

Dinámica de los nutrientes en el brazo oeste de Bahía San Quintín, Baja California, México, durante y después de El Niño 1997/1998

Nutrient dynamics in the west arm of San Quintín Bay, Baja California, Mexico, during and after El Niño 1997/1998

J. Martín Hernández-Ayón¹

M. Salvador Galindo-Bect¹

Víctor Camacho-Ibar¹

Zaul García-Esquivel^{1*}

Marco A. González-Gómez¹

Francisco Ley-Lou²

¹ Instituto de Investigaciones Oceanológicas

² Facultad de Ciencias Marinas

Universidad Autónoma de Baja California

Km. 103 carretera Tijuana-Ensenada

Ensenada, CP 22860, Baja California, México

*E-mail: sgarcia@uabc.mx

Recibido en julio 2002; aceptado en agosto de 2003

Resumen

Se realizaron series de tiempo de 8 h (mayo, septiembre y noviembre de 1997, y Marzo de 1998) y de 24 h (junio y septiembre de 1999, y febrero de 2000) en dos (1997–1998) y tres localidades (1999–2000) del brazo oeste de Bahía San Quintín (Bahía Falsa, BF), con el fin de describir la dinámica de los nutrientes durante y después del evento El Niño 1997/1998. La concentración de clorofila *a* también se evaluó en cada serie. Se estimaron los flujos no conservativos de fósforo inorgánico disuelto (Δ PID), nitrógeno inorgánico disuelto (Δ NID), nitratos (Δ NO₃⁻) y amonio (Δ NH₄⁺), utilizando un modelo de balance de nutrientes. Durante El Niño 1997/1998 se detectaron pulsos de NH₄⁺ entre 18 y 45 μ M, y concentraciones medias más altas que en 1999–2000. La concentración de NH₄⁺ fue consistentemente menor de 8 μ M en 1999–2000. Se observaron correlaciones significativas ($r = 0.60$ a 0.80) entre la altura de la marea y la concentración de NO₃⁻ en 1999–2000, y una relación inversa entre NO₃⁻ y salinidad, lo que reflejó un aporte oceánico de NID nuevo. La concentración de clorofila *a* fue hasta dos veces más alta en 1999–2000 que durante El Niño. No se observaron correlaciones significativas entre la marea y la concentración de nutrientes en 1997–1998, lo que se sugiere que: (a) las concentraciones altas de NH₄⁺ en 1997–1998 se debieron a la remineralización *in situ* de la materia orgánica y posiblemente a la excreción de moluscos bivalvos presentes en BF, y (b) el aumento de clorofila *a* y NO₃⁻ observados en 1999–2000 se debieron principalmente a aportes nuevos desde el océano adyacente. La combinación de valores positivos de Δ PID (0.1 a 0.57) y negativos del metabolismo neto del ecosistema (MNE = -1 a -60 mmol m⁻² d⁻¹) durante 1997–2000, indican que BF exportó permanentemente PID hacia el océano y actuó como un sistema heterótrofo neto en presencia y ausencia de El Niño.

Palabras clave: Bahía San Quintín, surgencias, nutrientes, balances, El Niño, metabolismo neto.

Abstract

Time series of 8 h (May, September and November 1997, and March 1998) and 24 h (June and September 1999, and February 2000) were carried out at two (1997–1998) or three sites (1999–2000) of the west arm (Falsa Bay, FB) of San Quintín Bay, in order to assess the nutrient dynamics during and after the 1997/1998 El Niño event. Chlorophyll *a* concentrations were also determined during each time series. Non-conservative fluxes of dissolved inorganic phosphorus (Δ DIP), dissolved inorganic nitrogen (Δ DIN), nitrates (Δ NO₃⁻) and ammonium (Δ NH₄⁺) were estimated using a nutrient budget model. High NH₄⁺ peaks (18–45 μ M) were detected during El Niño 1997/1998, and the mean concentration values were higher than those of 1999–2000. Ammonium concentration was consistently less than 8 μ M during 1999–2000. Significant correlations ($r = 0.60$ to 0.80) were found between tidal height and NO₃⁻ concentration in 1999–2000, as well as an inverse relationship between nitrates and salinity, thus reflecting the input of new DIN from the ocean. Chlorophyll *a* concentration was up to two times higher in 1999–2000 than during El Niño. There were no significant correlations between tidal height and nutrient concentration during 1997–1998, suggesting that: (a) the high NH₄⁺ concentrations found in 1997–1998 were due to *in situ* remineralization of the organic

matter and, possibly, the excretion by cultured mollusc bivalves in FB, and (b) the increase of chlorophyll *a* and NO_3^- during 1999–2000 was mainly due to new inputs from the adjacent ocean. The positive ΔDIP values (0.1 to 0.57) and negative values of the net ecosystem metabolism ($\text{NEM} = -1$ to $-60 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) observed throughout 1997–2000 indicate that FB permanently exported DIP towards the ocean and behaved as a net heterotrophic system, with or without the presence of El Niño.

Key words: San Quintín Bay, upwelling, nutrients, budget, El Niño, net metabolism.

Introducción

El Sistema de la Corriente de California (SCC) se extiende sobre las costas de California (EUA) y Baja California (México), y controla en gran medida el funcionamiento de las surgencias y la oceanografía de la región (Ibarra-Obando *et al.*, 2001). El SCC es sensible a los cambios climatológicos interanuales tales como los generados por El Niño (Schwing *et al.*, 1997). El impacto de El Niño sobre el SCC incluye la reducción en la intensidad de las surgencias, el calentamiento de la capa de mezcla, el hundimiento de la nutriclina y el aumento en el nivel del mar (Lynn *et al.*, 1995). En Bahía San Quintín se ha reportado la reducción en la concentración de nutrientes durante el evento de El Niño 1982/1983 (Torres-Moye y Álvarez-Borrego, 1985), así como de la productividad orgánica primaria (Torres-Moye y Álvarez-Borrego, 1985; Silva-Cota y Álvarez-Borrego, 1988). Recientemente se documentó también la disminución de biomasa en las poblaciones de macroalgas de las costas de Baja California durante El Niño 1997/1998 (Ladah *et al.*, 1999).

A diferencia de otros eventos El Niño (e.g., 1982/1983), el de 1997/1998 se presentó más temprano de lo normal en las costas de Baja California. Imágenes de satélite mostraron que las anomalías positivas de temperatura superficial del océano adyacente iniciaron entre los meses de abril y julio de 1997, y tuvieron registros máximos en enero de 1998 (Durazo y Baumgartner, 2002). Asimismo, Ladah *et al.* (1999) reportaron el inicio de las anomalías positivas de temperatura en Bahía Tortugas, Baja California ($\sim 27.6^\circ\text{N}$), a partir de mayo de 1997. En julio de 1997 se observaron anomalías mayores de $+1^\circ\text{C}$ que persistieron por más de ocho meses (Ladah *et al.*, 1999). De acuerdo con Durazo y Baumgartner (2002), durante El Niño 1997/1998 se reportó agua más caliente y salada en los primeros 600 m de profundidad en las costas de Baja California, y el regreso a condiciones no Niño ocurrió entre julio y octubre de 1998.

Aunque se sabe que los eventos El Niño inducen cambios en las condiciones oceanográficas en las aguas costeras que interactúan con Bahía San Quintín, hasta ahora no existen estudios que describan los cambios interanuales en la dinámica de los nutrientes dentro de esta laguna costera. El presente estudio tuvo como objetivos: (a) identificar la variación, en periodos cortos, de la concentración de nutrientes en el brazo oeste (Bahía Falsa, BF) de Bahía San Quintín durante y después de un evento El Niño; (b) comparar los flujos no conservativos de nutrientes, calculados para ambas condiciones oceanográficas; y (c) comparar el metabolismo neto del sistema (MNE) para BF durante y después de un evento El Niño. Para ello, se midieron los cambios en la concentración de nutrientes en la

Introduction

The California Current System (CCS) extends along the coasts of California (USA) and Baja California (Mexico), and to a great extent controls the upwelling and oceanography of the region (Ibarra-Obando *et al.*, 2001). The CCS is affected by interannual climatological changes such as those produced by El Niño (Schwing *et al.*, 1997), which include a reduction in upwelling intensity, warming of the mixed layer, deepening of the nutricline and increase in sea level (Lynn *et al.*, 1995). A decrease in nutrient concentrations (Torres-Moye and Álvarez-Borrego, 1985) and reduced primary productivity (Torres-Moye and Álvarez-Borrego, 1985; Silva-Cota and Álvarez-Borrego, 1988) during the 1982/1983 El Niño have been reported for San Quintín Bay. Ladah *et al.* (1999) documented a decrease in macroalgal biomass on the coasts of Baja California during the 1997/1998 El Niño.

Unlike other El Niño events (e.g., 1982/1983), that of 1997/1998 occurred sooner than normal off Baja California. Satellite images show that positive sea surface temperature anomalies began between April and July 1997, with maxima in January 1998 (Durazo and Baumgartner, 2002). Likewise, Ladah *et al.* (1999) reported the beginning of positive temperature anomalies in May 1997 at Tortugas Bay, Baja California ($\sim 27.6^\circ\text{N}$), and recorded anomalies greater than $+1^\circ\text{C}$ in July 1997 that persisted for more than eight months. Durazo and Baumgartner (2002) reported warmer and saltier water in the first 600 m depth along the Baja California coast during the 1997/1998 El Niño and the return of non-Niño conditions between July and October 1998.

Though El Niño events are known to produce changes in the oceanographic conditions of the coastal waters that interact with San Quintín Bay, there are no studies that describe the interannual changes in nutrient dynamics within this coastal lagoon. The objectives of the present work are: (a) to identify the short-period variation of the nutrient concentrations in the west arm of the bay, known as Falsa Bay (FB), during and after an El Niño event; (b) to compare the non-conservative fluxes of nutrients, calculated for both El Niño and non-El Niño conditions; and (c) to compare the net ecosystem metabolism (NEM) for FB during and after an El Niño event. For this, the changes in the concentration of nutrients in the water column were measured based on short time series (8 or 24 h) during the period 1997–2000 (97–00).

