

Nutrientes: efectos de procesos locales y de gran escala

G Gaxiola-Castro¹, ME De la Cruz-Orozco¹, S Nájera-Martínez¹,
MD Martínez-Gaxiola^{1,2}, A Rodríguez-Gamboa¹

RESUMEN

A partir de las concentraciones de nutrientes inorgánicos disueltos (nitratos NO_3 ; ortofosfatos PO_4) obtenidas entre 1997 y 2005 frente a Baja California, se presentan las variaciones debidas a cambios de largo período y las originadas por procesos de mesoescala. Durante esta etapa y aún dentro de los ciclos El Niño-La Niña la capa superficial del océano en la región IMECOCAL tuvo bajas concentraciones de ambos nutrientes ($\sim 0.3 \mu\text{M}$), a excepción de los altos valores de PO_4 ($\sim 1.0 \mu\text{M}$) durante 2002 resultantes de la intensificación de las surgencias costeras en la Corriente de California. Los ciclos El Niño-La Niña afectaron la posición vertical de la nutriclina ($\text{PO}_4 = 0.4 \mu\text{M}$; $\text{NO}_3 = 1.0 \mu\text{M}$), aunque los mayores efectos estuvieron relacionados con los remolinos ciclónicos (anticiclónicos) que elevaron (sumergieron) la nutriclina. La pendiente de la relación $\text{NO}_3:\text{PO}_4$ fue de 14.25, cercana a la razón de Redfield (16:1). A partir de las relaciones entre temperatura y NO_3 y PO_4 frente a Baja California, se obtuvieron concentraciones menores de ambos nutrientes relacionadas

¹ Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Departamento de Oceanografía Biológica. Carretera Ensenada-Tijuana No. 3918. Fracc. Zona Playitas. Ensenada 22860, Baja California. ggaxiola@cicese.mx, delacruz@cicese.mx, sila_najera@hotmail.com, rgamboa@cicese.mx.

² Centro de Estudios Tecnológicos del Mar No. 6. Coral No. 2 Col. Centro. La Cruz de Huanacaxtle 63734, Nayarit. martinezgax@gmail.com.

con agua de 14.0–21.0 °C, con valores de PO_4 siempre mayores a 0.20 μM , aún durante octubre de 1997 cuando la temperatura superficial del mar fue de 24.0–26.0 °C.

Palabras clave: Nutrientes inorgánicos disueltos, Corriente de California, Baja California, El Niño-La Niña.

ABSTRACT

From inorganic dissolved nutrient data (nitrate NO_3 ; orthophosphate PO_4) obtained off the western coast of Baja California between 1997 and 2005, the variability driven by long period changes, and that originated by mesoscale processes are shown. During this time and in spite of the El Niño-La Niña cycles, the surface layer of the IMECOCAL region showed low concentrations of both NO_3 and PO_4 ($\sim 0.3 \mu\text{M}$), except for higher surface values of PO_4 during 2002 resulting from increased coastal upwelling throughout the California Current region. El Niño-La Niña cycles affect the vertical location of the nutricline ($\text{PO}_4 = 0.4 \mu\text{M}$; $\text{NO}_3 = 1.0 \mu\text{M}$); however, the most important effects on the nutricline were those related with cyclonic (anticyclonic) shoaling (sinking) eddies. The slope of the $\text{NO}_3:\text{PO}_4$ relationship found was 14.25, very close to the Redfield ratio (16:1). From the nutrient-temperature relation in the study area, lower concentration of both nutrients were found related with water from 14.0–21.0 °C, with $\text{PO}_4 > 0.20 \mu\text{M}$ even during October 1997 when the surface water temperature was 24.0–26.0 °C.

Key words: Inorganic dissolved nutrients, California Current, Baja California, El Niño-La Niña.

INTRODUCCIÓN

El Sistema de la Corriente de California (SCC) es conocido en general como una zona muy fértil, creada principalmente por los nutrientes inorgánicos aportados por el agua de origen subártico transportada hacia el sur por el flujo de la Corriente de California (CC) y por los afloramientos a lo largo de la costa (Haury y Shulenberger 1982, Largier *et al.* 2006). En algunas regiones los aportes de nutrientes por los afloramientos costeros son más importantes que los transportados por el flujo de la CC (Chavez *et al.* 2002). Sin embargo, frente al sur de California

el ecosistema pelágico es mayormente sostenido por el aporte de nutrientes debido a otros procesos diferentes a la advección de la CC y las surgencias costeras (Mantyla *et al.* 2008).

Los macronutrientes fundamentales para el crecimiento del fitoplancton (ortofosfatos, PO_4 ; nitratos, NO_3) generalmente en el océano presentan una estequiometría molar cercana a 16 NO_3 :1 PO_4 (razón de Redfield), la cual puede ser verificada cuando se extrae el efecto de los procesos físicos y se relaciona sólo con la derivación de procesos biológicos (Alvarez-Borrego *et al.* 1975a, Alvarez-Borrego *et al.* 1975b). En particular frente a Baja California la razón NO_3 : PO_4 es generalmente menor a 16:1, tal como lo expresan Sigman *et al.* (2005). Ambos macronutrientes tienen mayores concentraciones por debajo de la termoclina-nutriclina, y muy a menudo no son detectables en la capa mezclada de las aguas oceánicas.

El proceso que produce el crecimiento del fitoplancton en el océano y su posterior proliferación en biomasa está fuertemente relacionado con la profundidad a la que se encuentra en la vertical el gradiente de mayor concentración de nutrientes inorgánicos disueltos (nutriclina). La posición vertical de la nutriclina se relaciona con la termoclina-picnoclina (Castro *et al.* 2002), y su ubicación dentro (fuera) de la zona eufótica (1% de la irradiancia superficial) determina la producción de mayor (menor) biomasa del fitoplancton en un tiempo y lugar específico (Mantyla *et al.* 2008).

Los procesos de gran escala temporal y espacial como El Niño (La Niña) surgen (emergen) la nutriclina (Castro *et al.* 2002), lo que impacta desfavorablemente (favorablemente) el crecimiento del fitoplancton. En la región de la CC frente a Baja California se han registrado diferentes ciclos El Niño-La Niña (Torres-Moye y Alvarez-Borrego 1987, Lavaniegos *et al.* 2001, Lavaniegos *et al.* 2002, Hernández-de-la-Torre *et al.* 2003, Gaxiola-Castro *et al.* 2008), los cuales afectan la variabilidad física en la escala regional (Durazo y Baumgartner 2002, Durazo *et al.* 2005).

