

Seasonal variations of the thermohaline structure in the Magdalena-Almejas Bay lagoon system and adjacent sea

Variaciones estacionales de la estructura termohalina en el sistema lagunar de Bahía Magdalena-Bahía Almejas y el mar adyacente

O Zaitsev^{1*}, O Sánchez-Montante², M Saldivar-Reyes¹

¹ CICIMAR-IPN, Av. IPN s/n, Col. Playa Palo de Santa Rita, La Paz, 23096, Baja California Sur, México.

* E-mail: ozaytsev@ipn.mx

² CICATA-IPN, Km. 14.5 Carretera Tampico, Puerto Industrial Altamira, Altamira, 89600, Tamaulipas, México.

ABSTRACT. The seasonal variability of sea surface temperature (SST) in the Magdalena-Almejas Bay lagoon system (Mexico) and adjacent oceanic region was characterized in terms of the averaged monthly SST distributions obtained from AVHRR satellite images during the period 1996–2001. Additionally, oceanographic data obtained during five sampling campaigns were analyzed. A regional subdivision of the study area was made in relation to the main physical processes affecting the thermohaline structure, such as upwelling, tidal transport, and surface heat fluxes. Annual cycles of monthly mean SST for these subregions showed that during the period from April to September the inner lagoon water was warmer than the adjacent oceanic water, with a maximum difference of 1.3°C in June. During the period from October to February, the SST inside the lagoon system was lower than in the adjacent ocean (by up to –1.5°C in December). These results are discussed in terms of upwelling activity in the adjacent oceanic region and winter cooling effects on the surface, particularly in Almejas Bay. Most of the system (about 70% of its surface) is characterized by vertical homogeneity. Thermohaline stratification modulated by coastal upwelling activity in the adjacent oceanic region is observed in the deepest part of the lagoon system (>15 m), especially during the spring and summer. The oceanic conditions frequently observed in this subregion of Magdalena Bay are hypothetically explained by the combined action of coastal upwelling and horizontal tidal transport. These local effects were more evident during the flood, when a strong tidal flow (up to 1.1 m s⁻¹) produced intense vertical mixing of near-bottom cold water with upper layer water leading to reduced SST values.

Key words: thermohaline structure, seasonal variability, coastal upwelling, Magdalena Bay.

RESUMEN. La variabilidad estacional de la temperatura superficial del mar (TSM) en el sistema lagunar Bahía Magdalena-Bahía Almejas (México) y en la región oceánica adyacente se caracterizó en términos de los promedios mensuales de las distribuciones de TSM obtenidas a partir de las imágenes satelitales de AVHRR durante el periodo 1996–2001. Adicionalmente, se analizaron los datos oceanográficos obtenidos durante cinco campañas de muestreo. Se realizó una subdivisión regional del área de estudio con relación a los procesos físicos importantes que afectan la estructura termohalina local, tales como las surgencias, el transporte de marea y los flujos superficiales de calor. Los ciclos anuales del promedio mensual de TSM para estas subregiones mostraron que durante el periodo de abril a septiembre el interior del sistema lagunar fue más cálido que la región oceánica adyacente. La máxima diferencia de 1.3°C se observó en junio. Durante el periodo de octubre a febrero el interior del sistema lagunar fue más frío (hasta de –1.5°C en diciembre). Estos resultados se explican en términos de la actividad de surgencias en la región oceánica adyacente y del enfriamiento invernal de la superficie en el interior del sistema lagunar, principalmente en Bahía Almejas. La mayor parte del sistema (cerca del 70% de su superficie) se caracteriza por una distribución vertical prácticamente homogénea. La estratificación termohalina modulada por la actividad de surgencia en la región oceánica adyacente se observó en la región más profunda del sistema lagunar (>15 m), especialmente durante el periodo de primavera-verano. Las condiciones oceánicas frecuentemente observadas en esta subregión de Bahía Magdalena se explican hipotéticamente por el efecto combinado de la surgencia costera y el transporte horizontal de marea. Estos efectos locales fueron más evidentes durante las fases del flujo de marea, cuando intensas corrientes (hasta de 1.1 m s⁻¹) produjeron una intensa mezcla vertical de aguas frías, resultando en una disminución apreciable de la TSM.

Palabras claves: estructura termohalina, variación estacional, surgencias costeras, Bahía Magdalena.

INTRODUCTION

The Magdalena-Almejas Bay coastal lagoon system consists of three bodies of water: Almejas Bay (AB), Magdalena Bay (MB), and the channel zone (CZ). They are interconnected by two channels, known as the Gaviotas Channel and the San Carlos Channel (fig. 1a). The AB inlet is

INTRODUCCIÓN

El sistema lagunar de Bahía Magdalena-Bahía Almejas está morfológicamente compuesto por tres cuerpos de agua: Bahía Almejas (BA), Bahía Magdalena (BM) y zona de canales (ZC). Los tres cuerpos de agua se interconectan mediante dos canales interiores, referidos como Canal San

very shallow, with a depth less than 10 m, so the MB inlet serves as the main inlet for the whole coastal system. The maximum depth (45 m) is located in the central part of the MB entrance (fig. 1b), but in general, the MB-AB lagoon system is relatively shallow ($h < 20$ m). The ocean adjacent to MB has a narrow continental shelf that deepens to 250 m at a distance of about 25 km off the coast.

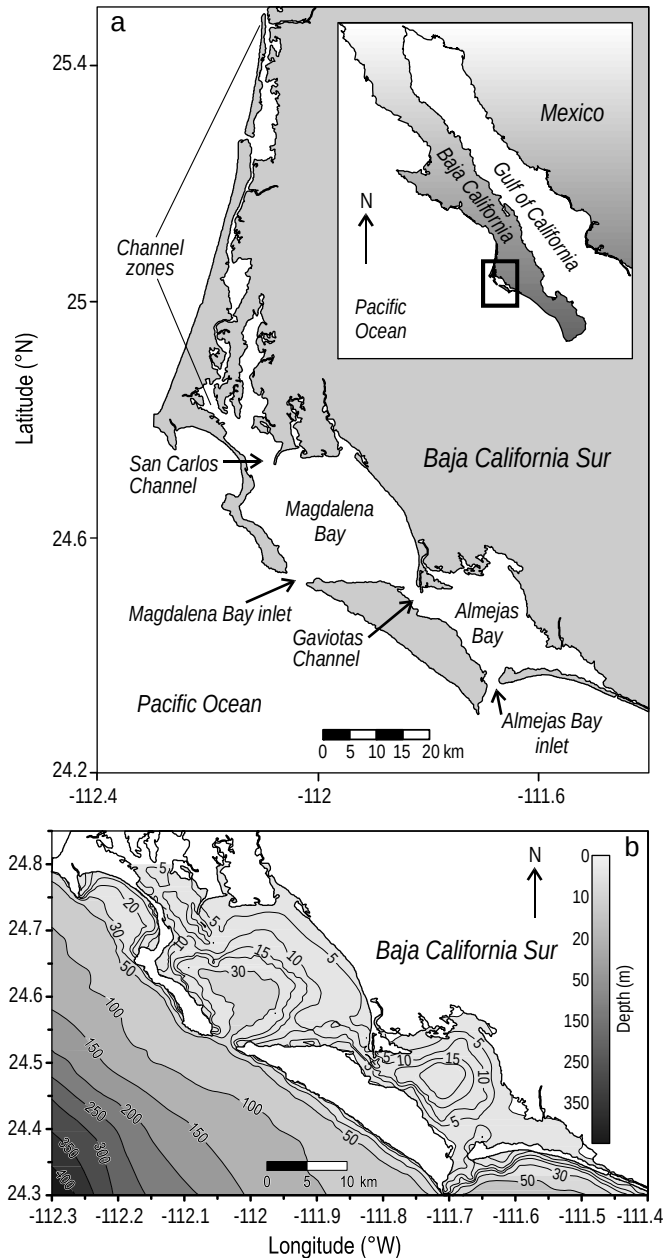


Figure 1. (a) Location of the Magdalena Bay-Almejas Bay lagoon system and (b) bathymetry of the region and adjacent ocean.

Figura 1. (a) Localización del sistema lagunar Bahía Magdalena-Bahía Almejas y (b) batimetría, incluyendo la región oceánica adyacente.

Carlos y Canal de Gaviotas (fig. 1a). La boca de BA es bastante somera, con una profundidad menor a 10 m, de tal forma que la boca de BM es considerada la boca principal del sistema lagunar. La profundidad máxima (45 m) se encuentra localizada en la parte central de la entrada a BM (fig. 1b), pero en general el sistema lagunar es relativamente somero ($h < 20$ m). El mar abierto adyacente tiene una plataforma continental angosta, con un gradiente batimétrico de aproximadamente 250 m en 25 km de extensión transversal a la costa.

El clima de la región es semiárido, con una precipitación anual escasa, por lo que el sistema lagunar se caracteriza como una cuenca de evaporación con condiciones del tipo antiestuarino en ZC y las regiones someras de BA (Álvarez-Borrego *et al.* 1975). Vientos del noroeste prevalecen la mayor parte del año, aunque vientos del sur son usualmente frecuentes de julio a septiembre (García-Escobar 1993).

Entre los pocos estudios sobre la hidrografía del sistema lagunar BM-BA se encuentran los trabajos de Álvarez-Borrego *et al.* (1975), quienes analizaron las condiciones físicas y químicas (temperatura, salinidad, oxígeno, pH, nutrientes) en las aguas superficiales; Acosta-Ruiz y Lara-Lara (1978), quienes reportan la variación diurna de las condiciones hidrofísicas y químicas en un único punto de medición situado cerca de la boca de BM; Lluch-Belda *et al.* (2000), quienes realizaron un análisis de la variabilidad espacial y temporal de la temperatura superficial del mar (TSM); y algunos trabajos recientes en los que se ha estudiado la dinámica de las corrientes en BM (Robinson y Gómez-Aguirre 2004, Gómez-Gutiérrez y Robinson 2006).

En general la variabilidad temporal de la TSM en la región subtropical de la costa del Pacífico de Baja California tiene un ciclo anual bien definido (Durazo *et al.* 2002, Sánchez-Montante *et al.* 2007). Particularmente, en el interior del sistema lagunar BM-BA se ha registrado un intervalo de variación anual de 7°C en TSM, entre marzo y septiembre (Lluch-Belda *et al.* 2000).

A partir de las investigaciones previas, se ha caracterizado a BM como un cuerpo de agua con condiciones hidrológicas del tipo oceánicas, debido a que la temperatura y la salinidad de esta bahía son relativamente menor que las que se encuentran en el interior de BA y de ZC. Lo anterior se puede explicar mediante la fuerte comunicación hidrodinámica entre BM y las aguas oceánicas adyacentes, en las cuales se ha identificado una zona típica de surgencias costeras generadas por el viento (Bakun y Nelson 1977). Las surgencias son de frecuencia estacional y de mayor intensidad durante el periodo de abril a junio (Zaytsev *et al.* 2003). Aunque esta actividad de surgencias es de menor intensidad que la que se presenta en los sistemas de surgencias de la región norte de California, se manifiesta regularmente en los campos hidrológicos superficiales (Zaitsev *et al.* 2007).

Obeso-Nieblas *et al.* (1999) reportaron que el régimen de marea de la región de estudio es del tipo diurno-semidiurno.

The climate of the region is semi-arid, with low annual precipitation, making the lagoon system an evaporation basin with slightly inverse estuarine conditions in CZ and in the shallow part of AB (Álvarez-Borrego *et al.* 1975). North-westerly winds prevail over most of the year, whereas southerly winds are more frequent from July to September (García-Escobar 1993).

Among the few studies of the regional hydrography in the MB-AB lagoon system are those of Álvarez-Borrego *et al.* (1975), who analyzed surface physical and chemical conditions (temperature, salinity, oxygen, pH, nutrients); Acosta-Ruíz and Lara-Lara (1978), who reported the diurnal variability of some hydrophysical and chemical measurements at a point located near the mouth of MB; Lluch-Belda *et al.* (2000), who analyzed the spatial and temporal variability of sea surface temperature (SST); and some recent papers on current dynamics in MB (Robinson and Gómez-Aguirre 2004, Gómez-Gutiérrez and Robinson 2006).

In general, temporal SST variability in the subtropical region of the Baja California Pacific coast displays a well-defined annual cycle (Durazo *et al.* 2002, Sánchez-Montante *et al.* 2007). Within the MB-AB system, an annual SST cycle with a range of 7°C (between March and September) has been recorded (Lluch-Belda *et al.* 2000).

Based on these oceanographic studies, the water within MB can be considered to be more like the adjacent ocean water, since temperature and salinity are slightly lower than in AB and CZ. This can be explained by the good hydrodynamic communication between MB and the adjacent oceanic region, where a typical zone of wind-generated coastal upwelling has been identified (Bakun and Nelson 1977). Upwelling occurs seasonally and is more intense from April to June (Zaitsev *et al.* 2003). Although this upwelling activity is weaker than off northern California, it regularly appears as a characteristic of surface hydrological fields (Zaitsev *et al.* 2007).

