

**PRODUCTIVIDAD PRIMARIA EN EL GOLFO DE CALIFORNIA  
EFECTOS DEL EVENTO EL NIÑO 1982-1983**

**PRIMARY PRODUCTIVITY IN THE GULF OF CALIFORNIA  
EFFECTS OF EL NIÑO 1982-1983 EVENT**

José Eduardo Valdéz-Holguín\*  
José Rubén Lara Lara

División de Oceanología  
Centro de Investigación Científica  
y de Educación Superior de Ensenada  
Ave. Espinoza 843  
Ensenada, BC.

\*Dirección actual: Centro de Investigación Científica y Tecnológica de la Universidad de Sonora. Apdo. Postal 1819. 83000 Hermosillo, Sonora.

José Eduardo Valdéz-Holguín y José Rubén Lara-Lara. Productividad Primaria en el Golfo de California efectos del evento El Niño 1982-1983. Primary Productivity in the Gulf of California effects of El Niño 1982-1983 event: Ciencias Marinas Vol. 13(2): 34-50.

**RESUMEN**

Durante marzo y octubre de 1983 realizamos dos cruceros al Golfo de California. Se realizaron experimentos de asimilación de  $^{14}\text{C}$  y mediciones de biomasa fraccionada por clase de tamaños en 14 estaciones. Las profundidades de la capa de mezcla y de la zona eufótica fueron mayores en el Golfo sur durante marzo. Todos los nutrientes mostraron una distribución uniforme hasta la profundidad del 10% de  $I_0$ , y la nutriclina usualmente se situó en el límite de la profundidad de la zona eufótica. La clorofila  $a$  integrada y productividad primaria diaria registraron sus máximos en marzo durante la máxima influencia del evento "El Niño". Las razones  $P^B$  sugieren que el incremento en la productividad en el Golfo central fue probablemente debido a un aumento significativo en la biomasa del fitoplancton, mientras que en el Golfo sur fue el resultado del incremento en las razones de asimilación del fitoplancton. Se propone que el principal factor responsable del incremento en la productividad del Golfo central, fue la disminución en la presión del pastoreo por el zooplancton, mientras que en el Golfo sur la gran dominancia del nanofitoplancton debió ser responsable de las altas tasas de productividad registradas. En comparación con datos históricos de productividad primaria en años normales, el Golfo de California parece enriquecerse durante eventos de "El Niño".

**ABSTRACT**

During March and October, 1983, two cruises were performed in the Gulf of California. Size-fractionated biomass and  $^{14}\text{C}$  assimilation experiments were done at 14 stations. Mixed layer and euphotic zone depths were greater in the southern Gulf during March. All nutrients showed a very uniform distribution down to the depth of 10%  $I_0$ , and the nutricline usually began at the limit of the euphotic zone depth. Integrated chlorophyll  $a$  and primary productivity registered their maxima in March, during the peak "El Niño" event.  $P^B$  ratios suggest that the increased production in the central Gulf, was probably due to an increase in the phytoplankton biomass, while in the southern area was the result of higher phytoplankton assimilation ratios.

Zooplankton grazing suppression in the central zone, is proposed as the main factor responsible for the increased production; while in the southern Gulf the nanrophytoplankton dominance should be responsible for the higher productivity rates. In comparison with historical primary productivity data during normal years, the Gulf of California seem to be enriched during "El Niño" events.

## INTRODUCCION

El Golfo de California está localizado en un medio ambiente árido, entre la Península de Baja California y los estados de Sonora y Sinaloa (Fig. 1). Es una gran cuenca de evaporación, con comunicación directa con el océano Pacífico (Roden, 1964). Tiene una longitud y anchura promedio de aproximadamente 1,000 y 150km respectivamente. Topográficamente está dividido por una serie de cuencas, con dos principales provincias hidrográficas separadas por las Islas Angel de la Guarda y Tiburón. Existe una cuenca somera al norte y una secuencia de cuencas profundas hacia el sur (Alvarez-Borrego, 1983).

En el golfo central ocurren procesos de mezcla por mareas y surgencias estacionales; vientos del noroeste causan surgencias en la costa este durante invierno y primavera, y vientos del sur causan surgencias en la costa oeste durante el verano (Roden y Groves, 1959; Badán-Dangón *et al.*, 1985). Estos procesos causan una excepcional productividad del fitoplancton, con tasas en el Golfo de dos a tres veces mayores que en el océano abierto del Atlántico o del Pacífico a latitudes similares, y comparables a las de la Bahía de Bengala o las áreas de surgencias de la costa oeste de Baja California o África del noroeste (Zeitzchel, 1969).

Los eventos El Niño/Oscilación Sur tienen efectos marcados en el Golfo de California. Alvarez Borrego y Schwartzlose (1979) han documentado una fuerte invasión al Golfo de las masas de agua del Pacífico Tropical del Este y del agua Subtropical subsuperficial durante el evento "El Niño" 1957, comparado con 1974, un año normal. Registros del nivel del mar al final de 1982, mostraron la presencia de anomalías positivas del nivel medio del mar a lo largo de la costa del Pacífico mexicano, incluyendo el Golfo de California (Robles Pacheco y Christensen, 1984; Robles

## INTRODUCTION

The Gulf of California is located in an arid environment between the Baja California peninsula and the mainland states of Sonora and Sinaloa (Fig. 1). It is a large evaporative basin, with free connection to the Pacific Ocean (Roden, 1964). Average length and width are about 1000km and 150km, respectively. Topographically, it is divided by a series of basins, with main hydrographic provinces, separated by Angel de la Guarda and Tiburón islands. There is a shallow northern basin, and sequence of deeper basins to the south (Alvarez-Borrego, 1983).

Strong, semipermanent tidal mixing and seasonal upwelling occur in the central Gulf; northwesterly winds cause upwelling on the eastern shore during winter and spring, and southerly winds cause upwelling on the west coast during summer (Roden and Groves, 1959; Badán-Dangón *et al.*, 1985). These processes cause an exceptionally high phytoplankton productivity, with rates in the Gulf about two to three times greater than those in the open Atlantic or the open Pacific oceans at similar latitudes; and comparable to those in the Bay of Bengal or the upwelling area of the west coast of Baja California or Northwest Africa (Zeitzchel, 1969).

The ENSO El Niño/Southern Oscillation events have marked effects in the Gulf of California. Alvarez-Borrego and Schwartzlose (1979) have documented a stronger invasion of Eastern Tropical Pacific and subsurface Subtropical water masses into the Gulf during the 1957 "El Niño", compared to 1974, a normal year. Tidal records at the end of 1982 showed the presence of positive anomalies of mean sea level along the Mexican Pacific coast, including the Gulf of California (Robles-Pacheco and Christensen, 1984; Robles-Pacheco and Marinone, in press), and this was a clear indication of the presence of "El Niño" event, that lasted throughout 1983 at least. Baum-

Pacheco y Marinone, en prensa), y esto fue una clara indicación de la presencia del evento "El Niño", que duró a través de 1983 al menos. Baumgartner y Christensen (1985) concluyeron que la principal fuente de variación interanual en el nivel del mar del Golfo de California, es el cambio en la intensidad de la circulación ecuatorial asociada con el fenómeno de "El Niño".

El objetivo de ésta investigación fue entender la respuesta de la biomasa y productividad del fitoplancton del golfo al fenómeno de "El Niño". Para tal fin, se presentan los resultados de dos campañas oceanográficas realizadas durante el pasado evento.

## MATERIALES Y METODOS

Durante 1983 realizamos dos cruceros a la parte central y sur del Golfo de California (10-23 marzo y 10-18 octubre), abordo de los B/I "El Puma" y "Mariano Matamoros". Se muestrearon nueve estaciones hidrógráficas en marzo y cinco en octubre (Fig. 1). Se tomaron muestras a cinco profundidades (correspondiendo al 100, 50, 25, 10 y 1% de la irradiancia medida en el agua subsuperficial) con botellas Niskin de siete litros. La irradiancia se midió con un fotómetro submarino Kahlsico No. 268WA310. De cada profundidad muestreada se llenaron diez botellas claras de vidrio de 125ml de capacidad, y diez más con agua filtrada a través de una malla Nitex de 20 $\mu$ m de poro, para estimar la fijación de carbono por las dos fracciones de tamaño del fitoplancton (Malone, 1971). La contribución por el microfitoplancton (>20  $\mu$  m) fue calculada restando la fracción del nanofitoplancton (<20  $\mu$  m) de la fijación de carbono total de las muestras sin filtrar. Cada botella de incubación fue inoculada con 5 $\mu$ Ci de <sup>14</sup>C, siguiendo básicamente la técnica descrita por Steemann-Nielsen (1952). Las incubaciones se hicieron a bordo de la embarcación entre las 11:00 y 14:00 horas, a la luz del día, utilizando tubos de acrílico forrados con mallas de plástico para controlar los niveles de irradiancia. Después de 2 hr de incubación, las muestras fueron filtradas a través de filtros de membrana de 0.45 $\mu$ m de poro; los filtros se colocaron en viales de centelleo líquido con 15ml de solución Betaphase. La radioactivi-

gartner and Christensen (1985) concluded that the principal source of interannual variability in the sea level climate of the Gulf of California is the changing intensity of the equatorial circulation associated with the ENSO phenomenon.

