

ESTIMACIÓN DE BIOMASA FITOPLANCTÓNICA, DERIVADA DE DATOS DE SATELITE, FRENTE A BAJA CALIFORNIA SUR

SATELLITE-DERIVED ESTIMATES OF PHYTOPLANKTON BIOMASS OFF SOUTHERN BAJA CALIFORNIA

Iriana Leticia Zuria-Jordan¹
Saúl Álvarez-Borrego¹
Eduardo Santamaría-del-Ángel²
Frank E. Müller-Karger³

¹Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada
División de Oceanología
Apartado postal 2732
Ensenada, BC
México

²Universidad Autónoma de Baja California
Facultad de Ciencias Marinas
Apartado postal 453
Ensenada, BC
México

³University of South Florida
Department of Marine Science
St. Petersburg, FL 33701-5016
USA

Recibido en diciembre de 1994; aceptado en marzo de 1995

RESUMEN

Se utilizaron todas las estimaciones disponibles de la concentración de pigmentos fotosintéticos derivadas de datos generados por el sensor *Coastal Zone Color Scanner* (CZCS) en el periodo 1978-1986, para interpretar las variaciones espaciales y temporales de la biomasa de fitoplancton, en un transecto de punta San Hipólito (27°N, 114°30'O) a cabo Corrientes (20°30'N, 105°30'O), frente al sur de Baja California, México. Las mayores concentraciones de pigmentos fotosintéticos se presentaron cerca de la costa. Se sugiere que se debieron a surgencias y a la interacción entre las corrientes marinas y la fisiografía local. Frente a cabo San Lucas se observó un frente recurrente, con gradientes fuertes de las concentraciones de pigmentos al final de primavera e inicios de verano, en años sin El Niño. Se presentó una clara variación estacional cerca de la costa. Inmediatamente al oeste de la península, se registraron valores grandes de pigmentos de febrero a agosto (3 a 8 mg m⁻³). Frente a cabo Corrientes los valores altos se presentaron de enero a mayo (5 a 8 mg m⁻³). Estas áreas experimentan surgencias con fuerte estacionalidad. El Niño tuvo un claro efecto en la concentración de pigmentos, pero ésta no fue la única causa de variación interanual. Se presentaron concentraciones relativamente bajas de pigmentos en todo el transecto, a partir de septiembre de 1982, a menudo con valores menores del 20% de los presentados en el periodo previo. Estas concentraciones bajas se mantuvieron hasta agosto de 1984 en la boca del golfo, y hasta diciembre de 1985 en la costa occidental de Baja California.

Palabras clave: pigmentos fotosintéticos, datos de satélite, Pacífico mexicano.

ABSTRACT

All available estimates of photosynthetic pigment concentration derived from data generated during 1978-1986 by the sensor Coastal Zone Color Scanner (CZCS) were used to interpret the spatial and temporal variations of phytoplankton biomass in a transect from Punta San Hipólito (27°N, 114° 30'W) to Cabo Corrientes (20°30'N, 105°30'W) off southern Baja California, Mexico. Highest pigment concentrations were present in areas near the coast. We suggest that they were due to upwelling and to interaction between the marine currents and local physiography. A recurrent front was observed off Cabo San Lucas, with the strongest pigment concentration gradients at the end of spring and beginning of summer, during non-El Niño years. There was a clear seasonal variation near the coast. Immediately west of Baja California, high pigment values (3 to 8 mg m⁻³) were observed from February through August. Off Cabo Corrientes, high values occurred from January through May (5 to 8 mg m⁻³). These areas experience strong seasonal upwelling. El Niño had a clear effect on pigment concentration, but it was not the only cause of interannual variation. There were relatively low pigment concentrations throughout the whole transect starting in September 1982, with values often lower than 20% of those during the previous period. These low concentrations were maintained through August 1984 at the entrance to the gulf, and through December 1985 off the west coast of Baja California.

Key words: photosynthetic pigments, satellite data, Mexican Pacific.

INTRODUCCIÓN

Los datos de satélite permiten estudiar, a escalas grandes de tiempo (días a años) y espacio (mayores que unos cuantos kilómetros), los fenómenos oceánicos frente al sur de Baja California. El satélite Nimbus-7 fue puesto en órbita en octubre de 1978, llevando a bordo el *Coastal Zone Color Scanner* (CZCS), diseñado específicamente para generar información sobre los pigmentos fotosintéticos del océano. El CZCS proveyó datos útiles para estimar radiancias reflejadas cerca de la primera profundidad óptica del océano, hasta junio de 1986. La concentración de pigmentos (clorofila *a* más feopigmentos) se puede estimar a partir de los datos de radiancia total del satélite, después de que se han realizado las correcciones apropiadas para remover los efectos de la atmósfera (Gordon *et al.*, 1983). Estos valores son promedios de las concentraciones *in situ* ponderadas por la irradiancia atenuada a medida que la luz viaja hacia abajo y es dispersada hacia arriba en la primera profundidad óptica.

El objetivo del presente trabajo es describir la distribución espacial de la concentración de pigmentos fotosintéticos en la zona de transición entre el cálido Pacífico oriental tropical y el templado sistema de la corriente de California, y describir las variaciones estacionales e

INTRODUCTION

Satellite data provide an opportunity to resolve long-time scales (days to years) and large-space scales (greater than a few kilometers) of oceanic phenomena off southern Baja California. In October 1978, the Nimbus-7 satellite was launched carrying the Coastal Zone Color Scanner (CZCS), which was designed specifically for remote sensing of photosynthetic pigments in the ocean. The CZCS provided data useful for estimating radiance reflected from approximately within the first optical depth of the ocean until June of 1986. Pigment concentration (chlorophyll *a* plus phaeopigments) may be estimated from the total satellite radiance data, after proper corrections to remove the effects of the atmosphere have been made (Gordon *et al.*, 1983). These pigment values are averages of the *in situ* concentrations weighted by the attenuated irradiance as light travels down and is scattered up within the first optical depth.

The purpose of the present work is to describe the spatial distribution of the photosynthetic pigment concentrations in the transition zone between the warm Eastern Tropical Pacific and the cold California Current System, and to describe the seasonal and interannual variations of this distribution with emphasis on the

interanuales de esta distribución, con énfasis en el efecto de El Niño 1982-1984. Para este propósito, se estudió un transecto de punta San Hipólito hasta el sur de cabo San Lucas, y de ahí a cabo Corrientes (fig. 1). Esta zona de transición es de gran interés biológico y oceanográfico por sus pesquerías actuales y potenciales.

