

2008

G. Gaxiola Castro / R. Durazo / B. Lavaniegos / ME. De La Cruz Orozco / R. Millán Núñez /
L. Soto Mardones / J. Cepeda Morales

RESPUESTA DEL ECOSISTEMA PELÁGICO A LA VARIABILIDAD INTERANUAL DEL
OCÉANO FRENTE A BAJA CALIFORNIA

Ciencias Marinas, junio, año/vol. 34, número 002

Universidad Autónoma de Baja California

Ensenada, México

pp. 263–270

Nota de Investigación/Research Note

Pelagic ecosystem response to interannual variability off Baja California

Respuesta del ecosistema pelágico a la variabilidad interanual del océano frente a Baja California

G Gaxiola-Castro^{1*}, R Durazo^{1,2}, B Lavaniegos¹, ME De La Cruz-Orozco¹, E Millán-Núñez¹,
L Soto-Mardones³, J Cepeda-Morales¹

¹ División de Oceanología, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Km 107 Carretera Tijuana-Ensenada, Ensenada, Baja California, México. * E-mail: ggaxiola@cicese.mx

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

³ Facultad de Ciencias, Departamento de Física, Universidad del Bío-Bío, Ave. Collao 1202, Casilla 5-C, CP 4081112, Concepción, Chile.

Abstract

Seasonal anomalies of salinity, phytoplankton chlorophyll *a*, and zooplankton volume off Baja California were examined from data obtained during 2001–2007. The analyses helped to identify a strong effect of physical processes on the pelagic ecosystem, diminishing near surface salinity and water column integrated phytoplankton biomass, and enhancing zooplankton volume. These changes are associated with an increase of the Pacific Decadal Oscillation (PDO) index, characterizing a warm phase of the index from summer 2002 to at least summer 2006. Negative chlorophyll *a* anomalies appear to respond to zooplankton grazing activity, with a possible “top down” effect during this period. Empirical orthogonal functions (EOFs) of Ekman drift reveal the seasonal and interannual patterns that describe the influence of upwelling zones, and there was a strong response to changes in the equatorward wind forcing from 2002 to 2006. The relationship between negative salinity anomalies and the two temporal EOF modes of Ekman drift was evident as a result of relaxation of coastal upwelling during this period. After 2006, the PDO index showed more neutral or negative values, defining the beginning of a cool phase, with positive near-surface salinity anomalies off Baja California.

Key words: climate variability, pelagic ecosystem, California Current, Baja California.

Resumen

Se estudiaron las anomalías estacionales de salinidad, clorofila-*a* y del volumen del zooplancton obtenidas de datos recolectados frente a Baja California de 2001–2007. A partir de su análisis se identificó el efecto de procesos físicos en el ecosistema pelágico, al disminuir la salinidad cercana a la superficie y la biomasa del fitoplancton integrada en la columna de agua, con un aumento en el volumen del zooplancton. Estos cambios se asociaron con un incremento en el índice de la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP), que caracteriza a un periodo cálido del índice a partir del verano de 2002 y al menos hasta el verano de 2006. Las anomalías negativas de clorofila-*a* parecen responder al pastoreo por el zooplancton, con un posible efecto de “arriba hacia abajo” durante este periodo. Las funciones empíricas ortogonales (FEOs) de la deriva de Ekman describieron el patrón estacional e interanual producido en las zonas de afloramientos costeros de 2002 a 2006, como una respuesta a los cambios en el forzamiento del viento hacia el ecuador. Las semejanzas entre las anomalías negativas de salinidad y la variabilidad en los dos modos temporales de las FEOs fueron evidentes en la serie de tiempo, como resultado del relajamiento en los afloramientos costeros durante el periodo cálido. Después de 2006, el índice de la ODP tuvo mayormente valores neutros o negativos, lo que parece delimitar el inicio de un período frío con anomalías positivas de salinidad frente a Baja California.

Palabras clave: Variabilidad climática, ecosistema pelágico, Corriente de California, Baja California.

Introduction

The pelagic ecosystem off Baja California has been influenced by large-scale processes like the 1997–1998 El Niño (Durazo and Baumgartner 2002), which was characterized by low chlorophyll, high sea surface height, high surface salinity, and high sea surface temperature, with opposite conditions during the 1998–1999 La Niña (Espinosa-Carreón *et al.* 2004).

Introducción

El ecosistema pelágico frente a Baja California ha sido influenciado por procesos de gran escala temporal y espacial como El Niño 1997–1998 (Durazo y Baumgartner 2002), el cual dio como resultado bajas concentraciones de clorofila, incremento en el nivel del mar, aumento en la salinidad y la temperatura superficial del océano, con condiciones contrarias

Seasonal and interannual patterns are also found off Baja California, with a maximum of phytoplankton chlorophyll occurring in spring as a result of phytoplankton growth in response to the seasonal maximum in upwelling-favorable winds. Zooplankton biomass is greater in summer and autumn, characterized by an abundance of copepods, euphausiids, and other minor groups, and by a higher abundance of salps during the 1997–1998 El Niño event (Lavaniegos *et al.* 2002).

Events of longer duration and their relationship with large-scale northern Pacific Ocean variability have not been characterized for this region. In this paper, we examine the association between temporal physical forcing and plankton variability off Baja California, in the southern region of the California Current System.

