

Variabilidad espacial y balance de fosfatos sobre la plataforma continental de la región fronteriza occidental México-EUA

Phosphate balance and spatial variability on the continental shelf off the western US-Mexico border region

JA Segovia-Zavala¹*, F Delgadillo-Hinojosa¹, A Muñoz-Barbosa¹, MA Huerta-Díaz¹, EA Gutiérrez-Galindo¹, SR Canino-Herrera², JM Hernández-Ayón¹

¹ Instituto de Investigaciones Oceanológicas, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada CP 22800, Baja California, México. * E-mail: jsegovia@uabc.mx

² Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, CP 22800, Baja California México.

Resumen

Se realizó un crucero oceanográfico durante la época de surgencias en la región costera fronteriza occidental entre México y EUA. El objetivo fue conocer los factores físicos, biológicos y antropogénicos que afectan la concentración y distribución de fosfatos (PO_4^{3-}) en la plataforma continental frente a esta región. En la zona sur del área de estudio, la isolinia de $0.75 \mu\text{M}$ de PO_4^{3-} y la isoterma de 13°C se ubicaron en la superficie y en la costa, mientras que en la parte norte se encontraron concentraciones bajas de PO_4^{3-} ($0.50 \mu\text{M}$) asociadas con un florecimiento fitoplanctónico con concentraciones altas de clorofila *a* (10.0 mg m^{-3}). El análisis de componentes principales sugiere que las concentraciones de PO_4^{3-} están dominadas por las surgencias (51%) y la biomasa fitoplanctónica (23%). Utilizando un modelo de balances de masas se estimó que los efectos por las descargas antropogénicas fueron locales, estimando un aporte de PO_4^{3-} de $3.0 \pm 0.12 \text{ t d}^{-1}$ (5.0%), uno por advección horizontal de $20.9 \pm 2.2 \text{ t d}^{-1}$ (32.0%) y uno por surgencias de $41.1 \pm 2.3 \text{ t d}^{-1}$ (63.0%). Si se continúa con la misma tasa de aporte de PO_4^{3-} en las descargas de aguas residuales se pronostica que para el año 2035, la contribución antropogénica de PO_4^{3-} será igual a los aportes de fuentes naturales la Corriente de California. En contraste, si en México se eficientizan los sistemas de tratamiento al igual que los de EUA, para el año 2012 se reducirían significativamente los aportes antropogénicos de PO_4^{3-} y el enriquecimiento en la zona costera mexicana será insignificante.

Palabras clave: fosfatos, surgencias, balance de masas, contaminación.

Abstract

A cruise was conducted along the northwestern coast of Baja California, off the US-Mexico border region, to determine the physical, biological and anthropogenic factors affecting the concentration and distribution of phosphates (PO_4^{3-}). The vertical distribution of temperature and PO_4^{3-} showed isograms (13°C and $0.75 \mu\text{M}$, respectively) rising towards the shore. Although this phenomenon was observed in all the study area, it was more abrupt in the southern part than in the northern, resulting in lower phosphate concentrations in the north ($0.50 \mu\text{M}$) associated with high chlorophyll *a* concentrations (10.0 mg m^{-3}). A principal components analysis indicated that the PO_4^{3-} concentrations were related to upwelling (51%) and phytoplankton biomass (23%). A PO_4^{3-} mass balance indicated that sewage discharge had a very local effect, contributing $3.0 \pm 0.12 \text{ t d}^{-1}$ (5%), while horizontal advection contributed $20.0 \pm 2.2 \text{ t d}^{-1}$ (32%) and upwelling supply was $41.1 \pm 2.3 \text{ t d}^{-1}$ (63%). If the PO_4^{3-} sewage contribution trend does not change, we predict that in 2035 the anthropogenic contribution will be as high as the amount delivered to the area by the Californian Current. Conversely, if Mexico's sewage treatment systems improve to a level similar to that in the USA, we estimate that by 2012 the anthropogenic sources will be insignificant.

Key words: phosphates, upwelling, mass balance, pollution.

Introducción

En la costa occidental de la frontera México-EUA, la principal forma de fertilización es la originada por los procesos naturales de surgencias. En particular el fenómeno se presenta durante primavera-verano, y se caracteriza por bajas temperaturas (Gómez-Valdez 1983) y aporte de cadmio y nutrientes (Segovia-Zavala *et al.* 1998). Sin embargo, se ha reportado que

Introduction

Along the western US-Mexico border region, natural upwelling processes are primarily responsible for the fertilization of coastal waters. Upwelling typically occurs during spring and summer, and is characterized by low water temperatures (Gómez-Valdez 1983) and by cadmium and nutrient inputs (Segovia-Zavala *et al.* 1998). It has been reported,

este ecosistema costero recibe aportes crónicos de contaminantes de naturaleza química (metales y nutrientes) y biológica (bacterias) en forma disuelta y particulada, debido a sistemas deficientes de tratamiento de aguas de desecho (Gutiérrez-Galindo *et al.* 1994, Segovia-Zavala *et al.* 1995, 2003, 2004). La región costera fronteriza México-EUA se encuentra ubicada en la Cuenca del Sur de California (CSC), uno de los ecosistemas más estudiados del Océano Pacífico (Carlucci *et al.* 1986, Dailey *et al.* 1993) y tal vez del mundo. No obstante, en el área costera mexicana se han realizado pocos estudios en la plataforma continental que relacionen las características físicas y biológicas de una manera integral (Espinosa-Carreón *et al.* 2001). En particular, es necesario evaluar la fertilización de nutrientes como los fosfatos (PO_4^{3-}) en la plataforma continental debido a que éstos generan una fracción importante de la productividad orgánica primaria en esta zona.

En relación a los estudios oceanográficos de fertilización sobre la plataforma y talud continental de la CSC se distinguen dos procesos importantes: la advección de aguas que provienen del norte y las surgencias de aguas costeras, ambas ricas en nutrientes (Haury y Shulenberger 1982). Esta plataforma, por ser tan estrecha en la zona mexicana y con talud continental abrupto, se ha considerado como una región de surgencia intermedia (Roemmich 1989), lo que implica una fertilización moderada de la región sur de la CSC (Eppley 1986). Además, el aporte de agua dulce por escurrimientos pluviales es escaso, mientras que existen volúmenes mayores de agua dulce que provienen de las descargas residuales de las ciudades costeras (Carlucci *et al.* 1986). Estos procesos muy probablemente son capaces de influir en la variabilidad y distribución de nutrientes en esta región costera fronteriza México-EUA. En el presente trabajo se examinan y caracterizan los factores que influyen en la distribución de PO_4^{3-} , haciendo énfasis en aspectos biológicos (biomasa fitoplanctónica), físicos (advección y surgencias) y antropogénicos (descargas residuales).

La región de estudio está comprendida dentro de la zona del programa regional CalCOFI (por las siglas en inglés de *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations*) el cual ha estudiado sistemáticamente la región desde 1949. Sin embargo, los muestreos más próximos a la costa de este programa internacional no incluyen estaciones sobre la plataforma continental de la región costera occidental de la frontera México-EUA. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es entender los factores que afectan a la concentración de PO_4^{3-} en respuesta a las surgencias y al aporte de aguas residuales ocurridos en la plataforma continental adyacente en el Pacífico a la frontera México-EUA.

Área de estudio

El área de estudio comprende las aguas costeras de la región noroccidental de Baja California (México), localizada entre $32^{\circ}07'30''$ – $32^{\circ}36'30''$ N y $116^{\circ}55'12''$ – $117^{\circ}38'18''$ W (fig. 1). Geográficamente se extiende desde el sur de la costa de San Diego, California, hasta 50 km al sur de la línea

however, that this coastal ecosystem receives chronic inputs of chemical (metals and nutrients) and biological (bacteria) contaminants in dissolved or particulate form, owing to deficient wastewater treatment systems (Gutiérrez-Galindo *et al.* 1994, Segovia-Zavala *et al.* 1995, 2003, 2004). Even though this coastal region is located within the Southern California Bight (SCB), one of the most studied ecosystems of the Pacific Ocean (Carlucci *et al.* 1986, Dailey *et al.* 1993) and possibly of the world, few surveys have been conducted on the continental shelf off the Mexican coast that relate the physical and biological characteristics in a more integrated manner (Espinosa-Carreón *et al.* 2001). In particular, it is necessary to evaluate the fertilization of nutrients such as phosphates (PO_4^{3-}) over the continental shelf since they generate a significant fraction of primary organic productivity in this area.

Oceanographic studies of fertilization over the continental shelf and slope of the SCB have revealed two important processes: the advection of waters of northern origin and the upwelling of nearshore waters, both rich in nutrients (Haury and Shulenberger 1982). In the Mexican section, the continental shelf is very narrow and the slope is steep, and it is therefore considered an intermediate upwelling region (Roemmich 1989); this indicates moderate fertilization in the southern part of the SCB (Eppley 1986). Moreover, the volume of freshwater input is greater from urban wastewater than from the scant rainfall runoff (Carlucci *et al.* 1986). These processes probably influence the variability and distribution of nutrients in this US-Mexico border region. This study examines and characterizes the factors influencing the distribution of PO_4^{3-} , with emphasis on biological (phytoplankton biomass), physical (advection and upwelling) and anthropogenic (wastewater discharges) aspects.

This coastal region is within the area that has been systematically studied by the California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations (CalCOFI) program since 1949. As the most coastal surveys of this international project do not include stations on the continental shelf off the US-Mexico boundary, this study aims to understand the factors affecting the concentration of PO_4^{3-} in relation to upwelling and wastewater inputs in this region.

Study area

The study area comprises the coastal waters off northwestern Baja California, Mexico ($32^{\circ}07'30''$ – $32^{\circ}36'30''$ N, $116^{\circ}55'12''$ – $117^{\circ}38'18''$ W (fig. 1). Geographically, it extends 50 km southwards from the US-Mexico (San Diego-Tijuana) border and approximately 50 km offshore. This hydrodynamically complex area is located within the southern section of the SCB. The general circulation pattern is determined by the California Current System, with a net southern transport (Lynn and Simpson 1987). Upwelling intensification and relaxation events occur off the coast of Baja California during spring and summer (Álvarez-Borrego and Álvarez-Borrego 1982). These events are an important mechanism for transporting metals

fronteriza México-EUA y hasta aproximadamente 50 km fuera de la costa; se encuentra dentro de la sección sur de la CSC, cuya hidrodinámica es compleja. El patrón general de circulación sigue al Sistema de la Corriente de California, con transporte neto hacia el sur (Lynn y Simpson 1987). En la costa de Baja California ocurren eventos de intensificación y relajación de surgencias durante primavera-verano (Álvarez-Borrego y Álvarez-Borrego 1982). Estos eventos son un importante mecanismo de transporte de metales (Sañudo-Wilhelmy y Flegal 1991, 1996; Segovia-Zavala *et al.* 1998, 2003, 2004) y nutrientes (Haury y Shulenberger 1982, 1998). Asimismo, este fenómeno provoca fuertes gradientes en la temperatura y nutrientes en aguas costeras sobre la plataforma (Petersen *et al.* 1986). El clima de la región es de tipo mediterráneo con veranos secos y cálidos e inviernos húmedos y fríos (Carlucci *et al.* 1986), por ende, la precipitación pluvial es escasa.

Materiales y métodos

Del 21 al 26 de junio de 1990 se realizó el crucero ECOBAC a bordo del buque oceanográfico *El Puma*. El plan de crucero incluyó 35 estaciones hidrográficas (fig. 1) que se realizaron en transectos perpendiculares a la costa para evidenciar el surgimiento de aguas subsuperficiales y su relación con los PO_4^{3-} . Esta distribución de estaciones permitió determinar los gradientes norte-sur y de la costa hacia mar abierto. Las profundidades muestreadas en cada estación fueron las estándares (1, 5, 10, 20, 30, 50, 75, 100 y 200 m), dependiendo de la profundidad en cada sitio. Se utilizó un CTD Neil Brown para generar los perfiles de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y salinidad. Las muestras de agua se recolectaron con botellas Niskin de 5 L y se les analizó salinidad, oxígeno disuelto (mL L^{-1}), clorofila *a* (C_{la} , mg m^{-3}), PO_4^{3-} (μM) y nitratos (NO_3^- , μM). El análisis y la determinación de las variables hidrológicas fueron de acuerdo con métodos estándares establecidos. La salinidad y temperatura se calibraron y corrigieron con determinaciones discretas de salinidad y temperatura *in situ* (termómetros reversibles). Los PO_4^{3-} y los NO_3^- fueron analizados con un espectrofotómetro Spectronic 2001 de acuerdo con las técnicas espectrofotométricas descritas por Parsons *et al.* (1984). Las muestras de C_{la} fueron filtradas inmediatamente a través de filtros Gelman A/E con $0.8 \mu\text{m}$ de luz de malla y 45 mm de diámetro, los cuales fueron envueltos en papel aluminio y almacenados a -20°C hasta su análisis. Las muestras de C_{la} se analizaron utilizando un fluorímetro Turner 112 siguiendo el método descrito por Holm-Hansen *et al.* (1965) y los cálculos de concentración descritos por Parsons *et al.* (1984). Los límites de detección de los métodos para PO_4^{3-} , NO_3^- y C_{la} fueron de $0.040 \mu\text{M}$, $0.006 \mu\text{M}$, y 0.002 mg m^{-3} , respectivamente.