Obeso-Nieblas *et al.* (1999) reported that the tidal pattern in the study area is mixed-semidiurnal. Statistical analysis of sea level variations in San Carlos harbor for the period from June 1974 to December 1976 (UNAM 1985) show that during neap tides the mean high tide amplitude is 0.83 m and the mean low tide is -0.87 m. Maximum records of high and low tides during spring tides are 1.56 and -1.98 m, respectively. Because of these considerable tidal fluctuations, it is logical to conclude that tidal currents are an important transport mechanism through the MB and AB inlets. In addition, Acosta-Ruíz and Lara-Lara (1978) reported that the near-bottom chemical and physical conditions change according to the tidal cycle, at least close to the MB inlet.

The main objectives of the present study are (1) to evaluate seasonal temperature variations for different subregions of the lagoon system in relation to ocean forcing, and (2) to elucidate to what extent oceanic water affects the thermohaline structure of the lagoon system. In order to fulfill these objectives, mean monthly SST distributions derived from

El análisis estadístico de las variaciones del nivel del mar en el puerto de San Carlos (UNAM 1985) muestra que, durante el periodo de junio de 1974 a diciembre de 1976, la amplitud media de la marea durante la pleamar es de 0.83 m, mientras que durante la bajamar es de -0.87 m. Los registros máximos de la amplitud durante la pleamar y la bajamar, durante las mareas vivas, son de 1.56 m y -1.98 m, respectivamente. Debido a este considerable rango de fluctuaciones, se sugiere que las corrientes de marea son importantes como mecanismo de transporte advectivo a través de las bocas del sistema en BM y BA. Adicionalmente, Acosta-Ruíz y Lara-Lara (1978) reportaron que las condiciones físicas y químicas de las aguas profundas de BM varían de acuerdo con el ciclo de marea, por lo menos cerca de la boca de BM.

Los principales propósitos de este estudio son: (1) evaluar las variaciones estacionales de la temperatura en las diferentes subregiones del sistema lagunar en relación con el forzamiento oceánico y (2) elucidar la extensión sobre la cual el agua oceánica afecta la estructura termohalina del sistema lagunar. Para realizar estos objetivos, se analizan las distribuciones mensuales de TSM derivadas de las imágenes satelitales del Radiómetro Avanzado de Muy Alta Resolución (AVHRR, por sus siglas en inglés), y los datos complementarios hidrológicos (perfiles de CTD) e hidrodinámicos (variaciones del nivel del mar y corrientes en las bocas y canales del sistema) obtenidas durante las campañas de muestreo en el periodo de 2000 a 2003.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las imágenes mensuales promedio AVHRR de 1996 a 2001 se procesaron y segmentaron para analizar la variabilidad estacional de la TSM. Los datos de los índices de surgencias costeras, calculados a partir de los campos de presión atmosférica obtenidos por el Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center (FNMOC) de la flota naval estadounidense, están disponibles en el sitio web PFEL (www.pfel.noaa.gov). Los datos del Índice Multivariante de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) obtenidos de la página de Internet de NOAA Earth System Research Laboratory (www.esrl.noaa.gov/psd/people/klaus.wolter/MEI/) se incluyeron en esta investigación a fin de considerar como referencia los patrones interanuales que pueden modular la variabilidad térmica del sistema lagunar BM-BA.

Las mediciones hidrográficas se realizaron dentro y fuera del sistema lagunar BM-BA durante cinco campañas de muestreo realizadas por el grupo de oceanografía del Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas (CICIMAR-IPN) entre los años 2000 y 2003 (4–8 de abril de 2000, 19–23 de febrero de 2001, 13–17 de noviembre de 2001, 21–24 de mayo de 2002 y 19–23 de marzo de 2003). En cada campaña se realizaron mediciones de perfiles verticales de temperatura, conductividad y presión utilizando un CTD SeaBird-19Plus. La figura 2 muestra las localizaciones exactas de los lances de CTD. Adicionalmente, el correntómetro

Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) satellite images have been analyzed together with additional hydrographic (CTD profiles) and hydrodynamical (sea level variations and currents in the inlets and channels of the system) data obtained during sampling campaigns conducted in the period from 2000 to 2003.

MATERIAL AND METHODS

Average monthly AVHRR satellite images were processed and fractioned from 1996 to 2001 for the SST seasonal variability analysis. Coastal upwelling index data calculated from the US Navy's Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center (FNMOC) sea level pressure fields are provided on the PFEL website (www.pfeg.noaa.gov). The Multivariate El Niño-Southern Oscillation Index (MEI) data were obtained from the NOAA Earth System Research Laboratory (www.esrl.noaa.gov/psd/people/klaus.wolter/MEI/) to serve as reference of some interannual patterns that could modulate the thermal variability of the MB-AB lagoon system.

Hydrographic measurements were made both inside and outside the MB-AB lagoon system during five field surveys carried out between 2000 and 2003 (4–8 April 2000, 19–23 February 2001, 13–17 November 2001, 21–24 May 2002, and 19–23 March 2003), by the oceanographic research group from the Interdisciplinary Center of Marine Sciences of the Mexican National Polytechnic Institute (CICIMAR-IPN). Vertical profiles (temperature, conductivity, and pressure) were taken during each field survey with a SeaBird-19Plus CTD instrument. Figure 2 shows the location of the CTD profiles. Additionally, an InterOcean S4 wave-tide gauge with a current sensor was moored in the MB inlet during the period from 21 May to 5 July 2002, in order to obtain a relatively long-term record of sea level variations and currents. In March 2003, current measurements were made in a cross-section of the mouth of MB with a Sontek 0.5 MHz acoustic profiler.

RESULTS

A time series of sea level variations in the mouth of MB during the 45-day-long mooring period (21 May to 5 July 2002) is shown in figure 3a. Fortnightly tidal range varied from 0.6 m during neap tide to 2.30 m during spring tide. Current intensity in the MB inlet (fig. 3b) varied from 0.35 m s^{-1} during neap tide to 0.7 m s^{-1} during spring tide. The energy spectrum of sea level variations (fig. 3c) shows peaks of maximum spectral density at the diurnal (K_1 , O_1) and semi-diurnal (M_2 , S_2) tidal periods. The ratio between diurnal and semi-diurnal components (Bowden 1983), $F = (K_1 + O_1)/(M_2 + S_2) = 0.72 < 1.5$, confirms the mixed tidal pattern, with a predominance of the semi-diurnal component. Current intensities observed at the MB inlet were two times greater than those at the AB inlet. Taking into account that

InterOcean S4 con sensor de corrientes se ancló en la boca de BM durante el periodo que abarca desde el 21 de mayo hasta el 5 de julio de 2002, a fin de obtener la variabilidad temporal de las corrientes. En marzo de 2003 se realizaron las mediciones de las corrientes en una sección transversal de la boca de BM con un perfilador acústico Sontek 0.5 MHz.

RESULTADOS

La serie de tiempo de las variaciones del nivel del mar que fueron registradas en la boca de BM durante un anclaje de 45 días (21 de mayo a 5 de julio de 2002) se muestra en la figura 3a. El rango de marea quincenal varió de 0.6 m durante la marea muerta a 2.30 m durante la marea viva. La intensidad de las corrientes en la boca de BM (fig. 3b) varió de 0.35 m s^{-1} durante la marea muerta a 0.7 m s^{-1} durante la marea viva. El espectro de energía de las variaciones del nivel del mar (fig. 3c) muestra los picos de máxima densidad espectral en los periodos astronómicos de marea diurna (K_1 , O_1) y semidiurna (M_2 , S_2). La razón entre las componentes diurnas y semidiurnas de la marea, $F = (K_1 + O_1)/(M_2 + S_2) = 0.72 < 1.5$ (Bowden 1983), confirma el hecho de que el régimen de marea es mixto con predominancia semidiurna. Las intensidades de las corrientes en la boca de BM tuvieron el doble de las intensidades registradas en la boca de BA. Considerando que el área de la sección transversal de la boca de BM es aproximadamente 15 veces mayor que la boca de BA, se establece que el principal forzamiento de la circulación en todo el sistema lagunar (y especialmente la circulación en BM) es el que se ejerce a través de la boca de BM. Por su parte, las mediciones de las corrientes a través de la boca de BA y el canal de interconexión de ambas bahías, Canal de Gaviotas, son prácticamente del mismo rango de intensidades en ambos canales (alcanzando 0.5 m s^{-1} en la capa de fondo durante las fases de flujo). Sin embargo, el área de la sección del Canal de Gaviotas es aproximadamente dos veces mayor que la de la boca de BA, lo que sugiere que la circulación en el interior de BA es principalmente forzada por el intercambio que ocurre a través del Canal de Gaviotas.

A fin de determinar las características espaciales de las variaciones estacionales de TSM, se calcularon las anomalías mensuales de TSM, con respecto a los valores promedio mensuales, sobre el periodo de 1996 a 2001. Las distribuciones correspondientes para los meses de febrero, mayo, agosto y noviembre, se presentan de manera independiente para la región adyacente del mar abierto (fig. 4) y para el interior del sistema lagunar (fig. 5). La secuencia de las distribuciones de la anomalía de la TSM en la región oceánica adyacente esboza la evolución temporal estacional de la interacción térmica entre las latitudes tropicales y extratropicales. En febrero y mayo (fig. 4) se observa un cambio en la dirección del gradiente de TSM, transversal al sistema BM-BA, que coincide con el periodo de intensificación de la Corriente de California (Schwartzlose y Reid 1972). Por tanto, es de esperarse un transporte de aguas superficiales más frías y menos

the cross-sectional area of the MB inlet is approximately 15 times greater than that of the AB inlet, tidal forcing for the entire lagoon system's circulation (and especially the circulation in MB) is mainly through the MB inlet. In the case of AB, analysis of current observations showed that tidal currents near the bottom through Gaviotas Channel and at the AB inlet were practically the same (reaching 0.5 m s^{-1} during the flood). The sectional area of the Gaviotas Channel is about two times greater than that of the AB inlet, suggesting that the inner circulation of AB is mainly forced by tidal exchange through the Gaviotas Channel.

To determine the spatial features of the seasonal SST variations, distributions of the monthly SST anomalies for February, May, August, and November, averaged over the period from 1996 to 2001, were calculated in relation to the mean monthly SST values. These distributions were generated independently for both the adjacent oceanic region (fig. 4) and the interior of the lagoon system (fig. 5). Spatial distributions of SST anomalies in the oceanic region clarify the seasonal evolution of heat transfer between the tropical and middle latitudes. In February and May (fig. 4), a zonal

salobres en la zona subtropical en el campo mensual de la TSM. No obstante, los contornos de los valores máximos de las anomalías negativas aparecen en las proximidades de la boca de BM durante la primavera (fig. 4a). Esta característica del campo de la TSM está asociada a las surgencias costeras forzadas por el viento prevaleciente del noroeste en el periodo de marzo a junio. Las anomalías de TSM en estas zonas de surgencia disminuyeron hasta -2°C respecto al valor promedio mensual y en eventos extremos hasta -3°C . En agosto y más claramente en noviembre el gradiente de las anomalías de TSM en la sección sur de la región oceánica adyacente presentó una dirección latitudinal de tal forma que el campo de las isotermas fue perpendicular a la costa. Anomalías positivas de TSM (de hasta 1°C) alcanzaron las latitudes de BM, indicando una intrusión transversal a lo largo de la costa de aguas subtropicales hacia el norte, observación que es consistente con los resultados de Durazo y Baumgartner (2002).

