

**TEMPERATURA, SALINIDAD, NUTRIENTES Y CLOROFILA *a* EN  
AGUAS COSTERAS DE LA ENSENADA DEL SUR DE CALIFORNIA**

**TEMPERATURE, SALINITY, NUTRIENTS AND CHLOROPHYLL *a*  
IN COASTAL WATERS OF THE SOUTHERN CALIFORNIA BIGHT**

T. Leticia Espinosa-Carreón\*  
Gilberto Gaxiola-Castro  
José María Robles-Pacheco  
Sila Nájera-Martínez

División de Oceanología  
Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada  
Km. 107 Carretera Tijuana-Ensenada  
Ensenada, C.P. 22860, Baja California, México  
\* E-mail: lespinos@cicese.mx

*Recibido en noviembre de 2000; aceptado en junio de 2001*

**RESUMEN**

Durante cinco muestreos realizados en aguas costeras del sur de la Ensenada del Sur de California (ESC), se estudió la variabilidad estacional de los nutrientes inorgánicos disueltos (fosfatos,  $\text{PO}_4^{3-}$ ; nitratos,  $\text{NO}_3^-$ ; nitritos,  $\text{NO}_2^-$ ) y clorofila *a*. Los cambios estacionales de las propiedades físicas en el área son principalmente derivados de los procesos regionales del Océano Pacífico adyacente. El agua presente en la zona costera parece estar relacionada con la dinámica del sistema de la Corriente de California y su variabilidad estacional. Durante los muestreos de marzo y junio se encontró agua con baja temperatura ( $11^\circ\text{C}$ ) y alta salinidad (33.7), derivada del afloramiento de aguas subsuperficiales. Esta agua fría y salina está asociada con un incremento de las concentraciones de nutrientes en la columna de agua ( $127 \mu\text{mol m}^{-2}$  de nitratos y  $22 \mu\text{mol m}^{-2}$  de fosfatos) y clorofila *a* ( $74 \text{ mg m}^{-2}$ ). Las aguas frías y de relativa alta salinidad son el resultado de la mezcla del Agua Subártica modificada y Agua del Pacífico Ecuatorial, que fluye hacia la superficie de la ESC durante los periodos de afloramientos costeros. El incremento en la temperatura ( $\sim 18^\circ\text{C}$ ) y el decremento en la salinidad ( $\sim 33.4$ ) durante septiembre y octubre es resultado de la disminución del afloramiento costero derivado del debilitamiento del esfuerzo del viento en la zona. Durante estos meses se incrementa el flujo de agua superficial más caliente y pobre en nutrientes, derivada del giro ciclónico frente a la costa de la ESC. La variabilidad estacional de la temperatura y salinidad medida en la zona costera sigue el patrón general de la región sur de la ESC, determinado por estudios mucho más extensos en tiempo y espacio.

*Palabras clave:* clorofila *a*, nutrientes, variabilidad costera.

## ABSTRACT

The seasonal variability of dissolved inorganic nutrients (phosphates,  $\text{PO}_4^{3-}$ ; nitrates,  $\text{NO}_3^-$ ; nitrites,  $\text{NO}_2^-$ ) and chlorophyll *a* was studied during five surveys in nearshore waters of the southern region of the Southern California Bight (SCB). The seasonal changes in the physical properties of the area are derived mainly from the regional processes of the adjacent Pacific Ocean. The water present in the coastal zone seems to be related to the dynamics of the California Current System and its seasonal variability. High-salinity (33.7) and low-temperature (11°C) water sampled in March and June is derived from upwelled subsurface water, and is associated with an increase in nutrient concentrations (nitrates,  $127 \mu\text{mol m}^{-2}$ ; phosphates,  $22 \mu\text{mol m}^{-2}$ ) and chlorophyll *a* ( $74 \text{ mg m}^{-2}$ ) in the water column. The cool and relatively high-salinity water is the result of the mixing of modified Subarctic Water with Equatorial Pacific Water, which flows into SCB during coastal upwellings. The increase in temperature ( $\sim 18^\circ\text{C}$ ) and decrease in salinity ( $\sim 33.4$ ) during September and October can be explained by the decrease in coastal upwelling due to reduced wind stress. During these months, there is an increase in the flow of warmer and surface water that is poor in nutrients, derived from the cyclonic eddy off the coast of SCB. The seasonal variability of temperature and salinity measured in the coastal zone follows the general pattern of the southern region of the SCB.

*Key words:* chlorophyll *a*, nutrients, inshore variability.

## INTRODUCCIÓN

La Ensenada del Sur de California (ESC) es uno de los sistemas costeros más estudiados del Océano Pacífico (Carlucci *et al.*, 1986; Jackson, 1986; Dailey *et al.*, 1993) y tal vez del mundo. La extensión geográfica del ESC comprende desde Punta Concepción en California, EUA, hasta Punta Colonet en Baja California, México. La ensenada es definida como un cambio en el ángulo de línea de costa asociado con la topografía del sur de California y el noroeste de Baja California. Esta región de la ESC en la zona estadounidense comprende uno de los programas oceanográficos con mayor esfuerzo científico. Desafortunadamente, en el área costera mexicana se han realizado pocos estudios que relacionen las características físicas y biológicas de una forma más integral.

Uno de los factores oceanográficos que influyen en la zona de la ESC es la presencia de la Corriente de California (CC), la cual contribuye fuertemente a los cambios en las características oceanográficas que se encuentran en

## INTRODUCTION

The Southern California Bight (SCB) is one of the most studied coastal systems in the Pacific Ocean (Carlucci *et al.*, 1986; Jackson, 1986; Dailey *et al.*, 1993) and perhaps throughout the world. The geographical area of the SCB extends from Point Conception, California (USA), to Punta Colonet, Baja California (Mexico). This bight is defined as a change in the angle of the shoreline associated with the topography of southern California and northwestern Baja California. One of the most intense oceanographic programs has been conducted in the American part of the SCB. Unfortunately, few studies have been carried out in the Mexican part that relate the physical and biological characteristics in a more integrated manner.

One of the oceanographic factors that influence the area of the SCB is the presence of the California Current (CC), which contributes strongly to the changes in the oceanographic characteristics of the area (Hickey, 1993). The

esta área (Hickey, 1993). La CC constituye principalmente un amplio flujo hacia el Ecuador, que ocurre frente a las costas del oeste de Estados Unidos y noroeste de México. Los cambios temporales de algunas variables oceanográficas medidos en la zona costera de la ESC han sido utilizados para entender la variabilidad en el régimen de la CC. Por ejemplo, los registros de la temperatura superficial del agua obtenidos junto al muelle de la Institución Scripps de Oceanografía (SIO) desde 1916, han sido analizados a diferentes escalas de tiempo para entender la señal de algunos procesos físicos del Océano Pacífico (List y Koh, 1976; Pineda, 1991, 1994). List y Koh (1976) concluyeron que los datos de temperatura medidos junto al muelle de SIO son representativos de cambios en el océano abierto, a escalas de tiempo mayores que semanas; además, son utilizados para determinar anomalías en el Océano Pacífico norte a escalas interanuales (Latif y Barnett, 1994).

A pesar del aislamiento parcial del ESC de la región de la CC (Smith, 1995), la mayor parte de los cambios hidrográficos de la zona responden a la variabilidad regional del régimen oceánico adyacente. Los cambios de otros factores que afectan el ambiente biológico, como los nutrientes inorgánicos disueltos y la clorofila del fitoplancton, pueden servir como indicadores de los procesos de fertilización en la zona costera, donde estas variables tienen una respuesta de horas a días a los cambios hidrográficos.

En el presente trabajo se estudió la variabilidad estacional de los nutrientes inorgánicos disueltos (fosfatos,  $\text{PO}_4^{3-}$ ; nitratos,  $\text{NO}_3^-$ ; y nitritos  $\text{NO}_2^-$ ), así como la clorofila *a* del fitoplancton en relación con los cambios en el campo hidrográfico del sur de la ESC. Proponemos que las propiedades hidrográficas medidas en determinados meses del año pueden usarse para caracterizar la variabilidad estacional del sur de la ESC. Con este fin, se

CC mainly constitutes a wide stream towards the Equator that occurs off the coasts of the western United States and northwestern Mexico. The temporal changes of some oceanographic variables measured in the coastal area of the SCB have been used to understand the variability in the regime of the CC. For example, the records of the surface water temperature obtained off the pier of Scripps Institution of Oceanography (SIO) since 1916 have been analyzed in different time scales, in order to understand the signals of some physical processes of the Pacific Ocean (List and Koh, 1976; Pineda, 1991, 1994). List and Koh (1976) concluded that the temperature data measured near the SIO pier are representative of changes in the open ocean, at time scales greater than weeks; furthermore, they are used to determine anomalies in the north Pacific Ocean at interannual scales (Latif and Barnett, 1994).

In spite of the partial isolation of the SCB from the CC region (Smith, 1995), most of the hydrographic changes in the area respond to the regional variability of the adjacent oceanic regime. Changes in other factors affecting the biological environment, such as the dissolved inorganic nutrients and phytoplankton chlorophyll, can serve as indicators of the fertilization processes in the coastal area, where these variables react within hours to days to the hydrographic changes.

In the present work, the seasonal variability of dissolved inorganic nutrients (phosphates,  $\text{PO}_4^{3-}$ ; nitrates,  $\text{NO}_3^-$ ; and nitrites,  $\text{NO}_2^-$ ) was studied, as well as the chlorophyll *a* of the phytoplankton in relation to the changes in the hydrographic field of the southern region of the SCB. We propose that the hydrographic properties measured in certain months of the year can be used to characterize the seasonal variability of the southern part of the SCB. Hence, the Todos Santos Bay area, in Baja California (fig. 1), was selected, as it is

seleccionó la zona de la Bahía de Todos Santos, Baja California (fig. 1), como un área representativa de la hidrografía de la región sur de la ESC; además, tiene una amplia comunicación con el Océano Pacífico adyacente y provee la facilidad de realizar muestreos oceanográficos cortos y de menor costo.

El objetivo principal de este trabajo es entender la variabilidad estacional de los procesos de fertilización de la región, en respuesta a cambios ocurridos en el sistema de la CC adyacente. Debido a que el índice de surgencia costera calculado para el área de la ESC es muy bajo, y aparentemente sin cambios fuertes durante el año (Jackson, 1986), esperamos que la variabilidad estacional de nutrientes y clorofila *a* sea principalmente el resultado de los cambios en las aguas adyacentes al área de estudio. Sin embargo, es posible que los cambios en estas variables estén asociados con procesos locales, como mezcla y transporte por marea, corrientes costeras derivadas del viento y la batimetría, así como con cambios estacionales en la irradiación solar.

#### ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se localiza al sur de la ESC, en la Bahía de Todos Santos, región noroeste de la península de Baja California (México), entre los 31°40' y 31°56' N y 116°36' y 116°55' W. La bahía cuenta con dos bocas por las que establece comunicación con el Océano Pacífico, además de dos pequeñas islas, llamadas islas de Todos Santos (fig. 1). El viento promedio medido en la región de las islas presenta un componente noroeste y sopla con el doble de velocidad que en la parte interna de la bahía (Pavía y Reyes, 1983). Durante otoño e invierno, los vientos del noroeste son interrumpidos por vientos fuertes, cálidos y secos del sureste llamados "santaninas", con velocidades mayores que 12 m s<sup>-1</sup> (Gil *et al.*, 1991).