Aunque en diversos trabajos se ha mencionado la fertilidad de la zona en cuestión, hasta ahora no se ha publicado información sobre la variabilidad de los nutrientes inorgánicos en esta región de la CC, ni sobre su relación con algunos procesos locales y de gran escala temporal y espacial. En este trabajo se describen los cambios espacio-temporales de los nutrientes frente a la costa occidental de Baja California, que corresponde a la región IMECOCAL, entre 1997–2005 y su relación con eventos regionales y de gran escala espacial que afectan su variabilidad.

MÉTODOS

Los cruceros oceanográficos de donde se obtuvieron los datos fueron realizados por el programa de Investigaciones Mexicanas en la Corriente de California (IMECOCAL) a bordo del B/O Francisco de Ulloa del CICESE, en la red de estaciones que había cubierto el programa CalCOFI frente a Baja California de la línea 100 hasta la 130, y desde aproximadamente 30 km de la costa hasta 220 km fuera de la costa (figs. 1, 3, 4, 5). Los niveles muestreados con botellas Niskin de 5 l acopladas a la roseta oceanográfica fueron 0, 10, 20, 50, 100, 150 y 200 m de profundidad. Las muestras para los análisis de nutrientes inorgánicos (fosfatos PO_4 ; nitratos NO_3 ; nitratos+nitritos NO_3+NO_2) se congelaron a bordo del barco en botellas de plástico de 100 ml.

Los análisis de PO_4 y NO_3 de las muestras recolectadas en septiembre-octubre de 1997 y enero de 1998 se hicieron en el laboratorio del Instituto de Ciencias Marinas de la Universidad de California en Santa Bárbara (MSI-UCSB), por medio de un analizador de inyección de flujo (FIA; *flow injection analysis*) LACHAT modelo QuickChem 8000, con una precisión del 5% en la escala completa para ambos nutrientes. Los análisis de PO_4 y NO_3+NO_2 para los cruceros restantes se hicieron en el laboratorio del CICESE con un autonalizador SKALAR bajo el principio de formación de complejos coloreados, posteriormente medidos por el método colorimétrico (Eaton *et al.* 2005) con una precisión analítica del 1% y un error medio entre réplicas menor al 5%. Con el antecedente de que en general las concentraciones de NO_2 en la región de estudio son $<0.10 \mu\text{M}$ y típicamente $<0.05 \mu\text{M}$ (Sigman *et al.* 2005), en este trabajo los valores de NO_2+NO_3 se representan como NO_3 .

El primer crucero de IMECOCAL se realizó del 26 de septiembre al 7 de octubre de 1997 (9710), recorriendo la región de sur a norte (fig. 1a). Debido a problemas de funcionamiento de la roseta, solamente se recolectaron muestras verticales en algunas secciones. En este trabajo sólo se presenta la distribución espacial superficial de fosfatos (PO_4) y nitratos (NO_3), y un perfil vertical de la línea 127. El segundo crucero cubrió una mayor cantidad de estaciones, iniciando el 24 de enero y finalizando el 14 de febrero 1998 (fig. 1c). En este trabajo se presentan datos de PO_4 y NO_3 de los cruceros de septiembre-octubre de 1997 (fig. 1a) y de enero-febrero de 1998 (fig. 1c), y de PO_4 de enero (fig. 3a) y abril de 1999 (fig. 3a, d, respectivamente), y enero de 2002 (fig. 4a) y 2005 (fig. 5a), por contar con una base de datos más robusta de este nutriente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

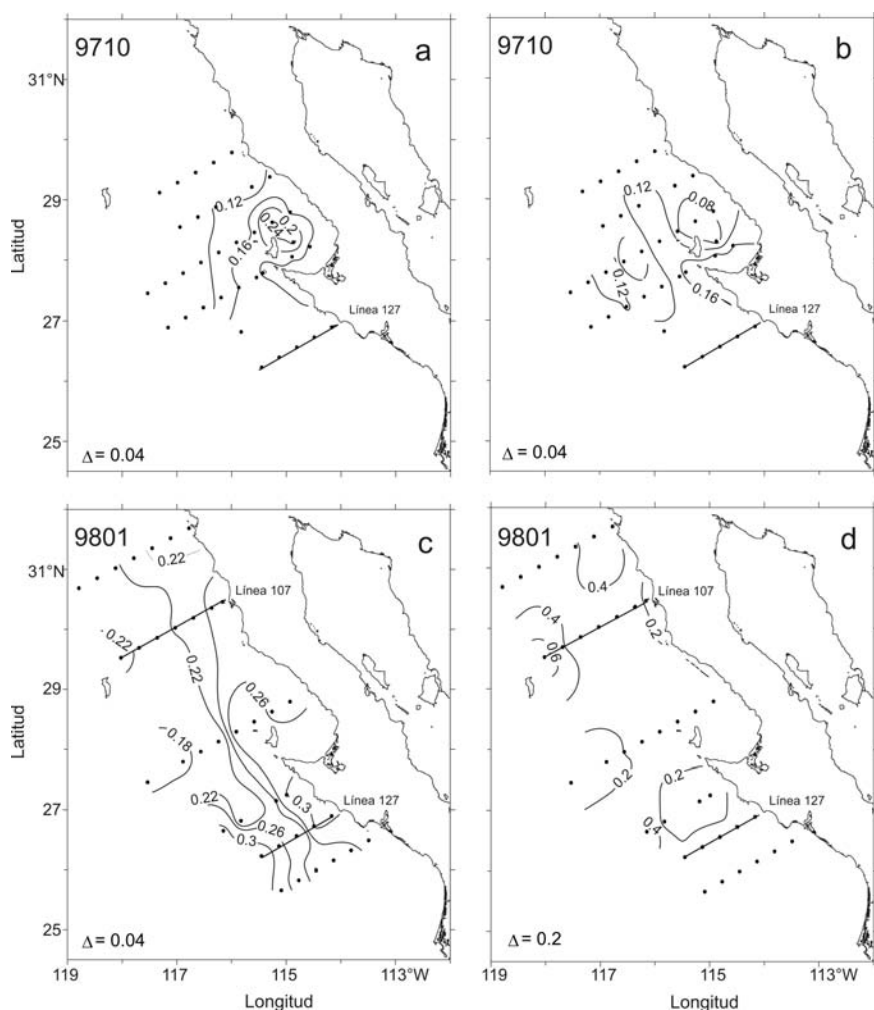
En septiembre-octubre de 1997 los valores superficiales de PO_4 variaron de 0.10 a 0.30 μM (fig. 1a), asociados a una posible disminución de la fertilidad debida al hundimiento entre 50 y 100 m en la profundidad de la nutriclina-termoclina en la CC por efectos de El Niño 1997-1998 (Castro *et al.* 2002). Este hundimiento de la termoclina fue resultado del ingreso de agua más cálida y salada a la región sur de la CC durante este evento (Durazo y Baumgartner 2002). Los efectos de El Niño fueron evidentes en las concentraciones superficiales de NO_3 , las cuales alcanzaron valores cercanos a 0.20 μM (fig. 1b). Sin embargo, las concentraciones medias de ambos nutrientes no fueron muy diferentes a los valores superficiales reportados para esta región ($\text{PO}_4 = 0.25 \mu\text{M}$; $\text{NO}_3 = 0.10 \mu\text{M}$) por Thomas y Seibert (1974) durante septiembre-octubre de 1969 bajo condiciones no-El Niño. Los ciclos El Niño más cercanos a 1969 que afectaron el Océano Pacífico ocurrieron en 1965-66 y 1972-73 (Wang y Fielder 2006).