Las distribuciones espaciales de las anomalías promedio mensuales de TSM en el interior de BM se caracterizaron por un gradiente ascendente orientado hacia el sureste durante el

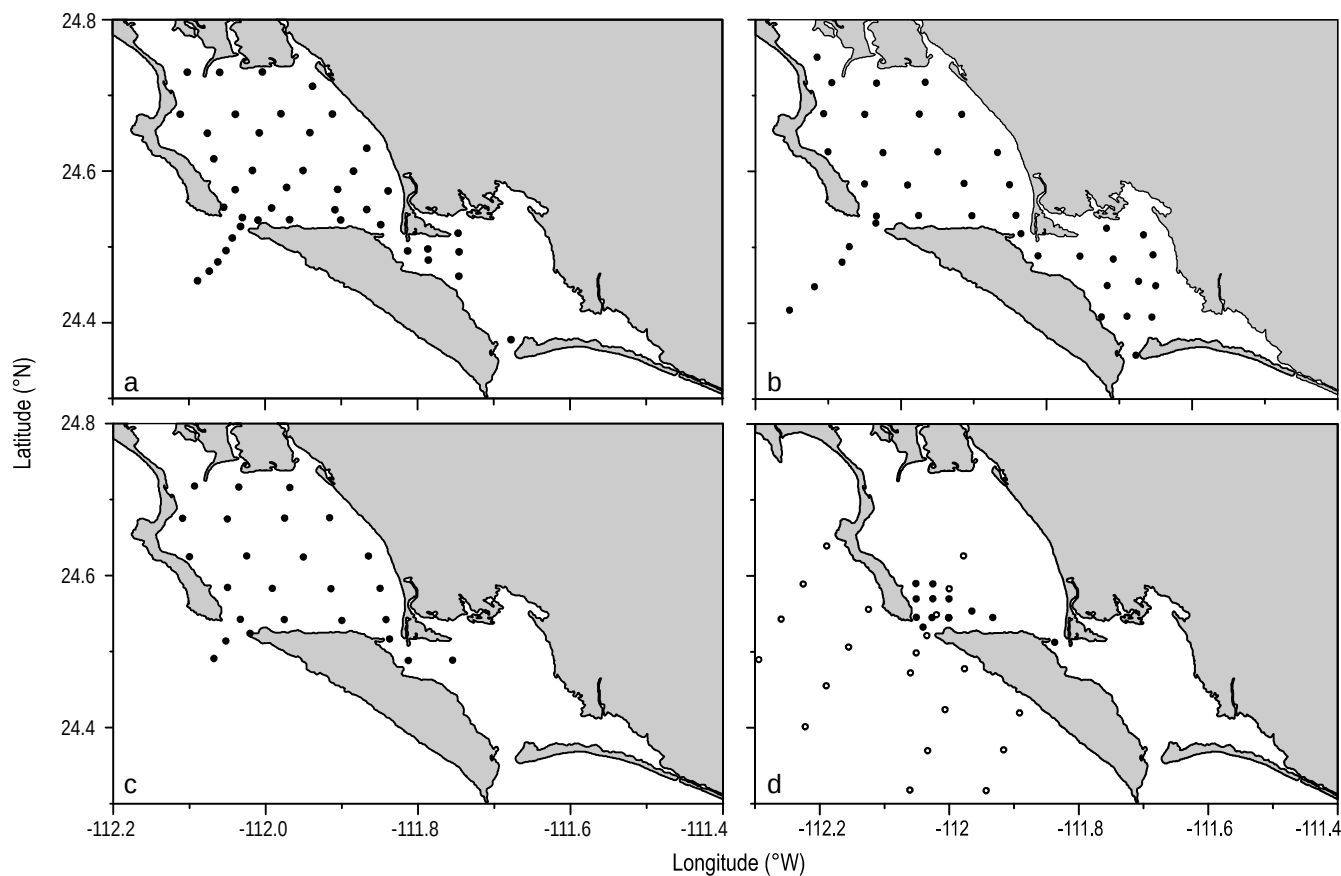


Figure 2. Location of the CTD measurement sites during the surveys conducted in (a) April 2000, (b) February 2001, (c) November 2001, and (d) May 2002 (solid dots) and March 2003 (white dots).

Figura 2. Localización de los puntos de medición realizada con CTD durante las campañas en (a) abril de 2000, (b) febrero de 2001, (c) noviembre de 2001, y (d) mayo de 2002 (puntos solidos) y marzo de 2003 (puntos blancos).

shift in the direction of the SST gradient, observed off the lagoon system, coincides with the time of intensification of the California Current (Schwartzlose and Reid 1972). Therefore, an appearance of cooler, less salty, surface water in the subtropical zone would be expected in the corresponding SST field. Furthermore, contours of significant negative anomalies were registered close to the MB inlet in spring (fig. 4a). This spatial effect was associated with the coastal upwelling forced by the prevailing northwesterly wind in the period from March to June. In these upwelling zones, the SST anomalies can decrease to 2°C lower than the monthly mean value, and during extreme events, to 3°C lower. In

periodo de primavera y verano (fig. 5a–b), presentando una diferencia entre las condiciones locales en las subregiones profundas y someras de BM. Anomalías negativas abarcaron prácticamente toda el área de BM, mientras que anomalías positivas fueron características de BA, con valores máximos mayores que 3°C (en mayo) y 1.5°C (en agosto) en la parte este de BA. Esta diferencia está asociada con el calentamiento por irradiación solar de las aguas someras en BM, y muy particularmente en BA, en contraste con el influjo de agua fría, asociada a la actividad local de surgencias, como resultado del transporte a través de la boca de BM. Durante el periodo de otoño e invierno (fig. 5c–d), el campo de

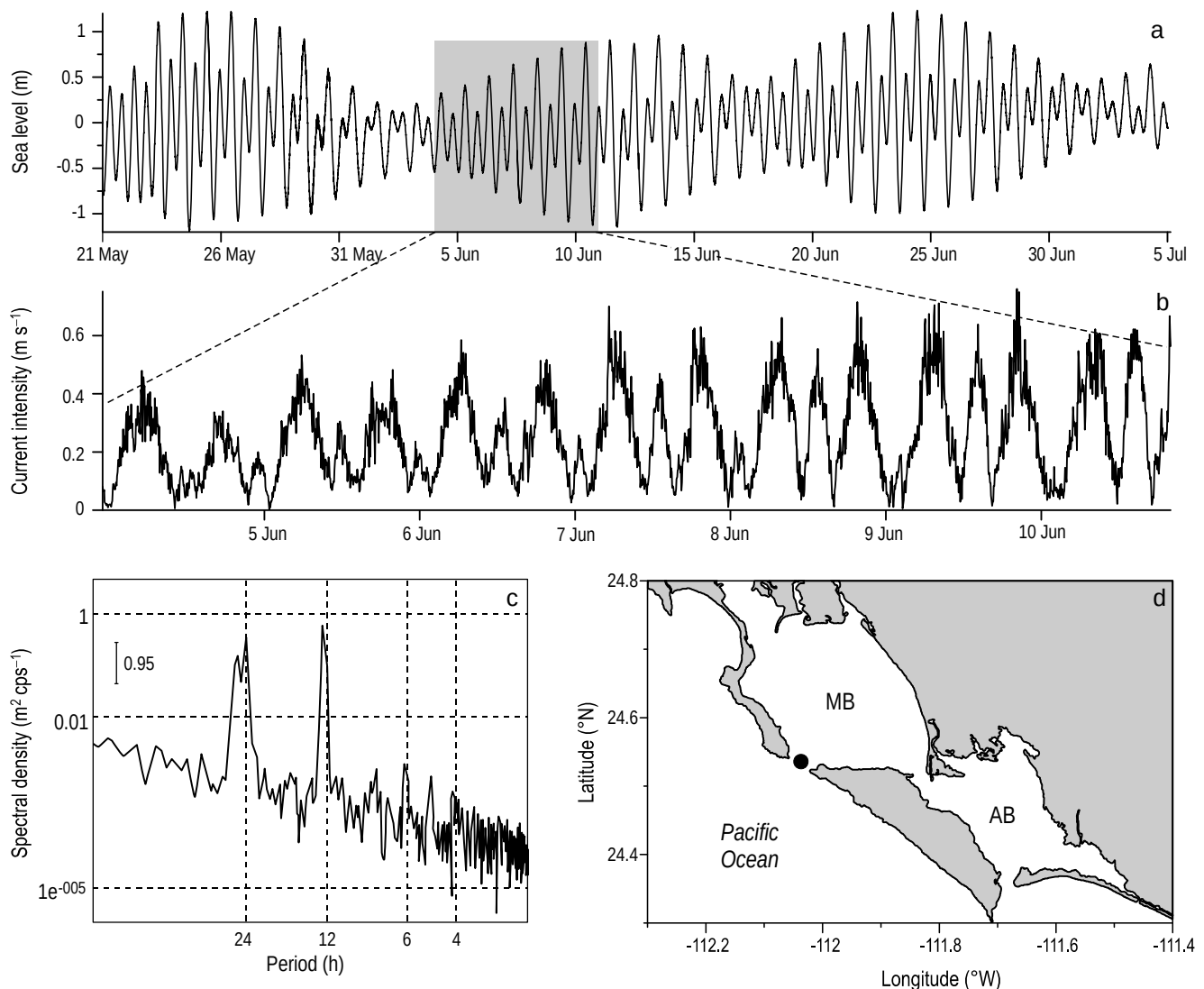


Figure 3. (a) Sea level variations for the period from 21 May to 5 July 2002. (b) Current intensity for the period from 4 to 11 June 2002. (c) Energy spectra of sea level variations at the inlet of Magdalena Bay (MB); the vertical bar indicates the 95% confidence interval for spectral density. (d) Location of the tide gauge (black dot). AB = Almejas Bay.

Figura 3. (a) Variaciones del nivel del mar para el periodo de 21 de mayo al 5 de julio de 2002. (b) Intensidad de las corrientes registradas para el periodo de 4 a 11 de junio de 2002. (c) Espectro de energía de las variaciones del nivel del mar en la boca de Bahía Magdalena (MB); la barra vertical indica el intervalo de confianza de 95% para la densidad espectral. (d) Localización del correntómetro (punto negro). AB = Bahía Almejas.

August and particularly in November, the gradient of the SST anomaly field in the southern part of the adjacent oceanic region had latitudinal direction, and isotherms were oriented in a perpendicular direction to the coast. Positive SST anomalies (up to 1°C) reached the latitude of MB, revealing an alongshore intrusion of subtropical waters toward the north (Durazo and Baumgartner 2002).

las anomalías en BM fue más homogéneo; los mayores gradientes se observaron en la distribución de las anomalías negativas, que abarcaron la parte oeste de BA, extendiéndose sobre la región sureste de BM. Una pequeña área de las anomalías negativas se localizó en la región noroeste de BM, incluyendo la boca principal de BM en febrero (fig. 5d). En general, el campo de anomalías de TSM en BA durante estos

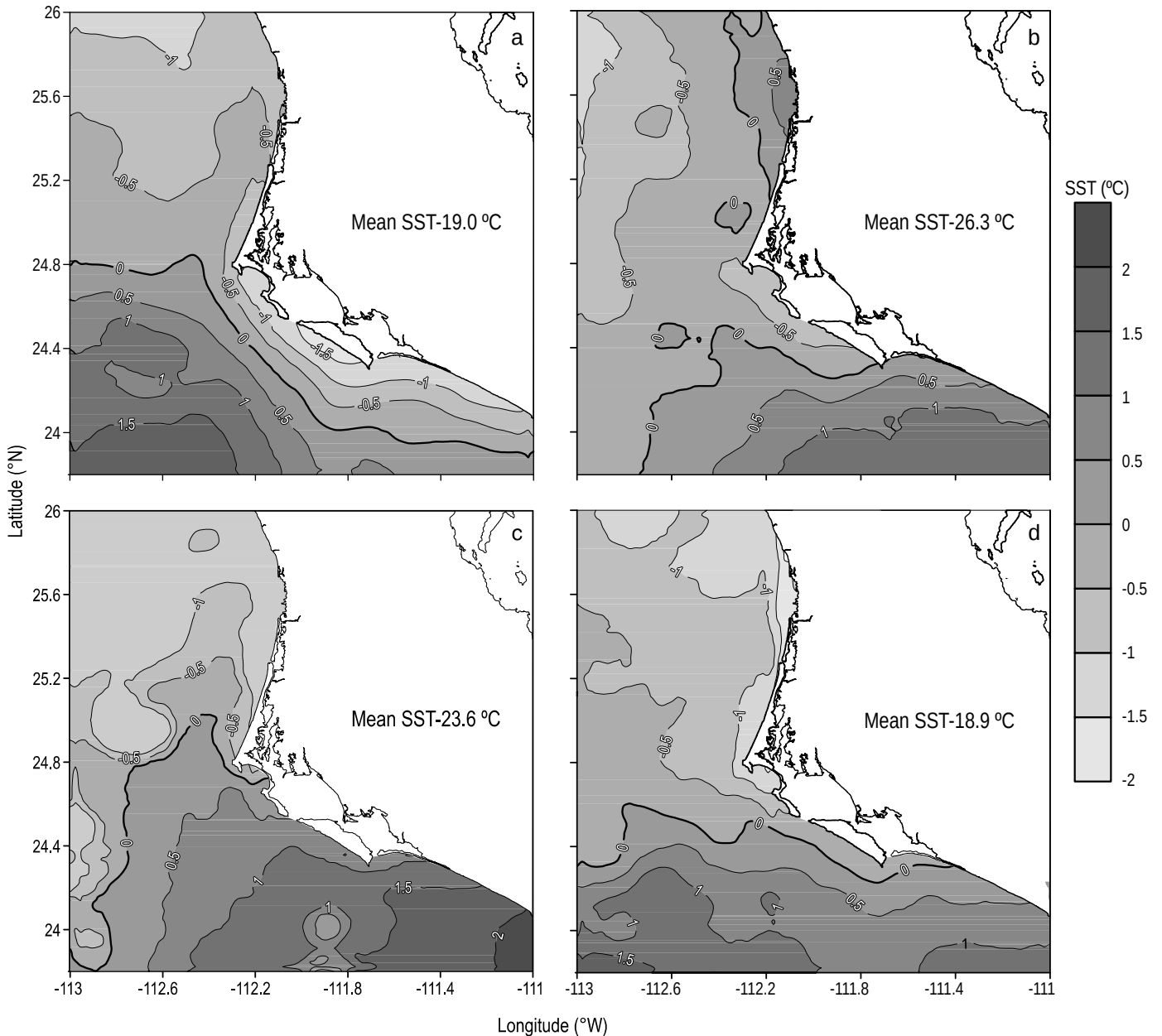


Figure 4. Seasonal variability of the averaged monthly sea surface temperature (SST) anomalies generated from AVHRR images of the ocean adjacent to the Magdalena-Almejas Bay lagoon system, relative to the mean monthly values (shown as SST in each panel): (a) May, (b) August, (c) November, and (d) February.