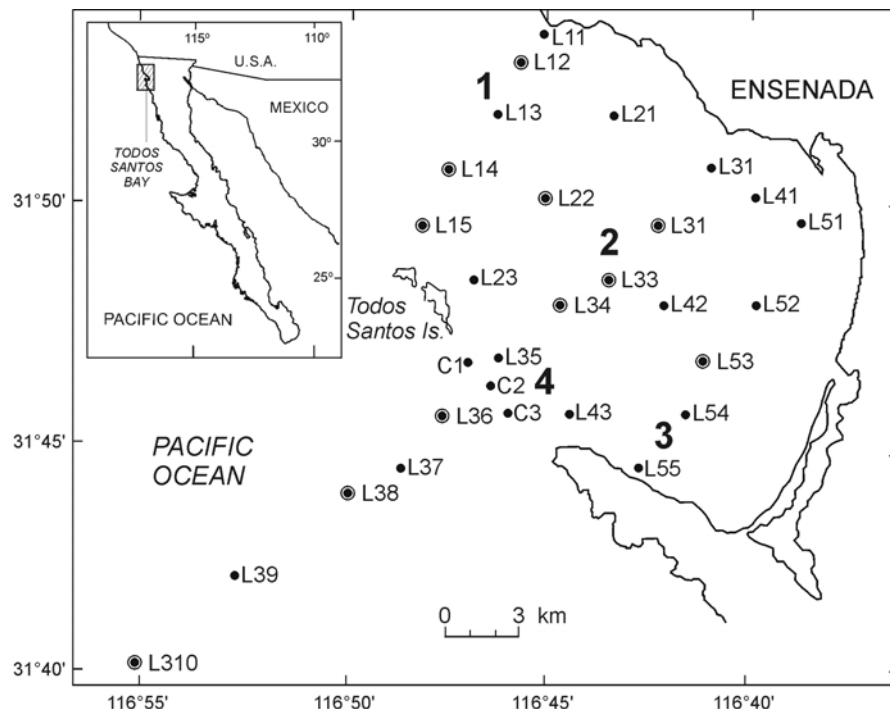
representative of the hydrography of the southern region of the SCB; also, it has ample communication with the adjacent Pacific Ocean and it is accessible for short, less expensive oceanographic surveys.

The main objective of this work is to understand the seasonal variability of the fertilization processes in the region, in response to changes that occur in the adjacent CC system. Given the low and relatively stable coastal upwelling index calculated for the area of the SCB (Jackson, 1986), we expect that the seasonal variability of nutrients and chlorophyll *a* will be the result of changes in the waters adjacent to the study area. However, the changes in these variables may be related to local processes, such as mixing and tidal transport, wind-derived coastal currents and bathymetry, as well as to seasonal changes in the solar irradiation.

#### STUDY AREA

The study area is located in the southern region of the SCB, in Todos Santos Bay (31°40'–31°56' N, 116°36'–116°55' W), located in the northwestern region of the Baja California peninsula (Mexico). The bay has two mouths through which it connects with the Pacific Ocean, as well as two small islands called Todos Santos Islands (fig. 1). On average, northwesterly winds predominate in the region of the islands, with wind speeds that are twice as high as those in the internal part of the bay (Pavía and Reyes, 1983). During autumn and winter, the northwesterly winds are interrupted by strong, warm, dry winds from the southeast called "Santa Anna winds", with speeds of more than 12 m s<sup>-1</sup> (Gil *et al.*, 1991).

According to Mancilla and Martínez (1991), the surface water temperature in the bay varies from low values in February to the highest values in August and September,



**Figura 1.** Localización de los lugares muestreados en el área de la Bahía de Todos Santos (Baja California, México). Los círculos cerrados muestran las estaciones hidrográficas (CTD y fluorescencia) y los círculos abiertos los puntos donde se recolectaron muestras discretas para los análisis de nutrientes y clorofila. Los números de mayor tamaño son los cuatro puntos seleccionados como representativos de las diferentes condiciones hidrográficas en la bahía, de los cuales se muestran perfiles verticales.

**Figure 1.** Location of the sampling spots in the area of Todos Santos Bay (Baja California, Mexico). The closed circles indicate the hydrographic stations (CTD and fluorescence) and the open circles the spots where discrete samples were collected for the analysis of nutrients and chlorophyll. The largest-sized numbers are the four spots selected as representative of the different hydrographic conditions of the bay, for which vertical profiles are shown.

De acuerdo con Mancilla y Martínez (1991), la temperatura superficial del agua en la bahía varía de bajos valores en febrero, hasta los mayores en agosto y septiembre, con salinidad máxima de 33.70 en el verano y mínima de 33.30 en invierno. Con base en registros continuos de termógrafos instalados en el área de las islas de Todos Santos, Granados-Guzmán *et al.* (1995) reportaron mínimos de la temperatura superficial cercanos a 11.0°C en junio y máximos de hasta 21.4°C en agosto. Estos

with a maximum salinity of 33.70 in summer and minimum of 33.30 in winter. Based on the continuous recordings of thermographs installed in the area of the Todos Santos Islands, Granados-Guzmán *et al.* (1995) reported a minimum surface temperature close to 11.0°C in June and maximum of 21.4°C in August. These authors also report that the lowest mean surface temperatures were 11.2°C and 12.5°C in spring and summer (May and July, respectively).

autores reportan que las temperaturas superficiales promedio más bajas fueron de 11.2°C y 12.5°C en primavera y verano (mayo y julio, respectivamente).

En la zona de la ESC, se ha calculado un bajo transporte de Ekman hacia fuera de la costa, sin una variabilidad estacional aparente durante todo el año (Jackson, 1986), donde las surgencias costeras en la ESC son sólo un débil fenómeno durante el verano. Álvarez-Borrego y Álvarez-Borrego (1982) concluyeron que durante los meses de primavera y verano, el agua fría medida en el interior de la bahía es originada por el afloramiento fuera de la costa. En la Bahía de Todos Santos, la variabilidad hidrográfica parece estar fuertemente influenciada por los cambios estacionales de la CC (Álvarez-Sánchez, 1971), la cual se aproxima a la costa durante abril y mayo, retirándose al final del verano.

En años recientes anteriores a este trabajo (1992–1993), se presentaron leves condiciones de El Niño en la zona, resultando en una elevación del nivel del mar, anomalías positivas de temperatura, hundimiento de la termoclina/nutriclina y bajos valores de la clorofila del fitoplancton, con un restablecimiento de las condiciones normales a partir de abril de 1994 (Hayward *et al.*, 1994). Debido a cambios en la circulación de la atmósfera, se presentó una fuerte transición entre otoño e invierno de 1994 y la primavera de 1995, ocasionando fuertes y frecuentes tormentas en la zona de la ESC (Hayward *et al.*, 1995).

## MÉTODOS

Los datos fueron recolectados en el área de la Bahía de Todos Santos (fig. 1), durante cinco cruceros en enero, marzo, junio, septiembre y octubre de 1994, con la finalidad de cubrir un ciclo anual, en el primer viaje del B/O *Francisco de Ulloa*. Para obtener los registros de temperatura y salinidad, se utilizó

In the SCB, low Ekman transport offshore has been calculated, with no apparent seasonal variability throughout the year (Jackson, 1986) and with only a weak coastal upwelling phenomenon during the summer. Álvarez-Borrego and Álvarez-Borrego (1982) concluded that during the spring and summer months, the cold water recorded inside the bay is caused by upwelling off the coast. In Todos Santos Bay, the hydrographic variability seems to be strongly influenced by the seasonal changes of the CC (Álvarez-Sánchez, 1971), which approaches the coast during April and May, and withdraws at the end of the summer.

In recent years prior to this work (1992–1993), slight El Niño conditions appeared in the area, resulting in a rise of the sea level, positive temperature anomalies, sinking of the thermocline/nutricline, and low phytoplankton chlorophyll values; normal conditions returned in April 1994 (Hayward *et al.*, 1994). Due to changes in the atmospheric circulation, a severe transition occurred between the autumn and winter of 1994 and the spring of 1995, causing heavy and frequent storms in the area of the SCB (Hayward *et al.*, 1995).

## METHODS

The data were collected in the Todos Santos Bay area (fig. 1), during five cruises in January, March, June, September and October 1994, aiming to cover an annual cycle, in the first trip of the R/V *Francisco de Ulloa*. Temperature and salinity were recorded with a Sea-Bird 9/11 CTD, and a SeaTech fluorimeter was used to obtain the continuous fluorescence data of chlorophyll *a*. The water samples for the analysis of chlorophyll *a* and nutrients (phosphates, PO<sup>-3</sup><sub>4</sub>; nitrates, NO<sup>-3</sup><sub>3</sub>; and nitrites NO<sup>-2</sup><sub>2</sub>) were

un CTD Sea-Bird 9/11, junto con un fluorímetro SeaTech para los datos continuos de la fluorescencia de la clorofila *a*. Las muestras de agua para el análisis de clorofila *a* y nutrientes (fosfatos,  $\text{PO}_4^{3-}$ ; nitratos,  $\text{NO}_3^-$ ; y nitritos,  $\text{NO}_2^-$ ) fueron obtenidas desde la superficie hasta ~50 m, de profundidades de 0, 5, 10, 15, 20, 30 y 50 m, utilizando botellas Niskin de 5 L de capacidad acopladas a una roseta.

Para la determinación de la clorofila, se pasaron 250 mL de la muestra, con ayuda de una bomba de vacío, a través de filtros de fibra de vidrio GF/C de 22 mm de diámetro y ~1.2  $\mu\text{m}$  de tamaño de poro en los muestreos de marzo y junio, y a través de filtros de membrana de 22 mm de diámetro y 0.45  $\mu\text{m}$  de tamaño de poro en los muestreos de enero, septiembre y octubre. Los filtros se etiquetaron y se almacenaron en un congelador a  $-20^\circ\text{C}$  hasta su análisis. Las muestras para clorofila se analizaron siguiendo el método descrito por Holm-Hansen *et al.* (1965), con un fluorímetro Turner Designs. La extracción de la clorofila *a* se realizó con acetona al 90% en la oscuridad durante 24 horas, de acuerdo con la recomendación de Venrick y Hayward (1984). Los cálculos de concentración de clorofila *a* ( $\text{mg m}^{-3}$ ) se realizaron de acuerdo con Parsons *et al.* (1984).

Los perfiles verticales continuos de fluorescencia obtenidos con el fluorímetro SeaTech (unidades relativas de fluorescencia = URF) fueron transformados a clorofila *a* ( $\text{mg m}^{-3}$ ), utilizando todos los datos de clorofila analizados para las mismas profundidades de las URF medidos por el fluorímetro, obteniéndose la concentración a partir de una regresión lineal simple: clorofila *a* = 0.93 (URF) - 0.22; ( $r^2 = 0.82$ ;  $n = 972$ ;  $p \leq 0.05$ ).

Los nutrientes inorgánicos disueltos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NO}_2^-$ ) fueron analizados con un auto-analizador de flujo segmentado Technicon, siguiendo la técnica de Murphy y Riley (1962)

obtenido from the surface down to ~50 m, at depths of 0, 5, 10, 15, 20, 30 and 50 m, using 5-L Niskin bottles coupled to a rosette.