Debido a que el PO_4^{3-} es un nutriente indicador de surgencias en Baja California (González-Morales y Gaxiola-Castro 1991, Espinosa-Carreón *et al.* 2001, Takesue *et al.* 2004) y trazador de descargas antropogénicas (Johnston 1976, Gerlach 1981), en este trabajo los NO_3^- sólo se consideraron para

(Sañudo-Wilhelmy and Flegal 1991, 1996; Segovia-Zavala *et al.* 1998, 2003, 2004) and nutrients (Haury and Shulenberger 1982, 1998). This phenomenon also causes strong temperature and nutrient gradients in nearshore shelf waters (Petersen *et al.* 1986). The region has a Mediterranean climate, with hot, dry summers and cold, wet winters (Carlucci *et al.* 1986). Rainfall is scarce.

Material and methods

The ECOBAC cruise was conducted from 21 to 26 June 1990 aboard the R/V *El Puma*. The cruise plan included 35 hydrographic stations (fig. 1), which were covered in transects perpendicular to the coast to determine upwelling of subsurface water and its relation to PO_4^{3-} . This station distribution allowed establishing the north-south and inshore-offshore gradients. At each station, sampling was conducted at standard depths (1, 5, 10, 20, 30, 50, 75, 100 and 200 m), depending on the depth of each location. A Neil Brown CTD was used to generate the temperature ($^{\circ}\text{C}$) and salinity profiles. Water samples were collected in 5-L Niskin bottles, and analyzed for salinity, dissolved oxygen (mL L^{-1}), chlorophyll *a* (Chla , mg m^{-3}), PO_4^{3-} (μM) and nitrates (NO_3^- , μM). Analysis and

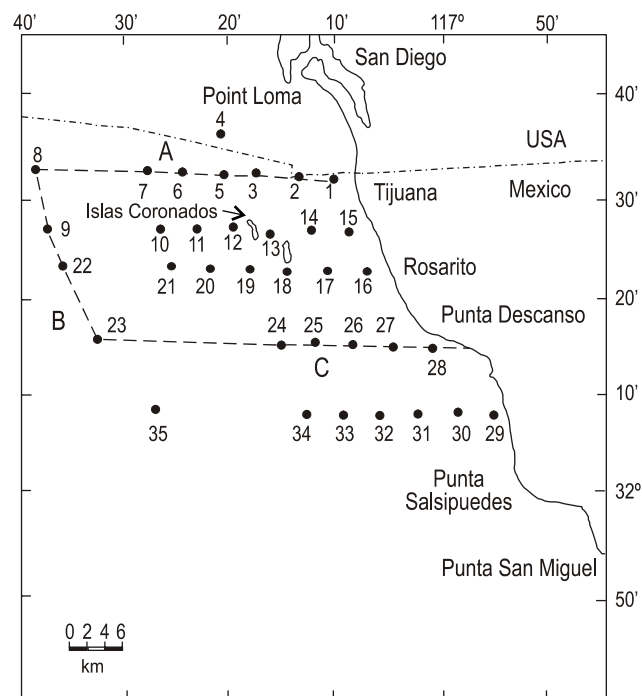


Figura 1. Localización del área de estudio y distribución de las estaciones de muestreo. Las líneas discontinuas representan los límites del área de estudio: el transecto A (lado norte), el transecto B (el lado paralelo y a 50 km de la costa) y el transecto C (el lado sur).

Figure 1. Location of the study area and distribution of the sampling stations. The broken lines represent the limits of the study area: transect A (northern side), transect B (parallel to the coast and 50 km offshore), and transect C (southern side).

estudiar la covarianza del PO_4^{3-} con las variables fisicoquímicas

Para identificar las características hidrográficas y procesos dominantes a escala vertical, se eligieron las líneas formadas por los transectos que limitan el área de estudio (fig. 1): el transecto A es el lado norte, el transecto B es el lado paralelo a la costa y el transecto C es el lado sur. Además, para la comparación superficial de la Chl *a* y los PO_4^{3-} se tomaron las concentraciones integradas por estación, mismas que incluyeron las profundidades superficiales de 1 a 10 m. Asimismo, para describir la consistencia de los principales procesos que afectan la distribución del PO_4^{3-} se utilizaron los análisis de agrupamiento (AA) y de componentes principales (ACP). El ACP se obtuvo a partir de las variables hidrográficas y biológicas estandarizadas ya que las escalas de las diferentes propiedades tienen intervalos y unidades diferentes (Popham y D'Auria 1983).

Balance de masas

Se realizó un balance de masas para estimar la contribución relativa de los principales aportes y salidas de PO_4^{3-} respecto al área de estudio. Para ello se consideró un prisma sobre la plataforma en forma de cuña de 32 km de largo (de Point Loma hasta Punta Descanso) por 15 km de ancho (de la costa hasta el borde de la plataforma) con una profundidad de 0 m en la costa

determination of the hydrological variables followed standard methods. Salinity and temperature were calibrated and corrected by discrete determinations *in situ* (reversing thermometers). A Spectronic 2001 spectrophotometer was used to analyze PO_4^{3-} and NO_3^- according to the spectrophotometric techniques described by Parsons *et al.* (1984). The Chl *a* samples were immediately filtered through Gelman A/E filters (0.8- μm pore size, 45-mm diameter), wrapped in foil paper and stored at -20°C until analysis. The Chl *a* concentrations were determined using a Turner 112 fluorometer following the method described by Holm-Hansen *et al.* (1965) and the calculations described by Parsons *et al.* (1984). The method detection limits for PO_4^{3-} , NO_3^- and Chl *a* were 0.040 mM, 0.006 mM and 0.002 mg m^{-3} , respectively.

Since PO_4^{3-} are indicators of upwelling in Baja California (González-Morales and Gaxiola-Castro 1991, Espinosa-Carreón *et al.* 2001, Takesue *et al.* 2004) and tracers of anthropogenic discharges (Johnston 1976, Gerlach 1981), in this study, NO_3^- were only considered to determine the covariance of PO_4^{3-} with the physicochemical variables.

The transect lines delimiting the study area were chosen to identify the hydrographic characteristics and dominant vertical processes (fig. 1): transect A corresponds to the northern side, transect B to the side parallel to the coast and transect C to the southern side. To compare surface Chl *a* and PO_4^{3-} , the station-integrated concentrations were taken, which included the depths of 1 to 10 m. To describe the consistency of the main processes affecting PO_4^{3-} distribution, a cluster analysis and a principal components analysis (PCA) were applied. Standardized hydrographical and biological variables were used for the PCA since the scales of the different properties have diverse ranges and units (Popham and D'Auria 1983).

Mass balance

A mass balance was done to estimate the relative contribution of the main PO_4^{3-} input and output sources in the study area. For this, we considered a wedge-shaped prism over the continental shelf, 32 km long (from Point Loma to Punta Descanso) by 15 km wide (from the coastline to the shelf), with a depth ranging from 0 m at the coast to 60 m at 15 km offshore (fig. 2). The prism functions as a recipient with inputs (subsurface-surface) and outputs (surface), as well as scavenging within the system. The system's inputs are upwelling (CsQs), horizontal advection from the north (CanQan) and anthropogenic discharges (CdQd). These inputs are balanced by outputs represented by horizontal advection from the south (CasQas) and biological removal (Br) within the prism. The following equation was considered for the mass balance:

$$\text{CsQs} + \text{CanQan} + \text{CdQd} = \text{CasQas} + \text{Br}$$

To calculate the input through upwelling, we considered the integrated concentration of PO_4^{3-} that was measured at the shelf edge between 30 and 50 m depth. The mean integrated

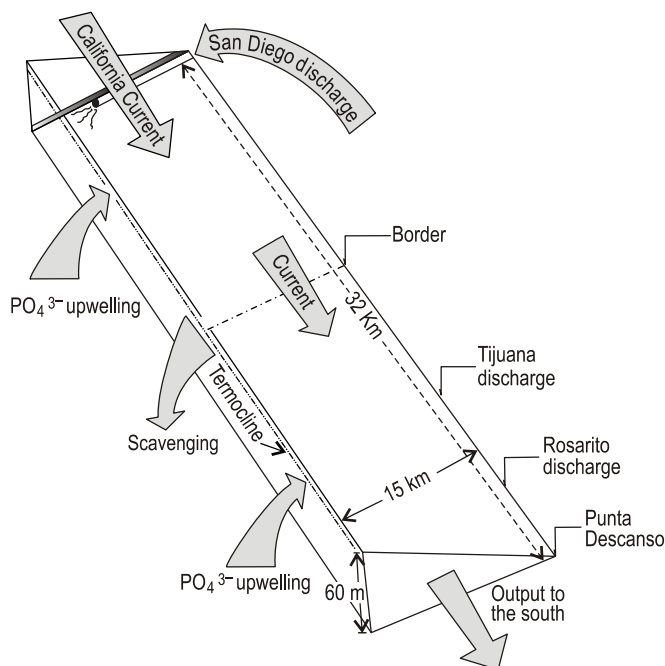


Figura 2. Prisma triangular sobre la plataforma continental en forma de cuña de 32 km de largo por 15 km de ancho y con una profundidad que varía de 0 m en la costa a 60 m a 15 km de la costa, utilizado para el balance de masas.

Figure 2. Wedge-shaped triangular prism over the continental shelf used for the mass balance: 32 km long by 15 km wide, and depth ranging from 0 m (on the coast) to 60 m (15 km offshore).

hasta 60 m a 15 km de la costa (fig. 2). El prisma opera como un recipiente con aportes (subsupsuperficial-superficial) y salidas (superficial), así como con remoción dentro del sistema. Los aportes de entrada al sistema son la surgencia (CsQs), la advección horizontal desde el norte (CanQan) y las descargas antropogénicas (CdQd). Estos aportes están balanceados por las salidas representadas por la advección horizontal al sur (CasQas) y la remoción biológica (Rb) en el interior del prisma. La ecuación considerada para el balance de masas fue:

$$CsQs + CanQan + CdQd = CasQas + Rb$$

Para el cálculo del aporte por surgencias se consideró la concentración integrada de PO_4^{3-} que fue medida al borde de la plataforma entre los 30 y 50 m de profundidad. La concentración media integrada de PO_4^{3-} ($\bar{P}$) se calculó en cada una de las caras del prisma como:

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \int P \times dz$$

donde z es la profundidad de la columna de agua y Px es la concentración de PO_4^{3-} a la profundidad x . Por lo tanto, se puede obtener una estimación razonable del aporte por la surgencia mediante la integración del rectángulo paralelo a la corriente entre los 30 y 50 m de profundidad que aporta el PO_4^{3-} de surgencia. Asimismo, para un cálculo más apropiado del agua surgida se tomó el área de surgencia de la figura 3a y de la imagen de satélite (fig. 3b), en donde es evidente la salida de agua fría. Esta área es aproximadamente la mitad del área de 15×32 km. Para estimar el aporte por advección del norte, normal a la corriente, se consideró la concentración integrada de PO_4^{3-} de los 20 m superficiales y una longitud de 15 km. Este criterio se fundamenta en que al norte de la costa de San Diego, en la línea designada por CalCOFI como 93.27, se detecta la Corriente de California (CC) en la superficie (Haury y Shulenberger 1998). Para estimar la advección al sur se consideró que el agua sale superficialmente (fig. 3b) y está definida por la capa de Ekman de 26 m (figs. 4a, 5a–b). La capa de Ekman ($H = 4.3 U/\text{sen } \Phi$) indica el grosor de la capa superficial que se transporta cuando se presenta el fenómeno de surgencia, razón por la cual se integró hasta 20 m de profundidad y por 15 km de longitud. En resumen, el modelo plantea entradas y salidas por los 20 m superficiales y una entrada subsuperficial entre 30 y 50 m de profundidad.