La boca del golfo de California es un área de migración de túnidos (Griffiths, 1968). Los frentes oceánicos son la característica más sobresaliente de la entrada del golfo. Los frentes son regiones de alta producción planctónica, que conduce a una producción pesquera más elevada (Mann y Lazier, 1991, y otros citados por ellos). Thorade (1909) fue el primero en describir el sistema frontal cerca de cabo San Lucas, entre la corriente de California, fría, y el agua tibia del golfo.

Con vientos del noroeste (condiciones de invierno, diciembre a mayo), las surgencias ocurren en toda la costa este del golfo de California hasta cabo Corrientes (Roden, 1964). Con vientos del sureste (condiciones de verano, julio a octubre), el agua oligotrófica superficial del Pacífico tropical oriental invade el golfo, por lo menos hasta las grandes islas, Ángel de la Guarda y Tiburón (Álvarez-Borrego y Schwartzlose, 1979). Se han reportado bajas concentraciones de pigmentos en el golfo en este último periodo (Santamaría-del-Ángel *et al.*, 1994a, y otros citados por ellos).

La corriente de California forma remolinos más o menos permanentes frente a algunas puntas de la costa oeste de Baja California. En la superficie aparece una contracorriente entre el flujo principal de la corriente de California hacia el sur y la costa, hacia el final del otoño y principios de invierno, cuando los vientos del norte se debilitan. Este flujo superficial hacia el norte dura hasta que comienzan las surgencias intensas en primavera, pero el flujo de las corrientes cercanas a la costa puede revertir su dirección, de acuerdo con las fluctuaciones de los vientos (Reid *et al.*, 1958). A lo largo de la costa occidental de Baja California las surgencias ocurren todo el año (Bakun y Nelson, 1975). Su intensidad es muy variable y depende de las fluctuaciones de los vientos y las

effect of the 1982-1984 El Niño event. This was accomplished by studying a transept from Punta San Hipólito south to Cabo San Lucas, and then southeast to Cabo Corrientes, off southern Baja California, Mexico (fig. 1). This transition zone is of great biological and oceanographic interest because of its actual and potential fisheries.

The mouth of the Gulf of California is an area of tuna migrations (Griffiths, 1968). The most prominent oceanographic features of the entrance to the Gulf of California are the oceanic fronts. Fronts are regions of enhanced plankton production which leads to higher fish production (Mann and Lazier, 1991, and others cited therein). Thorade (1909) was the first to describe the frontal system near Cabo San Lucas, between the cold California Current and the warm gulf water.

With northwesterly winds (winter conditions, December through May), upwelling occurs off the eastern coast of the Gulf of California, all the way south to Cabo Corrientes (Roden, 1964). With southeasterly winds (summer conditions, July through October) oligotrophic surface water from the Eastern Tropical Pacific invades the gulf, at least as far north as the midrift islands, Ángel de la Guarda and Tiburón (Álvarez-Borrego and Schwartzlose, 1979). Very low pigment concentrations are reported in the gulf during this time (Santamaría-del-Ángel *et al.*, 1994a, and others cited therein).

The southward-flowing California Current forms more or less permanent eddies off some points of the Baja California coast. At the surface, a countercurrent appears inshore of the main California Current flow in late fall and early winter, when north winds are weaker. This northward surface flow lasts until the seasonal onset of strong upwelling in spring, but the nearshore surface currents may reverse direction following wind fluctuations (Reid *et al.*, 1958). Upwelling occurs along the western Baja California coast throughout the entire year (Bakun and Nelson, 1975). Its intensity is highly variable and depends on the fluctuations in the strengths of favorable winds and currents (Reid *et al.*, 1958; Walsh *et al.*, 1977).

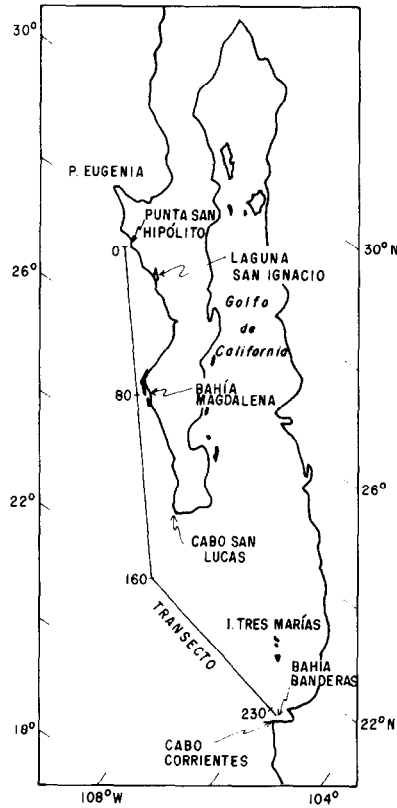


Figura 1. Área de estudio con el transecto. Los números al lado del transecto corresponden al número de hotel.

Figure 1. Study area with transept. Numbers on the side of the transept correspond to the pixel numbers.

corrientes favorables (Reid *et al.*, 1958; Walsh *et al.*, 1977).

MÉTODOS

Las concentraciones de pigmentos se calcularon a partir de los datos de radiancia del CZCS usando las correcciones atmosféricas y el algoritmo bioóptico de Gordon *et al.* (1983) (para los detalles del procesado de las imágenes, véase Müller-Karger *et al.*, 1991). Este algoritmo agrupa todos los pigmentos fotosintéticos y sus productos de degradación con absorción significativa a 443 nm, como si fueran uno solo. El error en la concentración calculada es de 30 a

METHODS

Pigment concentrations were derived from CZCS radiance data using the atmospheric correction and bio-optical algorithm of Gordon *et al.* (1983) (for details of image processing see Müller-Karger *et al.*, 1991). This algorithm lumps all photosynthetic pigments and their degradation products with significant absorption at 443 nm, into a single product. Within the 0.08-1.5 mg m⁻³ range, the error in the retrieved pigment concentration is of the order of 30-40% for a variety of atmospheric turbidities; for higher pigment concentrations, the error is larger (Gordon *et al.*, 1983).

40% en el intervalo de 0.08 a 1.5 mg m⁻³; para concentraciones más altas, el error es mayor (Gordon *et al.*, 1983).