The objective of this research was to understand the response of the phytoplankton biomass and productivity in the Gulf to the ENSO phenomenon. For this, we summarize the results of two cruises that took place during the past ENSO event.

## MATERIALS AND METHODS

During 1983 we carried out two cruises to the central and southern portions of the Gulf of California (10-23 March and 10-18 October, 1983), aboard the research vessels "El Puma" and "Mariano Matamoros". Nine hydrographic stations in March and five in October were occupied (Fig. 1), and samples obtained at five depths (corresponding to 100, 50, 25, 10 and 1% of the irradiance measured just below the sea surface) with 7-litre Niskin bottles. Irradiance was measured with a submarine photometer Kahlsico No. 268WA310, with cosine corrector, filtered to give only the photosynthetic active radiation. Ten 125ml clear glass bottles were filled with water from each sampled depth, and ten more bottles were filled with water from each sampled depth but filtered through a 20 $\mu$ m Nitex mesh, to estimate the carbon fixation by the two size fractions (Malone, 1971). The contribution by the microphytoplankton (>20  $\mu$  m) was calculated subtracting the nanophytoplankton (<20  $\mu$  m) fraction from the total. Each glass bottle was inoculated with 5 $\mu$ Ci of <sup>14</sup>C, basically following Steemann-Nielsen (1952) technique. Sunlight incubation was done on board, using acrylic tubes with black plastic screens to control irradiance. Incubations were done between 11:00 and 14:00 hours. After 2 hr incubation, samples were filtered with 0.45 $\mu$ m pore membrane filters. The filters were put into liquid scintillation vials with 15ml of Betaphase cocktail. Radioactivity was measured with a Beckman LSC-100 Liquid Scintillation counter, at the Scripps Institution of Oceanography in La Jolla, Ca. Calculations of assimilated carbon were done follow-

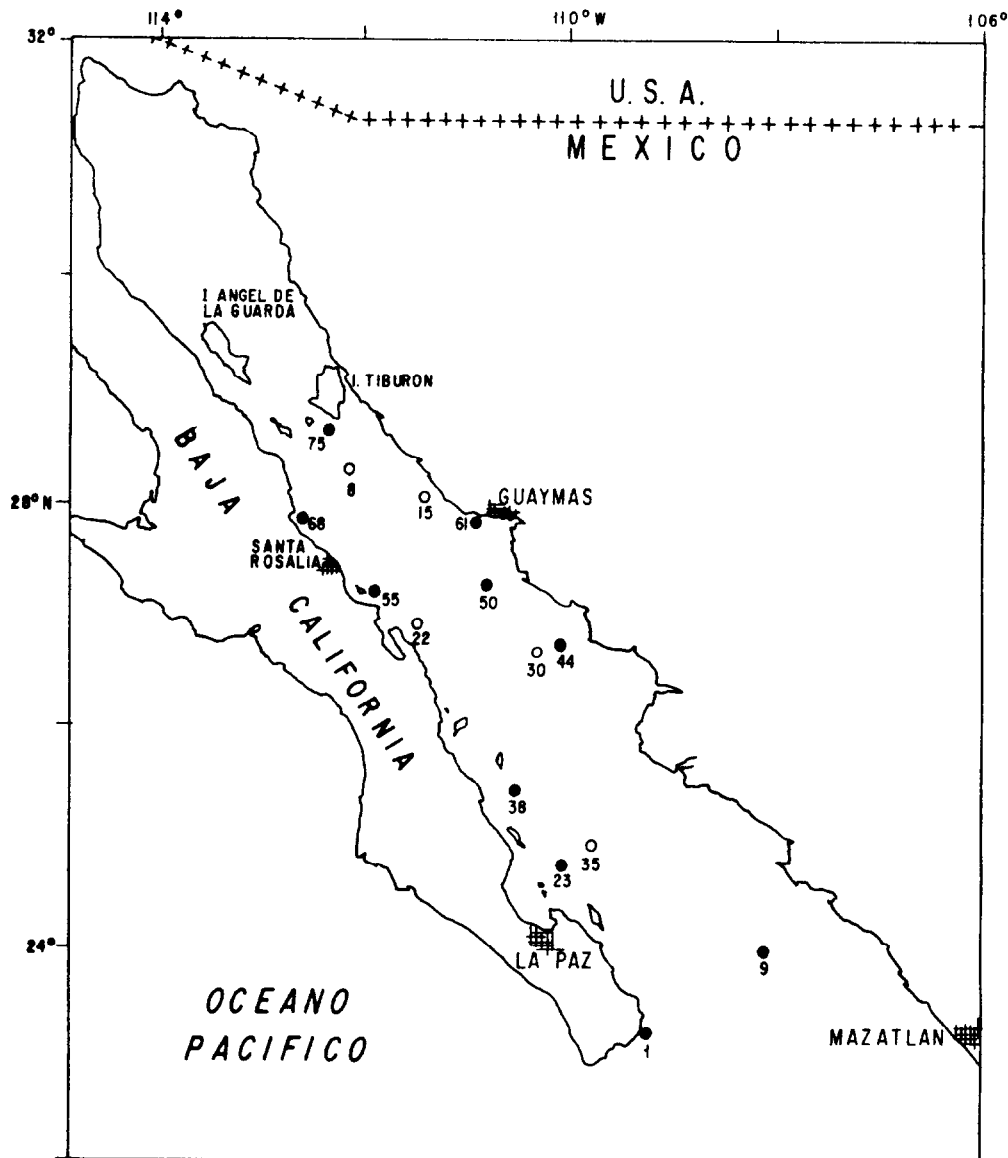


Figura 1. Localización de estaciones. Marzo 1983 (●) y octubre 1983 (○).

Figure 1. Station locations. March 1983 (●) and October 1983 (○).

dad se midió con un contador de centelleo líquido Beckman LSC-100 en la Institución de Oceanografía Scripps, en la Jolla, California. Los cálculos de carbono asimilado se hicieron de acuerdo a Strickland y Parsons (1972). Para cada profundidad muestreada se midió también la temperatura (T°C), salinidad

ing Strickland and Parsons (1972). For each sampled depth we also measured temperature (T°C), salinity (S<sup>o</sup>/o<sub>00</sub>), chlorophyll a Chl<sub>a</sub>) and nutrients NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, PO<sub>4</sub> and SiO<sub>2</sub>). Nutrients were measured from preserved frozen samples with a Scientific Instrument autoanalyzer. Total chlorophyll a content and

( $S^0/_{00}$ ), contenido de clorofila  $a$  ( $Cl_a$ ) y la concentración de nutrientes ( $NO_2$ ,  $NO_3$ ,  $PO_4$ , y  $SiO_2$ ). Las concentraciones de nutrientes se midieron de muestras preservadas congeladas, con un autoanalizador Scientific Instrument. El contenido de clorofila  $a$  total y la clorofila  $a$  debida a la fracción del nanofitoplancton (filtrada a través de una malla Nitex de  $20\mu m$ ) fueron obtenidas mediante filtros de fibra de vidrio GF/C, utilizando la técnica fluorimétrica con correcciones por feopigmentos, descrita por Yentsch y Menzel (1963).

## RESULTADOS

Durante ambos muestreos, marzo y octubre, el área sur del Golfo (al sur de  $27^{\circ}N$ ) registró las temperaturas del agua superficial más cálidas, con valores hasta de  $28.9^{\circ}C$  en octubre. Las temperaturas superficiales mínimas ( $19.8^{\circ}C$ ) se midieron en el Golfo central ( $27$  a  $29^{\circ}N$ ) en marzo (Tabla I). Las máximas profundidades de la capa de mezcla se registraron en el Golfo sur durante marzo, con valores hasta de  $70m$  (Tabla I). La profundidad de la zona eufótica, definida por el  $1\%$  de  $I_0$ , varió de  $26$  a  $98m$ . Durante ambos periodos la región sur registró las máximas profundidades (Tabla I).