Las concentraciones de PO_4^{3-} en las descargas del emisor de Point Loma, en San Diego, fueron de 3.8 mg L^{-1} con un flujo de $179 \times 10^6 \text{ L d}^{-1}$ (www.sccwrp.org/pubs/annrpt/92-93/ar-01.htm). Las concentraciones de PO_4^{3-} y los volúmenes de las descargas de Punta Bandera, en Tijuana, y de Rosarito fueron de 4.87 y 8 mg L^{-1} , y de $81,129,600$ y $2,505,600 \text{ L d}^{-1}$, respectivamente (Canino-Herrera com. pers.). Es razonable suponer que las descargas de agua residual viajan hacia el sur, ya que la plata que proviene de las descargas de Point Loma fue detectada en Ensenada e incluso hasta San Quintín, Baja

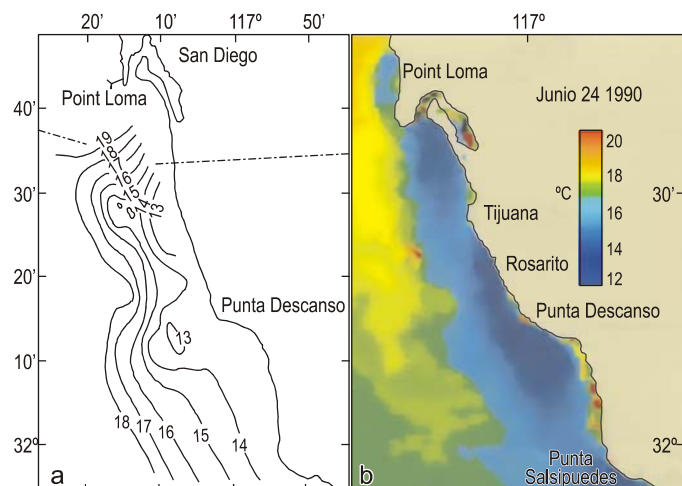


Figura 3. (a) Distribución superficial (1 m) de temperatura y (b) imagen de satélite en el espectro infrarrojo con valores de temperatura superficial correspondientes al 24 de junio de 1990.

Figure 3. (a) Surface (1 m) temperature distribution and (b) infrared satellite image showing surface temperature values corresponding to 24 June 1990.

concentration of PO_4^{3-} ($\bar{P}$) was calculated for each prism face as follows:

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \int P \times dz$$

where z is the depth of the water column and Px is the concentration of PO_4^{3-} at depth x . Thus, a reasonable calculation of the upwelling input is estimated by integrating the rectangle parallel to the current between 30 and 50 m depth contributed by PO_4^{3-} from upwelling. Likewise, for a more appropriate calculation of upwelled water, we used the upwelling area from figure 3a and from the satellite image (fig. 3b), which clearly show the emergence of cold water. This area is approximately half of the area of 15×32 km. For input through normal northern advection we considered the integrated concentration of PO_4^{3-} within 20 m of the surface and a length of 15 km. This criterion is based on the fact that off San Diego (California), at station 93.27 of the CalCOFI line, the California Current (CC) is detected at the surface (Haury and Shulenberger 1998). For southern advection we considered that water emerges at the surface (fig. 3b) and is defined by the 26-m Ekman layer (figs. 4a, 5a–b). Since the Ekman layer ($H = 4.3 U/\text{sen } \Phi$) indicates the thickness of the surface layer that is advected when upwelling occurs, the integration covered a depth of 20 m and a length of 15 km. Thus, the model contemplates input and output within 20 m of the surface and subsurface input between 30 and 50 m depth.

The PO_4^{3-} input from the Point Loma sewer outfall (San Diego County, California) was 3.8 mg L^{-1} , with a flow of $179 \times 10^6 \text{ L d}^{-1}$ (www.sccwrp.org/pubs/annrpt/92-93/ar-01.htm). The PO_4^{3-} concentrations and volumes from the Punta Bandera (Tijuana) and Rosarito sewer outfalls (Baja California) were

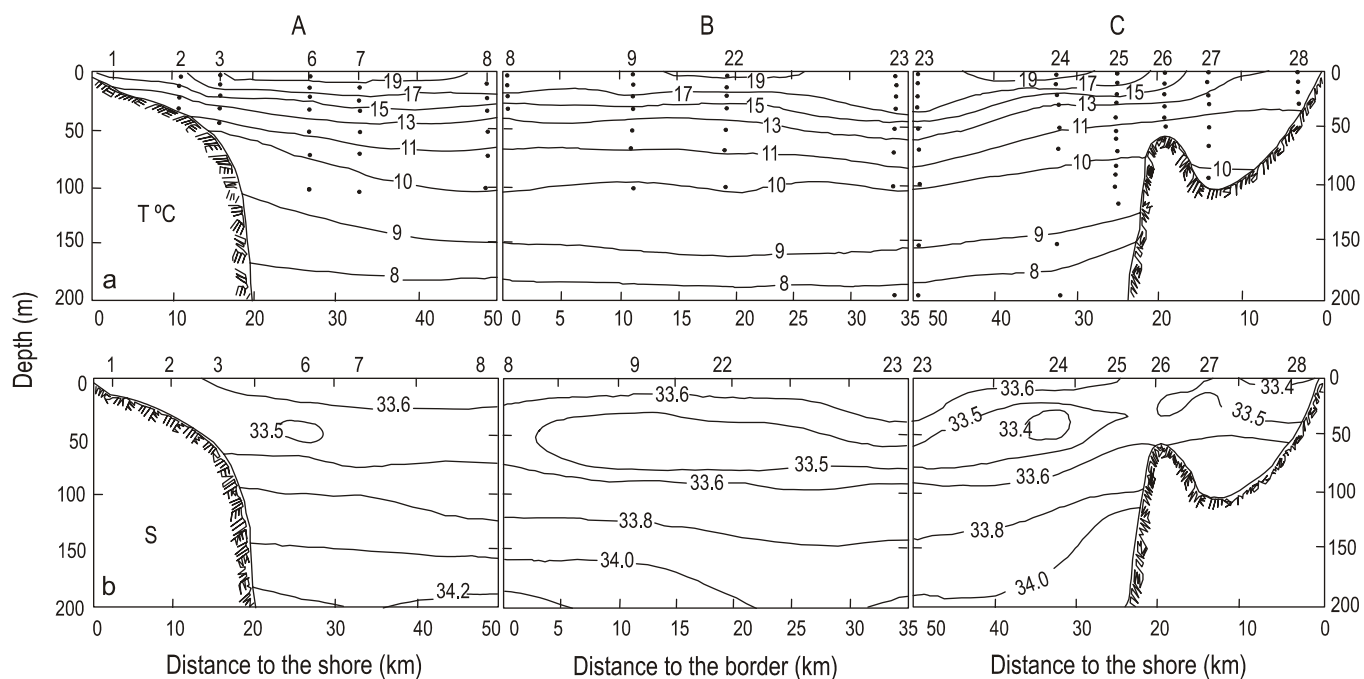


Figura 4. Distribución vertical de (a) temperatura y (b) salinidad. El transecto A es el lado norte, el transecto B es el lado paralelo y a 50 km de la costa, y el transecto C es el lado sur (ver fig. 1).

Figure 4. Vertical distribution of (a) temperature and (b) salinity. Transect A is the northern side, transect B is the side parallel to the coast and 50 km offshore, and transect C is the southern side (see fig. 1).

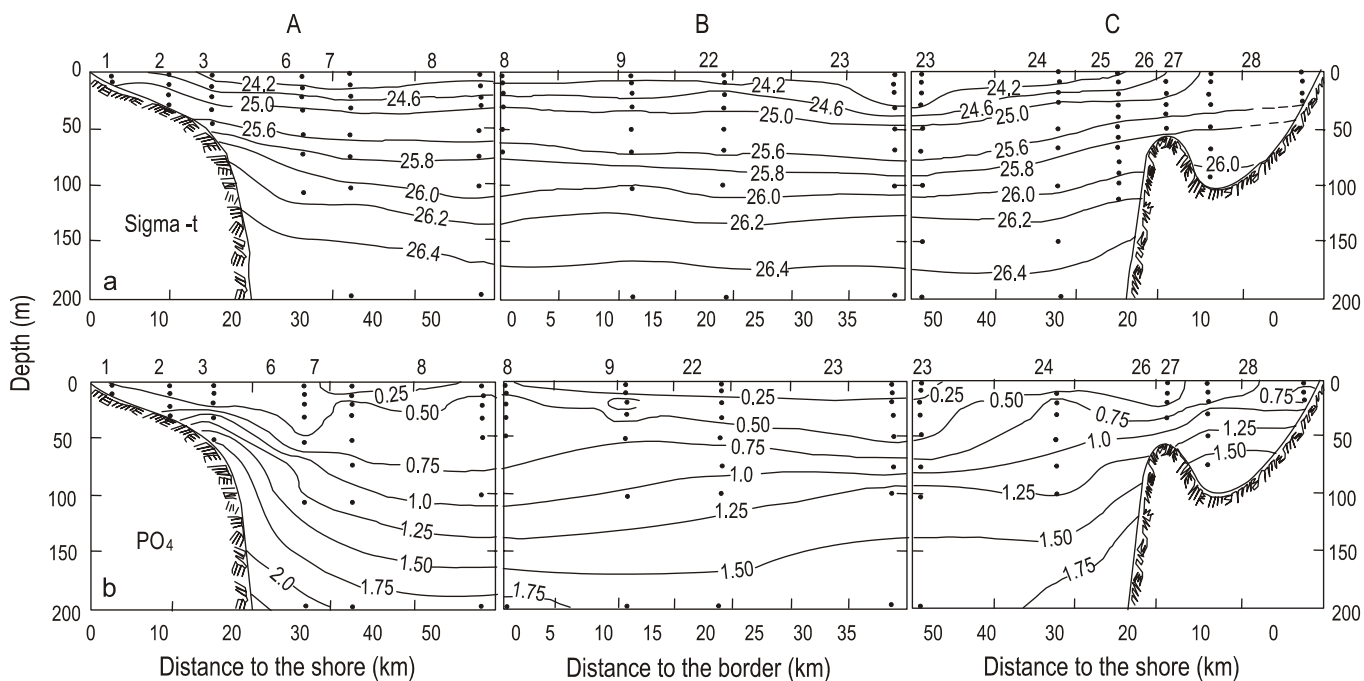


Figura 5. Distribución vertical de (a) densidad y (b) PO₄³⁻ (μM). El transecto A es el lado norte, el transecto B es el lado paralelo y a 50 km de la costa, y el transecto C es el lado sur (ver fig. 1).

Figure 5. Vertical distribution of (a) density and (b) PO₄³⁻ (μM). Transect A is the northern side, transect B is the side parallel to the coast and 50 km offshore, and transect C is the southern side (see fig. 1).

California, en México (Sañudo-Wilhelmy y Flegal 1992). Además, Haury y Shulenberger (1982) establecen que durante el verano frente a California y Baja California se presenta una mayor advección de la CC hacia el sur, demostrando que el balance de la CC tiene un transporte neto hacia el sur. Finalmente, el cálculo de la remoción biológica se realizó balanceando las entradas y salidas de PO_4^{3-} del sistema.

Los datos de entrada para la estimación del modelo fueron los siguientes: velocidad de la CC = 0.1 m s^{-1} (NOAA 1980), velocidad en el área de estudio (prisma) = 0.081 m s^{-1} (Hendricks 1976), velocidad de la surgencia = 3.39 m d^{-1} (calculada en este estudio), concentración media integrada de PO_4^{3-} en la surgencia = 0.0516 g m^{-3} , concentración media integrada de PO_4^{3-} a la entrada al sistema = 0.0190 g m^{-3} , concentración promedio integrada de PO_4^{3-} a la salida del sistema = 0.0294 g m^{-3} , concentración de PO_4^{3-} en la descarga de San Diego (California) = 3.8 mg L^{-1} , concentración de PO_4^{3-} en la descarga de Tijuana (Baja California) = 4.87 mg L^{-1} , y concentración de PO_4^{3-} en la descarga de Rosarito (Baja California) = 8 mg L^{-1} .

En la estimación del transporte de PO_4^{3-} por surgencias se calculó la velocidad vertical en el área a partir de una serie de tiempo de viento de dos días previos (estación 5) y durante el desarrollo del crucero ECOBAC. El viento dominante provino del noroeste y su velocidad media fue de 4.5 m s^{-1} . De esta manera la velocidad vertical de la surgencia se calculó de acuerdo con Takano (1955) y Pond y Pickard (1978):

$$W_0 = Ty / \sqrt{g\Delta\rho H}$$

donde W_0 es velocidad de ascenso (cm s^{-1}) = $3.84 \times 10^{-3} \text{ cm s}^{-1}$; Ty es el componente norte-sur del esfuerzo del viento = $C \times \rho \times U^2$, donde C es el coeficiente de arrastre = 0.0013, ρ es la densidad del aire = $0.00122 \text{ g cm}^{-3}$ y U es la velocidad media de la componente en $u = 450 \text{ cm s}^{-1}$, por tanto $Ty = 0.311 \text{ g cm}^{-1} \text{ s}^{-2}$; $g\Delta\rho$ es la condición de ajuste cuasi-isostático = 2.5; y H es el espesor medio de la capa de Ekman = $2616 \text{ cm} = 4.3 \text{ U}/\sqrt{\sin\Phi}$, donde Φ = latitud = 32° (N). U es la velocidad media de la componente norte u del viento = 443 cm s^{-1} , que es la que realmente afecta la surgencia.

El error asociado con el cálculo del balance de masas se obtuvo utilizando las ecuaciones de propagación de error definidas por Bevington (1969).