Material and methods

Time series of 8 h were carried out in May, September and November 1997, and March 1998, at two sites in FB (sites C

columna de agua a partir de siete series de tiempo cortas (8 ó 24 h) realizadas durante el periodo 1997–2000 (97–00).

Materiales y métodos

En mayo, septiembre y noviembre de 1997, y marzo de 1998, se realizaron series de tiempo de 8 h en dos localidades de BF (sitios C y B, fig. 1), mientras que en junio y septiembre de 1999 y febrero de 2000 se realizaron series de 24 h en tres localidades (sitios C, B y Y, fig. 1). En cada sitio se recolectaron muestras superficiales de agua cada hora (1997–1998) o cada 2 h (1999–2000), con el fin de cuantificar las concentraciones de clorofila *a* y nutrientes (NO_3^- , NH_4^+ y PO_4^{3-}). Se filtraron muestras de 200 mL de agua, *in situ*, a través de filtros de fibra de vidrio GF/F y cada filtro se congeló para la determinación posterior de clorofila *a*, en el laboratorio. El agua del filtrado se recolectó en frascos de vidrio y se congeló para el posterior análisis de los nutrientes. La temperatura y la salinidad superficiales se registraron en forma continua con un CTD Sea Bird durante los muestreos de 1997–1998, mientras que en 1999–2000 las mediciones se realizaron con un salinómetro-conductímetro. A partir de marzo de 1997 se instaló en la estación B un termógrafo ($\pm 0.2^\circ\text{C}$) construido en el Instituto de Investigaciones Oceanológicas (López, 1992), el cual se reemplazó en 2000 por un termistor submarino portátil de igual precisión (Onset Computer Corp.). Los termógrafos se instalaron a 1 m de profundidad y se programaron con una frecuencia de registro de 30 min. Los datos obtenidos con los termógrafos fueron tratados de acuerdo con el procedimiento estándar indicado por los fabricantes. Las clorofilas fueron extraídas en el laboratorio con acetona al 90% y analizadas mediante fluorimetría (Strickland y Parsons, 1972), utilizando un fluorómetro Turner 112. La concentración de nutrientes se determinó con un analizador de flujo continuo Lachat QuikChem 8000 en la Universidad de California en Santa Barbara. La precisión para cada uno de los análisis fue de ± 0.05 , ± 0.03 y $\pm 0.02 \mu\text{M}$ para NO_3^- , NH_4^+ y PO_4^{3-} , respectivamente. Por cada diez muestras se analizó un estándar de la curva de calibración para asegurar la calidad de las mediciones.

Con los datos de salinidad y nutrientes se calculó el metabolismo neto de BF utilizando el modelo de cajas propuesto por Gordon *et al.* (1996) y descrito para Bahía San Quintín por Camacho-Ibar *et al.* (1999). Las variables del modelo fueron el volumen del sistema (BF), los flujos de agua dulce aportados por ríos (V_Q), agua subterránea (V_G), precipitación pluvial (V_P) y evaporación (V_E). Se requirieron además los aportes de fósforo inorgánico disuelto (PID) y nitrógeno inorgánico disuelto (NID) asociados con los flujos de agua dulce, así como los gradientes de salinidad, PID y NID, entre el sistema y el mar adyacente. El área de BF se consideró de $9 \times 10^6 \text{ m}^2$, con una profundidad media de 1 m. Se consideró un valor promedio de $V_E = 36 \times 10^3 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ y un valor de $V_P = 0.9 \times 10^3 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$, restringido este último a los meses de invierno (Camacho-Ibar *et al.*, 1999). Para V_Q y V_G se consideraron valores de cero, ya que durante el periodo de muestreos no hubo escurrimientos

and B, fig. 1), and of 24 h in June and September 1999, and February 2000, at three sites (sites C, B and Y, fig. 1). At each location, 200-mL surface water samples were collected every hour (1997–1998) or every 2 h (1999–2000) to quantify the concentrations of chlorophyll *a* and nutrients (NO_3^- , NH_4^+ and PO_4^{3-}). The samples were filtered through GF/F fiberglass filters and each filter was frozen for later determination of chlorophyll *a* in the laboratory. The filtered water was collected in glass flasks and frozen for subsequent nutrient analysis. Surface temperature and salinity were measured continuously with a Sea-Bird CTD during the 1997–1998 collections, whereas a conductimeter/salinometer was used during the 1999–2000 series. In March 1997, a thermograph ($\pm 0.2^\circ\text{C}$), made at the Instituto de Investigaciones Oceanológicas of the Universidad Autónoma de Baja California (López, 1992), was deployed at station B; this instrument was replaced in 2000 by a portable underwater thermistor of the same accuracy (Onset Computer Corp.). The thermographs were installed at 1 m depth and data were recorded every 30 min, which were then treated according to the standard procedures indicated by the manufacturers. The chlorophylls were extracted in the laboratory with 90% acetone and by fluorometry analyzed (Strickland and Parsons, 1972), using a Turner 112 fluorometer. The concentration of nutrients was determined with a

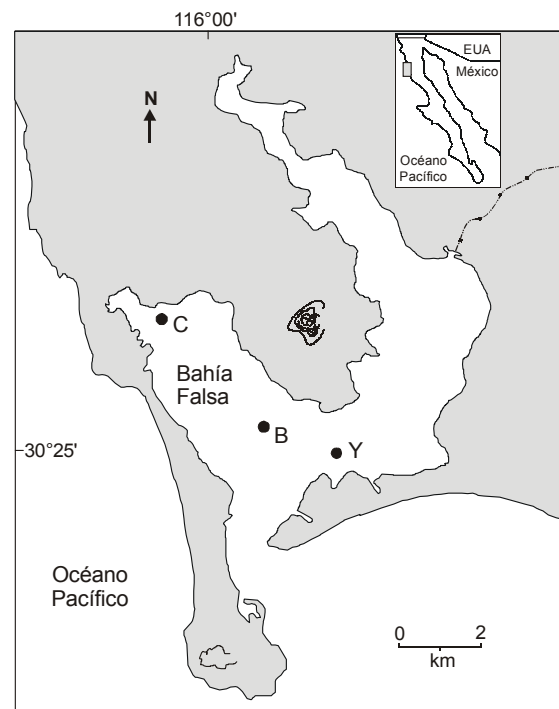


Figura 1. Localización del sitio de estudio y las estaciones de muestreo en el brazo oeste (Bahía Falsa) de Bahía San Quintín (Baja California, México). C = cabeza, B = boca de Bahía Falsa y Y = boca de Bahía San Quintín.

Figure 1. Location of the study area and sampling sites in the west arm (Falsa Bay) of San Quintin Bay (Baja California, Mexico). C = head, B = mouth of Falsa Bay, and Y = mouth of San Quintín Bay.

superficiales ni probablemente tampoco aportes subterráneos (Aguirre-Muñoz *et al.*, 2001).

Los balances de materiales conservativos (agua y sal) y no conservativos (nutrientes) y la estimación del metabolismo neto del ecosistema (MNE) se realizaron en tres pasos:

- (a) Para el balance de agua y sal se supuso que el volumen de BF permaneció constante a escalas mayores de un ciclo de marea ($dV_{Syst}/dt = 0 = V_Q + V_P + V_E + V_G + V_O + V_R$), de tal forma que el volumen residual (V_R) compensó las pérdidas o ganancias netas de agua dulce, de acuerdo con la ecuación:

$$V_R = -(V_Q + V_P + V_E + V_G + V_O) \quad (1)$$

Se consideró además que las sales disueltas fueron removidas o adicionadas a BF solamente por procesos de mezcla (V_X) y advección (V_R) de acuerdo con la ecuación (Smith y Hollibaugh, 1997):

$$V_X = (-V_R S_R) / (S_{Ocn} - S_{Syst}) \quad (2)$$

donde S_{Ocn} es la salinidad del océano y S_{Syst} la salinidad del sistema (BF). Los datos obtenidos durante los flujos de marea en la estación B se consideraron como valores “oceánicos” para 1997–1998, mientras que para 1999–2000 se utilizó el promedio de los valores obtenidos en las estaciones B y Y durante los flujos de marea. La estación C se utilizó para referir la salinidad del sistema. Con la información anterior, se estimó el tiempo de residencia (τ), mediante la ecuación:

$$\tau = V_{Syst} / (V_X + |V_R|) \quad (3)$$

- (b) Para estimar el flujo no conservativo de nutrientes se utilizó una ecuación similar a la del balance de agua y sal, excepto que se incluyó el término no conservativo (ΔY), el cual indica si el sistema es fuente o sumidero neto de estos materiales:

$$d(VY)/dt = V_Q Y_Q + V_P Y_P + V_G Y_G + V_E Y_E + V_R Y_R + V_X (Y_{Ocn} - Y_{Syst}) + \Delta Y \quad (4)$$

- (c) El MNE (producción – respiración) y el balance entre la fijación de nitrógeno y la desnitrificación (nfix–denit) se estimaron estequiométricamente a partir de los balances de PID y de NID, suponiendo una relación de Redfield para la razón carbono:fósforo (C:P) = 106:1, y para la razón nitrógeno:fósforo (N:P) = 16:1, como se indica a continuación:

$$MNE = -\Delta PID \times 106 \quad (5)$$

$$(nfix-denit) = \Delta NID_{obs} - \Delta NID_{exp} \quad (6)$$

$$= \Delta NID_{obs} - \Delta PID \times 16 \quad (7)$$

donde ΔNID_{obs} es el flujo no conservativo observado de NID, ΔNID_{exp} es el flujo esperado no conservativo de NID

Lachat QuikChem 8000 continuous-flow analyzer at the University of California in Santa Barbara. The accuracy for each analysis was ± 0.05 , ± 0.03 and ± 0.02 μM for NO_3^- , NH_4^+ and PO_4^{3-} , respectively. One standard of the calibration curve was analyzed for every ten samples to assure the quality of the measurements.

