

Influence of the geostrophic transport of phosphates on primary production off Baja California (Mexico)

Aporte del transporte geostrofico de fosfatos a la producción primaria frente a Baja California

MD Martínez-Gaxiola^{1*}, R Durazo², G Gaxiola-Castro³

¹ Centro de Estudios Tecnológicos del Mar No. 6, Coral No. 2, Col. Centro, La Cruz de Huanacastle, CP 63734, Nayarit, México. *E-mail: martinezgax@gmail.com

² Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, Km 107 Carretera Tijuana-Ensenada, Ensenada, CP 22860, Baja California, México.

³ Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, División de Oceanología, Carretera Ensenada-Tijuana No. 3918, Fracc. Zona Playitas, Ensenada, CP 22860, Baja California, México.

ABSTRACT. We estimated the net flux of inorganic phosphorus (kg P d^{-1}) due to geostrophic transport in the upper 100 m of a control volume (CV) off Baja California (Mexico) during 2003 and 2004. The influence of this flux on integrated primary production (IPP) in the photic zone (<100 m depth) was estimated comparing the net P flux into the CV against the P requirements for IPP. The greatest P fluxes occurred during spring and summer 2004; the northern side of the CV was the main recipient of P. The most persistent P outflow occurred along the southern side of the CV, except in winter 2003, when there was an input of P fluxes related to cyclonic and anticyclonic eddies off Ensenada. The net geostrophic transport during 2003 and 2004 contributed enough P to support the IPP requirements during winter and spring, indicating that P was not limiting for phytoplankton organic carbon production during these seasons.

Key words: phosphorus, geostrophic transport, primary production, Baja California, California Current.

RESUMEN. Se calculó el flujo de fósforo inorgánico (kg P d^{-1}) debido al transporte geostrofico en los primeros 100 m de profundidad de una caja de estudio (CE) frente a Baja California durante 2003 y 2004, y su influencia en la producción primaria a partir de la relación entre los aportes de fósforo (P) por geostrofia y los requerimientos de P para la producción primaria integrada (PPI) estimada en la zona eufótica (<100 m de profundidad). Los flujos mayores de P se presentaron en primavera y verano de 2004, con los aportes más altos por la frontera norte de la CE. El flujo de salida de P más persistente se obtuvo por la frontera sur de la CE, a excepción del invierno de 2003 cuando hubo un ingreso relacionado con la presencia de remolinos ciclónicos y anticiclónicos frente a Ensenada. Durante invierno y primavera de 2003 y 2004 el flujo geostrofico aportó en forma neta el P necesario para cubrir los requerimientos de este nutriente en la PPI, por lo que en estos periodos el P no fue limitante para la síntesis de carbono orgánico por el fitoplancton.

Palabras clave: fósforo, transporte geostrofico, producción primaria, Baja California, Corriente de California.

INTRODUCTION

The fertility of the California Current (CC) is mainly attributable to the nutrients supplied by coastal upwelling and to their equatorward geostrophic transport from the subarctic region (Haury and Shulenberger 1982, Largier *et al.* 2006). One of these nutrients, phosphorus (P), plays an essential role in the synthesis of organic carbon by primary producers in the ocean, and estimating its input and output rates in a certain area provides important information for a better understanding of the carbon cycle and the possible impact of a portion of the ocean on the exchange of carbon dioxide (a greenhouse gas) between the atmosphere and ocean.

Only a few studies have considered the degree of influence exerted by geostrophic transport on primary production rates in the region off Baja California (Mexico). Haury and Shulenberger (1982) estimated the horizontal transport of phosphates in coastal waters from Monterey Bay, California (36°N), to Punta Baja, Baja California (29°N), and discussed

INTRODUCCIÓN

La fertilidad de la Corriente de California (CC) se debe principalmente al aporte de nutrientes por las surgencias costeras, y al transporte geostrofico de nutrientes hacia el ecuador desde la región subártica (Haury y Shulenberger 1982, Largier *et al.* 2006). Entre estos nutrientes, el fósforo (P) tiene un papel esencial en la síntesis de carbono orgánico por parte de los productores primarios en el océano, por lo que la estimación de las tasas de consumo y aporte de P en un área determinada provee importante información para el entendimiento del ciclo del carbono y del posible impacto de una porción del océano en la dinámica del dióxido de carbono (gas de invernadero) en su intercambio con la atmósfera adyacente.

Sin embargo, son pocos los estudios que orientados a establecer el grado de influencia que tiene el transporte geostrofico en las tasas de producción primaria de la región frente a Baja California. Haury y Shulenberger (1982) estimaron el

the possible causes of variations in phosphate fluxes due to Ekman and geostrophic transports but did not address the impact of this variability on primary production. Roemmich (1989) and Bograd *et al.* (2001) estimated primary production rates off the coast of San Diego to Point Conception, California, and discussed their temporal variability considering the balance of inorganic nitrogen and phosphorus fluxes by Ekman drift and geostrophic transport. Their calculations were based on nutrient flux balances in the upper 500 m.

The approximations regarding the influence of nutrient transport on primary production rates should be broadened as more information is generated in other areas of the CC. The coastal region off Baja California forms part of the southern transition zone of the California Current System (CCS), where temperate water masses of subarctic origin and Pacific Ocean subtropical warm water converge (Roden 1971, McGowan *et al.* 1996, Durazo and Baumgartner 2002), intensifying the temporal and spatial variability of physical, chemical, and biological properties (Hayward *et al.* 1999, Bograd *et al.* 2000, Lavaniegos *et al.* 2002).

The Mexican California Current research program (IMECOCAL, <http://imecocal.cicese.mx>) has been conducting quarterly surveys of the region off Baja California since 1997 using the California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations (CalCOFI) station grid. The magnitude and variability of the primary production rates and of associated physical processes have been discussed, inferring the influence that inorganic nutrient input should exert on the synthesis of organic carbon and the region's trophic chain (Kahru and Mitchel 2002, Aguirre-Hernández *et al.* 2004). Nevertheless, the degree of influence exerted by mechanisms for the horizontal transport of nutrients on primary productivity in the southern part of the CC has yet to be determined. This study aimed to estimate the magnitude of inorganic P flux due to geostrophic transport in an area off Baja California during 2003 and 2004, and its possible influence on the regional primary productivity.

METHODS

The study was conducted off the coast of Baja California, in the southern region of the CC, occupying the IMECOCAL stations. A control volume (CV) was defined, delimited to the north by the stations from line 100 (face A), to the west by the 60s stations (face B), to the south by line 123 (face C), and to the east by the 40s stations (face D), with a total area of 73.7×10^3 km² (fig. 1). Samples of dissolved inorganic nutrients were collected at 0, 10, 20, 50, 100, 150, and 200 m depth during cruises conducted in winter, spring, summer, and autumn of 2003 and 2004. Dissolved inorganic P (orthophosphate PO₄⁻³) in the samples was determined using a Skalar autoanalyzer and a colorimetric method, based on the formation of colored complexes (Eaton *et al.* 2005), with an analytical accuracy of 99.9% (*r*² calibration curves) and a mean error among subreplicas below 5% within the range of

transporte horizontal de fosfatos frente a la región costera de la CC desde el sur de la Bahía de Monterey, California (36°N), hasta Punta Baja, Baja California (29°N). Estos autores discutieron las posibles causas de la variabilidad de los flujos de fosfatos debidas al transporte de Ekman y a geostrofia, sin hacer ninguna inferencia acerca del impacto de ésta variabilidad en la producción primaria. Roemmich (1989) y Bograd *et al.* (2001) estimaron las tasas de producción primaria frente a las costas de San Diego a Punta Concepción, California, y discutieron su variabilidad temporal a partir del balance de los flujos de nitrógeno y fósforo inorgánicos producto del transporte geostrofico y la deriva de Ekman. Sus cálculos se basaron en balances de flujos de nutrientes estimados hasta una profundidad de 500 m.