El tamaño del fotel (elemento de fotografía) fue cercano a 4 × 4 km². Los datos de nuestro transecto (fig. 1) se tomaron de 92 composiciones mensuales (promedios aritméticos de datos válidos) de las imágenes del CSCZ de noviembre de 1978 a junio de 1986. El transecto tiene 230 foteles, con el número uno frente a San Hipólito y el número 230 frente a cabo Corrientes. Para producir las composiciones mensuales, se usó un total de 1,042 escenas originales: 23 para 1978, 176 para 1979, 233 para 1980, 156 para 1981, 135 para 1982, 117 para 1983, 34 para 1984, 94 para 1985 y 74 para 1986. Las composiciones mensuales se derivaron mediante programas desarrollados en la Universidad de Miami. Para generar los transectos se usaron programas desarrollados en la Universidad del Sur de Florida.

Se obtuvo el "año promedio" promediando todos los transectos de cada mes por separado, sucesivamente, para describir la variación estacional de la biomasa fitoplanctónica. A fin de examinar los efectos de El Niño en la concentración de los pigmentos, se escogieron dos localidades: el fotel 80 frente a bahía Magdalena (24°30'N, 112°20'O); y el fotel 230 (20°30'N, 105°30'O) frente a cabo Corrientes. Estas localidades representan áreas muy productivas adyacentes a la parte occidental de Baja California y a la parte continental de México, respectivamente. Se computaron anomalías de concentración, $X_i - \bar{X}_i$, donde X_i es la concentración mensual respectiva; \bar{X}_i , el valor del mes promedio para la serie; e i , el número del fotel. Luego, se codificó el conjunto de anomalías en dos bloques definiendo los periodos con El Niño y sin El Niño. De acuerdo con Robles Pacheco y Christensen (1984), la presencia de El Niño en el área de estudio fue detectada por anomalías del nivel del mar en septiembre de 1982. Analizando las series de tiempo de las anomalías de concentración de pigmentos, se definió el final de El Niño en diciembre de 1985 en el fotel 80, y en agosto de 1984 en el fotel 230. También basamos estas definiciones en las series de tiempo de tempera-

Pixel size was about 4 × 4 km². Data for our transept (fig. 1) were extracted from 92 monthly composites (arithmetic averages of valid data) of CZCS imagery covering November 1978 through June 1986. The transept has 230 pixels, beginning with pixel number one off Punta San Hipólito, and ending with pixel 230 off Cabo Corrientes. A total of 1,042 original scenes were used to produce the monthly composites: 23 for 1978, 176 for 1979, 233 for 1980, 156 for 1981, 135 for 1982, 117 for 1983, 34 for 1984, 94 for 1985 and 74 for 1986. The composites were derived using software developed at the University of Miami. Software developed at the University of South Florida was used to generate the monthly transepts.

An "average year" was obtained by averaging all transepts for January, all transepts for February, and so on, to describe the seasonal variability of the phytoplankton biomass. Two locations were chosen to examine the El Niño effect on pigment concentrations: pixel 80, off Bahía Magdalena (24°30'N, 112°20'W) and pixel 230 (20°30'N, 105°30'W) off Cabo Corrientes. These locations represent very productive areas, one immediately off western Baja California and the other off continental Mexico. Concentration anomalies were computed as $X_i - \bar{X}_i$, where X_i is the respective monthly concentration; \bar{X}_i , represents the average month for the series; and i is the pixel number. The set of anomalies were then coded into two groups by defining periods of El Niño and non-El Niño. According to Robles-Pacheco and Christensen (1984), the onset of El Niño was detected in the study area by sea level anomalies in September 1982. Upon analyzing the time series of pigment concentration anomalies, we defined the end of El Niño in December 1985 at pixel 80, and in August 1984 at pixel 230. We also based these definitions on the temperature time series of Mee *et al.* (1985) for an area north of Cabo Corrientes, and on phytoplankton abundance data reported by Martínez-López (1993) for the area adjacent to Bahía Magdalena. The rest of the time series was considered non-El Niño periods. For each location, we counted the negative anomalies oc-

tura de Mee *et al.* (1985), para un área al norte de cabo Corrientes, y en los datos de abundancia de fitoplancton de Martínez-López (1993) para el área adyacente a bahía Magdalena. El resto de las series de tiempo se consideró como periodos sin El Niño. Para cada localidad contamos las anomalías negativas que se presentaron en el periodo con El Niño (A) y los periodos sin El Niño (B). Luego se calculó el Índice de Potencia Relativa (IPR, Navarro-Fierro, 1988):

$$IPR = 1 - (Br_1 / Ar_2)$$

donde r_1 es el número de meses para el periodo con El Niño, y r_2 es el número de meses para los periodos sin El Niño. El IPR proporciona una medida de la asociación de las anomalías negativas con la presencia de El Niño. Puede cambiar de valores negativos a 1.0 positivo. Los valores negativos indican que las anomalías negativas están asociadas principalmente a condiciones sin El Niño, cero significa que las anomalías negativas asociadas con El Niño y sin El Niño son iguales, y uno significa que todas las anomalías negativas están asociadas con condiciones de El Niño. El IPR no toma en consideración la magnitud de las anomalías.

RESULTADOS

En general, se presentaron concentraciones altas de pigmentos fotosintéticos en las zonas cercanas a la costa (fig. 2). Se distinguen tres zonas principales que tienen influencia costera: el área frente a punta San Hipólito y laguna San Ignacio, foteles 1 y 40; frente a bahía Magdalena, foteles 60 y 120; y frente a cabo Corrientes, foteles 220-230. Lejos de la costa las concentraciones de pigmento fueron generalmente pequeñas ($< 1 \text{ mg m}^{-3}$), como frente al área desde el sur de San Ignacio hasta antes de bahía Magdalena, frente a cabo San Lucas y en la boca del golfo. Las concentraciones mínimas se presentaron en la boca del golfo con valores a menudo del orden de centésimas de mg m^{-3} . En general, la variación espacial fue muy irregular con máximos y mínimos, y denotó una distribución en forma de manchas (fig. 2).

En el enero "promedio" las concentraciones de pigmento fueron bajas a lo largo del transec-

curing within the El Niño period (A), and non-El Niño periods (B). We then calculated the Relative Power Index (RPI, Navarro-Fierro, 1988):

$$RPI = 1 - (Br_1 / Ar_2)$$

where r_1 is the number of months of the El Niño period, and r_2 is the number of months for non-El Niño periods. The RPI measures the association of negative anomalies with El Niño conditions. It may change from negative values to 1.0 positive. Negative values indicate that negative anomalies are mostly associated with non-El Niño conditions. Zero means that an equal number of negative anomalies are associated with El Niño and non-El Niño conditions, and one means that all negative anomalies are associated with El Niño conditions. The RPI does not take into consideration the magnitude of the anomalies.