Aunque se cubrió una mayor área geográfica en el crucero de enero-febrero de 1998, las concentraciones superficiales de ambos nutrientes fueron similares a las medidas en septiembre-octubre de 1997, con $\text{PO}_4 < 0.3 \mu\text{M}$, y NO_3 entre 0.2 μM y 0.4 μM (fig. 1c, d). Las concentraciones de clorofila-*a* superficial medidas durante estos cruceros fueron $< 0.5 \text{ mg m}^{-3}$ (Lavaniegos *et al.* 2002, Gaxiola-Castro *et al.* este volumen), asociadas a los valores bajos superficiales de nutrientes y una temperatura superficial del mar de $\sim 25^\circ\text{C}$ (Durazo y Baumgartner 2002).

El inicio de la nutriclina en septiembre-octubre de 1997 para ambos nutrientes (en este trabajo 0.4 μM de PO_4 y 1.0 μM de NO_3) en la línea 127 (fig. 1a) varió de ~ 50 m de profundidad cerca de la costa (estaciones 35–40), hasta aproximadamente 100 m en las estaciones más oceánicas (fig. 2a, b), similar a lo observado en aguas costeras y oceánicas frente a Monterey, California (Castro *et al.* 2002). La elevación de la nutriclina en la estación 127.40 estuvo asociada a un remolino ciclónico en la zona que afectó la columna de agua al menos hasta 100 m de profundidad (Lynn *et al.* 1998).

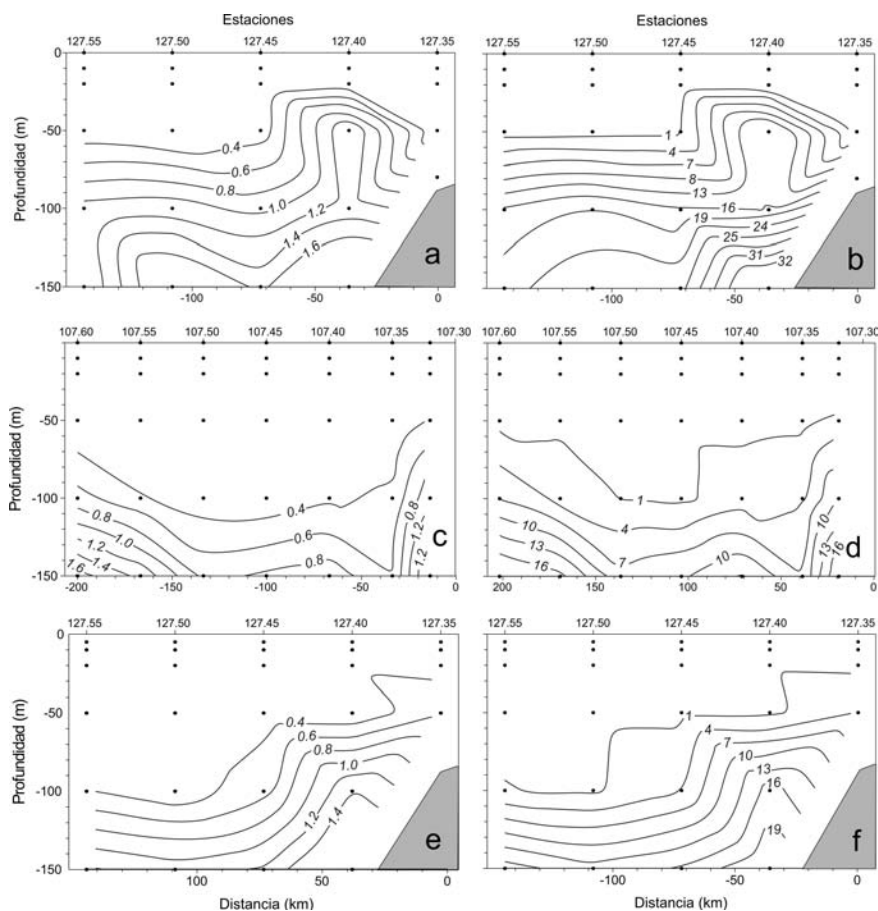
En enero-febrero de 1998, la fase más intensa de El Niño 1997-1998 en la CC (Hayward *et al.* 1999), se presentó un hundimiento de la nutriclina por debajo de 50 m en la zona costera y hasta aproximadamente 100 m de profundidad en la zona oceánica, en las regiones norte y sur (líneas 107 y 127, respectivamente; fig. 1c, d) del área de estudio (fig. 2c–2f). Uno de los efectos de El Niño en la CC consiste en el hundimiento de la nutriclina (Chavez *et al.* 2002), lo cual reduce el

Figura 1. Distribución superficial de nutrientes (μM) en la región IMECOCAL en septiembre-octubre de 1997 (9710) y enero de 1998 (9801): (a, c) fosfatos (PO_4) y (b, d) nitratos (NO_3). Se indican las líneas hidrográficas 107 y 127 de las que se presentan los perfiles verticales en la figura 2.



transporte vertical de nutrientes hacia la zona eufótica y, por ende, disminuye el crecimiento del fitoplancton. Castro *et al.* (2002) observaron una tendencia similar durante el invierno de 1998 cuando se verificó el hundimiento de la nutriclina frente a la región central de California.