Las figuras 2 al 5 presentan las distribuciones verticales de temperatura, salinidad, nutrientes, clorofila  $a$  y productividad primaria por clase de tamaños, para dos estaciones seleccionadas de cada crucero, representativas de las condiciones del Golfo sur y central en marzo y octubre de 1983. En general, todos los nutrientes mostraron una distribución vertical muy uniforme en las aguas subsuperficiales, sin embargo, se incrementaron rápidamente con la profundidad desde los niveles de luz de  $10$  ó  $1\%$  de  $I_0$  (Figs. 2b a 5b). Las concentraciones superficiales de fosfatos (Tabla I) presentaron un rango de  $0.1$  a  $1.9\mu M$ . Las mínimas concentraciones se registraron en octubre, mientras que en el Golfo central se midieron las máximas concentraciones en marzo (Tabla I). Las concentraciones superficiales de nitratos (Tabla I) tuvieron un rango de  $0.4$  a  $1.8\mu M$ . Las mínimas concentraciones se registraron en el Golfo central en octubre, mientras que el área sur presentó en ambos cruceros las máximas concentraciones de nitratos superficiales. Las

the chlorophyll  $a$  due to the nanophytoplankton size class (filtered through  $20\mu m$  Nitex mesh) were obtained using GF/C fiber glass filters, and analyses were performed by the Yentsch and Menzel (1966) fluorimetric technique, correcting for phaeopigments.

## RESULTS

During both, March and October, the southern Gulf presented the warmest surface waters, with values up to  $28.9^{\circ}C$  in October. Minimum surface temperatures ( $19.8^{\circ}C$ ) were found in the central Gulf in March (Table I). Maximum mixed layer depths were observed during March in the southern Gulf, with values up to  $70m$  (Table I). The depth of the euphotic zone, defined by  $1\%$   $I_0$ , varied from  $26$  to  $98m$ . During both periods the southern region registered the deepest euphotic zone depths (Table I).

Vertical profiles of temperature, salinity, nutrients, chlorophyll  $a$  and primary productivity by size fractions, are presented for only two selected stations of each cruise, representative of the southern and central Gulf conditions in both, March and October (Figs. 2 to 5). In general, all nutrients showed a very uniform distribution in the subsurface waters, but increasing rapidly with depth, beginning at the  $10$  or  $1\%$  light depths (Figs. 2b to 5b). Surface phosphate concentrations (Table I) ranged from  $0.1$  to  $1.9\mu M$ . Their lowest concentrations were found during October. The central gulf registered the highest values during March (Table I). Surface nitrate concentrations (Table I) ranged from  $0.4$  to  $1.8\mu M$ . Minimum concentrations were reached in October in the central Gulf. The southern Gulf presented always the highest surface nitrate concentrations. Surface silicate concentrations ranged from  $1.6$  to  $16.6\mu M$  (Table I). Maximum concentrations were registered in the central region during March, while the minima were registered in October in the central Gulf. A very distinctive feature was shown by the cell size contribution to the chlorophyll  $a$  content and primary productivity. In general, all the stations in the southern Gulf showed a dominance of the nanophytoplankton size class throughout the euphotic zone (Figs. 2c,d and 4c,d); while only in few stations in the central Gulf in March and only

**Tabla 1.** Comparación por regiones de valores promedios ( $\pm$  desv. est.) de variables medidas en el Golfo de California, durante marzo (8303) y octubre (8310) de 1983.**Table 1.** Regional comparison of mean values ( $\pm$  std. dev.) for variables measured in the Gulf of California, during March (8303) and October (8310), 1983.

VARIABLE	8303		8310	
	SUR	CENTRAL	SUR	CENTRAL
TEMP. (°C)	22.6 $\pm$ 0.68 (5,21.8-23.7)	20.4 $\pm$ 0.59 (5,19.8-21.4)	28.6 $\pm$ 0.35 (3,28.0-28.9)	26.8 $\pm$ 0.36 (2,26.5-27.2)
PROF. CAPA MEZCLA (m)	32 $\pm$ 25.6 (5,0-70)	24 $\pm$ 10.2 (5,10-40)	17 $\pm$ 3.5 (2,14-21)	17 $\pm$ 0.0 (1,17)
I% I <sub>0</sub> (m)	69 $\pm$ 13.5 (5,50-92)	37 $\pm$ 7.2 (5,28-47)	78 $\pm$ 13.9 (3,68-98)	58 $\pm$ 14.0 (2,44-72)
NO <sub>3</sub> [ $\mu$ M]	1.33 $\pm$ 0.29 (5,1.0-1.8)	0.96 $\pm$ 0.34 (5,0.5-1.4)	0.80 $\pm$ 0.14 (3,0.6-0.9)	0.49 $\pm$ 0.02 (2,0.4-0.5)
PO <sub>4</sub> [ $\mu$ M]	0.60 $\pm$ 0.09 (5,0.4-0.7)	1.26 $\pm$ 0.37 (5,0.7-1.9)	0.36 $\pm$ 0.17 (3,0.1-0.5)	0.22 $\pm$ 0.01 (2,0.21-0.24)
SiO <sub>2</sub> [ $\mu$ M]	5.4 $\pm$ 3.1 (5,1.6-10.7)	10.0 $\pm$ 3.4 (5,3.3-12.5)	7.96 $\pm$ 6.1 (3,3.2-16.6)	3.97 $\pm$ 0.41 (2,3.56 $\pm$ 4.39)
Clorofila <i>a</i> (mg.m <sup>-2</sup> )	33.1 $\pm$ 10.7 (5,15.7-42.2)	104.2 $\pm$ 51.8 (4,50.1-163.5)	23.4 $\pm$ 2.6 (3,21.0-27.1)	43.9 $\pm$ 28.1 (2,15.7-72.1)
Productividad primaria (gC.m <sup>-2</sup> .dfa <sup>-1</sup> )	2.76 $\pm$ 0.53 (4,1.8-3.1)	3.12 $\pm$ 0.95 (5,1.9-4.4)	1.51 $\pm$ 0.15 (3,1.4-1.7)	3.12 $\pm$ 1.6 (2,1.4-4.8)
PB (mgC.mgCl <sub>2</sub> <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup> )	13.0 $\pm$ 1.65 (4,10.4-15.0)	7.6 $\pm$ 2.5 (5,4.5-11.4)	7.20 $\pm$ 1.1 (3,6.1-8.8)	9.9 $\pm$ 1.0 (2,8.9-10.9)

NOTA: Los datos de temperatura y nutrientes son valores superficiales. El número de estaciones y el rango de valores son mostrados entre paréntesis.

concentraciones superficiales de silicatos registraron un rango de 1.6 a 16.6 $\mu$ M (Tabla I). El Golfo central presentó las máximas concentraciones en marzo, y las mínimas en octubre.

La contribución por clase de tamaños al contenido de clorofila *a* y productividad primaria fue muy peculiar. En general, todas las estaciones en el Golfo sur mostraron una dominancia de la fracción del nanofitoplancton a través de la zona eufótica (Figs. 2c,d y 4c,d);

one station in October (Figs. 3c,d and 5c,d) the contribution by the microphytoplankton was significantly higher than that of the nanophytoplankton. Maximum chlorophyll *a* and primary productivity per m<sup>3</sup> were reached in the central Gulf stations (Figs. 3c,d and 5c,d).

Mean integrated chlorophyll *a* (mg m<sup>-2</sup>) throughout the euphotic zone in the central Gulf, was greater in March (104.2mg m<sup>-2</sup>)