Regresión de aportes antropogénicos de PO_4^{3-}

Por medio de un análisis de regresión se realizó una proyección a futuro para predecir la magnitud de las descargas antropogénicas al ecosistema costero. Los aportes de PO_4^{3-} provenientes de las descargas de aguas residuales originadas en las ciudades de Rosarito y Tijuana se estimaron con los promedios mensuales de la concentración de PO_4^{3-} y de los volúmenes de descarga proporcionados por la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Tijuana (CESPT) para el periodo

4.87 and 8 mg L^{-1} , and 81,129,600 and 2,505,600 L d^{-1} , respectively (Canino-Herrera pers. comm.). It is reasonable to assume that the wastewaters are transported southwards, since silver discharged through the Point Loma outfall has been detected in Ensenada and even San Quintín, Baja California (Sañudo-Wilhelmy and Flegal 1992). Haury and Shulenberger (1982) established that during summer, off California and Baja California, there is enhanced southward advection of the CC, indicating a net southward transport in the CC. Finally, biological removal was calculated by balancing the inputs and outputs of PO_4^{3-} in the system.

The following model input data were used for the estimation: CC speed = 0.1 m s^{-1} (NOAA 1980), speed in the study area (prism) = 0.081 m s^{-1} (Hendricks 1976), upwelling speed = 3.39 m d^{-1} (calculated in this study), mean integrated concentration of PO_4^{3-} from upwelling = 0.0516 g m^{-3} , mean integrated concentration of PO_4^{3-} entering the system = 0.0190 g m^{-3} , mean integrated concentration of PO_4^{3-} exiting the system = 0.0294 g m^{-3} , PO_4^{3-} concentration in the San Diego (California) outfall = 3.8 mg L^{-1} , PO_4^{3-} concentration in the Tijuana (Baja California) outfall = 4.87 mg L^{-1} , and PO_4^{3-} concentration in the Rosarito (Baja California) outfall = 8 mg L^{-1} .

To estimate phosphate transport by upwelling, the vertical speed in the area was calculated based on wind time series data from two days before (station 5) and from the ECOBAC cruise. The prevailing winds were northwesterly and had a mean speed of 4.5 m s^{-1} . The vertical upwelling speed was thus calculated according to Takano (1955) and Pond and Pickard (1978), as follows:

$$W_0 = Ty / \sqrt{g\Delta\rho H}$$

where W_0 is the upward speed (cm s^{-1}) = $3.84 \times 10^{-3} \text{ cm s}^{-1}$; Ty is the north-south component of wind stress = $C \times \rho \times U^2$, where C is the drag coefficient = 0.0013, ρ is the density of air = $0.00122 \text{ g cm}^{-3}$ and U is the mean speed of the component in $u = 450 \text{ cm s}^{-1}$, therefore $Ty = 0.311 \text{ g cm}^{-1} \text{ s}^{-2}$; $g\Delta\rho$ is the quasi-isostatic fit condition = 2.5; H is the mean Ekman layer thickness = $2616 \text{ cm} = 4.3 \text{ U}/\sqrt{\sin\Phi}$, being Φ = latitude = 32° (N). U is the mean speed of the north wind component $u = 443 \text{ cm s}^{-1}$, which is the one actually affecting upwelling.

The error associated with the mass balance calculation was obtained using the error propagation equations defined by Bevington (1969).

Regression of anthropogenic PO_4^{3-} inputs

A regression analysis was applied to predict the magnitude of future anthropogenic discharges to the coastal ecosystem. The PO_4^{3-} inputs from the wastewater discharges of the cities of Tijuana and Rosarito (Baja California) were estimated using the monthly mean PO_4^{3-} concentration values and the outfall volumes provided by the Tijuana Public Service Commission (Comisión Estatal de Servicios Públicos de Tijuana) for the

comprendido de 1990 a 2005. Las concentraciones de PO_4^{3-} fueron multiplicadas por el gasto diario de cada efluente para obtener el aporte diario de PO_4^{3-} . Con los datos de los aportes diarios anualizados se realizó una regresión lineal para los años correspondientes.

Para el cálculo de los aportes de PO_4^{3-} de la descarga de Point Loma, provenientes de la ciudad de San Diego, se utilizaron los promedios anuales de la concentración de PO_4^{3-} y los volúmenes de descarga proporcionados por la Southern California Coastal Water Research Project (SCCWRP) desde 1990 hasta 2005 (www.sccwrp.org). Se estimó la carga media por día para cada año dividiendo la carga total entre 365 días. Para el modelo de regresión sólo se consideraron los datos de los aportes diarios anualizados de 1994 a 2005, debido a que los aportes de PO_4^{3-} no han variado en los últimos 10 años. Este promedio es el que se consideró para sumárselo a las cargas de México y así generar una predicción de PO_4^{3-} ($\text{t PO}_4^{3-} \text{ d}^{-1}$) de origen antropogénico que entra al área de estudio. Por medio de esta regresión y la suma de la carga media de Point Loma se realizó la proyección a mediano (10 años) y largo plazo (25 años) de la carga que será introducida al sistema costero. Entonces se presentan dos modelos: el modelo de regresión de Point Loma (MRPL) y el modelo de regresión Tijuana-Rosarito (MRTR).

Resultados

Hidrografía

La temperatura superficial (1 m) presentó un gradiente espacial evidente, con valores de 5–6°C más bajos en la costa que mar abierto (fig. 3a). Se observaron dos lenguetas de agua fría (13°C) de la costa hacia mar abierto: una frente a Punta Descanso y otra al sur de la frontera México-EUA. Asimismo, una imagen de satélite tomada durante el crucero (24 de junio), reveló la presencia de aguas superficiales frías en la costa (13°C) y más calientes (19°C) fuera de la costa (fig. 3b). La distribución vertical de temperatura también mostró una elevación de las isotermas de mar abierto (50 km) hacia la costa, con pendientes más intensas sobre el borde de la plataforma continental (fig. 4a). En la parte sur del área de estudio la isoterma de los 13°C se elevó desde 60–70 m de profundidad 50 km mar adentro, hasta la superficie cerca de la costa (transecto C); en contraste, en la región norte esta isoterma sólo se elevó hasta 10 m de profundidad cerca de la costa (transecto A). En el transecto B (paralelo a la costa) las isotermas fueron en general horizontales.

Las isohalinas mostraron el mismo patrón de elevación, de mar abierto hacia la costa (fig. 4b). En el transecto C la isohalina de 34 mostró una elevación de los 200 m de profundidad (40–50 km mar adentro), hasta 100 m de profundidad en el talud continental, localizado a poco más de 20 km de la costa. En la parte sur se detectó un núcleo con un mínimo subsuperficial menor a 33.4, entre 30–40 km de la costa, así como también en la región costera y superficial (transecto C).

period 1990–2005. The PO_4^{3-} concentrations were multiplied by the daily volume of each effluent to obtain the daily input of PO_4^{3-} . Using the annual input calculated from the daily data, a linear regression was conducted for the corresponding years.

For the PO_4^{3-} inputs from the Point Loma wastewater treatment plant of the city of San Diego (California), we used the annual mean PO_4^{3-} concentrations and outfall volumes provided by the Southern California Coastal Water Research Project for the period 1990–2005 (www.sccwrp.org). To estimate the mean daily load for each year, the total load was divided by 365 days. For the regression model, only the 1994–2005 annual inputs calculated from the daily data were considered since the PO_4^{3-} inputs have not varied over time during the last 10 years. This average was added to the Baja California loads in order to predict the amount of PO_4^{3-} ($\text{t PO}_4^{3-} \text{ d}^{-1}$) of anthropogenic origin entering the study area. Through this regression and the addition of the mean Point Loma load, a medium- (10 years) and short-term (25 years) projection was made of the load that would be introduced into the coastal system. Hence, two models are presented: the Point Loma regression model (RMPL) and the Tijuana-Rosarito regression model (RMTR).

Results

Hydrography

Surface (1 m) water temperature showed an evident spatial gradient, with values 5–6°C lower on the coast than offshore (fig. 3a). Two nearshore-offshore cold-water (13°C) plumes were observed: one off Punta Descanso and another to the south of the US-Mexico boundary. A satellite image taken during the cruise (24 June) revealed the presence of cold surface water (13°C) on the coast and warmer waters (19°C) offshore (fig. 3b). The vertical temperature distribution also showed isotherms rising from the open sea (50 km) towards the coast, with steeper slopes over the edge of the continental shelf (fig. 4a). In the southern part of the study area (transect C), the 13°C isotherm rose from 60–70 m depth (50 km offshore) to the surface (close to shore), whereas in the northern part (transect A) it only rose to 10 m depth near the coast. Along transect B (parallel to the coast), the isotherms were generally horizontal.

Isohalines showed the same offshore-nearshore rising pattern (fig. 4b). Along transect C, the 34 isohaline rose from 200 m depth, 40–50 km offshore, to 100 m depth over the continental slope, located slightly more than 20 km offshore. In the southern part, a core with a subsurface minimum of less than 33.4 was detected 30–40 km offshore as well as in the coastal region (transect C).

The vertical distribution of density was similar to that of temperature and salinity. Isopycnals rose from the open sea towards the coast (fig. 5a). The slopes were steeper over the continental shelf and slope. In the southern part of the study area (transect C), the 25.0 isopycnal rose from 50 m depth

La distribución vertical de densidad presentó un patrón similar a la temperatura y salinidad. Se observa una elevación de las isopícnas de mar abierto hacia la costa (fig. 5a). Las pendientes fueron más pronunciadas sobre el talud y la plataforma continentales. En la parte sur, la isopícnica de 25.0 subió desde 50 m de profundidad (50 km mar adentro), hasta la superficie a 15 km de la costa (tránsito C). En la región norte, esta isopícnica se elevó hasta 10 m de profundidad en la costa (tránsito A).

Fosfatos y clorofila a

La distribución del PO_4^{3-} fue similar a las variables hidrográficas. Se presentó una pronunciada elevación de las isolíneas de mar abierto hacia la zona costera (fig. 5b). Se aprecia un transporte vertical más intenso en la parte sur del área de estudio, en donde la isolínea de $0.75 \mu\text{M}$ llegó hasta la superficie (1 m) en la costa (tránsito C), mientras que en la parte norte sólo alcanzó a llegar hasta los 30–40 m de profundidad (tránsito A). En general en ambos tránsitos se identifican concentraciones mayores a $1 \mu\text{M}$ sobre la plataforma y en el borde del talud continental. La distribución superficial integrada de PO_4^{3-} presentó gradientes muy marcados. Por ejemplo en Punta Descanso, en donde se observó una lengüeta con altas concentraciones de PO_4^{3-} ($0.90 \mu\text{M}$) que disminuyen hacia el norte (estaciones 16 y 17) y sur (estaciones 30 y 31), así como hacia mar abierto (fig. 6a).

La distribución superficial integrada de Chl *a* presentó una amplia variación con valores de 1.0 a 10.0 mg m^{-3} , distinguiéndose dos zonas de alta concentración (fig. 6b). Una zona está localizada en la región norte del área de estudio, con valores hasta de 10 mg m^{-3} , mientras que la segunda zona, se localizó en la región central (estación 16) frente a Rosarito, con concentraciones de 5 mg m^{-3} . En contraste, en Punta Descanso se presentaron las más bajas concentraciones de Chl *a*, con valores de 1.0 a 2.0 mg m^{-3} (estaciones 27 y 28). En general, después de 9 a 10 km perpendiculares a la costa las concentraciones fueron menores a 1.0 mg m^{-3} .

Análisis multivariado

El AA permitió distinguir la covariación de PO_4^{3-} con las variables conservativas y no conservativas (fig. 7), sugiriendo que su variación espacial está asociada a la biomasa fitoplanctónica y a las aguas frías. Además, en el ACP el componente 1 (C1) se asocia con el régimen de surgencias de agua con alto contenido de nutrientes, bajo oxígeno y baja temperatura (tabla 1). El componente 2 (C2) puede asociarse a un régimen de mezcla costera y se identifica por baja temperatura, baja salinidad y presencia de Chl *a*. El componente 3 (C3) se asocia con la presencia de partículas biogénicas que florecen después de un evento de surgencia costera. El componente 4 (C4) se asocia con la presencia de aguas estratificadas en las estaciones fuera de la plataforma.

(50 km offshore) to the surface (15 km offshore). In the northern part (tránsito A), this isopycnal rose to 10 m depth on the coast.

Phosphates and chlorophyll a

The distribution of PO_4^{3-} was similar to that of the hydrographic variables, the isolines rising steeply from the open sea to the coastal area (fig. 5b). Vertical transport was more pronounced in the southern part of the study area, where the $0.75\text{-}\mu\text{M}$ isoline reached the surface (1 m) on the coast (tránsito C), while in the northern part it only reached 30–40 m (tránsito A). In general, along both tránsitos, concentrations higher than $1 \mu\text{M}$ were found over the continental shelf and slope edge. The integrated surface distribution of PO_4^{3-} showed very marked gradients. For example, a plume observed at Punta Descanso had high concentrations of PO_4^{3-} ($0.90 \mu\text{M}$) that decreased northwards (stations 16 and 17) and southwards (stations 30 and 31), as well as offshore (fig. 6a).