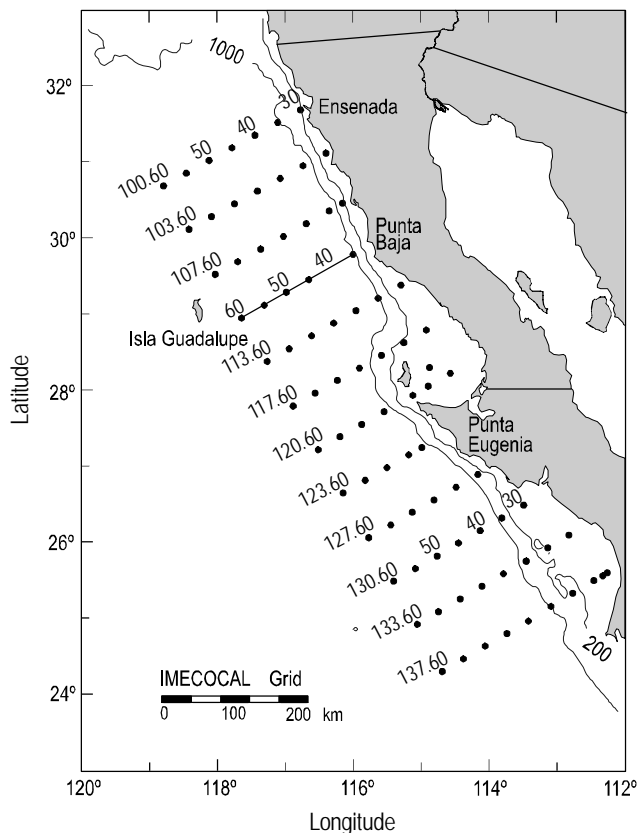


Figure 1. Standard IMECOCAL sampling grid. Black points represent the 85 stations (CalCOFI lines 100 to 137) occupied by the IMECOCAL program since 1997. The northern region for zooplankton volume data is considered from line 100 to line 110. In this study, line 110 off Punta Baja was used as reference of the IMECOCAL zone variability. The 200 and 1000 depths are in meters.

Figura 1. Red estándar de estaciones de IMECOCAL. Los puntos negros representan las 85 estaciones (líneas 100 a 137 de CalCOFI) muestreadas por IMECOCAL desde 1997. Para los datos de volumen del zooplankton se consideraron las estaciones nocturnas de la región norte de la línea 100 a la línea 110. En este trabajo los datos de la línea 110 obtenidos frente a Punta Baja fueron utilizados como referencia de la variabilidad en la región IMECOCAL. Se muestran las isobatas de 200 y 1000 metros.

durante La Niña 1998–1999 (Espinosa-Carreón *et al.* 2004). Los cambios estacionales del ecosistema pelágico son también evidentes frente a Baja California, caracterizados por valores altos de clorofila durante primavera como resultado del crecimiento del fitoplancton debido a la intensificación del esfuerzo del viento favorable a la creación de los afloramientos costeros. La biomasa del zooplancton es mayor en verano y otoño, compuesta principalmente por copépodos, euphausiidos y otros grupos con menores abundancias, así como por gran abundancia de salpas observadas principalmente durante eventos cálidos como El Niño 1997–1998 (Lavaniegos *et al.* 2002).

En el ecosistema pelágico de la región de estudio no se han caracterizado eventos con una mayor extensión temporal que la escala anual, ni tampoco su relación con la variabilidad de gran escala del Océano Pacífico norte. En este trabajo se exploran las consecuencias del forzamiento físico de gran escala sobre la variabilidad temporal del plancton frente a Baja California, en la región sur del Sistema de la Corriente de California (SCC).

Materiales y métodos

El programa Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California (IMECOCAL) realiza cruceros oceanográficos cuatrimestrales en la región sur de la Corriente de California, frente a Baja California, desde octubre de 1997, en las líneas que históricamente ocupó el programa CalCOFI. En este trabajo se utilizó información obtenida de 1997 a 2007 por el programa IMECOCAL, para estudiar las relaciones temporales entre los niveles tróficos menores y algunos procesos físicos en el sur de la Corriente de California frente a Baja California. Goericke *et al.* (2004) concluyeron que las observaciones cuatrimestrales realizadas en la Corriente de California son suficientes para representar los efectos de eventos de gran escala sobre el clima del océano. Los cruceros IMECOCAL fueron realizados sobre una malla de 85 estaciones oceanográficas establecidas originalmente por el programa CalCOFI, a partir de la línea hidrográfica 100 frente a Ensenada hasta la línea 137 en el Golfo de Ulloa (fig. 1). En cada estación hidrográfica se realizaron lances hasta un máximo de 1000 m de profundidad, con una sonda CTD a la cual se acopló una roseta muestreadora con botellas Niskin de 5 L de capacidad. La sonda CTD contenía sensores para medir en forma continua la presión, temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y la fluorescencia del fitoplancton. En los primeros 200 m se recolectó agua por medio de las botellas Niskin a 0, 10, 20, 50, 100, 150 y 200 m de profundidad para el análisis del oxígeno disuelto, clorofila-*a* del fitoplancton y la concentración de nutrientes inorgánicos disueltos.

Para determinar la clorofila-*a* se obtuvo un litro de agua de cada una de las profundidades, la cual se pasó a través de filtros Whatman GF/F para posteriormente ser analizada por el método fluorimétrico (Yentsch y Menzel 1963, Holm Hansen *et al.* 1965) con las modificaciones de Venrick y Hayward (1984). La abundancia de células del fitoplancton se determinó

Material and methods

The Mexican IMECOCAL (Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California) program has been conducting quarterly surveys of the southern region of the California Current, occupying historical CalCOFI lines off Baja California since October 1997. We used IMECOCAL information collected during 1997–2007 to illustrate the temporal links between lower trophic biological levels and physical processes in the southern region of the California Current off Baja California from 2001 to 2007. Goericke *et al.* (2004) established that quarterly observations in the California Current have been sufficient to delineate the effects of major events on ocean climate. Surveys were carried out by sampling a standard grid of about 85 hydrographic stations from CalCOFI line 100 off Ensenada to line 137 in the Gulf of Ulloa (fig. 1). At each station, a CTD/Rosette cast was made to 1000 m (depth permitting) to measure pressure, temperature, salinity, dissolved oxygen, and phytoplankton fluorescence. Water samples from the upper 200 m were collected in 5-L Niskin bottles at 0, 10, 20, 50, 100, 150, and 200 m depths to determine dissolved oxygen, phytoplankton chlorophyll *a*, and dissolved inorganic nutrients.