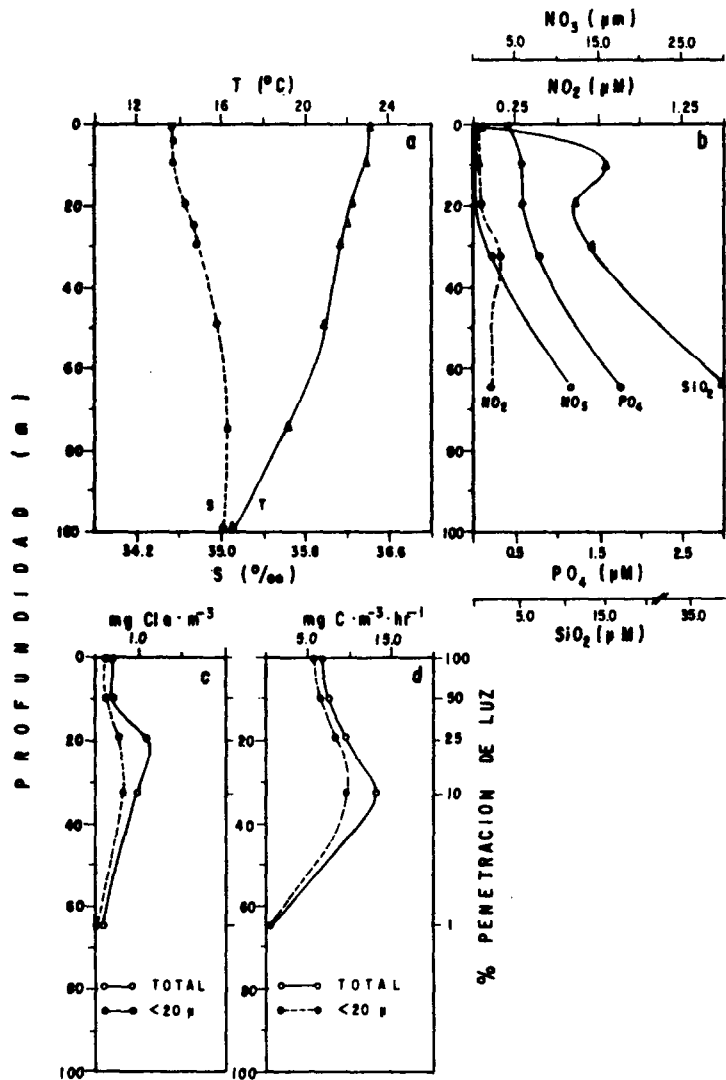
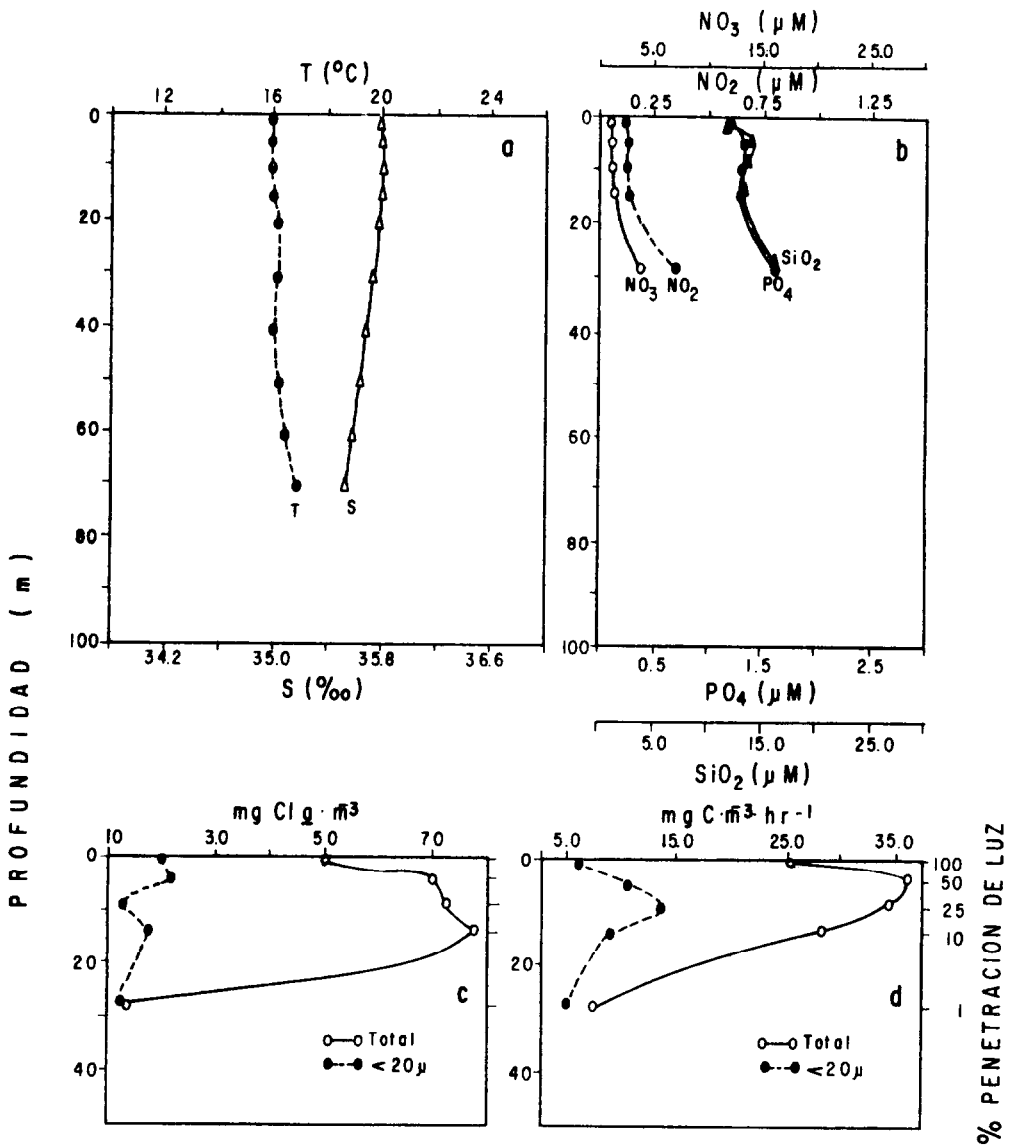


Figura 2. Perfiles verticales de: a) temperatura ( $T^{\circ}\text{C}$ ) y salinidad ( $S^{\circ}/\text{oo}$ ); b) nitratos, nitritos, fosfatos y silicatos ( $\mu\text{M}$ ); c) clorofila a total y para la fracción del nanofitoplancton ( $\text{mg Chl a m}^{-3}$ ); d) productividad primaria total y para la fracción del nanofitoplancton ( $\text{mg C m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ ), para la estación nueve en marzo 1983.

Figure 2. Vertical profiles of: a) temperature ( $T^{\circ}\text{C}$ ) and salinity ( $S^{\circ}/\text{oo}$ ); b) nitrates, nitrites, phosphates and silicates ( $\mu\text{M}$ ); c) total and nanophytoplankton chlorophyll a ( $\text{mg Chl a m}^{-3}$ ) d) total nanophytoplankton primary productivity ( $\text{mg C m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ ), for station nine, in March, 1983.

mientras que solo en algunas estaciones en el Golfo central durante marzo y únicamente una estación en octubre (Figs. 3c,d y 5c,d) la contribución por el microfitoplancton fue

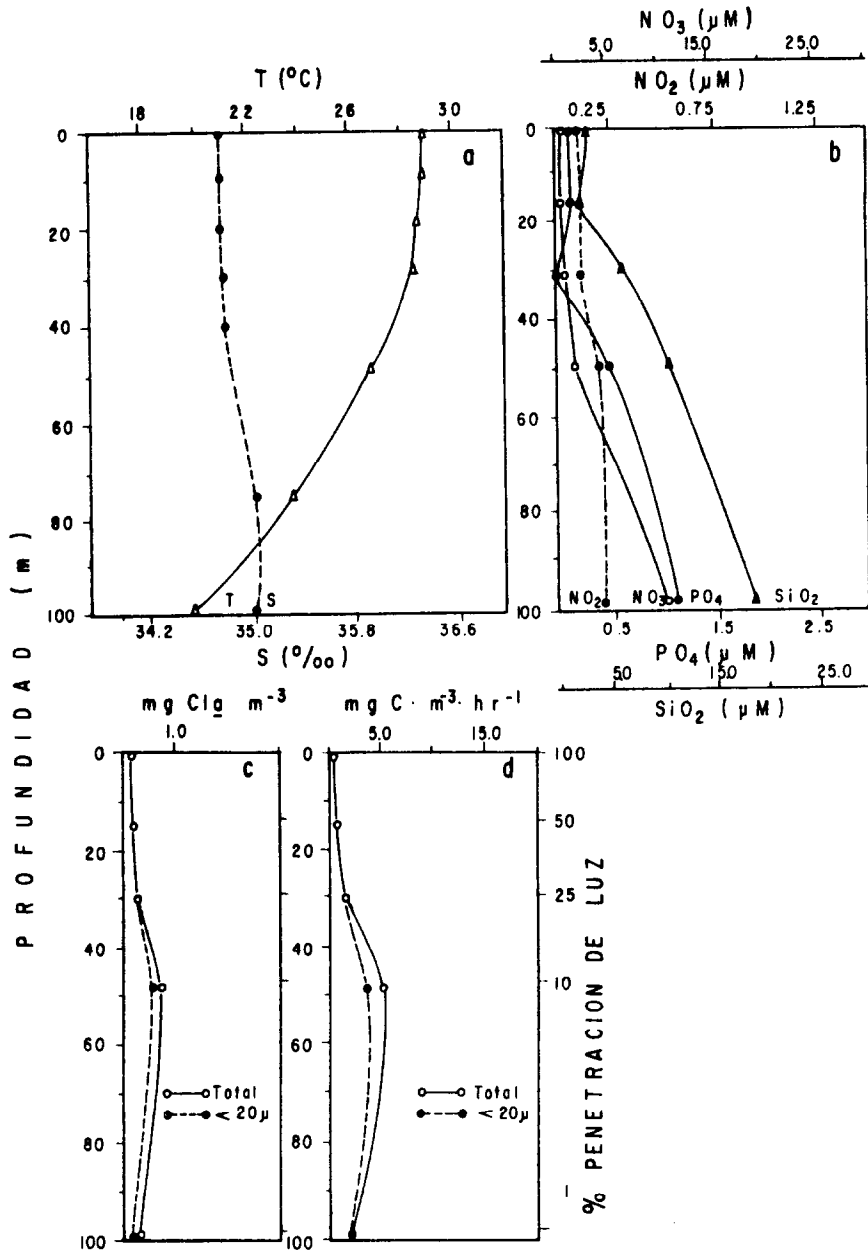
than in October ( $43.9\text{mg m}^{-2}$ ) (Fig. 6; Table I). The southern Gulf (south of  $27^{\circ}\text{N}$ ) showed lower chlorophyll a concentrations than the central Gulf. Integrated chlorophyll a were also



**Figura 3.** Perfiles verticales de: a) temperatura ( $T^{\circ}\text{C}$ ) y salinidad ( $S^{\circ}\text{‰}$ ); b) nitratos, nitritos, fosfatos y silicatos ( $\mu\text{M}$ ); c) clorofila  $a$  total y para la fracción del nanofitoplancton ( $\text{mg Chl } a \cdot \text{m}^{-3}$ ); d) productividad primaria total y para la fracción del nanofitoplancton ( $\text{mg C m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ ), para la estación 61, marzo 1983.