Figura 4. Variabilidad estacional de la distribución de las anomalías promedio mensuales de la temperatura superficial del mar (SST), generadas de la base de datos AVHRR en la región oceánica adyacente al sistema lagunar Bahía Magdalena-Bahía Almejas, con respecto a los valores promedio mensuales (indicados como valor numérico de SST en cada panel). Los paneles corresponden a los meses de (a) mayo, (b) agosto, (c) noviembre y (d) febrero.

Spatial distributions of averaged monthly SST anomalies inside MB were characterized by an increasing gradient oriented towards the southeast during spring and summer (fig. 5a–b), presenting a large contrast between local conditions in the deep and shallow subregions of MB. Negative anomalies covered almost all the MB area when positive anomalies were observed in AB, with maximum values of up to 3°C (in May) and 1.5°C (in August) in the eastern part of AB. This contrast is associated with the heating of the shallow water in MB and especially in AB by solar radiation, and the upwelling-induced influx of cold water passing through the inlet of MB. During autumn and winter (fig. 5c–d), the anomaly fields in MB were more homogeneous; the largest gradients were observed in the distribution of negative anomalies, covering the western part of AB and spreading over the southeast region of MB. Negative anomalies were also observed in February in a small area located in the northwestern part of MB, including the main mouth of MB (fig. 5d). In general, the SST anomaly field in AB during all months had a similar pattern, with the SST gradient oriented from the inlet and Gaviotas Channel towards the northeast of AB.

To understand these spatial effects, the AVHRR SST data were grouped according to subregions, depending on the influence of the physical processes described earlier (fig. 6). In the adjacent oceanic region, an upwelling zone was defined (subregion 2, fig. 6a). Within this latter subregion, a zone of maximum negative SST anomalies was delimited, corresponding to maximum upwelling activity (subregion 3, fig. 6a). The averaged SST in these upwelling subregions (2 and 3) were analyzed independently to determine the seasonal variability of upwelling relative to the seasonal SST variations in the adjacent oceanic region and inside the lagoon system itself. Within the system, the deepest part of MB (>15 m deep), the shallowest part of MB, and AB were assigned subregions 4, 5, and 6, respectively (fig. 6a). The 15-m isobath was chosen to delimit the shallow and deep regions of MB, since the most pronounced bathymetry gradients occur around these depths (fig. 1b). This subdivision was helpful to distinguish the SST pattern of MB separately from that of AB and CZ, as well as the SST contrast between the shallow and deep subregions within MB.

Comparison of the mean SST annual cycles averaged over the period 1996–2001 for the upwelling subregions (2 and 3, fig. 6a) and for their adjacent oceanic region (fig. 6b) revealed significant differences during the period from April to July. The maximum difference (>2°C) occurred in May. We found a minimal difference between SST variability in upwelling zone 3 and in the deep subregion 4 of MB (fig. 6c). It is noticeable that surface water in subregion 3 (maximum negative SST anomaly) was cooler than in subregion 4 only in the period from April to July. The shallow subregion of MB, and especially AB, presented higher SST values (with a maximum difference of 4.5°C in June) relative to subregion 3. Also, the low SST area, observed during the upwelling period at MB, did not occur in the AB annual cycle.

meses presentó un patrón similar, con los gradientes de TSM orientados desde la boca y el Canal de Gaviotas hacia el noreste de BA.

A fin de explicar los contrastes térmicos observados en términos de los distintos procesos dinámicos locales, los datos de TSM-AVHRR se agruparon por subregiones según la influencia de los procesos físicos descritos anteriormente (fig. 6). En la región oceánica adyacente, se especificó una zona de surgencias (subregión 2, fig. 6a). En el interior de esta subregión, se especificó adicionalmente la zona de anomalías máximas de TSM, delimitada en correspondencia con la actividad de surgencias máximas (subregión 3, fig. 6a). Los promedios espaciales de TSM sobre estas subregiones de actividad de surgencias (subregiones 2 y 3) fueron analizados independientemente, a fin de obtener la variabilidad estacional de las surgencias en relación con las variaciones estacionales de TSM en ambas regiones, la región oceánica adyacente y el interior del sistema lagunar. En el interior de este último, la región de mayor profundidad (>15 m) en BM, la región menos profunda de BM y la región completa de BA fueron asignadas como subregiones 4, 5 y 6, respectivamente (fig. 6a). La profundidad de 15 m fue elegida para delimitar las regiones profundas de las someras en BM, debido a que a partir de estas profundidades el gradiente batimétrico es mayor (fig. 1b). Esta subdivisión hizo posible distinguir las características de la variabilidad temporal de TSM en BM independientemente de las de BA y CZ, así como del contraste en TSM entre las subregiones someras y profundas de BM.

La comparación de la media de los ciclos anuales de TSM promediados para el periodo 1996–2001, correspondientes a las zonas de surgencias (subregiones 2 y 3, fig. 6a) y la región oceánica adyacente (fig. 6b), indica diferencias significativas durante el periodo de abril a julio. La máxima diferencia (>2°C) ocurrió en mayo. Se encontró una diferencia mínima en TSM entre la subregión 3 (zona principal de surgencias) y la subregión 4 (profunda) de BM (fig. 6c). Es notable que el agua superficial en la subregión 3 (máxima anomalía negativa de TSM) fue más fría que el de la subregión 4 en el periodo de abril a julio. La región somera de BM, y especialmente BA, presentaron temperaturas mayores que la subregión 3, alcanzando valores máximos de 4.5°C durante el mes de junio. Asimismo, la tendencia de enfriamiento que se presentó durante el periodo de surgencias en la región de BM no se observó en el ciclo anual de BA.

El análisis de TSM promedio de todo el interior de BM-BA mostró que durante el periodo de abril a septiembre el agua superficial del sistema lagunar resultó más cálido que en la región oceánica adyacente, alcanzando una diferencia máxima en junio (hasta 1.3°C). En contraste, para el periodo de octubre a febrero, la TSM media en el interior del sistema lagunar fue menor que el valor medio de TSM en la región oceánica adyacente (hasta 1.5°C en diciembre).

Las diferencias máximas de hasta 1°C registradas entre los promedios mensuales de las subregiones someras y

Analysis of SST averaged over the entire interior of MB-AB showed that during the period from April to September the surface water inside the lagoon was warmer than that in the adjacent ocean, with the maximum difference in June (up to 1.3°C). Contrastingly, for the period from October to February, mean SST inside the lagoon system was lower than that in the adjacent oceanic region (up to approximately 1.5°C in December).

The maximum difference in the annual SST cycle between the shallow and deep subregions of MB was approximately 1°C (June, fig. 6c), confirming that surface water in

profundas, en el interior de BM (fig. 6c, en junio), confirman que las aguas superficiales en la subregión profunda de BM fueron más frías que en la subregión somera de BM, excepto para el periodo de octubre a febrero, cuando se presentó una situación inversa. Por su parte, el ciclo anual de TSM en BA presentó los valores máximos (~27.0°C) en agosto y el valor mínimo (~17.5°C) en febrero.

La variabilidad interanual de las anomalías mensuales de TSM para tres de la zona principal de surgencias, la zona profunda de BM y la zona de BA (subregiones 2, 4 y 6, respectivamente, en fig. 6a), se presentan en la figura 7a en

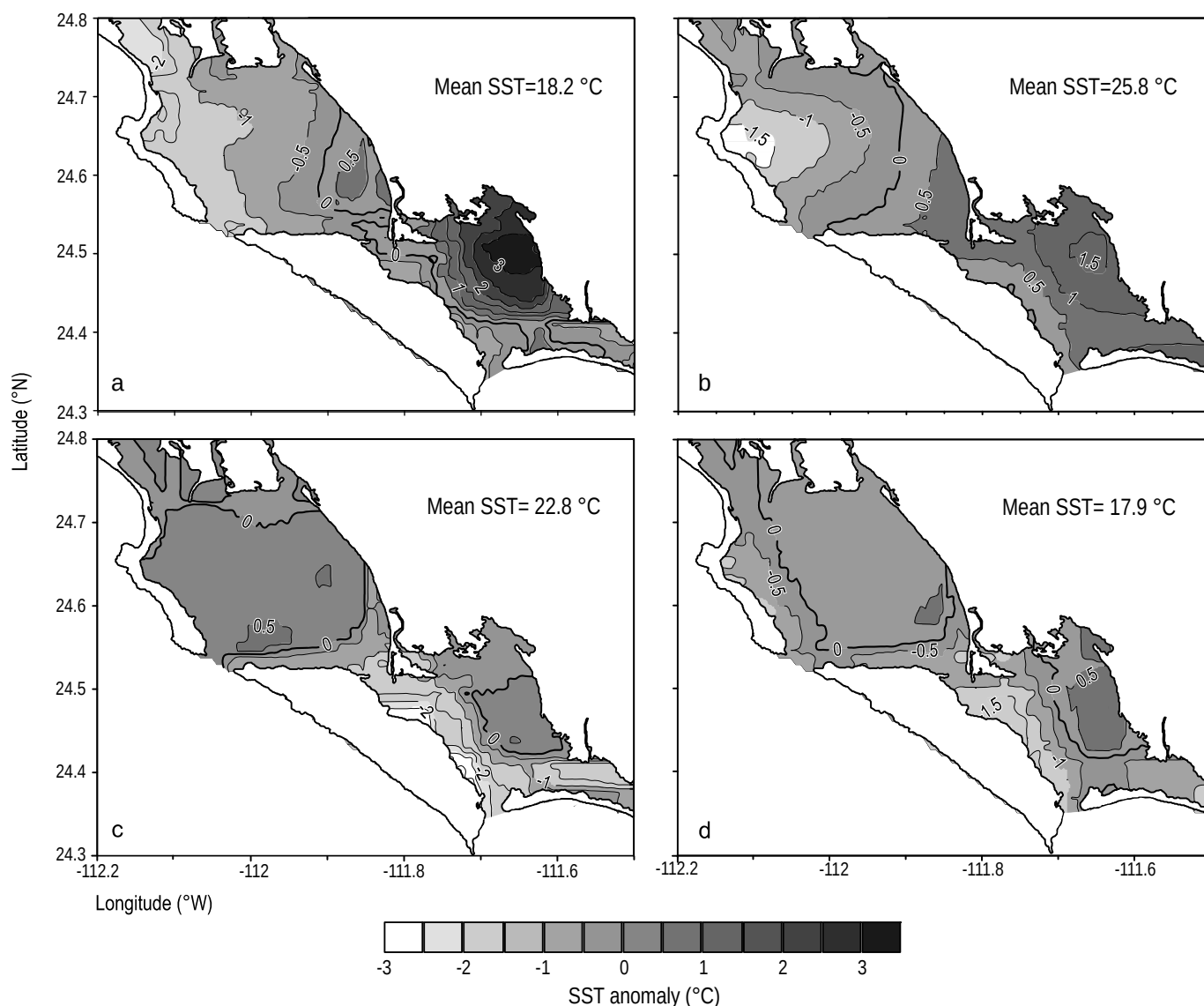


Figure 5. Seasonal variability of the averaged monthly sea surface temperature (SST) anomalies within the Magdalena-Almejas Bay lagoon system, relative to the mean monthly values (indicated as SST in each panel) for the period from 1996 to 2001: (a) May, (b) August, (c) November, and (d) February.

Figura 5. Variabilidad estacional de la distribución de las anomalías promedio mensuales de la temperatura superficial del mar (SST), en el interior del sistema lagunar Bahía Magdalena-Bahía Almejas, con respecto a los valores promedio mensuales (indicados como valor numérico de SST en cada panel) para el periodo de 1996 a 2001. Los paneles corresponden a los meses de (a) mayo, (b) agosto, (c) noviembre y (d) febrero.

the deep subregion was cooler than that in the shallow subregion, except from October to February, when an inverse situation occurred. The SST annual cycle in AB presented the highest temperatures in August ($\sim 27.0^{\circ}\text{C}$) and lowest in February ($\sim 17.5^{\circ}\text{C}$).

The interannual variability of the monthly SST anomalies with respect to the 1996–2001 climatology for the main upwelling subregion, the deep MB subregion, and AB (subregions 2, 4, and 6, respectively, fig. 6a) is presented in figure 7a. Figure 7b shows the corresponding MEI data. There is a significant increase in the SST anomalies during the 1997–1998 El Niño event (fig. 7a), with the most intense positive anomalies in the upwelling area (more than 4°C in June and September 1997). These SST anomalies were caused by changes in the circulation pattern in the adjacent oceanic region, with weakening winds and decreased upwelling activity (Durazo and Baumgartner 2002, Palomares-García *et al.* 2003). Maximum negative anomalies were present in AB during the 1999–2001 La Niña event (as much as -4°C in May 1999, May–June 2000, and June–July 2001).

