

## Modelación de la circulación invernal y la retención de partículas en el sistema lagunar Bahía Magdalena-Almejas (Baja California Sur, México)

### Modeling winter circulation and particle retention in the Magdalena-Almejas Bay lagoon system (Baja California Sur, Mexico)

MV Morales-Zárate<sup>1</sup>, AL Aretxabaleta<sup>2</sup>, FE Werner<sup>2</sup>, SE Lluch-Cota<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C., Apartado postal 128, La Paz, CP 23000, Baja California Sur, México.

\* E-mail: [slluch@cibnor.mx](mailto:slluch@cibnor.mx)

<sup>2</sup> Department of Marine Sciences, University of North Carolina, Chapel Hill, North Carolina, 27599-3300, USA.

#### Resumen

Se describe la circulación y el transporte pasivo de partículas en las inmediaciones del sistema lagunar Bahía Magdalena-Almejas mediante un modelo lineal de circulación en el dominio de la frecuencia con el que se obtuvieron los campos básicos de flujo. El modelo está forzado por mareas, marea residual, viento medio, viento periódico para simular el efecto de la brisa marina y una simulación aproximada del efecto de la Corriente de California. Se realizaron dos experimentos principales, uno enfocado a detectar zonas de retención en el interior del sistema lagunar, y el segundo para observar el intercambio de partículas entre el sistema y el océano abierto adyacente. Se encontró que las partículas sembradas en el sistema tienden a quedarse dentro y concentrarse en regiones particulares que se correspondieron con la distribución real de bancos pesqueros de recursos bentónicos y, en segundo término, que durante condiciones poco comunes de viento se pueden presentar intrusiones importantes de partículas de la plataforma continental al interior del sistema lagunar. Los resultados son de importancia para el estudio de la zona en general, y particularmente para la modelación y desarrollo de pronósticos de procesos de deriva larval de recursos pesqueros importantes.

*Palabras clave:* modelación, deriva larval, Bahía Magdalena, retención de partículas.

#### Abstract

We describe circulation and passive particle transport in the Magdalena-Almejas Bay lagoon system through a linear circulation model in the frequency domain to obtain basic flux fields. The model is forced by tides, residual tides, mean wind speed, periodic winds (to simulate sea breeze), and an approximation of advection in the California Current. Two main experiments were performed: one to detect retention zones within the lagoon system and another to evaluate particle exchange between the lagoon system and the open ocean. We found that particles seeded within the system tend to remain inside and concentrate in restricted areas that correspond to the real distribution of benthic fish and that, under rare wind conditions, masses of particles seeded on the continental shelf could enter the lagoon system. The results are relevant for the general study of the system and for modeling and developing forecasts of the larval drift of important fish resources.

*Key words:* modeling, larval drift, Magdalena Bay, particle retention.

#### Introducción

Uno de los mayores retos de la modelación ecológica costera es la descripción de la relación que guardan la circulación y la deriva larval de diferentes recursos, dada la necesidad que existe de hacer pronósticos de dispersión larval, éxito de desove y reclutamiento. Una forma de atacar este tema es acoplar a modelos de circulación lagrangiana, información clave de los estadios tempranos de vida de las especies e identificar los procesos oceanográficos de mayor influencia en las escalas de tiempo relacionadas a la dinámica poblacional. Ejemplos de esto son la evaluación de probabilidades de asentamiento al finalizar el periodo larval de ciertas especies, la coincidencia de áreas de concentración de alimento (fitoplancton) con la retención de organismos en un hábitat apropiado durante el

#### Introduction

One of the greatest challenges of coastal ecological modeling is to describe the relationship between circulation and larval drift in order to be able to determine larval dispersion, spawning success and recruitment of several resources. One way of attacking this subject is to construct Lagrangian circulation models using key information of the early life stages of the species and identify the most influential oceanographic processes in the time scales related to the population dynamics. Examples of this are the assessment of settling probabilities at the end of the larval period of some species, coincidence of areas of food concentration (phytoplankton) with organism retention in a suitable habitat during the critical larval period (just after consumption of the food reserve), and the potential

periodo crítico larval (justo después del consumo de la reserva alimenticia) y la conectividad potencial entre poblaciones, especialmente de especies sésiles o de locomoción limitada (Mumby *et al.* 1996, Metaxas 2001, Hart y Chute 2004).

En el caso del sistema lagunar Bahía Magdalena-Almejas (BMA) (fig. 1) se han desarrollado numerosas investigaciones en las áreas de la biología pesquera y ecología (Acosta-Ruiz y Lara-Lara 1978, Castro-Ortiz 1985, Dedina y Young 1985, Arellano-Martínez *et al.* 1997, Hernández-Trujillo *et al.* 1997, Lluch-Belda *et al.* 2000, Gárate-Lizárraga *et al.* 2001); sin embargo, hasta la fecha no se cuenta con modelos publicados que provean la información cuantitativa necesaria para experimentos de deriva y el desarrollo de pronósticos.

En el presente estudio se utilizó el modelo hidrodinámico Fundy (Lynch y Werner 1987) para explorar la contribución relativa de forzantes en la circulación local, con énfasis en el intercambio entre el sistema lagunar y el mar abierto y la distribución de zonas de retención dentro del sistema.

El modelo Fundy ha sido empleado exitosamente en otras áreas costeras. Tal es el caso de la simulación de los campos de corriente en la costa oeste de Groenlandia (Hvid-Ribergaard *et al.* 2004) utilizando tanto el modelo diagnóstico Fundy, forzado con campos de salinidad y temperatura medidos en campo, como el modelo de pronóstico Quoddy forzado con mareas y viento. Los autores encontraron coherencia entre las simulaciones y estudios previos observacionales, tanto en el flujo principal como en la mayoría de los giros. Brown *et al.* (2000, 2004) realizaron experimentos de transporte de larvas utilizando los campos de corriente generados con Quoddy para la costa central de Texas. Ellos validaron el modelo comparando con velocidades registradas *in situ*, y encontraron que el modelo explicó cerca de 40% de la varianza observada ( $r = 0.65$ ,  $N = 688$ ). Stegmann *et al.* (1999) y Werner *et al.* (1999) utilizaron los campos de corriente generados con Quoddy para simular deriva de larvas de clupeidos, e identificaron regiones potenciales de desove en la costa y sistemas estuarinos de Carolina del Norte. Sus resultados tuvieron gran concordancia con las observaciones en el campo disponibles en las bases de datos de MARMAP (Marine Resources Monitoring Assessment and Prediction) y SABRE (South Atlantic Bight Recruitment Experiment). Asimismo, el modelo Fundy ha sido utilizado en diferentes estudios en el Bajo Georges y los resultados validados con observaciones en campo (Lynch y Werner 1987, 1991; Lynch y Naimie 1993; Werner *et al.* 1993; Lough *et al.* 1994; Tremblay *et al.* 1994; Lough y Mountain 1996; Werner *et al.* 1996, 2001).

## Métodos

### El modelo

Se utilizó el modelo Fundy 6.5.1 (Lynch y Werner 1987, Lynch *et al.* 1992, Greenberg *et al.* 1998) con coordenadas esféricas para obtener las soluciones de elevación y corriente forzadas por condiciones de frontera. El modelo Fundy es un

connectivity among populations, especially of sessile or limited-mobility species (Mumby *et al.* 1996, Metaxas 2001, Hart and Chute 2004).

In the case of the Magdalena-Almejas Bay (MAB) lagoon system (fig. 1), considerable research has been conducted in the areas of fish biology and ecology (Acosta-Ruiz and Lara-Lara 1978, Castro-Ortiz 1985, Dedina and Young 1985, Arellano-Martínez *et al.* 1997, Hernández-Trujillo *et al.* 1997, Lluch-Belda *et al.* 2000, Gárate-Lizárraga *et al.* 2001); however, to date models are lacking that provide the quantitative information necessary to develop drift experiments and predictions.

In this study we used the Fundy hydrodynamic model (Lynch and Werner 1987) to explore the relative contribution of forcings to the local circulation, with emphasis on the exchange between the lagoon system and the open sea and the distribution of retention areas within the system.

The Fundy model has been successfully used in other coastal areas. For example, in the simulation of current fields on the West Greenland Shelf (Hvid-Ribergaard *et al.* 2004), both the Fundy diagnostic model, forced by field-measured salinity and temperature fields, and the Quoddy prediction model, forced by tides and wind, were applied. The authors found consistency between the simulations and previous observational studies relative to the main flow as well as most of the gyres. Brown *et al.* (2000, 2004) performed larval transport experiments using current fields generated by Quoddy for the central coast of Texas. They validated the model by comparing against speeds recorded *in situ* and found that the model explained nearly 40% of the variance observed ( $r = 0.65$ ,  $N = 688$ ). Stegmann *et al.* (1999) and Werner *et al.* (1999) used current fields generated by Quoddy to simulate the transport of clupeid larvae and identified potential spawning areas along the coast and estuarine systems of North Carolina. Their results showed very good agreement with the field observations available in the MARMAP (Marine Resources Monitoring Assessment and Prediction) and SABRE (South Atlantic Bight Recruitment Experiment) databases. The Fundy model was also used in several studies on Georges Bank and the results validated by field observations (Lynch and Werner 1987, 1991; Lynch and Naimie 1993; Werner *et al.* 1993; Lough *et al.* 1994; Tremblay *et al.* 1994; Lough and Mountain 1996; Werner *et al.* 1996, 2001).

## Methods

### The model

The Fundy 6.5.1 model (Lynch and Werner 1987, Lynch *et al.* 1992, Greenberg *et al.* 1998) in spherical coordinates was used to obtain the elevation and current solutions forced by boundary conditions. Fundy is a three-dimensional diagnostic model for baroclinic circulation, especially developed for coastal areas. The numerical method employs linear harmonic equations in the frequency domain, with forcing by tides,

modelo diagnóstico baroclínico de circulación en tres dimensiones, especialmente desarrollado para zonas costeras. El método numérico emplea ecuaciones armónicas linealizadas en el dominio de la frecuencia, con forzamiento de mareas, condiciones barotrópicas de frontera, y/o viento, utilizando elementos finitos linealizados.

La viscosidad vertical (mezcla) en el modelo Fundy se especifica de manera externa (Lynch y Werner 1987, Blanton *et al.* 2003). En este caso utilizamos el valor de viscosidad derivado del modelo de pronóstico, no lineal, tridimensional y dependiente del tiempo, Quoddy (Lynch y Werner 1991, Lynch *et al.* 1996, Blanton *et al.* 2003), el cual utiliza un esquema de Mellor-Yamada de la parametrización de turbulencia con rango de 2.5 (Mellor y Yamada 1982). Se forzó con la componente  $M_2$  en los bordes correspondientes a la parte oceánica de la malla, especificando como datos iniciales el coeficiente de mezcla vertical ( $N_z$ ) =  $5 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  y el coeficiente de fricción de fondo proporcional de la velocidad de fondo ( $U_b$ ) =  $10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ . El modelo se corrió por 20 periodos de marea para la componente  $M_2$ , y se generaron valores promedio de  $N_z$  y  $U_b$ .

