

## Efectos del ENSO en la producción primaria frente a Baja California

### ENSO effects on primary production off Baja California

Benigno Hernández de la Torre<sup>1, 2\*</sup>

Gilberto Gaxiola-Castro<sup>2</sup>

Sila Nájera-Martínez<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento del Medio Físico General y Marino  
Dirección General de Investigación de Ordenamiento Ecológico  
y Conservación de los Ecosistemas  
Instituto Nacional de Ecología  
México, D.F.

<sup>2</sup> Departamento de Oceanografía Biológica  
División de Oceanología  
Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada  
Km. 107 Carretera Tijuana-Ensenada  
Ensenada, Baja California, México  
\* E-mail: bhernan@cicese.mx

*Recibido en abril de 2003; aceptado en enero de 2004*

#### Resumen

La variabilidad de largo período de la producción primaria total ( $P_T$ ) se presenta en una serie de tiempo de 1969 a 2002 para el norte de Baja California, asociada con eventos ENSO (El Niño/Oscilación del Sur).  $P_T$  se calculó con un modelo empírico en seis cuadrículas de la zona costera y oceánica, en donde se agruparon algunas estaciones de la red CalCOFI-IMECOCAL. En general las anomalías de  $P_T$  fueron positivas de 1970 a 1975 con un promedio de 0.024 GtC año<sup>-1</sup> para todas las líneas.  $P_T$  mostró un cambio a anomalías negativas a partir del ENSO 1976–77, cuyo efecto permaneció al menos 20 años, acentuadas por los ENSO 1982–84, 1987–88, 1992–93 y 1997–98. La producción media anual en la zona de estudio disminuyó en ~20% durante los diferentes ENSO. El cambio de período largo (1976–97) impactó la zona de estudio y originó una reducción de 0.007 GtC año<sup>-1</sup> (~70%), en promedio, con relación a la alta producción del inicio de los años setenta (1970–75). El promedio de  $P_T$  durante 1997–98 fue de 0.014 GtC año<sup>-1</sup>, con un incremento durante 1999–2002 (0.023 GtC año<sup>-1</sup>) hacia valores similares a los estimados para el inicio de los años setenta. Con base en el Análisis de Épocas Superpuestas se comprobó la asociación entre las fluctuaciones en  $P_T$  y los eventos ENSO, con una alta probabilidad de que haya un incremento en  $P_T$  un año antes (–1), disminuya durante el año de afectación (0) y se recupere un año después (+1) de la incidencia del ENSO en la región frente a Baja California. La serie de tiempo de período largo (1950–2002) de  $P_T$  presentó la mayor varianza en el período de 1.43 años. La biomasa de peces pelágicos menores estimada entre 1970 y 2002 con los valores de  $P_T$  para las regiones costeras de las líneas 90 y 107 disminuyó por debajo de  $200 \times 10^3$  toneladas después de 1976–77, con la tendencia a recuperarse a partir de 2000.

*Palabras clave:* producción primaria total, ENSO, épocas superpuestas, Corriente de California, Baja California.

#### Abstract

Long-term time series of total primary production ( $P_T$ ) from 1969 through 2002, associated with ENSO (El Niño/Southern Oscillation) events are presented for the region off northern Baja California.  $P_T$  was calculated using an empiric model in six inshore and offshore grids of the CalCOFI-IMECOCAL network in the southern California Current. In general,  $P_T$  anomalies were positive from 1970 to 1975, with a period average of 0.024 GtC yr<sup>-1</sup> for the study lines.  $P_T$  changed to negative anomalies after ENSO 1976–77, with a decrease in productivity for at least 20 years, reinforced by the ENSO events of 1982–84, 1987–88, 1992–93 and 1997–98. Annual time series of  $P_T$  anomalies show that during the ENSO events, values diminished by ~20% in the study area. Long-term  $P_T$  changes (1976–97) originated a reduction of 0.007 GtC yr<sup>-1</sup> (~70%), in relation to the higher production of the early 1970s (1970–75). Mean  $P_T$  during 1997–98 was 0.014 GtC yr<sup>-1</sup>, increasing during 1999–2002 (0.023 GtC yr<sup>-1</sup>) toward similar values calculated for the early 1970s. Superposed Epoch Analysis proved the statistical association between the ENSO events and  $P_T$ , with the probability of high production one year before (–1), diminishing during the key year (0), and recovering one year after (+1) the event off Baja California. Complete (1950–2002)  $P_T$  time series showed greatest variance in the

1.43-year period. Small pelagic fish biomass estimated for inshore stations of lines 90 and 107 dropped below  $200 \times 10^3$  tons after the 1976–77 period, with a recovering trend after 2000.

*Key words:* total primary production, ENSO, Superposed Epoch Analysis, California Current, Baja California.

## Introducción

La Corriente de California (CC) forma parte del sistema de corrientes con flujos hacia el ecuador llamados “corrientes con frontera este”, los cuales han sido reconocidos por su alta productividad oceánica (Barber y Smith, 1981; Carr, 2002). La riqueza pesquera en estas áreas es consecuencia de los altos niveles de producción primaria ocasionados por sistemas de surgencias costeras, los cuales aportan altas concentraciones de nutrientes inorgánicos hacia la zona eufótica (ZE). El Sistema de la Corriente de California (SCC) aporta una producción primaria total ( $P_T$ ) de aproximadamente  $0.04 \text{ GtC año}^{-1}$ , un orden de magnitud menor a lo estimado para otras corrientes con frontera este como las Corrientes de Humboldt, Canarias y Benguela (Carr, 2002). En estas cuatro zonas se llevan a cabo las principales pesquerías del mundo, entre ellas las de pelágicos menores como la sardina y la anchoveta (Bakun, 1996).

Los cálculos globales de producción primaria permiten estimaciones medias de las capturas anuales de peces (Pauly y Christensen, 1995), además de ser utilizados para examinar la transferencia de energía y la variabilidad en las eficiencias tróficas (Smith y Eppley, 1982). La información sobre  $P_T$  y los estudios de su variación en el tiempo se han utilizado como un importante estimador de las capturas de túnidos en el área del Pacífico Ecuatorial y una herramienta para calcular el potencial pesquero del océano (Turk *et al.*, 2001; Carr, 2002).

El fenómeno El Niño/Oscilación del Sur (ENSO) es el resultado de un complejo sistema de fluctuaciones climáticas entre océano y atmósfera (Troup, 1965; Rasmusson y Wallace, 1983; Rasmusson *et al.*, 1990). El ENSO es considerado actualmente como la señal dominante del cambio global para escalas de tiempo que van de meses a años (Philander, 1983). Los efectos de los años ENSO en la capa pelágica del océano están asociados con disminuciones en la abundancia del fitoplancton (Feldman *et al.*, 1984) y en la producción primaria (Barber y Chavez 1983; Barber *et al.*, 1985). El principal efecto sobre el fitoplancton está relacionado con decrementos en la concentración de nutrientes inorgánicos en la ZE (Dugdale, 1967), lo cual ha sido plenamente demostrado durante los ENSO de 1982–83 (Barber y Chavez, 1986) y 1992–93 (Chavez, 1996). El SCC y la zona frente a Baja California son también afectados por estas perturbaciones de gran escala espacial y temporal (Millán-Núñez *et al.*, 1996).

El propósito del presente trabajo es estudiar la variabilidad interanual de  $P_T$  de 1969 a 2002, con base en el modelo propuesto por Smith y Eppley (1982). Se muestra la significancia estadística de los resultados aportados por el modelo en relación con los eventos ENSO y se propone una serie de tiempo de producción primaria total anual, en giga toneladas de carbono por año ( $\text{GtC año}^{-1}$ ), para los primeros 300 km fuera de la

## Introduction

The California Current forms part of the system of equatorward-flowing currents called “eastern boundary currents”, known for their high oceanic productivity (Barber and Smith, 1981; Carr, 2002). Fish abundance in these areas is the result of high levels of primary production caused by coastal upwelling systems, which supply high concentrations of inorganic nutrients to the euphotic zone. The California Current System contributes a total primary production ( $P_T$ ) of approximately  $0.04 \text{ GtC yr}^{-1}$ , one order of magnitude less than that estimated for the other major eastern boundary currents: Humboldt, Canary and Benguela currents (Carr, 2002). The world’s main fisheries are conducted in these four zones, among them that of small pelagics like sardine and anchovy (Bakun, 1996).

Overall calculations of primary production can be used to estimate annual fish catches (Pauly and Christensen, 1995), and to determine energy transfer and variability in trophic efficiencies (Smith and Eppley, 1982). Information on  $P_T$  and its variation in time has been used as an important estimator of tunid catches in the equatorial Pacific and as a tool to calculate the ocean’s fishery potential (Turk *et al.*, 2001; Carr, 2002).

The El Niño/Southern Oscillation (ENSO) phenomenon is the result of a complex system of climatic fluctuations between the ocean and atmosphere (Troup, 1965; Rasmusson and Wallace, 1983; Rasmusson *et al.*, 1990), and it is currently considered the main sign of global change in time scales of months to years (Philander, 1983). The effects of ENSO years on the ocean’s pelagic layer are associated with reduced phytoplankton abundance (Feldman *et al.*, 1984) and primary production (Barber and Chavez, 1983; Barber *et al.*, 1985). The principal effect on phytoplankton is related to a decrease in the concentration of inorganic nutrients in the euphotic zone (Dugdale, 1967), as clearly demonstrated during the ENSO events of 1982–83 (Barber and Chavez, 1986) and 1992–93 (Chavez, 1996). The California Current System and the area off Baja California are also affected by these large-scale spatial and temporal perturbations (Millán-Núñez *et al.*, 1996).

This study aims to study the interannual variability of  $P_T$  from 1969 to 2002, based on the model proposed by Smith and Eppley (1982). We show the statistical significance of the results provided by the model in relation to ENSO events and propose a time series of total annual primary production, in giga-tons of carbon per year ( $\text{GtC yr}^{-1}$ ), for the first 300 km offshore, in the area between  $28^\circ\text{N}$  and  $32^\circ\text{N}$  off Baja California. Based on these estimates of variability in primary production and Pauly and Christensen’s (1995) model, modified by Carr (2002), we quantify the small pelagic biomass

costa, en el área comprendida entre 28°N–32°N frente a Baja California. Con base en estas estimaciones de variabilidad en la producción primaria y el modelo de Pauly y Christensen (1995) modificado por Carr (2002), se realiza un ejercicio que cuantifica la biomasa de pelágicos menores disponible para la pesca frente al norte de Baja California, sin considerar las condiciones intrínsecas que éstos requieren para su desarrollo y crecimiento (hábitat, amplitud del nicho, etc.), suponiendo que el único factor que limita el desarrollo de estos peces es la producción del fitoplancton.

## Materiales y métodos

A partir de las estaciones de la red CalCOFI (California Cooperative Fisheries Investigations, <http://www.calcofi.org>) e IMECOCAL (Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California, <http://imecocal.cicese.mx>) se seleccionaron seis cuadrículas agrupándolas en estaciones cercanas y alejadas de la costa (fig. 1) de acuerdo al criterio de Lynn y Simpson (1987) y Millán-Núñez *et al.* (1996).