The spatial distributions obtained during three field surveys show SST patterns (fig. 8, left panels) similar to those described above (fig. 5), with a positive gradient oriented from the MB inlet towards the shallow part of MB and from Gaviotas Channel towards the eastern part of AB, as well as salinity patterns (fig. 8, right panels). Minimum values for both variables were located in the vicinity of the MB inlet. The contrast between the deep- and shallow-water characteristics of MB was more intense during the upwelling period, as observed in the April 2000 survey (fig. 8a).

Vertical sections of temperature and salinity inside the lagoon system in February 2001 (fig. 9) showed that vertical stratification occurred in the deepest part of MB, adjacent to the bay entrance, extending to the middle of MB. In the rest of the lagoon complex, with depths less than 15 m, the vertical structure is almost homogeneous and the vertical gradients are small and local. Similar vertical homogeneity in the shallow areas was also observed during the April 2000 and November 2001 surveys. This distribution indicates the presence of intense vertical mixing probably caused by the interaction of tidal flow, bottom friction, and wind waves. The shaded area in figure 9 (top panel) corresponds to the area that showed vertical stratification associated with the influence of the adjacent ocean.

Figure 10 shows the surface distribution of density excess during the April 2000, February 2001, and November 2001 surveys. The distribution pattern for April 2000 (fig. 10a) shows density gradients oriented from the shallow regions towards the deeper regions, reaching maximum values close to the MB inlet. During the November 2001 survey (fig. 10b) the surface density distribution was practically uniform, with nonsignificant maximum values in the vicinity of San Carlos Channel and at the MB mouth. In February 2001 (fig. 10c) the surface water was most dense in CZ and AB because of increased salinity probably due to intense evaporation.

relación con los indicadores climáticos durante el periodo de 1996 a 2001. La figura 7b muestra los valores de MEI correspondientes. Con base en estos valores se observó un incremento significativo en las anomalías de TSM durante el evento de El Niño 1997–1998 (fig. 7a), particularmente en la variación correspondiente a la zona principal de surgencias (anomalías positivas mayores que 4°C en junio y septiembre, 1997). Estas anomalías de TSM se asociaron con las variaciones en el patrón de circulación en la región oceánica adyacente, características de una disminución en la intensidad del viento y un decremento en la actividad de surgencias (Durazo y Baumgartner 2002, Palomares-García *et al.* 2003). Recíprocamente, se presentaron anomalías máximas negativas en la región de BA durante el evento La Niña de 1999–2001 (hasta de -4°C en mayo de 1999, mayo–junio de 2000 y junio–julio de 2001).

Las distribuciones espaciales obtenidas a partir de las mediciones en tres campañas muestran patrones de TSM (fig. 8, paneles de la izquierda) similares a los anteriormente descritos (fig. 5), con los gradientes positivos desde la boca hacia las regiones someras de BM y desde el Canal Gaviotas hacia la región este en BA, así como los patrones de salinidad (fig. 8, paneles de la derecha). Los valores mínimos de ambas variables se localizan en una vecindad cercana a la boca de BM. El contraste en TSM entre la región profunda y la región somera de BM es más evidente durante el periodo de surgencias, como se observa en la campaña de abril de 2000 (fig. 8a).

Secciones verticales de temperatura y salinidad en el interior del complejo lagunar en febrero de 2001 (fig. 9) mostraron que la estratificación vertical se observó en la parte más profunda de BM, adyacente a la entrada de la bahía, extendiéndose hasta la mitad de la bahía. En el resto del complejo lagunar, con profundidades menores que 15 m, la estructura vertical fue prácticamente homogénea con gradientes verticales pequeños y locales. Una homogeneidad vertical muy semejante en las áreas someras fue también observada durante las campañas de abril de 2000 y noviembre de 2001. Esta distribución indica la presencia de una intensa mezcla vertical, causada probablemente, por la interacción del flujo de la marea y la fricción del fondo, además del oleaje generado por el viento. El área sombreada en la figura 9 (panel superior) es indicativa de la zona en la que se observó una estratificación asociada a la interacción dinámica con la región oceánica adyacente.

La figura 10 muestra las distribuciones del exceso de densidad durante las campañas de abril de 2000, febrero de 2001 y noviembre de 2001. El patrón de distribución en abril de 2000 (fig. 10a) presenta gradientes de densidad orientados desde las regiones someras hacia las profundas, alcanzándose los valores máximos en una vecindad cercana a la boca de BM. Sin embargo, durante noviembre de 2001 (fig. 10b) la distribución superficial de la densidad fue prácticamente uniforme con valores máximos, sin significancia numérica, en la región del Canal San Carlos y la boca de BM.

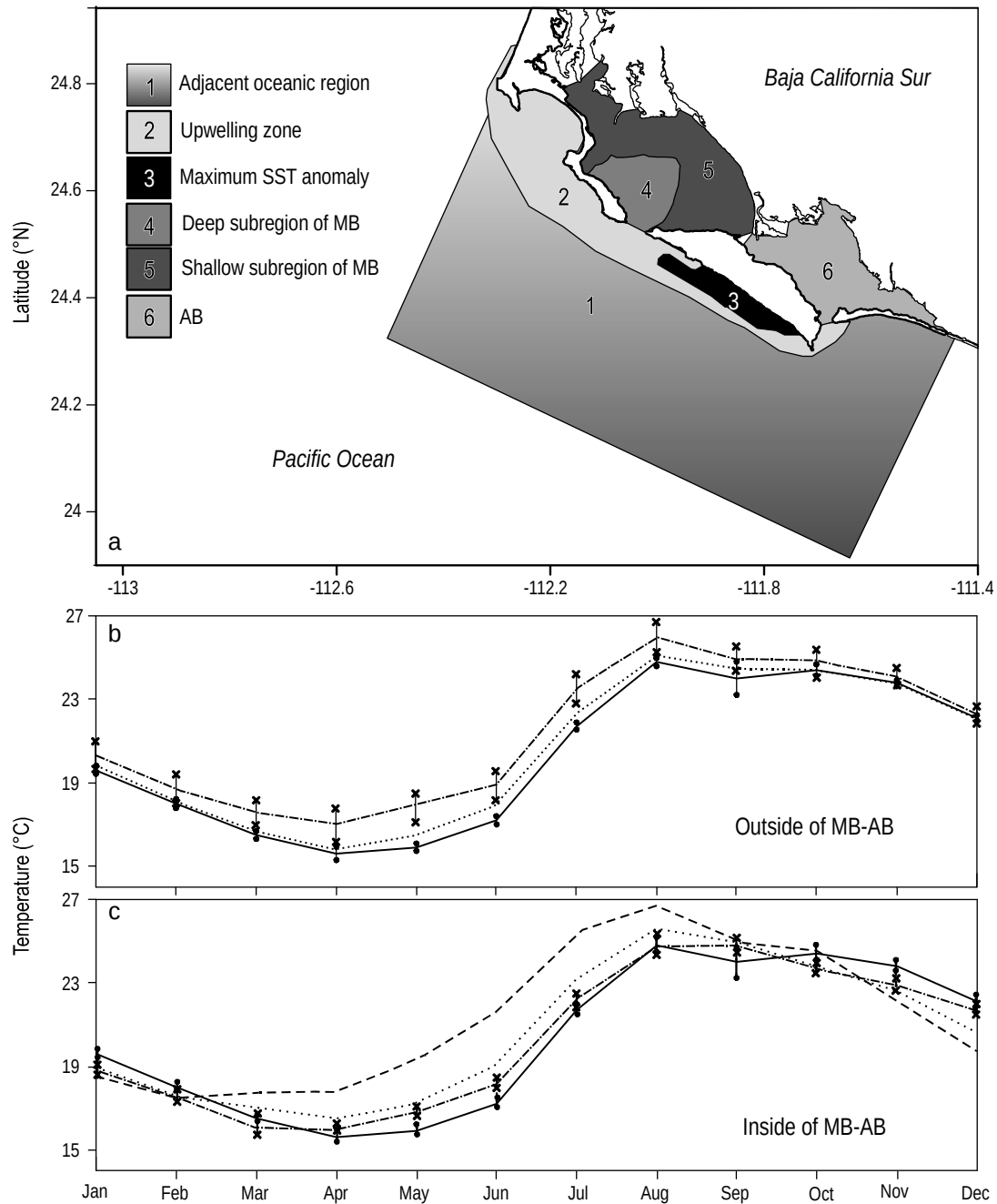


Figure 6. (a) Regional subdivision of the study area. (b, c) Mean annual sea surface temperature (SST) cycles corresponding to each of the subregions, based on the 1996–2001 AVHRR averaged monthly data. Panel (b) shows the mean cycles over the zone of maximum negative SST anomaly (solid line), the whole local upwelling zone (dotted line), and the adjacent oceanic region (dot-dashed line). Panel (c) shows the mean cycles over the deep subregion of Magdalena Bay (MB), close to the bay’s mouth (dot-dashed line), the shallow subregion of MB (dotted line), the entire Almejas Bay (AB, dashed line), and for reference, the zone of maximum SST anomaly (solid line). The vertical intervals indicate the associated 95% confidence intervals, with thick dots for the main upwelling zone (maximum negative SST anomaly) and crosses for the adjacent oceanic region (panel b) and for the deep subregion of MB (panel c).

Figura 6. (a) Subdivisión del área de estudio. (b, c) Ciclos medios anuales de la temperatura superficial del mar (SST) correspondientes a cada una de las subregiones, con base en las imágenes AVHRR mensuales promedio de 1996 a 2001. El panel (b) muestra los ciclos medios sobre la zona de máxima anomalía negativa de SST (línea sólida), toda la zona local de surgencias (línea discontinua) y la región oceánica adyacente (línea discontinua con puntos). El panel (c) muestra los ciclos medios sobre la subregión profunda de Bahía Magdalena (MB), cerca de la boca de la bahía (línea discontinua con puntos), la subregión somera de MB (línea punteada), toda la Bahía Almejas (AB, línea discontinua) y, como referencia, la zona de máxima anomalía de SST (línea sólida). Los intervalos verticales indican el intervalo de confianza de 95% en cada caso, distinguiendo para la zona principal de surgencia (máxima anomalía negativa de SST) con puntos, y para la región oceánica adyacente (panel b) y la subregión profunda de BM (en panel c) con cruces.

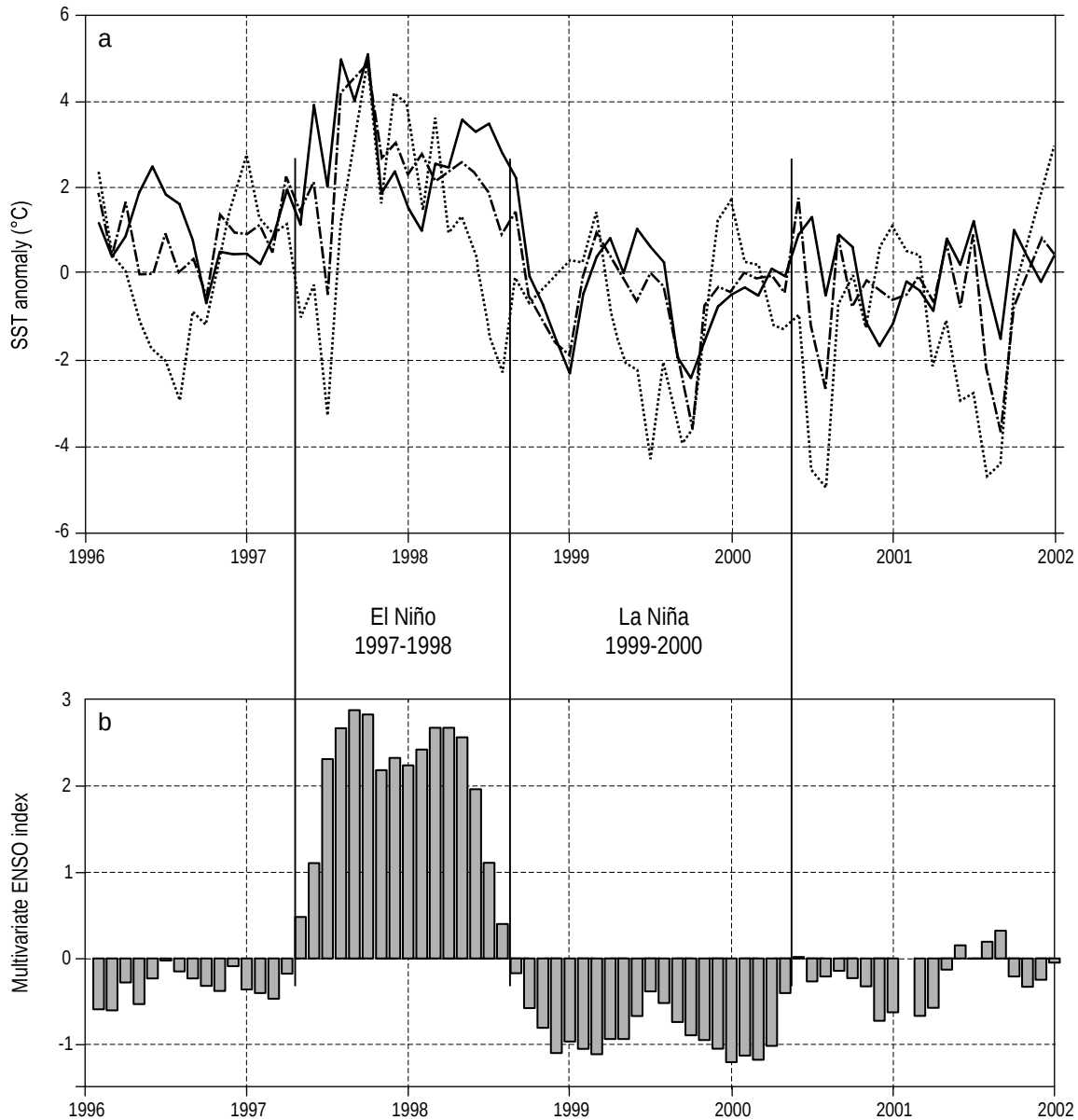


Figure 7. (a) Interannual variability of sea surface temperature (SST) anomaly generated from AVHRR satellite images during the period from 1996 to 2001 for the upwelling zone (solid line), the deep subregion of Magdalena Bay (dot-dashed line), and the interior of Almejas Bay (dotted line). **(b)** Corresponding multivariate ENSO Index (MEI).