RESULTS

In general, high concentrations of photosynthetic pigments were present in areas near the coast (fig. 2). There are three main areas with coastal influence: between pixels 1 and 40, the area off Punta San Hipólito and San Ignacio; off Bahía Magdalena, between pixels 60 and 120; and off Cabo Corrientes, between pixels 220 and 230. Away from the coast, pigment concentrations were generally low ($< 1 \text{ mg m}^{-3}$), such as the area between southern San Ignacio and northern Bahía Magdalena, off Cabo San Lucas, and the entrance to the gulf. Minimum concentrations were found at the mouth of the gulf, often with values on the order of hundredths of mg m^{-3} . In general, the spatial variation was very irregular, indicating a high degree of patchiness (fig. 2).

In our "average" January, pigment concentrations were low along the transect, although there were some peaks as high as $> 2 \text{ mg m}^{-3}$ (fig. 2). Maximum concentrations for this month ($> 3 \text{ mg m}^{-3}$) were present off Cabo Corrientes. Beginning in February, a typical pattern with higher concentrations near the coast and lower in oceanic regions was defined. In February, waters off Bahía Magdalena had

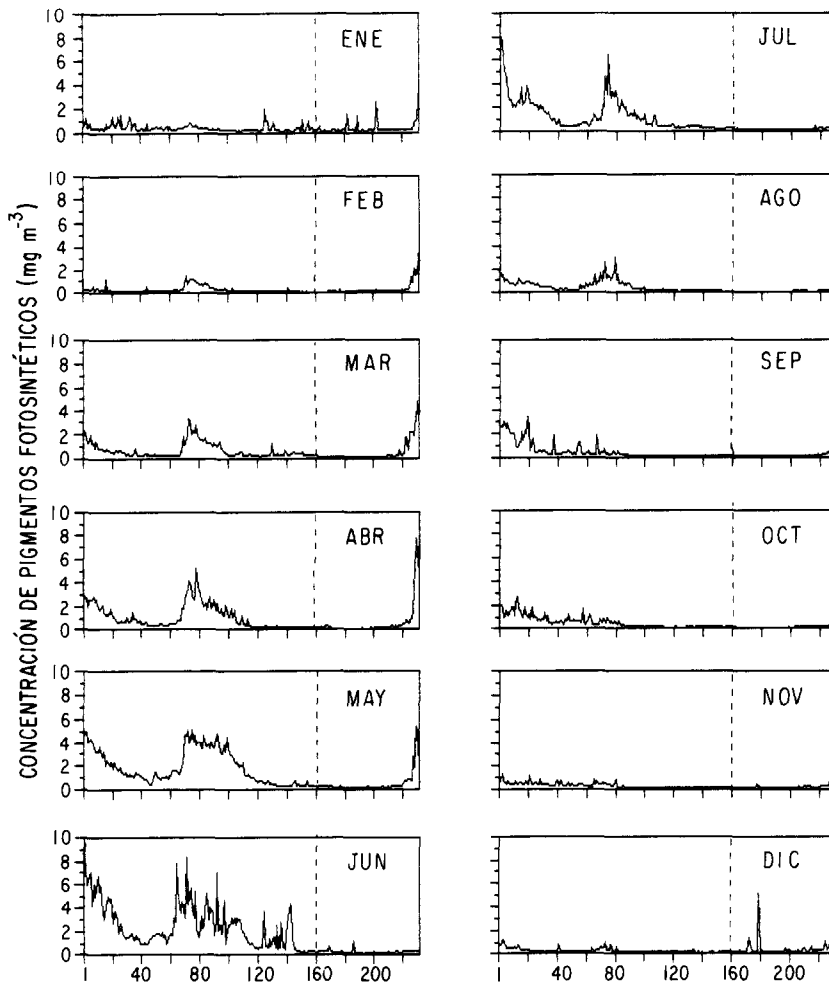


Figura 2. El año promedio del transecto obtenido a partir de las 92 composiciones mensuales de las imágenes del CZCS. En el eje de las equis están los números de los foteles. La línea punteada vertical corresponde al fotel donde cambia de dirección el transecto. (ver fig. 1)

Figure 2. The average year of the transect obtained from the 92 monthly compositions of the CZCS imagery. Pixel numbers are on the x-axis. The broken vertical line corresponds to the pixel where the transect changes direction. (see fig. 1)

to, aunque pueden observarse algunos picos de hasta $> 2 \text{ mg m}^{-3}$ (fig. 2). Las mayores concentraciones de este mes ($> 3 \text{ mg m}^{-3}$) se presentaron frente a cabo Corrientes. En febrero, empezó a definirse un patrón típico de mayores concentraciones en las regiones costeras y menores en las oceánicas. En febrero, las aguas

concentrations up to 2 mg m^{-3} , and the area off Cabo Corrientes almost up to 4 mg m^{-3} . In March, April and May there was a general tendency for the pigment concentrations to increase, up to 5 mg m^{-3} off Bahía Magdalena and $> 7 \text{ mg m}^{-3}$ off Cabo Corrientes. West of Baja California, the maximum spatial extent of high

frente a bahía Magdalena alcanzaron concentraciones de 2 mg m^{-3} , y la zona de cabo Corrientes casi 4 mg m^{-3} . En marzo, abril y mayo se presentó en general una tendencia de aumento de las concentraciones de pigmentos, que llegó a 5 mg m^{-3} frente a bahía Magdalena y $> 7 \text{ mg m}^{-3}$ frente a cabo Corrientes. Al oeste de la península se presentó la máxima extensión de valores altos en mayo y junio. Las mayores concentraciones de pigmento para el año promedio se alcanzaron en junio frente a San Hipólito (hasta 10 mg m^{-3}) y bahía Magdalena (hasta 8 mg m^{-3}). En la boca del golfo las concentraciones fueron muy bajas de junio a noviembre. Julio todavía presentó concentraciones altas (hasta 8 mg m^{-3}) en las dos zonas costeras norteñas. Entre San Hipólito y bahía Magdalena, las concentraciones bajaron a partir de agosto y fueron mínimas de noviembre a febrero, aunque hubo picos aislados de $> 2 \text{ mg m}^{-3}$. En la entrada del golfo hubo manchas de valores relativamente altos, > 2 y en un caso $> 4 \text{ mg m}^{-3}$, en diciembre y enero (fig. 2).