The net metabolism for FB was calculated with the salinity and nutrient data, using the box model proposed by Gordon *et al.* (1996) and described for San Quintín Bay by Camacho-Ibar *et al.* (1999). The variables of the model were the volume of the system (FB), fresh-water input by rivers (V_Q), ground water (V_G), rainfall (V_P) and evaporation (V_E), as well as the inputs of dissolved inorganic phosphorus (DIP) and dissolved inorganic nitrogen (DIN) associated with the fresh water, and the gradients of salinity, DIP and DIN, between the system and adjacent sea. Falsa Bay was considered to have an area of 9×10^6 m² and a mean depth of 1 m. A mean value of $V_E = 36 \times 10^3$ m³ d⁻¹ and a value of $V_P = 0.9 \times 10^3$ m³ d⁻¹ were considered, the latter only for the winter months (Camacho-Ibar *et al.*, 1999). Values of zero were assigned to V_Q and V_G because there was no surface runoff, and probably no underground input, during the sampling period (Aguirre-Muñoz *et al.*, 2001).

The budget of conservative (water and salt) and non-conservative materials (nutrients), and the estimation of NEM were obtained with the following three steps:

- (a) For the water and salt budget, the volume of FB was assumed to remain constant at time-scales greater than one tidal cycle ($dV_{Syst}/dt = 0 = V_Q + V_P + V_E + V_G + V_O + V_R$), so that the residual volume (V_R) compensated the net gains or losses of fresh water, according to the equation:

$$V_R = -(V_Q + V_P + V_E + V_G + V_O) \quad (1)$$

The removal or input of dissolved salts was considered to occur only through mixing (V_X) and advection (V_R) processes, according to the equation (Smith and Hollibaugh, 1997):

$$V_X = (-V_R S_R) / (S_{Ocn} - S_{Syst}) \quad (2)$$

where S_{Ocn} is the salinity of the ocean and S_{Syst} the salinity of the system (FB). The data obtained during the tidal flows at station B were considered as “oceanic” values for 1997–1998, whereas the average of the values obtained during the tidal flows at stations B and Y was used for 1999–2000. Station C was used to refer the system’s salinity. With this information, the residence time (τ) was estimated with the equation:

$$\tau = V_{Syst} / (V_X + |V_R|) \quad (3)$$

- (b) To estimate the non-conservative flux of nutrients, an equation similar to that of the salt and water budget was

calculado con la relación de Redfield ($= 16 \times \Delta \text{PID}$), y ΔPID es el flujo no conservativo observado de PID.

Resultados

Variables conservativas

La salinidad en la cabeza de BF fue generalmente mayor que en la parte externa, con un valor promedio para todos los muestreos de 34.6 y 34.2, respectivamente (tabla 1). El tiempo de residencia del agua calculado para la mayoría de los muestreos fluctuó entre 1 y 6 días, con excepción de noviembre de 1997 y febrero de 2000 cuando el tiempo de residencia calculado fue de alrededor de 11 días (tabla 1).

Las temperaturas más altas de todos los muestreos se registraron en 1997, con valores máximos de 27.4°C y mínimos de 16.6°C (fig. 2). La máxima temperatura registrada para el periodo de abril a agosto se observó en 1997 (27.3°C), seguida de las de 2000 (25.6°C) y de 1998 (24.7°C), mientras que las temperaturas mínimas de ese mismo periodo fueron 16.6°C, 14.6°C y 12.3°C, respectivamente. Los valores mínimos de temperatura se presentaron con las surgencias de primavera (mayo a junio) de 1998 y marzo de 2000, con registros mínimos de 12.3°C y 12.0°C, respectivamente. En general,

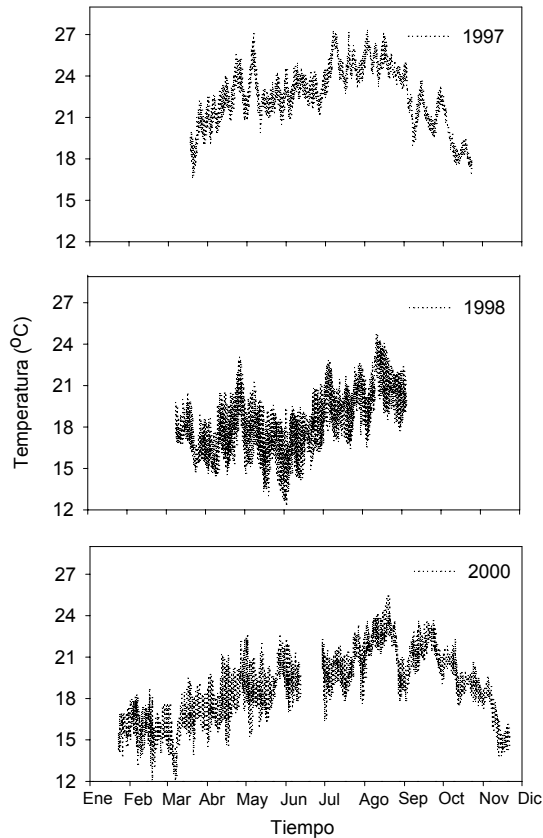


Figura 2. Registros continuos de temperatura superficial (°C) obtenidos en la estación B de Bahía Falsa durante 1997, 1998 y 2000.

Figure 2. Continuous surface temperature (°C) measurements from station B at Falsa Bay during 1997, 1998 and 2000.

used, except that the non-conservative term (ΔY) was included, which indicates whether the system is a net source or sink of these materials:

$$d(VY)/dt = V_Q Y_Q + V_P Y_P + V_G Y_G + V_E Y_E + V_R Y_R + V_X (Y_{Ocn} - Y_{Syst}) + \Delta Y \quad (4)$$

- (c) The NEM (production – respiration) and the balance between nitrogen fixation and denitrification (nfix–denit) were estimated stoichiometrically from the DIP and DIN budgets, assuming a Redfield relation for the carbon:phosphorus (C:P) ratio of 106:1 and for the nitrogen:phosphorus (N:P) ratio of 16:1, as indicated below:

$$\text{NEM} = -\Delta \text{DIP} \times 106 \quad (5)$$

$$(\text{nfix} - \text{denit}) = \Delta \text{DIN}_{\text{obs}} - \Delta \text{DIN}_{\text{exp}} \quad (6)$$

$$= \Delta \text{DIN}_{\text{obs}} - \Delta \text{DIP} \times 16 \quad (7)$$

where $\Delta \text{DIN}_{\text{obs}}$ is the observed non-conservative flux of DIN, $\Delta \text{DIN}_{\text{exp}}$ is the non-conservative flux of DIN calculated according to the Redfield ratio ($= 16 \times \Delta \text{DIP}$), and ΔDIP is the observed non-conservative flux of DIP.

Results

Conservative variables

Salinity in the head of FB was generally greater than in the external part, with mean values for all the samplings of 34.6 and 34.2, respectively (table 1). The water residence time ranged from 1 to 6 days for most samplings and was ~11 days for November 1997 and February 2000 (table 1).

Tabla 1. Salinidades medias (S) y tiempos de residencia (τ) del agua en Bahía Falsa calculados a partir de los gradientes de salinidad. El dato de agosto fue tomado de Camacho-Ibar *et al.* (2003).

Table 1. Mean salinities (S) and residence times (τ) for Falsa Bay, calculated from salinity gradients. The August values were taken from Camacho-Ibar *et al.* (2003).

Fecha	S Boca	S Cabeza	τ
08/1995	34.3	34.6	4
05/1997	34.4	35.2	6
09/1997	34.2	34.6	3
11/1997	34.4	35.1	10
03/1998	33.5	33.7	4
06/1999	34.5	35.3	6
09/1999	34.7	34.3	1
02/2000	34.1	34.5	12

durante los tres años se observaron pulsos de temperaturas bajas con una frecuencia aproximada de 15 días, los cuales están probablemente relacionados con eventos de surgencias.

Variables no conservativas

En las series de 1997–1998 no se observó una relación clara entre la altura de la marea y la concentración de nutrientes (fig. 3), excepto para el amonio que presentó picos máximos mayores de 25 μM en las series de primavera (mayo de 1997 y marzo de 1998), durante la fase de velocidad máxima de la corriente de marea (fig. 3 a–b, g–h). El PO_4^{3-} y el NO_3^- también tendieron a mostrar picos máximos durante el flujo y reflujo de las series, aunque con menor consistencia (fig. 3). En contraste, durante los tres muestreos del periodo 1999–2000 se presentaron correlaciones positivas significativas ($P < 0.05$) entre la altura de la marea y la concentración de

The highest temperatures for the study period were recorded in 1997, with maximum values of 27.4°C and minimum of 16.6°C (fig. 2). The maximum temperature for the April–August period was recorded in 1997 (27.3°C), followed by 2000 (25.6°C) and 1998 (24.7°C), and the minimum temperatures for that same period were 16.6°C, 14.6°C and 12.3°C, respectively. The lowest temperature values of 12.3°C and 12.0°C occurred during the spring (May–June) 1998 and March 2000 upwelling seasons, respectively. Pulses of low temperature with an approximate frequency of 15 days were observed during the three years, probably related to upwelling events.