La producción primaria total ( $P_T$ ;  $gC\ m^{-2}\ d^{-1}$ ) se calculó a partir del modelo empírico propuesto por Smith y Eppley (1982) para la Ensenada del Sur de California (ESC):  $P_T = \exp(-3.78 - 0.372\ \Delta T + 0.227\ D)$ , siendo  $\Delta T$  la anomalía mensual de la temperatura superficial del mar (TSM; °C) definida como el valor puntual menos la media histórica para cada mes de los años analizados (1969–2002); y  $D$  la duración media del día-luz (horas) para cada mes. A los datos mensuales de  $P_T$  se les aplicó un promedio móvil de 12 meses para substraer la tendencia estacional. Las fluctuaciones de baja frecuencia de la TSM, medidas en el muelle de la Institución Scripps de Oceanografía (La Jolla, California) e incluidas en el modelo de Smith y Eppley (1982), están altamente correlacionadas con la variabilidad de los datos de temperatura superficial recolectados en las costas de La Salina (Pineda y López, 2002) y Punta Baja, Baja California (~30°N; al sur de la línea 107 en este estudio) (F. Tapia, comunicación personal, WHOI), con una alta correlación entre la ESC hasta Punta Abreojos (Barton, 1985), Baja California Sur, al sur de la línea 120 y resultados publicados de la distribución vertical de clorofila por Millán *et al.* (1997).

Para el cálculo regional total de la producción de carbono expresada en  $GtC\ año^{-1}$  ( $1Gt = 10^{15}\ g$ ) se utilizó un área de 136,300  $km^2$ , la cual cubre los primeros 300 km mar adentro frente a Baja California (28°N–32°N). Esta área es similar a la seleccionada por Carr (2002), quien utilizó un modelo diferente al propuesto en el presente trabajo para estimar  $P_T$  en la Corriente de California.

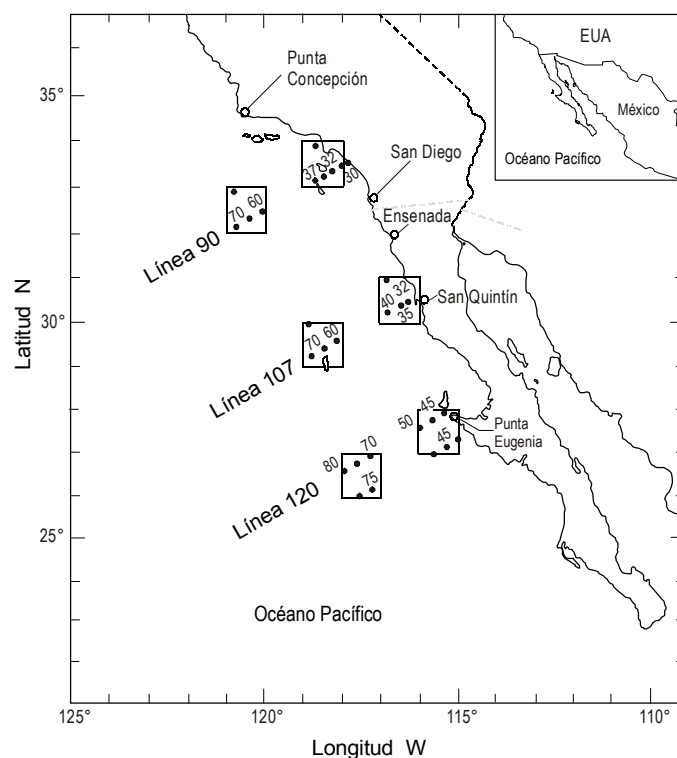
Para complementar la serie de 33 años (1969–2002) de TSM de la región de estudio, se obtuvieron los promedios mensuales de TSM de la base de datos COADS (Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set; Woodruff *et al.*, 1987) en cuadrículas de  $1^\circ \times 1^\circ$  de latitud (fig. 1). Los coeficientes de determinación ( $r^2$ ) entre los datos COADS y los obtenidos en cruceros CalCOFI-IMECOCAL fueron: estaciones de la línea

available to the fishery off northern Baja California, without considering the intrinsic conditions that these species require for development and growth (habitat, niche breadth, etc.), assuming that the only factor limiting their development is phytoplanktonic production.

## Materials and methods

Based on the CalCOFI (California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations, <http://www.calcofi.org>) and IMECOCAL (Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California, <http://imecocal.cicese.mx>) network, six grids were selected and grouped into inshore and offshore stations (fig. 1), according to the criterion of Lynn and Simpson (1987) and Millán-Núñez *et al.* (1996).

Total primary production ( $P_T$ ;  $gC\ m^{-2}\ d^{-1}$ ) was calculated using the empirical model proposed by Smith and Eppley (1982) for the Southern California Bight:  $P_T = \exp(-3.78 - 0.372\ \Delta T + 0.227\ D)$ , where  $\Delta T$  is the monthly anomaly of sea surface temperature (SST; °C), defined as the point value



**Figura 1.** Localización de las seis cuadrículas con referencia al SW: Línea 90 cerca de la costa (33°N, 119°W) y lejos de la costa (32°N, 121°W); línea 107 cerca de la costa (30°N, 117°W) y lejos de la costa (29°N, 119°W); línea 120 cerca de la costa (27°N, 116°W) y lejos de la costa (26°N, 118°W). Los números dentro de las cuadrículas representan las estaciones de muestreo en los programas CalCOFI-IMECOCAL.

**Figure 1.** Location of the six grids with reference to SW: line 90, inshore (33°N, 119°W) and offshore (32°N, 121°W); line 107, inshore (30°N, 117°W) and offshore (29°N, 119°W); line 120, inshore (27°N, 116°W) and offshore (26°N, 118°W). The numbers within the grids represent the sampling stations of the CalCOFI-IMECOCAL programs.

107 cerca 0.94 y 0.80 para la más alejada de la costa, mientras que para las cuadrículas de la línea 120 los coeficientes fueron de 0.93 y 0.88, respectivamente.

Como indicador del ENSO se utilizó el Índice Multivariado (MEI) (Wolter y Timlin 1993; 1998), según el sitio: [http://www.cdc.noaa.gov/ENSO/enso.mei\\_index](http://www.cdc.noaa.gov/ENSO/enso.mei_index). Este índice representa el análisis de componentes principales de seis variables observadas en el Pacífico ecuatorial: presión al nivel del mar, componente norte-sur del viento superficial, componente este-oeste del viento superficial, y TSM (datos COADS), temperatura del aire y cantidad de nubes en octavos. Los valores positivos/negativos del MEI representan la fase caliente/fría o El Niño/La Niña. Para relacionar los valores del MEI con  $P_T$  se promediaron los valores del índice entre septiembre y febrero (otoño-invierno) y se utilizó este promedio. El efecto de los eventos ENSO sobre la variabilidad de  $P_T$  se determinó utilizando el valor medio del período otoño-invierno del MEI en cada uno de los seis eventos ENSO (1970–2002) reportados con anterioridad en la literatura, según Kiladis y Díaz (1989) y el Climate Diagnostic Center (CDC) en su sitio web: <http://www.cdc.noaa.gov/ENSO>. Para demostrar estadísticamente las relaciones entre  $P_T$  y los eventos ENSO se utilizó el Análisis de Épocas Superpuestas (Panofski y Brier, 1965; Haurwitz y Brier, 1981; Hoenig *et al.*, 1989; Prager y Hoenig, 1989, 1992). Esta técnica no-paramétrica prueba la significancia estadística de asociaciones entre eventos discretos (fenómenos ambientales extremos como El Niño) y otros sucesos. La prueba de significancia que se utiliza ( $W$ ) es análoga a la  $t$  de Student, y compara la media obtenida en cada evento clave (año 0) con los años contiguos de referencia (-1, +1, +2):

$$W = \bar{d} (N_B)^{1/2} / S_W$$

donde  $\bar{d}$  es la media de todas las diferencias entre  $P_T$  en los años claves y  $P_T$  en los años contiguos,  $N_B$  es el número de observaciones de  $P_T$  en años contiguos y  $S_W$  es el error estándar. Una vez obtenido este número, se utiliza el método Monte Carlo, que brinda la probabilidad de que este análisis no sea aleatorio, dependiendo más del evento clave en cuestión (Prager y Hoenig, 1992).

Para determinar las frecuencias donde se presentó la mayor variabilidad en la serie de tiempo de  $P_T$  se calculó el espectro de varianza con el Programa Estadístico para Aplicaciones Climáticas (CLIMLAB) (Tanco y Berri, 2000). El espectro se estimó con 640 datos mensuales a partir de la serie de producción total (1950–2002), utilizando los valores de  $P_T$  (1950–1978) calculados para la ESC (Smith y Eppley, 1982) y los estimados en este trabajo para las estaciones cercanas a la costa de la línea 107 (1978–2002).

La biomasa de peces pelágicos menores ( $FB$ ) se estimó con la ecuación de Pauly y Christensen (1995) modificada por Carr (2002), a partir de considerar un nivel trófico simple, y un

minus the historic mean for each month of the years analyzed (1969–2002), and  $D$  is the mean length of daylight hours for each month. A 12-month moving average was applied to the monthly  $P_T$  data to obtain the seasonal trend. The low-frequency fluctuations of SST, measured off the pier of Scripps Institution of Oceanography (La Jolla, California) and included in Smith and Eppley's (1982) model, are highly correlated with the variability of the surface temperature data recorded on the coasts of La Salina (Pineda and López, 2002) and Punta Baja, Baja California (~30°N; south of line 107 in this study) (F. Tapia, pers. comm., WHOI), with a high correlation between the Southern California Bight until Punta Abreojos, Baja California Sur (Barton, 1985), to the south of line 120, and results of the vertical distribution of chlorophyll reported by Millán-Núñez *et al.* (1997).

For the total regional calculation of carbon production expressed in  $GtC\ yr^{-1}$  (1 Gt =  $10^{15}$  g), an area of 136,300 km<sup>2</sup> was used, which covers the first 300 km off Baja California (28°N–32°N). This area is similar to that chosen by Carr (2002), who used a different model than the one proposed herein to estimate  $P_T$  in the California Current.

To complement the 33-year series (1969–2002) of SST in the study area, monthly SST averages were obtained from the Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set (COADS; Woodruff *et al.*, 1987), in grids of 1° × 1° of latitude (fig. 1). The coefficients of determination ( $r^2$ ) between the COADS data and those obtained on CalCOFI-IMECOCAL cruises were 0.94 and 0.80 for the inshore and offshore stations of line 107, and 0.93 and 0.88 for the inshore and offshore stations of line 120, respectively.