Figura 2. Perfiles verticales de nutrientes (μM) en la región de IMECOCAL: (a) fosfatos (PO_4) y (b) nitratos (NO_3) en la línea 127 en septiembre-octubre de 1997 (9710); y (c) fosfatos (PO_4) y (d) nitratos (NO_3) en la línea 107 y (e) fosfatos (PO_4) y (f) nitratos (NO_3) en la línea 127 en enero de 1998 (9801). La localización de las líneas hidrográficas se indica en la figura 1.



Para enero de 1999, los valores superficiales de PO_4 fueron muy similares a los obtenidos en septiembre-octubre de 1997 y enero-febrero de 1998, con concentraciones ligeramente mayores a $0.3 \mu\text{M}$ en las estaciones costeras (fig. 3a). Esta condición estuvo presente en abril de 1999, con una mayor extensión espacial de las concentraciones superficiales $>0.4 \mu\text{M}$, desde frente a Punta Banda (línea 100) hasta Punta Baja (fig. 3d). Durante enero de 1999 se presentó una

elevación de la nutriclina en las líneas 107 y 113 (fig. 3a), con mayor elevación en esta última (fig. 3b, c). En abril de 1999 se observó un efecto más acentuado en las líneas 100 y 107 (fig. 3d), con concentraciones superficiales de $\text{PO}_4 > 0.4 \mu\text{M}$ en las estaciones costeras (30, 35, 40 y 45) de la línea 107 (fig. 3e, f). En la capa de mezcla de la CC el efecto de La Niña en los nutrientes fue más evidente en los NO_3 que en el PO_4 , con una anomalía positiva de $\sim 1.0 \mu\text{M}$ en NO_3 (Goericke *et al.* 2005). En enero de 1998 y 1999 las anomalías en la profundidad de la nutriclina ($\text{NO}_3 \geq 1.0 \mu\text{M}$) frente a la región central de California fueron positivas (aumentó su profundidad) cercanas a 25 m y ~ 10 m, respectivamente, mientras que a partir de abril de 1999 se presentaron anomalías negativas (disminuyó la profundidad de la nutriclina), lo cual continuó en esta región al menos hasta el 2006 (Goericke *et al.* 2007).

El inicio de 2002 fue anómalamente frío en la CC, con intensos afloramientos costeros desde Oregon, EUA, hasta Baja California, México (Schwing *et al.* 2002, Durazo *et al.* este volumen). Al parecer estos procesos relacionados con bajas temperaturas superficiales estuvieron asociados a las continuas condiciones La Niña 1998-1999 y a cambios en la circulación atmosférica del Pacífico Norte, lo que originó una fase fría en la Oscilación Decenal del Pacífico (PDO por sus siglas en inglés). Durante enero de 2002 en la región central de la región IMECOCAL los valores superficiales de PO_4 se incrementaron a $\sim 1.5 \mu\text{M}$, con una zona de gran fertilidad ($\sim 1.0 \mu\text{M}$) desde el sur de San Quintín hasta frente a Punta Eugenia (fig. 4a). Estas concentraciones de PO_4 se relacionaron con altas concentraciones de clorofila-*a* (2.0 mg m^{-3} a 4.0 mg m^{-3}) y biomasa de zooplancton ($200\text{--}250 \text{ ml} \times 1000 \text{ m}^{-3}$) (Schwing *et al.* 2002), y con las mayores anomalías positivas de clorofila-*a* integrada en la columna de agua de la región IMECOCAL en el período 1998-2007 (Gaxiola-Castro *et al.* 2008, Gaxiola-Castro *et al.* este volumen).

En enero de 2002 la línea 100 (fig. 4a) tuvo concentraciones superficiales de PO_4 entre $0.8 \mu\text{M}$ y $1.2 \mu\text{M}$ en toda la sección (fig. 4b), debido a la amplificación del núcleo de la CC con temperaturas superficiales de $\sim 15^\circ\text{C}$ y clorofila-*a* entre 1.0 mg m^{-3} y 2.0 mg m^{-3} (Schwing *et al.* 2002). En la línea 127 (fig. 4a) la nutriclina estuvo a ~ 50 m de profundidad (fig. 4c), con fuertes aportes subsuperficiales generados por procesos de mesoescala y los frentes originados al sur de la región de estudio descritos por Schwing *et al.* (2002), con valores de clorofila-*a* $> 4.0 \text{ mg m}^{-3}$ (Gaxiola-Castro *et al.* este volumen). De acuerdo con Schwing *et al.* (2002) en ese invierno las condiciones del flujo de la CC fueron muy similares a las descritas por Durazo *et al.* (2001) para 2000-2001. Una característica adicional fue

Figura 3. Distribución superficial y perfiles verticales de fosfatos (PO_4 , μM) en la región IMECOCAL: (a) concentración superficial, (b) perfil vertical de la línea 107 y (c) perfil vertical de la línea 113 en enero de 1999 (9901); y (d) concentración superficial, (e) perfil vertical de la línea 100, y (f) perfil vertical de la línea 107 en abril de 1999 (9904). Se indican las líneas hidrográficas 100, 107 y 113 de las que se presentan los perfiles verticales.