**Figure 3.** Vertical profiles of: a) temperature ( $T^{\circ}\text{C}$ ) and salinity ( $S^{\circ}\text{‰}$ ); b) nitrates, nitrites, phosphates and silicates ( $\mu\text{M}$ ); c) total and nanophytoplankton chlorophyll  $a$  ( $\text{mg Chl } a \cdot \text{m}^{-3}$ ); d) total nanophytoplankton primary productivity ( $\text{mg C m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ ), for station 61, in March, 1983.





**Figura 4.** Perfiles verticales de: a) temperatura (T°C) y salinidad (S‰); b) nitratos, nitritos, fosfatos y silicatos (μ M); c) clorofila *a* total y para la fracción del nanofitoplancton (mg Chl<sub>a</sub> m<sup>-3</sup>); d) productividad primaria total y para la fracción del nanofitoplancton (mg C m<sup>-3</sup>.h<sup>-1</sup>), para la estación 35, en octubre 1983.

**Figure 4.** Vertical profiles of: a) temperature (T°C) and salinity (S‰); b) nitrates, nitrites, phosphates and silicates (μ M); c) total and nannophytoplankton chlorophyll *a* (mg Chl<sub>a</sub> m<sup>-3</sup>) d) total nannophytoplankton primary productivity (mgC m<sup>-3</sup>.h<sup>-1</sup>), for station 35, in October 1983.

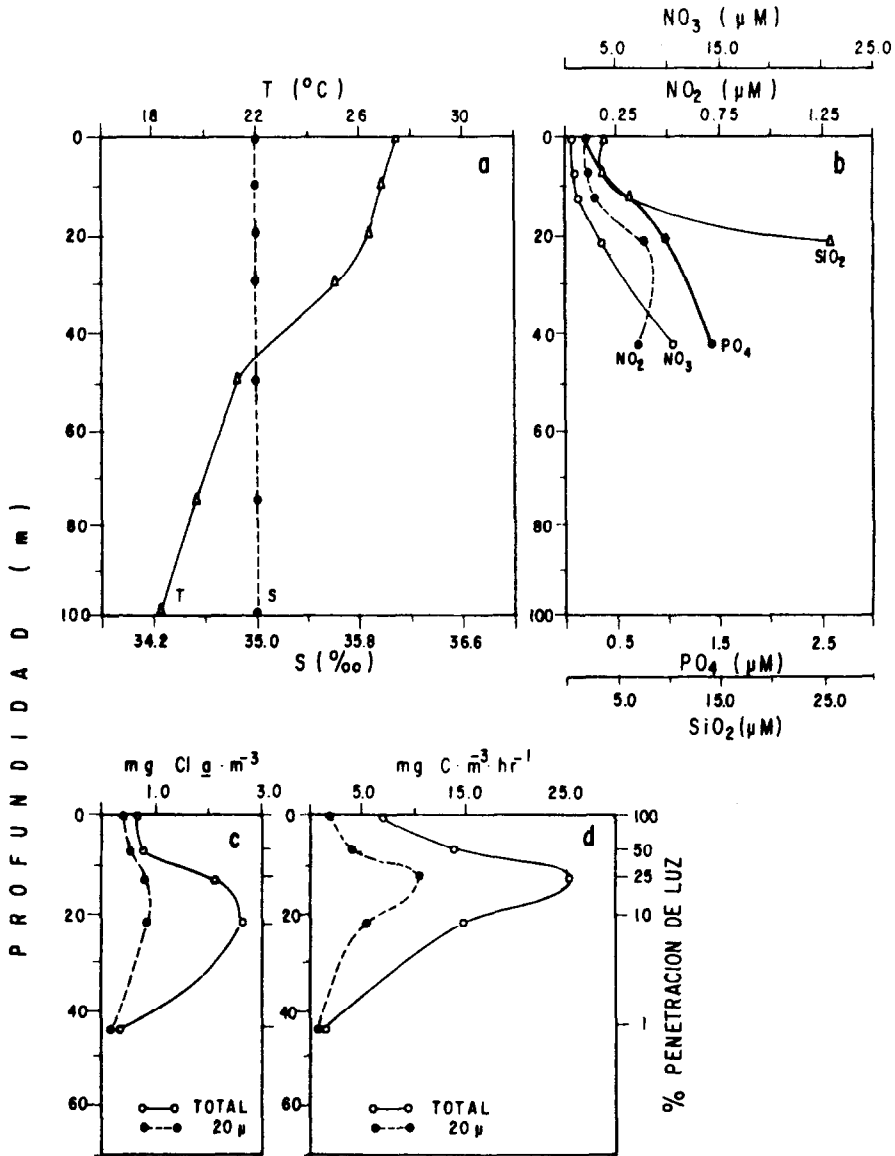


Figura 5. Perfiles verticales de: a) temperatura ( $T^{\circ}\text{C}$ ) y salinidad ( $S^{\circ}/\text{oo}$ ); b) nitratos, nitritos, fosfatos y silicatos ( $\mu\text{M}$ ); c) clorofila  $a$  total y para la fracción del nanofitoplancton ( $\text{mg Chl } a \cdot \text{m}^{-3}$ ); d) productividad primaria total y para la fracción del nanofitoplancton ( $\text{mg C } \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ ), para la estación 15, en octubre 1983.

Figure 5. Vertical profiles of: a) temperature ( $T^{\circ}\text{C}$ ) and salinity ( $S^{\circ}/\text{oo}$ ); b) nitrates, nitrites, phosphates and silicates ( $\mu\text{M}$ ); c) total and nannophytoplankton chlorophyll  $a$  ( $\text{mg Chl } a \cdot \text{m}^{-3}$ ) d) total nannophytoplankton primary productivity ( $\text{mg C } \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ ), for station 15, in October 1983.

significativamente mayor que la del nanofitoplancton. Los valores máximos del contenido de clorofila *a* y productividad primaria por  $m^3$  se registraron en las estaciones del Golfo central (Figs. 3c,d y 5c,d).

Las concentraciones promedio de clorofila *a* integrada ( $mg\ m^{-2}$ ) a través de la zona eufótica fueron mayores en marzo ( $104.2mg\ m^{-2}$ ) que en octubre ( $43.9mg\ m^{-2}$ ) para el Golfo central (Fig. 6; Tabla I). El Golfo sur presentó mas bajas concentraciones de clorofila *a* que el Golfo central; la clorofila *a* integrada fue también mayor en marzo ( $33.1mg\ m^{-2}$ ) que en octubre ( $23.4mg\ m^{-2}$ ) (Fig. 6, Tabla I). Más del 70% de las estaciones tuvieron una mayor contribución al contenido de clorofila *a* por el nanofitoplancton, registrándose sólo en algunas estaciones de la región central una dominancia por el microfitoplancton (Fig. 6).

Las tasas de productividad primaria ( $gC\ m^{-2}\ d^{-1}$ ) mostraron patrones similares a los de las distribuciones del contenido de clorofila *a* (Fig. 7). Las tasas promedio máximas ( $3.12gC\ m^{-2}\ d^{-1}$ ) se registraron en el Golfo central, en ambos muestreos de marzo y octubre; mientras que en el Golfo sur, marzo promedió  $2.76gC\ m^{-2}\ d^{-1}$  y octubre  $1.53gC\ m^{-2}\ d^{-1}$  (Tabla I). Con la excepción de algunas estaciones en el Golfo central, la fracción del nanofitoplancton, al igual que en el contenido de clorofila *a*, presentó las máximas tasas de productividad primaria (Fig. 7).