Estas aproximaciones a la influencia del transporte de nutrientes en las tasas de producción primaria deben extenderse conforme se genera mayor información en el resto de las zonas que conforman la CC. La región de Baja California forma parte de la zona de transición sureña del Sistema de la Corriente de California (SCC), donde convergen masas de agua templadas de origen subártico y agua cálida de origen subtropical del Océano Pacífico (Roden 1971, McGowan *et al.* 1996, Durazo and Baumgartner 2002) lo cual intensifica la variabilidad de las propiedades físicas, químicas y biológicas en escalas temporales y espaciales (Hayward *et al.* 1999, Bograd *et al.* 2000, Lavaniegos *et al.* 2002).

El programa IMECOCAL (Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California; <http://imecocal.cicese.mx>) ha estudiado la región frente a Baja California desde 1997 con el plan de estaciones que se manejaba en el programa CalCOFI (California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations), con una cobertura trimestral. En este marco se ha descrito la magnitud y variabilidad de las tasas de producción primaria y de procesos físicos asociados, con inferencias acerca de la influencia que debe ejercer el aporte de nutrientes inorgánicos en la síntesis de carbono orgánico y en la red trófica de la región (Kahru y Mitchel 2002, Aguirre-Hernández *et al.* 2004). Sin embargo, aún no se ha determinado el grado de influencia que tienen los mecanismos de transporte horizontal de nutrientes en la productividad primaria regional del sur de la CC. El propósito de este trabajo es calcular la magnitud del flujo de fósforo inorgánico (P) debido al transporte geostrofico en una zona frente a Baja California durante 2003–2004 y su posible influencia en la producción primaria de la región.

MÉTODOS

La zona de estudio se localizó en la región sur de la CC frente a las costas de Baja California en las estaciones visitadas por el programa IMECOCAL. Con base en estas localidades se definió una caja de estudio (CE) delimitada al norte por las estaciones de la línea 100 (lado A), al oeste por las estaciones 60 (lado B), al sur por las de la línea 123 (lado C) y al este por las estaciones 40 (lado D), con un área total de

concentrations measured. Geostrophic velocity (m s^{-1}) was calculated in the upper 200-m layer based on salinity and temperature data collected by casts made with a SeaBird 911-Plus CTD at the stations corresponding to the perimeter of the CV, with 500 m depth as the reference level. The following equation was used to determine the geostrophic velocity (V_g):

$$V_g = \frac{dp}{dx}(f\rho)^{-1}$$

where f is the Coriolis parameter, ρ is the density, and dp/dx is the horizontal pressure gradient.

For each cruise and along the perimeter of the CV, data grids were generated for P and V_g with a vertical resolution of 1 m and a horizontal resolution of 1 km, using linear interpolation. The product of P concentration (kg P m^{-3}) by V_g (m d^{-1}) at each cell grid resulted in point values of P flux (F_p) in the upper 200 m ($\text{kg P m}^{-2} \text{h}^{-1}$). These values were integrated from the surface to 100 m depth to yield the F_p ($\text{kg P m}^{-1} \text{d}^{-1}$) in the euphotic zone along the CV perimeter. Finally, a second integration over the CV perimeter, starting and ending at station 100.40, produced the net balances of F_p (kg P d^{-1}) into and out of the CV. This estimation process

$73.7 \times 10^3 \text{ km}^2$ (fig. 1). Durante 2003 y 2004 se realizaron cruceros en invierno, primavera, verano y otoño en los que se recolectaron muestras para el análisis de nutrientes inorgánicos disueltos hasta 200 m de profundidad (0, 10, 20, 50, 100, 150 y 200 m). De estas muestras se analizó el fosfato inorgánico disuelto (ortofosfato PO_4^{-3}) con un autoanalizador Skalar bajo el principio de formación de complejos coloreados medidos por colorimetría (Eaton *et al.* 2005), con una precisión analítica de 99.9% (r^2 de curvas de calibración) y con un error medio entre subréplicas menor al 5% dentro del intervalo de las concentraciones medidas. La velocidad geostrofica (V_g ; m s^{-1}) se calculó para los primeros 200 m de profundidad a partir de los datos de salinidad y temperatura recolectados de lances con un CTD Seabird-911Plus en las estaciones correspondientes al perímetro de la CE, con la profundidad de 500 m como el nivel de referencia. Para determinar la velocidad geostrofica se utilizó la ecuación:

$$V_g = \frac{dp}{dx}(f\rho)^{-1}$$

donde f es el parámetro de Coriolis, ρ es la densidad y dp/dx es el gradiente horizontal de presión.

Para cada crucero y a lo largo de las caras de la CE, se generaron mallas de datos para fósforo (P) y V_g con resolución vertical de 1 m y de 1 km en la horizontal, utilizando interpolación lineal. El producto de la concentración de P (kg P m^{-3}) por V_g (m d^{-1}) en cada punto de esta malla de datos resultaron en valores puntuales de los flujos de fósforo (F_p) en los primeros 200 m de profundidad ($\text{kg P m}^{-2} \text{h}^{-1}$). Estos valores se integraron desde la superficie hasta los 100 m de profundidad para obtener los flujos de P ($\text{kg P m}^{-1} \text{d}^{-1}$) en la zona eufótica a lo largo del perímetro de la CE; por último, se realizó una segunda integración a lo largo de las cuatro caras de la CE, iniciando y finalizando en la estación 100.40, para obtener los balances netos de F_p (kg P d^{-1}) hacia o desde el interior de la CE. Este proceso de cálculo se puede representar como la integral de área de P multiplicada por V_g , es decir:

$$F_p = \int_{100.40}^{100.40} \int_{100}^0 PV_g dA$$

En este trabajo, las magnitudes de F_p se consideran positivas (negativas) cuando el balance neto implicó un ingreso (egreso) de P hacia (desde) la CE.

La media de la producción primaria integrada en la zona eufótica de la CE (PPI; $\text{mg C m}^{-2} \text{d}^{-1}$) para los cruceros de 2003 y 2004 se estimó a partir de las ecuaciones del modelo de Behrenfeld y Falkowski (1997), parametrizando la profundidad de la zona eufótica en función de la clorofila superficial (Morel y Maritorena 2001). Los datos para alimentar este modelo (temperatura superficial del mar, radiación fotosintéticamente disponible, clorofila superficial) se tomaron de imágenes diarias de los sensores satelitales

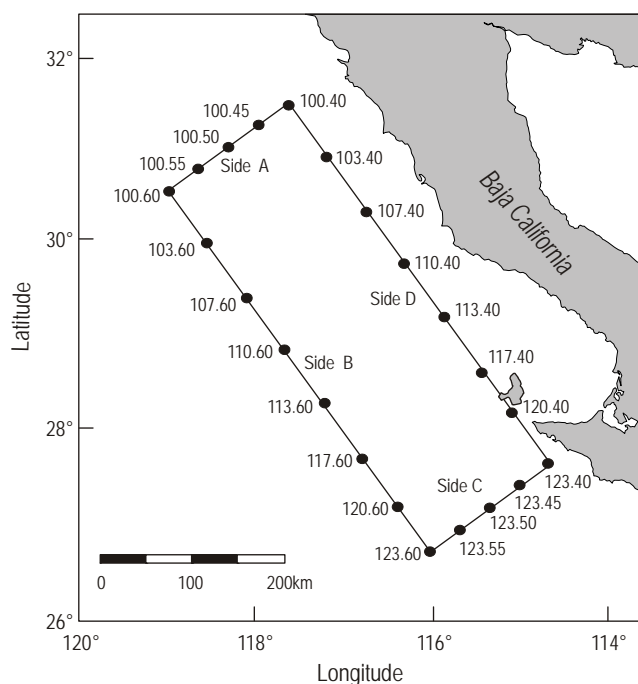


Figure 1. IMECOCAL stations delimiting the control volume used to estimate geostrophic phosphorus fluxes and integrated primary production.