Figura 7. (a) Serie de tiempo interanual, generada a partir de las imágenes satelitales AVHRR para el periodo de 1996 a 2001, de las anomalías promedio de la temperatura superficial del mar (SST) correspondiente a la zona principal de surgencias (línea sólida), la subregión profunda de Bahía Magdalena (línea cortada con puntos) y la región de Bahía Almejas (línea punteada). **(b)** Datos correspondientes del Índice Multivariado de ENSO (MEI).

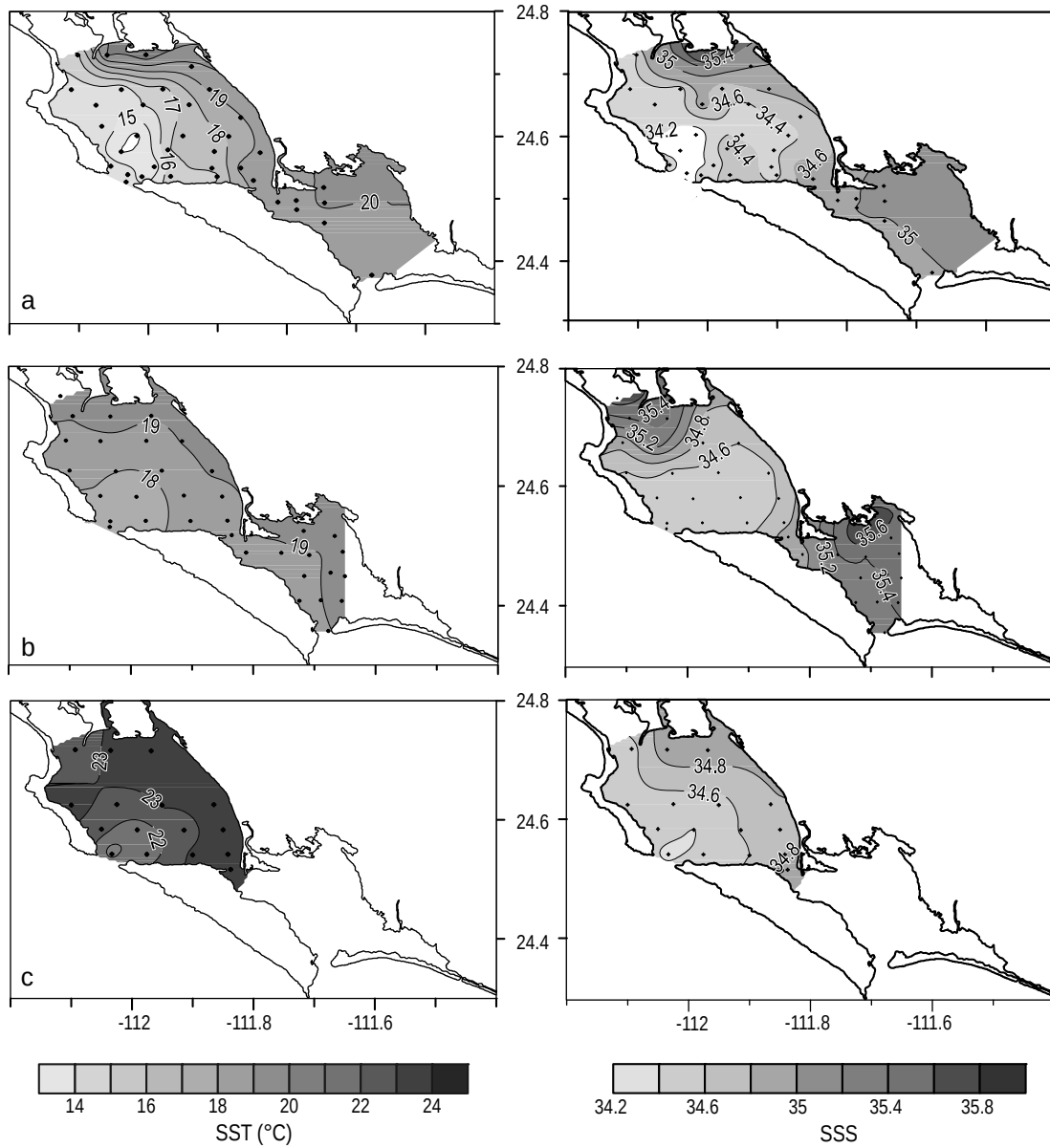


Figure 8. Spatial distributions of sea surface temperature (SST, left) and salinity (SSS, right) inside the Magdalena-Almejas Bay lagoon system. Data were obtained from CTD casts during the surveys conducted in (a) April 2000, (b) February 2001, and (c) November 2001.

Figura 8. Distribuciones espaciales de la temperatura superficial del mar (SST, izquierda) y de salinidad (SSS, derecha) del interior del sistema lagunar Bahía Magdalena-Bahía Almejas. Los datos fueron obtenidos mediante el lance vertical del instrumento de medición CTD en las campañas oceanográficas realizadas en (a) abril de 2000, (b) febrero de 2001 y (c) noviembre de 2001.

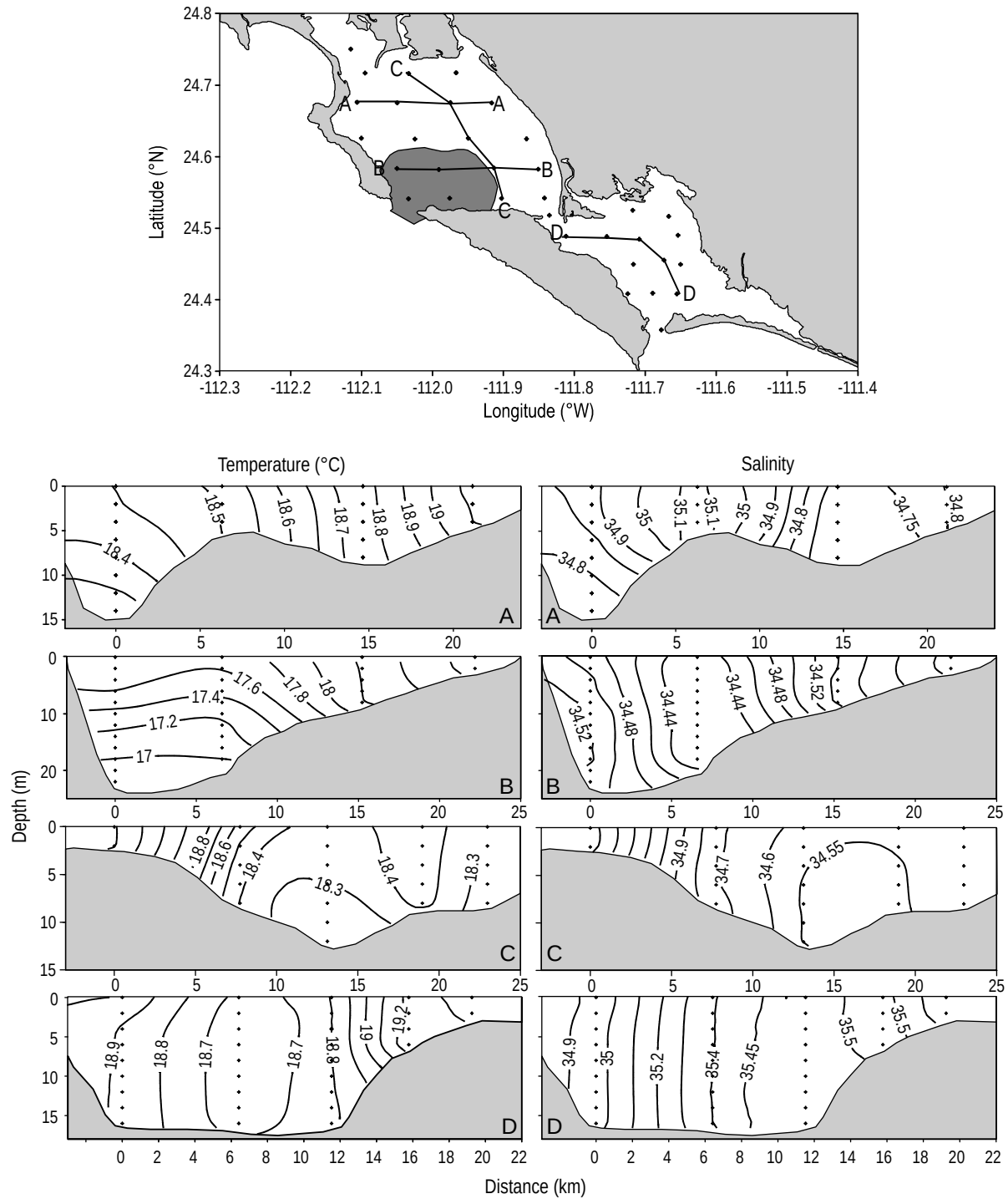


Figure 9. Vertical sections of temperature (left panels) and salinity (right panels) within the Magdalena-Almejas Bay lagoon system. Data were obtained during the February 2001 survey by CTD casts made along the transects indicated in the top panel (letters). The shaded area indicates the region close to the main mouth where stratification effects were recorded. Dots indicate the location of CTD profiles.

Figura 9. Secciones verticales de temperatura (paneles de la izquierda) y salinidad (paneles de la derecha) en el interior del complejo lagunar Bahía Magdalena-Bahía Almejas. Los datos se obtuvieron durante la campaña de febrero de 2001 mediante lances de CTD realizados en los transectos indicados en el grafico superior (letras). El área sombreada muestra la región cerca de la boca principal en la cual se registraron los efectos de estratificación. Los puntos indican la ubicación de los perfiles CTD.