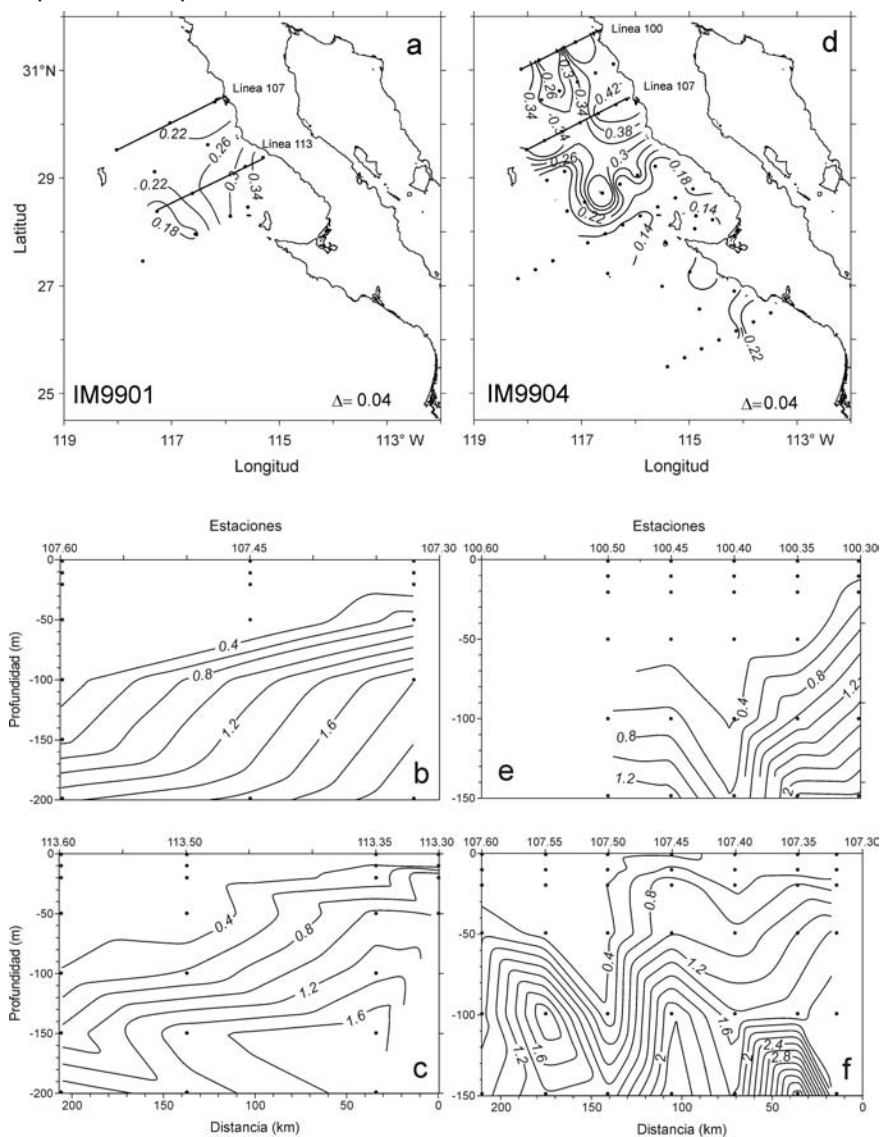
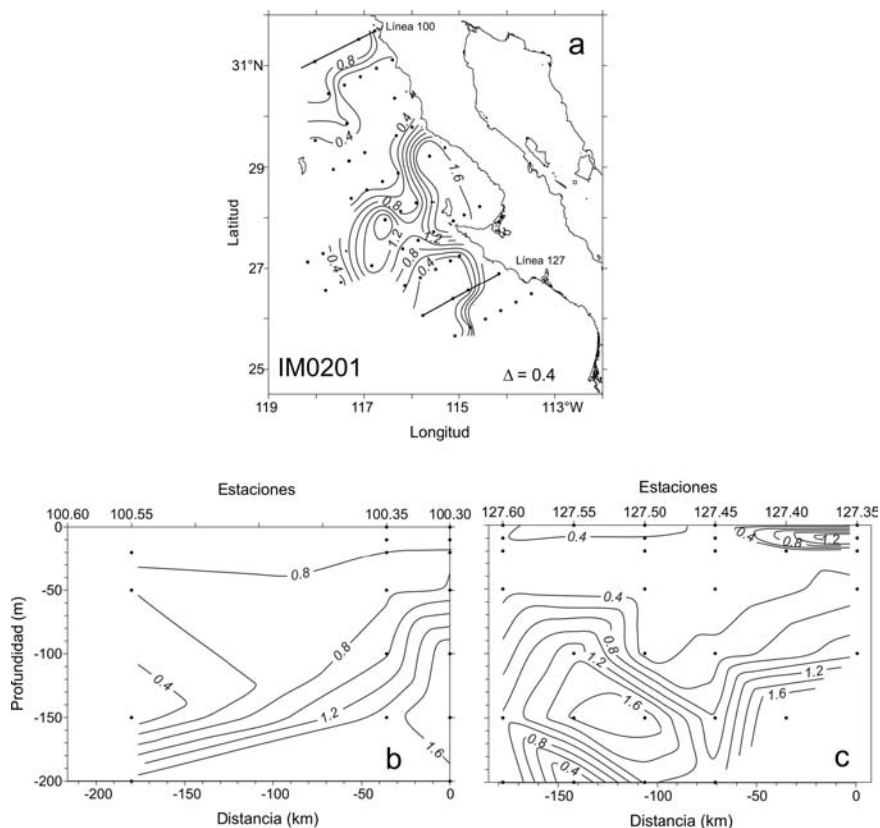


Figura 4. Distribución superficial (a) y perfiles verticales de fosfatos (PO_4 , μM) en la región IMECOCAL de las líneas 100 (b) y 127 (c) durante enero de 2002 (O201). En (a) se indican las líneas hidrográficas 100 y 127 de las cuales se presentan los perfiles verticales.



la intensificación del frente al sur de Punta Eugenia, asociado con alta temperatura ($>18.5^{\circ}\text{C}$) y salinidad (>34.5), bajo contenido de oxígeno disuelto ($<5.0 \text{ ml l}^{-1}$) y alta concentración de clorofila-*a* ($>4.0 \text{ mg m}^{-3}$) a 1.0 m de profundidad (Schwing *et al.* 2002).