Figura 1. Estaciones del plan de cruceros del programa IMECOCAL que delimitan la caja de estudio donde se realizó el balance de flujos de fósforo por geostrofia y las estimaciones de PPI.

can be represented as the integral of the P area multiplied by V_g , as follows:

$$F_p = \int_{100.40}^{100.40} \int_{100}^0 P V_g dA$$

In this study, F_p magnitudes were considered positive (negative) when the net balance indicated P input (output) to (from) the CV.

Mean integrated primary production (IPP, mg C m⁻² d⁻¹) in the euphotic zone of the CV for the 2003 and 2004 cruises was estimated using equations from the model proposed by Behrenfeld and Falkowski (1997), parameterizing euphotic zone depth in terms of surface chlorophyll (Morel and Maritorena 2001). The data used for the model (sea surface temperature, photosynthetically available radiation, and surface chlorophyll) were taken from daily SeaWiFS and MODIS-Aqua satellite images (9-km spatial resolution) provided by NASA (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/ftp.html>). Compositions (mean data) of 20 and 23 days were made for each variable, depending on the length of each cruise. The satellite data were processed using Windows Image Manager software (www.wimsoft.com). The amount of inorganic P required to sustain IPP (R_p ; kg P d⁻¹) within the CV area was estimated as follows:

$$R_p = IPP \times 1.793 \times 10^3$$

where the factor 1.793×10^3 is the product of the conversion of milligrams to moles of carbon (mg C to mol C), the Redfield carbon:phosphorus ratio (C:P = 106:1), the conversion of moles to kilograms of P (mol P to kg P), and the area surveyed (m²).

RESULTS

Positive and negative values of P fluxes (F_p), determined by the product of P and V_g along each CV face, were established by the V_g sign in the upper 200 m of the water column (positive towards the interior of the CV). The F_p direction (figs. 2, 3) corresponded to the surface geostrophic circulation patterns described and analyzed for the IMECOCAL region (Venrick *et al.* 2003, Goericke *et al.* 2004).

The vertical F_p profiles (0–200 m depth) corresponding to the April (0404) and October (0410) 2004 cruises are shown to illustrate the spatial variability (fig. 2). These vertical structures clearly show the complexity of the geostrophic volume flux, the F_p direction alternating along each of the four CV faces as well as in the upper 200 m (fig. 2). The highest F_p magnitudes occurred in April, along faces C and D, due to a combination of greater nutrient availability and enhanced intensity of the CC in spring (Goericke *et al.* 2004).

The F_p integrated for the upper 100 m of the water column per sampling station showed that P input occurred

SeaWiFS y Aqua-MODIS con una resolución espacial de 9 km, proporcionadas por el centro de distribución de datos de la NASA (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/ftp.html>). Se realizaron composiciones (promedio de datos) de 20 a 23 días para cada variable, relacionados con la duración de cada crucero. Los datos satelitales se procesaron con el software Windows Image Manager (www.wimsoft.com). Se calculó la cantidad de fósforo inorgánico requerido para sustentar la PPI (R_p ; kg P d⁻¹) dentro del área de la CE a partir de la siguiente relación:

$$R_p = PPI \times 1.793 \times 10^3$$

donde el factor 1.793×10^3 es el producto de la conversión de miligramos de carbono a moles de carbono (mg C a mol C), la razón de Redfield carbono:fósforo (C:P = 106:1), el factor de conversión de moles de fósforo a kilogramo de fósforo (mol P a kg P) y el área de estudio en metros cuadrados (m²).

RESULTADOS

Los signos de los valores de F_p , determinados por el producto de P y V_g en cada una de las fronteras de la CE, se establecieron por el sentido de V_g en los primeros 200 m de la columna de agua (positivos hacia el interior de la CE). El sentido de F_p (figs. 2, 3) correspondió con los patrones de circulación geostrofica superficial descritos y analizados para la región de IMECOCAL en los años de estudio (Venrick *et al.* 2003, Goericke *et al.* 2004).

En el presente trabajo se muestran los perfiles verticales de F_p , de 0 a 200 m de profundidad, para los cruceros de abril (0404) y octubre (0410) del año de 2004 con la finalidad de ilustrar su variabilidad espacial (fig. 2). En estas estructuras verticales se hizo evidente la complejidad del flujo de volumen por geostrofia, presentándose en cada uno de los cuatro lados de la CE alternancia en los sentidos de F_p , tanto a lo largo de cada cara como en los primeros 200 m de profundidad (fig. 2). Las mayores magnitudes de F_p se presentaron en abril, en los lados C y D de la CE, debido a la combinación de mayor disponibilidad de nutrientes en la columna de agua y a la mayor intensidad de la CC durante la primavera (Goericke *et al.* 2004).

Los F_p integrados en los primeros 100 m de la columna de agua por estación de muestreo manifestaron el predominio de los ingresos de P por la frontera norte de la CE (lado A), en la mayoría de los ocho cruceros estudiados (figs. 2, 3). La excepción fue octubre de 2003 cuando el mayor F_p en la frontera norte fue hacia el exterior de la CE (fig. 3d), debido a la presencia de un remolino ciclónico frente a Ensenada que alteró el flujo principal de la CC (Goericke *et al.* 2004). En la frontera sur de la CE (lado C) predominó F_p hacia fuera de la CE, a excepción del crucero de invierno de 2003 en el que el lado C presentó un predominio de F_p hacia el norte (fig. 3a),