Tanto las series de tiempo con los datos de las composiciones mensuales como las del año promedio, para los foteles 80 (frente a bahía Magdalena) y 230 (frente a cabo Corrientes), muestran con claridad la variación estacional (fig. 3). Esta variación es diferente en las dos localidades. En el fotel 80, los valores altos de concentración de pigmentos se presentaron en general de febrero a agosto, con los máximos en la mitad de primavera (figs. 3a, c). Mientras que en el fotel 230, los valores altos se presentaron de febrero a mayo, también con los máximos en la mitad de primavera (figs. 3b, d). Las concentraciones altas de cabo Corrientes fueron mayores (a menudo $> 10 \text{ mg m}^{-3}$) y de menor duración que frente a bahía Magdalena. Los máximos del año promedio se registraron en mayo en el fotel 80 (4 mg m^{-3}) y en abril en el fotel 230 ($> 6 \text{ mg m}^{-3}$).

La serie de tiempo del fotel 80 muestra que los valores de concentración fueron menores de la segunda mitad de 1982 hasta el final de 1985, con relación a otros periodos. Noviembre de 1983 es una excepción, ya que fue el único noviembre de la serie que presentó un valor mayor de 0.5 mg m^{-3} (6 mg m^{-3}). La serie de tiempo del

pigment values was present in May and June. The highest pigment concentrations for the average year were present in June off San Hipólito (up to 10 mg m^{-3}) and off Bahía Magdalena (up to 8 mg m^{-3}). At the mouth of the gulf, pigment concentrations were very low from June through November. There were high pigment concentrations in July (up to 8 mg m^{-3}) in the two northern coastal areas. Between San Hipólito and Bahía Magdalena, concentrations decreased from August and were minimum from November through February, although there were isolated peaks of $> 2 \text{ mg m}^{-3}$. There were patches of relatively high values at the entrance of the gulf, > 2 and in one case $> 4 \text{ mg m}^{-3}$, in December and January (fig. 2).

Both the monthly and average year time series for pixels 80 (off Bahía Magdalena) and 230 (off Cabo Corrientes) clearly show seasonal variation (fig. 3). This variation is different at the two locations. At pixel 80, high pigment concentration values were, in general, present from February through August, with maxima in the middle of spring (figs. 3a, c). While, at pixel 230, high values were present from February through May, but also with maxima in the middle of spring (figs. 3b, d). The high concentrations off Cabo Corrientes were greater (often $> 10 \text{ mg m}^{-3}$) and of shorter duration than those off Bahía Magdalena. Maxima for the average year were reached at pixel 80 in May (4 mg m^{-3}), and at pixel 230 in April ($> 6 \text{ mg m}^{-3}$).

The time series for pixel 80 shows that pigment concentration values were lower from the second half of 1982 through the end of 1985, with respect to the other periods. November 1983 is an exception, since it is the only value greater than 0.5 mg m^{-3} (6 mg m^{-3}) for any November in this series. The time series for pixel 230 shows that values were lower from the second half of 1982 through the first half of 1984, with respect to values in other periods. The value for January 1984 is an exception, since it is the only January value of the series greater than 1 mg m^{-3} (4 mg m^{-3} , fig. 3).

Greater absolute values of the anomalies for pixel 230 than for pixel 80 indicate greater interannual fluctuations off Cabo Corrientes than off Bahía Magdalena (fig. 4). The time series

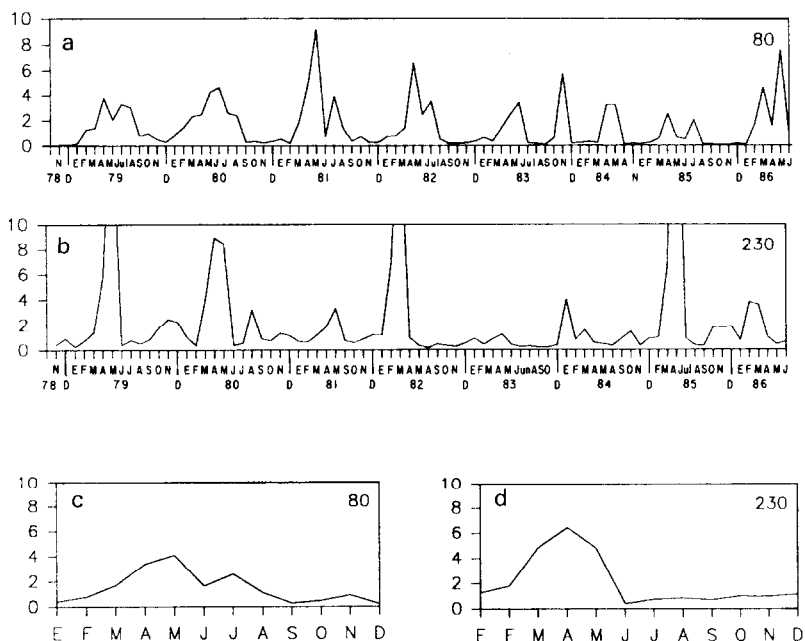


Figura 3. Series de tiempo de los datos mensuales de la concentración de pigmentos para dos foteles del transecto: A) 80, frente a bahía Magdalena; B) 230, frente a cabo Corrientes. Concentración de pigmentos en mg m^{-3} . No todos los años tienen el mismo número de meses, debido a la falta de datos por nubosidad. C) Series de tiempo con los datos del año promedio para el fotel 80; y D) para el fotel 230.

Figure 3. Time series of monthly pigment concentrations for two pixels of the transect: A) 80, off Bahía Magdalena; B) 230, off Cabo Corrientes. Pigment concentration in mg m^{-3} . Not all years have the same number of months due to lack of data caused by overcast skies. C) Time series with the average year data for pixel 80; and D) for pixel 230.

fotel 230 muestra que los valores fueron menores de la segunda mitad de 1982 hasta la primera mitad de 1984, con respecto a los de otros periodos. El valor de enero de 1984 es una excepción, ya que fue el único enero de la serie que rebasó 1 mg m^{-3} (4 mg m^{-3} , fig. 3).