Las razones de asimilación promedio a través de la zona eufótica ( $P^B$ ) mostraron una fuerte variación espacial en el Golfo (Fig. 8), el rango de valores registrado fue de 4.5 a  $15.0mgC\ mgChl_a^{-1}\ h^{-1}$  (Tabla I). Las máximas razones (15.0) se determinaron en marzo en la región sur, mientras que en octubre las razones  $P^B$  se incrementaron de la boca (6.1) hacia la zona central (10.9) (Fig. 8).

## DISCUSIONES

Nuestros resultados muestran que la biomasa y productividad del fitoplancton del Golfo de California parece ser afectada por la variabilidad interanual debida a los eventos

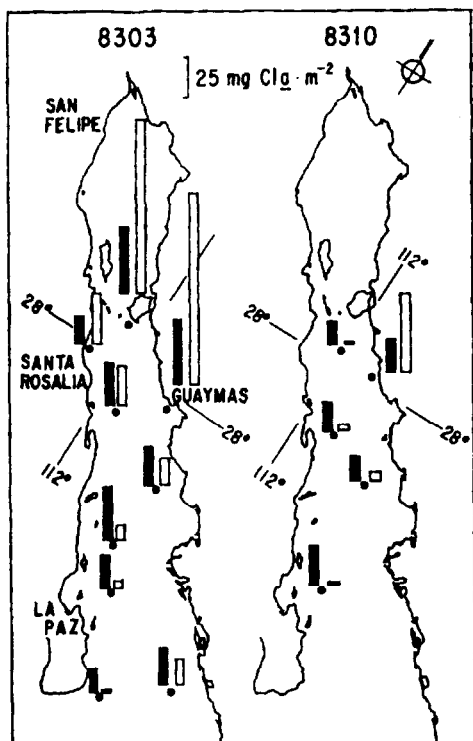
greater in March ( $33.1mg\ m^{-2}$ ) than in October ( $23.4mg\ m^{-2}$ ) (Fig. 6, Table I). Over 70% of the stations owed the greatest contributions of chlorophyll *a* to the nanophytoplankton (Fig. 6). The few cases where microphytoplankton dominated were found mainly in the central region (Fig. 6).

Daily integrated primary productivity rates ( $gC\ m^{-2}\ d^{-1}$ ) showed trends similar to those of the chlorophyll *a* distributions (Fig. 7). Maximum mean values ( $3.12gC\ m^{-2}\ d^{-1}$ ) were found in the central Gulf, in both March and October; while in the southern Gulf, March averaged  $2.76gC\ m^{-2}\ d^{-1}$  and October  $1.53gC\ m^{-2}\ d^{-1}$  (Table I). With the exception of a few stations in the central Gulf, the nanophytoplankton size class also provided the dominant contribution to the primary productivity (Fig. 7).

Average euphotic zone assimilation ratios ( $P^B$ ) showed strong spatial variability (Fig. 8), with values ranging from 4.5 to  $15.0mgC\ mgChl_a^{-1}\ h^{-1}$  (Table I). During March, maximum values (15.0) were found in the southern region, while in October the  $P^B$  ratios increased from the mouth (6.1) to the central zone (10.9) (Fig. 8).

## DISCUSSION

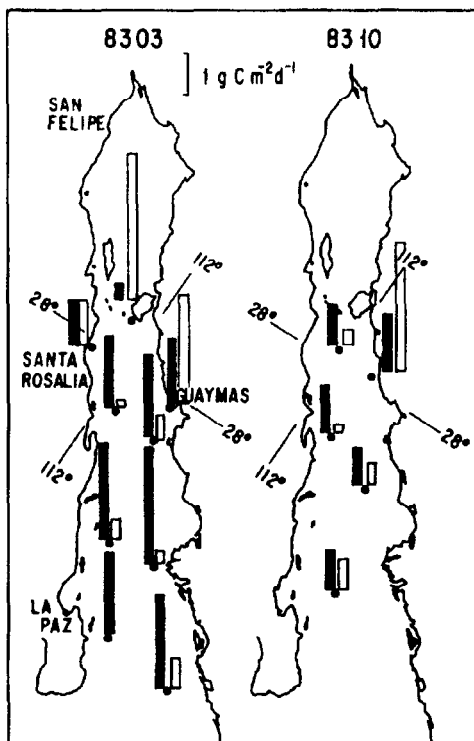
Our results show that the phytoplankton biomass and productivity of the Gulf of California may be affected by the interannual variability due to the ENSO conditions, increasing the production rates during the event. Historical comparison with previous primary productivity data during normal periods support our results, for example, mean primary productivity rates in 1983 were as high as seven times the rates in 1968 and about twice the rates in 1981-1982 (Fig. 9). However, we have to be cautious because comparison with historical data may not be completely appropriate, due to differences in space and timing, and also changes in methodology. For instance, Zeitzschel's (1969) data for 1968 were from half a solar day  $^{14}C$  incubations, while ours and those of Gaxiola-Castro and Alvarez-Borrego (1986) and Alvarez-Borrego (in press) for 1981-1982 were



**Figura 6.** Concentración de clorofila *a* ( $\text{mg m}^{-2}$ ) por clase de tamaños durante 1983. Las barras claras indican la contribución debida al microfitoplancton, y las barras oscuras debida al nanofitoplancton.

**Figure 6.** Chlorophyll *a* concentration ( $\text{mg m}^{-2}$ ) by size classes during 1983. Open bars indicate contribution due to the microphytoplankton, while dark bars due to the nanophytoplankton.

"El Niño", incrementando las tasas de producción durante el fenómeno. Comparaciones con datos históricos de productividad primaria en años normales, apoyan nuestras conclusiones, por ejemplo, valores de productividad primaria promedio en 1983 fueron hasta siete veces mayores que en 1968 y cerca del doble que las tasas en 1981-1982 (Fig. 9). Sin embargo, tenemos que ser cautos, ya que las comparaciones con datos históricos pueden ser no completamente apropiadas, debido a diferencias espaciales y temporales en los muestre-



**Figura 7.** Productividad primaria ( $\text{gC m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) por clase de tamaños durante 1983. Las barras claras indican la contribución debida al microfitoplancton, y las barras oscuras debida al nanofitoplancton.

**Figure 7.** Phytoplankton primary productivity ( $\text{gC m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) by size classes during 1983. Open bars indicate contribution due to the microphytoplankton, while dark bars due to the nanophytoplankton.

estimated from two-hour incubations. Carpenter and Lively (1980) have reported that sometimes short-term incubations give greater production rates than long-term ones, often more than double.

If the productivity rates in the Gulf of California during the peak "El Niño" are greater than in normal years, as our data suggest, this will indicate that the pelagic ecosystem of the Gulf of California responds to "El Niño" events in an inverse manner from

os y diferencias en las metodologías usadas. Por ejemplo, los datos de Zeitzschel (1969) para 1968, fueron generados de incubaciones con duración de medio día solar, mientras que los nuestros y los de Gaxiola Castro y Alvarez Borrego (1986) y Alvarez Borrego, *et al.* (en prensa) para 1981-1982, fueron estimados de incubaciones con duración de aproximadamente dos horas. Carpenter y Lively (1980) han reportado que las incubaciones de corta duración a veces resultan con mayores tasas de producción que las incubaciones de larga duración, a menudo más del doble.

Si las tasas de productividad en el Golfo de California durante los eventos "El Niño" son mayores que en años normales, tal como lo sugieren nuestros datos, esto indicará que el ecosistema pelágico del Golfo de California responde a los eventos "El Niño" de una manera inversa a las aguas costeras de América del Sur (Ecuador, Perú, Chile) y América del Norte (Baja California y la costa oeste de E.U.A.), en las cuales usualmente se han reportado fuertes decrementos en las tasas de producción planctónicas (por ejemplo, Guillén, 1971; Avaria Placier, 1983; Dandonneau y Donguy, 1983; Chávez, *et al.*, 1983, 1984; Barber y Chávez, 1986; Torres Moye y Alvarez Borrego, en prensa; Bernal, 1979, 1981; McGowan, 1983, 1984).

Investigaciones previas en el Golfo de California han sugerido grandes cambios en la flora fitoplanctónica durante eventos "El Niño". Por ejemplo, Baumgartner *et al.* (1985) han mostrado que las poblaciones de fitoplancton silíceo (diatomeas y silicoflagelados mayores de  $24\mu\text{m}$ ) que son preservadas en los sedimentos laminados de la cuenca anóxica de Guaymas en el Golfo central, tienen una alta coherencia con las anomalías interanuales del nivel del mar. Ellos han reportado también que los períodos de ocurrencia de eventos de "El Niño" están generalmente caracterizados por incrementos en las abundancias de células silíceas totales preservadas, y en particular, por un mayor número de individuos de especies cuya distribución está limitada a aguas tropicales y subtropicales.