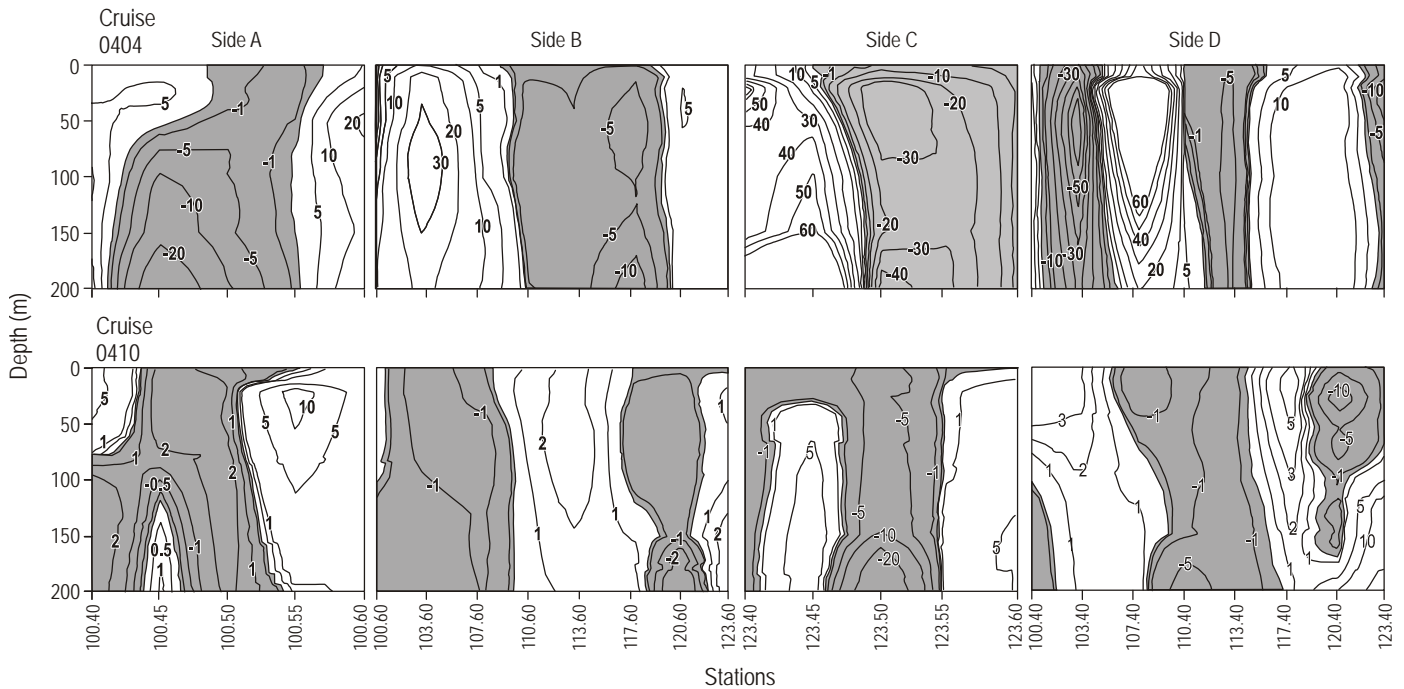


Figure 2. Geostrophic phosphorus flux ($10^{-3} \text{ kg P m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) for each face (sides A–D) of the control volume (CV) during the April (0404) and October (0410) 2004 cruises. Distances among sampling stations (x axis) and among depths (y axis) are not to scale. The separation between sides A and C (B and D) is approximately 37 km (74 km). The light (dark) areas and positive (negative) isolines represent fluxes towards the interior (exterior) of the CV.

Figura 2. Flujo de fósforo por geostrofia ($10^{-3} \text{ kg P m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) en cada una de las caras (lados A–D) de la caja de estudio (CE) correspondientes a los cruceros de abril (0404) y octubre (0410) de 2004. Las distancias entre estaciones de muestreo (eje x) y entre profundidades (eje y) no se presentan a escala. La separación entre estaciones de los lados A y C (B y D) es de aproximadamente 37 km (74 km). Las áreas claras (oscuras) e isólineas positivas (negativas) representan flujos hacia el interior (exterior) de la CE.

predominantly through the northern side of the CV (face A) in most of the surveys (figs. 2, 3), except in October 2003, when P output was greater on this side (fig. 3d) due to the presence of a cyclonic eddy off Ensenada that altered the main flow of the CC (Goericke *et al.* 2004). Greater P outflow occurred on the southern side of the CV (face C), except in winter 2003, when F_p was predominantly northwards along this face (fig. 3a) due to the combined presence of an anticyclonic eddy close to shore and a cyclonic eddy far from shore; these structures are evident in the dynamic heights (0/500 m) reported for this cruise along IMECOCAL line 123 (Venrick *et al.* 2003). The F_p on the western (face B) and eastern (face D) sides of the CV showed the meanders formed by the CCS off Baja California (Venrick *et al.* 2003; Goericke *et al.* 2004); on these two sides the greatest fluxes occurred in spring and summer 2004 (figs. 2, 3f, 3g), with larger magnitudes along face D because of its proximity to the upwelling areas off the coast of Baja California (Durazo and Baumgartner 2002, Venrick *et al.* 2003, Goericke *et al.* 2004).

During 2003, the net P inputs to the CV by geostrophic fluxes were estimated to be 12×10^5 and $57.8 \times 10^5 \text{ kg P d}^{-1}$ in winter and spring, and the net P outputs were 26.9×10^5

debido a la combinación de un remolino anticiclónico cercano a la costa y un remolino ciclónico lejos de la costa, estructuras evidentes en las alturas dinámicas (0/500 m) reportadas para ese crucero en la línea 123 del programa IMECOCAL (Venrick *et al.* 2003). Los F_p en las fronteras este (lado D) y oeste (lado B) de la CE mostraron en general los meandros formados por el SCC en su travesía frente a Baja California (Venrick *et al.* 2003; Goericke *et al.* 2004). En estas dos fronteras de la CE se presentaron los flujos mayores de P en primavera y verano de 2004 (figs. 2, 3f y 3g), con las magnitudes mayores de F_p en el lado D por su cercanía a las zonas de surgencia de la costa de Baja California (Durazo y Baumgartner 2002, Venrick *et al.* 2003, Goericke *et al.* 2004).

Durante 2003 se obtuvieron ingresos netos de P por flujos geostrofos entre 12×10^5 y $57.8 \times 10^5 \text{ kg P d}^{-1}$ en los periodos correspondientes a invierno y primavera, y egresos netos de 26.9×10^5 y $44.3 \times 10^5 \text{ kg P d}^{-1}$ para verano y otoño, respectivamente (tabla 1). En 2004 sólo se obtuvo un egreso neto de P en la CE ($47.3 \times 10^5 \text{ kg P d}^{-1}$) durante el verano mientras que para invierno, primavera y otoño se obtuvieron ingresos netos de P entre 1.7×10^5 y $68.9 \times 10^5 \text{ kg P d}^{-1}$ (tabla 1).