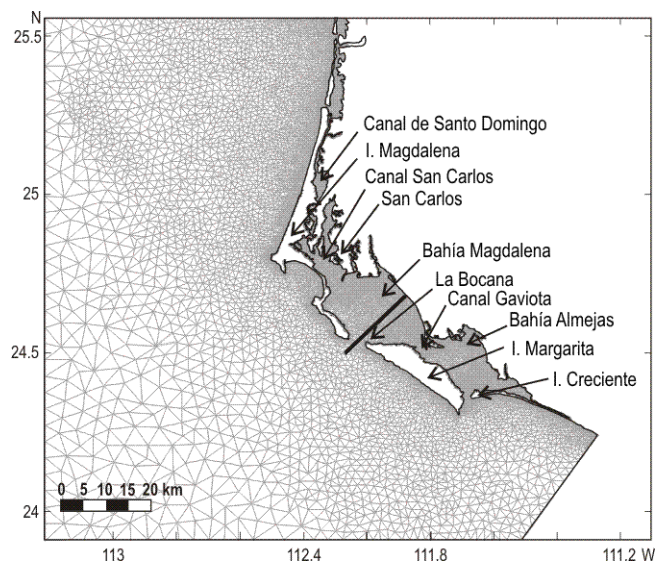
Se utilizó una malla de elementos triangulares finitos con resolución horizontal variable, que va de  $\sim 1 \text{ km}$  sobre la parte de la plataforma continental a  $<0.5 \text{ km}$  dentro del sistema lagunar (fig.1).

#### Forzamiento por mareas

Las únicas observaciones de mareas existentes para la zona son los constituyentes armónicos del mareógrafo que operó en Puerto San Carlos ( $24^{\circ}47' \text{ N}$ ,  $112^{\circ}07' \text{ W}$ ), disponibles en el Centro de Investigación Científica y Estudios Superiores de Ensenada (CICESE: <http://www.cicese.mx>). Considerando la insuficiencia de la información existente, se decidió utilizar el resultado de modelos globales de mareas como condiciones de frontera para forzar el modelo. La solución utilizada fue la del modelo TPXO.6 desarrollado por Egbert *et al.* (1994) y modificado por Egbert y Erofeeva (2002). El TPXO.6 es un modelo inverso de mareas que asimila la información de nivel del mar derivada de las observaciones del sensor TOPEX/Poseidon. La elevación (amplitud y fase) fue especificada a lo largo de las fronteras abiertas de nuestra malla. Se incluyeron las componentes armónicas  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $N_2$ ,  $K_1$  y  $O_1$ . El análisis armónico del nivel del mar se obtuvo utilizando la técnica desarrollada por Foreman (1977) implementada en el código de MatLab *t\_tide* (Pawlowicz *et al.* 2002). La marea residual ( $Z_0$ ) se obtuvo por separado con una simulación no lineal utilizando el modelo Quoddy forzada únicamente con la componente  $M_2$ .

#### Forzamiento por viento

Por falta de información más puntual se utilizaron los valores de viento de NCEP/NCAR Reanalysis Project (<http://www.cdc.noaa.gov/>), que utiliza un sistema avanzado de análisis y pronóstico para la asimilación de datos sobre la base de



**Figura 1.** Zona de estudio y malla utilizada para el modelo. La malla tiene 16,133 nodos y 27,090 elementos. Se muestra el transecto perpendicular a la costa de referencia.

**Figure 1.** Study area and model domain. The mesh contains 16,133 nodes and 27,090 elements. The reference cross-shelf transect (thick line) is shown.

barotropic boundary conditions and/or wind, using linear finite elements.

In the Fundy model, vertical viscosity (mixing) is specified externally (Lynch and Werner 1987, Blanton *et al.* 2003). In this case we used the viscosity value derived from the non-linear, three-dimensional, time-dependent Quoddy prediction model (Lynch and Werner 1991, Lynch *et al.* 1996, Blanton *et al.* 2003), which uses a Mellor-Yamada 2.5-level turbulence parameterization scheme (Mellor and Yamada 1982). It was forced by the  $M_2$  component at the boundaries corresponding to the oceanic part of the mesh, specifying as initial data the vertical mixing coefficient ( $N_z$ ) =  $5 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  and the bottom friction coefficient proportional to the bottom velocity ( $U_b$ ) =  $10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ . The model was run for 20 tidal cycles for component  $M_2$ , and mean  $N_z$  and  $U_b$  values were generated.

A triangular finite element mesh was used with variable horizontal resolution, ranging from  $\sim 1 \text{ km}$  over the continental shelf to  $<0.5 \text{ km}$  within the lagoon system (fig.1).

#### Tidal forcing

The only tidal observations available for the region are the harmonic constituents of the tide gauge at Puerto San Carlos ( $24^{\circ}47' \text{ N}$ ,  $112^{\circ}07' \text{ W}$ ), obtainable from the Ensenada Center for Scientific Research and Higher Education (CICESE: <http://www.cicese.mx>). In view of the scant information available, we decided to use the results of global tidal models as boundary conditions to force our model, and employed the solution of the TPXO.6 model developed by Egbert *et al.* (1994) and modified by Egbert and Erofeeva (2002). This inverse tide model assimilates the sea-level data derived from observations

observaciones desde 1948. Los datos tienen una resolución espacial de  $1.875^\circ$  (Betts *et al.* 1996, Kalnay *et al.* 1996), por lo que se utilizó el valor medio de los dos puntos más cercanos al dominio de nuestro modelo. En la región el viento es predominantemente del NO, con una intensidad máxima de  $5 \text{ m s}^{-1}$  (Maeda-Martínez *et al.* 1993, Sánchez-Montante 2004), y una de sus características principales en esta zona es la presencia de un ciclo diurno relacionado con la brisa marina que es evidente en los poderes espectrales estimados para ambas componentes del viento (fig. 2). El efecto de la brisa marina está presente todo el año debido a la persistencia del gradiente térmico entre la tierra y el océano en estas latitudes. Dado lo anterior, el efecto del viento se separó en dos componentes, el viento medio (dominante) mensual usado como forzamiento básico y el viento periódico simple estimado para incluir el efecto de la brisa marina utilizando un método similar al empleado por Werner *et al.* (1993) en estudios previos en las Islas Baleares.

### Aproximación de la Corriente de California

Se simuló el flujo principal de la Corriente de California especificando la elevación barotrópica media en los bordes de la malla, de manera similar a como lo hicieron Lynch *et al.* (1992) al estudiar la circulación en el Golfo de Maine en respuesta al forzamiento de la Corriente de Labrador y flujos asociados. Se supuso que la corriente está en balance barotrópico y se especificó el gradiente de elevación que corresponde a un transporte de  $0.1 \text{ Sv}$  sobre la plataforma continental. La disponibilidad limitada de observaciones hidrográficas en la región condiciona la validación de esta aproximación.

### Validación del modelo Fundy

Además de los armónicos obtenidos para las componentes de marea, se realizó una comparación de las velocidades de flujo y reflujo registradas en el campo y reportados por Sánchez-Montante (2004) con las velocidades simuladas por el modelo para los mismos puntos. Se empleó un solo valor de simulación para la comparación (promedio de flujo y reflujo

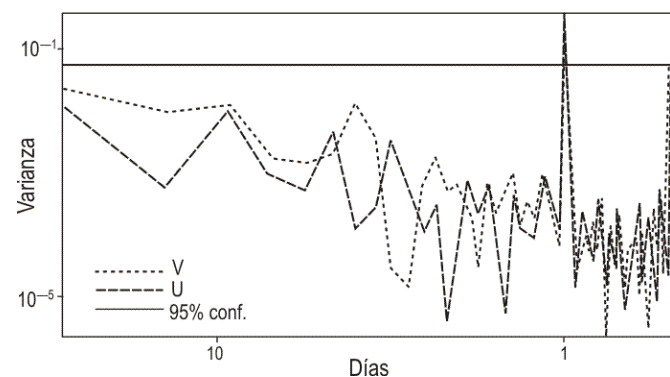


Figura 2. Análisis espectral de las componentes de viento U y V.  
Figure 2. Power spectral analysis for U and V wind components.

by the TOPEX/Poseidon sensor. The elevation (amplitude and phase) was specified along the mesh's open boundaries. The harmonic components  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $N_2$ ,  $K_1$  and  $O_1$  were used. The harmonic analysis of sea level was performed following the technique developed by Foreman (1977), implemented in Matlab using *t\_tide* (Pawlowicz *et al.* 2002). Residual tide ( $Z_0$ ) was obtained separately by non-linear simulation using Quoddy and forced only by the  $M_2$  component.

### Wind forcing

Owing to the lack of more exact information, we used wind data from the NCEP/NCAR Reanalysis Project (<http://www.cdc.noaa.gov/>), which employs an advanced analysis and forecast system to perform data assimilation based on observations since 1948. The measurements have a spatial resolution of  $1.875^\circ$  (Betts *et al.* 1996, Kalnay *et al.* 1996), so the mean value of the two points closest to our model's domain was used. In the region, northwesterly winds predominate and have a maximum intensity of  $5 \text{ m s}^{-1}$  (Maeda-Martínez *et al.* 1993, Sánchez-Montante 2004). The wind pattern is characterized by a sea-breeze-related diurnal cycle that is evident in the power spectra estimated for both wind components (fig. 2). The effect of sea breeze is present throughout the year because of the persistence of the thermal gradient between land and ocean at these latitudes. The wind effect was therefore separated into two components: mean (dominant) monthly wind, used as basic forcing, and simple periodic wind, estimated to include the effect of sea breeze using a method similar to that applied by Werner *et al.* (1993) in previous studies on the Balearic Islands.

### California Current approximation

The main flow of the California Current was simulated by specifying the mean barotropic height on the mesh boundaries, in a similar way as that done by Lynch *et al.* (1992) to study the circulation in the Gulf of Maine in response to forcing by the Labrador Current and associated fluxes. We assumed that the current is in barotropic equilibrium and specified the elevation gradient corresponding to a transport of  $0.1 \text{ Sv}$  over the continental shelf. The limited availability of hydrographic observations for the region conditions the validity of this approximation.

### Validation of the Fundy model

In addition to the harmonics obtained for the tide components, a comparison was made between field-recorded flux and reflux velocities (Sánchez-Montante 2004) and the velocities simulated by the model for the same points. A single simulation value was used for the comparison (mean flux and reflux value for each point) because Fundy works in the frequency domain and does not distinguish between flux and reflux, because the variation in the ellipses does not recover due to the

para cada punto), dado que el modelo Fundy trabaja en el dominio de frecuencias y no distingue entre flujo y refluo, que la variación en las elipses no se recupera dada la limitación lineal del modelo, y porque las observaciones en el campo cubrieron un periodo muy corto (cuatro días).

### Deriva de partículas

La trayectoria de las partículas se obtuvo utilizando el modelo Drog3D, que permite la simulación de deriva de partículas a partir de campos armónicos de velocidad impuestos en una malla tridimensional de elementos finitos (Blanton 1995). Esta herramienta tiene la ventaja de permitir la simulación de múltiples pasos, cada uno con múltiples frecuencias en una sola corrida. Así por ejemplo, si los campos de flujo derivados del viento están dados como variaciones mensuales, el modelo Drog3D leerá esos archivos y simulará las trayectorias de las partículas usando la secuencia de los campos de flujo especificados por el usuario en un solo archivo tipo \*.din, y cada grupo de componentes de velocidad y parámetros de tiempo llamados "pasos" se correrá de manera secuencial. El archivo \*.din contiene la información de todos los componentes de velocidad y parámetros de trayectoria, factores escalares, nodos, error de criterio, y las coordenadas iniciales de las partículas. Este modelo se corrió utilizando los campos armónicos generados con el modelo Fundy.