As an indicator of ENSO, the Multivariate Index (MEI) was used (Wolter and Timlin, 1993, 1998), according to the website: [http://www.cdc.noaa.gov/ENSO/enso.mei\\_index](http://www.cdc.noaa.gov/ENSO/enso.mei_index). This index represents the principal components analysis of six variables observed in the equatorial Pacific: sea-level pressure, north-south component of surface wind, east-west component of surface wind, SST (COADS data), air temperature and cloud cover in octaves. The positive/negative MEI values represent the warm/cold phase of El Niño/La Niña. To relate the MEI values with  $P_T$ , the September to February values were averaged (autumn/winter) and this average was used. The effect of ENSO events on the variability of  $P_T$  was determined using the mean MEI value for the autumn/winter period for each of the six ENSO events (1970–2002) previously reported in the literature, according to Kiladis and Díaz (1989) and the Climate Diagnostic Center website: <http://www.cdc.noaa.gov/ENSO>. A Superposed Epoch Analysis was used to statistically show the relation between  $P_T$  and the ENSO events (Panofski and Brier, 1965; Haurwitz and Brier, 1981; Hoenig *et al.*, 1989; Prager and Hoenig, 1989, 1992). This non-parametric method tests the statistical significance of associations between discrete events (extreme environmental phenomena like El Niño) and other events. The significance test used ( $W$ ) is analogous to

promedio de  $P_T$  ( $\bar{P}_t$ ) para las estaciones en las cuadrículas cercanas a la costa de las líneas 90 y 107:

$$FP = (\bar{P}_t) (EFF)^{(TL-1)}$$

donde  $FP$  es la producción estimada de pelágicos, ( $\bar{P}_t$ ) es la producción primaria total promedio ( $\text{gC m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ),  $EFF$  es la eficiencia media de la transferencia de energía entre niveles tróficos (10%; Pauly y Christensen, 1995) y  $TL$  es el número de niveles tróficos (2.6 para las regiones de surgencias costeras cuando predominan sardina y anchoveta, según Pauly y Christensen, 1995). La estimación de la biomasa de peces por el modelo de Carr (2002) supone que toda la producción primaria es accesible a los peces pelágicos menores, tanto en tiempo como en espacio.

Para comparar las biomásas de peces pelágicos menores estimadas por los modelos con las descargas de sardina y anchoveta reportadas para la región norte de Baja California (García y Sánchez, 2002) se utilizó un factor de conversión del carbono a peso húmedo de 8 (Carr, 2002) ( $FB = 8FP$ ;  $FB$  expresado en miles de toneladas métricas). La estimación de biomasa de peces representa el límite superior de la capacidad de carga del ecosistema, si se supone que toda la producción primaria puede ser utilizada por estos organismos y sin considerar pérdidas en el fitoplancton por hundimiento, advección y pastoreo del zooplancton. De acuerdo con Shannon y Field (1985) solamente el 25% de la zona activa está disponible para los peces a un determinado tiempo y sólo el 50% de la biomasa del fitoplancton es apropiada como alimento de los peces. Por lo anterior, se utilizó una corrección de 12.5% sobre los valores de la biomasa de peces pelágicos menores debido a la accesibilidad ambiental efectiva. En estos cálculos de biomasa de peces se considera una trama trófica sencilla (microfitoplancton-zooplancton-peces pelágicos) para una región de surgencias costeras bajo una situación de años no ENSO (Chavez *et al.*, 2002).

## Resultados

Las anomalías de la TSM-COADS en los primeros años de los setenta se caracterizaron por un período frío (fig. 2) y anomalías positivas (AP) sólo durante el evento ENSO 1972–73, con mayor evidencia en las estaciones cercanas a la costa (fig. 2a, c, e). El período de fuertes anomalías negativas (AN) en la TSM terminó aproximadamente entre 1976 y 1977, con un cambio hacia AP a partir de este último año y hasta aproximadamente 1998–2000. Este cambio se mantuvo al menos durante 20 años, con valores de AP sólo en los ENSO 1982–84, 1992–93 y 1997–98, y con AN durante 1988–89, 1991 y 1999–2002, relacionados principalmente con eventos La Niña (fig. 2a–f). Los promedios generales de la TSM (fig. 2a–f) mostraron menores diferencias ( $1.4^\circ\text{C}$ ) entre las cuadrículas cercanas y alejadas de la costa de la línea 90, con mayores diferencias ( $3.6^\circ\text{C}$ ) entre las cuadrículas de las otras líneas seleccionadas.

Student's *t*-test, and compares the mean obtained in each key event (year 0) with the contiguous reference years (–1, +1, +2):

$$W = \bar{d} (N_B)^{1/2} / S_w$$

where  $\bar{d}$  is the mean of all the differences between  $P_T$  in the key years and  $P_T$  in the contiguous years,  $N_B$  is the number of  $P_T$  observations in contiguous years and  $S_w$  is the standard error. Once this number is obtained, the Monte Carlo method is used, which gives the probability that this analysis is not random, depending more on the key event in question (Prager and Hoenig, 1992).

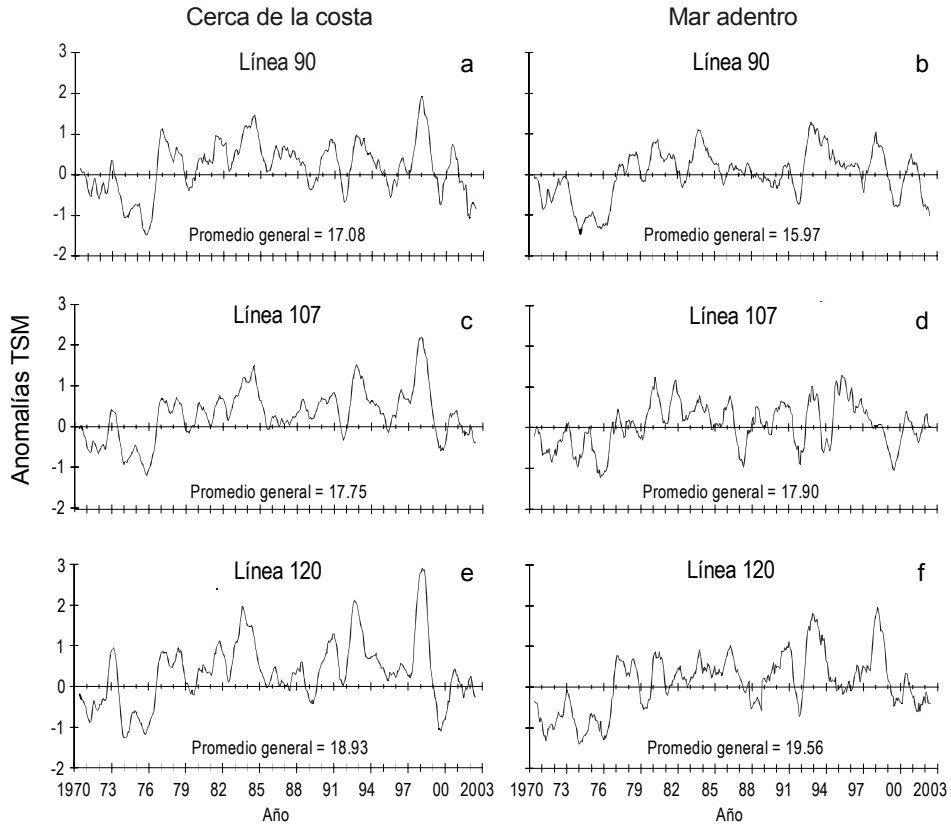
To determine the frequencies where most  $P_T$  variability in the time series occurred, the variance spectrum was calculated with the Statistical Program for Climatic Applications (CLIMLAB) (Tanco and Berri, 2000). The spectrum was estimated with 640 monthly data based on the total production series (1950–2002), using the  $P_T$  values (1950–1978) calculated for the Southern California Bight (Smith and Eppley, 1982) and those estimated in this study for the inshore stations of line 107 (1978–2002).

The small pelagic fish biomass ( $FB$ ) was estimated with Pauly and Christensen's (1995) equation, modified by Carr (2002), considering a simple trophic level and an average  $P_T$  ( $\bar{P}_t$ ) for the inshore grids of lines 90 and 107:

$$FP = (\bar{P}_t) (EFF)^{(TL-1)}$$

where  $FP$  is the estimated pelagic production, ( $\bar{P}_t$ ) is the mean total primary production ( $\text{gC m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ),  $EFF$  is the mean efficiency of energy transfer among trophic levels (10%; Pauly and Christensen, 1995) and  $TL$  is the number of trophic levels (2.6 for the coastal upwelling regions when sardine and anchovy are predominant, according to Pauly and Christensen, 1995). The estimation of fish biomass by Carr's (2002) model assumes that all primary production is available to small pelagic fishes, both in time and space.

To compare the small pelagic fish biomass estimated by the models with sardine and anchovy landings reported for northern Baja California (García and Sánchez, 2002), a conversion factor of carbon to a wet weight of 8 (Carr, 2002) was used ( $FB = 8FP$ ;  $FB$  expressed in miles of metric tons). The estimation of fish biomass represents the upper limit of the ecosystem's carrying capacity, if it is assumed that all the primary production can be used by these organisms and without considering phytoplankton losses due to sinking, advection and zooplankton grazing. According to Shannon and Field (1985), only 25% of the active zone is available to fish at a given time and only 50% of the phytoplankton biomass is suitable as fish food. Therefore, a 12.5% correction was applied to the values of small pelagic fish biomass due to effective environmental accessibility. In these fish biomass calculations, a simple trophic chain is considered (microphytoplankton-zooplancton-pelagic fish) for a coastal upwelling region during non-ENSO



**Figura 2.** Serie de tiempo de anomalía de la temperatura superficial del mar (TSM; °C) de septiembre de 1969 a septiembre de 2002. En cada caso se muestra la media general de los datos solamente como referencia.  
**Figure 2.** Time series of sea surface temperature (SST; °C) anomalies from September 1969 to September 2002. The overall mean is shown as reference.

La figura 3 presenta los cambios de  $P_T$  calculados con los datos de la TSM para la ESC (Smith y Eppley, 1982) del período 1950–1980 y los datos de TSM-COADS para las líneas 90, 107 y 120 del período 1970–2002. La variabilidad de  $P_T$  para la región frente a Baja California muestra una tendencia similar a la ESC en los años en que ambas se traslapan (1970–80), sobre todo en las cuadrículas cercanas a la costa (fig. 3). Sin embargo, para las cuadrículas alejadas de la costa no se presentaron las mismas tendencias debido a la variación costa-oceano.  $P_T$  tuvo un período de aproximadamente 15 años (1960–1976) en que fluctuó por encima de la media general ( $0.4 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ), excepto un valor mínimo durante el ENSO 1957–58 y uno máximo en 1975–76. A partir de 1978 y hasta el ENSO 1997–98,  $P_T$  descendió ~50%, con tendencia a aumentar a partir de La Niña 1998–99. Al parecer el evento ENSO más reciente tuvo un fuerte impacto en la región costera, similar al de 1957–58 cuando se registró una disminución en  $P_T$  (fig. 3).