El que los valores absolutos de las anomalías sean mayores para el fotel 230 que para el 80 indica mayores fluctuaciones interanuales frente a cabo Corrientes que frente a bahía Magdalena (fig. 4). La serie de tiempo del fotel 80 muestra que las anomalías fueron consecutivamente positivas y negativas de noviembre de 1978 hasta agosto de 1982 y en 1986, pero las anomalías positivas tuvieron valores absolutos claramente mayores que los de las negativas

for pixel 80 shows that the anomalies were consecutively positive and negative from November 1978 through August 1982 and in 1986, but the absolute values of positive anomalies were clearly greater than those of the negative ones (fig. 4a). However, almost all of the anomalies from September 1982 through the end of 1985 from this series were negative, with the only exception being November 1983 ($> 4 \text{ mg m}^{-3}$). Similarly, the series for pixel 230 shows that anomalies were consecutively positive and negative from the beginning through August 1982, and from September 1984 through the end of the series. Again, the absolute values of positive anomalies were greater than those of the negative ones (fig. 4b). From September

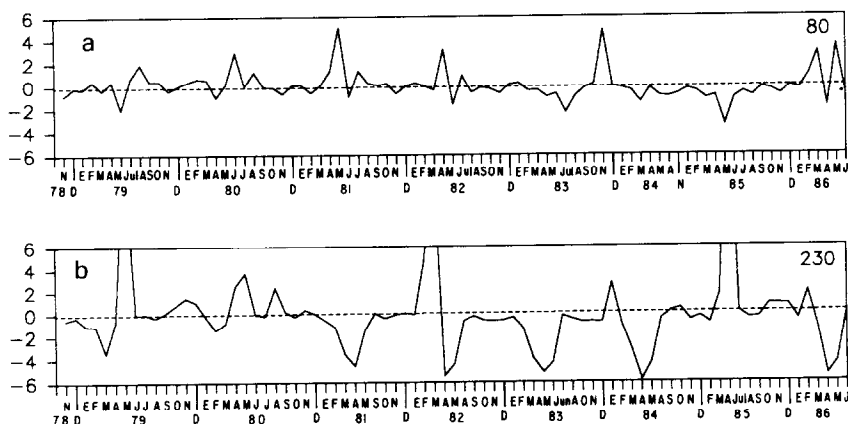


Figura 4. Serie de datos de anomalías de concentración de pigmentos para el fotel 80 (A) y para el fotel 230 (B). Los valores están en mg m^{-3} .

Figure 4. Time series of pigment concentration anomalies for pixel 80 (A) and for pixel 230 (B). Values are in mg m^{-3} .

(fig. 4a). Sin embargo, las anomalías de esta serie en la porción de septiembre de 1982 hasta el final de 1985 son casi todas negativas, con la única excepción de noviembre de 1983 ($> 4 \text{ mg m}^{-3}$). De manera similar, la serie del fotel 230 también muestra que las anomalías fueron consecutivamente positivas y negativas desde el inicio hasta agosto de 1982, y de septiembre de 1984 al final de la serie. De nuevo, en estos casos los valores absolutos de las anomalías positivas fueron mayores que los de las negativas (fig. 4b). De septiembre de 1982 a agosto de 1984, las anomalías fueron negativas para este fotel, de nuevo con excepción de enero de 1984 ($> 2 \text{ mg m}^{-3}$).

Para el fotel 80, el número de meses con condición El Niño fue 40 y hubo 36 anomalías negativas; el número de meses con condición sin El Niño fue 52 y hubo 23 anomalías negativas. Para el fotel 230, el número de meses con condición El Niño fue 22 y hubo 21 anomalías negativas; el número de meses con condición sin El Niño fue 70 y hubo 44 anomalías negativas. El IPR para el fotel 80 es 0.51, y para el fotel 230 es 0.34, lo cual indica que El Niño produce anomalías negativas de pigmentos fotosintéticos en ambas localidades.

1982 through August 1984, the anomalies were negative for this pixel, again with the exception of January 1984 ($> 2 \text{ mg m}^{-3}$).

At pixel 80, the number of months with an El Niño condition was 40, with 36 negative anomalies; the number of months with a non-El Niño condition was 52, with 23 negative anomalies. At pixel 230, the number of months with an El Niño condition was 22, with 21 negative anomalies, and the number of months with a non-El Niño condition was 70, with 44 negative anomalies. The RPI for pixel 80 is 0.51, and for pixel 230 is 0.34, which indicates that El Niño forces negative photosynthetic pigment anomalies at both localities.

DISCUSSION

In situ chlorophyll concentration data are very scarce for the study area. Therefore, it is difficult to quantify the validity of the CZCS data. However, CZCS time series are very consistent; their seasonal cycles and spatial variation behave in agreement with the physical processes, such as the movement of water masses and the incidence of upwelling events. Santamaría-del-Ángel *et al.* (1994a) compared

DISCUSIÓN

Los datos de concentración de clorofila *in situ* son muy escasos para el área de estudio. Por tanto, es difícil cuantificar la validez de los datos del CZCS. Sin embargo, las series de tiempo del CZCS son muy consistentes; sus ciclos estacionales y su variación espacial se comportan muy de acuerdo con la fenomenología física, como el movimiento de masas de agua y la ocurrencia de eventos de surgencia. Santamaría-del-Ángel *et al.* (1994a) compararon datos de clorofila *in situ* con datos del CZCS para el golfo de California y encontraron una buena correspondencia, pero los datos del CZCS tienden a sobrestimar los valores de campo.

Datos de cruceros realizados en 1967 muestran que la mediana de los valores de concentración de clorofila *a* superficial, en la boca del golfo, aumentaron de 0.65 en abril a 0.97 mg m⁻³ en agosto (Stevenson, 1970). Gaxiola-Castro y Álvarez-Borrego (1986) reportaron valores de clorofila *a*, para la boca del golfo, de 0.10 a 0.88 mg m⁻³ en la zona eufótica. Valdez-Holguín (1986) registró valores de clorofila *a* de 0.2-0.4 mg m⁻³, en marzo de 1983, para los primeros 10 m en el área cerca de cabo San Lucas y la parte central de la boca del golfo. Estos datos de barco sobre clorofila *a* son similares a los del CZCS.

Las imágenes de satélite muestran la rica estructura de la distribución de pigmentos fotosintéticos desde la costa hasta cientos de kilómetros mar adentro (Traganza, 1985). La distribución en forma de manchas se debe a una combinación de factores físicos, químicos y biológicos que afectan al fitoplancton, como surgencias, movimientos de masas de agua, mezcla por vientos (incluyendo tormentas) o por fenómenos asociados a las mareas, distribución en forma de manchas de nutrientes, reproducción diferencial del fitoplancton, pastoreo diferencial, etc. (Yentsch, 1981).

En el frente de cabo San Lucas (Griffiths, 1968) no se detectó un gradiente claro permanente de las concentraciones de pigmentos fotosintéticos. Se detectó un gradiente recurrente al

in situ chlorophyll data with CZCS data for the Gulf of California and found good agreement. The CZCS data, however, tend to overestimate the field values.