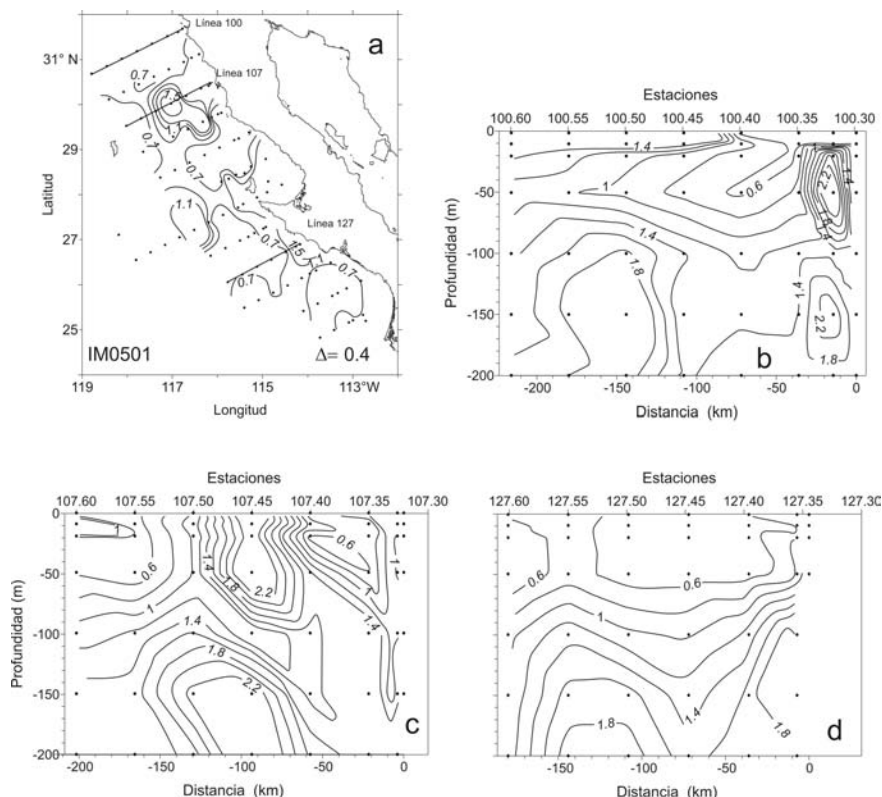
Durante el invierno de 2005 (enero-febrero) la región estuvo fuertemente influenciada por Agua Subártica, con salinidad superficial entre 33.1 y 33.3, y temperatura de $16\text{--}17^{\circ}\text{C}$ desde la línea 100 hasta frente a Isla de Cedros (línea 117) (Durazo *et al.* este volumen). El estado del SCC para esta estación del año se consideró como “normal”, como una señal remanente de la fase fría de la PDO

asociada a la continuación de La Niña 1999 (Goericke *et al.* 2005). La intrusión inusual desde el subártico de un gran volumen de agua fría y menos salina que se inició a partir de 2003 (Durazo *et al.* 2005), permaneció frente a Baja California hasta 2005 (Durazo *et al.* este volumen).

La distribución espacial de PO_4 en enero de 2005 presentó diversas estructuras superficiales con concentraciones $>1.0 \mu\text{M}$ en la sección norte (líneas 100, 107 y 110) y en las localidades oceánicas de la línea 120, así como frente a Punta Abreojos (fig. 5a). En la región IMECOCAL esta gran variabilidad espacial en la hidrografía es más frecuente en verano (julio) que en invierno (enero-febrero) (Durazo *et al.* este volumen). Las estructuras de PO_4 en la región norte estuvieron relacionadas con remolinos ciclónicos y temperaturas superficiales cercanas a $16\text{--}17^\circ\text{C}$, pero con bajas concentraciones de clorofila-*a* $\sim 0.12 \text{ mg m}^{-3}$ (Goericke *et al.* 2005). Los altos valores de PO_4 frente a Punta Eugenia parecen originados por un meandro que se estrechó fuertemente en esta zona; no obstante, los valores de clorofila-*a* cercanos a la superficie fueron similares a los de la zona norte (Goericke *et al.* 2005). Los perfiles verticales de PO_4 de las líneas 100 y 107 (fig. 5a) mostraron el efecto de los remolinos ciclónicos al transportar agua con nutrientes altos hacia las capas superficiales, además de estructuras subsuperficiales muy complejas cercanas a la costa y en la sección media de los transectos (fig. 5b, c). Los remolinos ciclónicos descritos por Goericke *et al.* (2005) tuvieron un efecto en la distribución vertical de PO_4 de la línea 127 (fig. 5a), al hacer más somera la nutriclina en la estación 55 y las estaciones cercanas a la costa (fig. 5d). La clorofila superficial solamente se incrementó ($\sim 0.5 \text{ mg m}^{-3}$) en las estaciones costeras (Gaxiola-Castro *et al.* este volumen), como resultado de los procesos dinámicos que hicieron más somera la nutriclina ($<50 \text{ m}$ de profundidad).

La relación entre PO_4 y NO_3 en los primeros 200 m de profundidad de la CC frente a Baja California tuvo una pendiente de 14.25 ($\text{NO}_3 = 14.25 \text{ PO}_4$; $r^2 = 0.95$; $n = 571$) durante el período 1997–2005, con la abscisa al origen en $\sim 0.3 \mu\text{M}$ (fig. 6a). De acuerdo con la relación propuesta por Redfield ($\text{NO}_3:\text{PO}_4 = 16:1$), el valor al origen de PO_4 podría indicar la presencia de compuestos nitrogenados reducidos diferentes a los NO_3 con concentraciones $\leq 4 \mu\text{M}$ en las capas superficiales del océano. El valor de la pendiente en la relación entre ambos nutrientes (14.25) fue diferente a la razón de Redfield (16) que se obtiene cuando sólo se consideran los efectos biológicos (Alvarez-Borrego *et al.* 1975a, 1975b), y menor en 1.95 unidades a la misma relación obtenida para la primavera de 1974 en la región central del Golfo de California (Alvarez-Borrego *et al.* 1978). Las

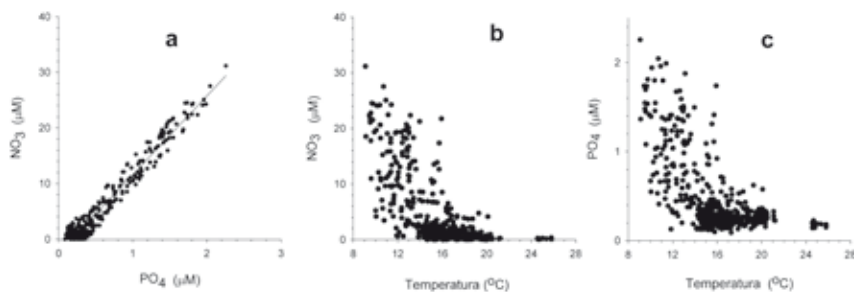
Figura 5. Distribución superficial (a) y perfiles verticales de fosfatos (PO_4 , μM) en la región IMECOCAL de las líneas 100 (b), 107 (c) y 127 (d) durante enero de 2005 (O501). En (a) se indican las líneas hidrográficas 100, 107 y 127 de las cuales se presentan los perfiles verticales.



desviaciones de la relación 16:1 estarían entonces relacionadas a la influencia de diferentes procesos físicos presentes en la región de estudio (surgencias costeras, remolinos ciclónicos y anticiclónicos), que mezclan aguas con características hidrográficas distintas.