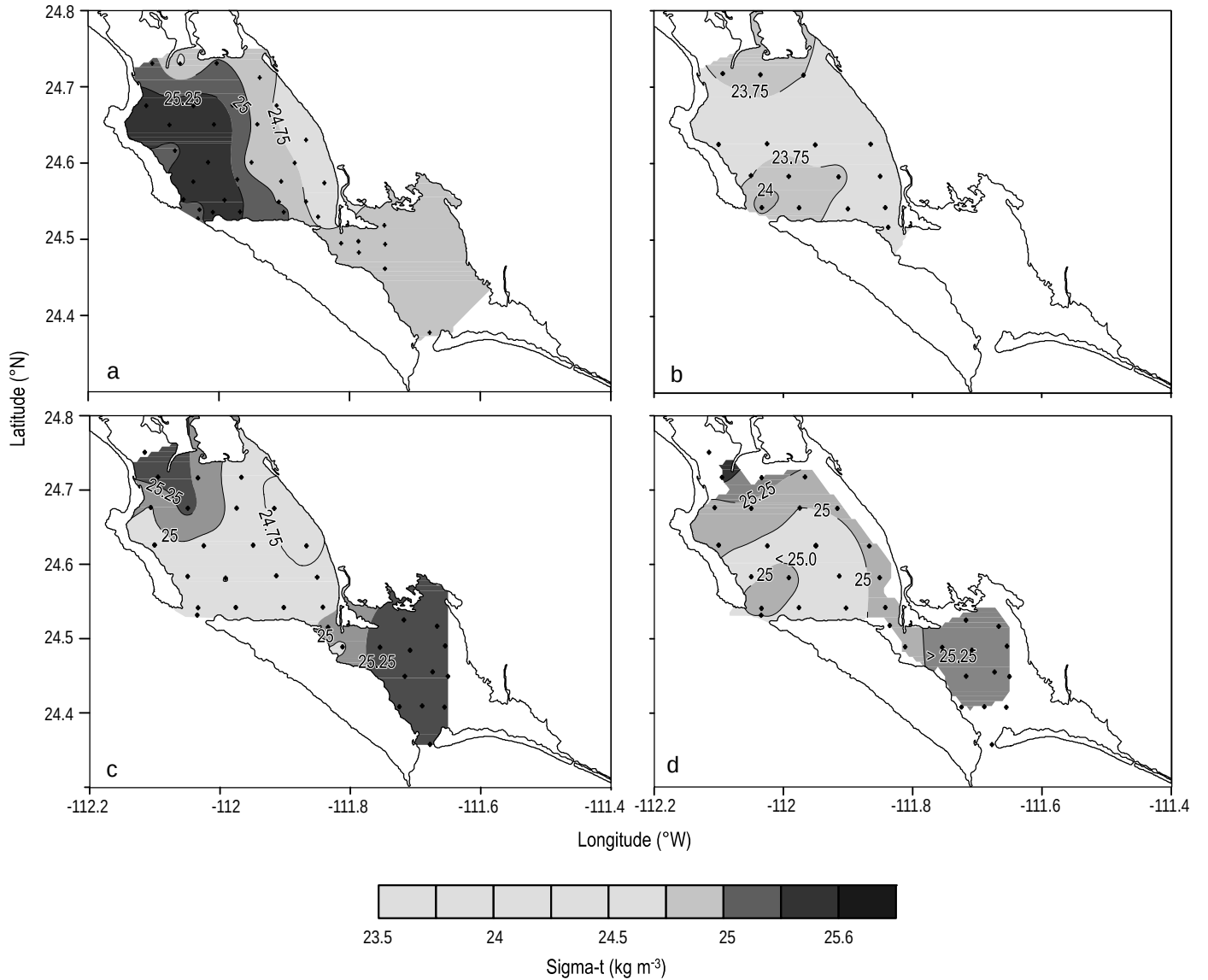


Figure 10. Density excess distribution (sigma-t) inside the Magdalena-Almejas Bay lagoon system in (a) April 2000, (b) November 2001, and (c) February 2001 at the surface, and in (d) February 2001 at 5 m depth.

Figura 10. Distribuciones del exceso de densidad (sigma-t) correspondiente al interior del sistema lagunar Bahía Magdalena-Bahía Almejas registrados en la superficie durante las campañas de (a) abril de 2000, (b) noviembre de 2001 y (c) febrero de 2001, y a la profundidad de 5 m en (d) febrero de 2001.

Despite the small variability in density found in the subsurface layer at 5 m depth (fig. 10d), these results show that the surface conditions in the study area were more uniform in the autumn and winter than during the rest of the year.

Currents measured by an acoustic Doppler current profiler (ADCP) during maximum flood and ebb on 24 March 2003 across the entrance to MB are shown in figure 11. The across-mouth currents during the flood tide (fig. 11a) were somewhat asymmetric, with a core of elevated intensities (up to 1.1 m s^{-1}) in the eastern part of the MB mouth, while the current distribution during ebb tide (fig. 11b) was more uniform and intensities did not exceed 1 m s^{-1} . It is notable that, in general, the maximum currents were recorded at mid-depth in the 8–15 m layer. Surface currents were in the range of 0.5 to 0.7 m s^{-1} that can be caused by wind stress. Current velocity in the bottom layer did not exceed 0.7 m s^{-1} , which concurs with measurements taken by the near-bottom current meter (fig. 3). Instantaneous transport through the cross-sectional area was $172,000$ and $161,700 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ for maximum flood and ebb, respectively.

DISCUSSION AND CONCLUSIONS

The AVHRR SST data show that the surface water inside the lagoon was warmer than in the adjacent ocean (up to 1.3°C in June) during the period from April to September, when upwelling decreased SST in the adjacent region. During the period from October to February the surface water inside the lagoon system was cooler than in the adjacent oceanic region (by approximately 1.5°C) because of winter cooling.

Analysis of SST spatial distributions in the adjacent oceanic region indicated the existence of a well-defined coastal upwelling pattern during the spring and summer period (fig. 4a–b). This upwelling activity caused the presence of cold subsurface water in front of the MB inlet. The SST distributions inside the lagoon system (figs. 5a–b, 8a) showed that horizontal thermal gradients were more intense during spring and summer, when upwelling activity directly affected the deep water of MB and also the temperature of surface waters close to the MB mouth due to vertical mixing, while solar radiation heated the shallow water of MB and AB. These two factors caused thermal differences between the deep and shallow areas of the lagoon system.

The CTD profiling data showed that, because of vertical homogeneity, most of the MB-AB lagoon system (approximately 70% of the lagoon area) can be considered well mixed, especially in shallow waters (fig. 10). Hence, the surface distribution of the thermohaline parameters may be representative for estimating the mean hydrographic properties of most of this lagoon system. The stratification in the deep subregion close to the MB inlet showed well-defined seasonal variability. In winter, when the main thermocline is generally located deeper than the maximum

En febrero de 2001 (fig. 10c) el agua superficial presentó una mayor densidad en las regiones de ZC y BA debido a un incremento en la salinidad probablemente inducido por una intensa evaporación. A pesar de las variaciones pequeñas de la densidad observadas en la profundidad de 5 m (fig. 10d), estos resultados demuestran que las condiciones superficiales en BM-BA se presentaron con mayor uniformidad durante el otoño e invierno que en el resto del año.

En la figura 11 se muestran las corrientes medidas con un perfilador de corrientes acústico Doppler (ADCP) durante las fases del flujo y reflujo máximos de marea del 24 de marzo de 2003, a través de una sección transversal a la boca de BM. La distribución durante el flujo de marea (fig. 11a) mostró una estructura asimétrica a lo largo del transecto, con un núcleo de intensidades máximas (hasta de 1.1 m s^{-1}) en la parte oriental de la entrada de BM. La distribución de las corrientes registradas durante el reflujo de marea (fig. 11b) presentó una mayor uniformidad y las intensidades no excedieron de 1 m s^{-1} . Es notable que, en general, las corrientes máximas se concentraron en medio de la columna de agua, en la capa de 8 a 15 m de profundidad. Las intensidades de las corrientes superficiales se encontraron en un rango de 0.5 a 0.7 m s^{-1} , probablemente moduladas por el forzamiento del viento. Las corrientes del fondo no superaron la intensidad de 0.7 m s^{-1} , lo cual es consistente con los datos obtenidos por medio de un corrientímetro instalado en el fondo (fig. 3). Los flujos instantáneos de transporte de agua, calculados mediante la integración de las corrientes en el área de la sección, fueron iguales a $172,000$ y $161,700 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para el flujo y el reflujo máximos de marea, respectivamente.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los datos de TSM de las imágenes AVHRR muestran que las aguas superficiales en el interior del sistema lagunar fueron más cálidas que las de la región oceánica adyacente durante el periodo de abril a septiembre (con diferencia máxima de 1.3°C en junio), cuando las surgencias indujeron una disminución de TSM en la región oceánica adyacente. Durante el periodo de octubre a febrero las aguas superficiales en el interior del sistema lagunar fueron más frías que las de la región oceánica adyacente (en aproximadamente 1.5°C) debido al enfriamiento invernal de la superficie marina.

El análisis de las distribuciones espaciales de TSM en la región oceánica adyacente indica la existencia de un patrón bien definido de surgencias costeras durante el periodo de primavera-verano (fig. 4a–b). Esta actividad de surgencias induce la presencia de aguas frías subsuperficiales frente a la boca de BM. Las distribuciones de TSM en el interior del sistema lagunar (figs. 5a–b, 8a) indican que los gradientes horizontales térmicos se presentaron con mayor intensidad durante la primavera y el verano, cuando la actividad de surgencias afectó directamente las aguas de la región profunda de BM y también la TSM en esta zona mediante la mezcla vertical, mientras que la irradiación solar incrementó

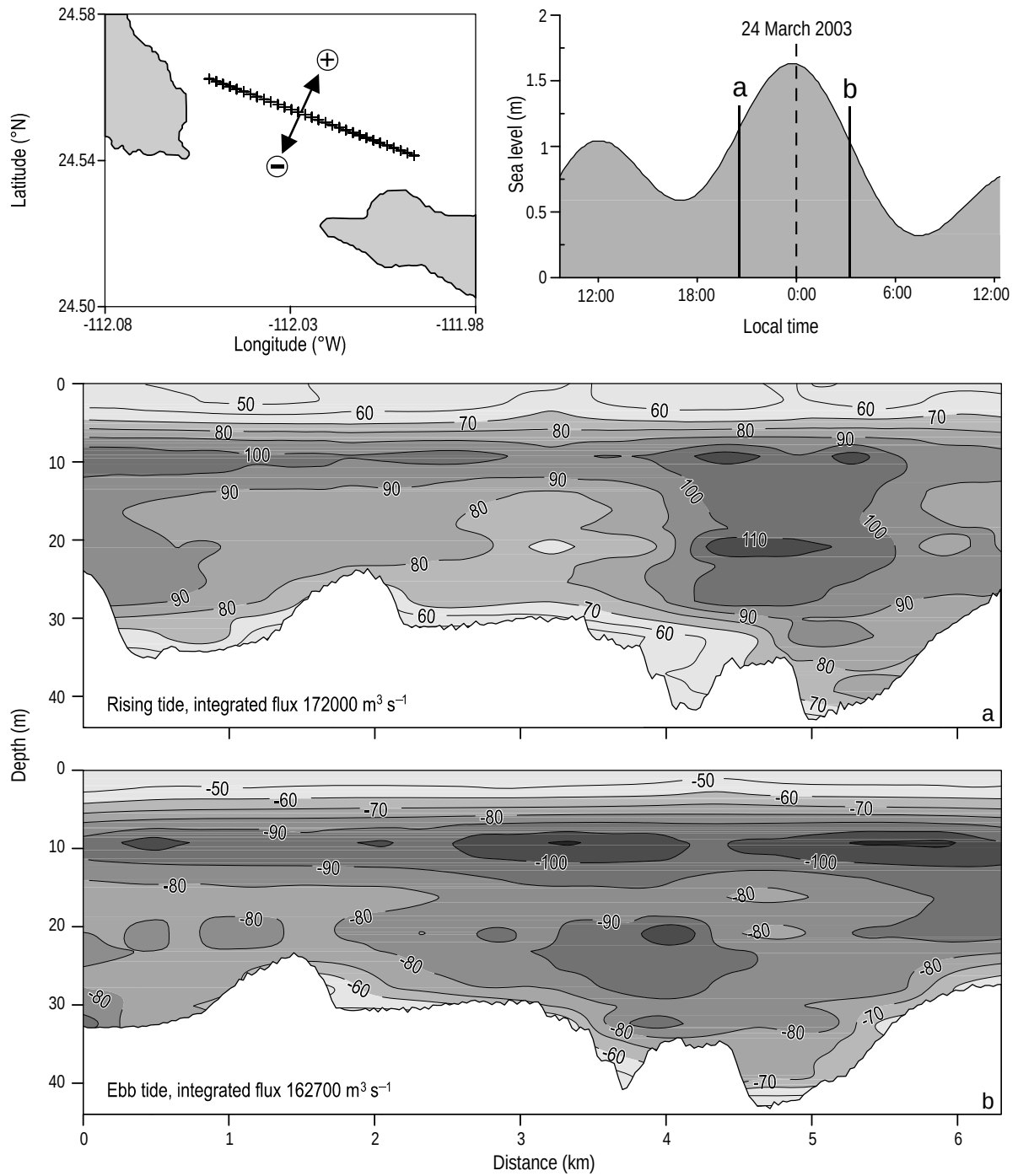


Figure 11. Normal components of currents in a cross section near the mouth of Magdalena Bay during (a) the maximum flow of the tide and (b) maximum ebb tide. The acoustic Doppler current profiler data were obtained during the March 2003 survey. Transect location and measurement times are shown in the upper charts.

Figura 11. Componentes normales de las corrientes a lo largo de una sección transversal cerca de la boca de la Bahía Magdalena durante (a) el flujo máximo de marea y (b) el refluo máximo de marea. Los datos del perfilador de corrientes acústico Doppler se obtuvieron durante la campaña de marzo de 2003. La localización del transecto y el tiempo de mediciones se muestran en los gráficos superiores.

depth of the MB inlet (>45 m), adjacent surface ocean water that is transported into MB by tides belongs to the well-mixed surface layer and does not greatly affect vertical homogeneity in the deep region of MB. During spring and summer, the rise of the thermocline to the surface, associated with both surface heating and coastal upwelling, acts together with tidal water transport to produce a near-bottom inflow of upwelled cold water into MB during the rising tide. As a result of this coupling process, a vertical stratification in the deep subregion of MB is established. The influence of this oceanic forcing was observed in the SST distribution as far as the middle of MB (figs. 8a, 9).