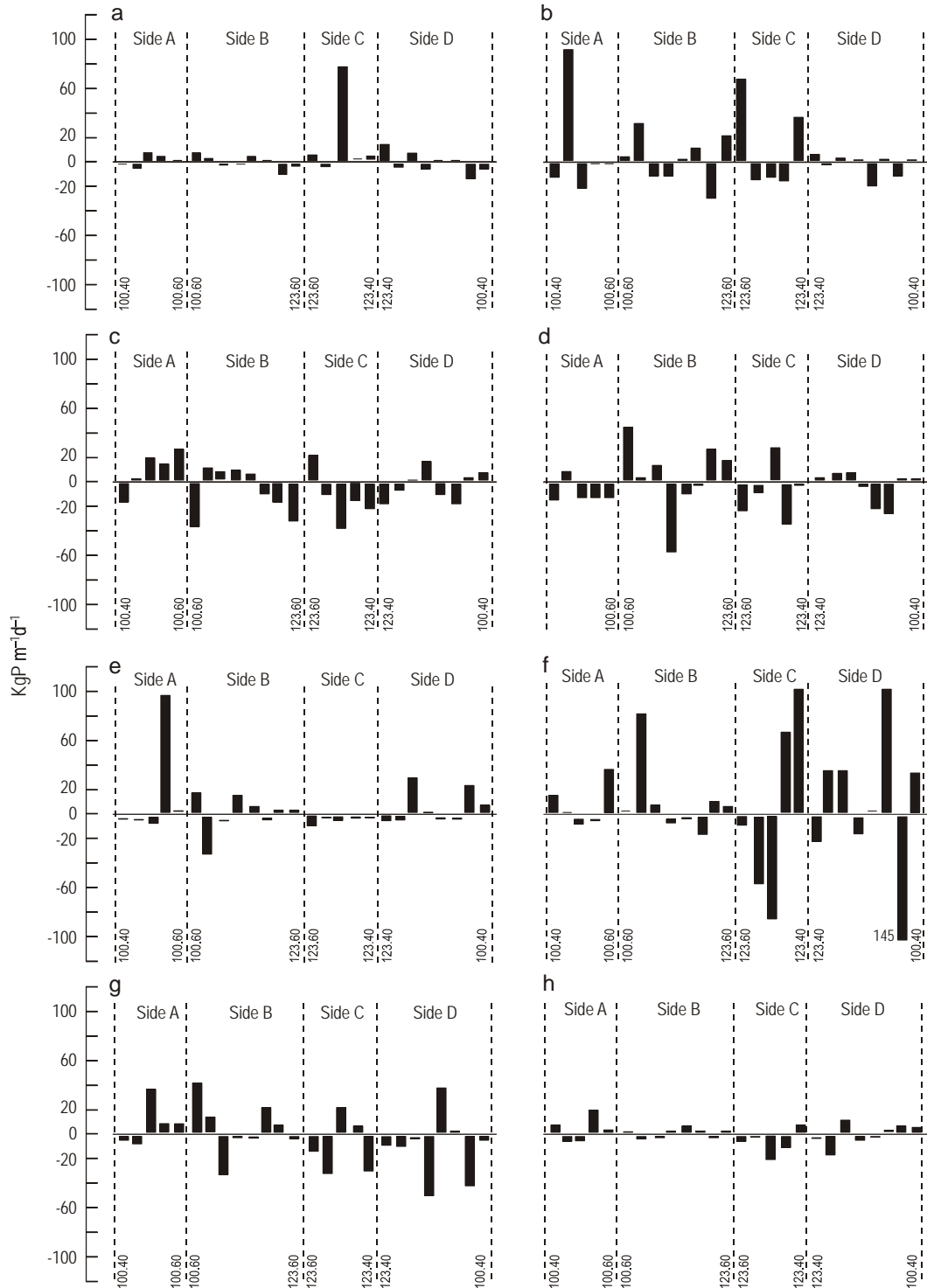


Figure 3. Phosphorus fluxes per control volume (CV) station integrated in the upper 100 m of the water column ($\text{kg P m}^{-1} \text{d}^{-1}$) for the following cruises: (a) winter 2003 (0301), (b) spring 2003 (0304), (c) summer 2003 (0307), (d) autumn 2003 (0310), (e) winter 2004 (0401), (f) spring 2004 (0404), (g) summer 2004 (0407), and (h) autumn 2004 (0410). The separation between flux bars does not represent the distance between stations. Positive and negative magnitudes indicate P fluxes into and out of the CV, respectively. Numbers along the dotted lines correspond to the IMECOCAL stations delimiting the CV.

Figura 3. Flujos de P por estación de la caja de estudio (CE) integrados en los primeros 100 m de profundidad ($\text{kg P m}^{-1} \text{d}^{-1}$) para los cruceros de 2003: (a) invierno (0301), (b) primavera (0304), (c) verano (0307), (d) otoño (0310); y 2004: (e) invierno (0401), (f) primavera (0404), (g) verano (0407), (h) otoño (0410). La separación entre barras de flujos no representa la distancia entre estaciones. Las magnitudes positivas muestran los flujos de P hacia el interior de la CE. Las barras con magnitudes negativas representan flujos de P hacia el exterior de la CE. Los números sobre las líneas punteadas corresponden a las estaciones del programa IMECOCAL que delimitan la CE.

and $44.3 \times 10^5 \text{ kg P d}^{-1}$ in summer and autumn, respectively (table 1). During 2004, net P output was only recorded in summer ($47.3 \times 10^5 \text{ kg P d}^{-1}$), while net P inputs ranged from 1.7×10^5 to $68.9 \times 10^5 \text{ kg P d}^{-1}$ in winter, spring, and autumn (table 1).

During the two years of study, the IPP values for the CV were lower in winter and higher in spring (table 1). This seasonal pattern of minimum IPP values in winter and maximum in spring concurs with that reported for the region off Baja California, and is related to upwelling relaxation and intensification events and to the equatorward transport of nutrient-rich water (Chavez *et al.* 2002, Kahru and Mitchel 2002, Espinosa-Carreón *et al.* 2004).

DISCUSSION

Phosphate fluxes into the CV may represent a combination of different physical and biogeochemical processes, such as horizontal advection (geostrophic and ageostrophic) towards the CV, vertical advection from depths greater than 100 m (cyclonic eddies, coastal upwelling), and bacterial oxidation of organic matter (rem mineralization). Phosphate losses in the CV can be attributed to the combination of outward horizontal advection, vertical advection below 100 m depth (anticyclonic eddies), and consumption by part of the phytoplankton community for photosynthetic organic carbon production. The comparison of net P input due to geostrophic flow and the magnitude necessary to sustain IPP considered only two of the processes influencing P balance in the CV (horizontal advection and consumption), enabling us to determine the influence exerted by the geostrophic transport of P on productivity off Baja California in 2003 and 2004. If we consider that coastal upwelling generates “high” nutrient concentrations in the surface layers of the water column, they will always be exposed to geostrophic transport in the direction in which this process moves the parcel of water.

Durante los dos años de estudio se tuvieron valores de PPI menores en la CE durante el invierno y mayores en primavera (tabla 1). El patrón estacional de PPI con valores mínimos en invierno y máximos en primavera se ajustó a lo reportado para la región frente a Baja California, relacionado con el ciclo de relajación e intensificación de los eventos de surgencias y con el transporte de aguas ricas en nutrientes hacia el ecuador (Chavez *et al.* 2002, Kahru y Mitchel 2002, Espinosa-Carreón *et al.* 2004).

DISCUSIÓN

Los ingresos de P a la CE podrían representar una combinación de diferentes procesos físicos y biogeoquímicos como la advección horizontal (geostrofica y ageostrofica) hacia la CE, la advección vertical desde profundidades mayores a los 100 m (remolinos ciclónicos, surgencias costeras) y la oxidación bacteriana de la materia orgánica (rem mineralización). Las pérdidas de P en la CE pueden atribuirse a la combinación de la advección horizontal hacia fuera de la CE, la advección vertical hacia abajo de 100 m de profundidad (remolinos anticiclónicos) y el consumo por parte de la comunidad fitoplanctónica para la producción de carbono orgánico vía fotosíntesis. Al comparar el ingreso neto de P por geostrofia con la magnitud necesaria para sostener PPI, se consideró únicamente a dos de los procesos que influyeron en el balance de P en la CE (advección horizontal y consumo), lo que permitió establecer la influencia que ejerció el transporte geostrofico de P sobre la productividad frente a Baja California en 2003 y 2004. Si consideramos que el proceso de surgencias costeras provoca “altas” concentraciones de nutrientes en las capas superficiales de la columna de agua, éstas siempre estarán expuestas a ser transportadas por geostrofia en el sentido en el que este proceso dirija a la parcela de agua.

Table 1. Balance of geostrophic phosphorus fluxes (F_p), primary production (PP) rates, and P requirements of primary producers throughout the area of the control volume (CV). In the case of F_p balances, the positive (negative) values indicate P input (output) of the CV.

Tabla 1. Balance de flujos de P (F_p) por geostrofia, tasas de producción primaria (PP) y requerimientos de P por PP en toda el área de la caja de estudio (CE). En el caso de los balances de F_p , el valor positivo (negativo) significa que la CE importó (exportó) P en forma neta por geostrofia.