To determine phytoplankton chlorophyll *a*, 1 L of seawater was filtered onto Whatman GF/F glass filters, and analyzed by the fluorometric method (Yentsch and Menzel 1963, Holm Hansen *et al.* 1965) following the procedure of Venrick and Hayward (1984). For phytoplankton cell counting, 10-m water samples from line 110 (winter surveys) were used, following Utermöhl's (1958) technique. Mainly diatoms and dinoflagellates (>5 μm) were identified.

Zooplankton samples were collected using a bongo net of 0.71-m mouth diameter and 505- μm mesh-size, with oblique tows from 210 m depth to the sea surface. In shallow locations the depth of the tow was from 10 m above the bottom to the surface. Samples were preserved in 4% formaldehyde buffered with sodium borate. Zooplankton biomass was determined following the displacement volume technique (Smith and Richardson 1977). Here we only show zooplankton volume anomalies for the northern region, defined as the region between hydrographic lines 100 to 110. Jerónimo and Gómez-Valdés (2006) characterized this northern zone (29–31°N) as highly influenced by equatorward California Current water. Log-transformed data from all the IMECOCAL cruises were used to estimate seasonal anomalies of zooplankton volumes in the northern region, after removing the long-term seasonal mean from 1997–2007.

For each station, a harmonic curve composed of annual and semi-annual frequencies was fitted to 10-m depth salinity data. To compute harmonic coefficients, all data gathered by the CalCOFI program for the period 1950–1978, as well as those obtained by the IMECOCAL program, were used. Salinity anomalies were computed contrasting measured values to

de agua recolectada a 10 m de profundidad en la línea 110 sólo durante los cruceros de invierno. El análisis del fitoplancton se hizo por el método de Utermöhl (1958), con la identificación principalmente de diatomeas y dinoflagelados >5 μm .

Las muestras para el análisis de zooplancton se recolectaron mediante lances oblicuos desde 210 m de profundidad hacia la superficie con una red bongo de 0.71 m de diámetro y 505 μm de luz de malla. En las estaciones someras la profundidad del arrastre inició 10 m arriba del fondo. Las muestras fueron preservadas con formol al 4% amortiguado con borato de sodio. La biomasa del zooplancton se determinó por la técnica del volumen desplazado de Smith y Richardson (1977). En este trabajo se presentan únicamente las anomalías del volumen desplazado del zooplancton para la región norte de IMECOCAL, definida por el área entre las líneas hidrográficas 100 y 110. Jerónimo y Gómez-Valdés (2006) han caracterizado a esta región norte (29°N a 31°N) como altamente influenciada por el agua de la Corriente de California que fluye hacia el ecuador. Para calcular las anomalías, los datos de volumen del zooplancton de todos los cruceros IMECOCAL realizados durante 1997–2007 se transformaron a su logaritmo y se les sustrajo la media estacional de largo período.

A los datos de salinidad (*S*) tomados a 10 m de profundidad en cada una de las estaciones de la línea 110 se les ajustó un armónico compuesto por las frecuencias anual y semi-anual. Para obtener los coeficientes del ajuste armónico se utilizaron todos los datos de esa línea hidrográfica recolectados por el programa CalCOFI en el periodo 1950–1978, así como los del programa IMECOCAL. Las anomalías de salinidad fueron calculadas sustrayendo los valores medidos para cada estación a las medias estacionales. A partir de estas anomalías de *S* se estimaron las medias para la línea 110. Las anomalías de la clorofila-*a* integrada en la columna de agua para la línea 110 se estimaron de una forma similar, a partir de los datos obtenidos durante los cruceros IMECOCAL de 1998 a 2007.

Se utilizó el índice de gran escala temporal de la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP) como un estimador de la variabilidad interanual del Océano Pacífico frente a Baja California. Los datos de la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP, Mantua *et al.* 1997) fueron obtenidos del sitio de red <http://jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest>.

Resultados

La climatología de las anomalías estacionales (2001–2007) de la salinidad y las variables biológicas medidas en la línea hidrográfica 110 mostraron una fuerte relación con los cambios en el índice de la ODP (fig. 2a). La mayor variabilidad en el ODP se inició después del verano de 2001, cambiando de valores negativos del índice a altamente positivos hacia el final de 2002 e inicios de 2003 (fig. 2a). Después del verano de 2002 y hasta el verano de 2006 el índice de la ODP fue principalmente positivo, con sólo períodos cortos de tendencias negativas en

seasonal means. A line-mean was computed averaging the salinity anomalies obtained for line 110. Water-column integrated phytoplankton chlorophyll *a* anomalies for line 110 were estimated in a similar manner, using the IMECOCAL 1998–2007 data.

The large-scale Pacific Decadal Oscillation (PDO) climate index was used as a proxy to assess the interannual state of the Pacific Ocean off Baja California; PDO (Mantua *et al.* 1997) was obtained from <http://jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest>.

Results

The seasonal climatological anomalies (2001–2007) of the salinity and biological variables measured at northern hydrographic line 110 showed a strong relationship with the PDO index (fig. 2a). The major changes in PDO began after the summer of 2001, from negative values to the highest positive values by the end of 2002 and early 2003 (fig. 2a). After the summer of 2002 and until the summer of 2006, the PDO index was mostly positive, with only small negative periods during autumn 2004 and 2005. From the summer of 2006 to early 2008 the values were mostly negative, with “neutral” and small positive periods after the summer of 2007. Seasonal 10-m salinity anomalies (fig. 2b) showed an approximately inverse trend in relation to the PDO variability, changing from positive to negative from autumn 2002 to spring 2006. After the summer of 2006, positive salinity anomalies were again discerned. The largest negative salinity anomalies (~-0.4) were calculated during the autumn 2003 and winter 2004 surveys (fig. 2b).