### Selección de forzantes

Con la finalidad de explorar los mecanismos que mayormente influyen en la dispersión de las partículas y generar los campos armónicos correspondientes en el modelo Fundy, se probó el efecto individual de cada uno de los agentes forzantes utilizados en el modelo hidrodinámico (viento medio noroeste, viento periódico, ABCC, marea ( $M_2$ ) y marea residual ( $Z_0$ )), y la suma de todos los anteriores. Para ello se eligieron dos cuadrantes, uno en la boca de Bahía Magdalena (112.057° W, 24.505° N; 112.008° W, 24.545° N) y otro más situado sobre la plataforma continental (112.3° W, 25.13° N; 112.5° W, 24.92° N). En estos cuadrantes se sembraron 100 partículas a una profundidad de 5 m y se corrieron las simulaciones por 25 días.

### Zonas de retención

Para evaluar las zonas de retención dentro del sistema lagunar se sembraron diez mil partículas a una sola profundidad (1m), en un cuadrante que cubrió 100% del sistema BMA. Se registró la ubicación diaria de las partículas (graficadas en pasos de tiempo de cuatro días). Posteriormente el interior del sistema lagunar se dividió en una cuadrícula de 0.01° y se integró el número de partículas que permaneció dentro de cada cuadrante en cada paso de tiempo. Con la información obtenida se generaron los mapas de retención en la zona.

linear limitation of the model and because the field observations covered a very short period of time (four days).

### Particle drift

The trajectory of particles was obtained using the Drog3D model, which allows simulating particle drift with given harmonic velocity fields on a three-dimensional finite element mesh (Blanton 1995). This tool has the advantage of allowing the simulation of multiple steps, each one with multiple frequencies in one single run. For example, if the wind-derived flow fields are given as monthly variations, Drog3D will read those files and will simulate the trajectories of the particles using the sequence of the flow fields specified by the user in a single \*.din file, and each group of velocity components and time parameters called "steps" will run sequentially. The \*.din file contains the information of all the velocity components and trajectory parameters, scalar factors, nodes, criterion error and the initial coordinates of the particles. This model was run using the harmonic fields generated by the Fundy model.

### Selection of forcings

To explore the major mechanisms involved in particle dispersion and generate the corresponding harmonic fields in Fundy, we assessed the individual effect of each one of the forcing agents used in the hydrodynamic model (mean northwesterly wind, periodic wind, California Current barotropic approximation, tide ( $M_2$ ) and residual tide ( $Z_0$ )) and the sum of all the above. For this, two quadrants were chosen: one at La Bocana, at the mouth of Magdalena Bay (112.057°W, 24.505°N; 112.008°W, 24.545°N), and another situated over the continental shelf (112.3°W, 25.13°N; 112.5°W, 24.92°N). In these quadrants, 100 particles were seeded at 5 m depth and the simulations were run for 25 days.

### Retention areas

To determine the retention areas within the lagoon system, 10,000 particles were seeded at the same depth (1m) in a quadrant that covered 100% of MAB. The daily location of the particles was recorded (plotted in four-day time steps). The inner part of the lagoon system was then divided into a 0.01°-grid and the number of particles that remained within each grid at each time step was integrated. Retention maps were generated with the information obtained.

### Import of particles to the lagoon system

To evaluate whether particles seeded in the oceanic part entered and remained in the lagoon system, drift experiments were run for 25-day periods. The sum of all the forcings was considered for these simulations. Three wind scenarios were applied: weak wind (1.8 m s<sup>-1</sup>), medium wind (3 m s<sup>-1</sup>) and strong wind (5 m s<sup>-1</sup>). The rest of the forcing agents were kept

### Importación de partículas al sistema lagunar BMA

Para evaluar la posibilidad de que partículas sembradas en la parte oceánica llegaran a entrar y permanecer en el sistema lagunar, se corrieron experimentos de deriva por periodos de 25 días. Para estas simulaciones se consideró la suma de todas las forzantes, y se manejaron tres escenarios de viento, medio ( $3 \text{ m s}^{-1}$ ), débil ( $1.8 \text{ m s}^{-1}$ ) y fuerte ( $5 \text{ m s}^{-1}$ ), mientras que el resto de las forzantes se mantuvieron constantes. Se sembró un total de 54 cuadrantes de  $0.125 \text{ grados}^2$  sobre la plataforma continental siguiendo la isolínea de los 200 m de profundidad. En cada cuadrante se sembraron 600 partículas a seis diferentes profundidades (0.5, 5, 10, 15, 20 y 40 m) y se registró la posición final de cada una de ellas al concluir el periodo de simulación. A partir de estos resultados se seleccionó el cuadrante que presentó mayor intrusión de partículas sin estar pegado a la línea de costa, y se realizaron seis simulaciones más manteniendo constantes las forzantes utilizadas y fijando la intensidad del viento pero variando la dirección hacia el este (simulando un viento oeste) y hacia el sur (simulando un viento norte).

### Resultados

En la tabla 1 se muestran los valores de velocidad máxima y media (promedio de flujo y reflujo) observados en el campo y los obtenidos con el modelo así como la excursión máxima y media para los mismos puntos. Se observa que las diferencias menores se obtuvieron para La Bocana mientras que las máximas diferencias las encontramos en San Carlos.

constant. A total of 54 quadrants of  $0.125$  square degrees were seeded on the continental shelf following the 200-m-depth isoline. In each quadrant, 600 particles were seeded at six different depths (0.5, 5, 10, 15, 20 and 40 m) and the final position of each one of them was recorded at the end of the simulation period. Based on these results, the quadrant not bordering the coastline that showed most particle intrusion was selected and six more simulations were run, maintaining the forcings used constant and fixing the wind intensity but varying the direction towards the east (simulating a westerly wind) and towards the south (simulating a northerly wind).

### Results

Table 1 shows the maximum and mean (averaged flux and reflux) velocity values obtained in the field and generated by the model, as well as the maximum and mean excursion for the same points. Smaller differences were obtained for the site of La Bocana, while greater differences were observed for San Carlos.

The values obtained for each one of the tidal components using the Fundy model showed a good similarity with those recorded at the San Carlos station (table 2). Although the simulations (Fundy) overestimated the amplitude of the semi-diurnal components by 10–20%, the phase values were close enough (differences less than 5%). With respect to the non-linear simulations (Quoddy), the estimates for the semidiurnal components improved (1–1.5%) and maintained an accurate phase representation. Since one of the limiting factors is the

**Tabla 1.** Comparación de las velocidades máximas y medias de corriente observadas en campo y las simuladas con el modelo Fundy.  
**Table 1.** Comparison of the maximum and mean current velocities observed in the field and those simulated with the Fundy model.

		Velocidad máx. ( $\text{m s}^{-1}$ )	Velocidad media ( $\text{m s}^{-1}$ )	Excursión máx. ( $\text{m s}^{-1}$ )	Excursión media ( $\text{m s}^{-1}$ )
La Bocana	Observados	0.22	0.15	3.13	2.21
	Simulados	0.24	0.17	3.39	2.36
San Carlos	Observados	0.49	0.34	6.98	4.77
	Simulados	0.51	0.39	7.30	5.55
Canal Gaviota	Observados	0.34	0.19	4.7	2.71
	Simulados	0.29	0.21	4.14	3.02

**Tabla 2.** Comparación entre los valores de amplitud y fase de las componentes armónicas de marea observados en campo (en San Carlos) y los estimados con el modelo Fundy.

**Table 2.** Comparison of the amplitude and phase of the harmonic constituents of the tide observed in the field (at San Carlos) and those simulated with the Fundy model.

	$M_2$		$S_2$		$N_2$		$O_1$		$K_1$	
	Amp.	Fase	Amp.	Fase	Amp.	Fase	Amp.	Fase	Amp.	Fase
Observados	0.55	112	0.31	121	0.12	103	0.27	196	0.18	182
Simulados	0.63	115	0.36	123	0.15	99.1	0.28	195	0.18	180

Por su parte, los valores para cada una de las componentes de marea obtenidas con el modelo Fundy muestran buena similitud con los valores observados en la estación local de San Carlos (tabla 2). Aunque las simulaciones (Fundy) sobreestiman la amplitud de las componentes semidiurnas en un 10% a 20%, los valores de fase son bastante cercanos (diferencias menores al 5%). Por otra parte, las simulaciones no lineales (Quoddy) mejoraron las estimaciones para las componentes semidiurnas (1–1.5%) manteniendo una representación acertada de la fase. Dado que uno de los factores limitantes es la falta de información precisa de batimetría, el utilizar los valores de marea obtenidos con un modelo más complejo en el dominio del tiempo como el Quoddy no resulta significativo, por lo que para realizar la caracterización de la circulación en esta región se emplearon los resultados obtenidos con las simulaciones lineales del modelo Fundy (ver también Werner *et al.* 1999).

lack of completely accurate bathymetry, the use of tidal values obtained by a more complex time-domain model such as Quoddy is not significant. Therefore, the results obtained by Fundy linear simulations (see also Werner *et al.* 1999) were used to characterize the circulation in this region.

Henceforth we will only refer to the semidiurnal lunar  $M_2$  component, because it is the tidal component that explains the largest variability (more than 50%) and the one that mainly characterizes the type of tide in the study area, which is semidiurnal.

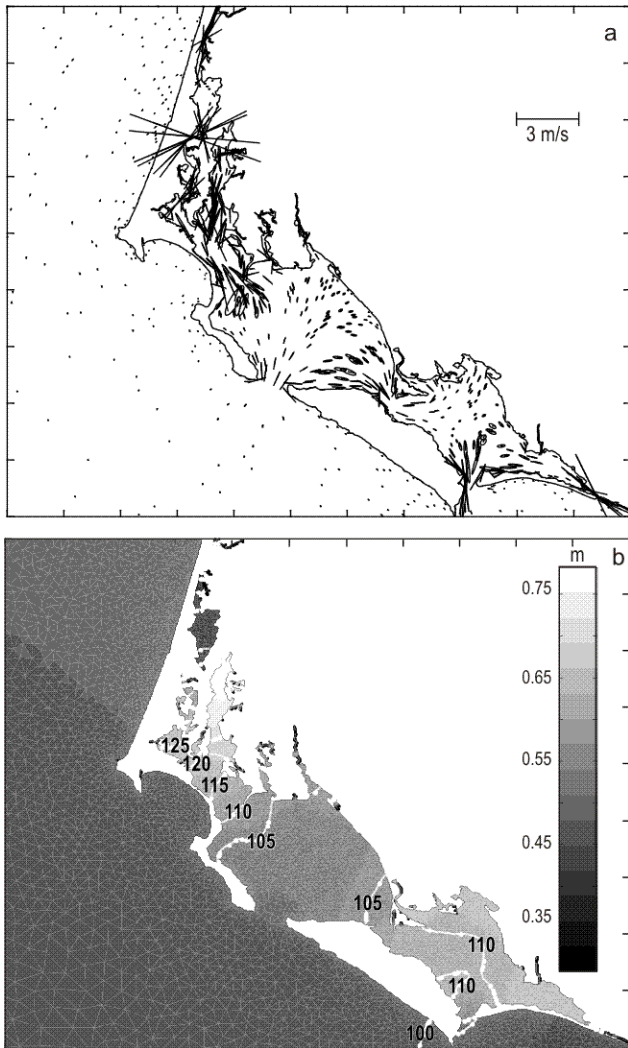
Orientation and intensity ellipses of the currents generated by the  $M_2$  component for a tidal cycle are shown in figure 3a. A marked reorientation and intensification with ellipsis elongation was observed close to water inlets (e.g., La Bocana). Figure 3b shows the amplitude and phase, revealing an important signal amplification inside the lagoon system, with maximum values in the vicinity of the old part of San Carlos.