Cruise	Balance of geostrophic F_p (10^5 kg P d^{-1})	Mean PP (\pm SD) ($\text{mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)	P requirements for PP (10^5 kg P d^{-1})
Winter 2003 (0301)	12.0	571 (\pm 280)	10.2
Spring 2003 (0304)	57.8	961 (\pm 1030)	17.3
Summer 2003 (0307)	-26.9	864 (\pm 766)	15.5
Autumn 2003 (0310)	-44.3	592 (\pm 228)	10.6
Winter 2004 (0401)	68.9	593 (\pm 162)	10.6
Spring 2004 (0404)	22.2	844 (\pm 730)	15.1
Summer 2004 (0407)	-47.3	757 (\pm 512)	13.6
Autumn 2004 (0410)	1.7	624 (\pm 323)	11.2

To sustain the IPP rates in the CV during 2003 and 2004, P fluxes into the euphotic zone had to be between 10.2×10^5 and 17.3×10^5 kg P d⁻¹ (table 1). These requirements seem to be met by the net geostrophic contribution of P in winter and spring of both years, and only 10% sustained by the net P inputs estimated for autumn 2004 (table 1). This indicates that during winter and spring of 2003 and 2004, P did not limit primary production off Baja California, even without considering possible inputs by ageostrophic processes (processes whose origin differs from the combinations of forcings due to horizontal density gradients). The geostrophic output of P from the CV in winter and spring may be due to factors not considered in this study: (1) intrusion of a large amount of nutrient-rich subarctic water, evident in the oceanographic characteristics of the region since the end of 2002 (Venrick *et al.* 2003, Goericke *et al.* 2004, Durazo *et al.* 2005, Gaxiola-Castro *et al.* 2008); (2) availability of inorganic P in surface layers as a result of coastal upwelling events off Baja California (Goericke *et al.* 2004, 2005); (3) nutrients carried to the euphotic zone by Ekman pumping in cyclonic eddies, structures that form near the coast of Baja California and drift seawards (Soto-Mardones *et al.* 2004); (4) availability of inorganic P in surface layers due to wind-stress curl upwelling (Rykaczewski and Checkley 2008).

During the summer and autumn of 2003 and summer of 2004, the F_p balances in the CV were negative (table 1), and the geostrophic transport exported more P than it imported; hence, net IPP in the CV can be attributed to non-geostrophic processes. For example, in addition to the nutrients supplied by upwelling, their input by Ekman pumping in cyclonic eddies, as the ones that occur in the region (Espinosa-Carreón *et al.* 2004), in other parts of the ocean can account for a large part of the total primary production (Falkowski *et al.* 1991, McGillicuddy *et al.* 1998).

Our findings for the summer and autumn of 2003 and 2004 only indicate that geostrophic transport produced a greater net export of inorganic P from the CV to adjacent areas, allowing a first relative evaluation of the rest of the processes involved in sustaining primary organic production.

The occurrence of a weak El Niño event was recorded for the winter of 2002–2003 (Venrick *et al.* 2003), and an increase in the depth of the nutricline and the presence of nutrient-poor waters was expected (Mann and Lazier 2006); consequently, when the water column nutrient concentrations decrease, the geostrophic transport of nutrients should presumably decrease. These effects, however, were not evident in the CCS in 2003, since most of its physical and chemical properties, including P concentrations, were very similar to those of the climatological mean; 2003 was therefore called a “rare normal year” (Venrick *et al.* 2003, Goericke *et al.* 2004). Moreover, nutricline depth in this region remained practically the same as the mean climatological level in 2003 and 2004 (Goericke *et al.* 2005).

During 2004, greater intrusion of subarctic water was recorded in the CCS (Goericke *et al.* 2005), which would

Para sustentar las tasas de PPI en la CE durante estos dos años fue necesario un aporte de P a la zona eufótica de la CE entre 10.2×10^5 y 17.3×10^5 kg P d⁻¹ (tabla 1). Estos requerimientos parecen ser solventados por el aporte geostrófico neto de P durante invierno y primavera de los dos años estudiados, y sostenidos sólo en un 10% por los aportes netos de P calculados para el otoño de 2004 (tabla 1). Esto implica que durante invierno y primavera de 2003 y 2004 el P no fue limitante para los productores primarios frente a Baja California, aun sin considerar el posible aporte por procesos ageostroficados (procesos cuyo origen es distinto a la combinación de forzamientos debidos a la diferencia de densidad en la horizontal). El fósforo transportado por geostrofia desde fuera de la CE en invierno y primavera puede tener diversos orígenes no resueltos en el presente trabajo: (1) intrusión de una gran cantidad de Agua del Subártico rica en nutrientes, evidente en las características oceanográficas de la región desde finales del año 2002 (Venrick *et al.* 2003, Goericke *et al.* 2004, Durazo *et al.* 2005, Gaxiola-Castro *et al.* 2008); (2) P inorgánico disponible en capas superficiales mediante surgencias costeras a lo largo de la costa de Baja California (Goericke *et al.* 2004, 2005); (3) nutrientes llevados a la zona eufótica por bombeo de Ekman en remolinos ciclónicos; estas estructuras se llegan a formar cerca de la costa de Baja California y derivan mar adentro (Soto-Mardones *et al.* 2004); (4) P inorgánico hecho disponible en las capas superficiales por surgencias inducidas por el rotacional del esfuerzo del viento (Rykaczewski y Checkley 2008).

Durante verano y otoño de 2003 y verano de 2004 los balances de F_p en la CE resultaron negativos (tabla 1). En estos períodos el transporte geostrófico extrajo más P de lo que ingresó a la CE, por lo que la PPI en la CE se puede atribuir en forma neta a procesos no geostroficados. Por ejemplo, además del aporte por episodios de surgencias costeras en este periodo, se ha señalado que la inyección de nutrientes por bombeo de Ekman en remolinos ciclónicos como los que se presentan en la región (Espinosa-Carreón *et al.* 2004), en otras localidades del océano pueden llegar a aportar gran parte de la producción primaria total (Falkowski *et al.* 1991, McGillicuddy *et al.* 1998).

Los resultados aquí presentados para las temporadas de verano y otoño de 2003 y 2004 sólo indican que el transporte geostrófico resultó en una mayor exportación neta de P inorgánico desde la CE hacia las zonas adyacentes, lo que permitió una primer valoración relativa del resto de los procesos implicados en el sostenimiento de la producción orgánica primaria.

Durante el invierno 2002–2003 se registró la presencia de un evento El Niño débil (Venrick *et al.* 2003), por lo que se esperaba el incremento en la profundidad de la nutriclina y la presencia de masas de agua pobres en nutrientes (Mann y Lazier 2006); en consecuencia, sería de esperar que a menor presencia de nutrientes en la columna de agua, el transporte geostrófico de nutrientes debería disminuir. Sin embargo, estos efectos no fueron evidentes en el SCC durante 2003, ya

suggest higher nutrient inputs and geostrophic transport rates. Nevertheless, the P concentrations reported for the CalCOFI region were similar to those of the past two decades (Goericke *et al.* 2005). These indications of “normality” in regard to P concentrations and nutricline depth to the north of the study area suggest that P transport by geostrophic, pumping, and/or vertical diffusion (ageostrophic) processes during 2003 and 2004 can at least be considered not extraordinary.

Roemmich (1989) and Bograd *et al.* (2001) showed that horizontal geostrophic transport in the CC, to the north of the IMECOCAL region, contributed enough P to sustain organic carbon synthesis throughout the year; however, off Baja California, the horizontal transport of P due solely to geostrophic processes was not sufficient to sustain organic carbon production rates in all the seasons. To affirm that horizontal P transport off Baja California in 2003 and 2004 was sufficient to sustain IPP in the region throughout the year, the Ekman-drift-generated F_p would have to compensate for the net P export from the CV by geostrophic transport, as well as supply the IPP requirements of this nutrient. This implies F_p rates due to Ekman transport between 10×10^5 and 60×10^5 kg P d⁻¹ in the CV during summer and autumn of 2003 and 2004. Durazo (2009), however, reported a decrease in the intensity of the winds that drive coastal upwelling in the region during these years, so these net P fluxes into the CV in summer and autumn must have been largely due to vertical advection in the cyclonic eddies that occur in the area and to upwelling generated by rotational wind components (Rykaczewski and Checkley 2008).