High positive phytoplankton chlorophyll *a* anomalies dominated mainly during late 2001 and early 2002, with negative values from 2003 to at least the summer of 2006 (fig. 2c), closely associated with negative salinity anomalies. Negative chlorophyll *a* anomalies were very homogenous, tending to increase slightly during the autumn surveys.

Large phytoplankton cell abundance (diatoms and dinoflagellates) at the line 110 stations surveyed in winter showed higher counts dominated by diatoms in 2001 and 2007 (fig. 2d). Both high phytoplankton cells counts were associated with slightly positive chlorophyll anomalies estimated in the time series (fig. 2c). Phytoplankton abundance from 2002 to 2006 was one order of magnitude lower, with more dinoflagellates than diatoms.

Between 2003 and 2007, high positive zooplankton volume anomalies were obtained in the northern IMECOCAL region, with only some small negative anomalies during winter 2003, winter 2004, and summer 2005 and 2006 (fig. 2e). The magnitudes of the positive zooplankton biomass anomalies were of the same order of magnitude, except during winter 2007, when higher biomass of salps predominated (data not shown).

Discussion

An anomalous low salinity condition began in the northern region of the California Current in 2001 as an upper ocean

los otoños de 2004 y 2005. A partir del verano de 2006 y hasta inicios de 2008 los valores del índice fueron mayormente negativos, con períodos de valores “neutrales” o positivos muy bajos después del verano de 2007. Las anomalías estacionales de la salinidad a 10 m de profundidad (fig. 2b) presentaron una tendencia aproximadamente inversa a la variabilidad del ODP, con un cambio de valores positivos a negativos desde el otoño de 2002 hasta la primavera de 2006. Después del verano de 2006 se observaron de nuevo anomalías positivas en la salinidad. Las mayores anomalías negativas en la salinidad (~-0.4) fueron medidas durante los cruceros de otoño 2003 e invierno de 2004 (fig. 2b).

Durante finales de 2001 y principios de 2002 persistieron mayormente grandes anomalías positivas de clorofila-*a*, con valores negativos a partir de 2003 hasta al menos el verano de 2006 (fig. 2c), estrechamente asociados con anomalías negativas de salinidad. Los valores de las anomalías negativas de la clorofila-*a* fueron muy homogéneos, con tendencia a incrementar muy levemente en los cruceros de otoño.

Las abundancias de células del nano-microfitoplancton (diatomeas y dinoflagelados) recolectadas en la línea 110 durante los cruceros de invierno fueron mayores en 2001 y 2007 (fig. 2d). Estas grandes abundancias de fitoplancton estuvieron asociadas con ligeras anomalías positivas de clorofila-*a* estimadas en la serie de tiempo de largo periodo (fig. 2c). La abundancia de las células del microfitoplancton de 2002 a 2006 fue un orden de magnitud menor, con mayor proporción de dinoflagelados.

Las mayores anomalías positivas del volumen del zooplankton en la región norte de IMECOCAL se obtuvieron de 2003 a 2007, con sólo pequeñas anomalías negativas en el invierno de 2003, el invierno de 2004, y los veranos de 2005 y 2006 (fig. 2e). Los valores de las anomalías positivas de la biomasa del zooplankton estuvieron dentro de un mismo orden de magnitud a lo largo de toda la serie de tiempo, excepto en el invierno de 2007 cuando se presentaron las mayores biomásas debido al predominio de las salpas (datos no mostrados).

Discusión

Las condiciones anómalas de baja salinidad en la Corriente de California (CC) se observaron durante 2001 en la región norteña como una señal predominante en la capa superior del océano (Huyer 2003, Bograd y Lynn 2003), la cual a partir de entonces se fue intensificando. Esta señal fue evidente frente a Baja California al menos desde el verano de 2002, pero se vio confinada solamente a los 200 m superiores del océano (Durazo *et al.* 2005). En el sector sureño de la CC (región IMECOCAL) la intrusión de Agua del Subártico con menor salinidad fue más evidente en el otoño de 2002, cuando se inició la tendencia de anomalías negativas de salinidad que permaneció hasta la primavera de 2006 (fig. 2b). La intrusión de una gran cantidad de agua proveniente del Subártico parece estar acoplada con la fase cálida del índice de la ODP (figs. 2a,