Non-conservative variables

No clear relationship was found between tidal height and nutrient concentrations in the 1997–1998 series (fig. 3), except

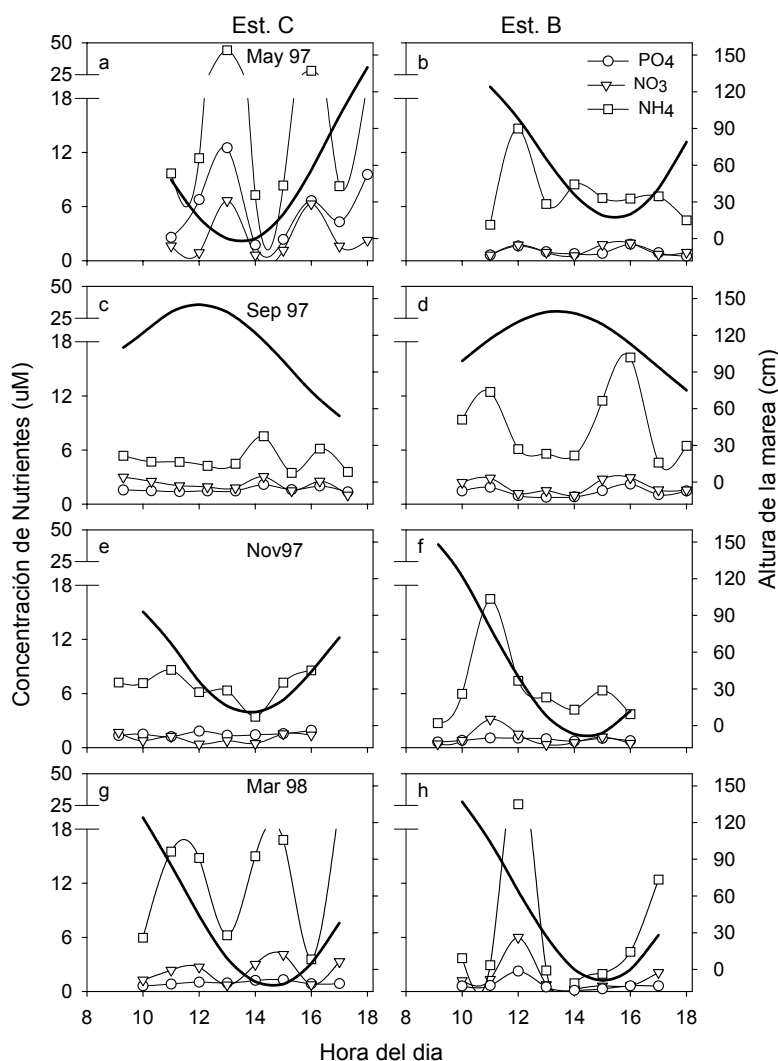


Figura 3. Cambios temporales en la concentración de nitratos (NO_3^-), amonio (NH_4^+) y fosfatos (PO_4^{3-}), en series de 8 h llevadas a cabo en las estaciones C y B de Bahía Falsa en 1997–1998. La línea gruesa representa la altura de la marea.

Figure 3. Temporal changes in the concentration of nitrates (NO_3^-), ammonium (NH_4^+) and phosphates (PO_4^{3-}) in 8-h time series at stations C and B of Falsa Bay in 1997–1998. The thick line represents tidal height.

nitratos en la estación Y, con valores de coeficiente de correlación (r) entre 0.68 y 0.87 (fig. 4, tabla 2). La clara covariación entre la altura de la marea y los nitratos observada en las series de la estación Y, y en una serie de la estación B en febrero de 2000 (fig. 4) indica la ocurrencia de aportes de NO_3^- desde el océano hacia el interior de la bahía durante el flujo de marea en años no Niño. Al igual que los nitratos, la clorofila a mostró valores muy bajos de r con relación a la altura de la marea durante 1997–1998, mientras que en 1999–2000 se presentaron varios valores significativos (tabla 2). En general, los valores promedio de clorofila a fueron menores en 1997–1998 (aprox. 1 mg m^{-3}) que en 1999–2000 ($>2 \text{ mg m}^{-3}$). Es de notar que la concentración de clorofila a fue generalmente mayor en la boca (hasta dos veces mayor) que en la parte interna (fig. 5).

El PID mostró de manera consistente valores más altos en la estación C, con valores promedio entre 1.1 y $5.3 \mu\text{M}$ (tabla 3). En la boca de BF los valores promedio fluctuaron entre 0.6 y $1.9 \mu\text{M}$. El único muestreo en el cual no se observó

for ammonium that presented maximum peaks greater than $25 \mu\text{M}$ in the spring series (May 1997 and March 1998) when tidal current velocity was maximum (fig. 3a–b, g–h). Maximum peaks of PO_4^{3-} and NO_3^- also tended to occur during the ebb and flood flow of the series, but with less consistency (fig. 3). In contrast, during the three samplings of 1999–2000, significant positive correlations ($P < 0.05$) were obtained between tidal height and nitrate concentrations at station Y, with correlation coefficient (r) values between 0.68 and 0.87 (fig. 4, table 2). The clear covariation between tidal height and nitrates observed in the series at station Y, and in one series at station B in February 2000 (fig. 4), indicates NO_3^- input to the inner bay from the ocean with the tide in non-El Niño years. Likewise, chlorophyll a had very low r values relative to tidal height during 1997–1998, but significant values during 1999–2000 (table 2). In general, the mean values of chlorophyll a were lower in 1997–1998 (approximately 1 mg m^{-3}) than in 1999–2000 ($>2 \text{ mg m}^{-3}$), and the

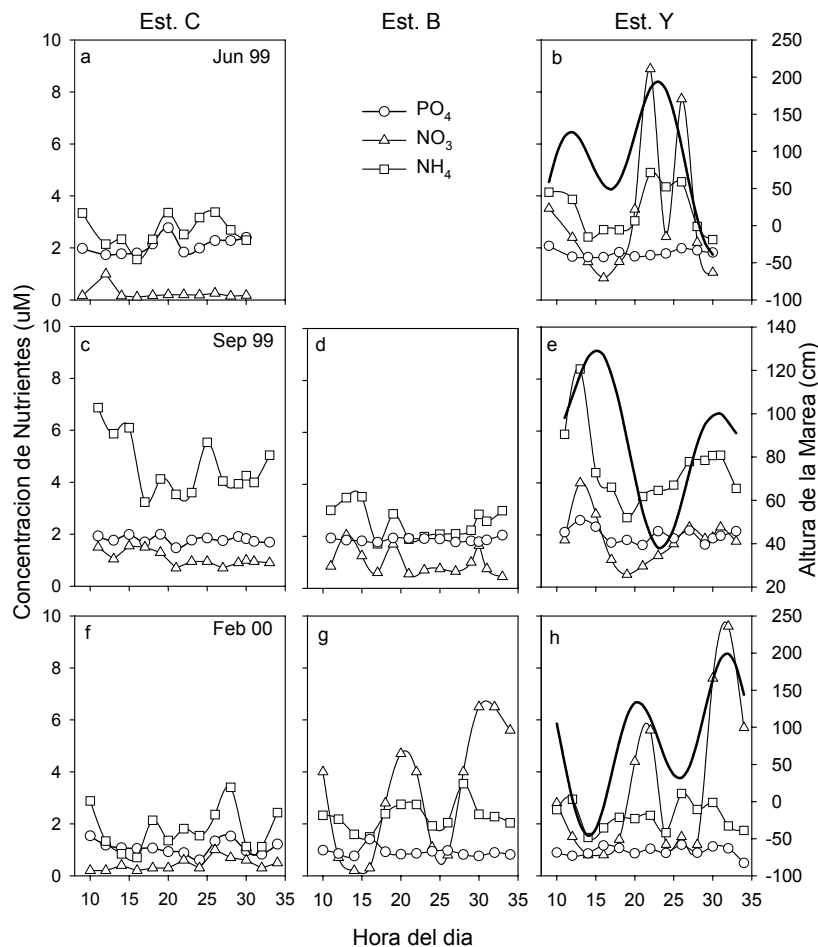


Figura 4. Cambios temporales en la concentración de nitratos (NO_3^-), amonio (NH_4^+) y fosfatos (PO_4^{3-}), en series simultáneas de 24 h llevadas a cabo en las estaciones C, B y Y en 1999–2000. La línea gruesa representa la altura de la marea.

Figure 4. Temporal changes in the concentration of nitrates (NO_3^-), ammonium (NH_4^+) and phosphates (PO_4^{3-}) in simultaneous 24-h time series at stations C, B and Y in 1999–2000. The thick line represents tidal height.

un gradiente claro de PID fue el de septiembre de 1999 (tabla 3). Durante el periodo 1997–1998 se detectaron mayores concentraciones medias de NH_4^+ (4 a 17 μM) que en 1999–2000 (1.8 y 4.6 μM). En 1997–1998 los valores más altos se observaron generalmente hacia el interior de la bahía, mientras que en 1999–2000 no se observó un gradiente claro entre sitios de muestreo (tabla 3). Por otra parte, durante 1997–1998 la concentración media de NO_3^- fue generalmente más alta en la cabeza (1.0 a 3.3 μM) que en la boca de BF (0.8 a 2.0 μM), pero dicho patrón se invirtió en 1999–2000 (tabla 3). Es notable que al igual que el PO_4^{3-} y el NH_4^+ , la concentración media de NO_3^- fue similar en ambas localidades en septiembre de 1999 (fig. 4, tabla 3).

Durante el periodo 1997–1998 no se observó una relación clara entre la concentración de las especies nitrogenadas y la salinidad (fig. 6a–d), aunque hubo una tendencia del amonio a aumentar con el incremento de salinidad a concentraciones menores de 10 μM (fig. 6c). En contraste, los datos para junio

Tabla 2. Coeficientes de correlación (r) entre la altura de la marea y la concentración de nitratos, así como entre la altura de la marea y la concentración de clorofila a para distintas localidades de muestreo en Bahía Falsa; nd = sin datos.

Table 2. Correlation coefficients (r) between tidal height and nitrate concentration, and between tidal height and chlorophyll a concentration for different sampling sites at Falsa Bay; nd = no data.