Ship data collected during 1967 show that the median value of chlorophyll *a* surface concentrations at the mouth of the gulf increased from 0.65 in April to 0.97 mg m⁻³ in August (Stevenson, 1970). Gaxiola-Castro and Álvarez-Borrego (1986) reported chlorophyll *a* values for the mouth of the gulf, ranging from 0.10 up to 0.88 mg m⁻³ for the euphotic zone. Valdez-Holguín (1986) reported chlorophyll *a* values of 0.2-0.4 mg m⁻³ in March 1983 for the first 10 m in the area near Cabo San Lucas and the central part of the mouth of the gulf. These ship-derived values are similar to those derived from the CZCS.

The satellite imagery shows a rich structure in the distribution of photosynthetic pigment from the coast to hundreds of kilometers offshore (Traganza, 1985). The patchy distribution is due to a combination of physical, chemical and biological factors that affect phytoplankton, such as upwelling, movement of water masses, mixing by winds (including storms) or by phenomena associated with tides, distribution of nutrients, differential reproduction of phytoplankton, differential grazing, etc. (Yentsch, 1981).

Across the Cabo San Lucas front (Griffiths, 1968), the CZCS imagery did not detect a clearly permanent gradient in the photosynthetic pigment concentrations. A gradient was repeatedly observed recurring at the end of spring and beginning of summer during non-El Niño years, with the exception of January 1983 (it was detected in July and August 1979, May, June and July 1980, May and June 1981, March, April and May 1982, January 1983, June and July 1985, and March and June 1986) (not illustrated). The CZCS imagery did not detect a pigment gradient during the El Niño event across the Cabo San Lucas front.

The greatest pigment concentrations in the coastal zones of northwestern Mexico are mainly due to upwelling (Zeitzschel, 1969; Walsh *et al.*, 1977). There are favorable conditions for upwelling off western Baja California practical-

final de primavera e inicios de verano en años sin El Niño, con la excepción de enero de 1983 (se detectó en julio y agosto de 1979, mayo, junio y julio de 1980, mayo y junio de 1981, marzo, abril y mayo de 1982, enero de 1983, junio y julio de 1985, y marzo y junio de 1986) (no ilustrado). Las imágenes del CZCS no detectaron un gradiente de pigmentos durante El Niño en el frente de cabo San Lucas.

Las mayores concentraciones de pigmentos en las zonas costeras del noroeste de México se deben principalmente a las surgencias (Zeitzschel, 1969; Walsh *et al.*, 1977). En la costa oeste de Baja California existen condiciones favorables para las surgencias prácticamente todo el año, pero son muy débiles de noviembre a febrero. El máximo de intensidad de surgencia es a finales de primavera y principios de verano (Bakun y Nelson, 1975). Las más altas concentraciones frente al suroeste de Baja California durante mayo y junio pueden deberse al efecto de esta surgencia intensa. Frente a cabo Corrientes, las surgencias se presentan de diciembre a mayo, con condiciones de invierno y vientos del noroeste en el golfo de California (Álvarez-Borrego, 1983). Las surgencias son el principal factor que causa la variación estacional de los pigmentos fotosintéticos.

En la boca del golfo, incluyendo la parte frente a cabo Corrientes, otro factor importante que afecta la distribución del fitoplancton es el cambio de las masas de agua. Con condiciones de verano en el golfo de California, los vientos del sureste refuerzan la corriente de Costa Rica que transporta agua superficial del Pacífico tropical oriental hacia el interior del golfo. Esta masa de agua es oligotrófica (Álvarez-Borrego *et al.*, 1978) y causa menores concentraciones de pigmentos en verano (junio a noviembre) que en invierno frente a cabo Corrientes (fotel 230, fig. 2).

En agosto, la concentración de pigmentos empieza a disminuir frente al oeste de Baja California, como frente a bahía Magdalena. Los valores son muy bajos hasta enero (fig. 2). En este periodo la corriente de California es débil y su límite al sur es bahía Magdalena; la corriente de Costa Rica es fuerte y tiene su mayor despla-

ly throughout the year, but they weaken considerably from November through February. The maximum upwelling intensity is at the end of spring and beginning of summer (Bakun and Nelson, 1975). The highest pigment concentration immediately off southwestern Baja California during May and June may be the effect of this intense upwelling. Off Cabo Corrientes, upwelling events occur from December through May, under winter conditions and northwesterly winds in the Gulf of California (Álvarez-Borrego, 1983). Upwelling is the main factor that causes seasonal variation of the photosynthetic pigments.

Another important factor that affects the distribution of phytoplankton at the mouth of the gulf, including the area near Cabo Corrientes, is the change of water masses. During summer conditions in the Gulf of California, southeasterly winds strengthen the Costa Rica Current, which transports surface water from the Eastern Tropical Pacific into the gulf. This water mass is oligotrophic (Álvarez-Borrego *et al.*, 1978) and leads to lower pigment concentrations during the summer (June through November) than during winter off Cabo Corrientes (pixel 230, fig. 2).

In August, pigment concentrations begin to decrease off western Baja California, such as off Bahía Magdalena. Values are very low through January (fig. 2). During this period, the California Current is weak and does not reach further than Bahía Magdalena; the Costa Rica Current is strong and has its maximum northward displacement that meets the California Current at $\sim 24^{\circ}\text{N}$ (Wyrski, 1966). This leads to impoverished phytoplankton communities from Bahía Magdalena to the south. Off Punta San Hipólito, pigment concentrations are low only from November through February. This is due to the surface manifestation of the Davidson Current during this period, which flows northward and inhibits coastal upwelling.

In addition to seasonal variation, the results show some interannual variability. Anomalous oceanographic conditions associated with El Niño were present throughout the California Current System in 1982-1983 (*e.g.*, Simpson, 1983; Thomas *et al.*, 1994). In the study area,

zamiento hacia el norte para encontrarse con la corriente de California a ~24°N (Wyrki, 1966). Esto empobrece las comunidades fitoplanctónicas desde bahía Magdalena hacia el sur. Frente a punta San Hipólito la concentración de pigmentos es baja solamente de noviembre a febrero. Esto se debe a la manifestación superficial de la corriente de Davidson en esta época, que al fluir hacia el norte inhibe las surgencias costeras.