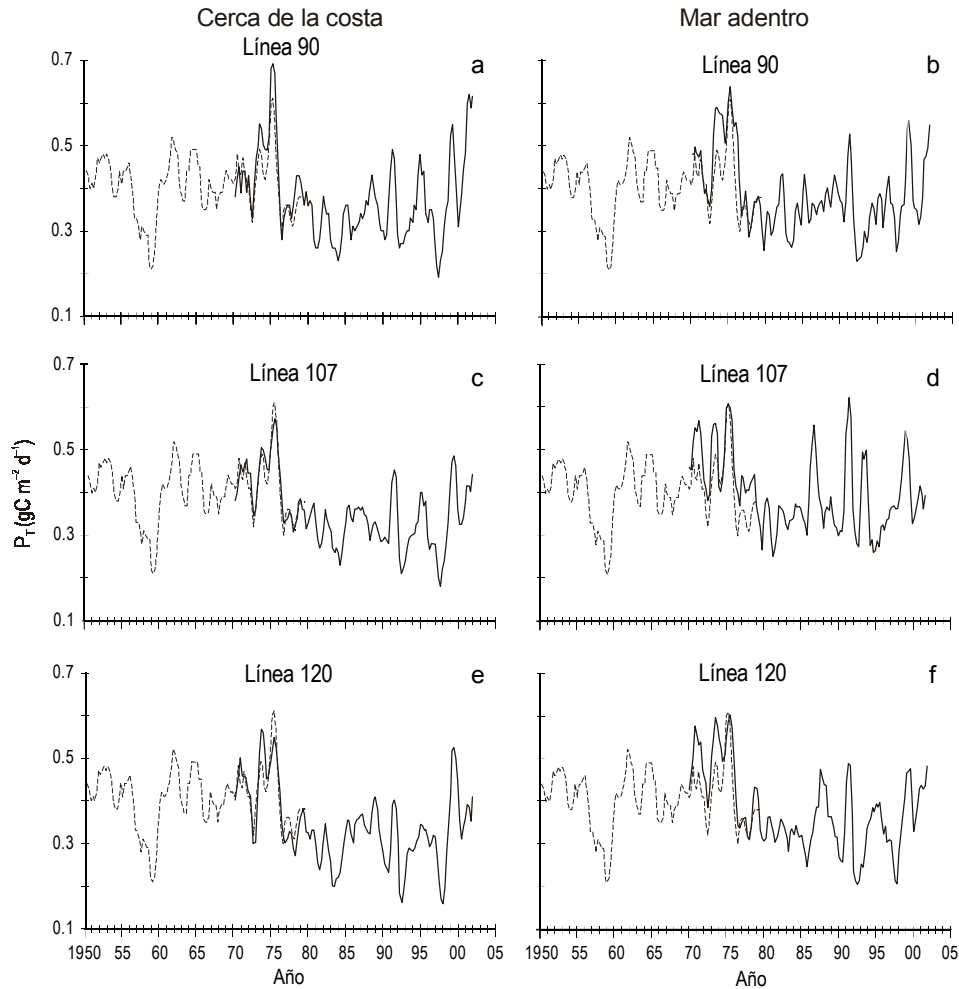
Las anomalías de  $P_T$  en las cuadrículas cercanas y alejadas de la costa en la línea 90 presentaron un período de altos valores positivos altos en los primeros años de los setenta, excepto por una ligera inflexión durante el ENSO 1972–73 (fig. 4a, b). En las cuadrículas cercanas a la costa de las líneas 107 y 120 se observó un período de AP en los primeros años de los setenta

years (Chavez *et al.*, 2002).

## Results

The anomalies of COADS SST in the early 1970s were characterized by a cold period (fig. 2) and positive anomalies only during the 1972–73 ENSO event, with greater evidence at the inshore stations (fig. 2a, c, e). The period of strong negative SST anomalies ended approximately between 1976 and 1977, with a change to positive anomalies as of the latter year until about 1998–2000. This change continued for at least 20 years, with positive anomalies during the 1982–84, 1992–93 and 1997–98 ENSO events, and negative anomalies during 1988–89, 1991 and 1999–2002, years related mainly to La Niña events (fig. 2a–f). The general SST averages (fig. 2a–f) presented smaller differences ( $1.4^\circ\text{C}$ ) between the inshore and offshore grids of line 90, and greater differences ( $3.6^\circ\text{C}$ ) between the grids of the other lines selected.

Figure 3 shows the changes in  $P_T$  calculated with the 1950–1980 SST data for the Southern California Bight (Smith and Eppley, 1982) and the 1970–2002 COADS SST data for lines 90, 107 and 120. The variability of  $P_T$  for the area off Baja California is similar to that of the Southern California Bight during the overlapping years (1970–1980), especially in the inshore grids (fig. 3). However, the offshore grids did not



**Figura 3.**  $P_T$  calculado por Smith y Eppley para la Ensenada del Sur de California (líneas cortadas) y las calculadas con datos de TSM-COADS para la zona de estudio (líneas continuas). Se traslapa el período 1970–1980 entre ambas series.  
**Figure 3.** Total primary production ( $P_T$ ) values calculated by Smith and Eppley for the Southern California Bight (dashed lines) and those calculated with the COADS SST data for our study area (continuous lines). There is an overlap of the period 1970–1980 in both time series.

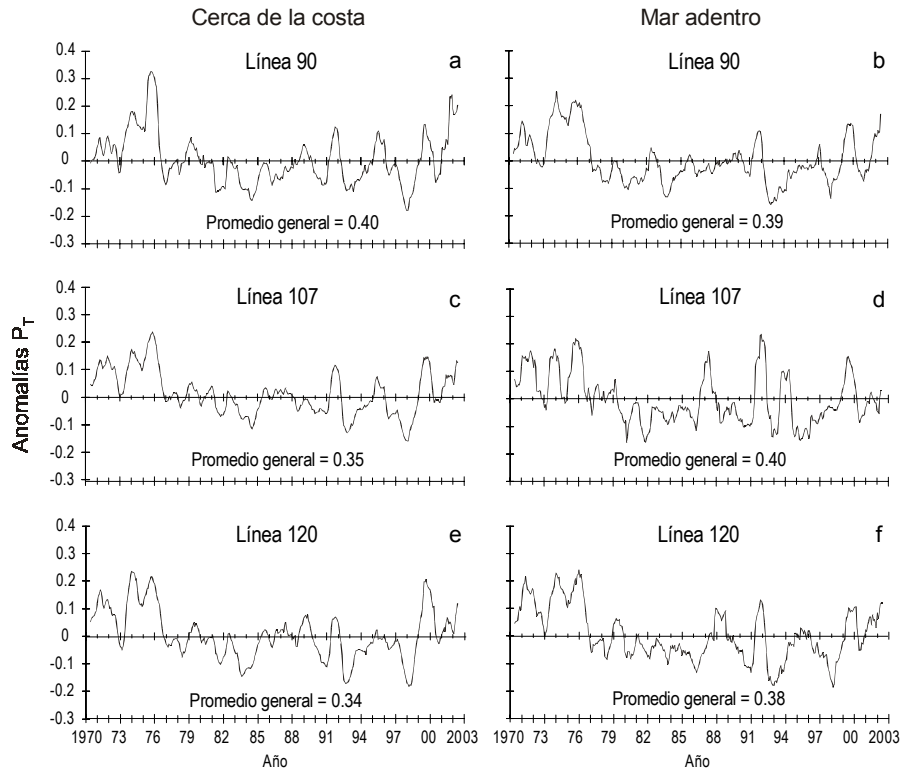
(figs. 4c–f), con una disminución abrupta a partir de 1976 hacia valores negativos (fig. 4c). Las AP de corta duración en la línea 107 se presentaron en 1991, 1995 y 1999. En las estaciones lejanas de la costa (fig. 4d) las AP de la  $P_T$  se mantuvieron altas durante los primeros años de la década de los setenta. La tendencia de AN se mantuvo con valores similares al resto de las áreas estudiadas. AP importantes ocurrieron en 1987–88, 1991 y 1994, con una tendencia hacia AP a partir de 1995 (fig. 4d).

En la línea 120 las anomalías de  $P_T$  cerca y lejos de la costa mostraron una tendencia similar durante los años setenta, aunque con valores mayores en las estaciones alejadas de la costa en algunos años fríos (fig. 4e, f). Las AP más importantes para las estaciones costeras después de la década de los setentas fueron originadas por el evento La Niña 1998–99, comparables a los de 1974 y 1976 (fig. 4e). El período de AP de  $P_T$  en los años setenta terminó con el fuerte impacto del ENSO 1976–77. Después de este período dio inicio una larga secuencia de eventos

present the same tendencies because of the ocean/shore variation. There was an approximately 15-year period (1960–1976) during which  $P_T$  fluctuated above the overall mean ( $0.4 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ), except for a minimum value during ENSO 1957–58 and a maximum value during 1975–76. From 1978 to ENSO 1997–98,  $P_T$  decreased  $\sim 50\%$  and then tended to increase with La Niña 1998–99. The most recent ENSO event seems to have strongly impacted the coastal region, similarly to the 1957–58 event, when  $P_T$  decreased (fig. 3).

The  $P_T$  anomalies in the inshore and offshore grids of line 90 presented a period of high positive values in the early 1970s, except for a slight inflection during ENSO 1972–73 (fig. 4a, b). The inshore grids of lines 107 and 120 show a period of positive anomalies in the early 1970s (figs. 4c–f), abruptly decreasing in 1976 to negative values (fig. 4c). The short-term positive anomalies of line 107 occurred in 1991, 1995 and 1999. At the offshore stations (fig. 4d), the positive





**Figura 4.** Anomalías de la variabilidad interanual de la producción primaria total ( $P_T$ ;  $gC\ m^{-2}\ d^{-1}$ ) desde septiembre de 1969 hasta septiembre de 2002 (promedio móvil 12 meses).

**Figure 4.** Interannual variability of total primary production ( $P_T$ ) anomalies ( $gC\ m^{-2}\ d^{-1}$ ) from September 1969 to September 2002 (12-month moving average).

con una señal predominante de baja productividad en toda la zona, reforzados por los ENSO 1982–83, 1992–93 y 1997–98. Algunos períodos de AP estuvieron relacionados con eventos fríos durante los años 1988 y 1991 en las estaciones alejadas de la costa en las líneas 107 y 120. Durante 1995 los mayores impactos de AP fueron en la línea 107 y las estaciones costeras de la línea 90. A partir del último evento frío de 1998–99, las AP de  $P_T$  tuvieron una magnitud comparable a los años setenta (fig. 4 a–f).