Fecha	Nitratos			Clorofilas		
	B	Y	C	B	Y	C
05/1997	nd	−0.37	−0.21	nd	0.35	−0.20
09/1997	nd	−0.38	−0.41	nd	−0.54	−0.54
11/1997	nd	0.13	0.29	nd	−0.28	−0.34
03/1998	nd	0.24	−0.26	nd	−0.06	−0.40
06/1999	0.68	nd	0.25	0.69	0.78	0.76
09/1999	0.81	0.49	0.62	−0.08	0.78	0.78
02/2000	0.87	0.96	0.07	0.51	0.71	−0.88

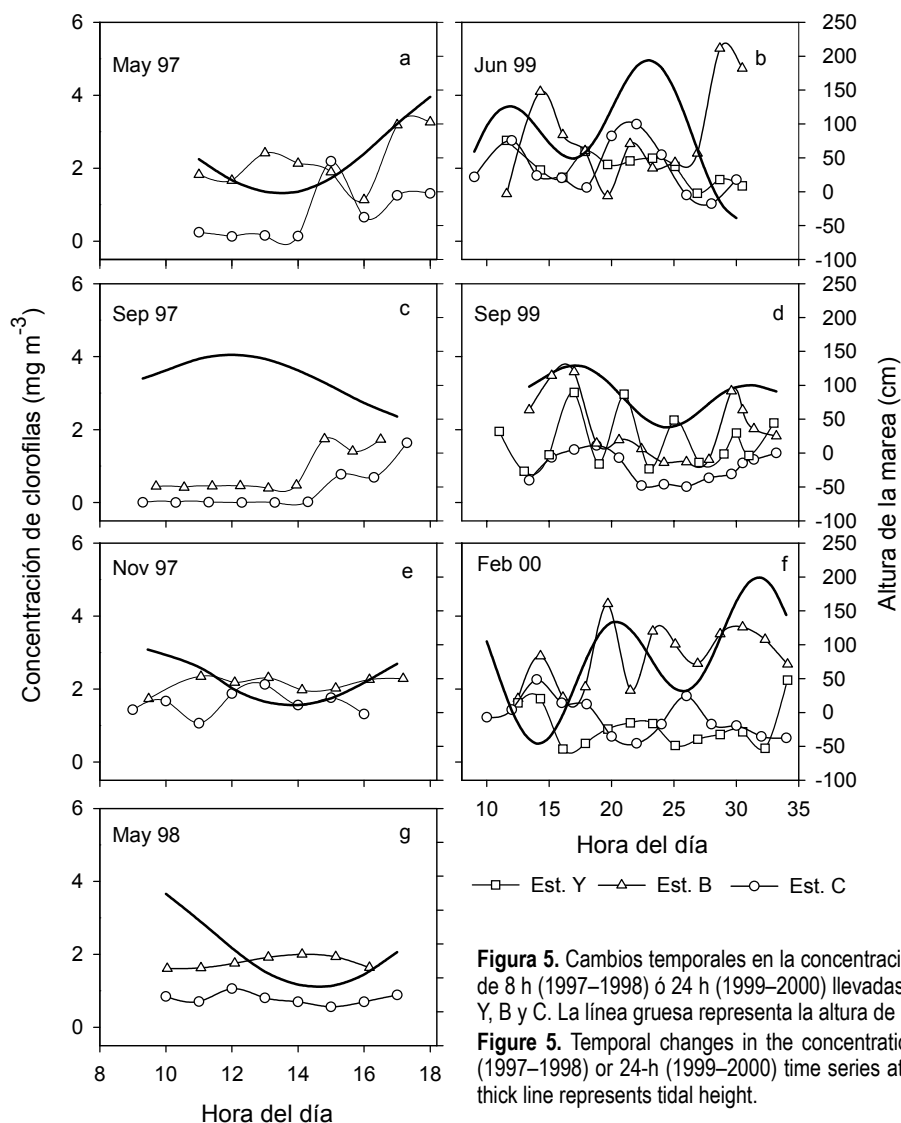


Figura 5. Cambios temporales en la concentración de clorofila a en series de 8 h (1997–1998) ó 24 h (1999–2000) llevadas a cabo en las estaciones Y, B y C. La línea gruesa representa la altura de la marea.

Figure 5. Temporal changes in the concentration of chlorophyll a in 8-h (1997–1998) or 24-h (1999–2000) time series at stations Y, B and C. The thick line represents tidal height.

Tabla 3. Concentración media y desviación estándar de la concentración de nutrientes en Bahía Falsa durante el periodo 1997–2000. Los promedios se calcularon para cada fecha de muestreo considerando todos los valores de flujo y reflujo.**Table 3.** Mean concentration and standard deviation of the concentration of nutrients at the mouth and head of Falsa Bay during the period 1997–2000. The means were calculated for each sampling date considering all the tidal flow values.

Fecha	Boca			Cabeza		
	NO ₃ [μM]	NH ₄ [μM]	PO ₄ [μM]	NO ₃ [μM]	NH ₄ [μM]	PO ₄ [μM]
05/1997	1.1 ± 0.6	6.3 ± 1.5	1.0 ± 0.5	3.3 ± 3.2	17.4 ± 9.0	5.3 ± 5.3
09/1997	2.0 ± 0.8	8.6 ± 4.0	1.3 ± 0.5	2.2 ± 0.7	4.9 ± 1.3	1.6 ± 0.3
11/1997	0.8 ± 0.4	5.3 ± 1.6	0.9 ± 0.2	1.0 ± 0.5	6.8 ± 1.6	1.5 ± 0.2
03/1998	1.0 ± 0.6	4.1 ± 3.8	0.6 ± 0.2	2.3 ± 1.2	12.3 ± 6	1.1 ± 0.3
06/1999	3.2 ± 2.6	3.4 ± 1.1	1.8 ± 0.2	0.2 ± 0.2	2.6 ± 0.7	2.1 ± 0.3
09/1999	1.8 ± 0.9	4.6 ± 1.4	1.9 ± 0.3	1.1 ± 0.3	4.6 ± 1.2	1.8 ± 0.2
02/2000	3.3 ± 2.9	2.3 ± 0.7	0.9 ± 0.2	0.4 ± 0.3	1.8 ± 0.9	1.1 ± 0.3

de 1999 y febrero de 2000 mostraron una alta correlación inversa ($r = -0.95$) entre NO₃⁻ y salinidad (fig. 6b).

Todos los valores de ΔPID calculados fueron positivos (+0.01 a +0.57 mmol m⁻² d⁻¹), lo cual indica que el sistema produjo PID y que pudo funcionar como una fuente para el océano (tabla 4). En consecuencia, los valores del MNE fueron negativos (-1 a -60 mmol m⁻² d⁻¹), lo que indica que BF se comportó como un sistema heterótrofo neto en todas las fechas en las que se realizaron los muestreos. Por otra parte, todos los valores de ΔNID fueron positivos durante el periodo 1997–1998 (+0.14 a +3.71 mmol m⁻² d⁻¹), indicando que el sistema exportó NID al océano durante la condición El Niño. En contraste, los valores de ΔNID calculados para 1999–2000 fueron negativos (entre -0.30 y -0.80 mmol m⁻² d⁻¹), indicando que el sistema importó NID durante ese periodo

concentration of chlorophyll *a* tended to be greater in the mouth (up to two times higher) than in the inner part (fig. 5).

The DIP values were consistently higher at station C, with mean values between 1.1 and 5.3 μM (table 3); the mean values at the mouth of FB ranged from 0.6 to 1.9 μM. The only sampling in which a clear DIP gradient was not observed was that of September 1999 (table 3). Higher mean concentrations of NH₄⁺ (4 to 17 μM) were detected in 1997–1998 than in 1999–2000 (1.8 and 4.6 μM). In 1997–1998, the highest values were generally recorded in the inner part of the bay, whereas in 1999–2000 there was no clear gradient among the sampling sites (table 3). In 1997–1998 the mean concentration of NO₃⁻ was generally higher at the head (1.0 to 3.3 μM) than at the mouth of FB (0.8 to 2.0 μM), but this pattern was inverted in 1999–2000 (table 3). Like PO₄⁻³ and NH₄⁺, the mean concentration of NO₃⁻ was similar at both sites in September 1999 (fig. 4, table 3).

A clear relation between the concentration of nitrogenated species and salinity was not found for 1997–1998 (fig. 6a–d), though ammonium tended to increase as salinity increased at concentrations below 10 μM (fig. 6c); however, the June 1999 and February 2000 data showed a high inverse correlation ($r = -0.95$) between NO₃⁻ and salinity (fig. 6b).

All the ΔDIP values calculated were positive (+0.01 to +0.57 mmol m⁻² d⁻¹), indicating that the system produced DIP and acted as a source to the ocean (table 4). Consequently, the NEM values were negative (-1 to -60 mmol m⁻² d⁻¹), which indicates that FB behaved as a net heterotrophic system in all the sampling dates. On the other hand, all the ΔDIN values for 1997–1998 were positive (+0.14 to +3.71 mmol m⁻² d⁻¹), indicating that the system exported DIN to the ocean during the El Niño event, whereas those for 1999–2000 were negative (-0.30 to -0.80 mmol m⁻² d⁻¹), indicating that the system imported DIN during this period (table 4). The (nfix–denit) values were negative for all the series (-0.5 to -6.9 mmol N m⁻² d⁻¹), indicating that FB acted as a nitrogen sink during both El Niño and non-El Niño conditions.

Tabla 4. Flujos de nutrientes no conservativos y cálculos estequiométricos para Bahía Falsa. Se muestran datos comparativos tomados de Camacho-Ibar *et al.* (2003).**Table 4.** Non-conservative nutrient fluxes and stoichiometrical estimates for Falsa Bay. Comparative data taken from Camacho-Ibar *et al.* (2003) are shown.

Fecha	ΔPID	ΔNID	nfix–denit	MNE
	(mmol m ⁻² d ⁻¹)			
08/1995*	+0.09	+0.51	-0.9	-9
02/1996*	+0.02	-1.27	-1.6	-2
08/1996*	+0.21	+0.62	-2.7	-22
05/1997	+0.57	+2.17	-6.9	-60
09/1997	+0.26	+0.14	-4.1	-28
11/1997	+0.08	+0.27	-0.9	-8
03/1998	+0.20	+3.71	-0.6	-21
06/1999	+0.04	-0.80	-1.4	-4
02/2000	+0.01	-0.30	-0.5	-1

(tabla 4). Los valores de (nfix–denit) fueron negativos en todas las series (-0.5 a -6.9 mmol N $m^{-2} d^{-1}$), indicando que BF actuó como un sumidero de nitrógeno tanto en condiciones de El Niño como en condiciones no Niño.

Para comprobar que los cálculos de los balances de nutrientes no estuvieran afectados por promediar observaciones de nutrientes en flujo y reflujo de marea, se calcularon los flujos no conservativos para ambas condiciones por separado. Los datos en la tabla 5 muestran que, para cada serie, el signo de los flujos no conservativos fue similar durante el flujo y reflujo de la marea. La tabla 5 también muestra que, con excepción de la serie de septiembre de 1997, el flujo no conservativo de NID estuvo dominado por los aportes internos de NH_4^+ , presentándose valores de ΔNH_4^+ entre $+0.17$ y $+5.91$ mmol $m^{-2} d^{-1}$. En contraste, los flujos no conservativos de NID en 1999–2000 fueron ligeramente dominados por el consumo de NO_3^- , con valores de balances de ΔNO_3^- entre -0.28 y -0.68 mmol $m^{-2} d^{-1}$ (tabla 5).