En la región frente a Baja California la temperatura cercana a la superficie cuando los NO_3 se encuentran próximos a cero (indetectables por los métodos tradicionales) decrece de sur a norte (Hernández-de-la-Torre *et al.* 2003, Ladah 2003), una condición derivada de la fuente del agua subsuperficial que alcanza la superficie. Los NO_3 y PO_4 disminuyeron con el aumento en temperatura (fig. 6b, c), con valores de nutrientes a temperatura $>24^\circ\text{C}$ correspondientes a octubre de 1997

Figura 6. Relaciones entre PO_4 (μM) y NO_3 (μM), y la temperatura ($^{\circ}\text{C}$), para el periodo 1997–2005 en la región IMECOCAL: (a) PO_4 vs. NO_3 ($\text{NO}_3 = 14.25 \text{ PO}_4 - 2.60$; $r^2 = 0.95$, $n = 571$), (b) temperatura vs. NO_3 , y (c) temperatura vs. PO_4 . Los datos mayores a 24.0°C en (b) y (c) corresponden al crucero de septiembre-octubre de 1997.



separados del conjunto. Un intercepto aproximado para menores concentraciones de ambos nutrientes se podría considerar $\sim 18.5^{\circ}\text{C}$. Cabe notar que los PO_4 nunca fueron menores a $\sim 0.3 \mu\text{M}$ (fig. 6c), lo que indica que en esta región el NO_3 es mayormente limitante para el crecimiento del fitoplancton, y que podrían existir frente a Baja California otras fuentes de nutrientes nitrogenados importantes no consideradas en este análisis.

CONCLUSIONES

Los campos espacial y temporal de los nutrientes inorgánicos disueltos (PO_4 y NO_3) frente a Baja California se vieron fuertemente influenciados por la variabilidad en el flujo de la Corriente de California, por eventos de gran escala temporal y espacial (ciclos El Niño-La Niña) y por procesos de mesoescala, principalmente surgencias costeras, remolinos ciclónicos y anticiclónicos que afectaron la región durante 1997–2005.

Durante el período de estudio y aún con efectos de los ciclos El Niño-La Niña, la capa superficial del océano en la región IMECOCAL tuvo bajas concentraciones de ambos nutrientes (entre 0.2 y $0.4 \mu\text{M}$), por lo que los valores superficiales no son de gran utilidad para caracterizar las variaciones de fertilización en esta región de la Corriente de California. La única excepción a las bajas concentraciones de nutrientes en las aguas superficiales se observó durante 2002, con altos valores de

PO_4 ($\sim 1.0 \mu\text{M}$) como resultado de la intensificación de las surgencias costeras en la Corriente de California.

Los ciclos El Niño-La Niña afectaron la posición vertical de la nutriclina ($\text{PO}_4 = 0.4 \mu\text{M}$; $\text{NO}_3 = 1.0 \mu\text{M}$), sumergiéndola (El Niño) y elevándola (La Niña) principalmente cerca de la costa. Sin embargo, los mayores efectos en la nutriclina fueron los derivados de la presencia de remolinos ciclónicos (que la elevaron) y anticiclónicos (que la sumergieron) en la región frente a Baja California.

La pendiente de la relación $\text{NO}_3:\text{PO}_4$ fue de 14.25, cercana a la razón de Redfield (16), lo que muestra que en esta región se presentaron otros procesos, diferentes a los biológicos (fotosíntesis y respiración), que afectan la proporción entre estos nutrientes.

A partir de las relaciones entre temperatura y NO_3 y PO_4 se mostró que las menores concentraciones de ambos nutrientes presentes en las capas superficiales se relacionaron con agua de $14.0\text{--}21.0^\circ\text{C}$, con un intercepto a $\sim 18.5^\circ\text{C}$. Esta relación con la temperatura varía con la latitud y depende del origen subsuperficial del agua que llega a la superficie.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los oficiales y la tripulación del B/O Francisco de Ulloa del CICESE la ayuda recibida durante las campañas oceanográficas, así como a los estudiantes, técnicos e investigadores participantes. El programa IMECOCAL contó con financiamiento del CICESE y del CONACYT a través de los proyectos G-0041T, G-35326T, 47044, SEP-CONACYT 2003-C02-42569, SEP-CONACYT 23947 y SEMARNAT-CONACYT 23804. Agradecemos especialmente las anotaciones y correcciones a una primera versión del manuscrito hechas por el Dr. Saúl Álvarez-Borrego y por dos revisores anónimos, las cuales ayudaron a mejorar este trabajo.

REFERENCIAS

- Álvarez-Borrego S, Guthrie D, Culbertson CH, Park PK. 1975a. Test of Redfield's model for oxygen-nutrient relationships using regression analysis. *Limnol. Oceanogr.* 20: 795–805.
- Álvarez-Borrego S, Culbertson CH, Park PK. 1975b. Oxygen-nutrient relationships in the Pacific Ocean. *Limnol. Oceanogr.* 20: 806–814.