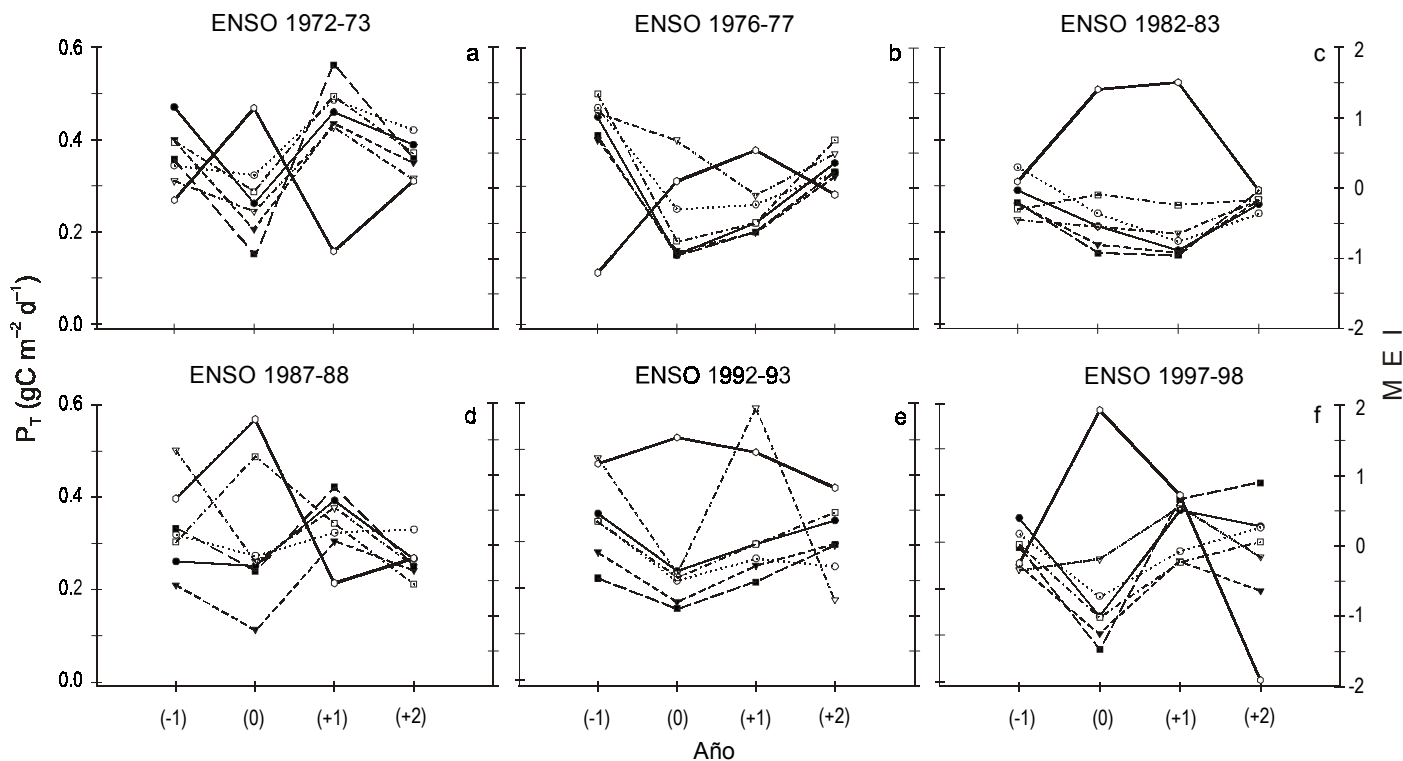
El efecto del ENSO sobre la  $P_T$  y su relación con el MEI no fueron tan evidentes durante 1972–73 y 1976–77 (fig. 5a–b), comparados con 1982–83 (fig. 5c).  $P_T$  se mantuvo alta en toda la zona un año antes de 1976–77 (–1), disminuyó en el año de afectación (0), pero no continuó disminuyendo sino que aumentó ligeramente a pesar de que el MEI se incrementó (fig. 5b). El efecto del ENSO 1982–83 se prolongó hasta un año después (+1) en toda el área, excepto en la zona alejada de la costa en la línea 120, la cual no mostró ninguna tendencia (fig. 5c). Durante el ENSO 1987–88 las estaciones alejadas de la costa de la línea 120 presentaron valores altos de  $P_T$  y un comportamiento diferente a la tendencia mostrada en las otras estaciones (fig. 5d). El evento ENSO 1992–93 mostró un efecto similar a sus antecesores, cuando un año antes (–1)  $P_T$  se mantuvo alta, después bajó en toda el área de estudio durante el año clave (0) para posteriormente elevarse al año siguiente (+1) (fig. 5e). Durante 1997–98  $P_T$  disminuyó a valores

anomalías de  $P_T$  remained high during the early 1970s. The negative anomaly trend continued with values similar to those of the rest of the areas studied. Important positive anomalies occurred during 1987–88, 1991 and 1994, with a tendency to positive anomalies in 1995 (fig. 4d).

The  $P_T$  anomalies near and off the coast of line 120 presented a similar trend during the 1970s, though the values were higher at the offshore stations during some cold years (fig. 4e, f). The most important positive anomalies for the inshore stations after the 1960s were caused by the 1998–99 La Niña event and are comparable to those of 1974 to 1976 (fig. 4e). The positive anomaly period of  $P_T$  in the 1970s ended with the strong impact of ENSO 1976–77. A long sequence of events began after this period, with a predominant signal of low productivity throughout the area, reinforced by the ENSO events of 1982–83, 1992–93 and 1997–98. Some positive anomaly periods were related to cold events in 1988 and 1991 at the offshore stations of lines 107 and 120. In 1995, the greatest positive anomaly impacts occurred at the stations of line 107 and the inshore stations of line 90. After the last cold event of 1998–99, the magnitude of the positive anomalies of  $P_T$  was comparable to that of the 1970s (fig. 4a–f).

The effect of ENSO on  $P_T$  and its relation with MEI were not as evident during 1972–73 and 1976–77 (fig. 5a, b), compared with 1982–83 (fig. 5c).  $P_T$  was high throughout the area one year before the 1976–77 event (–1) and decreased during





**Figura 5.** Promedio otoño-invierno de la producción primaria total ( $P_T$ ;  $\text{gC m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) y el MEI (Índice Multivariado de El Niño) para un año antes del ENSO (-1), durante el evento (0), y uno y dos años después (+1, +2), para los seis eventos durante el período 1969–2002. Líneas (○) 90 lejos de la costa, (●) 90 cerca de la costa, (▽) 107 lejos de la costa, (▼) 107 cerca de la costa, (□) 120 lejos de la costa, y (■) 120 cerca de la costa. La línea gruesa continua representa el promedio otoño-invierno del MEI.

**Figure 5.** Autumn/winter average of total primary production ( $P_T$ ;  $\text{gC m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) and Multivariate ENSO Index (MEI) for the year before ENSO (-1), during the event (0), and one and two years after (+1, +2), for the six events in the period 1969–2002. (○) Line 90 offshore, (●) line 90 inshore, (▽) line 107 offshore, (▼) line 107 inshore, (□) line 120 offshore and (■) line 120 inshore. The thick line shows the MEI autumn/winter average.

mínimos para todo el período 1970–2002 debido al fuerte impacto del ENSO, mostrando una recuperación inmediata un año después (+1). Sin embargo, no continuó su aumento a pesar de haber disminuido el MEI dos años después del ENSO (fig. 5f). De acuerdo con la variabilidad en el MEI y en  $P_T$ , cada ENSO estudiado desde 1972 a 1998 tuvo un comportamiento diferente y un efecto distinto sobre el ecosistema de la región. Con la información disponible no fue posible detectar un patrón único en la relación entre MEI y  $P_T$  para la región de estudio, aunque en general las tendencias fueron opuestas.

Los resultados de la prueba  $W$  con 100,000 intentos por Monte Carlo demuestran que existe una alta probabilidad ( $P < 0.01$ ) de que se presente alta  $P_T$  un año antes (-1) del ENSO, disminuya durante el año de afectación (0) y se recupere un año después (+1) de la incidencia de eventos en las tres líneas de estudio (tabla 1). En los resultados de probabilidad generados por Monte Carlo se muestra que ambas cuadrículas de la línea 90 y la alejada de la costa de la línea 107 mantuvieron una tendencia similar ( $P < 0.01$ ). Sin embargo, las estaciones de la línea 120 y la cercana a la costa de la línea 107 mostraron probabilidades mayores ( $\sim 0.02$ ). Al parecer las aguas de la parte sur de la CC antes de ser afectadas por un evento ENSO [año (-1)], mantienen su característica de alta producción

the affected year (0), but did not continue to decrease, rather increasing slightly even though MEI increased (fig. 5b). The effect of ENSO 1982–83 continued for one year after (+1) the event throughout the area, except in the offshore zone of line 120, which did not present any tendency (fig. 5c). During ENSO 1987–88, the offshore stations of line 120 had high  $P_T$  values and a different behaviour to the tendency showed by the other stations (fig. 5d). ENSO 1992–93 presented a similar effect to its predecessors:  $P_T$  was high one year before (-1), and then decreased throughout the area during the key year (0), to subsequently increase the year after (+1) (fig. 5e). During 1997–98,  $P_T$  decreased to minimum values throughout the period 1970–2002 due to ENSO's strong impact, but immediately recovered one year later (+1); however, it did not continue to increase even though MEI decreased two years after the ENSO event (fig. 5f). According to the variability in MEI and  $P_T$ , each ENSO studied from 1972 to 1998 had a different behaviour and effect on the region's ecosystem. With the information available, it was not possible to detect a unique pattern in the relation between MEI and  $P_T$  for the study area, though in general the tendencies were opposite.

The results of test  $W$  with 100,000 Monte Carlo trials show that it is highly probable ( $P < 0.01$ ) for  $P_T$  to be high one year

**Tabla 1.** Análisis de épocas superpuestas aplicado al promedio otoño/invierno de la producción primaria total ( $P_T$ ;  $gC\ m^{-2}\ d^{-1}$ ) basado en seis eventos ENSO claves.**Table 1.** Superposed Epoch Analysis applied to the autumn/winter average of total primary production ( $P_T$ ;  $gC\ m^{-2}\ d^{-1}$ ) based on six key ENSO events.

Prueba estadística	Estación	Eventos clave	Intentos Monte Carlo	Amplitud de época	Resultado de la prueba	Prueba de intentos	Probabilidad estimada
W	90 inshore	6	100,000	-1, 0, +1	4.8339	152	0.0015**
W	90 offshore	6	100,000	-1, 0, +1	4.5407	90	0.0009**
W	107 inshore	6	100,000	-1, 0, +1	3.1974	732	0.0073 *
W	107 offshore	6	100,000	-1, 0, +1	4.9068	144	0.0014**
W	120 inshore	6	100,000	-1, 0, +1	3.0495	1098	0.0109*
W	120 offshore	6	100,000	-1, 0, +1	2.6192	2125	0.0212*

\*  $P < 0.05$ , \*\*  $P < 0.005$ 

primaria, la cual en ocasiones se vuelve a recuperar al siguiente año de afectación, dependiendo de la intensidad del evento.

## Discusión

Las anomalías de la TSM en las tres líneas de CalCOFI estudiadas indican que el régimen frío en la región sur de la CC estuvo presente hasta 1976, con un cambio a partir de ese año hacia valores positivos en todo el SCC (Minobe, 1998, 1999; Wu y Hsieh, 1999; Stephens *et al.*, 2001). El régimen cálido se registró a partir de 1977 y continuó hasta 1998, incrementado por los eventos ENSO 1982–83, 1992–93 y 1997–98 que afectaron toda la región de la CC (Parés-Sierra y O'Brien, 1989; Smith, 1995; Hayward *et al.*, 1999; Moser *et al.*, 2001; Hernández-de-la-Torre *et al.*, 2003; Peterson y Schwing, 2003). El valor medio de  $P_T$  para el período otoño-invierno en los años ENSO tuvo incrementos antes del evento (-1), debido al parecer a una mayor presencia de nutrientes en la ZE; disminuyó durante el año clave (0) y aumentó aún hasta dos años después (+1, +2) durante los seis eventos registrados en toda la serie de tiempo. El ENSO transporta agua cálida y con mayor salinidad hacia la región, induciendo calentamiento en la capa superficial y un incremento en el nivel medio del mar (Durazo y Baumgartner, 2002). Este proceso hace más profunda la termoclina (nutriclina), lo que reduce el suplemento de nutrientes hacia la ZE como resultado del incremento de la estratificación en la columna de agua. Lo anterior trae como consecuencia una disminución en la producción del fitoplancton al presentarse una disminución en el enriquecimiento de la ZE de zonas de surgencias en años ENSO (Chavez, 1996; Chavez *et al.*, 2002).