Discusión

Las altas concentraciones de NID, principalmente de amonio, observadas en 1997–1998, combinadas con la falta de correlación entre las especies nitrogenadas y la salinidad o la altura de la marea, sugieren que durante el evento El Niño la concentración de NID en BF fue controlada por procesos biogeoquímicos *in situ* más que por aportes físicos externos. Esto incluyó la remineralización de la materia orgánica, y la excreción de amonio por parte de ostiones y almejas presentes en BF. Los valores consistentemente negativos de (nfix–denit) hallados en el presente estudio (tabla 4) sugieren que BF actuó como un sumidero neto de nitrógeno en presencia y ausencia de El Niño, y que la desnitrificación fue un proceso que ayudó a controlar la disponibilidad de NO_3^- . Anteriormente se reportaron concentraciones de NH_4^+ por arriba de $1900 \mu M$ en aguas intersticiales de sedimentos someros de Bahía San Quintín (Camacho-Ibar y Álvarez-Borrego, 1988). La dominancia de los aportes de NID por remineralización en 1997–1998 sería análogo a lo reportado para la Bahía de Monterey durante El Niño 1992/1993, donde se observó una disminución substancial de la producción nueva y el aumento de nutrientes regenerados (Kudela y Chávez, 2000). El empobrecimiento de la concentración de nitratos en las aguas costeras frente a Bahía San Quintín durante el periodo de El Niño 1997/1998 es consistente con las anomalías negativas en la concentración de nitratos (hasta de $-5 \mu M$) reportadas para la zona central de la costa de California (Chávez *et al.*, 2002). En contraste, la alta correlación positiva del nitrato con la marea en 1999–2000 (tabla 2), y su relación inversa con la salinidad, reflejaron el aporte oceánico de nitratos y producción nueva hacia el interior de la bahía. Anteriormente, Farfán y Álvarez-Borrego (1983) observaron que los flujos de NID desde el océano hacia Bahía San Quintín estaban asociados con la intensidad de las surgencias. Pennington y Chávez (2000) también reportaron valores más altos de nitratos en aguas superficiales costeras de la Bahía

Tabla 5. Flujos no conservativos (mmol $m^{-2} d^{-1}$) de fósforo inorgánico disuelto (ΔPID), nitratos (ΔNO_3^-), amonio (ΔNH_4^+) y nitrógeno inorgánico disuelto (ΔNID) durante flujos y reflujos de marea en Bahía Falsa.

Table 5. Non-conservative fluxes (mmol $m^{-2} d^{-1}$) of dissolved inorganic phosphorus (ΔPID), nitrates (ΔNO_3^-), ammonium (ΔNH_4^+) and dissolved inorganic nitrogen (ΔNID) during flood and ebb flow at Falsa Bay.

Fecha	ΔPID	ΔNO_3^-	ΔNH_4^+	ΔNID
Flujo				
05/1997	+0.55	+0.30	+2.33	+2.66
09/1997	+0.31	+0.53	-0.42	+0.06
11/1997	+0.11	+0.05	+0.40	+0.44
03/1998	+0.66	+0.52	+5.39	+5.91
06/1999	+0.01	-0.68	-0.39	-1.07
02/2000	0.00	-0.49	-0.16	-0.63
Reflujo				
05/1997	+0.41	+0.22	+1.13	+1.35
09/1997	+0.26	+0.26	-0.10	+0.16
11/1997	+0.07	+0.03	+0.17	+0.19
03/1998	+0.15	+0.41	+2.54	+2.95
06/1999	+0.07	-0.47	-0.22	-0.70
02/2000	+0.02	-0.28	-0.05	-0.33

To verify that the nutrient budget calculations were not affected by averaging nutrient observations during tidal flow, the non-conservative fluxes were determined separately for both conditions. The data in table 5 show that for each series the sign of the non-conservative fluxes was similar during high and low tide. Table 5 also shows that, except for the September 1997 series, the non-conservative flux of DIN was dominated by internal inputs of NH_4^+ , with ΔNH_4^+ values between $+0.17$ and $+5.91$ mmol $m^{-2} d^{-1}$. In contrast, the non-conservative fluxes of DIN in 1999–2000 were slightly dominated by the consumption of NO_3^- , with ΔNO_3^- values between -0.28 and -0.68 mmol $m^{-2} d^{-1}$ (table 5).

Discussion

The high concentrations of DIN, mainly ammonium, observed in 1997–1998, and the lack of correlation between the nitrogenated species and salinity or tidal height, suggest that during the El Niño event, the concentration of DIN in FB was controlled by *in situ* biogeochemical processes rather than by external physical inputs. This includes remineralization of organic matter and excretion of ammonium by oysters and clams in FB. The consistently negative values of (nfix–denit) obtained in this study (table 4) suggest that FB acted as a net sink of nitrogen in the presence or absence of El Niño, and that denitrification was a process that helped to control the availability of NO_3^- . Camacho-Ibar and Álvarez-Borrego (1988)

de Monterey, del orden de 7.5 a 20 μM durante mayo y junio, periodo en el cual las surgencias fueron más intensas. Aunque se ha reportado un calentamiento de las aguas locales del SCC y una disminución en las surgencias costeras durante El Niño (Durazo y Baumgartner, 2002), los mínimos periódicos de temperatura observados en el presente estudio sugieren que los eventos de surgencias estuvieron presentes en las costas de Bahía San Quintín aun durante El Niño. Sin embargo, el agua subsuperficial que entró a BF durante ese periodo era cálida y pobre en nitratos, mientras que en 1999–2000 entró agua más rica (fig. 6a, b). Podría suponerse que las diferencias en la concentración de NID entre los periodos 1997–1998 y 1999–2000 se debieron a que los muestreos se llevaron a cabo durante etapas diferentes de eventos de surgencias. Sin embargo, el análisis del registro continuo de temperaturas, verificado con el índice de Bakun (<http://upwell.pfeg.noaa.gov>) correspondiente a cada muestreo, indicó que sólo el muestreo de noviembre de 1997 se realizó en ausencia de surgencias; los de septiembre de 1997 y marzo de 1998 se ubicaron en la etapa de relajación de la surgencia, y el de mayo de 97 se realizó durante una surgencia fuerte. Por otro lado, los muestreos del 99–00 se realizaron en las etapas de relajación y de surgencia fuerte, en las cuales se pudieron observar pulsos de nitratos, de acuerdo con lo esperado para condiciones distintas a El Niño (fig. 4). La falta de pulsos de nitratos durante la fase más intensa de las surgencias de 1997–1998 refuerzan la hipótesis de que durante esos años los flujos de NID se dieron principalmente a partir de la remineralización en el interior de BF.

En el presente estudio no se evaluó la contribución de amonio por excreción de moluscos bivalvos. Sin embargo, se ha estimado que en primavera y otoño el ostión *Crassostrea gigas* cultivado en la Bahía de Morlaix, Francia, excreta entre 2.5 y 6.7 $\mu\text{moles NH}_4^+ \text{ g}^{-1}$ tejido seco h^{-1} (Boucher y Boucher-Rodoni, 1988). Aun cuando la biomasa del ostión *C. gigas* cultivado en BF disminuyó hasta en un 60% debido a mortalidades inusuales ocurridas en 1998, durante ese periodo se introdujeron almejas del Golfo de California (García-Esquivel *et al.*, este volumen), alcanzando una biomasa combinada de ostiones y almejas de aproximadamente 2000 t (Aguirre-Muñoz *et al.*, 2001; Camacho-Ibar *et al.*, 2003). Utilizando las relaciones alométricas reportadas por García-Esquivel *et al.* (este volumen), y suponiendo que las 2000 t fueron ostiones, se estima que la biomasa anterior equivale a 38×10^6 ostiones adultos. Si consideramos una excreción de 4.6 $\mu\text{moles NH}_4^+ \text{ g}^{-1}$ tejido seco h^{-1} , en promedio, y un peso promedio de 1.9 g de tejido seco para ostiones de talla comercial cultivados en BF (García-Esquivel *et al.*, este volumen), lo anterior se traduce en aproximadamente 210 $\mu\text{moles NH}_4^+$ excretados por ostión por día, o 7.98×10^6 $\mu\text{moles d}^{-1}$ para el total de ostiones/almejas presentes en BF. Al dividir el valor anterior entre la superficie de BF ($9 \times 10^6 \text{ m}^2$) encontramos que los moluscos presentes durante el periodo 1997–1998 podrían haber excretado hasta 0.9 $\text{mmol NH}_4^+ \text{ m}^2 \text{ d}^{-1}$. Este valor representa entre el 24% y >100% de los flujos observados de NID para ese periodo (tablas 4, 5), lo cual sugiere que la excreción por moluscos

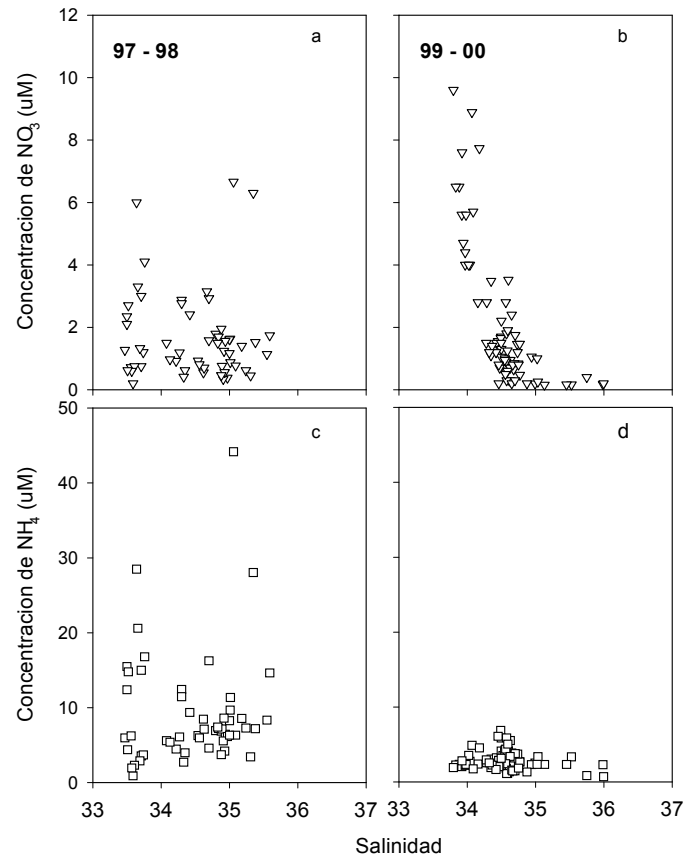


Figura 6. Relaciones salinidad-concentración de nitratos (a, b) y salinidad-concentración de amonio (c, d), generadas con todos los datos obtenidos durante 1997–1998 y 1999–2000.