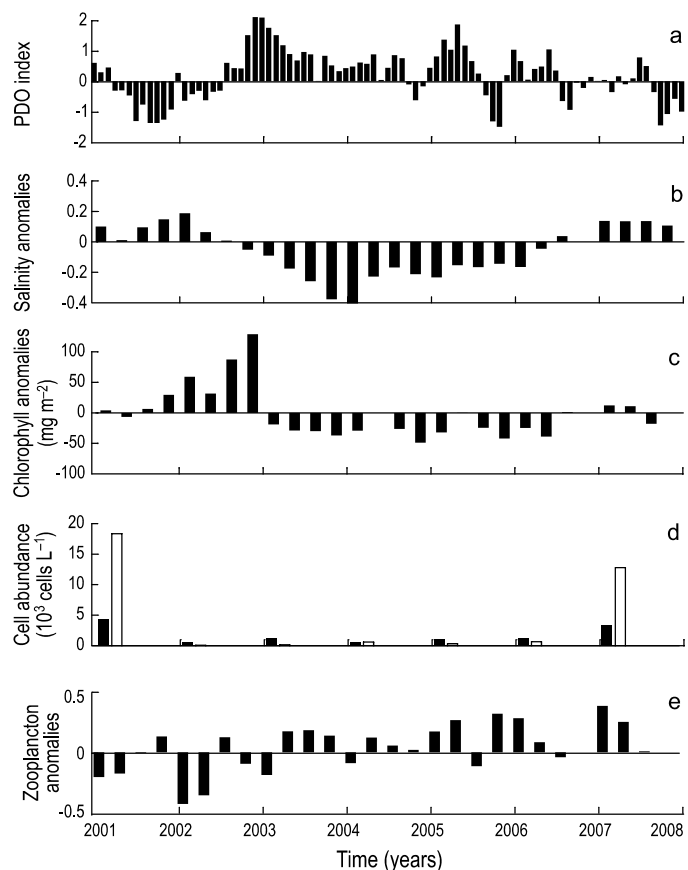


Figure 2. Time series (2001–2007) of: (a) the monthly Pacific Decadal Oscillation (PDO) index, (b) mean 10-m salinity anomalies at line 110, (c) depth-integrated phytoplankton chlorophyll *a* anomalies (mg m^{-2}) at line 110, (d) mean 10-m depth phytoplankton cell abundance ($10^3 \text{ cells L}^{-1}$) for the line 110 stations sampled during each winter survey (dark bars correspond to dinoflagellates and white bars to diatoms), and (e) log-transformed zooplankton volume anomalies for the northern region (lines 100 to 110).

Figura 2. Series de tiempo (2001–2007) de: (a) Datos mensuales del índice de la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP), (b) valor medio de las anomalías de salinidad a 10 m de profundidad para la línea 110, (c) valor medio de las anomalías de la clorofila-*a* integrada en la columna de agua (mg m^{-2}) para la línea 110, (d) media de la abundancia del fitoplancton ($10^3 \text{ cells L}^{-1}$) de 10 m de profundidad en la línea 110 (las barras oscuras corresponden a dinoflagelados y las claras a diatomeas, y (e) valor medio de las anomalías del volumen del zooplancton transformadas a logaritmo para la región norte (líneas 100 a la 110).

feature (Huyer 2003, Bograd and Lynn 2003), and intensified over the next years. Off Baja California it was evident at least since the summer of 2002, but confined to the upper 200 m (Durazo *et al.* 2005). In the southern sector of the California Current (IMECOCAL region), the intrusion of low-salinity Subarctic Water was clearly evident by autumn 2002, when a negative salinity anomaly trend started and remained until spring 2006 (fig. 2b). This Subarctic Water intrusion appears to be coupled with the warm phase of the PDO index (fig. 2a, b). Salinity anomalies changed to positive values after the spring

2b). Sin embargo, para este mismo periodo las anomalías en la temperatura superficial del mar no fueron positivas (datos no mostrados). Las anomalías de salinidad cambiaron a valores positivos a partir de la primavera de 2006, acopladas con valores recurrentemente negativos de la ODP. El cambio a valores positivos de la ODP hacia el final de 2002 estuvo asociado con un evento débil de El Niño, desarrollado en el Océano Pacífico ecuatorial durante 2002–2003 (Goericke *et al.* 2007). El efecto de este evento en la región IMECOCAL fue observado principalmente en la temperatura del océano, con evidencias por debajo de los 100 m de profundidad (Durazo *et al.* 2005).

La clorofila-*a* del fitoplancton se incrementó durante el periodo de transición en la salinidad de 2002, a partir del cual cambió a valores negativos con un desfase temporal con relación a la variación de la fase fría a la cálida en la ODP (fig 2a, c). La clorofila-*a* estacional tuvo anomalías negativas desde 2003 hasta el término del periodo de menor salinidad en el verano de 2006, cuando también cambiaron de signo el índice de la ODP y la anomalía de salinidad. Las anomalías negativas de la clorofila-*a* frente a Baja California parecen ser afectadas por procesos ecológicos de “abajo hacia arriba” y de “arriba hacia abajo”, ambos acoplados con la fase cálida de la ODP y con valores negativos en las anomalías de salinidad. El agua con menor salinidad presente en la región (agua liviana) causa una condición subsuperficial como un tapón que obstruye el transporte vertical de nutrientes hacia la zona eufótica. Las células del nano-microfitoplancton (principalmente diatomeas) responden a estos procesos de limitación de nutrientes, induciendo una baja abundancia celular de 2002 a 2006 (fig. 2d) que también se relacionó con la baja concentración de ácido silícico observada en la Corriente de California acoplada a valores negativos en las anomalías de salinidad (Goericke *et al.* 2005). Las bajas concentraciones de ácido silícico en la zona eufótica pueden afectar el crecimiento de las diatomeas, lo que llevó a una dominancia relativa de los dinoflagelados durante las estaciones invernales de 2002 a 2006.

De acuerdo con Goericke *et al.* (2004) la profundidad de la nutriclina en la CC está fuertemente relacionada con el ciclo en la ODP, siendo más profunda cuando el índice es altamente positivo. Por lo tanto, es posible anticipar bajas concentraciones de nutrientes superficiales en la región IMECOCAL durante la fase cálida de la ODP vigente de 2002 a 2006 y, por consecuencia, bajas abundancias de diatomeas y de dinoflagelados en la zona eufótica. Otro factor que puede inducir a una baja producción del fitoplancton es la disminución de los afloramientos costeros, los cuales transportarían una menor cantidad de agua subsuperficial rica en nutrientes hacia la zona eufótica. En este trabajo utilizamos la velocidad de la deriva zonal de Ekman (U_{EK}) como una aproximación al cálculo del afloramiento costero frente a Baja California. La deriva de Ekman se estimó a partir de los datos del esfuerzo del viento del sensor Quikscat (<ftp://podacc.jpl.nasa.gov>) captados entre agosto de 1999 y febrero de 2008, y las ecuaciones de Madsen (1977). Los primeros dos modos de las funciones empíricas

of 2006, associated with more recurrent negative PDO values. However, for the same period, near sea surface temperature anomalies were not significantly positive (not shown). The positive PDO index change by the end of 2002 was related to a weak El Niño that developed in the equatorial Pacific during 2002–2003 (Goericke *et al.* 2007). The effect of this weak El Niño was observed in the IMECOCAL region mainly in temperature, but only down 100 m depth (Durazo *et al.* 2005).