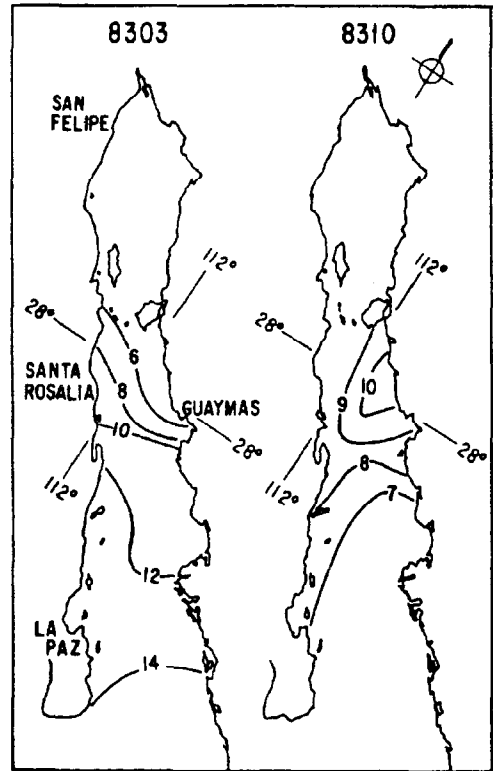
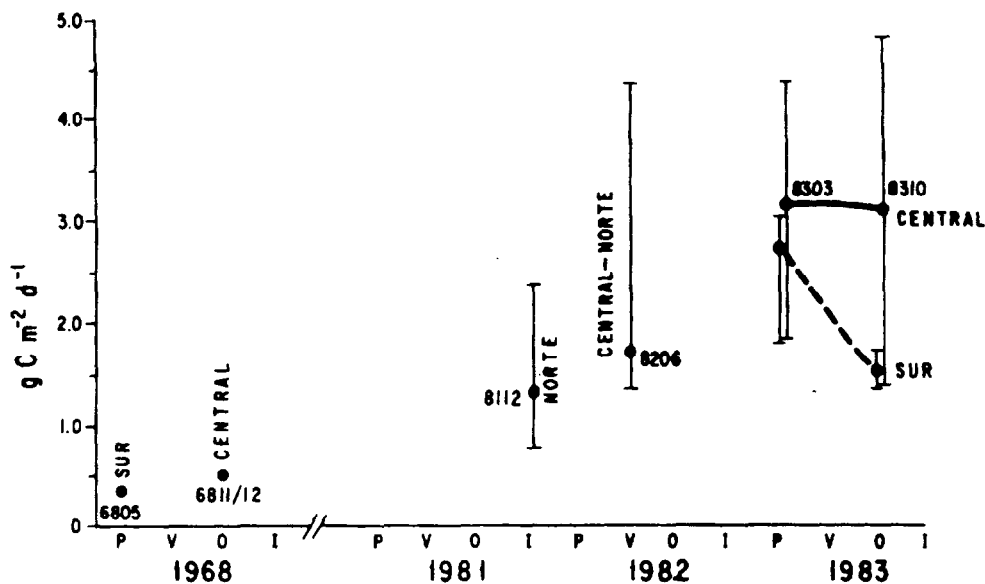


Figura 8. Razones de asimilación promedio ( $P^B$ ,  $\text{mgC mgChla}^{-1} \text{h}^{-1}$ ) durante 1983.

Figure 8. Average assimilation ratios ( $P^B$ ,  $\text{mgC mgChla}^{-1} \text{h}^{-1}$ ) during 1983.

those off south America (Ecuador, Perú, Chile) and north America (Baja California and the western coast of the USA), in which a strong decrease of the total plankton production has usually been documented (i.e., Guillén, 1971; Avaria-Placier, 1983; Dandonneau and Donguy, 1983; Chávez *et al.*, 1983, 1984; Barber and Chávez, 1986; Torres-Moye and Alvarez-Borrego, in press; Bernal, 1979, 1981; McGowan, 1983, 1984).

Previous investigations in the Gulf have implied major changes in the phytoplankton flora during "El Niño" events. For instance, Baumgartner *et al.* (1985) have shown that the siliceous phytoplankton assemblages (diatoms and silicoflagellates, greater than  $24\mu\text{m}$ ) which are preserved in the laminated sediments of the anoxic Guaymas basin in the



**Figura 9.** Comparación de tasas de productividad primaria promedio para el Golfo de California. Las barras indican el rango de valores reportados. Valores para 6805 y 6811/12 fueron tomados de Zeitzschel (1969); para 8112 de Gaxiola Castro y Alvarez Borrego (1986) para 8206 de Alvarez Borrego *et al.* (en prensa); y para 8303 y 8310 de este estudio.

**Figure 9.** Comparison of mean primary productivity rates in the Gulf of California. Bars indicate range of values reported. Rates for 6805 and 6811/12 are from Zeitzschel (1969); 8112 from Gaxiola-Castro y Alvarez-Borrego (1986) 8206 from Alvarez-Borrego *et al.* (in press); and 8303 and 8310 from this study.

Nuestros valores de las razones de asimilación ( $P^B$ ) sugieren que, las causas del incremento en las tasas de productividad en el Golfo central en marzo, fueron diferentes que en el Golfo sur. Por ejemplo, el Golfo central promedió  $7.6 \text{ mgC mgChl}_a^{-1} \text{ h}^{-1}$ , mientras que en el área sur el promedio fue de  $13.0 \text{ mgC mgChl}_a^{-1} \text{ h}^{-1}$  (Tabla I). Las tasas de productividad primaria fueron solo cerca del 13% mayores en el Golfo central que en el sur, pero el contenido de clorofila  $a$  fue tres veces mayor. Por lo tanto, sugerimos que los altos valores de productividad en el Golfo central resultaron del incremento excesivo en la biomasa fitoplanctónica, mientras que en el Golfo sur las altas tasas resultaron del aumento en las razones de asimilación de las poblaciones del fitoplancton. En octubre, el Golfo central mantuvo altas tasas de producción,

central Gulf of California, are strongly coherent with interannual sea-level anomalies. They have reported also that the ENSO periods are generally marked by increases in preserved abundances of the total siliceous assemblages and, in particular, by greater numbers of individuals from species whose distributions are limited to tropical and subtropical waters.

Our  $P^B$  ratios suggest that causes of the increased primary productivity rates in March, were different in the central from those in the southern Gulf. For instance, the central Gulf averaged  $7.6 \text{ mgC mgChl}_a^{-1} \text{ h}^{-1}$  while the southern area averaged  $13.0 \text{ mgC mgChl}_a^{-1} \text{ h}^{-1}$  (Table I). Primary productivity rates were only about 13% higher in the central than in the southern, but the chlorophyll  $a$  content

pero con un incremento en las razones  $PB$ , por el contrario en el Golfo sur la productividad decreció en un 80% y los  $PB$ 's en un 40%.

Porqué se incrementó la biomasa y productividad del fitoplancton del Golfo durante el pasado evento de "El Niño"? En base a nuestros datos hemos planteado las siguientes hipótesis: 1) que en el Golfo central, el exceso de biomasa fitoplanctónica resultó de la disminución en la presión por pastoreo zooplanctónico. Evidencias de resultados sobre estudios de la biomasa y estructura de las poblaciones del zooplancton durante el evento, apoyan nuestra hipótesis. Jiménez Pérez y Lara Lara (en prep.) encontraron que durante la máxima influencia del evento de "El Niño" (marzo), las poblaciones de zooplancton estuvieron dominadas por copepoditos de *Oithona* sp. y *Penilia avirostris* y otras especies no-herbívoras. Los herbívoros típicos como son los calanoides ocurrieron en muy bajas abundancias. Por lo tanto, las células del microfitoplancton no fueron grandemente consumidas. Bajo estas condiciones se puede esperar un incremento en las tasas de sedimentación de células fitoplanctónicas (principalmente del microfitoplancton). Baumgartner y Ferreira Bartrina (en prep.) han reportado la formación de una capa nefeloide intermedia de partículas en suspensión en el margen oriental del Golfo, en marzo de 1983. 2) que en el Golfo sur, en donde la mayor parte de la productividad se debió a la fracción del nanofitoplancton, posiblemente hubo un incremento de especies tropicales y subtropicales durante el evento de "El Niño", las cuales bajo condiciones de intensa radiación solar y concentraciones de nutrientes no limitantes, desarrollaron altas razones de asimilación tal como se muestra en los altos  $PB$ 's en las estaciones de la región sur. Baumgartner *et al.* (1985) han reportado previamente invasiones de especies de ambientes tropicales durante pasados eventos de "El Niño".