Figure 6. Relation between salinity and nitrate concentration (a, b), and between salinity and ammonium concentration (c, d), generated with all the data obtained during 1997–1998 and 1999–2000.

reported concentrations of NH_4^+ greater than 1900 μM in interstitial waters of shallow sediments at San Quintín Bay. Predominance of DIN inputs by remineralization in 1997–1998 is similar to that reported for Monterey Bay during El Niño 1992/1993, where a substantial decrease in new production and increase in regenerated nutrients was observed (Kudela and Chávez, 2000). The reduction in the concentration of nitrates in coastal waters off San Quintín Bay during El Niño 1997/1998 is consistent with the negative anomalies in the concentration of nitrates (up to $-5 \mu\text{M}$) reported for central California waters (Chávez *et al.*, 2002). In contrast, the high positive correlation of nitrate with the tide in 1999–2000 (table 2) and its inverse relationship with salinity reflect the oceanic input of nitrates and new production towards the inner bay. Farfán and Álvarez-Borrego (1983) found that the fluxes of DIN from the ocean to San Quintín Bay were associated with the upwelling intensity. Pennington and Chávez (2000) also reported higher nitrate values of 7.5 to 20 μM in coastal surface waters of Monterey Bay in May and June, when upwelling was most intense. Even though Durazo and Baumgartner (2002) reported a warming of local CCS waters and a decrease in coastal upwelling during El Niño, the periodic temperature minima found in this study

bivalvos es un componente que debe ser considerado en los balances de nitrógeno de BF.

El gradiente de clorofila *a*, entre la boca y la cabeza de BF se mantuvo aun en presencia de El Niño, por lo cual es de suponer que el tiempo de residencia del agua y/o el pastoreo jugaron un papel crítico sobre la variabilidad espacial de la materia orgánica particulada en BF, especialmente durante El Niño, cuando la concentración media de clorofila importada del océano se redujo en más de la mitad al interior de BF (fig. 5a). Los tiempos de residencia del agua estimados para BF (tabla 1) a partir de la salinidad fueron similares a los reportados por Juárez-Villarreal (1982) y la tendencia estacional también coincidió con lo reportado para toda la Bahía San Quintín (Camacho-Ibar *et al.*, 2003). Anteriormente, estos autores habían sugerido que los largos tiempos de residencia en invierno se debían a la menor intensidad de los vientos del noroeste durante esa época del año. Aun cuando el papel del viento sobre el tiempo de residencia no se pudo confirmar, los resultados del presente estudio mostraron que la evacuación del agua es consistentemente más dinámica durante los meses de primavera y verano.

Balance de nutrientes

Los valores positivos de Δ PID estimados para BF durante y después del periodo de El Niño (tabla 4) indican que BF exportó permanentemente PID hacia el océano. Álvarez-Borrego y Chee-Barragán (1976) y Zertuche-González y Álvarez-Borrego (1978) reportaron la misma tendencia en estudios previos, pero ésta es la primera ocasión que se incluyen muestreos consecutivos durante y después de El Niño. La magnitud de los flujos no conservativos de PID encontrados en el presente estudio ($+0.01$ a $+0.57$ mmol m⁻² d⁻¹) son consistentes con los valores reportados para la misma zona por Camacho-Ibar *et al.* (2003) y con los flujos reportados para Bahía Tomales, California (Smith y Hollibaugh, 1997).

Los cálculos de Δ PID obtenidos con el modelo de LOICZ, traducidos a valores de MNE, indican que BF se comportó como un sistema heterotrófico neto, con valores más altos en verano y bajos en invierno (tabla 4). El hecho de que esta condición heterotrófica neta se haya mantenido en presencia de El Niño sugiere que durante ese periodo existió aporte externo de materia orgánica desde la boca hacia BF en cantidades suficientes para que la respiración (*r*) excediera la fotosíntesis (*p*). Esto no parece ser una condición inusual, ya que Smith y Hollibaugh (1997) reportaron que en la Bahía Tomales el MNE no presentó valores anómalos durante el evento de El Niño 1992/1993, y éstos se mantuvieron en el intervalo de 0 a -30 mmol C m⁻² d⁻¹ a lo largo de 8 años de observaciones, con excepción de algunos valores extremos que alcanzaron -60 mmol C m⁻² d⁻¹. En BF, todos los valores calculados hasta ahora se mantienen entre -1 y -28 mmol m⁻² d⁻¹, con excepción de un valor extremo de -60 mmol m⁻² d⁻¹ (tabla 4). Los resultados del cálculo del MNE para junio de 1999 indican

suggest that upwelling events occurred off San Quintín Bay even during El Niño. However, the subsurface water entering FB during this period was warm and poor in nitrates, whereas in 1999–2000 it was richer in nitrates (fig. 6a, b). It can be assumed that the differences in the concentration of DIN between 1997–1998 and 1999–2000 were because the samples were conducted during different stages of upwelling events. The continuous temperature analysis, verified with the Bakun index (<http://upwell.pfeg.noaa.gov>) for each series, indicated that only the November 1997 sampling was carried out in the absence of upwelling; the September 1997 and March 1998 samplings occurred during upwelling relaxation periods, and that of May 1997 during strong upwelling. The 1999–2000 samplings were carried out during relaxation and strong upwelling periods, in which nitrate peaks were observed, according to that expected for conditions different to those of El Niño (fig. 4). The lack of nitrate peaks during the most intense upwelling period of 1997–1998 supports the hypothesis that in those years, the DIN fluxes occurred mainly because of remineralization in the interior of FB.

The contribution of ammonium excreted by bivalve molluscs was not evaluated herein. It has been estimated that the oyster *Crassostrea gigas*, cultivated in Morlaix Bay (France), excretes between 2.5 and 6.7 μ mol NH₄⁺ g⁻¹ dry tissue h⁻¹ in spring and autumn (Boucher and Boucher-Rodoni, 1988). In 1998 the biomass of *C. gigas* cultured in BF decreased up to 60% due to unusual mortalities; however, clams from the Gulf of California were introduced during that period (García-Esquivel *et al.*, this issue), and the combined biomass of oysters and clams reached approximately 2000 t (Aguirre-Muñoz *et al.*, 2001; Camacho-Ibar *et al.*, 2003). Using the allometric relations reported by García-Esquivel *et al.* (this issue), and assuming that the 2000 t were oysters, the previous biomass was estimated to be 38×10^6 adult oysters. If we consider an average excretion of 4.6 μ mol NH₄ g⁻¹ dry tissue h⁻¹ and an average weight of 1.9 g dry tissue for commercial-size oysters cultured at FB (García-Esquivel *et al.*, this issue), this corresponds to 210 μ mol NH₄ excreted per oyster per day, or 7.98×10^6 mmol d⁻¹ for the total of oysters/clams in FB. If this value is divided by the surface of FB (9×10^6 m²), the molluscs present during 1997–1998 could have excreted up to 0.9 mmol NH₄ m² d⁻¹. This value represents between 24% and >100% of the DIN fluxes observed for this period (tables 4, 5), indicating that the excretion by bivalve molluscs is a component that must be considered in nitrogen budgets for FB.

The chlorophyll *a* gradient between the mouth and head of FB persisted even in the presence of El Niño; it is therefore assumed that the water residence time and/or grazing played a critical role in the spatial variability of the particulate organic matter in FB, especially during El Niño, when the mean concentration of chlorophyll imported from the ocean decreased by more than half in the interior of FB (fig. 5a). The water residence times estimated for FB (tabla 1) based on salinity were similar to those reported by Juárez-Villarreal (1982) and the seasonal trend also coincided with that reported for all of

que la fotosíntesis y la respiración en BF estuvieron casi balanceadas, lo cual podría considerarse como anómalo si consideramos que otros autores reportaron mayores valores de MNE en primavera y verano que en invierno (Smith y Hollibaugh, 1997; Camacho-Ibar *et al.*, 2003). No obstante, el gradiente de concentración de nitratos observado entre la cabeza y la boca de BF para esa fecha sugieren que hubo un consumo intenso por parte de productores primarios. En dicho muestreo se observaron, en general, las concentraciones más altas de clorofila *a* ($> 2 \text{ mg m}^{-3}$), incluso en el interior de BF (fig. 5b). Estas observaciones sugieren que durante este periodo se presentó un evento de alta producción primaria, lo cual balanceó los valores comúnmente elevados de respiración resultando en un valor de MNE cercano al cero.

En resumen, los resultados del presente estudio indican que BF es un sistema heterotrófico neto, tanto en presencia como en ausencia del fenómeno El Niño, por lo que exporta permanentemente DIP que se produce internamente a partir de la remineralización de materia orgánica importada. Durante El Niño 1997/1998 hubo fuertes pulsos de amonio en la columna de agua de BF, mayores que los que ocurrieron en el periodo no Niño. Se sugiere que dicha acumulación se debió a la remineralización bentónica de la materia orgánica y a la excreción de ostiones y almejas presentes en BF. Aunque los procesos de generación interna de amonio siguieron presentes durante los años no Niño, el agua del mar adyacente abasteció de nitrógeno nuevo a Bahía San Quintín con cada flujo de la marea. Este abasto promovió la producción nueva en el interior de la laguna (evidenciada por las mayores concentraciones de clorofila *a* en 1999–2000), favoreciendo el consumo biológico del NID y limitando la acumulación del mismo en la columna de agua.