Phytoplankton chlorophyll *a* increased during the 2002 salinity transitional period, then changed to negative values that lagged the PDO switching from a cold to a warm phase (fig. 2a, c). Seasonal phytoplankton chlorophyll *a* showed negative anomalies from 2003 to almost the whole period of freshening, ending in summer 2006, when the PDO index and salinity anomaly also changed sign. Negative phytoplankton chlorophyll *a* anomalies off Baja California appear to be affected by “bottom up” and “top down” processes, both of them coupled with a warm phase of the PDO index and negative salinity anomalies. Lower surface salinity (lighter water) in the region develops a subsurface-like plug condition that hinders the vertical transport of nutrients to the euphotic zone. Large phytoplankton cells responded to these processes, with very low growth (mainly diatoms) from 2002 to 2006 (fig. 2d), also related to the low concentrations of silic acid associated with negative salinity anomalies reported for the California Current (Goericke *et al.* 2005). Low concentrations of silic acid may have affected the growth of large diatoms, resulting in the relative dominance of dinoflagellate cells during the 2002–2006 winter seasons.

According to Goericke *et al.* (2004), nutricline depth in the California Current reflects the PDO cycle, deepening when the index is strongly positive. We would therefore anticipate low nutrient concentrations in the IMECOCAL zone during the 2002–2006 warm phases of the PDO, and consequently we would expect low diatom and dinoflagellate biomass in the euphotic zone. Another factor that may yield low phytoplankton production is a diminishing of coastal upwelling, causing less nutrient-rich subsurface water to be transported to the euphotic zone. The zonal Ekman drift velocity (U_{EK}), computed following Madsen (1977), using scatterometer Quikscat wind stress (<ftp://podacc.jpl.nasa.gov>) from August 1999 to February 2008, was used here as a proxy for coastal upwelling. The first two modes of empirical orthogonal functions (EOFs) obtained from monthly anomalies of the Ekman drift are shown in figure 3. The spatial pattern of the first EOF mode anomaly off Baja California accounts for 58% of the total variance, and describes an eastward direction with persistent downwelling, characteristic during the period (fig. 3a, c), related to the negative salinity and chlorophyll *a* anomalies (fig. 2b, c). Time series of the first mode showed maximum values during late 2000 and early 2001, with similar patterns in 2004–2005 and 2006–2007 (fig. 3c). After the summer of 2006 there was an increase to positive values in the first mode, which remains until 2008. The second EOF spatial mode accounts for 20% of the total variance, and isolates the coastal

ortogonales (FEOs) obtenidos a partir de las anomalías mensuales de la deriva de Ekman se presentan en la figura 3. El patrón espacial de la anomalía del primer modo de las FEOs frente a Baja California contribuyó con 58% de la variancia total y describió una dirección hacia el este con características muy persistentes de hundimiento durante el periodo (fig. 3a, b), relacionadas además con las anomalías negativas de salinidad y clorofila-*a* (fig. 2b, c). La serie de tiempo del primer modo mostró los valores máximos durante finales de 2000 e inicios de 2001, con patrones similares durante 2004–2005 y 2006–2007 (fig. 3c). Después del verano de 2006 hubo un incremento hacia valores positivos en el primer modo, el cual permaneció hasta 2008. El segundo modo espacial de las FEOs contribuyó con 20% de la variancia total, el cual aisló la región de IMECOCAL cercana a la costa en dos zonas claramente delimitadas hacia el norte y sur de Punta Eugenia (fig. 3b). El agua transportada hacia el este parece ser un fenómeno más común en la región sur de IMECOCAL (figs. 3b y 3c), pero con valores muy bajos.

Las anomalías de la biomasa del zooplancton calculadas de 2002 a 2006 para la región norteña mostraron un patrón casi inverso al de la serie de la clorofila-*a* (figs. 2c y 2e), debido a un posible control “de arriba hacia abajo” sobre el fitoplancton. Las actividades de pastoreo por el zooplancton podrían relacionarse con los niveles bajos observados en la clorofila-*a* del fitoplancton. El comportamiento opuesto fue observado particularmente durante 2002, debido a que anomalías extremadamente bajas en el volumen del zooplancton correspondieron a anomalías altamente positivas de clorofila-*a*. Peterson *et al.* (2006) encontraron bajas abundancias de copépodos durante casi todo 2002 en el océano frente a Baja California, excepto en abril. También se encontraron bajas abundancias de eufáusidos durante los cruceros de enero y julio de 2002. Considerando que tanto los copépodos como los eufáusidos son los pastoreadores más importantes sobre el fitoplancton, sus bajas abundancias podrían significar una disminución en la presión de pastoreo. Algunos valores negativos y positivos de las anomalías del volumen del zooplancton no siempre estuvieron inversamente relacionados con las anomalías de biomasa del fitoplancton. Lo anterior fue más evidente al inicio de 2002 y durante algunos muestreos invernales, cuando ambas biomásas no se relacionaron, particularmente en enero de 2002 cuando se observó un incremento substancial en el picofitoplancton (<5 μm) de la línea 110, compuesto principalmente por células de *Prochlorococcus*, *Synechococcus* y picoeucariontes (datos no mostrados).