The integrated surface distribution of Chl *a* showed a wide variation, with values ranging from 1.0 to 10.0 mg m^{-3} . There were two zones of high concentration (fig. 6b): the first located in the northern part of the study area, where values reached 10 mg m^{-3} , and the second located in the central part (station 16), off Rosarito, where concentrations of 5 mg m^{-3} were found. The lowest concentrations of Chl *a* ($1.0\text{--}2.0 \text{ mg m}^{-3}$) were recorded at Punta Descanso (stations 27 and 28). In general, after 9–10 km perpendicular to the coast, the concentrations were lower than 1.0 mg m^{-3} .

Multivariate analysis

The covariation of PO_4^{3-} with conservative and nonconservative variables was determined by cluster analysis (fig. 7), which indicated that the spatial variation was associated with phytoplankton biomass and cold water. Moreover, in the PCA, component 1 (C1) is associated with the upwelling of nutrient-rich, low-oxygen, low-temperature water (tabla 1). Component 2 (C2) is associated with a coastal mixing regime and is identified by low temperature, low salinity and the presence of Chl *a*. Component 3 (C3) is associated with the presence of biogenic particles that emerge after a coastal upwelling event. Component 4 (C4) is associated with the presence of stratified waters at stations outside the shelf.

Mass balance and regression model

The results of the mass balance of PO_4^{3-} in the study area are given in tabla 2. The main source of PO_4^{3-} input was upwelling ($41.1 \pm 2.3 \text{ t d}^{-1}$), followed by horizontal advection ($20.9 \pm 2.2 \text{ t d}^{-1}$) and to a lesser extent by wastewater discharges ($3.0 \pm 0.1 \text{ t d}^{-1}$). Upwelling and horizontal advection contributed 95% of PO_4^{3-} , and anthropogenic discharges the remaining 5%. It is important to note that the coastal border

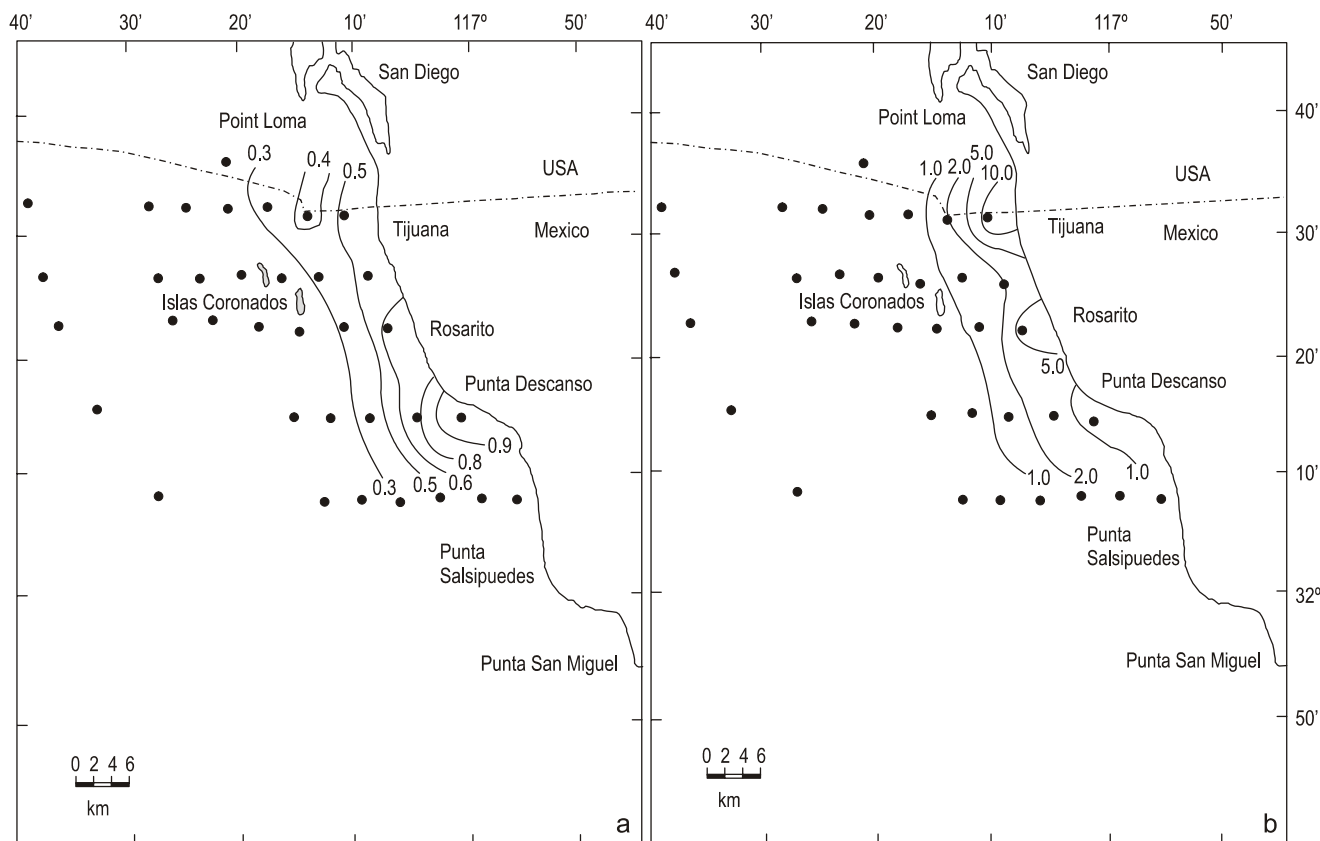


Figura 6. Distribución superficial integrada de (a) PO_4^{3-} y (b) clorofila *a*. La integración es considerando los niveles de 1 a 10 m de profundidad en cada estación.

Figure 6. Integrated surface distribution of (a) PO_4^{3-} and (b) chlorophyll *a*. The integration considers the levels of 1 to 10 m depth at each station.

Balace de masas y modelo de regresión

Los resultados del balance de masas de PO_4^{3-} en el área de estudio se presentan en la tabla 2. La principal fuente de aporte de PO_4^{3-} fue la surgencia ($41.1 \pm 2.3 \text{ t d}^{-1}$), seguida por la advección horizontal ($20.9 \pm 2.2 \text{ t d}^{-1}$) y en menor proporción las descargas de aguas residuales ($3.0 \pm 0.1 \text{ t d}^{-1}$). Se observa que 95% del PO_4^{3-} es aportado por la surgencia y la advección horizontal, mientras que el 5% restante es aportado por las descargas antropogénicas. Es importante señalar que la zona costera fronteriza ha recibido por décadas un aporte continuo de descargas antropogénicas con una tendencia sistemática a incrementarse con el aumento de la población. Por lo tanto, es importante realizar una proyección al futuro de la fertilización inducida que podría competir con los procesos naturales de fertilización y generar un fenómeno de eutrofización. La figura 8 muestra que las descargas de PO_4^{3-} provenientes de Tijuana y Rosarito han aumentado a una tasa de $0.19 \text{ t d}^{-1} \text{ año}^{-1}$. En contraste, las descargas de PO_4^{3-} provenientes de Point Loma han disminuido significativamente (MRPL) y durante la última década han tendido a ser relativamente constantes (0.3 t d^{-1}). El modelo de regresión de Tijuana-Rosarito (MRTR) pronostica que para los años 2015 y 2030 se aportarán aproximadamente 6.3 y 9.2 t d^{-1} de PO_4^{3-} , respectivamente.

region has been receiving continuous anthropogenic discharges for decades, which systematically increase as the population increases. It is therefore important to make a projection of future induced fertilization that could compete with natural fertilization processes and generate a phenomenon of eutrophication. Figure 8 shows that the Tijuana/Rosarito PO_4^{3-} inputs have increased at a rate of $0.19 \text{ t d}^{-1} \text{ yr}^{-1}$. In contrast, the Point Loma PO_4^{3-} inputs have decreased significantly (RMPL) and

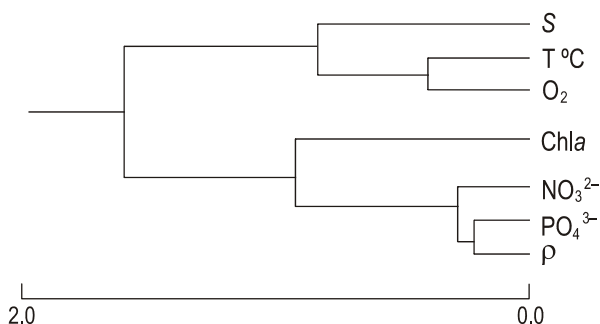


Figura 7. Análisis de agrupamiento de PO_4^{3-} con las variables conservativas y no conservativas.

Figure 7. Cluster analysis of PO_4^{3-} and the conservative and nonconservative variables.

Tabla 1. Componentes principales de las variables conservativas y no conservativas (* variable asociada al componente).
Table 1. Principal components of the conservative and nonconservative variables (* variable associated with the component).

Variable	C1	C2	C3	C4
Dissolved oxygen	−0.986*	0.045	0.070	−0.095
Apparent oxygen utilization	0.931*	0.070	0.072	0.31
NO ₃	0.850*	0.056	0.114	0.290
N:P	0.638*	0.115	0.205	0.270
Salinity	0.005	−0.920*	−0.280	−0.272
Chlorophyll <i>a</i>	0.130	0.434*	0.960*	−0.020
Sigma	0.491	0.294	−0.070	0.775*
Temperature (°C)	−0.598*	−0.420*	−0.036	0.780*
Explained variance (%)	51.04	9.20	22.72	12.60

Discusión

Barber y Smith (1981) definieron al fenómeno de surgencia como el proceso en que el agua subsuperficial es transportada hacia la superficie y transportada lejos del área del transporte vertical por un flujo superficial horizontal mar adentro. Estas aguas presentan menor temperatura y concentración de oxígeno, así como mayor densidad y contenido de nutrientes que las aguas superficiales de zonas oceánicas. En este estudio el gradiente superficial de temperatura que aumenta hacia fuera de la costa (fig. 3a, b) evidencia un movimiento de agua mar adentro debido al transporte de Ekman, el cual es inducido por el esfuerzo del viento. El factor principal que influye para que se desarrollen eventos de surgencia en la costa de Baja California es la presencia de vientos fuertes del noroeste (8 m s^{−1}) con dirección predominante hacia el sur (Barton y Argote 1980). Además, dos días previos al crucero (21 y 22 de junio), el promedio de la velocidad del viento fue de 4.5 m s^{−1} en una estación fija (E5), a 25 km de la costa mar adentro, y durante todo el crucero fue, en promedio, de 6.5 m s^{−1}. Dorman y Palmer (1981) reportaron que durante el verano las surgencias costeras entre La Jolla y Balboa, California, fueron provocadas por forzamientos de vientos locales de 2.8–3.87 m s^{−1}.

Nuestros resultados sugieren que el viento fue un factor determinante para el desarrollo de las lengüetas de agua fría que se proyectan de la costa hacia mar adentro (fig. 3a, b). El comportamiento termohalino observado en la figura 4(a, b) distingue la elevación hacia la costa de las isotermas y las isohalinas debido al transporte de Ekman por efecto del viento.

have tended to be relatively constant during the last decade (0.3 t d^{−1}). The Tijuana/Rosarito regression model (RMTR) predicts that by the years 2015 and 2030 the anthropogenic contribution of PO₄^{3−} will be approximately 6.3 and 9.2 t d^{−1}, respectively.

Discussion

Barber and Smith (1981) defined upwelling as the process by which subsurface water is brought up to the surface and advected offshore far from the vertical transport area by a horizontal surface flow. Upwelled water is usually colder and denser, and has a lower concentration of oxygen and higher concentration of nutrients than oceanic surface waters. In this study, the offshore-increasing surface temperature gradient (fig. 3a, b) indicates a movement of water towards the open ocean due to the wind-induced Ekman transport. The main factor influencing the development of upwelling events on the coast of Baja California is the occurrence of strong north-westerly winds (8 m s^{−1}) blowing predominantly towards the south (Barton and Argote 1980). Two days before the cruise (21 and 22 June), mean wind speed was 4.5 m s^{−1} at one fixed station (station 5) 25 km offshore; throughout the cruise it was on average 6.5 m s^{−1}. Dorman and Palmer (1981) reported that during the summer, coastal upwelling between La Jolla and Balboa (California) was generated by local wind forcings of 2.8–3.87 m s^{−1}.

Our results suggest that wind was a determining factor in the development of cold-water plumes extending seawards

Tabla 2. Balance de masas de PO₄^{3−} ± error asociado (en t d^{−1}). Los errores asociados fueron calculados por medio del análisis de propagación del error.
Table 2. Mass balance of PO₄^{3−} ± associated error (t d^{−1}). Associated errors calculated by error propagation analysis.

Input			Output	
Upwelling	Advection (N)	Discharge	Advection (S)	Scavenging
41.1 ± 2.3	20.9 ± 2.2	3.0 ± 0.1	61.7 ± 3.2	3.3 ± 4.5
CsQs	CanQan	CdQd	CasQas	Biological removal

dEsta es una característica que revela claramente un surgimiento de agua subsuperficial. Gómez-Valdez (1983) y González-Morales y Gaxiola-Castro (1991) establecieron que en verano, 100 km al sur de la frontera México-EUA, la elevación de las isotermas entre 12°C y 14°C, cerca de la costa, es un indicador de surgencia de aguas que provienen de entre 100 y 85 m de profundidad, lo cual es consistente con los resultados de esta investigación.