Si nuestras hipótesis son correctas, podemos inferir que este desacoplamiento entre el fitoplancton y el zooplancton en el Golfo central puede reducir el flujo de carbono-fitoplanctónico a través del ecosistema pelágico durante eventos de "El Niño", afectando las pesquerías pelágicas; pero tal

was three times higher. Therefore, we suggest that the high rates in the central Gulf were due to an increase in the phytoplankton biomass pool, while in the southern Gulf the high rates were a result of increased assimilation ratios. In October, the central Gulf maintained the high primary productivity rates, but with increased  $PB$  ratios, while in southern Gulf the production rates dropped 80% and the  $PB$ 's decreased by 40%.

Why were the phytoplankton biomass and productivity enhanced in the Gulf during the past ENSO event?. From our data we may hypothesize that, in the central Gulf, the large phytoplankton biomass pool was the result of a suppression of the zooplankton grazing pressure during the event. Evidence from data on zooplankton biomass and structure studies support this idea. Jiménez-Pérez and Lara-Lara (in prep.) have found that, during the peak of "El Niño" (March), the zooplankton populations were dominated by copepodites of *Oithona* sp. and *Penilia avirostris*, and other non-herbivorous species. Typical grazers as the calanoids were very scarce. Therefore, microphytoplankton cells were not heavily grazed. Under these conditions, higher phytoplankton-particle (larger than 20  $\mu$ m) sedimentation rates can be expected. Baumgartner and Ferreira-Bartrina (in prep.) have also reported a formation of an intermediate nepheloid layer of suspended particles at the eastern coast of the Gulf, in March 1983.

In the southern Gulf, where most of the production was due to the nannophytoplankton size class, possibly there was an increase of tropical and subtropical species during the event, which under intense solar radiation and non-limiting nutrient concentrations in the Gulf waters, can develop high primary productivity rates as shown by the high  $PB$ 's at the mouth. Baumgartner *et al.* (1985) have previously reported an invasion of tropical phytoplankton species during past "El Niño" events.

If our hypothesis are correct, we may infer that this uncoupling between the phytoplankton and zooplankton in the central Gulf may reduce the phytoplankton-carbon flux

vez favoreciendo las comunidades bentónicas, al incrementarse las tasas de sedimentación al bentos.

#### AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo de la Dirección Adjunta de Desarrollo Científico del CONACyT, por el tiempo del barco "El Puma" y el apoyo financiero para la realización del proyecto PCECBNA 021265. El Comité Oceanográfico Internacional de la UNESCO apoyó la presentación de este trabajo en la conferencia Chapman de la Unión Geofísica Americana sobre "El Niño", realizada en Guayaquil, Ecuador, en octubre de 1986.

#### LITERATURA CITADA

Alvarez-Borrego, S. (1983). Gulf of California. In: B H Ketchum (ed.), *Estuaries and Enclosed seas*. Elsevier Amsterdam. pp. 427-449.

Alvarez-Borrego, S., Gaxiola Castro, G. and Hernández Becerril, D. U. (In press). The relationship between photosynthesis and irradiance for Gulf of California phytoplankton. *Pacific Science*.

Alvarez-Borrego, S. y Schwartzlose, R. (1979). Masas de agua del golfo de California. *Ciencias Marinas*, 6:43-63.

Avaria-Placier, S. (1984). Cambios en la composición y biomasa del fitoplancton marino del norte de Chile durante el fenómeno de "El Niño" 1982-1983. *Rev. Com. Perm. Pacífico Sur*, 15: 303-309.

Badán-Dangón, A.F., Koblinsky, C.J. and Baumgartner, T. (1985). Spring and summer in the Gulf of California: observations of surface thermal patterns. *Oceanologica Acta*, 8:13-22.

Barber, R.T. and Chávez, F. (1986). Ocean variability in relation to living resources during the 1982-1983 "El Niño". *Nature*, 319: 279-285.

through the pelagic ecosystem during "El Niño" events, affecting the pelagic fisheries; but maybe favouring benthic communities with large inputs of phytoplankton-carbon to the benthos.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

The support of Dirección Adjunta de Desarrollo Científico del CONACyT, for ship-time and research costs through grant PCEBNA 021265, is greatly acknowledged. The International Oceanographic Committee of UNESCO supported the presentation of this paper at the AGU-Chapman Conference on "El Niño", held at Guayaquil, Ecuador in October 1986.

Baumgartner, T. and Christensen, N. (1985). Coupling of the Gulf of California to large-scale interannual climatic variability. *J Mar Res* 43: 825-848.

Baumgartner, T., Ferreira-Bartrina, V. Schrader, H. and Soutar, A. (1985). A 20-year varve record of siliceous phytoplankton variability in the central Gulf of California. *Marine Geology*, 64: 113-129.

Bernal, P.A. (1979). Large-scale biological events in the California Current. *Calif. Coop. Oceanic Fish. Invest Rep* 20: 89-101.

Bernal, P.A. (1981). A review of the low-frequency response of the pelagic ecosystem in the California Current. *Calif. Coop. Oceanic Fish Invest Rep*. 22: 49-62.

Carpenter, E.J. and Lively, J.S. (1980). Review of estimates of algal growth using C tracer techniques. In: P G Falkowski (ed.) *Primary Productivity in the sea*. Plenum Press, New York.

Chávez, F., Barber, R.T. and Vázquez, F. (1983). Progression of the 1982-1983 "El Niño" off northern Perú. *Trop Oc Atm. Newsletter*, 21: 26-27.



- Chávez, F., Barber, R.T., Kogelschatz, J.E., Thayer, V.G. and Binji Cai. (1984). "El Niño" and primary productivity: Potential effects on atmospheric carbon dioxide and fish production. *Trop. Oc. Atm. Newsletter*, 28: 1-2.
- Dandonneay, Y. and Donguy, R.J. (1983). Changes in surface chlorophyll concentrations related to the 1982 "El Niño". *Trop Oc Atm Newsletter*, 21: 14-15.
- Gaxiola-Castro, G., y Alvarez-Borrego, S. (1986). Productividad primaria del pacífico mexicano. *Ciencias Marinas*, 12(3):26-33.
- Guillén, O. (1974). The "El Niño" phenomenon in 1963 and its relation with the productivity in coastal Peruvian waters. In: J D Costlow (ed.). *Fertility of the sea*. Gordon and Breach. pp 187-196.
- Lara-Lara, J.R., Valdéz Holguín, J.E. and Jiménez Pérez, L.C. (1984). Plankton studies in the Gulf of California during the 1982-1983 "El Niño". *Trop. Oc. Atm. Newsletter*, 28: 16-17.
- Malonet, T.C. (1971). The relative importance of nanoplankton and netplankton as primary producers in tropical oceanic and neritic phytoplankton communities. *Limnol. Oceanogr.*, 16: 633-639.
- McGowan, J.A. (1983). "El Niño" and biological production in the California Current. *Trop. Oc. Atm. Newsletter*, 21:23.
- McGowan, J.A. (1984). The California "El Niño" 1983. *Oceanus*, 27: 48-51.
- Robles-Pacheco, J.M. and Christensen, N. (1984). Effects of the 1982-1983 "El Niño" on the Gulf of California, E0S transactions, American Geophysical Union, 64:52.
- Robles-Pacheco, J.M. and Marinone, S.G. (In Press). Seasonal and interannual thermo-haline variability in the Guaymas basin of the Gulf of California. *Continental Shelf Res.*
- Roden, G.I. and Groves, G.W. (1959). Recent oceanographic investigation in the Gulf of California. *J Mar Res.* 18: 10-35.
- Roden, G.I. (1964). Oceanographic aspects of the Gulf of California. In Tj. H. Van Andel and G.G. Shor Jr. (eds.) *Marine Geology of the Gulf of California: A symposium*. Am. Assoc. Pet. Geol. Mem., 3 pp. 30-58.
- Steemann-Nelsen, E. (1952). The use of radioactive carbon ( $^{14}\text{C}$ ) for measuring organic production in the sea. *J. Cons. Explor. Mer.* 18: 117-140.
- Strickland, J.D.H., and Parsons, T.R. (1972). A practical handbook of seawater analysis. *Bull. Fish. Res. Bd. Can.* 167. 2nd. Edition. 311 pp.
- Torres-Moye, G. and Alvarez Borrego, S. (In press). The 1984 "El Niño" effects on the summer phytoplankton of a Baja California upwelling zone. *J. of Geophys. Res.*
- Van-Andel, Tj. H. (1964). Recent marine sediments of the Gulf of California. In: Tj. H. Van Andel and G.G. Shor Jr. (eds.), *Marine Geology of the Gulf of California: A symposium* Am. Assoc. Pet. Geol. Mem., 3: 216-310.
- Yentsch, C.S y Menzel, D.W. (1963). A method for the determination of phytoplankton chlorophyll and phaeophytin by fluorescence. *Deep Sea Res.* 10: 221-231.
- 'Zeitzschel, B. (1969). Primary productivity in the Gulf of California. *Mar. Biol.* 3: 201-207.