Los valores máximos de  $P_T$  se presentaron durante la época fría de los años sesenta y setenta, relacionados con los eventos fríos de 1962, 1964–65, 1971–72 y 1974–75 (fig. 3). Después de los años setenta algunos altos valores de  $P_T$  estuvieron asociados con los eventos La Niña 1991, 1995 y 1998. Las condiciones frías y los eventos La Niña intensifican procesos de mezcla, generan una termoclina más somera y un incremento en el transporte de aguas frías y ricas en nutrientes hacia la superficie (Miller, 1996). Sin embargo, los valores de  $P_T$  en

before (-1) an ENSO event, to decrease during the key year (0) and to recover one year after (+1) the event in the three lines of study (table 1). The probability results generated with the Monte Carlo method indicate that both grids of line 90 and the offshore grid of line 107 had a similar tendency ( $P < 0.01$ ). However, higher probabilities were obtained for the stations of line 120 and the inshore station of line 107 (~0.02). Apparently, before the waters of the southern California Current are affected by an ENSO event (year -1) they present their characteristically high primary production, which is occasionally recovered the year after being impacted, depending on the intensity of the event.

## Discussion

The SST anomalies in the three lines of study indicate that the cold phase was present in the southern region of the California Current until 1976, changing that year to positive values throughout the system (Minobe, 1998, 1999; Wu and Hsieh, 1999; Stephens *et al.*, 2001). The warm phase was recorded in 1977 and continued until 1998, increased by the 1982–83, 1992–93 and 1997–98 ENSO events that affected the California Current region (Parés-Sierra and O'Brien, 1989; Smith, 1995; Hayward *et al.*, 1999; Moser *et al.*, 2001; Hernández-de la Torre *et al.*, 2003; Peterson and Schwing, 2003). The mean  $P_T$  value for the autumn/winter period in ENSO years increased before the event (-1), apparently due to the greater occurrence of nutrients in the euphotic zone; it decreased in the key year (0) and increased up to two years after (+1, +2) during the six events recorded in the time series. ENSO transports warm and saltier water towards the region, causing warming of the surface layer and an increase in mean sea level (Durazo and Baumgartner, 2002). This process deepens the thermocline (nutricline), which reduces the input of nutrients to the euphotic zone because of increased stratification of the water column. This leads to reduced phytoplankton production as a result of a decrease in the enrichment of the euphotic zone of upwelling zones in ENSO years (Chavez, 1996; Chavez *et al.*, 2002).

Maximum  $P_T$  values occurred during the cold period of the

estos últimos eventos fríos fueron menores que en los anteriores debido posiblemente a que ocurrieron sobre un régimen caliente. Los valores máximos de  $P_T$  calculados para 1999 estuvieron relacionados con fuertes surgencias reportadas durante ese año por Bograd *et al.* (2000) en el SCC, con el valor más alto del índice de afloramiento de los últimos 54 años (Schwing *et al.*, 2000), lo que podría significar el inicio de un nuevo régimen frío para la región de la CC (Peterson y Schwing, 2003).

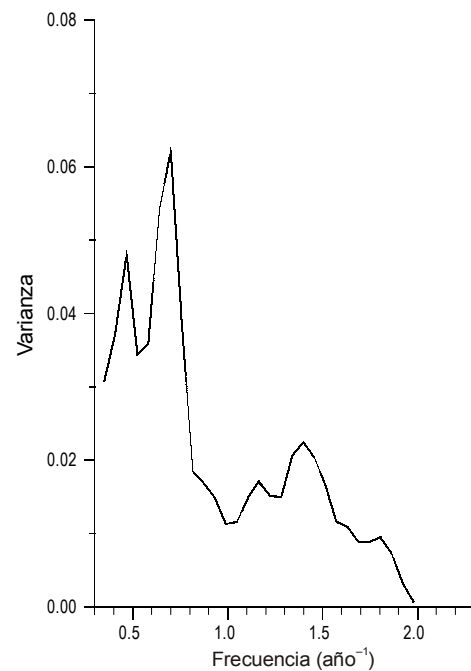
Los altos valores de producción primaria en las estaciones oceánicas de las líneas 90 y 107, al parecer fueron debidos al transporte de agua superficial fría y rica en nutrientes originada por la intensificación de los afloramientos frente a las costas del sur de California. Las aguas que se desprenden principalmente durante las surgencias de primavera-verano (Parés-Sierra y O'Brien, 1989; Lynn y Simpson, 1987, 1990; Hickey, 1993; Venrick, 2000) invaden las estaciones alejadas de la costa en estas dos líneas, modificando la distribución temporal y espacial de la producción oceánica. Esta alta productividad primaria calculada en la línea 90 durante los dos últimos eventos fríos (1995 y 1999) ha sido relacionada con altos valores de la biomasa desovante de sardina en el sur de la CC según la cronología de CalCOFI localizada en el sitio web: <http://www.calcofi.org/timeline.htm>.

$P_T$  presentó la mayor varianza en el período de 1.43 años, determinada a partir del espectro de la serie de tiempo (fig. 6). Este período de mayor variabilidad, cercano a un año, ha sido también descrito para la región costera de Baja California a partir de series de tiempo de clorofila obtenidas a partir de datos de sensores remotos del color del océano (Kahru y Mitchell, 2001). El otro período significativo que contribuyó a la varianza de  $P_T$  fue el de 2.15 años (fig. 6). Este período podría estar relacionado con la ocurrencia inicial de El Niño, el cual tiene una fluctuación aproximada de 3 a 7 años (Chavez *et al.*, 2003). La variabilidad de ~2 años ha sido también descrita por Kahru y Mitchell (2001) para la zona más oceánica de la ESC, por medio de series de tiempo de clorofila de sensores remotos.

La  $P_T$  anual estimada disminuyó en ~20% durante los años ENSO para la zona de estudio (tabla 2). La  $P_T$  media en 1997–98 para el área comprendida entre los primeros 300 km alejados de la costa en el norte de Baja California (28°N–32°N) fue 0.014 GtC año<sup>-1</sup>. Este valor es del mismo orden de magnitud que el calculado por Carr (0.049 GtC año<sup>-1</sup>; 2002) para estos mismos años en el área activa (>1 mgChl *a* m<sup>-3</sup>) del SCC, por medio de modelos acoplados a imágenes del SeaWiFS. A partir de estas mismas imágenes y un modelo relacionado con variables físicas de la columna de agua, Chavez *et al.* (2002) estimaron una producción de 0.034 GtC para el período 1997–98 en la región norte de California (32°N–42°N). Ambas estimaciones son un orden magnitud menores a la calculada para 1997–99 (0.271 GtC año<sup>-1</sup>) por Kahru y Mitchell (2002) para los primeros 300 km fuera de la costa, desde Cabo Mendocino, California, hasta Cabo San Lucas, Baja California, por medio del modelo VGPM de Behrenfeld y Falkowski

1960s and 1970s, associated with the cold events of 1962, 1964–65, 1971–72 and 1974–75 (fig. 3). After the 1970s, some high  $P_T$  values were related to the 1991, 1995 and 1998 La Niña events. Cold conditions and La Niña events intensify mixing processes, and generate a shallower thermocline and an increase in the transport of cold, nutrient-rich water to the surface (Miller, 1996). However, the  $P_T$  values in these last cold events were lower than in the previous events, possibly because they occurred during a warm phase. The maximum  $P_T$  values calculated for 1999 were associated with strong upwelling in the California Current System that year (Bograd *et al.*, 2000), with the highest value of the upwelling index of the last 54 years (Schwing *et al.* 2000); this could indicate the beginning of a new cold phase in the California Current region (Peterson and Schwing, 2003).

The high values of primary production at the offshore stations of lines 90 and 107 were probably due to the transport of cold, nutrient-rich surface water caused by intensified upwelling off southern California. The waters that detach mainly during spring/summer upwelling (Parés-Sierra and O'Brien, 1989; Lynn and Simpson, 1987, 1990; Hickey, 1993; Venrick, 2000) invade the offshore stations of these two lines, modifying the temporal and spatial distribution of oceanic production. This high primary productivity calculated for line 90 during the last two cold events (1995 and 1999) has been associated with high values of the sardine spawning biomass in the southern California Current, according to CalCOFI's



**Figura 6.** Espectro de varianza de la producción primaria total calculada de 1950 al 2002 por Smith y Eppley (1950–1978), y la del presente trabajo (1978–2002) para la cuadrícula cercana a la costa de la línea 107.

**Figure 6.** Total primary production spectral analysis for the data calculated from 1950 to 2002, using Smith and Eppley's (1950–1978) data and our data (1978–2002) for the inshore grid of line 107.

**Tabla 2.** Promedio anual de la producción primaria total ( $P_T$ ;  $\text{gC m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ). Estimación de la producción primaria total anual ( $\text{GtC año}^{-1}$ ) para los primeros 300 km alejados de la costa en el área comprendida entre  $28^\circ\text{N}$ – $32^\circ\text{N}$  ( $136 \times 10^3 \text{ km}^2$ ) ( $1 \text{ GtC} = 10^{15} \text{ gC}$ ) y biomasa (FB; ver texto).

**Table 2.** Average annual total primary production ( $P_T$ ;  $\text{gC m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ). Estimated annual total primary production ( $\text{GtC yr}^{-1}$ ) for the first 300 km offshore in the area between  $28^\circ\text{N}$  and  $32^\circ\text{N}$  ( $136 \times 10^3 \text{ km}^2$ ) ( $1 \text{ GtC} = 10^{15} \text{ gC}$ ) and biomass (FB; see text).