For the determination of chlorophyll, a vacuum pump was used to filter 250 mL of the sample through GF/C fiberglass filters of 22 mm diameter and ~1.2- $\mu\text{m}$  pore size, for the March and June surveys; however, for the January, September and October surveys, filters of 22 mm diameter and 0.45- $\mu\text{m}$  pore size were used. The filters were labeled and stored in a freezer at  $-20^\circ\text{C}$  until they were analyzed. The chlorophyll samples were analyzed following the method described by Holm-Hansen *et al.* (1965), with a Turner Designs fluorimeter. The extraction of chlorophyll *a* was carried out with 90% acetone in the dark during 24 hours, according to the recommendations of Venrick and Hayward (1984). The chlorophyll *a* concentration ( $\text{mg m}^{-3}$ ) was estimated according to Parsons *et al.* (1984).

The continuous vertical profiles of fluorescence, obtained with the SeaTech fluorimeter (relative fluorescence units = RFU), were transformed to chlorophyll *a* ( $\text{mg m}^{-3}$ ), using all the chlorophyll data analyzed for the same depths of the RFU measured by the fluorimeter, and the concentration from a simple linear regression was obtained: chlorophyll *a* = 0.93 (RFU) - 0.22; ( $r^2 = 0.82$ ;  $n = 972$ ;  $p \leq 0.05$ ).

The dissolved inorganic nutrients ( $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{NO}_2^-$ ) were analyzed with a Technicon segmented flow autoanalyzer, following the technique of Murphy and Riley (1962) for  $\text{PO}_4^{3-}$ , and of Armstrong *et al.* (1967) for  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{NO}_2^-$ . The final concentration of each nutrient was calculated according to the method described by Parsons *et al.* (1984).

para  $\text{PO}_4^{3-}$  y de Armstrong *et al.* (1967) para  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NO}_2^-$ . La concentración final de cada nutriente se calculó de acuerdo con el método descrito por Parsons *et al.* (1984).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Temperatura y salinidad

La temperatura y la salinidad del área de estudio mostraron diferencias durante los meses del año, con una columna de agua completamente mezclada durante enero y más estructurada en los demás meses. Se determinó una termoclina más definida durante septiembre y octubre en comparación con los primeros meses del estudio (fig. 2).

Con el fin de comparar la variabilidad estacional de la temperatura y la salinidad de la columna de agua, se usaron datos de los 25 m de profundidad, lo cual evita los cambios locales debidos al calentamiento y evaporación. La temperatura del agua a esta profundidad dentro de la bahía tuvo un intervalo de junio a septiembre de  $\sim 11.0^\circ\text{C}$  a  $\sim 17.0^\circ\text{C}$ . Las temperaturas más bajas se registraron en marzo y junio, y las más altas en enero y septiembre. Los valores promedio de salinidad para 25 m de profundidad variaron de 33.42 en enero a 33.65 en junio, decreciendo a  $\sim 33.35$  en septiembre y octubre. El agua modificada proveniente del subártico con baja salinidad (Reid *et al.*, 1958), la cual es transportada por la CC, estuvo presente en el área principalmente durante enero, septiembre y octubre, con registros de salinidad entre 33.33 y 33.37 (fig. 2a, d, e). El agua con alta salinidad y baja temperatura medida en la zona de estudio en marzo y junio (fig. 2b, c) está asociada con las características del agua originada por los procesos de afloramientos costeros (Lynn y Simpson, 1987). Esta agua es una mezcla del Agua Subártica y Agua Ecuatorial (Tibby,

## RESULTS AND DISCUSSION

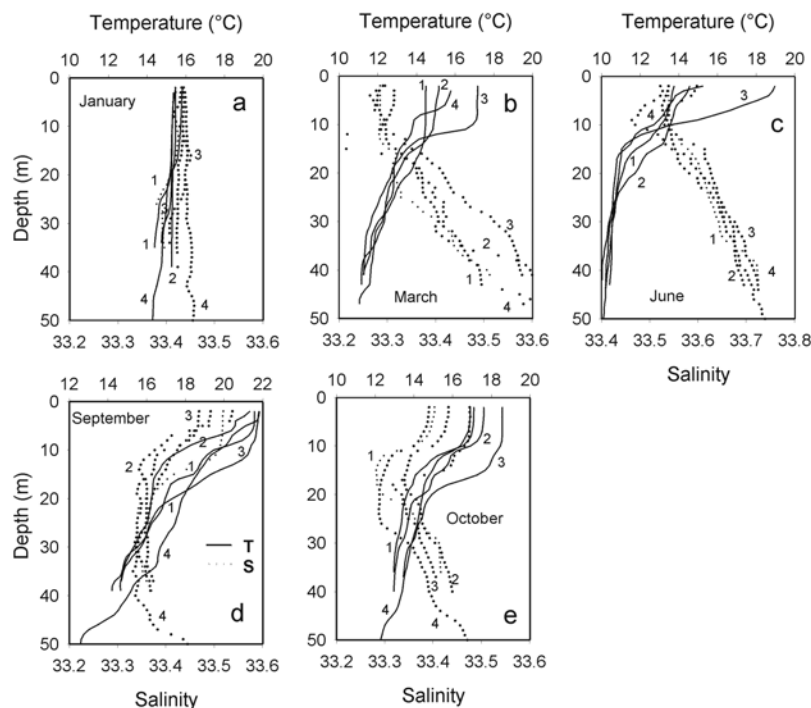
### Temperature and salinity

Temperature and salinity of the study area showed differences during the months of the year, with a totally mixed water column in January and a more stratified one in the other months. A better-defined thermocline was determined in September and October compared to the first months of the study (fig. 2).

In order to compare the seasonal variability of the temperature and salinity of the water column, the 25-m-depth data were used, thus avoiding local changes due to heating and evaporation. Water temperature at this depth inside the bay ranged between  $\sim 11.0^\circ\text{C}$  and  $\sim 17.0^\circ\text{C}$ , from June to September. The lowest temperatures were recorded in March and June, and the highest ones in January and September. Mean salinity values at the 25-m depth ranged from 33.42 in January to 33.65 in June, decreasing to  $\sim 33.35$  in September and October. The modified Subarctic Water of low salinity (Reid *et al.*, 1958), which is transported by the CC, was present in the area mainly during January, September and October, with salinities between 33.33 and 33.37 (fig. 2a, d, e). The high-salinity and low-temperature water measured in the study area in March and June (fig. 2b, c) is associated with the characteristics of the water originated by coastal upwelling (Lynn and Simpson, 1987). This water is a mixture of Subarctic and Equatorial waters (Tibby, 1941), and is the one that finally upwells in the coastal zone with Upwelled Water characteristics (Lynn and Simpson, 1987).

According to some authors (Gómez-Valdez and Vélez-Muñoz, 1982; Lynn and Simpson, 1987), these changes in temperature and salinity during an annual variation can be explained by the temporal and spatial variability of the CC in the area, by modifications in





**Figura 2.** Distribución vertical de temperatura y salinidad para los cinco periodos muestreados (enero, marzo, junio, septiembre y octubre). Los perfiles representan las cuatro áreas dentro de la bahía, con los números grandes de la figura 1.

**Figure 2.** Vertical distribution of temperature and salinity for the five periods sampled (January, March, June, September and October). The profiles represent the four areas in the bay with the large-sized numbers of figure 1.

1941), y es la que finalmente aflora en la zona costera con característica de Agua de Surgencia (Lynn y Simpson, 1987).

De acuerdo con algunos autores (Gómez-Valdez y Vélez-Muñoz, 1982; Lynn y Simpson, 1987), estos cambios en temperatura y salinidad durante una variación anual pueden ser explicados por la variabilidad temporal y espacial de la CC en la zona, modificaciones en la Contracorriente del Sur de California y en la Subcorriente de California, además de la presencia de agua derivada de las surgencias costeras en el área de la ESC. Gómez-Valdez y

the Southern California Countercurrent and in the California Subcurrent, and by the presence of water derived from coastal upwelling in the SCB area. Gómez-Valdez and Vélez-Muñoz (1982) determined that annual mean temperature and salinity in the CC near our study area (line 100, CalCOFI network) were lower in the coastal stations than in the oceanic ones. Gómez-Valdez (1983) reported that the strongest upwelling events in the region of the SCB occur from April to July, when the upwelled water comes from the first 100 m depth.

Vélez-Muñoz (1982) determinaron que los promedios anuales de la temperatura y la salinidad en la CC cerca de nuestra área de estudio (línea 100, red CalCOFI) fueron más bajos en las estaciones costeras que en las oceánicas. Gómez-Valdez (1983) reportó que los mayores afloramientos costeros en la región de la ESC ocurren de abril a julio, donde el agua aflorada proviene de los primeros 100 m de profundidad.

### Nutrientes y clorofila

Las mayores concentraciones de nutrientes inorgánicos disueltos se registraron durante marzo y junio, con un incremento promedio en aguas subsuperficiales (50 m) entre enero y marzo-junio, de  $\sim 6.0 \mu\text{M}$  para nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) y  $0.8 \mu\text{M}$  para fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) (figs. 3, 4, 5). Las más bajas concentraciones para ambos nutrientes fueron medidas durante enero y septiembre (figs. 3, 6), asociadas con la presencia de agua con baja salinidad ( $\sim 33.35$ ) (fig. 2). Las concentraciones superficiales de nitratos fueron  $<0.2 \mu\text{M}$  durante la mayor parte del periodo estudiado (figs. 3b-7b), excepto en junio, cuando el promedio fue de  $\sim 2.0 \mu\text{M}$  (fig. 5). Durante octubre se presentó un ligero incremento en las concentraciones de nutrientes (fig. 7), relacionado con la intrusión de agua subsuperficial con salinidad mayor a 33.40 (fig. 2). Las concentraciones de nitratos en octubre fueron ligeramente mayores que las determinadas en enero (figs. 3b-7b).

Las concentraciones de nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ) superficiales (figs. 3a-7a) que se registraron en este estudio fueron menores que  $0.1 \mu\text{M}$  en todo el periodo, excepto en junio que fueron superiores a  $0.1 \mu\text{M}$ , incrementándose en la capa subsuperficial. En marzo y junio (figs. 4a, 5a), es evidente el máximo de nitritos con concentración superior a  $0.2 \mu\text{M}$ . Cabe señalar que en octubre puede apreciarse un

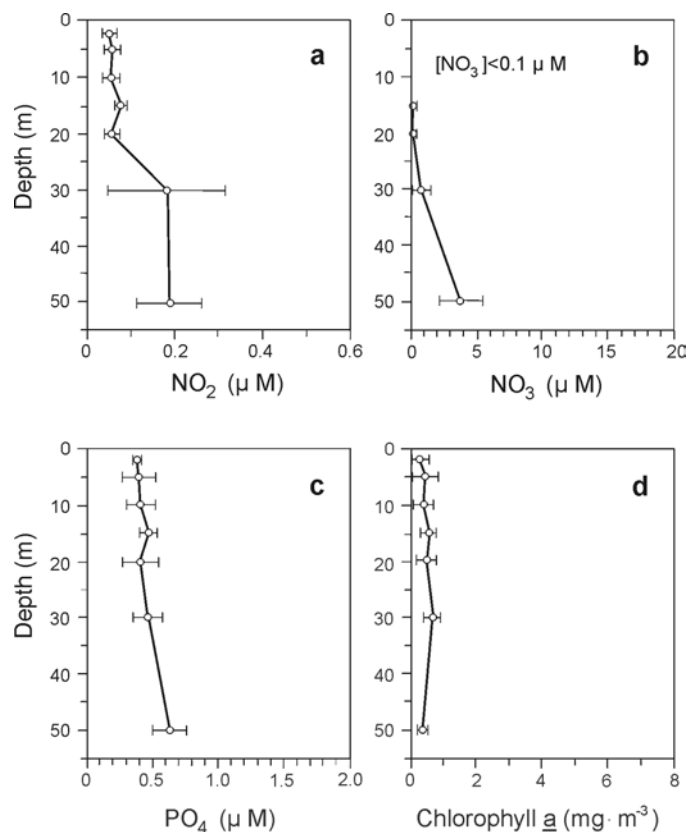
### Nutrients and chlorophyll

The highest concentrations of dissolved inorganic nutrients were recorded during March and June, with a mean increase in subsurface waters (50 m) between January and March-June, of  $\sim 6.0 \mu\text{M}$  for nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) and  $0.8 \mu\text{M}$  for phosphates ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) (figs. 3, 4, 5). The lowest concentrations for both nutrients were measured in January and September (figs. 3, 6), associated with the presence of low-salinity water ( $\sim 33.35$ ) (fig. 2). The surface concentrations of nitrates were  $<0.2 \mu\text{M}$  during much of the study period (figs. 3b-7b), except in June, when the average was  $\sim 2.0 \mu\text{M}$  (fig. 5). In October there was a slight increase in the nutrient concentrations (fig. 7), related to the intrusion of subsurface water with salinity higher than 33.40 (fig. 2). The nitrate concentrations in October were slightly higher than those recorded in January (figs. 3b-7b).