Con relación al mínimo subsuperficial de salinidad con núcleo a 40–50 m (fig. 4b), Reid *et al.* (1958) y Reid (1973) establecieron que la CC presenta un mínimo de salinidad a 100 m de profundidad y se origina en las altas latitudes del Océano Pacífico. Durazo *et al.* (2005) reportaron que frente a Baja California las características del mínimo de salinidad y baja temperatura tienen su origen en aguas del subártico. Asimismo, Jerónimo y Gómez-Valdez (2006) establecen que en la región norte y costera de Baja California se presentan a 38 m de profundidad áreas de baja temperatura (<14°C) y salinidad (< 33.6). Dorman y Palmer (1981) reportaron para un área 20 km al norte de la frontera México-EUA un comportamiento termohalino similar durante el verano, y asociaron agua fría superficial y un núcleo de baja salinidad (<33.53) con agua que es transportada por la CC. Asimismo, el mínimo de salinidad ha sido observado sobre la plataforma, justo al norte de San Diego (Tsuchiya 1976). Este mínimo de salinidad es el que se detecta a 50 km fuera de la costa (fig. 4b, transecto B) y se eleva surgiendo sobre la plataforma y en la zona costera.

Las características hidrográficas descritas en este trabajo, tanto en el plano vertical como horizontal, revelan una surgencia costera con advección vertical subsuperficial y transporte hacia fuera de la costa. De acuerdo con Gómez-Valdez (1983), el fenómeno se debe a una combinación del balance geostrófico en el flujo de la CC y la deriva de Ekman causada por el esfuerzo del viento. En el hemisferio norte, con el balance geostrófico el agua fría, de mayor densidad, se eleva al lado izquierdo del flujo de la corriente (Neumann y Pierson 1966). De esta manera, las surgencias son más intensas frente a puntas y cabos que se proyectan sobre la corriente norte-sur (Sverdrup *et al.* 1942). Esto es congruente con la evidencia de surgencia en Punta Descanso por el levantamiento de la isoterma de 13°C y el mínimo de salinidad del núcleo de la CC (33.4–33.5) hasta la superficie.

Se ha reportado que en las aguas frente a las costas del noroeste de Baja California el intervalo en la concentración de PO_4^{3-} de 0.75 a 1.50 μM es indicador de agua de surgencia (González-Morales y Gaxiola-Castro 1991, Espinosa-Carreón *et al.* 2001). Los resultados de nuestra investigación muestran que las concentraciones en el intervalo antes mencionado se ubicaron en mar abierto a profundidades de 70 a más de 100 m, mientras que en la costa estas mismas concentraciones se observaron entre la superficie y 40 m de profundidad (transecto C, fig. 5b). Es evidente que las distribuciones verticales de temperatura, salinidad, densidad y PO_4^{3-} son congruentes con el fenómeno de surgencias y muestran que durante el periodo de estudio las aguas subsuperficiales presentaron una

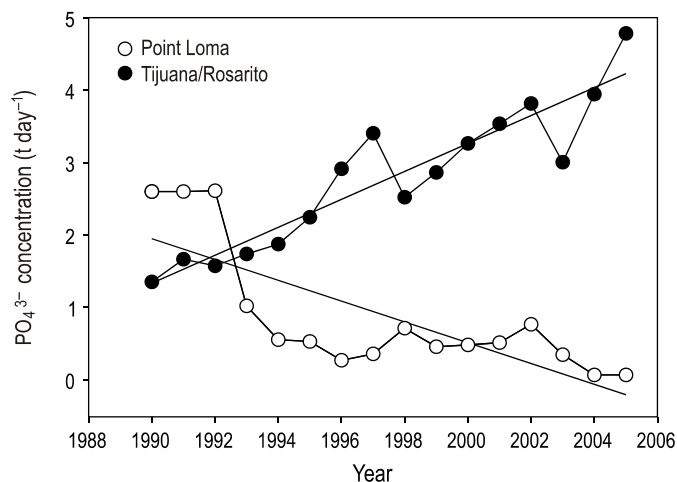


Figura 8. Relación de la carga de PO_4^{3-} en las descargas (t d^{-1}) de Tijuana y Rosarito, Baja California, México, y la carga de PO_4^{3-} en las descargas (t d^{-1}) de Point Loma, EUA de 1990 a 2005. Se incluyen también los modelos de regresión de Tijuana/Rosarito (MRTR) y de Point Loma (MRPL). MRTR: $\text{t PO}_4^{3-} \text{ d}^{-1} = 0.19 \times \text{año} - 382.8$, $r^2 = 0.86$, $n = 16$. MRPL: $\text{t PO}_4^{3-} \text{ d}^{-1} = -0.26 \times \text{año} + 52.9$, $r^2 = 0.60$, $n = 12$.

Figure 8. Relation of the PO_4^{3-} load in the 1990–2005 discharges (t d^{-1}) from Tijuana and Rosarito (Baja California, Mexico), and from Point Loma (California, USA). Also shown are the regression models for Tijuana/Rosarito (RMTR) and Point Loma (RMPL). RMTR: $\text{t PO}_4^{3-} \text{ d}^{-1} = 0.19 \times \text{year} - 382.8$, $r^2 = 0.86$, $n = 16$. RMPL: $\text{t PO}_4^{3-} \text{ d}^{-1} = -0.26 \times \text{year} + 52.9$, $r^2 = 0.60$, $n = 12$.

from the coast (fig. 3a, b). The thermohaline behaviour observed in figure 4(a, b) shows isotherms and isohalines sloping up towards the coast due to the wind-induced Ekman transport. This is a characteristic that clearly indicates upwelling of subsurface water. Gómez-Valdez (1983) and González-Morales and Gaxiola-Castro (1991) established that in summer, 100 km to the south of the US-Mexico border, the elevation of the 12–14°C isotherms, close to shore, is an indication of upwelling of waters from 100 and 85 m depth; this concurs with the results obtained in this study.

In relation to the subsurface salinity minimum with a core at 40–50 m (fig. 4b), Reid *et al.* (1958) and Reid (1973) found that the CC presents a salinity minimum at 100 m depth and that it originates at high latitudes of the Pacific Ocean. Durazo *et al.* (2005) reported that off Baja California, the low temperature and salinity characteristics are attributed to subarctic waters. Likewise, Jerónimo and Gómez-Valdez (2006) indicated that in the northern and coastal regions of Baja California, areas of low temperature (<14°C) and salinity (<33.6) occur at 38 m depth. Dorman and Palmer (1981) observed a similar thermohaline behaviour during summer in an area 20 km north of the US-Mexico border, and associated cold surface water and a low-salinity core (<33.53) with water that is advected by the CC. The salinity minimum has been observed over the shelf, just to the north of San Diego (Tsuchiya 1976). This is the salinity minimum observed 50 km

advección vertical por lo menos desde 200 m hacia la superficie en la zona de la costa.

La distribución superficial integrada de PO_4^{3-} en Punta Descanso (fig. 6a), en donde se observó una lengüeta con altas concentraciones de este nutriente ($0.90 \mu\text{M}$) que disminuyen hacia el norte (estaciones 16 y 17) y sur (estaciones 30 y 31), así como hacia mar abierto, es congruente con los resultados de las isotermas y las isohalinas debidas al transporte de Ekman por efecto del viento. En contraste, la *Cla* presentó valores más altos en la zona norte respecto a la zona sur, mientras que los PO_4^{3-} presentaron una distribución inversa con menores concentraciones en la parte norte y mayores en la zona sur del área de estudio (fig. 6a, b). Frente a las costas de Baja California se han reportado concentraciones subsuperficiales de *Cla* de hasta 20 mg m^{-3} durante el periodo de relajación de la surgencia (Cardona-Canizales *et al.* 1990). El comportamiento anterior sugiere que en la parte norte del área de estudio se presentó primero el aporte de agua rica en nutrientes y un subsecuente florecimiento fitoplanctónico, mientras que en la parte sur, el fenómeno de surgencia estuvo activo al momento del muestreo, razón por la cual se observaron los altos valores de PO_4^{3-} , bajas temperaturas y concentraciones de *Cla* relativamente menores. Barber y Ryther (1969) argumentaron que se presenta un desfase entre la máxima intensidad de un afloramiento y la respuesta del fitoplancton, ya que existe la necesidad de una quelación de los metales para que el fitoplancton disponga de los nutrientes necesarios para desarrollarse adecuadamente. Segovia-Zavala *et al.* (1998) reportaron para este mismo periodo que, en la zona fronteriza, el cadmio fue aportado por la surgencia y estuvo asociado con la biomasa fitoplanctónica.

El fenómeno de surgencia es un evento pulsante que dura de días a semanas y se ha reportado que no ocurre de manera simultánea sino que se propaga a lo largo de la costa con diferentes tiempos de secuencia ocasionados por cambios en la dirección del viento (Badan-Dangon *et al.* 1985). En base a lo anterior se podría sugerir que las características hidrológicas para la zona norte y sur no son similares, por lo que se propone que existe un traslape producto de las fases de la surgencia.

Debido a la consistencia oceanográfica en el comportamiento de la distribución horizontal y vertical de PO_4^{3-} con las variables previamente descritas y los resultados de los análisis multivariados (fig. 7, tabla 1), se sugiere que la distribución del PO_4^{3-} está controlada principalmente por procesos físicos y biológicos como la surgencia, la fotosíntesis y con una posible incipiente influencia antropogénica. Hemingway (1979) reportó una descripción general del ecosistema de la CC y estableció, por medio de un análisis de factores, que la mayor varianza del ecosistema pudo ser explicada por el surgimiento de nutrientes (36%), por mezcla (18%) y por la producción primaria (7.3%), lo cual concuerda con los resultados de nuestro estudio. Asimismo, Segovia-Zavala *et al.* (1998) reportan que la distribución del cadmio en esta misma área de estudio y durante el mismo periodo se explicó por procesos físicos (53%) y la biomasa fitoplanctónica (25%). Bruland (1980) y

offshore (fig. 4b, transect B), which rises over the shelf and in the coastal area.

The vertical and horizontal hydrographic characteristics described herein reveal coastal upwelling with vertical subsurface advection and offshore transport. According to Gómez-Valdez (1983), this phenomenon is caused by a combination of the geostrophic balance in the flow of the CC and the Ekman drift induced by wind stress. In the Northern Hemisphere, with the geostrophic balance, the cold, dense water rises on the left side of the current's flow (Neumann and Pierson 1966). Hence, upwelling is more intense off points and capes that jut out over the north-south current (Sverdrup *et al.* 1942). This is congruent with the upwelling evidenced off Punta Descanso by the elevation of the 13°C isotherm and CC minimum salinity core ($33.4\text{--}33.5$) to the surface.

It has been reported that in waters off northwestern Baja California, PO_4^{3-} concentrations ranging from 0.75 to $1.50 \mu\text{M}$ indicate upwelling (González-Morales and Gaxiola-Castro 1991, Espinosa-Carreón *et al.* 2001). In this study, the concentrations falling within this range were found in the open sea at depths of 70 m to more than 100 m, whereas along the coast, these same concentrations were recorded between the surface and 40 m depth (transect C, fig. 5b). The vertical temperature, salinity, density and PO_4^{3-} distributions are evidently congruent with the upwelling phenomenon and show that during the study period, subsurface waters were advected vertically from at least 200 m to the surface in the coastal area.

The integrated surface distribution of PO_4^{3-} off Punta Descanso (fig. 6a), where a plume was observed with high concentrations of this nutrient ($0.90 \mu\text{M}$) decreasing northwards (stations 16 and 17), southwards (stations 30 and 31) and seawards, concurs with the isotherm and isohaline results due to the wind-induced Ekman transport. In contrast, higher *Chla* values were recorded in the northern part of the study area than in the southern, whereas the PO_4^{3-} values showed an inverse distribution, with lower concentrations in the northern part and higher in the southern (fig. 6a, b). Subsurface *Chla* concentrations of up to 20 mg m^{-3} have been recorded off the coast of Baja California during the upwelling relaxation period (Cardona-Canizales *et al.* 1990). This behaviour suggests that in the northern part of the study area, nutrient-rich water appeared first, followed by phytoplankton blooms, but that in the southern part, the upwelling phenomenon was active at the time of the survey, and consequently high PO_4^{3-} values, low temperatures and relatively lower *Chla* concentrations were found. Barber and Ryther (1969) argued that there is a displacement between maximum bloom intensity and phytoplankton response, since metal chelation is necessary for the phytoplankton to dispose of the nutrients required for an appropriate development. Segovia-Zavala *et al.* (1998) reported that during this same study period in the border region, upwelling was a source of cadmium, which was associated with the phytoplankton biomass.