It is possible that if we had considered the P fluxes down to 500 m depth, as Roemmich (1989) and Bograd *et al.* (2001) did, the net geostrophic P inputs may have supported the IPP requirements of this nutrient in the summer and autumn of 2003 and 2004. This consideration involves the premise that all P input, between 100 and 500 m depth, would be available for the synthesis of organic matter by phytoplankton in the euphotic zone. This condition would impose an overestimation because there would have to be a vertical advection process of sufficient magnitude to transport enough P to the euphotic zone (<100 m depth) for phytoplankton growth.

Ramírez-Manguilar *et al.* (2010) calculated net geostrophic and Ekman volume transport (1998–2007) off Baja California, in a CV similar to the one used in this study (approximately corresponding to faces A, B, and C). The results obtained by these authors concurred with those of Roemmich (1989) and Bograd *et al.* (2001) in that Ekman drifts represented only a small portion (10–30%) of the net transport in the water column (0–500 m). Consistent with Ramírez-Manguilar *et al.*'s (2010) findings, the net transport estimate for the upper 100 m of the water column (results not shown) indicated that geostrophic volume transport off Baja California is more variable and of larger magnitude (with greater impact in the area) than that due to Ekman transport,

que la mayoría de las propiedades físicas y químicas del SCC, incluyendo las concentraciones de P, estuvieron muy cercanas a la media climatológica, razón por la cual el año 2003 fue llamado “año normal raro” (Venrick *et al.* 2003, Goericke *et al.* 2004). Asimismo, la profundidad de la nutriclina en esta región se mantuvo prácticamente en el nivel medio de su climatología durante 2003 y 2004 (Goericke *et al.* 2005).

Durante el año 2004 se documentó una mayor intrusión de Agua del Subártico en el SCC (Goericke *et al.* 2005), por lo que podría esperarse mayores aportes de nutrientes y mayores tasas de transporte por geostrofia. Sin embargo, las concentraciones de P reportadas en la región de CalCOFI se mantuvieron cercanas a la climatología de más de dos décadas (Goericke *et al.* 2005). Estas evidencias de “normalidad” en las concentraciones de P y en la profundidad de la nutriclina al norte de la región de estudio sugieren que el transporte de P por geostrofia o por procesos de bombeo y/o difusión vertical (ageostróficos) durante 2003 y 2004 podrían ser considerados al menos no extraordinarios.

Roemmich (1989) y Bograd *et al.* (2001) mostraron que el transporte horizontal de P por geostrofia en la CC, al norte de la región IMECOCAL, fue suficiente para sostener la síntesis de carbono orgánico durante todo el año. Sin embargo, frente a Baja California el transporte horizontal de P derivado sólo de la geostrofia no fue suficiente para sostener las tasas de producción de carbono orgánico durante todas las estaciones del año. Para afirmar que frente a Baja California el transporte horizontal de P en 2003 y 2004 fue suficiente para sustentar la PPI en la región durante todas las épocas del año, sería necesario que el F_p abastecido por la deriva de Ekman compensara la exportación neta de P desde la CE por geostrofia, además de aportar los requerimientos de este nutriente por parte de la PPI. Esto implica tasas de F_p por transporte de Ekman entre 10×10^5 y 60×10^5 kg P d⁻¹ en la CE durante verano y otoño de 2003 y 2004. Sin embargo, en estos años se reportó una disminución en la intensidad del esfuerzo del viento que promueve las surgencias costeras en la región (Durazo 2009), por lo que estas tasas de aporte neto de P hacia la CE en verano y otoño debieron ser abastecidos en mayor proporción por la advección vertical en los remolinos ciclónicos presentes en el área y por surgencias inducidas por el rotacional del esfuerzo del viento (Rykaczewski y Checkley 2008).

Es posible que si se hubieran considerado los flujos de P hasta 500 m de profundidad, como lo hicieron Roemmich (1989) y Bograd *et al.* (2001), los ingresos netos de P por geostrofia podrían haber sido suficiente para los requerimientos de este nutriente por parte de la producción primaria durante verano y otoño de 2003 y 2004. Sin embargo, esta consideración implica la premisa de que todo el ingreso de P, entre 100 y 500 m de profundidad, estuvo disponible para la síntesis de materia orgánica por el fitoplancton presente en la zona eufótica. Esta condición impondría una sobreestimación, debido a que debería existir un proceso de advección

suggesting that geostrophic processes dominate the exchange in the CV.

The horizontal geostrophic transport of P off Baja California, based on flux balance estimates for the upper 100 m of the water column, was sufficient to support the IPP rates in winter and spring of 2003 and 2004; hence, P was not limiting for the synthesis of organic carbon by phytoplankton during these seasons. Moreover, the results indicated the possible influence of ageostrophic processes on inorganic P input for primary production in this region during the summer and autumn of 2003 and 2004.

ACKNOWLEDGEMENTS

The first author thanks the following for support during his doctoral studies at the Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE): Dirección General de Educación en Ciencia y Tecnología del Mar (DGECyTM), Coordinación Sectorial de Desarrollo Académico (COSDAC-SEMS), and Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). The oceanographic data were collected during IMECOCAL cruises financed by the projects CONACYT-G35326T and SEP-2003-CO2-42569. We gratefully acknowledge the support received from the crew of the R/V *Francisco de Ulloa* and the technicians, students, and researchers who participated during the oceanographic campaigns. We thank A Ramírez-Manguilar for assistance in estimating net transports in the surface layer, as well as the three anonymous reviewers for their valuable comments on the manuscript.

English translation by Christine Harris.

REFERENCES

- Aguirre-Hernández E, Gaxiola-Castro G, Nájera-Martínez S, Baumgartner T, Kahru M, Mitchell G. 2004. Phytoplankton absorption, photosynthetic parameters, and primary production off Baja California: Summer and autumn 1998. *Deep-Sea Res.* II 51: 799–816.
- Behrenfeld M, Falkowski P. 1997. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. *Limnol. Oceanogr.* 42: 1–20.
- Bograd SJ, Digiacomo PM, Durazo R, Hayward TL, Hyrenbach KD, Lynn RJ, Mantyla AW, Schwing FB, Sydeman WJ, Baumgartner T, Lavaniegos B, Moore CS. 2000. The state of the California Current, 1999–2000: Forward to a new regime? *CalCOFI Rep.* 41: 26–52.
- Bograd SJ, Chereskin TK, Roemmich D. 2001. Transport of mass, heat, salt, and nutrients in the southern California Current System: Annual cycle and interannual variability. *J. Geophys. Res.* 106: 9255–9275.
- Chavez F, Pennington J, Castro C, Ryan J, Michisaki R, Schlining B, Walz P, Buck K, McFadyen A, Collins C. 2002. Biological and chemical consequences of the 1997–1998 El Niño in central California waters. *Prog. Oceanogr.* 54: 205–232.
- Durazo R. 2009. Climate and upper ocean variability off Baja California, Mexico: 1997–2008. *Prog. Oceanogr.* 83: 361–368.
- vertical de magnitud tal que transportara suficiente P hacia la zona eufótica (<100 m de profundidad) para el crecimiento del fitoplancton.
- Ramírez-Manguilar *et al.* (2010) calcularon el transporte de volumen neto (1998–2007) por geostrofia y por Ekman frente a Baja California, en una caja de estudio similar a la utilizada en el presente trabajo (corresponde aproximadamente a los lados A, B y C de la CE). Estos autores mostraron resultados consistentes con Roemmich (1989) y Bograd *et al.* (2001) en el sentido de que los flujos de Ekman representan sólo una porción pequeña (10–30%) del transporte neto en la columna de agua (0–500 m). Consistente con los resultados de Ramírez-Manguilar *et al.* (2010), el cálculo del transporte neto para los primeros 100 m de la columna de agua (resultados no mostrados) indicó que el transporte de volumen geostrofico frente a Baja California es más variable y de mayor magnitud (con mayor impacto en el área) que el debido al transporte de Ekman, lo que sugiere que los procesos geostrofos dominan el intercambio en la CE.
- El transporte horizontal de P por geostrofia frente a Baja California, con base al balance de los flujos estimados en los primeros 100 m de la columna de agua, fue suficiente para sostener las tasas de PPI durante el invierno y primavera de 2003 y 2004, por lo que en estos periodos el P no fue limitante para la síntesis de carbono orgánico por el fitoplancton. Además, los resultados expusieron la posibilidad de la influencia que los procesos ageostrofos pudieran ejercer en el aporte de fósforo inorgánico para la producción primaria en esta región durante el verano y otoño de 2003 y 2004.

AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece a la Dirección General de Educación en Ciencia y Tecnología del Mar (DGECyTM), a la Coordinación Sectorial de Desarrollo Académico (COSDAC-SEMS) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) sus apoyos para realizar la estancia doctoral en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). La información oceanográfica fue recolectada durante los cruceros del programa IMECOCAL, financiado por los proyectos CONACYT #G35326T y #SEP-2003-CO2-42569. Se agradece el apoyo de la tripulación del B/O *Francisco de Ulloa* y a los técnicos, estudiantes e investigadores participantes durante las campañas oceanográficas. Se agradece a A Ramírez-Manguilar su ayuda en el cálculo de transportes netos de la capa superficial. Asimismo, agradecemos a los tres revisores anónimos por sus valiosas críticas y observaciones al manuscrito de este artículo.

Durazo R, Baumgartner T. 2002. Evolution of oceanographic conditions off Baja California: 1997–1999. *Prog. Oceanogr.* 54: 7–31.

Durazo R, Gaxiola-Castro G, Lavaniegos B, Castro-Valdez R, Gómez-Valdés J, Da S Mascarenhas Jr. A. 2005. Oceanographic conditions west of the Baja California coast, 2002–2003: A

- weak El Niño and subarctic water enhancement. *Cienc. Mar.* 31: 537–552.
- Eaton AD, Clesceri L, Rice E, Greenberg A, Franson M (eds.). 2005. *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*. APHA, AWWA, WEF, Washington, DC, 1325 pp.
- Espinosa-Carreón TL, Strub PT, Beier E, Ocampo-Torres F, Gaxiola-Castro G. 2004. Seasonal and interannual variability of satellite-derived chlorophyll pigment, surface height, and temperature off Baja California. *J. Geophys. Res.* 109: C03039, doi:10.1029/2003JC002105.
- Falkowski PG, Ziemann D, Kolber Z, Bienfang P. 1991. Role of eddy pumping in enhancing primary production in the ocean. *Nature* 352: 55–58.
- Gaxiola-Castro G, Durazo R, Lavaniegos B, De la Cruz-Orozco ME, Millán-Núñez E, Soto-Mardones L, Cepeda-Morales J. 2008. Pelagic ecosystem response to interannual variability off Baja California. *Cienc. Mar.* 34: 263–270.
- Goericke R, Venrick E, Mantyla A, Hooff R, Lavaniegos BE, Bograd SJ, Schwing FB, Peterson WT, Huyer A, Smith RL, Wheeler PA, Gaxiola-Castro G, Hyrenbach KD, Sydeman WJ, Gómez-Valdes J. 2004. The state of the California Current, 2003–2004: A rare “normal” year. *CalCOFI Rep.* 45: 27–60.
- Goericke R, Venrick E, Bograd S, Huyer A, Smith RL, Mantyla A, Shwing FB, Wheeler PA, Hoof R, Peterson WT, Chavez F, Collins C, Marinovic B, Lo N, Gaxiola-Castro G, Durazo R, Hyrenbach KD, Sydeman WJ. 2005. The state of the California Current, 2004–2005: Still cool? *CalCOFI Rep.* 46: 32–71.
- Haury L, Shulenberg E. 1982. Horizontal transport of phosphorus in the California Current. *CalCOFI Rep.* 23: 149–159.
- Hayward TL, Baumgartner TR, Checkley DM, Durazo R, Gaxiola-Castro G, Hyrenbach KD, Mantyla AW, Mullin MM, Murphree T, Schwing FB, Smith PE, Tegner MJ. 1999. The state of the California Current in 1998–1999: Transition to cool water conditions. *CalCOFI Rep.* 40: 29–62.
- Kahru M, Mitchell BG. 2002. Influence of El Niño-La Niña cycle on satellite-derived primary production in the California Current. *Geophys. Res. Lett.* 29: 27-1–27-4.
- Largier JL, Lawrence CA, Roughan M, Kaplan DM, Dever EP, Dorman CE, Kudela RM, Bollnes SM, Wilkerson FP, Dugdale RC, Botsford LW, Garfield N, Kuebel-Cervantes B, Koracin D. 2006. WEST: A northern California study of the role of wind-driven transport in the productivity of coastal plankton communities. *Deep-Sea Res. II* 53: 2833–2849.
- Lavaniegos BE, Jiménez-Pérez LC, Gaxiola-Castro G. 2002. Plankton response to El Niño 1997–1998 and La Niña 1999 in the southern region of the California Current. *Prog. Oceanogr.* 54: 33–58.
- Mann KH, Lazier JRN. 2006. *Dynamics of Marine Ecosystems. Biological-Physical Interactions in the Ocean*. 3rd ed. Blackwell Publishing Ltd., 496 pp.
- McGillicuddy DJ, Robinson AR, Siegel DA, Jannasch HW, Johnsonk R, Dickey TD, McNeil J, Michael AF, Knap AH. 1998. Influence of mesoscale eddies on new production in the Sargasso Sea. *Nature* 394: 263–266.
- McGowan JA, Chelton DB, Conversi A. 1996. Plankton patterns, climate and change in the California Current. *CalCOFI Rep.* 37: 45–68.
- Morel A, Maritorena S. 2001. Bio-optical properties of oceanic waters: A reappraisal. *J. Geophys. Res.* 106: 7163–7180.
- Ramírez-Manguilar AM, Durazo R, Beier E, Castro R. 2010. Variabilidad anual e interanual en el transporte de volumen, calor y sal en el Sistema de la Corriente de California frente a Baja California. In: Gaxiola-Castro G, Durazo R (eds.), *Dinámica del Ecosistema Pelágico frente a Baja California, 1997–2007*. INE, SEMARNAT, CICESE, UABC, Mexico (in press).
- Roden GI. 1971. Aspects of the transition zone in the northeastern Pacific. *J. Geophys. Res.* 76: 3462–3475.
- 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.
- Ryckaczewski R, Checkley DM. 2008. Influence of ocean winds on the pelagic ecosystem in upwelling regions. *PNAS* 105: 1965–1970.
- Soto-Mardones L, Parés-Sierra A, García J, Durazo R, Hormazabal S. 2004. Analysis of the mesoscale structure in the IMECOCAL region (off Baja California) from hydrographic, ADCP and altimetry data. *Deep-Sea Res. II* 51: 785–798.
- Venrick E, Bograd SJ, Checkley D, Durazo R, Gaxiola-Castro G, Hunter J, Huyer A, Hyrenbach KD, Lavaniegos BE, Mantyla A, Shwing FB, Smith RL, Sydeman WJ, Wheeler PA. 2003. The state of the California Current, 2002–2003: Tropical and subarctic influences vie for dominance. *CalCOFI Rep.* 44: 28–60.

*Received October, 2009;
accepted February, 2010.*