The concentrations of nitrites ( $\text{NO}_2^-$ ) recorded at the surface (figs. 3a-7a) in this study were lower than  $0.1 \mu\text{M}$  in the whole period, except in June when they were higher than  $0.1 \mu\text{M}$ , increasing in the subsurface layer. In March and June (figs. 4a, 5a), the nitrite maximum is evident with a concentration higher than  $0.2 \mu\text{M}$ . It should be mentioned that in October, a small maximum can be noticed at  $\sim 30$  m (fig. 7a).

The lowest phosphate concentrations measured at the surface in the area were  $\sim 0.5 \mu\text{M}$  (figs. 3-7), suggesting that they could represent the lower limit of this nutrient in the waters of Todos Santos Bay. Below 50 m depth, phosphate concentrations higher than  $0.5 \mu\text{M}$  were recorded for all the months sampled, with concentrations higher than  $1.0 \mu\text{M}$  in March and June.

The surface concentrations of phosphate recorded in this study were slightly higher than

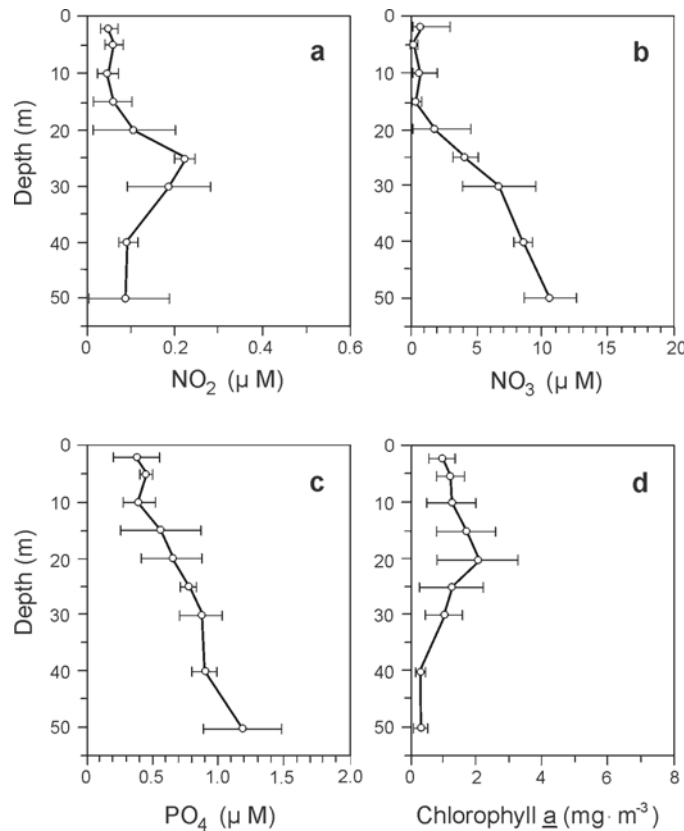


**Figura 3.** Perfiles verticales de la concentración de nutrientes y clorofila *a* para enero. Los puntos para cada profundidad muestran los valores promedio y las barras una desviación estándar.  
**Figure 3.** Vertical profiles of the concentration of nutrients and chlorophyll *a* for January. The points for each depth indicate the mean values and the bars represent one standard deviation.

pequeño máximo a ~30 m (fig. 7a).

Las menores concentraciones superficiales de fosfato medidos en la zona fueron de ~0.5 µM (figs. 3–7), lo cual sugiere que podría representar el límite inferior de ese nutriente en las aguas de la Bahía de Todos Santos. Por debajo de los 50 m de profundidad, se determinaron concentraciones de fosfato mayores que 0.5 µM para todos los meses muestreados, con concentraciones mayores que 1.0 µM en marzo y junio.

those of nitrate, which suggests a limitation of the latter nutrient for the phytoplankton in the area over long periods, according to the model proposed by Tyrrel (1999). The nitrate levels are controlled by the ecological competition between nitrogen-fixing and non-fixing algae, causing the nitrate concentrations to be slightly lower than 16 times the phosphate concentration. When the value of this ratio is smaller in the ocean, nitrogen fixation increases, restoring the ratio. Nitrate is the limiting nutrient in the

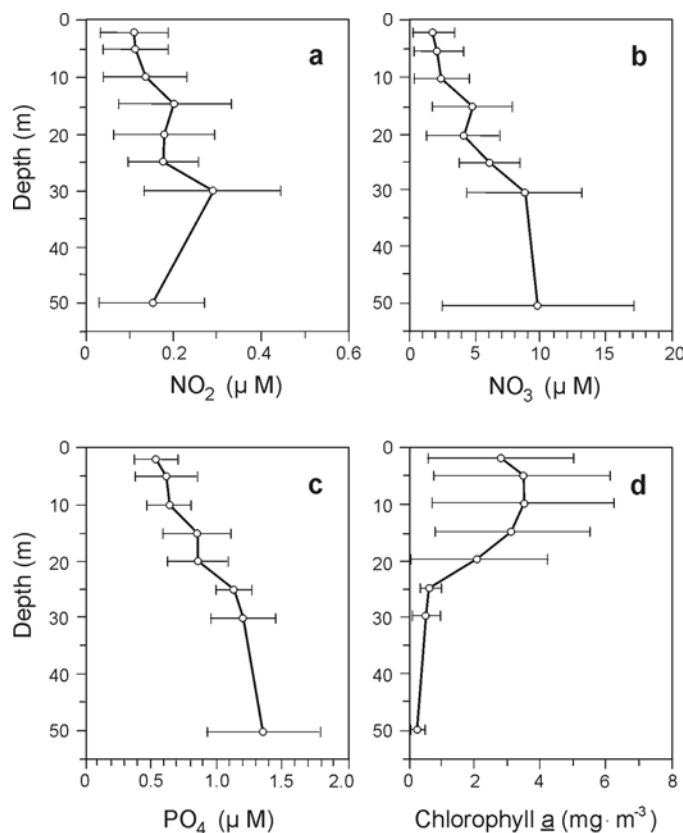


**Figura 4.** Perfiles verticales de la concentración de nutrientes y clorofila *a* para marzo. Los puntos para cada profundidad muestran los valores promedio y las barras una desviación estándar.  
**Figure 4.** Vertical profiles of the concentration of nutrients and chlorophyll *a* for March. The points for each depth indicate the mean values and the bars represent one standard deviation.

Las concentraciones superficiales de fosfato registradas en este estudio estuvieron ligeramente en exceso a las de nitrato, lo cual sugiere la limitación de este último nutriente para el fitoplancton en la zona sobre largos periodos, de acuerdo con el modelo propuesto por Tyrrel (1999). La competición ecológica entre las algas fijadoras y las no fijadoras de nitrógeno es lo que controla los niveles de nitrato, provocando que las concentraciones de nitrato sean ligeramente menores que 16 veces la concentración de fosfato. Cuando el valor de

ocean surface, the most limiting for instantaneous growth according to Liebig's law. Phosphate, however, is the last limiting nutrient, so its rate of availability simultaneously regulates the total oceanic productivity.

On the other hand, the phosphate and nitrate concentrations at 50 m depth (figs. 4, 5) do not sustain the Redfield ratio (16:1), because when the concentration of nitrate is  $\sim 10 \mu\text{M}$ , that of phosphate is higher than 1.2 and 1.4  $\mu\text{M}$  in March and June, respectively. This nitrate deficit could be explained by the



**Figura 5.** Perfiles verticales de la concentración de nutrientes y clorofila *a* para junio. Los puntos para cada profundidad muestran los valores promedio y las barras una desviación estándar.

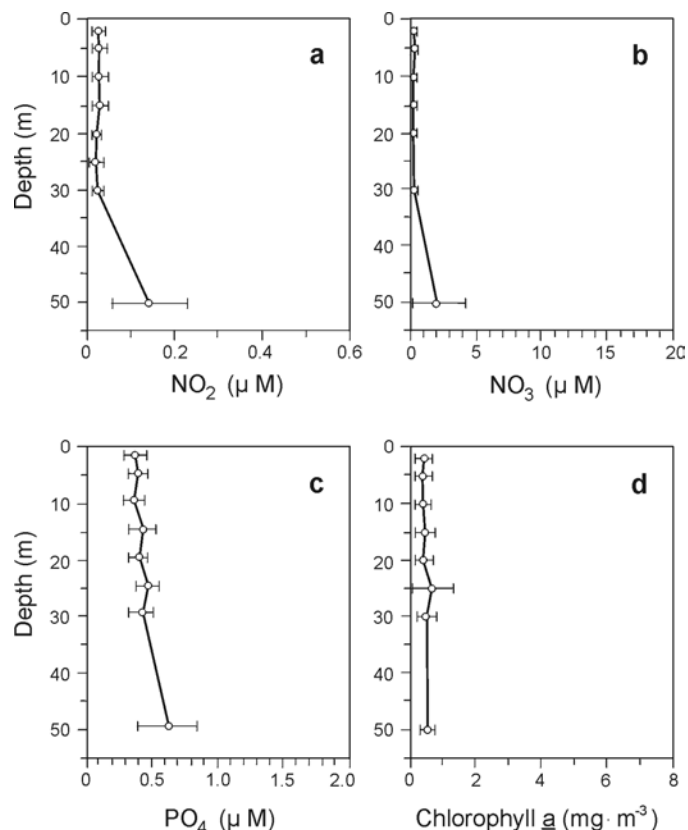
**Figure 5.** Vertical profiles of the concentration of nutrients and chlorophyll *a* for June. The points for each depth indicate the mean values and the bars represent one standard deviation.

esta razón es menor en el océano, la fijación de nitrógeno se incrementa, restaurando la razón. El nitrato es el nutriente limitante en la superficie del océano, el más limitante para el crecimiento instantáneo de acuerdo con la ley de Liebig. El fosfato, sin embargo, es el último nutriente limitante, por lo que su tasa de disponibilidad regula simultáneamente la productividad oceánica total.