- Alvarez-Borrego S, Rivera JA, Gaxiola-Castro G, Acosta-Ruiz MJ, Schwartzlose RA. 1978. Nutrientes en el Golfo de California. *Cienc. Mar.* 5: 53–71.
- Castro CG, Collins CA, Waltz P, Pennington JT, Michisaki RP, Friederich G, Chavez FP. 2002. Nutrient variability during El Niño 1997-98 in the California current system off central California. *Progr. Oceanogr.* 54: 171–184.
- Chavez FP, Pennington JT, Castro CG, Ryan JP, Michisaki RP, Schlining B, Walz P, Buck KR, McPhaden A, Collins CA. 2002. Biological and chemical consequences of the 1997–1998 El Niño in central California waters. *Progr. Oceanogr.* 54: 205–232.
- Durazo R, Baumgartner T, Bograd SJ, Collins CA, De la Campa S, Garcia J, Gaxiola-Castro G, Huyer A, Hyrenbach KD, Loya D, Lynn RJ, Schwing FB, Smith RL, Sydeman WJ, Wheeler PA. 2001. The State of the California Current, 2000–2001: a third straight La Niña year. *Calif. Coop. Oceanic Fish. Invest. Rep.* 42: 29–60.
- Durazo R, Baumgartner T. 2002. Evolution of oceanographic conditions off Baja California, 1997–1998. *Progr. Oceanogr.* 54: 7–31.
- Durazo R, Gaxiola-Castro G, Lavaniegos B, Castro-Valdez R, Gómez-Valdés J, Da Silva 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.
- Durazo R, Ramírez-Manguilar AM, Miranda LE, Soto-Mardones LA. 2010. Climatología de variables hidrográficas. En: Gaxiola-Castro G, Durazo R (eds.), *Dinámica del Ecosistema Pelágico frente a Baja California, 1977–2007: Diez años de Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California*. Pp. 25–57.
- Eaton AD, Clesceri L, Rice E, Greenberg A, Franson M (eds.). 2005. *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*. 21 Edición. APHA, AWWA, WEF. 1325 pp.
- 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.
- Gaxiola-Castro G, Cepeda-Morales J, Nájera-Martínez S, Espinosa-Carreón TL, De la Cruz-Orozco ME, Sosa-Avalos R, Aguirre-Hernández E, Cantú-Ontiveros JP. 2010. Biomasa y producción del fitoplancton. En: Gaxiola-Castro G, Durazo R (eds.), *Dinámica del Ecosistema Pelágico frente a Baja California, 1977–2007: Diez años de Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California*. Pp. 59–85.
- Goericke R, Venrick E, Mantyla A, Bograd SJ, Schwing FB, Huyer A, Smith RL, Wheeler PA, Hooff R, Peterson WT, Chavez F, Collins C, Marinovic B, Lo NCH, Gaxiola-Castro G, Durazo R, Hyrenbach KD, Sydeman WJ. 2005. The State of the California Current, 2004–2005: Still cool?. *Calif. Coop. Oceanic Fish. Invest. Rep.* 46: 32–71.

- Goericke R, Venrick E, Koslov T, Lara-Lara JR, Gaxiola-Castro G, Weise MJ, Sydeman WJ, Gómez-Valdés J, Harvey JT, Schwing FB, Bograd SJ, Hyrenbach KD, Collins C, Peterson WT, Emmet R, Bradley RW, Lo NCH. 2007. The state of the California Current, 2006-2007: Regional and local processes dominate. *Calif. Coop. Oceanic Fish. Invest. Rep.* 48: 33-66.
- Haury L, Shulenberger E. 1982. Horizontal transport of phosphorus in the California Current. *Calif. Coop. Oceanic Fish. Invest. 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 M. 1999. The state of the California Current, 1998-1999: transition to cool-water conditions. *Calif. Coop. Oceanic Fish. Invest. Rep.* 40: 29-62.
- Hernández-de-la-Torre B, Gaxiola-Castro G, Alvarez-Borrego S, Gómez-Valdés J, Nájera-Martínez S. 2003. Interannual variability of new production in the southern region of the California Current. *Deep-Sea Res. II* 50: 2423-2430.
- Ladah LB. 2003. The shoaling of nutrient-enriched subsurface waters as a mechanism to sustain primary productivity off Central Baja California during El Niño winters. *J. Mar. Syst.* 42: 145-152.
- Lavaniegos BE, Durazo R, Gaxiola-Castro G, Baumgartner T, Jiménez-Pérez LC, García-Córdova J, González-Esparza MR. 2001. El Niño y el mar. En: Escobar-Briones E, Bonilla M, Badán A, Caballero M, Winckwell A (comp.). *Los efectos del fenómeno El Niño en México 1997-1998*. CONACYT, México. Pp. 181-191.
- 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. *Progr. Oceanogr.* 54: 33-58.
- 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, Koračin 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.
- Lynn RJ, Baumgartner T, García J, Collins CA, Hayward TL, Hyrenbach KD, Mantyla AW, Murphree T, Shankle A, Schwing FB, Sakuma KM, Tegner MJ. 1998. The state of the California Current 1997-1998: transition to El Niño conditions. *Calif. Coop. Oceanic Fish. Invest. Rep.* 39: 25-49.
- Mantyla AW, Bograd SJ, Venrick EL. 2008. Patterns and controls of chlorophyll-a and primary productivity cycles in the Southern California Bight. *J. Mar. Sys.* 73: 48-60.
- Schwing FB, Bograd SJ, Collins CA, Gaxiola-Castro G, Garcia J, Goericke R, Gómez-Valdés J, Huyer A, Hyrenbach KD, Kosro PM, Lavaniegos BE, Lynn RJ, Mantyla AW, Ohman

- MD, Peterson WT, Smith RL, Sydeman WJ, Venrick E, Wheeler PA. 2002. The State of the California Current, 2001-2002: will the California Current system keep its cool, or is El Niño looming? Calif. Coop. Oceanic Fish. Invest. Rep. 43: 31-68.
- Sigman DM, Granger J, DiFiore PJ, Lehmann MF, Ho R, Cane G, van Geen A. 2005. Coupled nitrogen and oxygen isotope measurements of nitrate along the eastern North Pacific margin. *Global Biogeochem. Cycles* 19, GB4022, doi:10.1029/2005GB002458.
- Thomas WH, Seibert DLR. 1974. Distribution of nitrate, nitrite, phosphate and silicate in the California Current region, 1969. Calif. Coop. Oceanic Fish. Invest. Atlas No. 20. 144 pp.
- Torres-Moye G, Alvarez-Borrego S. 1987. Effects of the 1984 El Niño on the summer phytoplankton off a Baja California upwelling zone. *J. Geophys. Res.* 92: 14383-14386.
- Wang C, Fiedler PC. 2006. ENSO variability and the eastern tropical Pacific: A review. *Progr. Oceanogr.* 69: 239-266.