Upwelling is a pulsating event that can last from days to weeks. It has been reported that it does not occur

Bruland y Franks (1983) reportaron que PO_4^{3-} y NO_3^- en el Pacífico Norte y en el Atlántico muestran una alta correlación con el cadmio debido a los procesos de producción y mineralización de la materia orgánica. Por lo tanto, los resultados descritos indican que el sistema costero de la plataforma en la región fronteriza está regido por los fenómenos evidenciados por los análisis multivariados, mismos que muestran la consistencia oceanográfica de los datos.

En la zona costera es difícil distinguir entre los aportes antropogénicos y los aportes naturales únicamente con tener la concentración del nutriente en el agua de mar. Las velocidades de los ciclos internos de los micro nutrientes y metales traza son tan rápidos que es difícil medir el grado con el cual las distribuciones reflejan la influencia antropogénica (Yeast y Brewer 1983). Una alternativa para cuantificar e identificar los aportes relativos del PO_4^{3-} en la zona costera es realizando un balance de masas.

El balance de masas (tabla 2) explicó 95% de las salidas de PO_4^{3-} y el 5% restante ($3.3 \pm 4.45 \text{ t d}^{-1}$) puede ser balanceado por los procesos de remoción biológica por fotosíntesis. Realizando un cálculo de la remoción biológica basado en una producción de la CC de $0.5 \text{ gC m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ (Haury y Shulenberger 1998), y considerando la razón de Redfield que establece la utilización de 1 mol de PO_4^{3-} para producir 106 moles de C orgánico, se llega a estimar una remoción de 2.3 t d^{-1} , misma que representa 70% de la calculada por el balance de masas de entradas y salidas de PO_4^{3-} . Este valor es razonable ya que la producción de la CC es de aguas más oceánicas y nuestro estudio es de una zona costera en presencia del fenómeno de surgencia, misma que se esperaría tuviera una mayor remoción del nutriente. Segovia-Zavala (1994) realizó un balance de masas para el cadmio en esta misma área de estudio y reportó que la remoción biológica de cadmio fue de ~20%. Así, el cadmio y el PO_4^{3-} son removidos de la columna de agua por la actividad fotosintética que ocurre en la postsurgencia. Lo anterior es consistente con la distribución superficial integrada de Chl *a* (fig. 6b) que presentó dos zonas de alta concentración: una localizada en la región norte del área de estudio con valores de hasta 10 mg m^{-3} ; y la otra en la región central frente a Rosarito, con una concentración de Chl *a* de 5 mg m^{-3} . Segovia-Zavala *et al.* (1998) reportaron para este mismo periodo y zona de estudio que el cadmio y el PO_4^{3-} presentaron una correlación significativa entre sí y con las clorofilas, lo que sugiere que están asociados con la producción de biomasa fitoplanctónica y posiblemente son removidos de la columna de agua por la actividad fotosintética.

El desbalance del 5% pone en evidencia la desproporción (1:20) existente entre los vertidos costeros de fosfato ($3.0 \pm 0.1 \text{ t d}^{-1}$), los aportes de surgencia ($41.1 \pm 2.3 \text{ t d}^{-1}$) y advección del norte ($20.9 \pm 2.2 \text{ t d}^{-1}$), debidos a los desplazamientos de agua. El balance puede cerrarse con sólo considerar la remoción de $0.3 \pm 4.5 \text{ t d}^{-1}$ que se calcula de la diferencia de la salida hacia el sur ($61.7 \pm 3.2 \text{ t d}^{-1}$) y las entradas ($62.0 \pm 3.2 \text{ t d}^{-1}$). Sin embargo, es evidente que la incertidumbre asociada con la remoción calculada sobre la base de la diferencia entre

simultáneamente, pero más bien que se propaga a lo largo de la costa con diferentes secuencias de tiempo causadas por cambios en la dirección del viento (Badan-Dangon *et al.* 1985). Basado en esto, es posible sugerir que las características hidrográficas de las partes norte y sur del área de estudio no son similares, y por lo tanto proponemos que un solapamiento ocurre como resultado de las fases de surgencia.

En vista de la consistencia oceanográfica encontrada en el comportamiento de la distribución horizontal y vertical de PO_4^{3-} con las variables previamente descritas y los resultados del análisis multivariado (fig. 7, tabla 1), sugerimos que la distribución de PO_4^{3-} es controlada principalmente por procesos físicos y biológicos, tales como surgencia y fotosíntesis, con una posible influencia incipiente antropogénica. Hemingway (1979) dio una descripción general del ecosistema CC establecido, basado en análisis de factores, que la mayoría de la varianza podría ser explicada por surgencia de nutrientes (36%), mezcla (18%) y producción primaria (7.3%); esto concuerda con los resultados obtenidos aquí. Asimismo, Segovia-Zavala *et al.* (1998) reportó que la distribución del cadmio en esta misma zona de estudio y durante el mismo periodo estuvo asociada con procesos físicos (53%) y biomasa de fitoplancton (25%). Bruland (1980) y Bruland y Franks (1983) observaron que PO_4^{3-} y NO_3^- en el Pacífico Norte y Atlántico están altamente correlacionados con el cadmio debido a la producción y mineralización de materia orgánica. Los resultados indican por lo tanto que el sistema costero en la zona fronteriza es controlado por el fenómeno verificado por los análisis multivariados, los cuales también muestran la consistencia oceanográfica de los datos.

En la zona costera es difícil distinguir entre los aportes antropogénicos y los aportes naturales basados únicamente en las concentraciones de nutrientes en el agua de mar. Las velocidades de los ciclos internos de los micronutrientes y metales traza son tan rápidas que es difícil medir el grado en el cual las distribuciones reflejan la influencia antropogénica (Yeast y Brewer 1983). Una alternativa para cuantificar e identificar los aportes relativos de PO_4^{3-} en la zona costera es realizando un balance de masas.

El balance de masas (tabla 2) explicó 95% de la salida de PO_4^{3-} y el 5% restante ($3.3 \pm 4.45 \text{ t d}^{-1}$) puede ser balanceado por los procesos de remoción biológica por fotosíntesis. El cálculo de la remoción biológica basado en una producción de la CC de $0.5 \text{ gC m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ (Haury y Shulenberger 1998), y considerando la razón de Redfield que establece el uso de 1 mol de PO_4^{3-} para producir 106 moles de carbono orgánico, da como resultado una remoción de 2.3 t d^{-1} , lo que representa el 70% de la calculada por el balance de masas de entradas y salidas de PO_4^{3-} . Este valor es razonable ya que la producción de la CC es de aguas más oceánicas y nuestro estudio es de una zona costera influenciada por el fenómeno de surgencia, donde se esperaría una mayor remoción del nutriente. Segovia-Zavala (1994) realizó un balance de masas para el cadmio en esta misma zona de estudio y reportó una remoción biológica de este elemento de ~20%. Así, el cadmio y el PO_4^{3-} son removidos de la columna de agua por la actividad fotosintética que ocurre en la postsurgencia. Esto es consistente con la distribución superficial integrada de Chl *a* encontrada en la zona de estudio, la cual presentó dos zonas de alta concentración: una localizada en la zona norte del área de estudio con valores de hasta 10 mg m^{-3} ; y la otra en la zona central frente a Rosarito, con una concentración de Chl *a* de 5 mg m^{-3} . Segovia-Zavala *et al.* (1998) reportaron para este mismo periodo y zona de estudio que el cadmio y el PO_4^{3-} presentaron una correlación significativa entre sí y con las clorofilas, lo que sugiere que están asociados con la producción de biomasa fitoplanctónica y posiblemente son removidos de la columna de agua por la actividad fotosintética.

la salida al sur y las entradas es muy elevada ($0.3 \pm 4.5 \text{ t d}^{-1}$) y que también hay vertidos que aumentan la presencia de PO_4^{3-} en la zona costera (fig. 6a, tabla 2). Por lo tanto, es razonable suponer que una remoción biológica de $3.3 \pm 4.5 \text{ t d}^{-1}$ sea más congruente que la de $0.3 \pm 4.5 \text{ t d}^{-1}$, en un régimen de surgencia que no debe estar limitado por los nutrientes.

El resultado obtenido en este estudio que indica que 5% de PO_4^{3-} es aportado por las descargas antropogénicas sugiere que la contribución de PO_4^{3-} de origen antropogénico a la zona de estudio no es importante en la actualidad. No obstante, para apreciar adecuadamente la importancia del PO_4^{3-} antropogénico, el prisma se tiene que reducir hasta 7.63% de sus dimensiones, en las cuales el vertido antropogénico ($3.0 \pm 0.1 \text{ t d}^{-1}$) y los aportes por surgencia ($3.0 \pm 0.2 \text{ t d}^{-1}$) son equiparables. Esta condición se da cuando el prisma tiene las dimensiones de 2.44 km de largo, 1.14 km de ancho y una profundidad de 4.5 m. Asimismo, si se comparan las descargas de PO_4^{3-} con los aportes bajo condiciones normales de surgencias provocadas por los vientos locales (2.8–3.87 m s^{-1} , Dorman y Palmer 1981), es posible calcular que éstas pueden abastecer entre 19 y 30 t d^{-1} de PO_4^{3-} . Igualmente se puede establecer que aun cuando la CC presente su menor velocidad (0.04 m s^{-1} , Lynn y Simpson 1987), el aporte por advección de PO_4^{3-} puede llegar a ser de 10.6 t d^{-1} . Sin embargo, estas cargas naturales por surgencia y advección siguen siendo substancialmente mayores que las descargas antropogénicas ($3.0 \pm 0.1 \text{ t d}^{-1}$) que entran al área de estudio.

El modelo de regresión MRTR pronostica que para los años 2015 y 2030 se aportarían 6.3 y 9.2 $\text{t d}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de PO_4^{3-} , respectivamente (fig. 8). Estos aportes representan 60% y casi 90%, respectivamente, de lo que aporta la CC bajo condiciones de velocidad mínima. Por otro lado, si se considera al modelo de regresión de México (MRTR) con una descarga media de PO_4^{3-} de Point Loma, en San Diego, de 0.43 t d^{-1} , entonces los aportes antropogénicos y los de la CC se igualarían en el año 2035. Si el pronóstico se realiza tomando en cuenta únicamente las descargas de México, entonces la equiparación entre los aportes y los de la CC se logra en 2038. Estas predicciones son relativamente diferentes debido a que los datos que se utilizaron en el modelo que incluye las descargas de Punta Bandera y Rosarito tienen una tendencia constante al aumento (fig. 8), mientras que los de Point Loma tienden a ser relativamente constantes. Es importante señalar que los sistemas de tratamiento en ambos países son muy diferentes en cuanto a su eficiencia y tratamiento. Mientras que los sistemas de tratamiento en Point Loma se han eficientizado a partir de 1994, los de Punta Bandera y Rosarito, en México, han sido rebasados por el aumento en flujos y cargas, lo que ha disminuido su eficiencia. Por lo tanto, de seguir con esta tendencia de no mejorar sustancialmente los sistemas de tratamiento en México, los problemas de eutroficación serán más evidentes en la zona costera de la plataforma continental mexicana. En base al modelo MRTR, se recomendaría entonces reducir los vertidos antropogénicos de Tijuana y Rosarito al mar de tal

(fig. 6b), showing two zones of high concentration: one located in the northern part of the study area, with values of up to 10 mg m^{-3} , and the other in the central part, off Rosarito, with values of 5 mg m^{-3} . For this same study period and area, Segovia-Zavala *et al.* (1998) found a significant correlation between cadmium and PO_4^{3-} and the chlorophylls, indicating that they are associated with phytoplankton biomass production and are possibly removed from the water column by photosynthetic activity.

The 5% unbalance reveals the disproportion (1:20) between the coastal discharges of phosphate ($3.0 \pm 0.1 \text{ t d}^{-1}$), upwelling inputs ($41.1 \pm 2.3 \text{ t d}^{-1}$) and advection from the north ($20.9 \pm 2.2 \text{ t d}^{-1}$) due to water displacement. The balance can be closed just by considering the removal of $0.3 \pm 4.5 \text{ t d}^{-1}$ that is calculated by the difference between the southern output ($61.7 \pm 3.2 \text{ t d}^{-1}$) and the inputs ($62.0 \pm 3.2 \text{ t d}^{-1}$); however, it is evident that the uncertainty associated with the removal calculated based on this difference is high and that there are other discharges that also increase the presence of PO_4^{3-} in the coastal region (fig. 6a, table 2). Consequently, it is reasonable to assume that the biological removal of $3.3 \pm 4.5 \text{ t d}^{-1}$ is more congruent than that of $0.3 \pm 4.5 \text{ t d}^{-1}$ in an upwelling regime that is not nutrient-limited.