Por otro lado, se observa que las concentraciones de fosfatos y nitratos a 50 m de pro-

origin of the upwelled water found in the area, which comes from waters where some denitrification has occurred and, therefore, the concentration of nitrates recorded in this study is lower than the Redfield ratio, or by the continuous input of phosphates into the bay from non-natural sources. To support these theories, a more specific study is needed.

The nutrient concentrations during March and June are directly related to the increase in upwelling of coastal waters in the adjacent

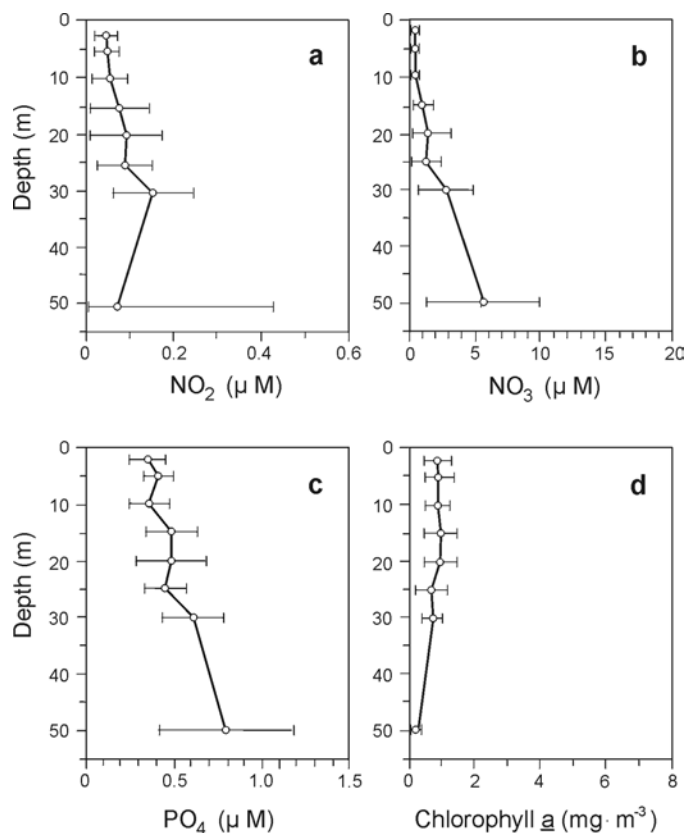


**Figura 6.** Perfiles verticales de la concentración de nutrientes y clorofila *a* para septiembre. Los puntos para cada profundidad muestran los valores promedio y las barras una desviación estándar.

**Figure 6.** Vertical profiles of the concentration of nutrients and chlorophyll *a* for September. The points for each depth indicate the mean values and the bars represent one standard deviation.

fundidad (figs. 4, 5) no mantienen la razón de Redfield (16:1), ya que cuando la concentración de nitratos es  $\sim 10 \mu\text{M}$ , la de fosfatos es mayor que 1.2 y 1.4  $\mu\text{M}$  en marzo y junio, respectivamente. Este déficit de nitratos podría explicarse con base en que el agua de surgencia que se presenta en esta zona proviene de aguas donde ha habido cierta denitrificación y, por tanto, la concentración de nitratos registrada en este estudio es menor que la razón de Redfield,

area, which is associated with the presence of cooler and saltier water transported into the bay. González-Morales *et al.* (1993) reported, for the summer of 1986, surface nitrate concentrations of 1.0 to 10.0  $\mu\text{M}$  outside the bay, with high concentrations related to water temperature lower than 15.0°C and phosphate concentrations of up to 1.0  $\mu\text{M}$ . For Todos Santos Bay, Valdez-Holguín *et al.* (1998) reported a concentration of phosphate at the



**Figura 7.** Perfiles verticales de la concentración de nutrientes y clorofila *a* para octubre. Los puntos para cada profundidad muestran los valores promedio y las barras una desviación estándar.

**Figure 7.** Vertical profiles of the concentration of nutrients and chlorophyll *a* for October. The points for each depth indicate the mean values and the bars represent one standard deviation.

o bien, que en la bahía se recibe un aporte constante de fosfatos por fuentes no naturales. Para sustentar dichas teorías es preciso realizar un estudio más específico.

Las concentraciones de nutrientes durante marzo y junio están directamente relacionadas con el incremento de la actividad en el afloramiento de aguas costeras de la zona adyacente, lo cual está asociado con la presencia de agua más fría y salina transportada hacia la bahía. González-Morales *et al.* (1993) reportaron,

surface of  $\sim 0.26 \mu\text{M}$  during August 1994, related to a surface water temperature between  $15.0^\circ\text{C}$  and  $20.0^\circ\text{C}$ .

Haury and Shulenberger (1998) report, for station number 93.27 of the CalCOFI line (off San Diego) in March 1993, surface concentrations of nitrate, nitrite and phosphate of  $<0.1$ ,  $<0.05$  and  $\sim 0.3 \mu\text{M}$ , respectively. These authors determine, at 50 m, nitrate and phosphate concentrations of  $\sim 16$  and  $\sim 1.4 \mu\text{M}$ , respectively, with maximum nitrite ( $\sim 0.5 \mu\text{M}$ )

para el verano de 1986, concentraciones superficiales de nitrato de 1.0 a 10.0  $\mu\text{M}$  afuera de la bahía, con las altas concentraciones asociadas con temperatura del agua menor a 15.0°C y con fosfato de hasta 1.0  $\mu\text{M}$ . Durante agosto de 1994, Valdez-Holguín *et al.* (1998) reportaron, para la Bahía de Todos Santos, fosfato superficial de  $\sim 0.26 \mu\text{M}$ , relacionado con una temperatura del agua entre 15.0°C y 20.0°C.

Haurly y Shulenberger (1998) reportan, para la estación 93.27 de la línea CalCOFI (frente a San Diego) en marzo de 1993, concentraciones de nitrato, nitrito y fosfato superficiales de  $<0.1$ ,  $<0.05$  y  $\sim 0.3 \mu\text{M}$ , respectivamente. Estos autores determinan, a 50 m, concentraciones de nitrato y fosfato de  $\sim 16$  y  $\sim 1.4 \mu\text{M}$ , respectivamente, con el máximo de nitrito ( $\sim 0.5 \mu\text{M}$ ) a 30 m de profundidad. Estudios anteriores (Millán-Núñez *et al.*, 1982; Traganza, 1985) han reportado mayores concentraciones de ambos nutrientes durante los meses de verano en regiones cercanas a la ESC, pero fuera de ésta. Estos autores han relacionado sus resultados con procesos locales de afloramiento costero y con la advección posterior hacia dentro y fuera de la costa, respectivamente.

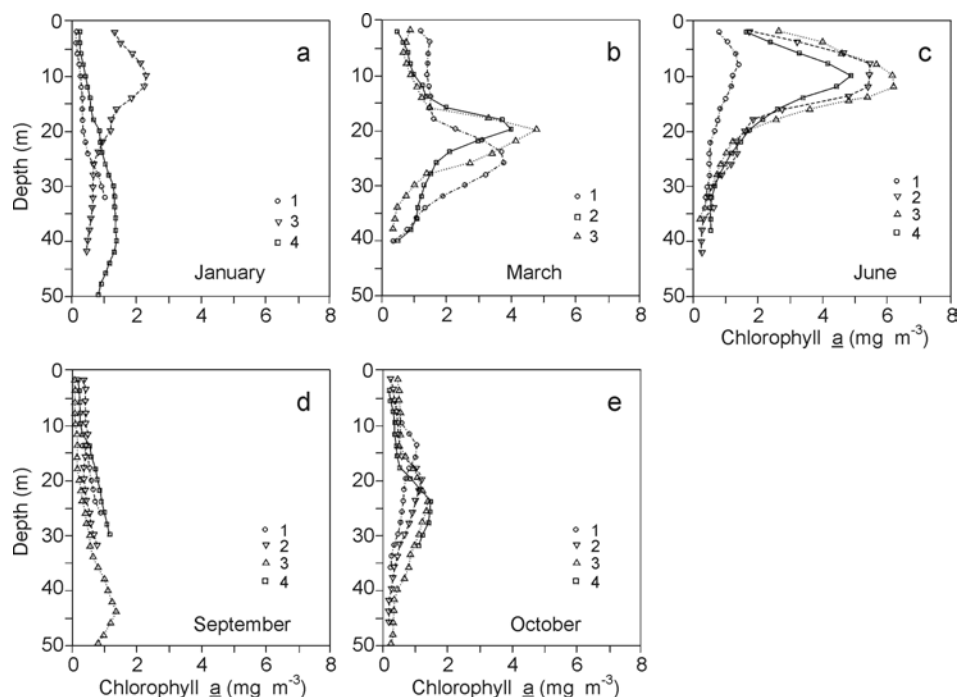
Los datos de nutrientes y clorofila de este trabajo muestran un patrón de distribución estacional similar, con altos registros durante marzo y junio, y bajos registros durante los otros meses del estudio (figs. 3–7). El máximo de clorofila en la columna de agua fue más profundo durante septiembre y octubre, y más somero en marzo y junio (fig. 8), asociados en ambos casos con la posición de la nutriclina. La nutriclina se registró a 30, 17, 37 y 20 m en los meses de enero, marzo, septiembre y octubre, respectivamente, presentando en julio concentraciones superiores a 1.0  $\mu\text{M}$  de nitratos en toda la columna de agua (figs. 3–7). El ligero incremento en la concentración de nutrientes durante octubre se reflejó también en el incre-

at 30 m depth. Previous studies (Millán-Núñez *et al.*, 1982; Traganza, 1985) have reported higher concentrations of both nutrients during the summer months in regions near but outside SCB. These authors have associated their results with local processes of coastal upwelling and to the subsequent advection towards and away from the shore, respectively.

The nutrient and chlorophyll data obtained in this study present a similar seasonal distribution pattern, with high values in March and June, and low values during the rest of the study months (figs. 3–7). The chlorophyll maximum in the water column was deeper in September and October, and shallower in March and June (fig. 8), in both cases associated with the position of the nutricline. The nutricline was recorded at 30, 17, 37 y 20 m in January, March, September and October, respectively, and in July the nitrate concentrations were higher than 1.0  $\mu\text{M}$  throughout the water column (figs. 3–7). The slight increase in the concentration of nutrients in October was also reflected in the increase in chlorophyll recorded during this month. Eppley *et al.* (1979) reported a similar situation for the SCB.

The vertical profiles of chlorophyll *a* recorded at different points inside the bay (fig. 8) are related to the concentration of nutrients and to the amount of light. In March (fig. 8b), the chlorophyll *a* maximum occurred below the nutricline and between 20 and 30 m depth. At this depth, there were enough nutrients and the necessary amount of light for the photosynthetic processes. In June (fig. 8c), the whole water column was rich in nutrients and the chlorophyll *a* maximum rose to between 8 and 15 m. This information suggests that the chlorophyll maximum migrated for the phytoplankton to obtain a greater amount of light, because with a high concentration of pigments, the self-shading effect could be the





**Figura 8.** Perfiles verticales continuos de clorofila *a* calculados a partir de los datos de fluorescencia *in situ*.

**Figure 8.** Vertical profiles of the chlorophyll *a* concentration calculated from fluorescence data *in situ*.

mento de la clorofila medida en este mes. Una situación similar fue reportada anteriormente para la ESC por Eppley *et al.* (1979).