The residual tidal velocity ( $Z_0$  of  $M_2$ ) showed complex characteristics within the lagoon system, with a marked intensification near water inlets. The flux in the shallow oceanic areas off Magdalena Bay showed a convergence into La Bocana, while a strong seaward jet towards the ocean was observed in the middle of the inlet. Two counter-rotating eddies were observed in the inner part of Magdalena Bay, next to La Bocana.

The solution of the model forced by mean northwesterly wind and the California Current barotropic approximation (CCBA) is shown in figure 4. In the surface layer (fig. 4a), the northwest wind produces an Ekman response with a flow towards the south-southeast, direction that overwhelms the signal of the California Current. The integrated vertical velocity (fig. 4b) shows the combination of the flow along the coastline caused by the mean wind and the barotropic response to the CCBA. The main feature in the elevation field is the north to south gradient within the lagoon system associated with the CCBA (fig. 4c). The minimum and maximum values in the elevation field occurred near San Carlos and in the southern part of Almejas Bay, respectively.

The local effect of sea breeze was dealt with by the simulation of periodic wind (fig. 5). The spatial distribution of the surface velocity ellipses obtained for this forcing is given in figure 5a, which shows reduced values inside the lagoon, especially in the shallowest and protected areas of Magdalena Bay and Almejas Bay. Maximum magnitudes (around  $0.1 \text{ m s}^{-1}$ ) occurred in open sea areas, while the effect of this same vertically integrated variable (fig. 5b) shows a major influence in the shallow areas of the MAB system, with a marked intensification in the area of channels, Gaviota Canal and the southern part of Almejas Bay.

In order to simulate water exchange between open sea waters and the inner part of the lagoon, a cross-shelf transect was designed (see fig. 1). The results are shown in figure 6, separating each forcing employed. Figure 6a shows the flows obtained by CCBA forcing; the along-shelf flow is shown in



**Figura 3.** Caracterización de la componente  $M_2$  de la marea. (a) Elipses de intensidad y orientación. (b) Amplitud (tonos de gris; escala en m) y fase (contornos blancos, en grados).

**Figure 3.** Characteristics of the  $M_2$  tidal constituent. (a) Intensity and orientation ellipses. (b) Amplitude (in meters, gray tones) and phase (in degrees, white contours).

A partir de aquí solamente se hará referencia a la componente semidiurna lunar  $M_2$ , por ser la componente de marea que explica más variabilidad (más del 50%) y ser la que caracteriza principalmente al tipo de marea de la región de estudio que es de régimen semidiurno.

Las elipses de orientación e intensidad de las corrientes generadas con la componente  $M_2$  para un ciclo de marea se presentan en la figura 3a, en la que se observa una marcada reorientación e intensificación en las áreas cercanas a las bocas (e.g. La Bocana), con una elongación de las elipses. En la figura 3b se presentan la amplitud y fase observándose una amplificación significativa de la señal al interior del sistema lagunar, con valores máximos en las inmediaciones de la parte vieja de San Carlos.

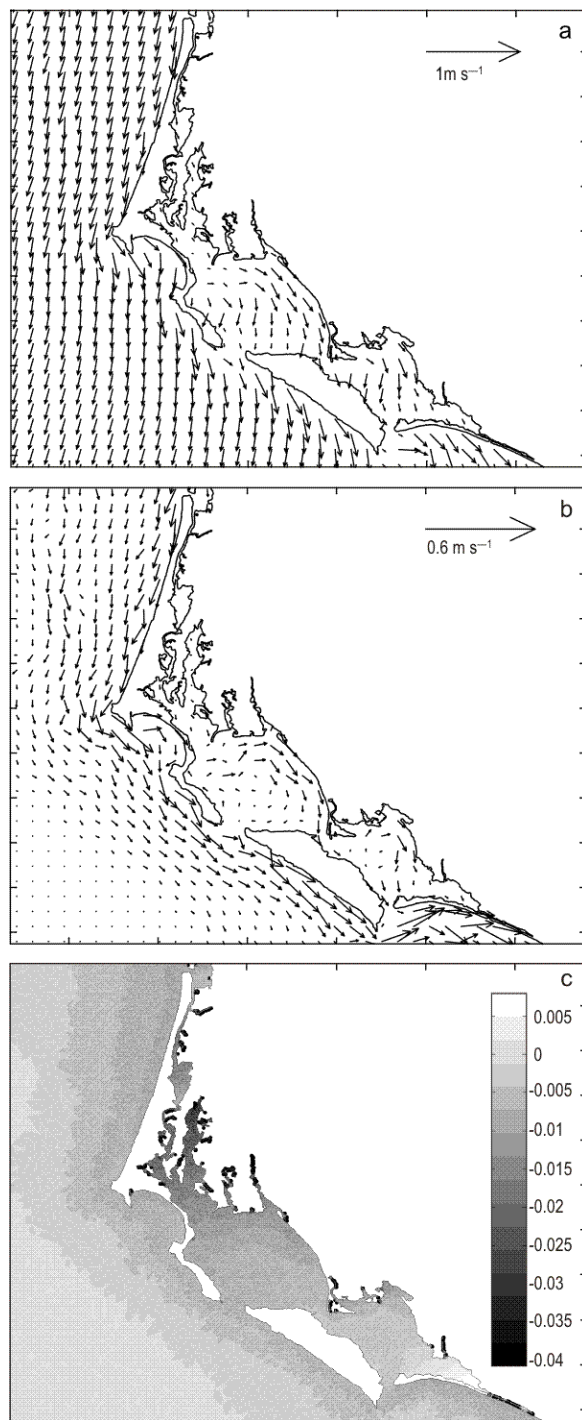
La velocidad de marea residual ( $Z_0$  de  $M_2$ ) presenta características complejas dentro del sistema lagunar con una marcada intensificación alrededor de las bocas. El flujo en las zonas oceánicas someras frente a Bahía Magdalena muestra una convergencia hacia dentro de La Bocana, mientras que un flujo con dirección hacia la parte oceánica se observa en el centro de la boca. En el interior de Bahía Magdalena junto a La Bocana se observan dos giros con direcciones opuestas.

La solución del modelo forzado con viento medio (noroeste) y la aproximación barotrópica de la Corriente de California (ABCC) se presentan en la figura 4. En la capa superficial (fig. 4a) el viento noroeste produce una respuesta tipo Ekman con flujo hacia el sur-sureste, que se superpone a la señal de la Corriente de California. La velocidad vertical integrada (fig. 4b) muestra la combinación del flujo a lo largo de la costa causado por el viento medio, y la respuesta barotrópica de la ABCC. La principal característica del campo de elevación es el gradiente de norte a sur dentro del sistema lagunar asociado con la ABCC (fig. 4c). Los valores mínimos y máximos en el campo de las elevaciones se aprecian cerca de San Carlos y en la parte sur de Bahía Almejas respectivamente.

El efecto local de la brisa marina se abordó con la simulación del viento periódico (fig. 5). En la figura 5a se muestra la distribución espacial de las elipses de velocidad en la superficie obtenidas para esta forzante, observándose valores reducidos en la parte interna de la laguna, especialmente en las zonas más someras y protegidas de Bahía Magdalena y Bahía Almejas, con magnitudes máximas (alrededor de  $0.1 \text{ m s}^{-1}$ ) en las áreas oceánicas, mientras que el efecto de esta misma variable integrada en la vertical (fig. 5b) muestra mayor influencia en las zonas someras del sistema BMA, con una marcada intensificación en la zona de canales, el Canal Gaviota y en la parte sur de Bahía Almejas.

Con la finalidad de simular el intercambio de masas de agua entre la zona oceánica y el interior de la laguna, se diseñó un perfil perpendicular a la línea de costa (ver fig. 1). Los resultados se muestran en la figura 6 por separado para cada forzante empleado.

En la figura 6a se muestran los flujos obtenidos por forzamiento de la ABCC, en gris se presenta el flujo a lo largo de la costa y en color rojo y azul los flujos perpendiculares a la línea

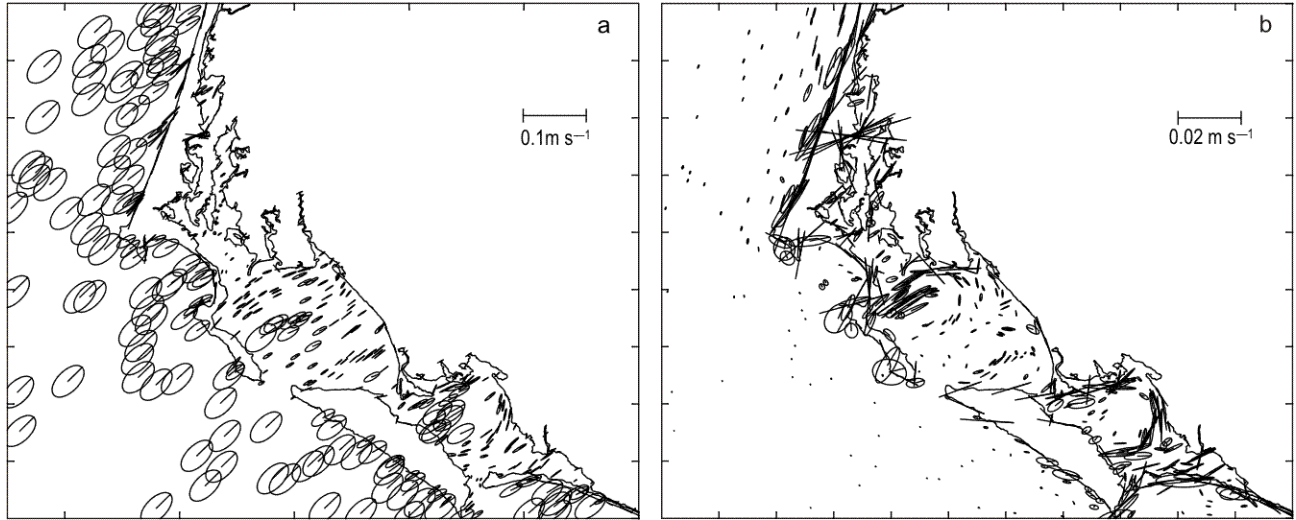


**Figura 4.** Patrones de circulación obtenidos con el modelo utilizando viento medio de febrero y la aproximación barotrópica de la Corriente de California (ABCC) como forzantes. (a) Velocidad en superficie, (b) velocidad media vertical, y (c) elevación (m).