Two possible mechanisms of transport of deep and dense water through the MB inlet are discussed: density-driven estuarine-type circulation and tidal forcing. It is unlikely that buoyancy effects caused much of the net inflow of cold water in spring. Water column stratification observed in the deep subregion of MB generally remained within the same subregion and disappeared toward the center of MB because of high tidal currents (fig. 11) over the rocky seabed and topography gradients. Some noticeable salinity excesses due to evaporation, which may be considered a mechanism of density-driven flow, were only observed in the CZ and in the shallow part of AB (figs. 8 [right panels], 10). This salinity excess was partially compensated by local heating (fig. 8, right panels). Except for these areas, density distribution was practically homogeneous in most of MB (fig. 9). These conditions are not favorable for the development of noticeable density-driven circulation in the lagoon system.

Tidal forcing of upwelled cold water inflow appears, hypothetically, to be a more likely forcing mechanism. Mixed tides have a certain asymmetry in time, since during the transition from spring tide (syzygy) to neap tide (quadrature) the length and amplitude of consecutive ebbs and flows were often different (Pugh 1987). Therefore, a temporal net flow is generated during certain periods of time (several tidal cycles), directed into (or out of) coastal bodies of water depending on the phase of the tidal lunar cycle. Such asymmetry between the ebb and the flow are particularly evident in figure 11 (upper right panel). Averaging over a lunar tidal cycle, these "residual" flows tend to compensate each other. Also, topographic effects in the area of the MB mouth determine the asymmetric spatial distribution of tidal currents in the inlet section and different patterns of ebb and flow, as observed in figure 11.

Cold water is transported into MB through the bottom layer during the flood. High-intensity flood tidal current during spring tide (up to 0.7 m s^{-1} in the bottom layer and up to 1.1 m s^{-1} in the middle of the water column, fig. 11) induces intense vertical mixing over the shoaling bottom toward the center of MB (fig. 1b), decreasing the mean temperature of the water column and, to a certain extent, the SST. Due to horizontal mixing and tidal current asymmetry (temporal and spatial) some of this cold water can mix with the internal

la temperatura de aguas someras de BM. Estos factores indujeron un marcado contraste térmico entre las aguas de las regiones profundas y someras del sistema lagunar.

Los datos obtenidos de los perfiles verticales de CTD, en los que se observó una homogeneidad vertical en la mayor parte del sistema lagunar BM-BA (aproximadamente el 70% del área de la laguna), caracterizan al sistema lagunar como un cuerpo de agua bien mezclado, especialmente en aguas de las regiones someras (fig. 10). Por tanto, la distribución superficial de los parámetros termohalinos puede ser representativa para estimar las propiedades hidrológicas medias de la mayor parte del sistema lagunar. La estratificación que se presentó en la subregión profunda de BM, cerca de la boca principal, presentó una variabilidad estacional bien marcada. En el invierno, cuando la termoclina principal generalmente se encuentra a una profundidad mayor que la de la boca de BM (>45 m), las aguas superficiales de la región oceánica adyacente que son transportadas hacia el interior de BM por el efecto de marea pertenecieron a la capa superficial de mezcla y no afectaron mucho la homogeneidad vertical de la zona profunda de BM. En cambio durante la primavera y el verano el ascenso de la termoclina hacia la superficie, asociado al calentamiento de aguas superficiales y a la actividad de surgencias costeras, actúa en conjunto con el flujo de la marea para producir un influjo de las aguas frías provenientes de capas profundas de la región oceánica adyacente hacia el interior de BM. Como resultado de este proceso acoplado, se estableció una estratificación vertical en las aguas profundas de BM. Este forzamiento oceánico, observado en la distribución de TSM, tiene una influencia que afecta prácticamente a la mitad del área superficial de BM (figs. 8a, 9).

Los dos posibles mecanismos mediante los cuales se efectúa el transporte de aguas oceánicas frías y densas a través de la boca de BM son: el transporte dirigido por los gradientes de densidad y el transporte por marea. Es poco probable que el influjo neto de agua fría en primavera y verano sea provocado por efectos de densidad. La estratificación observada en la subregión profunda de BM se mantuvo, en general, dentro de la misma subregión y desapareció hacia el centro de BM en las condiciones de intensa mezcla vertical, la cual resulta de la interacción de las fuertes corrientes de marea (fig. 11) con el fondo rocoso y gradientes de topografía. Algunos de los incrementos locales de salinidad, asociados a los procesos de evaporación, se observaron únicamente en ZC y la región somera de BA (figs. 8 [panel derecho], 10). Este exceso de salinidad es parcialmente compensado por un calentamiento local (fig. 8, panel derecho). A excepción de estas regiones, el campo de densidad en el interior del sistema lagunar fue prácticamente homogéneo en la mayor parte de BM (fig. 9). Estas condiciones no son favorables para el desarrollo de circulación gravitacional notable.

La hipótesis del comportamiento de marea en el transporte de aguas subsuperficiales frías hacia el interior de BM es consistentemente más probable. Las mareas de carácter

waters and does not leave MB during the next ebb tide, forming a “residual” inflow and an area of low SST close to the inlet (fig. 8a).

Owing to the shallowness of the AB inlet, there was no inflow of cooler subsurface oceanic water; therefore, the only stratification (smaller than 1°C) presented in AB was associated with the daily cycle of solar radiation.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was supported by grants from the Graduate Studies and Research Secretariat (SIP) of the National Polytechnic Institute (IPN, Mexico, research projects 20.01 and 20031396). Fieldwork aboard the R/V *El Puma* was supported by the Mexican Council for Science and Technology (CONACYT). The scholarship granted by CONACYT and the support provided by PIFI-IPN through the doctorate program to O Sánchez-Montante is acknowledged. We thank the Oceanography Department of ICMYL-UNAM and especially C Robinson-Mendoza for providing the ADCP data for March 2003, as well as E Martínez, R Rodríguez, and A Gallegos who gave us access to the AVHRR satellite images, which were previously processed under the OPOS project of LOF/ICMyC. Finally, we are grateful to the anonymous reviewers for their helpful comments and suggestions.

REFERENCES

- Acosta-Ruiz MJ, Lara-Lara JR. 1978. Resultados fisicoquímicos en un estudio de variación diurna en el área central de Bahía Magdalena, BCS. *Cienc. Mar.* 5: 37–45.
- Álvarez-Borrego S, Galindo-Bect LA, Chee-Barragán A. 1975. Características Hidrodinámicas de Bahía Magdalena, BCS. *Cienc. Mar.* 2: 94–109.
- Bakun A, Nelson CS. 1977. Climatology of upwelling related processes off Baja California. *CalCOFI Rep.* 19: 107–127.
- Bowden KF. 1983. *Physical Oceanography of Coastal Waters*. Ellis Horwood Ltd., Chichester, 302 pp.
- Durazo R, Baumgartner TR. 2002. Evolution of oceanographical conditions off Baja California: 1997–1999. *Prog. Oceanogr.* 54: 7–31.
- Durazo R, Soto L, Ramírez AM, Baumgartner TR. 2002. Hydrographic variability along the northeastern Mexican Pacific. *Invest. Mar.* 30: 87–89.
- García-Escobar H. 1993. Análisis del viento frente a Bahía San Hipólito y el área comprendida entre Bahía Magdalena y Cabo San Lucas, BCS, en junio y julio de 1989. *Invest. Mar. CICIMAR* 8: 95–96.
- Gómez-Gutiérrez J, Robinson C. 2006. Tidal current transport of epibenthic swarms of the euphausiid *Nyctiphanes simplex* in a shallow subtropical bay in Baja California Sur, Mexico. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 320: 215–231.
- Lluch-Belda D, Hernández-Rivas M, Saldierna-Martínez R, Guerrero-Caballero R. 2000. Variabilidad de la temperatura superficial del mar en Bahía Magdalena. *Oceanides* 15: 1–23.
- Obeso-Nieblas M, Gaviño-Rodríguez JH, Jiménez-Illescas AR. 1999. Modelación de la marea en el sistema lagunar Bahía Magdalena-Almejas, BCS, México. *Oceanides* 14: 79–98.

mixto tienen una cierta asimetría en el tiempo, expresada en el hecho de que durante la transición de la marea viva (sicigia) a marea muerta (cuadratura) la duración y la amplitud de los flujos y reflujos consecutivos fueron diferentes (Pugh 1987). Por lo tanto, durante ciertos periodos de tiempo (varios ciclos de marea) se generó un flujo neto temporal de agua dirigido hacia dentro (o fuera) del cuerpo de agua costera. La dirección de este flujo neto depende de la fase del ciclo lunar de la marea. En particular, esta asimetría temporal entre el flujo y reflujo se observa en la figura 11. Con un promedio del ciclo lunar de la marea, estos flujos se compensan. También, los efectos topográficos en la zona de la boca de BM determinan la distribución espacial asimétrica de las corrientes de marea en la sección de entrada y diferentes patrones de flujo y reflujo, como se muestra en la figura 11.

Aguas frías subsuperficiales son transportadas al interior de BM durante las fases de flujo de la marea. Las corrientes intensas registradas durante el flujo de la marea viva (desde 0.7 m s⁻¹ en la capa del fondo hasta 1.1 m s⁻¹ en la columna de agua, fig. 11) indujeron una mezcla vertical intensa como resultado de la interacción con la pendiente del fondo hacia la zona céntrica de BM (fig. 1b), disminuyendo la temperatura en la columna de agua y, en cierta medida, la TSM. Debido a la mezcla horizontal y la asimetría (temporal y/o espacial) de las corrientes de marea, cierta cantidad de esta agua fría puede mezclarse en el interior de BM con las aguas internas y no salir durante la fase siguiente de reflujo, formando un flujo “residual” y dando origen a regiones localizadas de mínima TSM dentro de BM (fig. 8a).

Debido a la escasa profundidad en la boca de BA, no existe un influjo de aguas profundas oceánicas, por lo que las únicas estratificaciones (menores que 1°C) que se presentaron en BA se asociaron con el ciclo diario de radiación solar.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue apoyada por la Secretaría de Investigación y Posgrado (SIP) del Instituto Politécnico Nacional (IPN, México, proyectos de investigación 20.01 y 20031396). Los trabajos a bordo del B/O *El Puma* fueron apoyados por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). Se reconoce la beca de grado del CONACYT y el apoyo del PIFI-IPN otorgados a O Sánchez-Montante a través del programa de doctorado. Se agradece atentamente al departamento de Oceanografía Física del ICMYL-UNAM, y especialmente a C Robinson-Mendoza, quien proporcionó los datos de ADCP para marzo de 2003. Asimismo, se agradece muy sinceramente a E Martínez, R Rodríguez y A Gallegos, quienes facilitaron el acceso a las imágenes satelitales de AVHRR, cuyo procesamiento previo fue realizado dentro del proyecto OPOS del LOF/ICMyC. Finalmente, se agradece a dos revisores anónimos por sus valiosos comentarios y sugerencias.

- Palomares-García R, Martínez-López A, De Silva-Dávila R, Funes-Rodríguez R, Carballido-Carranza MA, Avedaño-Ibarra R, Inojosa-Medina A, López-Ibarra GA. 2003. Biological effects of El Niño 1997–98 on a shallow subtropical ecosystem: Bahía Magdalena, Mexico. *Geofís. Int.* 42: 455–466.
- Pugh DT. 1987. *Tides, Surges and Mean Sea-Level*. John Wiley, Hoboken, NJ, 472 pp.
- Robinson CJ, Gómez-Aguirre S. 2004. Tidal use by the red crab *Pleuroncodes planipes* in Bahía Magdalena, Mexico. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 308: 237–252.
- Sánchez-Montante O, Zaitsev O, Saldivar-Reyes M. 2007. Condiciones hidrofísicas en el sistema lagunar Bahía Magdalena-Almejas. In: Funes-Rodríguez R, Gómez-Gutiérrez J, Palomares-García R (eds.), *Estudios Ecológicos en Bahía Magdalena*. Ed. Instituto Politécnico Nacional, La Paz, México, pp. 1–28.
- Schwartzlose RA, Reid Jr JL. 1972. Near-shore in the occidental California Current. *CalCOFI Rep.* XVI: 57–66.
- UNAM. 1985. *Tablas de Predicción de Mareas*. Universidad Nacional Autónoma de México, DF, 398 pp.
- Zaitsev O, Sánchez-Montante O, Robinson C. 2007. Características del ambiente hidrofísico de la plataforma continental y zona adyacente al sistema lagunar Bahía Magdalena-Almejas. In: Funes-Rodríguez R, Gómez-Gutiérrez J, Palomares-García R (eds.), *Estudios Ecológicos en Bahía Magdalena*. Ed. Instituto Politécnico Nacional, La Paz, México, pp. 29–43.
- Zaytsev O, Cervantes-Duarte R, Montante O, Gallegos A. 2003. Coastal upwelling activity of the Pacific shell of the Baja California Peninsula. *J. Oceanogr.* 59: 489–502.

Received November 2009;

accepted August 2010.