Agradecimientos

El presente estudio fue realizado con financiamiento del Sistema de Investigación del Mar de Cortés, a través del proyecto Estimación del Potencial Productivo y Capacidad de Carga Ostrícola en Bahía San Quintín, Baja California (ref. SIMAC 980106020). Se agradece el apoyo logístico y en especie de la Empresa Integradora Acuacultores de San Quintín, S.A. de C.V. Nuestro agradecimiento especial a Conrado Rivera, Dulce Partida, Jesus Serrano y Sergio Jiménez por su ayuda durante los muestreos. El manuscrito mejoró notablemente con las sugerencias de Francisco Delgadillo-Hinojosa y otro revisor anónimo.

Referencias

- Aguirre-Muñoz, A., Buddemier, R.W., Camacho-Ibar, V., Carriquiry, J.D., Ibarra-Obando, S.E., Massey, B.W., Smith S.V. and Wulff, F. (2001). Sustainability of coastal resource use in San Quintín, Mexico. *AMBIO*, 30: 142–149.
- Álvarez-Borrego, S. y Chee-Barragán, A. (1976). Distribución superficial de fosfatos y silicatos en Bahía de San Quintín, BC. *Cienc. Mar.*, 3: 51–61.

San Quintín Bay (Camacho-Ibar *et al.*, 2003). These authors suggested that the long residence times in winter were due to less intense northwesterly winds at this time of year. Even though the effect of the wind on the residence time was not confirmed, the results of this study show that the evacuation of water is consistently more dynamic during the spring and summer months.

Nutrient budget

The positive ΔDIP values estimated for FB during and after the El Niño period (table 4) indicate that FB continuously exported DIP to the ocean. Álvarez-Borrego and Chee-Barragán (1976) and Zertuche-González and Álvarez-Borrego (1978) reported the same trend, but this is the first study that includes consecutive samplings during and after an El Niño event. The magnitude of the non-conservative fluxes of DIP presented herein ($+0.01$ a $+0.57 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) are consistent with the values reported for the same zone by Camacho-Ibar *et al.* (2003) and with the fluxes reported for Tomales Bay, California (Smith and Hollibaugh, 1997).

The ΔDIP calculations obtained with the LOICZ model, converted into NEM values, indicate that FB behaved as a net heterotrophic system, with higher values in summer than in winter (table 4). The fact that this net heterotrophic condition continued in the presence of El Niño suggests that there was an external input of organic matter from the mouth to FB in sufficient amounts for respiration (*r*) to exceed photosynthesis (*p*). This does not seem to be an unusual condition; Smith and Hollibaugh (1997) reported that NEM values for Tomales Bay were not anomalous during El Niño 1992/1993, ranging from 0 to $-30 \text{ mmol C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ throughout eight years of observation, except for some extreme values of $-60 \text{ mmol C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. For FB, all the values calculated so far range from -1 to $-28 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, except for an extreme value of $-60 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (table 4). The NEM results for June 1999 indicate that there was a balance between photosynthesis and respiration in FB, which could be considered anomalous since other authors have reported higher NEM values in spring and summer than in winter (Smith and Hollibaugh, 1997; Camacho-Ibar *et al.*, 2003). Nevertheless, the nitrate concentration gradient between the head and mouth of FB for that date indicates that there was intense consumption by primary producers. That series produced, in general, the highest chlorophyll *a* concentrations ($> 2 \text{ mg m}^{-3}$), even in the interior of FB (fig. 5b). These observations suggest that a high primary production event occurred during that period, which balanced the normally high respiration values, resulting in a NEM value close to zero.

In summary, the results of this study indicate that FB is a net heterotrophic system, both in the presence and absence of the El Niño phenomenon, and that it continuously exports DIP which is produced internally as a result of remineralization of imported organic matter. During the 1997/1998 El Niño event, there were high peaks of ammonium in the water column of FB, greater than those during the non-El Niño period. This

- Boucher, G. and Boucher-Rodoni, R. (1988). *In situ* measurement of respiratory metabolism and nitrogen fluxes at the interface of oyster beds. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 44: 229–238.
- Camacho-Ibar, V.F. and Álvarez-Borrego, S. (1988). Nutrient concentration in pore waters of intertidal sediments in a coastal lagoon: Patchiness and temporal variations. *Sci. Total Environ.*, 75: 325–339.
- Camacho-Ibar, V.F., Carriquiry, J.D. and Smith, S.V. (1999). Bahía San Quintín, Baja California: N/P budgets within compartments in a coastal lagoon. In: Mexican and Central American Coastal Lagoon Systems: Carbon, Nitrogen and Phosphorus Fluxes (Regional Workshop II). LOICZ Reports and Studies No. 13, LOICZ, Texel, Netherlands, pp. 65–78.
- Camacho-Ibar, V.F., Carriquiry, J.D. and Smith, S.V. (2003). Non-conservative P and N fluxes and net ecosystem production in San Quintín Bay, Mexico. *Estuaries*, 26(5): 1220–1237.
- Chávez, F.P., Pennington, J.T., Castro, C.G., Ryan, J.P., Michisaki, R.P., Schlining, B., Walz, P., Buck, K.R., McFadyen, A. and Collins, C. (2002). Biological and chemical consequences of the 1997–1998 El Niño in central California waters. *Prog. Oceanogr.*, 54: 205–232.
- Durazo, R. and Baumgartner, T.R. (2002). Evolution of oceanographic conditions off Baja California: 1997–1999. *Prog. Oceanogr.*, 54: 7–73.
- Farfán, B.C. and Álvarez-Borrego, S. (1983). Variability and fluxes of nitrogen and organic carbon at the mouth of a coastal lagoon. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 17: 599–612.
- García-Esquivel, Z., González-Gómez, M.A., Ley-Lou, F. y Mejía-Trejo, A. (2003). Potencial ostrícola del brazo oeste de Bahía San Quintín: Biomasa actual y estimación preliminar de la capacidad de carga. *Cienc. Mar.*, 30(1): 71–84.
- Gordon, D.C.J.R., Boudreau, P.R., Mann, K.H., Ong, J.E., Silvert, W.L., Smith, S.V., Wattayakorn, G., Wulff, F. and Yanagi, T. (1996). LOICZ Biogeochemical Modelling Guidelines. LOICZ Report and Studies No. 5. 2nd ed. LOICZ, Texel, Netherlands, vi + 96 pp.
- Ibarra-Obando, S.E., Camacho-Ibar, V.F., Carriquiry, J.D. and Smith, S.V. (2001). Upwelling and lagoonal ecosystems of the dry Pacific coast of Baja California. In: U. Seeliger and B. Kjerfve (eds.), *Coastal Marine Ecosystems of Latin America. Ecological Studies*. Vol. 144. Springer-Verlag, Berlin, pp. 315–330.
- Juárez-Villarreal, M.M. (1982). Modelo de dispersión para un estuario ramificado y su aplicación a Bahía de San Quintín. Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, Baja California, 79 pp + apéndice.
- Kudela, R.M. and Chávez, F.P. (2000). Modeling the impact of the 1992 El Niño on new production in Monterey Bay, California. *Deep-Sea Res.*, II 47: 1055–1076.
- Ladah, L.B., Zertuche-González, J.A. and Hernández-Carmona (1999). Giant kelp (*Macrocystis pyrifera*, Phaeophyta) recruitment near its southern limit in Baja California after mass disappearance during ENSO 1997–1998. *J. Phycol.*, 35: 1106–1112.
- López, O.R. (1992). Termógrafo Digital Submarino. *Rev. Instrumentación y Desarrollo, SOMI*, 3, 2.
- Lynn R., Schwing, F.B. and Hayward, T.L. (1995). The effect of the ENSO on the California Current System. *CalCOFI Rep.*, 36: 57–71.
- accumulation seems to be due to benthic remineralization of organic matter and to oyster and clam excretion. Even though the processes of internal generation of ammonium continued during the non-Niño years, the adjacent seawater supplied new nitrogen to San Quintín Bay with every tidal flow. This supply generated new production in the inner part of the lagoon (revealed by the higher chlorophyll *a* concentrations in 1999–2000), favouring the biological consumption of DIN and limiting its accumulation in the water column.

Acknowledgements

This work received financial support from Sistema de Investigación del Mar de Cortés, through project Estimación del Potencial Productivo y Capacidad de Carga Ostrícola en Bahía San Quintín, Baja California (ref. SIMAC 980106020). We thank the Empresa Integradora Acuacultores de San Quintín, S.A. de C.V., for their support, and Conrado Rivera, Dulce Partida, Jesús Serrano and Sergio Jiménez for their help during the samplings. The comments of Francisco Delgadillo-Hinojosa and an anonymous reviewer helped to significantly improve the manuscript.

English translation by Christine Harris.

- Pennington, J.T. and Chávez, F.P. (2000). Seasonal fluctuations of temperature, salinity, nitrate, chlorophyll and primary production at station H3/M1 over 1989–1996 in Monterey Bay, California. *Deep-Sea Res.*, 47: 947–973.
- Schwing, F.B., Hayward, T.L., Sakuma, K.M., Murphree, T., Mascarenhas, A.S., Larios-Castillo, S.I., Mantyla, A.W., Cummings, S.L., Chávez, F.P., Baltz, K. and Ainley, D.G. (1997). The state of the California Current, 1996–1997: Mixed signals from the tropics. *CalCOFI Rep.*, 38: 22–47.
- Silva-Cota, S. and Álvarez-Borrego, S. (1988). The “El Niño” effect on the phytoplankton of a northwestern Baja California coastal lagoon. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 27: 109–115.
- Smith, S.V. and Hollibaugh, J.T. (1997). Annual cycle and interannual variability of ecosystem metabolism in a temperate climate embayment. *Ecol. Monogr.*, 67: 509–533.
- Strickland, J.D. and Parsons, T.R. (1972). *A Practical Handbook of Seawater Analysis*. 2nd ed. Bull. Fish. Res. Bd. Canada, 167, 311 pp.
- Torres-Moye, G. y Álvarez-Borrego, S. (1985). Efectos de El Niño en los nutrientes y el fitoplancton de verano de 1983, en aguas costeras de Baja California occidental. *Cienc. Mar.*, 11(3): 107–113.
- Zertuche-González, J.A. y Álvarez-Borrego, S. (1978). Series de tiempo de variables fisicoquímicas en las bocas de dos antiestuarios de Baja California. *Cienc. Mar.*, 5(1): 91–103.