La distribución vertical de los perfiles de clorofila *a* que se registraron en diferentes puntos en la bahía (fig. 8) responden a la concentración de nutrientes y a la cantidad de luz. En marzo (fig. 8b), el máximo de clorofila *a* mostró estar por debajo de la nutriclina y a una profundidad entre 20 y 30 m. A esta profundidad había suficientes nutrientes y aún podían recibir una cantidad de luz necesaria para los procesos fotosintéticos. En junio (fig. 8c), toda la columna de agua fue rica en nutrientes y el máximo de clorofila *a* ascendió hasta localizarse entre 8 y 15 m. Esta informa-

limiting factor for phytoplankton growth at deeper depths.

There are certain limitations and sources of error when GF/C filters are used. Venrick and Hayward (1984) state that due to their pore size ( $\sim 1.2 \mu\text{M}$ ), they do not completely retain the small phytoplankton. This error is important in oligotrophic waters, where a relative bias of around 15% occurs. However, in this study, this type of filter was only used in the March and June surveys, when the highest concentrations were recorded, so it is possible to say that the underestimation of the chlorophyll *a* concentration is very small. In the January, September and October surveys, when membrane filters were used, no underestimation of

ción sugiere que el máximo de clorofila migró para que el fitoplancton obtuviera una cantidad de luz mayor, ya que con una alta concentración de pigmentos, el efecto de autosombreado es lo que podría limitar el crecimiento del fitoplancton a mayores profundidades.

Existen ciertas limitaciones y fuentes de error por el uso de filtros GF/C. Venrick y Hayward (1984) mencionan que debido al tamaño de poro ( $\sim 1.2 \mu\text{M}$ ), no retienen completamente al fitoplancton pequeño. Este error es importante en aguas oligotróficas, donde el sesgo relativo es del orden del 15%. Sin embargo, en este estudio se utilizó este tipo de filtro sólo en los muestreos de marzo y junio, cuando se registraron las concentraciones mayores, por lo que podría decirse que la subestimación de la concentración de la clorofila *a* es muy pequeña. En los muestreos de enero, septiembre y octubre, donde se utilizaron filtros de membrana, se considera que no hay subestimación de la concentración de clorofila *a*. El segundo error importante es la recuperación incompleta de clorofila cuando el filtro no es macerado, sino que es extraído en acetona por 24 horas. El sesgo relativo que se introduce es del 8%. En este trabajo, todas las concentraciones de clorofila *a* registradas en los muestreos de marzo y junio podrían estar subestimadas un 8%.

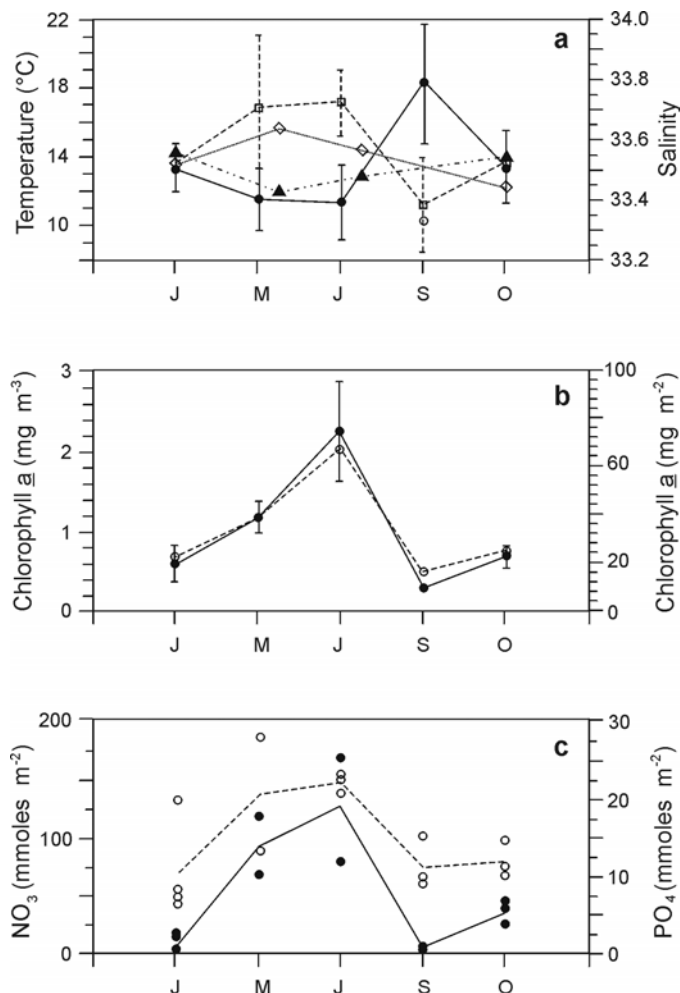
Las concentraciones promedio de la clorofila integrada en la columna de agua en el año van desde  $20 \text{ mg m}^{-2}$  en enero hasta  $74 \text{ mg m}^{-2}$  en junio, con una disminución a  $8 \text{ mg m}^{-2}$  en septiembre (fig. 9b). La clorofila integrada en la columna de agua de la ESC varió hasta diez veces durante nuestro estudio, con altas concentraciones cuando se presentó el agua más fría y salada durante primavera y verano.

La mayor diferencia en los valores promedios de temperatura y salinidad para el área se presentó en septiembre, con la mayor temperatura ( $17.50^\circ\text{C}$ ) y la menor salinidad

the chlorophyll *a* concentration is considered to have occurred. The second important error is the incomplete recuperation of chlorophyll when the filter is not macerated, but rather extracted in acetone for 24 hours. A relative bias of 8% is introduced. In this study, all the chlorophyll *a* concentrations recorded in the March and June surveys could be underestimated by 8%.

The mean concentrations of integrated chlorophyll in the water column ranged from  $20 \text{ mg m}^{-2}$  in January to  $74 \text{ mg m}^{-2}$  in June, decreasing to  $8 \text{ mg m}^{-2}$  in September (fig. 9b). The integrated chlorophyll in the water column of the SCB varied up to ten times during this study, with high concentrations when the coldest and saltiest water was present during spring and summer.

The largest difference in the mean values of temperature and salinity for the area occurred in September, with the highest temperature ( $17.50^\circ\text{C}$ ) and the lowest salinity (33.38) in this month (fig. 9a). The highest concentrations of nutrients and chlorophyll were measured during March and June (fig. 9b, c), in relation to the low temperature and high salinity (fig. 9a). Subsurface water with salinity higher than 33.60 and temperature lower than  $12.0^\circ\text{C}$  is directly related to fertilization processes in the area of the SCB, contributing to the increase in phytoplankton biomass. According to Lynn and Simpson (1987), this water, derived from coastal upwelling processes, is a mixture of modified Subarctic Water and Equatorial Pacific Water. However, Reid *et al.* (1958) state that the upwelling results from the incorporation of Equatorial Pacific Water into the low-temperature, high-salinity and nutrient-rich California Subcurrent. Hayward and Venrick (1998), based on a criterion regarding the position and motion of the pycnocline in the CC area, concluded that the presence of high nitrates in coastal waters of the northern region of SCB is characterized by water



**Figura 9.** Cambio estacional de los promedios de (a) temperatura (●) y salinidad (□), y (b) clorofila *a* superficial (○) y clorofila *a* integrada en la columna de agua (●); las barras representan una desviación estándar. (c) Datos integrados en la columna de agua de nitrato (●) y fosfato (○); las líneas que unen los puntos sólo marcan la tendencia de los datos. Los símbolos grandes en la figura 9a muestran el promedio estacional a 30 m de profundidad de temperatura (▲) y salinidad (◇), calculados para una estación fuera de la costa utilizando los datos CalCOFI reportados por Lynn *et al.* (1982).

**Figure 9.** Seasonal variation of the average (a) temperature (●) and salinity (□), and (b) chlorophyll *a* at the surface (○) and integrated chlorophyll *a* in the water column (●); the bars represent one standard deviation. (c) Integrated data in the water column of nitrate (●) and phosphate (○); the lines that join the dots only indicate the tendency of the data. The large symbols in figure 9a indicate the seasonal mean at 30 m depth of temperature (▲) and salinity (◇), calculated for one station off the coast using the CalCOFI data reported by Lynn *et al.* (1982).

(33.38) en este mes (fig. 9a). Durante marzo y junio se midieron las mayores concentraciones de nutrientes y clorofila (fig. 9b, c), en relación con la baja temperatura y alta salinidad (fig. 9a). Agua subsuperficial con salinidad mayor a 33.60 y temperatura menor a 12.0°C, está directamente relacionada con procesos de fertilización en la zona de la ESC, con una contribución al incremento de la biomasa del fitoplancton. De acuerdo con Lynn y Simpson (1987), esta agua originada por procesos de afloramientos costeros es una mezcla del Agua Subártica modificada y Agua del Pacífico Ecuatorial. Sin embargo, Reid *et al.* (1958) mencionan que dichas surgencias se forman por la incorporación del Agua del Pacífico Ecuatorial a la Subcorriente de California con baja temperatura, alta salinidad y altos nutrientes. Hayward y Venrick (1998) usaron un criterio sobre la posición y movimiento de la picnoclina en la zona de la CC y concluyeron que la presencia de altos nitratos en aguas costeras de la parte norte de la ESC se caracteriza por temperaturas del agua por debajo de 15.0°C y salinidades mayores a 33.2.

Los promedios de temperatura y salinidad, calculados para una profundidad de 30 m a partir de datos recolectados por el programa CalCOFI de 1950 a 1978 (Lynn *et al.*, 1982) en la estación más costera de la línea 100 de su malla de estaciones, muestran las más bajas temperaturas (11.20°C y 12.76°C) y mayor salinidad (33.63 y 33.56) durante abril y julio, respectivamente. El valor promedio de la temperatura para esa localidad y a 30 m de profundidad fue de 13.91°C para octubre y de 14.04°C para enero, similar a los promedios de nuestra zona de estudio (fig. 9a).

Los cambios en los mecanismos de fertilización en la ESC pueden ser relacionados con variaciones en el régimen hidrográfico estacional del sistema de la CC. Agua de alta

temperaturas lower than 15.0°C and salinities higher than 33.2.

The temperature and salinity averages, calculated for a depth of 30 m using data collected by the CalCOFI program for 1950 to 1978 (Lynn *et al.*, 1982) at the station closest to line 100 of their network, show that the lowest temperatures (11.20°C and 12.76°C) and highest salinities (33.63 and 33.56) occurred in April and July, respectively. The mean temperature values for that locality at 30 m depth were 13.91°C for October and 14.04°C for January, similar to the mean values for our study area (fig. 9a).

The changes in the fertilization mechanisms in the SCB can be related to variations in the seasonal hydrographic regime of the CC system. High-salinity and low-temperature water was found in the SCB during March and June (fig. 9a), which transported abundant nutrients and allowed the development of a significant phytoplankton biomass (fig. 9b, c). The increase in temperature and decrease in salinity during September and October may be due to reduced stress of the northwesterly winds in the area in late summer and early autumn (Strub *et al.*, 1987). This decrease in the intensity of the wind increases the surface water flow originated in the cyclonic gyre off the coast of the SCB and drastically reduces the coastal upwelling processes (Parés-Sierra *et al.*, 1997). This water located in the oceanic region of the CC that flows into the SCB is characterized by low salinity, warm temperature and low nutrient concentration. According to Lynn and Simpson (1987) and Hickey (1993), in spring, the Southern California Countercurrent seems to be absent in the region, and the stream that enters the SCB flows towards the Equator instead of towards the pole.