Año	$P_T$ (*)	$P_T$ (**)	FB(***)	Año	$P_T$ (*)	$P_T$ (**)	FB(***)
1970	0.431	0.021	201.47	1987	0.308	0.015	94.35
1971	0.495	0.025	230.29	1988	0.385	0.019	181.12
1972	0.397	0.020	198.07	1989	0.352	0.017	171.25
1973	0.528	0.026	249.77	1990	0.291	0.014	146.10
1974	0.488	0.024	245.58	1991	0.488	0.024	244.63
1975	0.610	0.030	327.74	1992	0.240	0.012	121.79
1976	0.408	0.020	174.54	1993	0.323	0.016	152.59
1977	0.360	0.018	185.46	1994	0.328	0.016	176.05
1978	0.357	0.018	190.62	1995	0.368	0.018	208.01
1979	0.369	0.018	191.57	1996	0.333	0.017	162.68
1980	0.357	0.018	188.58	1997	0.267	0.013	109.00
1981	0.279	0.014	136.83	1998	0.323	0.016	153.26
1982	0.365	0.018	180.51	1999	0.502	0.025	242.67
1983	0.263	0.013	134.95	2000	0.332	0.016	164.56
1984	0.309	0.015	130.33	2001	0.456	0.023	262.01
1985	0.358	0.018	188.23	2002	0.538	0.027	260.88
1986	0.357	0.018	169.55				

(\*)  $\text{gC m}^{-2} \text{d}^{-1}$ , (\*\*)  $\text{GtC yr}^{-1}$ , (\*\*\*)  $\text{ton} \times 1000$

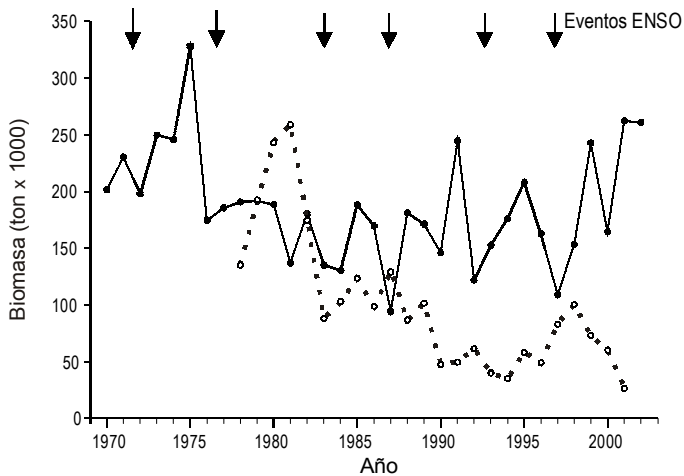
(1997) y de imágenes de TSM y color del océano. Esta aparente discrepancia en los resultados de los modelos es más evidente al extender las estimaciones a grandes regiones oceánicas. Las diferencias sólo podrán ser esclarecidas adecuadamente al generarse largas series de tiempo de producción primaria medida *in situ*, o estimada con modelos más precisos de resolución regional.

Las áreas geográficas con mayor producción observadas en este trabajo están relacionadas con altos valores de pigmentos fotosintéticos calculados en la región (Thomas y Strubb, 1990; Kahru y Mitchell, 2001, 2002), y con las principales zonas de desove de pelágicos menores como la sardina, macarela y anchoveta propuestas para la región central y sur de la CC por Husby y Nelson (1982). Las variaciones interanuales de  $P_T$  cercanas a un año propuestas en este trabajo, muestran gran afinidad con los cambios anuales en la abundancia de huevos y larvas de peces pelágicos menores descritos por Moser *et al.* (2001). La variabilidad temporal de la biomasa total de pelágicos menores estimada con los datos de producción primaria en el área entre las líneas 90 y 107 disminuyó por debajo de  $200 \times 10^3$  toneladas a partir de 1976–77, con la tendencia a recuperarse a partir de 2000 (fig. 7). Sin embargo, este estimado de la biomasa de peces pelágicos (anchoveta, sardina y macarela) no muestra una relación estrecha con el total de las

chronology found on their website: <http://www.calcofi.org/timeline.htm>.

$P_T$  presented highest variance in the 1.43-year period, determined from the time series spectrum (fig. 6). This nearly one-year period of high variability has also been described for the coastal region of Baja California based on chlorophyll time series obtained using ocean colour remote sensing data (Kahru and Mitchell, 2001). The other significant period that contributed to the variance of  $P_T$  was 2.15 years (fig. 6). This period could be related to the initial occurrence of El Niño, which has an approximate fluctuation of 3–7 years (Chavez *et al.*, 2003). The variability of ~2 years has also been described by Kahru and Mitchell (2001) for the most oceanic zone of the Southern California Bight, by means of remote sensing chlorophyll time series.

The annual  $P_T$  estimated decreased ~20% during the ENSO years in the study area (table 2). The mean  $P_T$  during 1997–98 for the area comprised in the first 300 km off the coast of northern Baja California ( $28^\circ\text{N}$ – $32^\circ\text{N}$ ) was  $0.014 \text{ GtC yr}^{-1}$ . This value is of the same order of magnitude than that calculated ( $0.049 \text{ GtC yr}^{-1}$ ) by Carr (2002) for these same years in the active area ( $>1 \text{ mgChla m}^{-3}$ ) of the California Current System, using models coupled to SeaWiFS images. Based on these images and a model related to physical variables of the



**Figura 7.** Biomasa de pelágicos menores calculada con la ecuación de Pauly y Christensen (●), a partir de la producción primaria total media de las estaciones cercanas a la costa en las líneas 90 y 107. Capturas anuales de pelágicos menores para la costa de Baja California (1978–2001) (○) documentadas por García y Sánchez (2002).

**Figure 7.** Small pelagic fish biomass estimated with the formula proposed by Pauly and Christensen (●), using the average total primary production data for the inshore stations of lines 90 and 107. Annual catch of small pelagic fish for Baja California during 1978–2001 (○) reported by García and Sánchez (2002).

capturas reportadas para la zona pesquera del norte de Baja California por García y Sánchez (2002) (fig. 7). Lo anterior es más evidente cuando en las capturas de peces predominó la anchoveta norteña (*Engraulis mordax*), como ocurrió a finales de los años setenta (García y Sánchez, 2002). Esto podría indicar que cuando abunda esta especie el modelo de Pauly y Christensen (1995) no resuelve adecuadamente las estimaciones de la biomasa de peces pelágicos menores en nuestra zona de estudio. Durante el período 1990–2000, cuando las capturas de anchoveta disminuyeron en la zona de Baja California (García y Sánchez, 2002), el promedio de la captura total de peces pelágicos fue de  $60 \times 10^3$  toneladas, relacionada con una biomasa estimada de  $171 \times 10^3$  toneladas en la zona costera de Baja California desde la línea 90 a la 107.

El ENSO 1972–73 no redujo considerablemente la biomasa de peces pelágicos estimada en la serie de tiempo. Sin embargo, a partir del ENSO 1976–77 el efecto fue mayor, con una disminución aproximada de hasta  $100 \times 10^3$  toneladas de peces durante los ENSO 1987–88 y 1997–98 (fig. 7). A pesar de que las AN más altas de  $P_T$  se calcularon para los ENSO 1992–93 y 1997–98, no ocurrieron grandes disminuciones en la biomasa estimada posiblemente debido a que provenían de años cercanos anteriores con efectos La Niña.

### Agradecimientos

Agradecemos al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) el apoyo otorgado al programa oceanográfico IMECOCAL (proyectos G3532-GT y G35326-T) y al proyecto Oceanografía por Satélite Fase-1 (J002/750/00C-834/00). El

water column, Chavez *et al.* (2002) estimated a production of 0.034 GtC for the period 1997–98 in northern California (32°N–42°N). Both estimates are one order of magnitude lower than that calculated for 1997–99 ( $0.271 \text{ GtC yr}^{-1}$ ) by Kahru and Mitchell (2002) for the first 300 km offshore, from Cape Mendocino, California, to Cabo San Lucas, Baja California, using the VGPM model of Behrenfeld and Falkowski (1997), and SST and colour images of the ocean. This apparent discrepancy in the results obtained with the models becomes more evident when the estimations are extended to large oceanic regions. The differences will only be suitably clarified when large time series are generated of primary production measured *in situ*, or estimated with more precise models of regional resolution.

The geographic areas found to present highest production in this study are related to high values of photosynthetic pigments calculated for the region (Thomas and Strubb, 1990; Kahru and Mitchell, 2001, 2002), and to the principal spawning grounds of small pelagics like sardine, mackerel and anchovy, proposed for the central and southern region of the California Current by Husby and Nelson (1982). The interannual variations of  $P_T$  of close to one year presented herein show great affinity with the annual changes in the abundance of eggs and larvae of small pelagic fish described by Moser *et al.* (2001). The temporal variability of small pelagic total biomass estimated with the primary production data in the area between lines 90 and 107 decreased to less than  $200 \times 10^3$  tons as of 1976–77, with a tendency to recover in 2000 (fig. 7). However, this pelagic fish biomass estimate (anchovy, sardine and mackerel) is not closely related to the catch total reported for the fishing zone off northern Baja California by García and Sánchez (2002) (fig. 7). This is more evident when northern anchovy (*Engraulis mordax*) dominate the catches, as occurred in the late 1970s (García and Sánchez, 2002), which could indicate that when this species is abundant, Pauly and Christensen's (1995) model does not suitably resolve the small pelagic fish biomass estimates in our study area. During 1990–2000, when the anchovy catches fell off Baja California (García and Sánchez, 2002), the average total catch of pelagic fish was  $60 \times 10^3$  tons, associated with an estimated biomass of  $171 \times 10^3$  tons in the coastal zone of Baja California from line 90 to line 107.

ENSO 1972–73 did not considerably reduce the biomass of small pelagics estimated in the time series; however, ENSO 1976–77 had a stronger impact, followed by an approximate decrease to  $100 \times 10^3$  tons of fish during ENSO 1987–88 and 1997–98 (fig. 7). Though the highest negative anomalies of  $P_T$  were calculated for ENSO 1992–93 and 1997–98, there were no significant reductions in the biomass estimated, possibly because they were caused in previous years with La Niña effects.

### Acknowledgements

We thank the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

primer autor tuvo una beca complementaria de los últimos dos proyectos, además de las otorgadas por el CICESE y la UNESCO. J.M. Domínguez y F. Ponce realizaron las figuras finales. El programa original EPOCH compilado en FORTRAN fue gentilmente proporcionado por el Dr. M.H. Prager (NOAA, NMFS, Southeast Fisheries Science Center). Agradecemos al Dr. O. Sosa los comentarios y sugerencias a una primera versión del trabajo y los de dos revisores anónimos a la versión final.