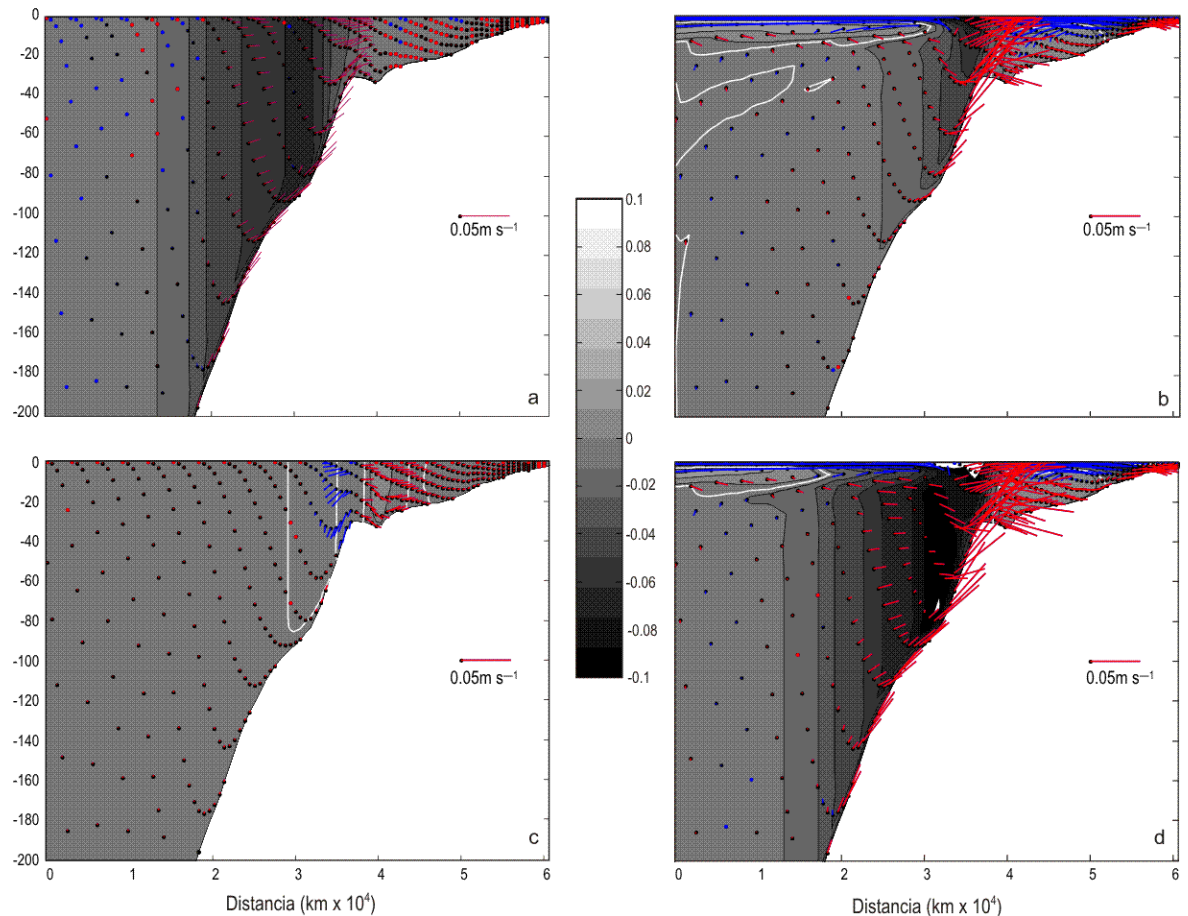
**Figure 4.** Results of the model simulation forced by February mean winds and the California Current barotropic approximation (CCBA). (a) Surface velocity, (b) depth-averaged velocity, and (c) elevation (m).

gray and the cross-shelf flows in color (red into and blue out of the bay). The strong along-shelf flow decreases in the vertical shear because of the barotropic nature of the forcing, which





**Figura 5.** Elipses de intensidad y orientación del viento periódico sobre el complejo BMA: (a) en superficie y (b) integrada en la vertical.  
**Figure 5.** Intensity and orientation ellipses of periodic wind: (a) surface and (b) depth-averaged.



**Figura 6.** Transporte a través de La Bocana. Comparación entre los diferentes forzantes no periódicos a lo largo del transecto perpendicular a la costa: (a) ABCC, (b) viento medio de febrero, (c) marea residual de  $M_2$  y (d) la combinación de todos. Los contornos grises representan el flujo hacia el sur a lo largo de la costa. Los contornos blancos corresponden a un flujo 0 a lo largo de la costa. El flujo perpendicular a la costa está representado por los vectores de color: rojo indica flujo hacia la costa y azul indica flujo hacia mar abierto.

**Figure 6.** Transport through La Bocana. Comparison of different non-periodic forcings along a cross-shelf transect: (a) California Current barotropic approximation (CCBA), (b) February mean wind, (c) residual tide of  $M_2$ , and (d) the sum of all of them. Gray contours indicate a southward along-shelf flow. White contours correspond to a zero along-shelf flow. The cross-shelf flow is represented by color vectors: red indicates an onshore flow (into Magdalena Bay) and blue an offshore flow (out of Magdalena Bay).

de costa, hacia adentro y hacia afuera de la bahía respectivamente. El flujo fuerte que se observa a lo largo de la costa disminuye verticalmente debido a que la naturaleza barotrópica del forzamiento no corresponde a la señal real baroclínica de la Corriente de California. A pesar de esta limitante, los flujos perpendiculares a la línea de costa, así como la presencia de surgencias de fondo, son consistentes con las observaciones reales en la zona (Álvarez-Borrego *et al.* 1975, Zaitsev *et al.* 2003, Sánchez-Montante 2004). En la figura 6b se muestra el flujo resultante usando los valores medios de viento durante febrero (favorables para la formación de surgencias en la región). Se reconoce la formación de surgencias cerca del fondo y se observa flujo hacia la costa en toda la columna de agua cerca de La Bocana y flujo hacia mar abierto en la superficie tanto en la parte oceánica como en el interior de Bahía Magdalena. La figura 6c presenta los flujos residuales, hacia la costa en el interior de Bahía Magdalena y hacia mar abierto en la parte oceánica cercana a La Bocana. El flujo total resultante de la combinación de todas las forzantes mencionadas se muestra en la figura 6d. Sus características principales son: (1) flujo hacia la costa en casi toda la columna de agua en los 15 km más cercanos a La Bocana en la parte oceánica; (2) presencia de surgencias cerca del fondo en la misma región; (3) un flujo a lo largo de la plataforma en la misma región; (4) un flujo hacia fuera de la costa en la superficie (5–10 m) en la parte oceánica excepto en la cercanía con La Bocana; (5) un flujo hacia la costa en toda la columna de agua entre los 5 y 10 km más cercanos a La Bocana dentro de Bahía Magdalena; y (6) un flujo hacia afuera de la costa (excepto cerca del fondo) desde la línea de costa hasta 5–10 km cerca de La Bocana. El máximo transporte hacia la costa ocurre cerca de La Bocana entre 20 y 40 m.

### Deriva de partículas

#### Selección de forzante

Los resultados mostraron que el viento medio y la ABCC son los factores que mayor influencia tienen en el desplazamiento de las partículas tanto para el cuadrante de la plataforma (fig. 7) como para el cuadrante situado en La Bocana (fig. 8). En el caso del cuadrante de la plataforma, la influencia de la marea ( $M_2$ ) y la marea residual ( $Z_0$  de  $M_2$ ) es mínima en comparación con las partículas puestas a derivar en La Bocana, donde las intensidades de corriente provocadas por marea son mucho mayores.

#### Zonas de retención

En la figura 9 se muestran los resultados de la caracterización de zonas de retención de partículas dentro del sistema según el modelo de deriva. Se muestran mapas de concentración de partículas en pasos de tiempo de cuatro días. Las zonas de mayor concentración incluyen las áreas someras a lo largo de la parte sur de Bahía Almejas, toda la parte somera a lo largo de Isla Margarita dentro del sistema lagunar y áreas

does not correspond to the real baroclinic signal from the California Current. In spite of this constraint, the cross-shelf flows and the presence of bottom upwelling are consistent with real observations in the area (Álvarez-Borrego *et al.* 1975, Zaitsev *et al.* 2003, Sánchez-Montante 2004). Figure 6b shows the resulting flow using February mean wind values (favoring upwelling in this region). The flow shows near-bottom upwelling, onshore flow in the entire water column near La Bocana, and offshore flow at the surface in the open sea and inner part of Magdalena Bay. Figure 6c shows residual flows towards the coastline in the inner part of Magdalena Bay and offshore flows in the open sea areas near La Bocana. The resulting total flow from the combination of all the mentioned forcings is shown in figure 6d. The main characteristics of the total flow include: (1) onshore flow in most of the water column in the 15 km closest to La Bocana in the open sea area; (2) near-bottom upwelling in the same region; (3) along-shelf flow in the same area; (4) surface offshore flow (5–10 m) in the oceanic part, except in the vicinity of La Bocana; (5) onshore flow in the entire water column between the closest 5 and 10 km to La Bocana within Magdalena Bay; and (6) offshore flow (except near the bottom) from the coastline to 5–10 km from La Bocana. The maximum onshore transport occurs near La Bocana between 20 and 40 m.