Peláez and McGowan (1986) analyzed images of the Coastal Zone Color Scanner (CZCS) and found a strong zoning to the south

salinidad y baja temperatura fue localizada en la ESC durante marzo y junio (fig. 9a), la cual transportó altos nutrientes y permitió el desarrollo de una alta biomasa del fitoplancton (fig. 9b, c). El incremento en la temperatura y decremento en la salinidad durante septiembre y octubre podría ser explicado por la disminución del esfuerzo del viento proveniente del noroeste en esta zona al final del verano e inicio del otoño (Strub *et al.*, 1987). Este decremento en la intensidad del viento incrementa el flujo de agua superficial originada en el giro ciclónico presente fuera de la costa de la ESC y disminuye drásticamente los procesos de afloramiento costeros (Parés-Sierra *et al.*, 1997). Esta agua localizada en la región oceánica de la CC que entra a la ESC tiene características de baja salinidad, temperatura cálida y baja concentración de nutrientes. De acuerdo con Lynn y Simpson (1987) y Hickey (1993), durante la primavera la Contracorriente del Sur de California parece estar ausente de la región y el flujo que entra a la ESC fluye hacia el Ecuador en lugar de hacerlo hacia el polo.

Peláez y McGowan (1986), analizando las imágenes de color del sensor Coastal Zone Color Scanner (CZCS), registraron una fuerte zonación al sur de San Diego, describiéndola como el Frente de Ensenada. Este frente es una transición brusca entre dos grandes y diferentes masas de agua, con fuertes cambios de concentración en la clorofila en una distancia de pocos kilómetros. De verano a invierno registraron una intrusión de aguas oligotróficas y cálidas a la ESC, donde predominan bajas concentraciones de clorofila. Hacia fuera de la línea de costa se localiza una zona de alta concentración de clorofila, que continúa al sur y al oeste del Frente de Ensenada, con concentraciones bajas de clorofila.

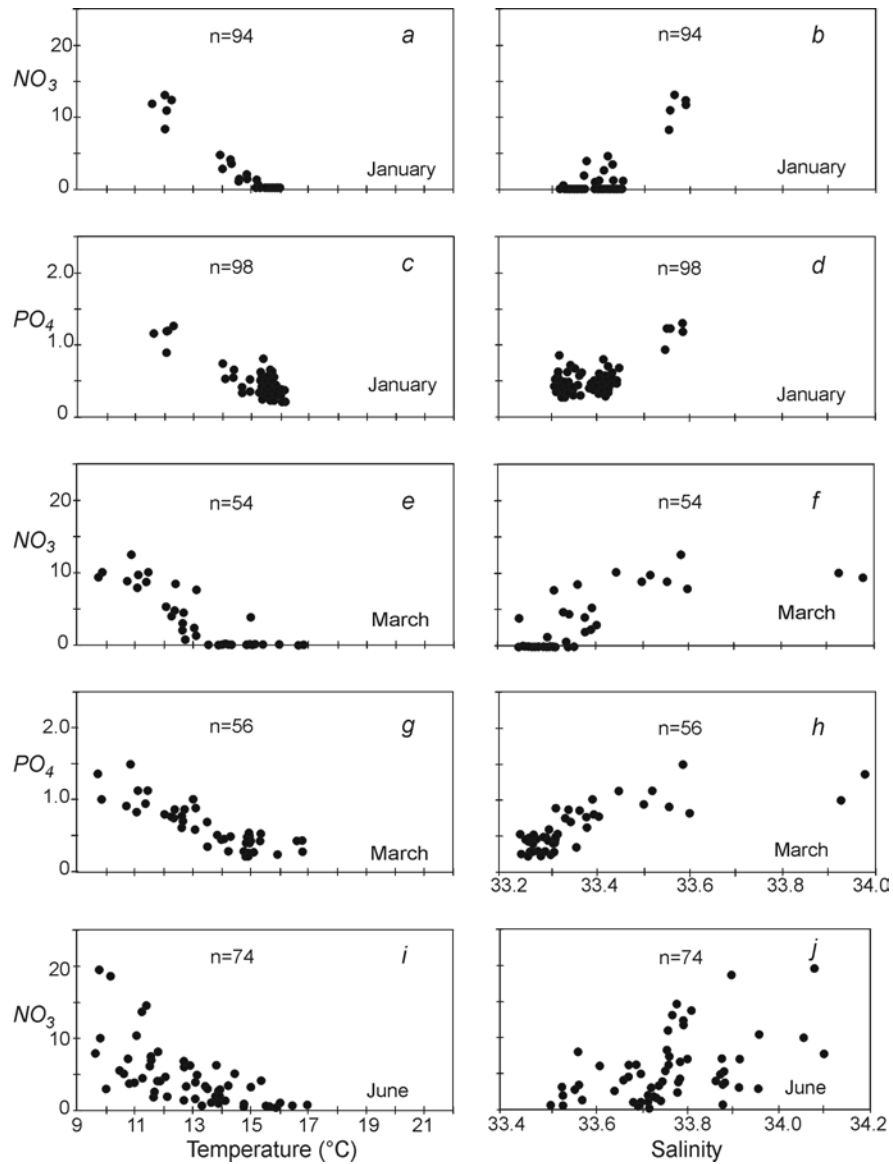
Los datos de clorofila integrada reportados por Hayward *et al.* (1995), obtenidos en 1994

of San Diego, describiendo it as the Ensenada Front. This front is a sudden transition between two large and differing water masses, with strong changes in chlorophyll concentration in a distance of a few kilometers. From summer to winter, they recorded an intrusion of oligotrophic and warm waters into the SCB, where low chlorophyll concentrations dominate. Off the coast, an area of high chlorophyll concentration is located, that continues to the south and west of the Ensenada Front, with low chlorophyll concentrations.

The integrated chlorophyll data reported by Hayward *et al.* (1995), obtained in 1994 from CalCOFI surveys between Point Conception and San Diego, California, show a seasonal variability similar to the one found in this work (fig. 9b). However, their records are slightly higher to those reported herein, with averages of  $\sim 80 \text{ mg m}^{-2}$  for April and between 30 and  $\sim 40 \text{ mg m}^{-2}$  for January, August and October.

The relationships of the salinity and temperature data with the dissolved inorganic nutrients show a similar trend for almost all the data, with an inverse relationship with temperature and a direct relationship with salinity (fig. 10a-t). The presence of nutrient-rich waters in the SCB has been related to temperatures lower than  $15.0^\circ\text{C}$  and salinity higher than 33.20 (Hayward and Venrick, 1998). This type of water is generally present in Todos Santos Bay during March and June, when high nutrient concentrations and high phytoplankton biomass are recorded (fig. 9c, b). In September and October, low volumes of this nutrient-rich water were found in the SCB; according to Strub *et al.* (1987), this is due to reduced wind stress and an increase in the cyclonic circulation in this region of the SCB. This has been corroborated by our data.

The mean values of the variables measured in the study area were indicators of the seasonal variability of the area, and they presented a similar trend to the interannual means reported



**Figura 10.** Relación temperatura/nutrientes y salinidad/nutrientes de todos los datos recolectados para (a-d) enero, (e-h) marzo, (i-l) junio, (m-p) septiembre y (q-t) octubre. Las concentraciones de fosfato ( $PO_4^{3-}$ ) y nitrato ( $NO_3^-$ ) están en  $\mu M$ .

**Figure 10.** Temperature/nutrient and salinity/nutrient relationship for all the data collected in (a-d) January, (e-h) March, (i-l) June, (m-p) September and (q-t) October. Phosphate ( $PO_4^{3-}$ ) and nitrate ( $NO_3^-$ ) concentrations are in  $\mu M$ .

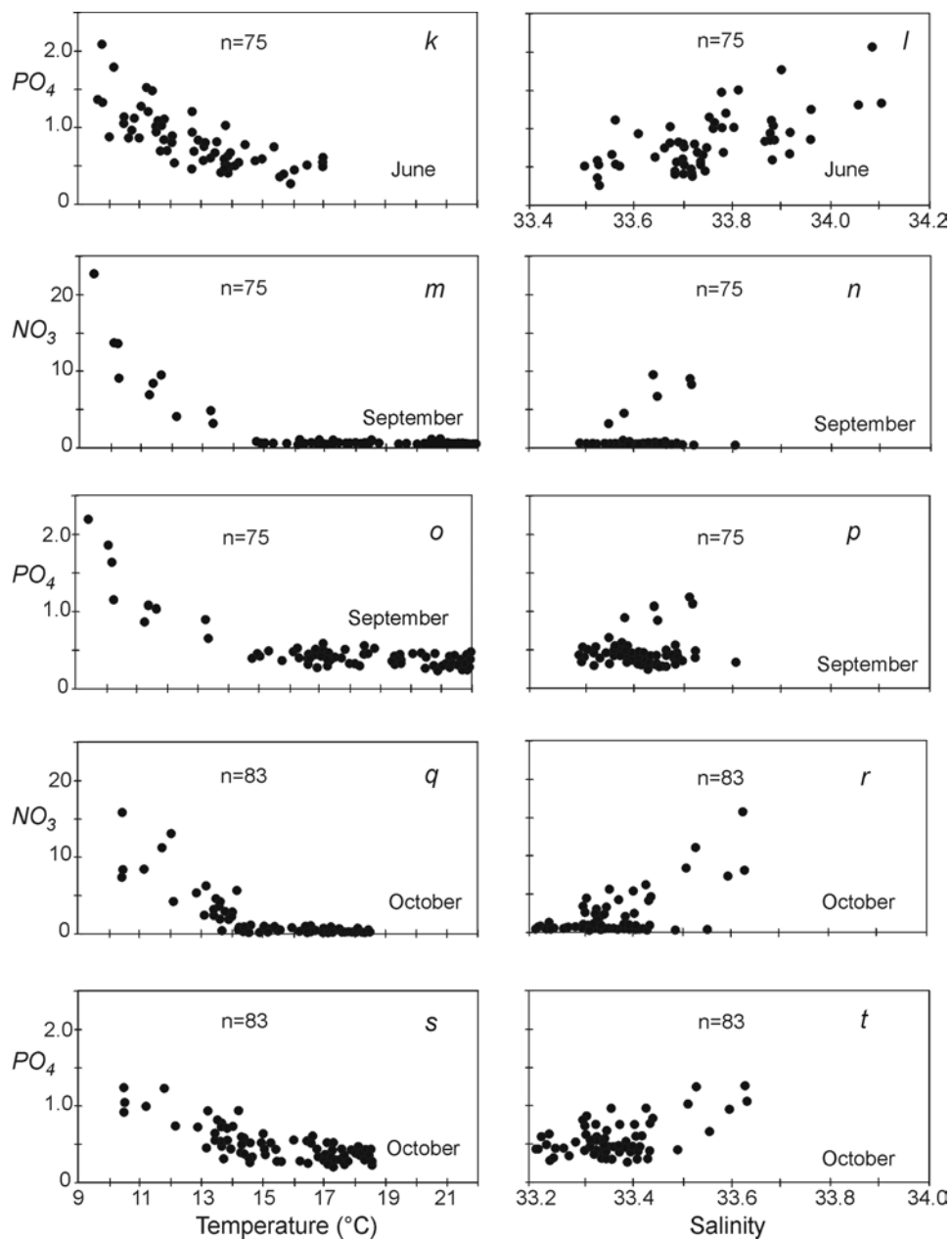


Fig. 10 (Cont.)

de muestreos CalCOFI entre Punta Concepción y San Diego en California, muestran una variabilidad estacional similar a este trabajo (fig. 9b). Sin embargo, sus registros son ligeramente mayores que los reportados aquí, con promedios de  $\sim 80 \text{ mg m}^{-2}$  para abril, y entre 30 y  $\sim 40 \text{ mg m}^{-2}$  para enero, agosto y octubre.