## Referencias

- Bakun, A. (1996). Patterns in the Ocean: Ocean Processes and Marine Population Dynamics. CSGCS/NOAA/CIBNOR, 323 pp.
- Barber, R.T. and Chavez, F.P. (1983). Biological consequences of El Niño. *Science*, 222: 1203–1210.
- Barber, R.T. and Chavez, F.P. (1986). Ocean variability in relation to living resources during the 1982–83 El Niño. *Nature*, 319: 279–285.
- Barber, R.T. and Smith, R.L. (1981). Coastal upwelling ecosystems. In: A.R. Longhurst (ed.), *Analysis of Marine Ecosystems*. Academic Press, New York, pp. 32–68.
- Barber, R.T., Kogelschatz, J.E. and Chavez, F.P. (1985). Origin of productivity anomalies during the 1982–83 El Niño. *CalCOFI Rep.*, 26: 65–71.
- Barton, E.D. (1985). Low-frequency variability of currents and temperatures on the Pacific continental shelf off northern Baja California, 1978 to 1979. *Cont. Shelf Res.*, 4(4): 425–443.
- Behrenfeld, M.J. and Falkowski, P.G. (1997). Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. *Limnol. Oceanogr.*, 42: 1–20.
- Bograd, S.J., Digiacomo, P.M., Durazo, R., Hayward, T.L., Hyrenbach, K.D., Lynn, R.J., Mantyla, A.W., Schwing, F.B., Sydeman, W.J., Baumgartner, T., Lavaniegos, B. and Moore, C.S. (2000). The state of the California Current, 1999–2000: Forward to a new regime? *CalCOFI Rep.*, 41:26–52.
- Carr, M.E. (2002). Estimation of potential productivity in Eastern Boundary Currents using remote sensing. *Deep-Sea Res.*, II, 49: 59–80.
- Chavez, F.P. (1996). Forcing and biological impact of onset of the 1992 El Niño in central California. *Geophys. Res. Lett.*, 23(3): 265–268.
- Chavez, F.P., Pennington, J.T., Castro, C.G., Ryan, J.P., Mishisaki, R.P., Schlining, B., Walz, P., Buck, K.R., McFadyen, A. and Collins, C.A. (2002). Biological and chemical consequences of the 1997–98 El Niño in central California waters. *Prog. Oceanogr.*, 54(1–4): 205–232.
- Chavez, F.P., Ryan, J., Lluch-Cota, S.E. and Niquen, M.C. (2003). From anchovies to sardines and back: Multidecadal change in the Pacific Ocean. *Science*, 299: 217–221.
- Dugdale, R.C. (1967). Nutrient limitation in the sea: Dynamics, identification, and significance. *Limnol. Oceanogr.*, 12(4): 685–695.
- Durazo, R. and Baumgartner, T.R. (2002). Evolution of oceanographic conditions off Baja California: 1997–1999. *Prog. Oceanogr.*, 54(1–4): 7–31.
- Feldman, G., Clark, D. and Halpern, D. (1984). Satellite color observations of the phytoplankton distribution in the eastern equatorial Pacific during the 1982–1983 El Niño. *Science*, 226: 1069–1071.
- García, F.W. y Sánchez, F.J. (2002). Análisis de la pesquería de pelágicos menores para la costa occidental de B.C. durante la temporada del 2001. *Boletín Anual 2003, CRIP-INP*, 15 pp.
- (CONACYT) for support of the IMECOCAL oceanographic program (projects G3532-GT and G35326-T) and of Phase-1 Satellite Oceanography project (J002/750/00C-834/00). The first author received a complementary scholarship from these two projects, in addition to those given by CICESE and UNESCO. The final figures were produced by J.M. Domínguez and F. Ponce. The original program EPOCH, compiled in FORTRAN, was kindly provided by M.H. Prager (NOAA, NMFS, Southeast Fisheries Science Center). We thank O. Sosa for his review of a preliminary version of this work, and two anonymous reviewers for their comments and suggestions to the final version.
- 
- English translation by Christine Harris.
- Haurwitz, M.W. and Brier, G.W. (1981). A critique of the Superposed Epoch Analysis method: Its application to solar-weather relations. *Mon. Weather Rev.*, 109: 2074–2079.
- Hayward, T., Baumgartner, T.R., Checkley, D.M., Durazo, R., Gaxiola-Castro, G., Hyrenbach, K.D., Mantyla, A.W., Mullin, M.M., Murphree, T., Schwing, F.B., Smith, P.E. and Tegner, M. (1999). The state of the California Current in 1998–1999: Transition to cool-water conditions. *CalCOFI Rep.*, 40: 29–62.
- Hernández-de la Torre, B., Gaxiola-Castro, G., Álvarez-Borrego S., Gómez-Valdés, J. and Nájera-Martínez, S. (2003). Interannual variability of new production in the southern region of the California Current. *Deep-Sea Res.*, Part II, 50: 2423–2430.
- Hickey, B.M. (1993). Physical oceanography. In: M.D. Daily, D.J. Reish and J.W. Anderson (eds.), *Ecology of the Southern California Bight. A synthesis and Interpretation*. Univ. of Calif. Press, Chap. 2, pp. 19–70.
- Hoenig, J.M., Prager, M.H. and Payton, N.B. (1989). Computer programs for investigating the effects of environmental events on a time series of recruitment. *Can. Tech. Rep. Fish Aquat. Sci.*, 1713: 43 pp.
- Husby, D.M. and Nelson, C.S. (1982). Turbulence and vertical stability in the California Current. *CalCOFI Rep.*, 23:113–129.
- Kahru, M. and Mitchell, B.G. (2001). Seasonal and nonseasonal variability of satellite-derived chlorophyll and colored dissolved organic matter concentrations in the California Current. *J. Geophys. Res.*, 106: 2517–2529.
- Kahru, M. and Mitchell, B.G. (2002). Influence of the El Niño-La Niña cycle on satellite-derived primary production in the California Current. *Geophys. Res. Lett.*, 29: 10.1029/2002GL014963. AGU.
- Kiladis, G.N. and Diaz, H.F. (1989). Global climatic anomalies associated with extremes in Southern Oscillation. *J. Climate*, 2: 1069–1090.
- Lynn, R.J. and Simpson, J.J. (1987). The California Current System: The seasonal variability of its physical characteristics. *J. Geophys. Res.*, 92: 12947–12966.
- Lynn, R.J. and Simpson, J.J. (1990). The flow of the undercurrent over Continental Borderland off California. *J. Geophys. Res.*, 95: 12995–13008.
- Millán-Núñez, R., Álvarez-Borrego, S. and Trees, C.C. (1996). Relationship between deep chlorophyll maximum and surface chlorophyll concentration in the California Current System. *CalCOFI Rep.*, 37: 241–250.
- Millán-Núñez, R., Álvarez-Borrego, S. and Trees, C.C. (1997). Modeling the vertical distribution of chlorophyll in the California Current System. *J. Geophys. Res.*, 102, C4: 8587–8595.



- Miller, A. (1996). Recent advances in California Current modeling: Decadal and interannual thermocline variations. *CalCOFI Rep.*, 37: 69–79.
- Minobe, S. (1998). Bidecadal and pentadecadal climate oscillations over the North Pacific and North America. In: G. Holloway, P. Muller and D. Henderson, (eds.), *Biotic Impacts of Extratropical Climate Variability in the Pacific*. Proc. 'Aha Huliko'a' Hawaiian Winter Workshop. Univ. of Hawaii at Manoa. Jan. 25–29. NOAA. pp. 5–14.
- Minobe, S. (1999). Resonance in bidecadal and pentadecadal climate oscillations over the North Pacific: Role in climate regime shifts. *Geophys. Res. Lett.*, 26: 855–858.
- Moser, H.G., Charter, R.L., Smith, P.E., Ambrose, D.A., Watson, W., Charter, S.R. and Sandknop, E.M. (2001). Distributional atlas of fish larvae and eggs in the Southern California Bight region: 1951–1998. *CalCOFI Atlas*, 34: 166 pp.
- Panofski, W.H. and Brier, G.W. (1965). *Some Applications of Statistics Meteorology*. Coll. Min. Ind., Pennsylvania State Univ., 159 pp.
- Parés-Sierra, A. and O'Brien, J.J. (1989). The seasonal and interannual variability of the California Current System: A numerical model. *J. Geophys. Res.*, 94: 3159–3180.
- Pauly, D. and Christensen, V. (1995). Primary production required to sustain global fisheries. *Nature*, 374: 255–257.
- Peterson, W.T. and Schwing, F.B. (2003). A new climate regime in northeast Pacific ecosystems. *Geophys. Res. Lett.*, 30(17), doi:10.1029/2003GL017528, 2003: OCE 6. AGU.
- Philander, S.G.H. (1983). El Niño/Southern Oscillation phenomena. *Nature*, 302: 295–301.
- Pineda, J. and López, M. (2002). Temperature, stratification and barnacle larval settlement in two Californian sites. *Cont. Shelf Res.*, 22: 1183–1198.
- Prager, M.H. and Hoenig, J.M. (1989). Superposed Epoch Analysis: A randomization test of environmental effects on recruitment with application to chub mackerel. *Trans. Am. Fish. Soc.*, 118: 608–618.
- Prager, M.H. and Hoenig, J.M. (1992). Can we determine the significance of key-event effects on a recruitment time series? A power study of superposed epoch analysis. *Trans. Am. Fish. Soc.*, 121: 123–131.
- Rasmusson, E.M. and Wallace, J.M. (1983). Meteorological aspects of El Niño/Southern Oscillation. *Science*, 222: 1195–1202.
- Rasmusson, E.M., Wang, X. and Ropelewski, C.F. (1990). The biennial component of ENSO variability. *J. Mar. Syst.*, 1: 71–96.
- Schwing, F.B., Moore, C.S., Ralston, S. and Sakuma, K.M. (2000). Record coastal upwelling in the California Current in 1999. *CalCOFI Rep.*, 41: 148–160.
- Shannon, L.V., and Field, J.G. (1985). Are fish stocks food-limited in the southern Benguela pelagic ecosystem? *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 22: 7–19.
- Smith, P.E. (1995). A warm decade in the Southern California Bight. *CalCOFI Rep.*, 36: 120–126.
- Smith, P.E. and Eppley, R.W. (1982). Primary production and the anchovy population in the Southern California Bight: Comparison of time series. *Limnol. Oceanogr.*, 27: 1–17.
- Stephens, C., Levitus, S., Antonov, J. and Boyer, T.P. (2001). On the Pacific Ocean regime shift. *Geophys. Res. Lett.*, 28: 3721–3724.
- Tanco, R.A. and Berri, G.J. (2000). *CLIMLAB2000 Manual* (version 1.1.0). A Statistical Software Package for Climate Applications. International Research Institute for Climate Prediction, 56 pp.
- Thomas, J. and Strubb, J. (1990). Seasonal and interannual variability of pigment concentrations across a California Current frontal zone. *J. Geophys. Res.*, 95: 13023–13042.
- Troup, A.J. (1965). The "Southern Oscillation". *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 91: 490–506.
- Turk, D., Lewis, M., Harrison, G.W., Kawano, T. and Asanuma, I. (2001). Geographical distribution of new production in the western/central equatorial Pacific during El Niño and non-El Niño conditions. *J. Geophys. Res.*, 106: 4501–4515.
- Venrick, E.L. (2000). Summer in the Ensenada Front: The distribution of phytoplankton species, July 1985 and September 1988. *J. Plankton Res.*, 22(5): 813–841.
- Wolter, K. and Timlin, M.S. (1993). Monitoring ENSO in COADS with a seasonally adjusted principal component index. In: *Proc. 17th Climate Diagnostic Workshop*, Norman, Oklahoma, pp. 52–57.
- Wolter, K. and Timlin, M.S. (1998). Measuring the strength of ENSO events: How does 1997/98 rank? *Weather*, 53: 315–324.
- Woodruff, S.D., Slutz, R.J., Jenne, R.L. and Steurer, P.M. (1987). A Comprehensive ocean-atmosphere data set. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 68: 1239–1250.
- Wu, J.Q. and Hsieh, W.W. (1999). A modeling study of the 1976 climate regime shift in the North Pacific Ocean. *Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci.*, 56: 2450–2462.