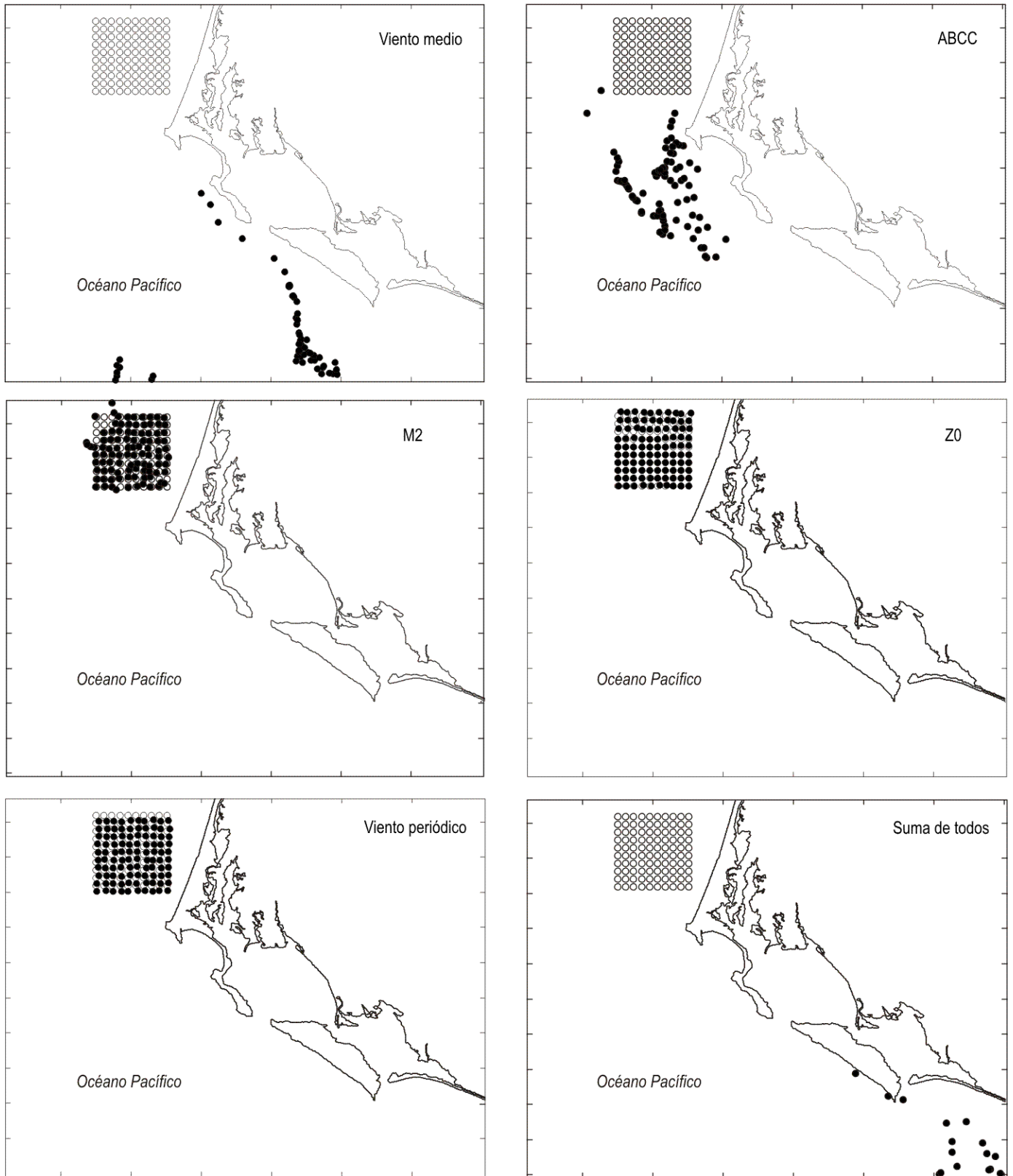
### Particle drift

#### Selection of forcings

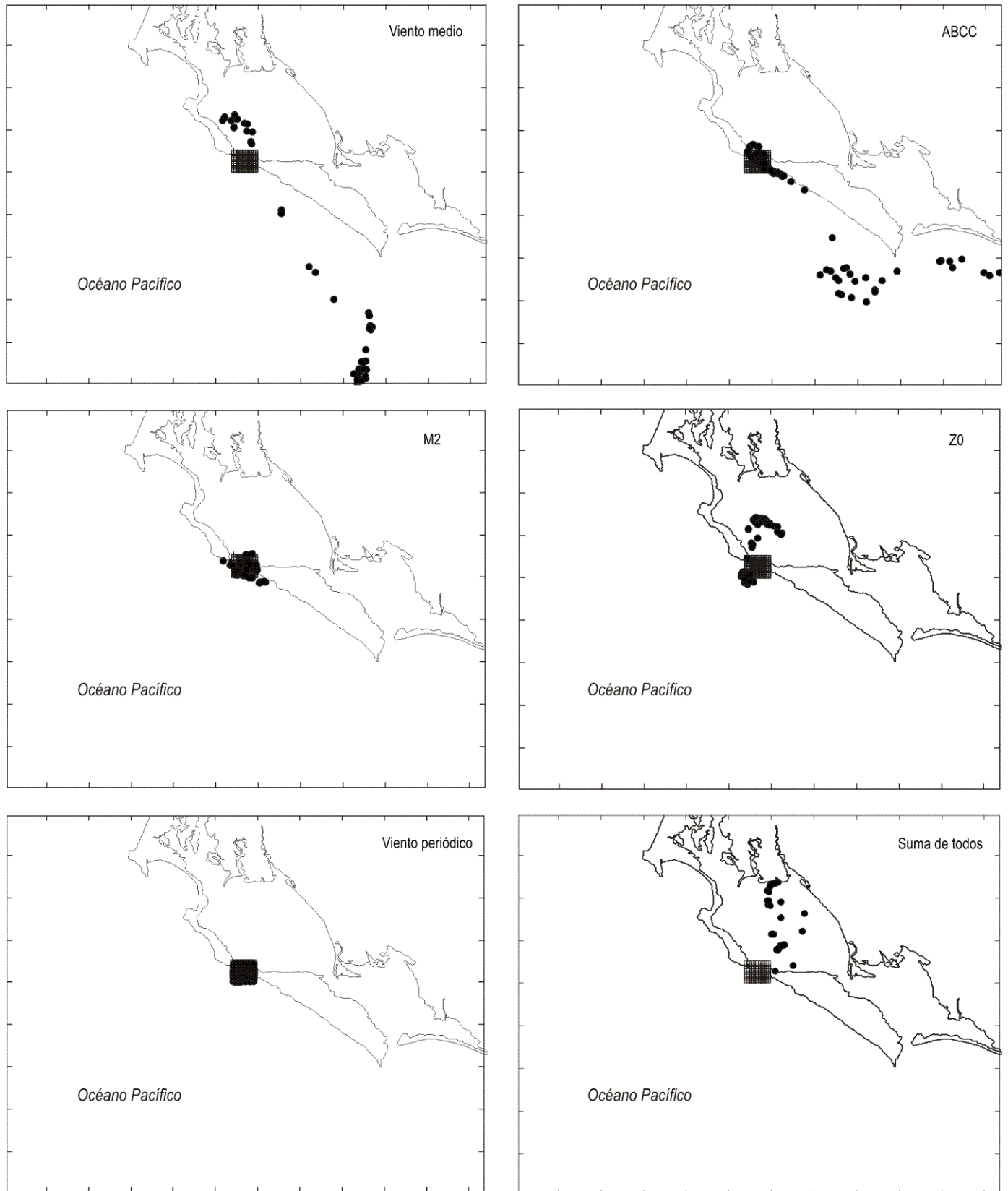
The results showed that mean wind and the CCBA were the factors that most influenced particle drift for both the continental shelf (fig. 7) and La Bocana (fig. 8) quadrants. The influence of the tide ( $M_2$ ) and residual tide ( $Z_0$  of  $M_2$ ) in the shelf quadrant was minimum compared with the particle drift in La Bocana, where current intensities caused by the tide are greater.

#### Retention areas

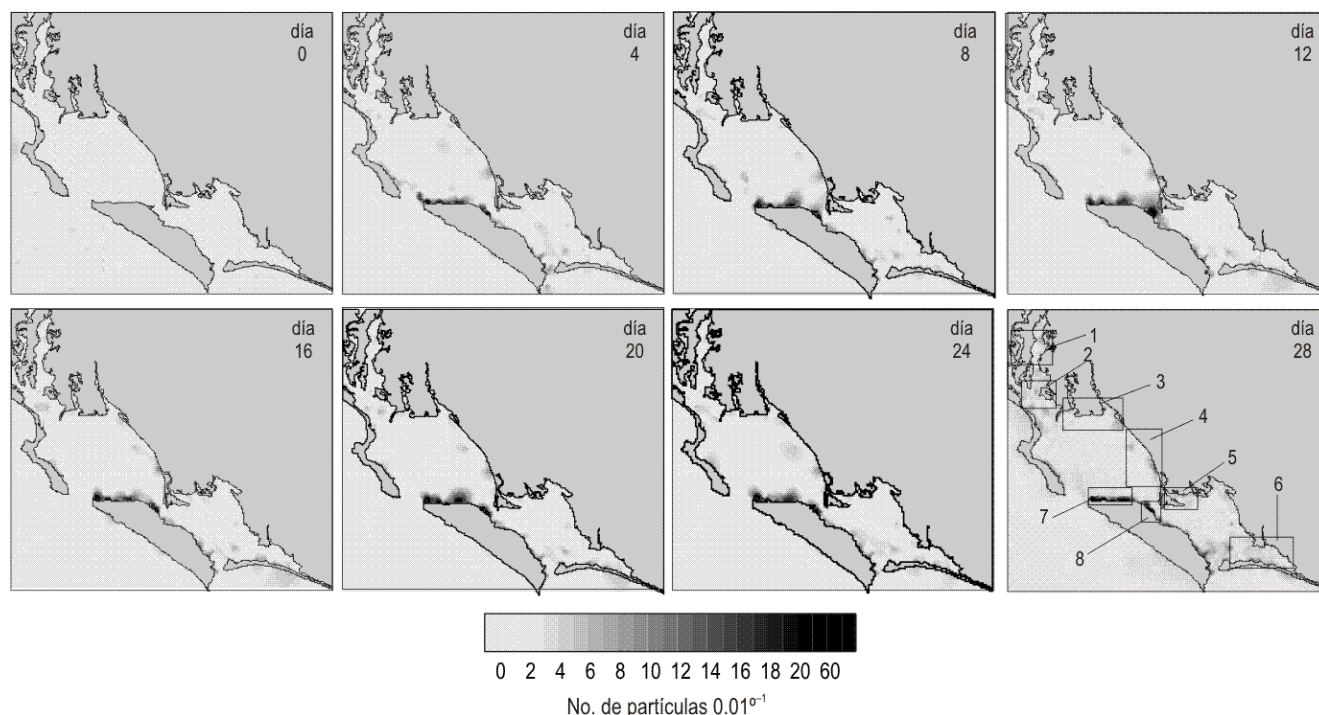
Figure 9 shows the results that characterize particle retention areas within the system according to the drift model. The accumulation of particles plotted in four-day time steps is shown in maps. The areas with greater accumulation include shallow areas in the southern part of Almejas Bay, the entire shallow coastal area around Margarita Island in the lagoon system, and specific areas in the northern part of the lagoon system. Accumulation was mostly patchy, especially in the northern areas. Maximum accumulation occurred to the north of Margarita Island associated with wind transport and the effect of the tidal residual flow. It is important to mention that the distribution of these patches of particle accumulation in the model correspond to the real distribution observed for different benthonic populations, especially catarina clam (*Argopecten ventricosus*) and lionspaw clam (*Nodipecten subnodosus*).



**Figura 7.** Comparación entre el desplazamiento de las partículas aplicando los diferentes forzantes, para un cuadrante en la plataforma continental del área de estudio. Los círculos marcan la posición inicial de las partículas y los puntos negros la posición final.  
**Figure 7.** Final location after a 25-day simulation of passive particles released over the continental shelf. Circles indicate the initial release position and black points the final position.



**Figura 8.** Comparación entre el desplazamiento de las partículas aplicando los diferentes forzantes, para un cuadrante en La Bocana. Los círculos marcan la posición inicial de las partículas y los puntos negros la posición final.  
**Figure 8.** Final location after a 25-day simulation of passive particles released at La Bocana. Circles indicate the initial release position and black points the final position.



**Figura 9.** Áreas de retención. Concentración (número) de partículas pasivas puestas a derivar en una distribución homogénea a 1 m de profundidad. Los mapas se presentan en intervalos de 4 días. Los cuadrantes señalan las zonas reconocidas como bancos pesqueros de recursos bentónicos. (1) La Florida-Vuelta del Diablo, (2) Los Barriles-La Libertad, (3) San Buto-El Médano Amarillo, (4) Loma Amarilla-Las Torres, (5) El Cuervo-El Muerto, (6) Puerto Cortés, y (7) El Blanquizcal.