Las relaciones entre los datos de salinidad y temperatura con las concentraciones de nutrientes inorgánicos disueltos muestran una tendencia similar en casi la totalidad de los datos, con una relación inversa con la temperatura y una directa con la salinidad (fig. 10a-t). La presencia de aguas ricas en nutrientes en la ESC ha sido relacionada con temperaturas menores a  $15.0^\circ\text{C}$  y con salinidad mayor a 33.20 (Hayward y Venrick, 1998). Este tipo de agua generalmente se presenta en la región de la Bahía de Todos Santos durante marzo y junio, cuando también se determinan una alta concentración de nutrientes y alta biomasa del fitoplancton (fig. 9b, c). En septiembre y octubre se encontraron bajos volúmenes de esa agua rica en nutrientes dentro de la ESC; de acuerdo con Strub *et al.* (1987), esto es resultado del decremento en el esfuerzo del viento y un incremento de la circulación ciclónica de esta región de la ESC, lo cual está corroborado con nuestros datos.

Los valores promedios de las variables medidas en el área de estudio fueron indicadores de la variabilidad estacional de la zona, y su tendencia no fue diferente de los promedios interanuales reportados por Lynn *et al.* (1982). El área de estudio al sur de la ESC presentó una alta homogeneidad espacial en sus propiedades físicas y biológicas, excepto en septiembre y octubre cuando se obtuvieron las mayores diferencias en los perfiles verticales de las variables medidas. Un muestreo puntual en un lugar cercano al centro o a las bocas de la Bahía de Todos Santos pudiera representar adecuadamente la variabilidad de la zona costera de la ESC.

by Lynn *et al.* (1982). The study area, south of the SCB, showed high spatial homogeneity in its physical and biological properties, except in September and October, when the largest differences were obtained in the vertical profiles of the variables measured. A detailed sampling in a spot near the center or mouths of Todos Santos Bay could adequately represent the variability of the coastal zone of the SCB.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

The first author thanks the Secretaría de Marina, the Armada de México and the Dirección General de Oceanografía Naval for the help provided to carry out this project, as well as the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología for the scholarship and the Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada for its institutional and financial support (project number 1679-T9209). Thanks to Manuel Mancilla, Juan Pablo Alarcón, Carmen Bazán, Joaquín García, Carlos Flores, Marina Mondragón, José Ma. Domínguez Olachea, Luis Demetrio Arce and Adolfo Granados (r.i.p.) for all their support on board and on land. The comments and notes of two anonymous reviewers helped to improve the final version of this work.

English translation by Manuel Gardea.

---

#### AGRADECIMIENTOS

La primera autora agradece a la Secretaría de Marina, Armada de México y Dirección General de Oceanografía Naval las facilidades otorgadas para la realización de este proyecto, así como al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología la beca otorgada y al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada el apoyo institucional y financiero (clave 1679-T9209). Un agradecimiento a



Manuel Mancilla, Juan Pablo Alarcón, Carmen Bazán, Joaquín García, Carlos Flores, Marina Mondragón, José Ma. Domínguez Olachea, Luis Demetrio Arce y Adolfo Granados (q.e.p.d.) por todo su apoyo a bordo y en tierra. Los comentarios y anotaciones de dos revisores anónimos ayudaron a complementar la versión final de este trabajo.

## REFERENCIAS

- Álvarez-Borrego, J. and Álvarez-Borrego, S. (1982). Temporal and spatial variability of temperature in two coastal lagoons. *CalCOFI Rep.*, 23: 188–198.
- Álvarez-Sánchez, L.G. (1971). Medición de corrientes superficiales en la Bahía de Todos Santos, B.C. Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, México, 68 pp.
- Armstrong, F.A.J., Stearns, C.R. and Strickland, J.D.H. (1967). The measurement of upwelling and subsequent biological processes by means of the Technicon AutoAnalyzer and associated equipment. *Deep-Sea Res.*, 14: 381–389.
- Carlucci, A.F., Eppley, R.W. and Beers, J.R. (1986). Introduction to the Southern California Bight. In: R.W. Eppley (ed.), *Plankton Dynamics of the Southern California Bight*. Springer-Verlag, New York, pp. 1–12.
- Dailey, M.D., Reish, D.J. and Anderson, J.W. (eds.). (1993). *Ecology of the Southern California Bight. A Synthesis and Interpretation*. Univ. California Press, Berkeley, 926 pp.
- Eppley, R.W., Renger, E.H. and Harrison, W.G. (1979). Nitrate and phytoplankton production in southern California coastal waters. *Limnol. Oceanogr.*, 24: 483–494.
- Gil, S.E., Larios, S., Blanco, R. y Delgado, O. (1991). Rapidez y dirección del viento en la Bahía de Todos Santos, BC. Reporte de Datos, Inst. Investigaciones Oceanológicas, UABC, Ensenada, México.
- Gómez-Valdez, J. (1983). Estructura hidrográfica promedio frente a Baja California. *Ciencias Marinas*, 9(2): 75–86.
- Gómez-Valdez, J. y Vélez-Muñoz, H.S. (1982). Variación estacional de la temperatura y salinidad en una región costera de la Corriente de California. *Ciencias Marinas*, 8(2): 167–178.
- González-Morales, A.T., Gaxiola-Castro, G. and Lara-Lara, J.R. (1993). Daily photosynthetic parameters and biomass from size-fractionated phytoplankton off Baja California. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 36: 147–158.
- Granados-Guzmán, A., Hidalgo-González, R.M. y Álvarez-Borrego, S. (1995). Variabilidad temporal de la temperatura en las islas de Todos Santos y San Jerónimo, Baja California, durante mayo 1992 a marzo de 1993. Informe Técnico CTECT9501. Comunicaciones Académicas, Serie Ecología, CICESE, 24 pp.
- Hauray, L. and Shulenberger, E. (1998). Surface nutrient enrichment in the California Current off Southern California: Description and possible causes. *Deep-Sea Res. II*, 45: 1577–1601.
- Hayward, T. and Venrick, E. (1998). Near-surface pattern in the California Current: Coupling between physical and biological structures. *Deep-Sea Res. II*, 45: 1617–1638.
- Hayward, T., Mantyla, A., Lynn, R., Smith, P. and Chereskin, T. (1994). The state of the California Current in 1993–1994. *CalCOFI Rep.*, 35: 19–35.
- Hayward, T., Cayan, D., Franks, P., Lynn, R., Mantyla, A., McGowan, J., Smith, P., Schwing, F. and Venrick, E. (1995). The state of the California Current in 1994–1995: A period of transition. *CalCOFI Rep.*, 36: 19–39.
- Hickey, B.M. (1993). Physical oceanography. In: M.D. Dailey, D.J. Reish and J.W. Anderson (eds.), *Ecology of the Southern California Bight. A Synthesis and Interpretation*. Univ. California Press, Berkeley, pp. 19–70.
- Holm-Hansen, O., Lorenzen, C.J., Holmes, R.W. and Strickland, J.D.H. (1965). Fluorometric determination of chlorophyll. *J. Cons. Int. Explor. Mer.*, 30: 3–15.
- Jackson, G.A. (1986). Physical oceanography of the Southern California Bight. In: R.W. Eppley (ed.), *Plankton Dynamics of the Southern California Bight*. Springer-Verlag, New York, pp. 13–52.

- Latif, M. and Barnett, T.P. (1994). Causes of decadal climate variability over the North Pacific and North America. *Science*, 266: 634–637.
- List, E.J. and Koh, R.C.Y. (1976). Variations in coastal temperatures on the central and southern California coast. *J. Geophys. Res.*, 81: 1971–1979.
- Lynn, R.J. and Simpson, J.J. (1987). The California Current System: The seasonal variability of its physical characteristics. *J. Geophys. Res.*, 92: 12947–12966.
- Lynn, R.J., Bliss, K.A. and Eber, L.E. (1982). Vertical and horizontal distributions of seasonal mean temperature, salinity, sigma-t, stability, dynamic height, oxygen, and oxygen saturation in the California Current, 1950–1978. *CalCOFI Atlas No. 30*, 513 pp.
- Mancilla, P.M. y Martínez, G.M. (1991). Variación estacional de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto en la Bahía de Todos Santos, BC, México (marzo de 1986 a junio de 1987). *Rev. Invest. Cient.*, 2: 33–45.
- Millán-Núñez, R., Álvarez-Borrego, S. and Nelson, D.M. (1982). Effects of physical phenomena on the distribution of nutrients and phytoplankton productivity in a coastal lagoon. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 15: 317–335.
- Murphy, J. and Riley, J.P. (1962). A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chem. Acta*, 27: 31.
- Parsons, T.R., Maita, Y. and Mali, C.M. (1984). *A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis*. Pergamon Press, 173 pp.
- Parés-Sierra, A., López, A. y Pavía, A. (1997). Oceanografía física del Océano Pacífico nor-oriental. En: *Contribuciones a la Oceanografía Física en México. Capítulo 1. Monogr. 3, Unión Geofísica Mexicana*, pp. 1–24.
- Pavía, E. y Reyes, S. (1983). Variaciones espacia- les y estacionales del viento superficial en la Bahía de Todos Santos. *Ciencias Marinas*, 9(1): 151–167.
- Peláez, J. and McGowan, J.A. (1986). Phytoplankton pigment patterns in the California Current as determined by satellite. *Limnol. Oceanogr.*, 3: 927–950.
- Pineda, J. (1991). Predictable upwelling and the shoreward transport of planktonic larvae by internal tidal bores. *Science*, 253: 548–551.
- Pineda, J. (1994). Internal tidal bores in the nearshore: Seaward gravity currents, water-temperature fronts and the onshore transport of neustonic larvae. *EOS*, 75: 74.
- Reid, J.L., Roden, G.I. and Wyllie, J.G. (1958). *Studies of the California Current System. CalCOFI Rep.*, 5: 27–57.
- Smith, P.E. (1995). A warm decade in the Southern California Bight. *CalCOFI Rep.*, 36: 120–126.
- Strub, P.T., Allen, J.S., Huyer, A. and Smith, R. (1987). Large-scale structure of the spring transition in the coastal ocean off western North America. *J. Geophys. Res.*, 92: 1527–1544.
- Tibby, R.B. (1941). The water masses off the west coast of North America. *J. Mar. Res.*, 4: 113–121.
- Tragana, D.E. (1985). Application of satellites to chemical oceanography. In: A. Zirino (ed.), *Mapping Strategies in Chemical Oceanography*. American Chemical Society, Ser. 209, Washington, DC, pp. 373–392.
- Tyrrel, T. (1999). The relative influence of nitrogen and phosphorus on oceanic primary production. *Nature*, 400: 525–531.
- Valdez-Holguín, J.E., Álvarez-Borrego, S. and Mitchell, B.G. (1998). Photosynthetic parameters of phytoplankton in the California Current System. *CalCOFI Rep.*, 39: 148–158.
- Venrick, E.L. and Hayward, T.L. (1984). Determining chlorophyll on the 1984 CalCOFI surveys. *CalCOFI Rep.*, 25: 74–79.