The result obtained in this study indicates that the anthropogenic discharge of PO_4^{3-} (5%) into the study area is currently not important. Nevertheless, to fully appreciate the importance of anthropogenic PO_4^{3-} , the dimensions of the prism have to be reduced by 7.63%, so that the anthropogenic and upwelling inputs (3.0 ± 0.1 and $3.0 \pm 0.2 \text{ t d}^{-1}$, respectively) are comparable. This condition is attained when the prism has a length of 2.44 km, a width of 1.14 km and a depth of 4.5 m. If the PO_4^{3-} discharges are compared with those supplied under normal upwelling conditions generated by local winds (2.8–3.87 m s^{-1} , Dorman and Palmer 1981), it is possible to calculate that the latter can contribute between 19 and 30 t d^{-1} of PO_4^{3-} . Moreover, even when the CC speed is lowest (0.04 m s^{-1} , Lynn and Simpson 1987), PO_4^{3-} input by advection can be 10.6 t d^{-1} . These natural inputs due to upwelling and advection, however, continue to be substantially greater than the anthropogenic discharges ($3.0 \pm 0.1 \text{ t d}^{-1}$) into the study area.

The Tijuana/Rosarito regression model (RMTR) predicts that by the years 2015 and 2030, the contribution of PO_4^{3-} will be 6.3 and 9.2 $\text{t d}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, respectively (fig. 8). These inputs represent 60% and almost 90%, respectively, of the amount supplied by the CC under minimum velocity conditions. On the other hand, if this regression model is considered with a mean PO_4^{3-} discharge from Point Loma (San Diego, California) of 0.43 t d^{-1} , then the anthropogenic and CC inputs will be comparable in 2035. If the prediction is made taking into account only the Mexican discharges, then the balance will be achieved in 2038. These predictions are relatively different because the data used for the Tijuana/Rosarito model show an increasing trend (fig. 8), whereas those from Point Loma tend

manera que se asemejaran más al modelo del funcionamiento de la planta de Point Loma (MRPL). Si el promedio anual porcentual de reducción de carga del modelo de Point Loma es aplicado a las cargas medias anuales de 1990 a 2005 de la plantas de Punta Bandera y Rosarito, se pronostica que para 2012 los vertidos de PO_4^{3-} serían menores o equivalentes a los de Point Loma (0.043 t d^{-1}). Asimismo, los enriquecimientos antropogénicos en la zona costera de la plataforma continental mexicana serían insignificantes y la única fuente de fertilización importante sería la natural ocasionada por los fenómenos de surgencia.

Agradecimientos

Este estudio fue realizado gracias al financiamiento del CONACYT con el número de código 88-01-79.

Referencias

- Álvarez-Borrego J, Álvarez-Borrego S. 1982. Temporal and spatial variability of temperature in two coastal lagoons. *CalCOFI Rep.* XXIII: 188–198.
- Badan-Dangon A, Koblinzky CJ, Baumgartner T. 1985. Spring and summer in the Gulf of California: Observations of surface thermal patterns. *Oceanol. Acta* 8: 13–22.
- Barber RT, Ryther JH. 1969. Organic chelators: Factors affecting primary production in the Cromwell upwelling. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 3: 191–199.
- Barber RT, Smith RL. 1981. Coastal upwelling ecosystems. In: Longhurst A (ed). *Analysis of Marine Ecosystems*. Academic Press, New York, pp. 31–68.
- Barton ED, Argote ML. 1980. Hydrographic variability in an upwelling area off northern Baja California in June 1976. *J. Mar. Res.* 38: 631–649.
- Bevington PR. 1969. *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences*. McGraw-Hill, New York, 336 pp.
- Bruland KW. 1980. Oceanography distribution of cadmium, nickel and copper in the North Pacific. *Earth Planet. Sci. Lett.* 47: 176–198.
- Bruland KW, Franks RP. 1983. Mn, Ni, Cu, Zn and Cd in the western North Atlantic. In: Wong CS, Boyle E, Bruland K, Burton JD, Golberg ED (eds.), *Trace Metals in Sea Water*. Plenum Press, New York, pp. 395–414.
- Cardona-Canizales C, Millán-Núñez R, Lara-Lara JR, Valdez-Holguín JE. 1990. Variabilidad espaciotemporal de la clorofila *a* en una zona de surgencia frente a Baja California. *Cienc. Mar.* 16: 31–46.
- Carlucci AF, Eppley RW, Beers JR. 1986. Introduction to the Southern California Bight. In: Eppley RW (ed.), *Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies: Plankton Dynamics of the Southern California Bight*. Springer-Verlag, New York, pp. 1–12.
- Dailey MD, Reish DJ, Anderson JW. (eds). 1993. *Ecology of the Southern California Bight. A Synthesis and Interpretation*. Univ. California Press, Berkeley, 926 pp.
- Dorman EC, Palmer DP. 1981. Southern California summer coastal upwelling. In: Richards PH (ed.), *Coastal Upwelling*. American Geophysical Union, Washington DC, pp. 49–55.
- Durazo R, Gaxiola-Castro G, Lavaniegas B, Castro-Valdez R, Gómez-Valdéz J, Mascarenhas A. 2005. Condiciones oceanográficas frente a la costa occidental de Baja California, 2002–2003: Influencia de un El Niño débil y del incremento de agua subártica. *Cienc. Mar.* 31: 537–552.
- to be relatively constant. It is important to indicate that the wastewater systems of both countries are very different in terms of efficiency and treatment. While the Point Loma treatment plant was improved in 1994, the capability of the Punta Bandera (Tijuana) and Rosarito facilities has diminished due to the increase in the amount of wastewater. Thus, if substantial improvements are not made to the Mexican treatment facilities, the problems of eutrophication will become more apparent in the coastal region of the continental shelf. Based on the RMTR, a reduction in the anthropogenic discharges from Tijuana and Rosarito would be recommendable in order to be similar to those from Point Loma (RMPL). If the mean annual percent load reduction of the Point Loma model is applied to the 1990–2005 mean annual loads of the Punta Bandera and Rosarito plants, by the year 2012 the PO_4^{3-} discharges would be lower or equivalent to those of Point Loma (0.043 t d^{-1}). The anthropogenic input to the coastal area of the Mexican continental shelf would be insignificant and the only important source of fertilization would be the natural process of upwelling.

Acknowledgements

This study was funded by the Mexican Council of Science and Technology (CONACYT grant No. 88-01-79).

English translation by Christine Harris.

- Eppley RW (ed.). 1986. *Plankton Dynamics of the Southern California Bight*. Springer-Verlag, Germany, 373 pp.
- Espinosa-Carreón TL, Gaxiola-Castro G, Robles-Pacheco JM, Nájera-Martínez S. 2001. Temperatura, salinidad, nutrientes y clorofila *a* en aguas costeras de la ensenada del sur de California. *Cienc. Mar.* 27: 397–422.
- Gerlach SA. 1981. *Marine Pollution (Diagnosis and Therapy)*. Springer-Verlag, 218 pp.
- Gómez-Valdez J. 1983. Estructura hidrográfica promedio frente a Baja California. *Cienc. Mar.* 9: 75–86.
- González-Morales AT, Gaxiola-Castro G. 1991. Variación día a día de las características fisicoquímicas, biomasa y productividad primaria del fitoplancton en una zona de surgencia costera de Baja California. *Cienc. Mar.* 17(3): 21–37.
- Gutiérrez-Galindo EA, Flores-Muñoz G, Ortega-Lara V, Villaescusa-Celaya JA. 1994. Metales pesados en sedimentos de la costa fronteriza de Baja California (México)-California (EUA). *Cienc. Mar.* 20: 105–124.
- Haury L, Shulenberger E. 1982. Horizontal transport of phosphorus in the California Current. *CalCofi Rep.* XXII: 149–159.
- Haury L, Shulenberger E. 1998. Surface nutrient enrichment in the California Current off Southern California: Description and possible causes. *Deep-Sea Res.* II 45: 1577–1601.
- Hemingway G. 1979. A description of the California Current ecosystem by factor analysis. *CalCOFI Rep.* XX: 164–177.
- Hendricks TJ. 1976. Measurements of subthermocline currents. Annual Report, 1976. Coastal Waters Research Project, El Segundo, California, pp. 63–70.
- Hendricks TJ. 1977. Coastal currents. In: Annual Report, 1977. Southern California Coastal Waters Research Project, El Segundo, California, pp. 53–62.

- Holm-Hansen O, Lorenzen CJ, Holmes RW, Strickland JDH. 1965. Fluorometric determination of chlorophyll. *J. Cons. Perm. Int. Explor. Mer.* 30: 3–15.
- Jerónimo G, Gómez-Valdez J. 2006. Promedios de temperatura y salinidad sobre una superficie isopícnica en la capa superior del océano frente a Baja California. *Cienc. Mar.* 32: 663–671.
- Johnston R. 1976. *Marine Pollution*. Academic Press, 729 pp.
- Metcalf y Eddy Inc. 1994. *Ingeniería Sanitaria: Tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales*. #a. edición. Editorial Labor, S.A. Colombia, 969 pp.
- Lynn RJ, Simpson JJ. 1987. The California Current System: The seasonal variability of its physical characteristics. *J. Geophys. Res.* 92: 12947–12966.
- Neumann G, Pierson WJ. 1966. *Principles of Physical Oceanography*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 545 pp.
- NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration. 1980. A climatology and oceanographic analysis of the California Pacific outer continental shelf region. US Department of Commerce. National Technical Information Service, Washington DC, 8: 1–15.
- Parsons TR, Maita Y, Lalli CM. 1984. *A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis*. Pergamon Press, Oxford, 173 pp.
- Petersen JH, Jahan AE, Lavenberg RJ, Grove RS. 1986. Physical chemical characteristics and zooplankton biomass on the continental shelf off southern California. *CalCOFI Rep.* 27: 36–50.
- Pond S, Pickard H. 1978. *Introductory Dynamic Oceanography*. Pergamon Press, Oxford, 241 pp.
- Popham DF, D'Auria JM. 1983. Statistical approach for deciding on mussels (*Mytilus edulis*) that have been collected from a water body polluted with trace metals. *Environ. Sci. Technol.* 17: 576–582.
- Reid JL. 1973. The shallow salinity minimum of the Pacific Ocean. *Deep-Sea Res.* 20: 51–68.
- Reid VL, Roden GL, Wyllie JG. 1958. Studies of the California Current System. *Calcofi. Rep.* 1 July 1956–1 January 1958, pp. 29–57.
- Roemmich D. 1989. Mean transport of mass, heat, salt and nutrients in southern California coastal waters: Implications for primary production and nutrient cycling. *Deep-Sea Res.* 36: 1359–1378.
- Sañudo-Wilhelmy SA, Flegal AR. 1991. Trace element distributions in coastal waters along the US-Mexican boundary: Relative contributions of natural processes vs anthropogenic inputs. *Mar. Chem.* 33: 371–392.
- Sañudo-Wilhelmy SA, Flegal AR. 1992. Anthropogenic silver in the Southern California Bight: A new tracer of sewage in coastal waters. *Environ. Sci. Technol.* 26: 2147–2151.
- Sañudo-Wilhelmy SA, Flegal AR. 1996. Trace metal concentrations in the surf zone and in coastal waters off Baja California, Mexico. *Environ. Sci. Technol.* 30: 1575–1580.
- Segovia-Zavala JA. 1994. Variación de cadmio en zonas de surgencias de la costa noroccidental de Baja California. Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, México, 49 pp.
- Segovia-Zavala JA, Delgadillo-Hinojosa F, Orozco-Borbón MV, Muñoz-Barbosa A, Canino-Herrera SR. 1995. Distribución de DBO y bacterias en la costa fronteriza México-EUA. *Cienc. Mar.* 21: 415–426.
- Segovia-Zavala JA, Delgadillo-Hinojosa F, Álvarez-Borrego S. 1998. Cadmium in the coastal upwelling area adjacent to the California-Mexico border. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 46: 475–481.
- Segovia-Zavala JA, Delgadillo-Hinojosa F, Vidal-Talamantes R, Muñoz-Barbosa A, Gutiérrez-Galindo EA. 2003. *Mytilus californianus* transplantados como bioindicadores de surgencia a dos zonas en Baja California, México. *Cienc. Mar.* 24: 665–675.
- Segovia-Zavala JA, Delgadillo-Hinojosa F, Muñoz-Barbosa A, Gutiérrez-Galindo EA, Vidal-Talamantes R. 2004. Cadmium and silver in *Mytilus californianus* transplanted to an anthropogenic influenced and coastal upwelling area in the Mexican northeastern Pacific. *Mar. Pollut. Bull.* 48: 458–464.
- Sverdrup HU, Johnson MW, Fleming RH. 1942. *The Oceans: Their Physics, Chemistry and General Biology*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1087 pp.
- Takano K. 1955. Note on the convective circulation. *Rec. Oceanogr. Works Japan* 2: 9–20.
- Takesue RK, Van Geen A, Carriquiry JD, Ortiz E, Godínez L. 2004. Influence of coastal upwelling and El Niño-Southern Oscillation on nearshore water along Baja California and Chile: Shore-based monitoring during 1997–2000. *J. Geophys. Res.* 109, CO 3009, doi: 10.2929/2003JC001856.
- Tsuchiya M. 1976. California Undercurrent in the Southern California Bight. *CalCOFI Rep.* 18: 155–158.
- Yeast PA, Brewer JM. 1983. Potential anthropogenic influences on trace metal distribution in the North Atlantic. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 40: 124–131.

Recibido en septiembre de 2006;
aceptado en abril de 2007