**Figure 9.** Retention areas. Concentration (number) of passive particles released from a homogeneous distribution (1 m depth) at four-day time steps. The squares indicate areas known to be fishery banks of benthonic resources: (1) La Florida-Vuelta del Diablo, (2) Los Barriles-La Libertad, (3) San Buto-El Médano Amarillo, (4) Loma Amarilla-Las Torres, (5) El Cuervo-El Muerto, (6) Puerto Cortés, and (7) El Blanquizcal.

específicas en la parte norte del sistema. La acumulación se da en parches, especialmente en las áreas del norte. La concentración máxima se registró en la porción norte de Isla Margarita asociada con transporte generado por viento y el efecto del flujo de la marea residual. Cabe mencionar que la distribución de estos parches de concentración de partículas en el modelo se corresponden con la distribución real observada de diversas poblaciones bentónicas, particularmente de las almejas catarina (*Argopecten ventricosus*) y mano de león (*Nodipecten subnodosus*). Respecto al tiempo se observó que el mayor movimiento de partículas se presentó durante los primeros seis días, de tal manera que a partir del día siete las partículas permanecieron en el mismo sitio hasta el final del experimento.

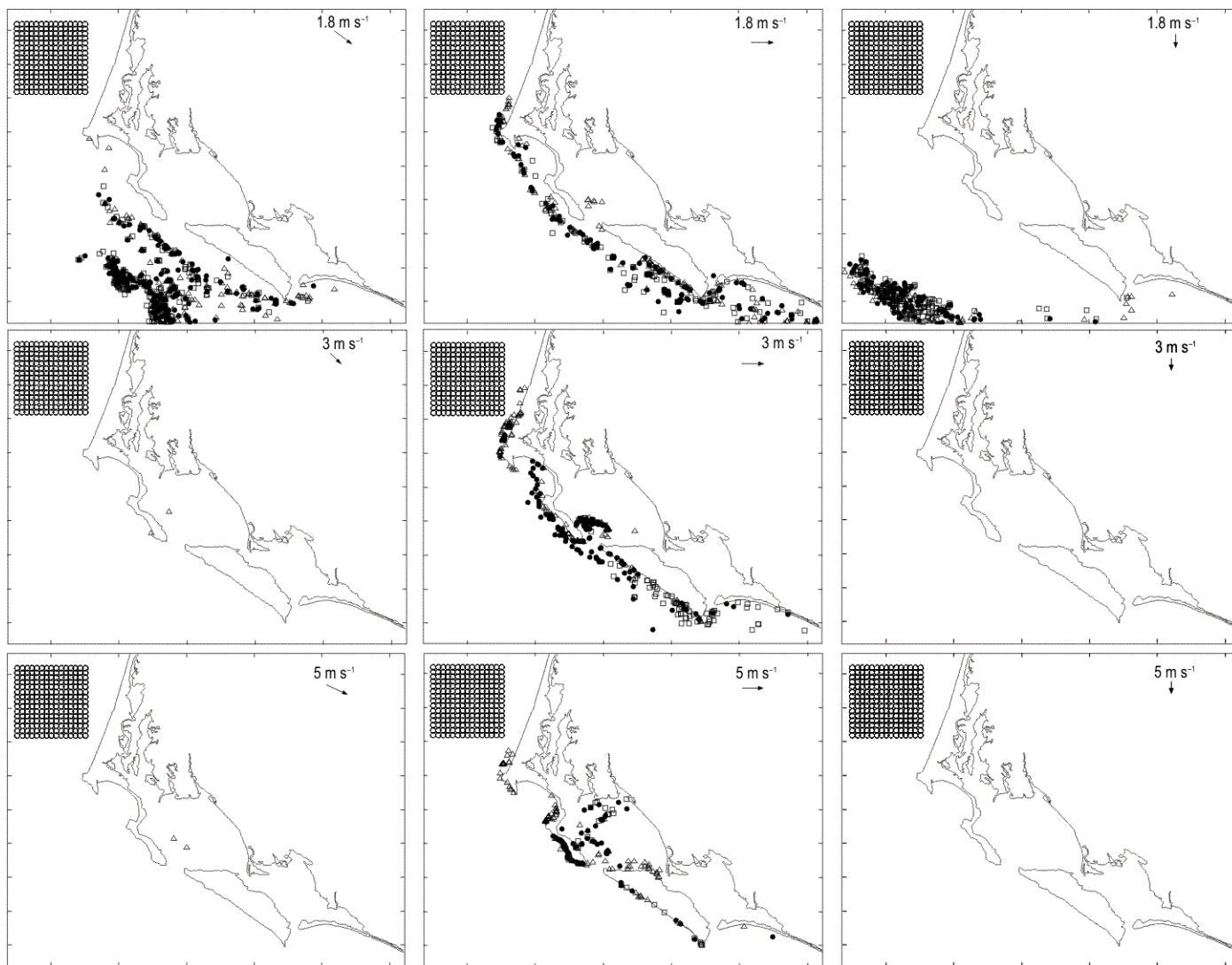
#### Importación de partículas al sistema lagunar BMA

En esta sección se hicieron experimentos para evaluar la posible importación de partículas desde la plataforma continental hacia el interior del sistema BMA con la finalidad de explorar su frecuencia e intensidad, en función de distintas condiciones de circulación, utilizando para ello los mismos forzantes ( $M_2$ ,  $Z_0$  de  $M_2$ , ABCC, viento periódico, y variando el viento medio entre tres intensidades: débil, medio y fuerte). Los resultados mostraron que, de los 54 cuadrantes sembrados, 19 (36%) presentaron al menos una partícula dentro del

With respect to time, a greater movement of particles was observed during the first six days, and from day seven onwards the particles remained at the same site until the end of the experiment.

#### Import of particles into the MAB lagoon system

Experiments were made to evaluate the possible import of particles from the continental shelf towards the inner part of the MAB system in order to explore the frequency and intensity, according to different circulation conditions and using the same forcings ( $M_2$ ,  $Z_0$  of  $M_2$ , CCBA, periodic wind, and changing mean wind in three conditions: weak, medium and strong). The results showed that of the 54 seeded quadrants, 19 (36%) presented at least one particle within the lagoon system at the end of the simulation period (25 days) under medium and strong wind conditions, and showed percentages of intrusion between 0.17 and 1.83; however, in the weak wind scenario ( $1.8 \text{ m s}^{-1}$ ), only 8 scenarios registered intrusion of particles, with percentages between 0.17% and 1.33%. Based on the quadrant with most intrusion, simulations were performed modifying only the northwest wind direction to a marked north and west, where zero intrusion was found to be in the first and up to 15.22% in the last (fig. 10). In this case, it was observed that the final location of the particles within the system agreed



**Figura 10.** Importación de partículas puestas a derivar durante 25 días, desde un cuadrante situado en la plataforma continental. Los símbolos muestran las profundidades iniciales en las que fueron liberadas las partículas: 40 m (\*), 20 m (◆), 15 m (□), 10 m (●) y 5 m (△).  
**Figure 10.** Import of particles put to drift from a quadrant over the continental shelf, after a 25-day simulation. Symbols indicate the initial depth at which they were released: 40 m (\*), 20 m (◆), 15 m (□), 10 m (●), and 5 m (△).

sistema lagunar al final del periodo de simulación (25 días) en condiciones de viento medio y fuerte, presentando porcentajes de intrusión entre 0.17% y 1.83%; mientras que para el escenario de viento débil ( $1.8 \text{ m s}^{-1}$ ) únicamente ocho escenarios registraron intrusión de partículas, con porcentajes de intrusión entre 0.17% y 1.33%. Partiendo del cuadrante con mayor intrusión se realizaron simulaciones modificando únicamente la dirección, de vientos noroeste a norte y oeste francos, encontrando intrusión desde 0% en el primero hasta 15.22% en el último (fig. 10), en cuyo caso se observó que la localización final de las partículas dentro del sistema coincidió con la ubicación de sitios reconocidos como bancos de asentamiento de importantes recursos pesqueros. Aunado a ello se observó que el tiempo de deriva puede ser congruente con la duración del periodo planctónico de algunas especies presentes en el área.

with the location of sites known as settling banks of important fishery resources, and that drift time could be congruent with the duration of the planktonic period of some species present in the area.

### Discussion

According to the retention experiment, in which particles were seeded in the inner part of the lagoon system and which was run in mean wind conditions for a period of 28 days, most particles remained within the system and tended to concentrate in certain areas. It is important to highlight two aspects of this result. First, that the accumulation areas coincide with the real distribution of important banks of benthonic resources, particularly clam, which is important because this coherence makes us

## Discusión

De acuerdo al experimento de retención, donde se sembraron partículas en el interior del sistema lagunar y el modelo se corrió en condiciones medias de viento por un periodo de 28 días, la mayoría de las partículas permanecen dentro y tienden a concentrarse en ciertas áreas. Cabe resaltar dos aspectos de este resultado: el primero es que las zonas de concentración coinciden con la distribución real de importantes bancos de recursos bentónicos, particularmente almeja, lo que es importante porque esta coherencia da confianza en el modelo y alienta a desarrollar sistemas de análisis y pronóstico de los procesos de deriva larval; el segundo es que, a partir del día siete de la corrida, la distribución de partículas cambia muy poco sugiriendo que en el caso de deriva larval no es crítica la duración del periodo larval para determinar el destino final de los reclutas.

Los experimentos con partículas sembradas en la plataforma continental afuera del sistema lagunar, nos indicaron que, de acuerdo al modelo, la intrusión de partículas es factible aunque su entrada en proporciones importantes se da únicamente en condiciones particulares de viento (oeste de moderado a intenso; fig. 10). Esta observación es importante toda vez que puede ser utilizada para soportar hipótesis que proponen que los reclutamientos masivos de recursos bentónicos que han sido observados en algunos años (Massó-Rojas 1999) se relacionan con la importación de organismos de la plataforma continental al interior del sistema. A pesar de que esta interrogante ha permanecido durante al menos los últimos quince años, las hipótesis en torno a este importante tema no han podido ser soportadas o rechazadas hasta la fecha por falta de información de campo y series históricas, por lo que este enfoque de modelación puede representar la única posibilidad de explorar escenarios del pasado.

Como cualquier iniciativa de modelación, el presente ejercicio es claramente perfectible. Se identificaron diversos aspectos que deberán ser abordados en el futuro cercano si queremos llevar el modelo a un verdadero sistema que apoye la planeación de las actividades en la zona y el adecuado manejo de los recursos naturales. Entre estos aspectos se incluyen estudios de campo para la adecuada validación del modelo y el mejoramiento de la información semilla, especialmente de las condiciones de frontera consideradas. Actualmente se desarrollan trabajos que permitirán generar parte de la información necesaria, por lo que se considera contar con una versión mejorada del presente modelo en unos cuantos años.

En conclusión, al estudiar la circulación barotrópica y el transporte pasivo de partículas en el sistema lagunar BMA y la zona oceánica adyacente mediante un modelo lineal de circulación en el dominio de la frecuencia, forzado por mareas, marea residual, viento medio, viento periódico, y una aproximación del efecto de la Corriente de California, se generaron dos observaciones principales: (1) que las partículas sembradas dentro del sistema tienden a quedarse dentro del mismo y a concentrarse en regiones particulares (zonas de concentración)

trust the model and encourages us to develop analysis and forecast systems of larval drift processes. Second, that as of day seven of the run, the particle distribution changes very little, suggesting that in the case of larval drift, the duration of the larval period is not critical to determine the final destiny of the recruits.