Goericke *et al.* (2007) han establecido que los procesos regionales y locales dominaron sobre el ecosistema pelágico de la CC de 2006 a 2007. Después de 2007 parece estar presente un cambio hacia condiciones frías en la CC fundamentado en los valores negativos del índice de la ODP (fig. 2a), lo que llevaría a una condición oceanográfica similar a la de 2001 e inicios de 2002. Sin embargo, los cambios actuales observados en la región IMECOCAL son sólo evidentes en el incremento de

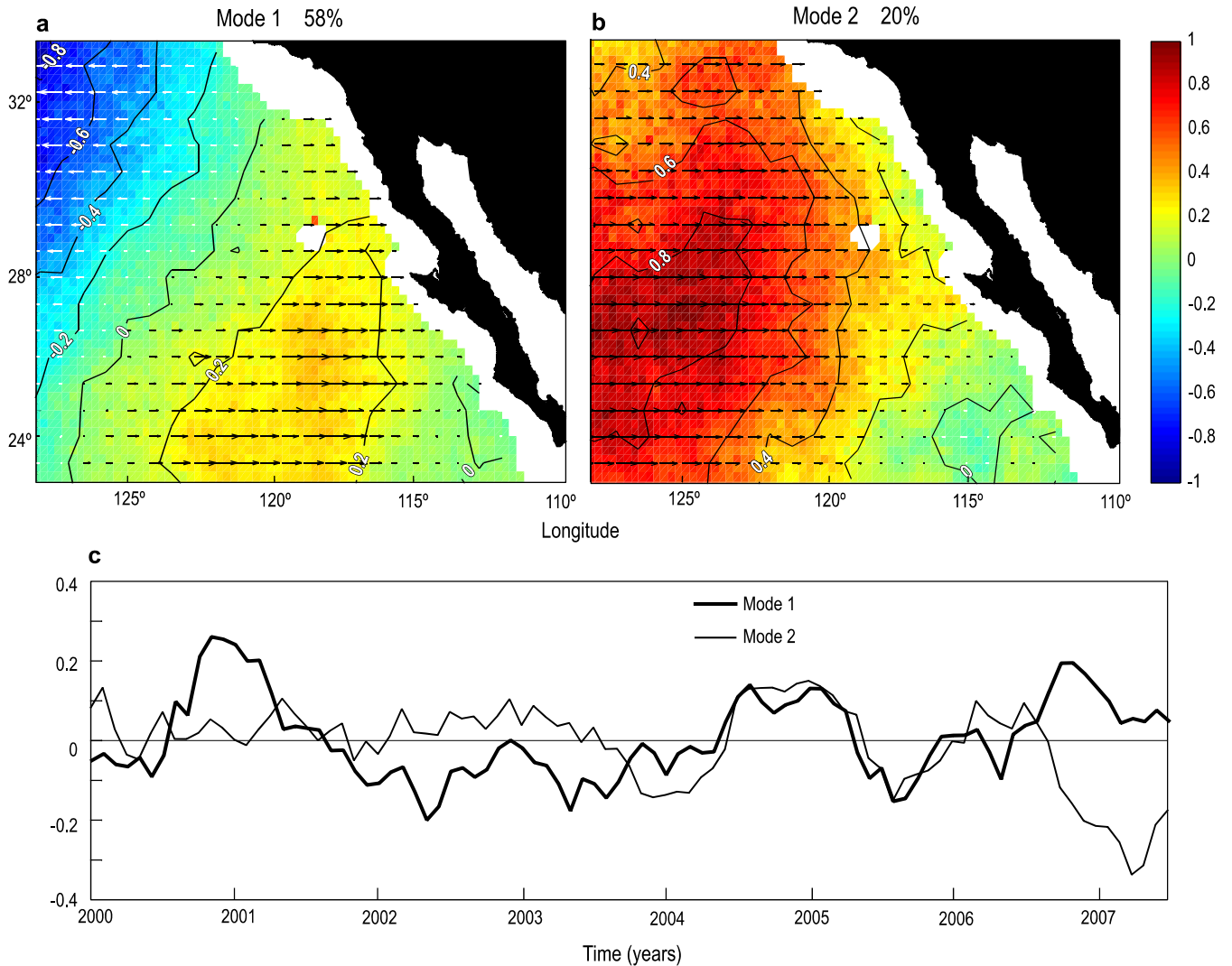


Figure 3. Empirical orthogonal functions (EOFs) for the interannual anomalies of the zonal Ekman drift (U_{EK} ; $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) in the IMECOCAL zone from 2000 to 2007: (a) spatial pattern of the first EOF mode, positive eastward; (b) spatial pattern of the second EOF mode, positive eastward; and (c) 2000–2007 time series of the first two EOF modes.

Figura 3. Funciones empíricas ortogonales (FEOs) de las anomalías de la deriva de Ekman (U_{EK} ; $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) en la zona IMECOCAL de 2000 a 2007: (a) patrón espacial del primer modo de las FEOs, con dirección positiva hacia el este; (b) Patrón espacial del segundo modo de las FEOs, con dirección positiva hacia el este; y (c) Series temporales de los primeros dos modos de las FEOs de 2000 a 2007.

IMECOCAL region, with two zones clearly delineated to the north and south of Punta Eugenia (fig. 3b). Eastward water transport appears to be more regular for the southern IMECOCAL region (fig. 3b, c), but with very low values.

Zooplankton biomass anomalies calculated for the northern region from 2002 to 2006 showed an almost inverse pattern than that of chlorophyll *a* (fig. 2c, e), as a possible “top down” control on phytoplankton. Grazing activity by zooplankton could be related to low phytoplankton chlorophyll *a* levels. The opposite pattern was particularly remarkable during 2002, because extremely low zooplankton anomalies correspond to high positive chlorophyll *a* anomalies. Peterson *et al.* (2006) showed that a low abundance of copepods occurred throughout 2002, except in April, in Baja California waters. Euphausiids

las abundancias de diatomeas, las anomalías positivas de salinidad y la biomasa del zooplancton (principalmente salpas), aún sin una anomalía positiva aparente en la clorofila-*a* del fitoplancton.