The experiments with seeded particles in the continental shelf, outside the lagoon system, showed that according to the model, the intrusion of particles is feasible though their entrance in significant proportions appears only during specific wind conditions (west from moderate to intense; fig. 10). This observation is important since it could be used to support hypotheses proposing that massive recruits of benthonic resources—which have been observed for some years (Massó-Rojas 1999)—are related to the import of organisms from the continental shelf to the inner part of the system. Even though this question has prevailed at least during the last 15 years, the hypotheses surrounding this important topic have not yet been supported or rejected because of the lack of field information and historical series; hence, this modeling focus could represent the only possibility of exploring past scenarios.

Like any modeling initiative, this exercise is clearly perfectible. We identified several aspects that should be dealt with in the near future if we want to take the model to a real system that supports planning activities in the area and the appropriate management of natural resources. These aspects include field studies for proper validation of the model and improvement of seed information, especially the frontier conditions considered. At present, studies that allow producing part of the necessary information are being developed and we expect that an improved version of the current model will be available in a few years.

In summary, this research on the barotropic circulation and passive transport of particles in the MAB lagoon system and adjacent oceanic area, using a linear circulation model in the frequency domain, forced by tides, residual tide, mean wind, periodic wind and an approximation of the California Current effect, produced two main observations: (1) particles seeded within the system tend to stay in it and accumulate in certain regions (accumulation zones) that correspond to the real distribution of fish banks of benthonic resources; (2) during not too common wind conditions (moderate to intense west winds), important particle intrusions can occur from the continental shelf to the inner part of the lagoon system. Both results, and the model as a tool, are important to study the area in general, but particularly for the modeling and forecast development of larval drift processes (within the system or the import of shelf individuals) of significant fishery resources.

---

que se corresponden con la distribución real de bancos pesqueros de recursos bentónicos, y (2) que es posible que durante condiciones poco comunes de viento (vientos oeste de moderados a intensos) se presenten intrusiones importantes de partículas de la plataforma continental al interior del sistema lagunar. Ambos resultados, y el modelo utilizado como

herramientas que son de importancia para el estudio de la zona en general, y particularmente para la modelación y el desarrollo de pronósticos de procesos de deriva larval (dentro del sistema o de importación de individuos de la plataforma) de importantes recursos pesqueros.

## Referencias

- Acosta-Ruiz M, Lara-Lara JR. 1978. Resultados fisicoquímicos de un estudio de variación diurna en el área central de Bahía Magdalena, BCS. *Cienc. Mar.* 5: 37–46.
- Álvarez-Borrego S, Galindo-Bect LA, Chee-Barragán A. 1975. Características hidroquímicas de Bahía Magdalena, BCS. *Cienc. Mar.* 2: 94–109.
- Arellano-Martínez M, De la Cruz-Agüero J, Cota-Gómez VM. 1997. New records and range extensions of fishes on the Pacific coast of Mexico. *Rev. Biol. Trop.* 45: 936.
- Betts AK, Ball JH, Beljaars ACM, Miller MJ, Viterbo P. 1996. The land surface-atmosphere interaction: A review based on observational and global modeling perspectives. *J. Geophys. Res.* 101: 7209–7225.
- Blanton BO. 1995. Drog3d: User's manual for 3-dimensional drogue tracking algorithm for a finite element grid with linear finite elements in spherical coordinates. Ocean Processes Numerical Methods Laboratory, University of North Carolina at Chapel Hill.
- Blanton BO, Aretxabaleta AL, Werner FE, Seim H. 2003. Monthly climatology of the continental shelf waters of the South Atlantic Bight. *J. Geophys. Res.* 108: 3264.
- Brown CA, Jackson GA, Brooks DA. 2000. Particle transport through a narrow tidal inlet due to tidal forcing and implications for larval transport. *J. Geophys. Res.* 105: 24141–24156.
- Brown CA, Holt SA, Jackson GA, Brooks DA, Holt JG. 2004. Simulating larval supply to estuarine nursery areas: How important are physical processes to the supply of larvae to the Aransas Pass Inlet? *Fish. Oceanogr.* 13: 181–196.
- Castro-Ortiz JL. 1985. La abundancia aparente de sardina y la variación de algunos factores ambientales en Bahía Magdalena, Baja California Sur, México. *CIBCASIO Trans.* 10: 205–220.
- Dedina S, Young E. 1985. Conservation and development in the gray whale lagoons of Baja California Sur, Mexico. Report to US Marine Mammal Commission.
- Egbert GD, Erofeeva SY. 2002. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 19, N2.
- Egbert GD, Bennett A, Foreman M. 1994. TOPEX/Poseidon tides estimated using a global inverse model. *J. Geophys. Res.* 99: 24821–24852.
- Foreman MGG. 1977. Manual for tidal heights analysis and prediction. *Pacific Mar. Sci. Rep.* 77–10, 66 pp.
- Gárate-Lizárraga I, Verdugo-Díaz G, Siqueiros-Beltrones DA. 2001. Variations in phytoplankton assemblages during 1988–1989 in a subtropical lagoon system on the west coast of Mexico. *Oceánides* 16: 1–16.
- Greenberg DA, Werner FE, Lynch DR. 1998. A diagnostic finite element ocean circulation model in spherical-polar coordinates. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 15: 942–958.
- Hart DR, Chute AS. 2004. Essential fish habitat source document: Sea scallop, *Placopecten magellanicus*, life history and habitat characteristics. NOAA Tech. Memo. NMFS-NE-189.
- Hernández-Trujillo S, Cervantes-Duarte R, Aguñiga-García S. 1997. Variación espacial y temporal de algunas variantes físicas, químicas y biológicas en Bahía Magdalena, BCS (julio–agosto 1988). *Rev. Invest. Cient.* 8: 1–13.
- Hvid-Ribergaard M, Pedersen SA, Ádlandsvik B, Kliem N. 2004. Modelling the ocean circulation on the West Greenland Shelf with special emphasis on northern shrimp recruitment. *Cont. Shelf Res.* 24: 1505–1519.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, Collins W, Deaven D, Gandin L, Iredell M, Saha S, White G, Woollen J, Zhu Y, Chelliah M, Ebisuzaki M, Higgins W, Janowiak J, Mo KC, Ropelewski C, Wang J, Leetmaa A, Reynolds R, Jenne R, Joseph D. 1996. The NMC/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 77: 437–471.
- Lluch-Belda D, Hernández-Rivas ME, Saldierna-Martínez R, Guerrero-Caballero R. 2000. Variabilidad de la temperatura superficial del mar en Bahía Magdalena, BCS. *Oceánides* 15: 1–23.
- Lough LG, Mountain DG. 1996. Effect of small-scale turbulence on feeding rates of larval cod and haddock in stratified water on Georges Bank. *Deep Sea Res.* II 43: 1745–1772.
- Lough RG, Smith WG, Werner FE, Loder JW, Page FE, Hannah CG, Naimie CE, Perry RI, Sinclair M, Lynch DR. 1994. Influence of wind-driven advection on interannual variability in cod egg and larval distributions on Georges Bank: 1982 vs 1985. *ICES Mar. Sci. Symp.* 198: 356–378.
- Lynch DR, Werner FE. 1987. Three-dimensional hydrodynamics on finite elements. I. Linearized harmonic model. *Int. J. Numer. Methods Fluids* 7: 871–909.
- Lynch DR, Werner FE. 1991. Three-dimensional hydrodynamics on finite elements. Part II. Non-linear time-stepping model. *Int. J. Numer. Methods Fluids* 12: 507–533.
- Lynch D, Naimie D. 1993. The M2 tide and its residual on the outer banks of the Gulf of Maine. *J. Phys. Oceanogr.* 23: 2222–2253.
- Lynch DR, Werner FE, Greenberg DA, Loder JW. 1992. Diagnostic model for baroclinic, wind-driven and tidal circulation in shallow seas. *Cont. Shelf Res.* 12: 37–64.
- Lynch DR, Ip JTC, Naimie CE, Werner FE. 1996. Comprehensive coastal circulation model with application to the Gulf of Maine. *Cont. Shelf Res.* 16: 875–906.
- Maeda-Martínez AN, Reynoso-Granados T, Solís-Marín F, Leija-Tristan A, Auriolos-Gamboa D, Salinas-Zavala C, Lluch-Cota D, Ormart-Castro P. 1993. A model to explain the formation of catarina scallop *Arpopecten circularis* (Sowerby 1835) beds in Magdalena Bay, Mexico. *Aquacult. Fish. Manage.* 24: 323–339.
- Massó-Rojas JA. 1999. Pesquería de almeja catarina. En: Casas-Valdez M, Ponce-Díaz G. (eds.), *Estudio del Potencial Pesquero y Acuicola de Baja California Sur. Vol. I. SEMARNAP. Gobierno del Estado de Baja California Sur. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. UABCS. CIBNOR. CICIMAR. CRIP-La Paz y CET Mar-La Paz.* 350 pp.
- Mellor G, Yamada T. 1982. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys.* 20: 851–875.
- Metaxas A. 2001. Behavior in flow: Perspectives on the distribution and dispersion of meroplanktonic larvae in the water column. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 58: 86–98.
- Mumby PJ, Clarke KR, Harborne AR. 1996. Weighting species abundance estimates for marine resource assessment. *Aquat. Conserv.: Mar. Freshwat. Ecosyst.* 6: 115–120.
- Pawlowicz R, Beardsley RC, Lentz S. 2002. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in Matlab using T tide. *Comput. Geosci.* 28: 929–937.
- Sánchez-Montante O. 2004. Hidrodinámica y transporte de masa en el sistema lagunar Bahía Magdalena-Bahía Almejas, Baja California Sur, México: Modelación y experimentación. Tesis de doctorado, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas-IPN, 237 pp.
- Stegmann PM, Quinlan JA, Werner FE, Blanton BO, Berrien P. 1999. Atlantic menhaden recruitment to a southern estuary: Defining potential spawning regions. *Fish. Oceanogr.* 8: 111–123.
- Tremblay MJ, Loder J, Werner FE, Naimie C, Page FH, Sinclair MM



1994. Drift of scallop larvae on Georges Bank: A model study of the roles of mean advection larval behavior and larval origin. *Deep Sea Res. II* 41: 7–49.
- Werner FE, Viúdez A, Tintoré J. 1993. An exploratory study of the currents off the southern coast of Mallorca including the Cabrera Island complex. *J. Mar. Syst.* 4: 45–66.
- Werner FE, Perry RI, Lough RG, Naimie CE. 1996. Trophodynamic and advective influences on Georges Bank larval cod and haddock. *Deep Sea Res. II* 43: 1793–1822.
- Werner FE, Blanton BO, Quinlan JA, Luettich RA Jr. 1999. Physical oceanography of the North Carolina continental shelf during the fall and winter seasons: Implications to the transport of larval menhaden. *Fish. Oceanogr.* 8: 7–21.
- Werner FE, Quinlan JA, Lough RG, Lynch DR. 2001. Spatially-explicit individual based modeling of marine populations: A review of the advances in the 1990s. *Sarsia* 86.
- Zaitsev O, Cervantes R, Montante O, Gallegos A. 2003. Coastal upwelling activity of the Pacific shell of Baja California Peninsula. *J. Oceanogr.* 59: 489–502.

*Recibido en marzo de 2006;  
aceptado en septiembre de 2006.*