Agradecimientos

El programa IMECOCAL está principalmente financiado por el CONACYT y el CICESE. Agradecemos a los oficiales y a la tripulación del B/O *Francisco de Ulloa* del CICESE, así como también a los técnicos y estudiantes que participaron en los cruceros. Las campañas de IMECOCAL fueron apoyadas por los proyectos CONACYT G004IT, G-35326T, SEP-2003-C02-42569, SEP-23947 y por el proyecto SEMARNAT-47044.

also occurred in low numbers during January and July 2002. Considering that copepods and euphausiids are the main phytoplankton grazers, their low abundance would relax the grazing pressure on phytoplankton biomass. Some negative and positive zooplankton volume anomalies were not always inversely linked with the phytoplankton biomass anomalies. This was more noticeable during some winter seasons and in early 2002, when both biomasses were unconnected, particularly in January 2002 when an increase in picoplankton cells (<5 µm) was observed at line 110, represented mainly by *Prochlorococcus*, *Synechococcus* and picoeukaryotes (data not shown).

It has been established that regional and local processes dominated the pelagic ecosystem of the California Current during 2006–2007 (Goericke *et al.* 2007). After 2007, a shifting to a cool phase, revealed by strong negative values of the PDO index similar to those obtained in 2001 and early 2002, appears to be present in the California Current (fig. 2a). However, the changes observed in the IMECOCAL region are restricted to diatom abundance and positive anomalies of salinity and zooplankton biomass (mainly salps), but are not yet apparent in positive phytoplankton chlorophyll *a* anomalies.

Acknowledgements

The IMECOCAL surveys were supported by the following projects: CONACYT G0041T, CONACYT G-35326T, SEP-2003-C02-42569, SEP-23947, and SEMARNAT-47044. We thank the officers and crew of the CICESE R/V *Francisco de Ulloa*, as well as the students and technicians that participated in the surveys. The second author acknowledges receipt of a sabbatical scholarship from CONACYT. The reviewers' comments were highly appreciated.

References

- Bograd SJ, Lynn RJ. 2003. Anomalous subarctic influence in the southern California Current during 2002. *Geophys. Res. Lett.* 30: 8020.
- Durazo R, Baumgartner TR. 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.
- 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: C030389, doi: 10.1029/2003JC002105.
- Goericke R, Bograd SJ, Gaxiola-Castro G, Gómez-Valdés J, Hooff R, Huyer A, Hyrenbach KD, Lavaniegos BE, Mantyla A, Peterson WT, Schwing FB, Smith RL, Sideman WJ, Venrick E, Wheeler PA. 2004. The state of the California Current, 2003–2004: A rare “normal” year. *CalCOFI Rep.* 45: 27–60.
- Goericke R, Venrick E, Mantyla A, Bograd SJ, Schwing FB, Huyer A, Smith RL, Wheeler PA, Hoff 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.
- Goericke R, Venrick E, Koslow T, Sydeman WJ, Schwing FB, Bograd SJ, Peterson WT, Emmett R, Lara-Lara JR, Gaxiola-Castro G, Gómez-Valdés J, Hyrenbach KD, Bradley RW, Wiese MJ, Harvey JT, Collins C, Lo NCH. 2007. The state of the California Current, 2006–2007: Regional and local processes dominate. *CalCOFI Rep.* 48: 33–66.
- Holm Hansen O, Lorenzen C, Holmes R, Strickland J. 1965. Fluorometric determination of chlorophyll. *J. Cons. Perm. Int. Expl. Mer* 30: 3–15.
- Huyer A. 2003. Preface to special section on enhanced subarctic influence in the California Current, 2002. *Geophys. Res. Lett.* 30: 8019.
- Jerónimo G, Gómez-Valdés J. 2006. Mean temperature and salinity along an isopycnal surface in the upper ocean off Baja California. *Cienc. Mar.* 32: 663–671.
- 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.
- Madsen OS. 1977. A realistic model of wind-induced Ekman boundary layer. *J. Phys. Oceanogr.* 7: 248–255.
- Mantua NJ, Hare SR, Zhang Y, Wallace JM, Francis RC. 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 78: 1069–1079.
- Peterson WT, Emmett R, Goericke R, Venrick E, Mantyla A, Bograd SJ, Schwing FB, Hewitt R, Lo N, Watson W, Barlow J, Lowry M, Ralston S, Fomet KA, Lavaniegos BE, Syderman WJ, Hyrenbach D, Bradley RW, Warzybok P, Chávez F, Hunter K, Benson S, Weisen M, Harvey J, Gaxiola-Castro G, Durazo R. 2006. The State of the California Current, 2005–2006: Warm in the North, cool in the South. *CalCOFI Rep.* 47: 30–74.
- Smith PE, Richardson SL. 1977. Técnicas modelo para prospecciones de huevos y larvas de peces pelágicos. *FAO Documentos Técnicos de Pesca No. 175*, 107 pp.
- Utermöhl H. 1958. Zur vervollkommnung der quantitaven phytoplankton-methodick. *Verh. Int. Ver. Limnol.* 9: 1–38.
- Venrick EL, Hayward TL. 1984. Determining chlorophyll on the 1984 CalCOFI surveys. *CalCOFI Rep.* 25: 74–79.
- Yentsch CS, Menzel DW. 1963. A method for the determination of phytoplankton chlorophyll and phaeophytin by fluorescence. *Deep-Sea Res.* 10: 221–231.

Recibido en marzo de 2008;
aceptado en mayo de 2008.