Además de la variación estacional, los resultados muestran variabilidad interanual. En todo el sistema de la corriente de California se presentaron condiciones oceanográficas anómalas asociadas con El Niño en 1982-1983 (*e.g.*, Simpson, 1983; Thomas *et al.*, 1994). En el área de estudio, El Niño se observó desde septiembre de 1982 y causó una reducción de las concentraciones de pigmentos fotosintéticos a lo largo del transecto. Las bajas concentraciones se mantuvieron hasta agosto de 1984 en la boca del golfo de California, y hasta diciembre de 1985 en la costa occidental de Baja California. Esto se manifiesta en las series de tiempo de anomalías (fig. 4). Una posible explicación es que el agua caliente proveniente del Pacífico occidental hizo más profunda la termoclina y nutriclina frente a las costas mexicanas, como fue descrito por Chávez (1987) para las aguas frente a Perú. Con una nutriclina profunda, el agua de surgencia contenía muy baja concentración de nutrientes y no hubo florecimientos de fitoplancton.

De acuerdo con nuestros resultados, Santamaria-del-Ángel *et al.* (1994b) reportaron anomalías negativas de pigmentos en el sur del golfo de California para los inviernos de 1982-1983 y 1983-1984. Wyrki (comunicación personal, *University of Hawaii*) produjo una película que describe la variación del nivel del mar en todo el Pacífico norte de 1981 a 1984. Esta película muestra que el efecto de El Niño ya no se presentaba de la boca del golfo de California hacia el sur, en la segunda mitad de 1984, mientras que al oeste de la península los altos niveles se mantuvieron por lo menos a través de todo 1984. Utilizando datos *in situ*, Torres-Moye y Álvarez-Borrego (1987) documentaron el efecto de El Niño en el verano de

the El Niño was observed since September 1982, and was responsible for a decrease in photosynthetic pigment concentrations along the sampling transept. Low concentrations remained until August 1984 at the mouth of the gulf, and until December 1985 in the area off the western coast of Baja California. This is shown in the time series of pigment anomalies (fig. 4). A possible explanation is that the warm water coming from the western Pacific deepened the thermocline and nutricline off Mexico, as described by Chávez (1987) for waters off Peru. With a deep nutricline, the upwelled water contained very low nutrient concentrations and there were no phytoplankton blooms.

In agreement with our results, Santamaria-del-Ángel *et al.* (1994b) reported negative pigment anomalies for the southern Gulf of California during the winters of 1982-1983 and 1983-1984. Wyrki (personal communication, *University of Hawaii*) produced a movie describing the sea level variation throughout the eastern north Pacific from 1981 to 1984. This movie shows no El Niño effects from the mouth of the gulf to the south during the second half of 1984, while high sea levels were maintained to the west of Baja California at least to the end of 1984. Using *in situ* data, Torres-Moye and Álvarez-Borrego (1987) documented the effect of El Niño in the summer of 1984. In coastal waters off Bahía San Quintín, in northwestern Baja California, they found maximum chlorophyll *a* values < 3 mg m⁻³, compared with values > 15 mg m⁻³ for 1977 and 1979, both non-El Niño years. Sea level anomalies for Bahía San Quintín were positive throughout 1984 and negative for 1985, which indicates the El Niño effect up to 1984. Martínez López (1993) found low phytoplankton abundances off Bahía Magdalena during 1985 associated with negative temperature anomalies. She suggested that these low abundances were due to an interruption of the diatom spores seeding mechanism as a subsequent effect of El Niño. Our 1985 negative pigment anomalies for pixel 80 agree with the results of Martínez-López (1993).

The greater RPI for the anomalies series of pixel 80 (RPI = 0.51), with respect to the one

1984. En las aguas costeras frente a bahía San Quintín, en el noroeste de Baja California, estos autores encontraron valores máximos de clorofila $a < 3 \text{ mg m}^{-3}$, comparados con valores de más de 15 mg m^{-3} para 1977 y 1979, años sin El Niño. Las anomalías de nivel de mar de bahía San Quintín fueron positivas hasta 1984 y negativas en 1985, lo cual indica la presencia de El Niño hasta 1984. Martínez-López (1993) encontró bajas abundancias de fitoplancton frente a bahía Magdalena en 1985 asociadas a anomalías negativas de temperatura. Sugirió que estas bajas abundancias se debieron a la interrupción del mecanismo de resiembra de esporas de diatomeas como un efecto subsecuente de El Niño. Nuestras anomalías negativas de pigmentos para 1985 en el fotel 80 concuerdan con los resultados de Martínez-López (1993).

El mayor IPR para la serie de anomalías del fotel 80 (IPR = 0.51), con respecto al del fotel 230 (IPR = 0.34), no significa que El Niño tuvo un efecto menor en las concentraciones de pigmentos en el fotel 230. Durante el periodo El Niño, todos los meses con excepción de uno tuvieron anomalías negativas en la serie del fotel 230. Mientras que en el fotel 80, cuatro meses presentaron anomalías positivas durante El Niño. Durante los periodos sin El Niño, hubo un número de anomalías negativas menor a la mitad del número de meses para el fotel 80, mientras que para el fotel 230 el número de anomalías negativas fue mayor que la mitad del número de meses sin dicha condición. El valor del IPR indica que hubo un efecto claro de El Niño en las dos localidades geográficas escogidas, pero su valor absoluto no necesariamente cuantifica el efecto en la distribución de pigmentos de un lugar con respecto al otro.

Los valores del IPR indican que El Niño no es el único fenómeno causante de variación interanual en la zona de estudio. Cualquier fenómeno que disminuya la mezcla de las aguas superficiales y subsuperficiales puede bajar el aporte de nutrientes a la zona eufótica y, por tanto, causar baja biomasa fitoplanctónica. De manera similar, los procesos que modifican la dispersión horizontal de varias masas de agua en el Pacífico oriental afectan las concentraciones de plancton en nuestra área de estudio.

for pixel 230 (RPI = 0.34), does not mean that El Niño had a lower effect on pigment concentrations at pixel 230. During the El Niño period, all of the months with the exception of one had negative anomalies for the series at pixel 230. While at pixel 80, four months had positive anomalies during El Niño. During the non-El Niño period, the number of negative anomalies was smaller than half the number of months at pixel 80, while the number of negative anomalies was greater than half the number of months for pixel 230. The RPI value indeed indicates a clear effect of El Niño at the two chosen geographic locations, but its absolute value does not necessarily quantify the effect on pigment distribution at one place with respect to another.

RPI values indicate that El Niño events are not the only phenomenon causing interannual variation in the study area. Any phenomenon that decreases mixing of surface and subsurface waters can diminish the input of nutrients to the euphotic zone and therefore cause lower phytoplankton biomass. Similarly, processes that modify the horizontal dispersion of various water masses in the eastern Pacific affect plankton concentration in our study area. Upon studying the coupling of the Gulf of California with large scale interannual climatic variability, Baumgartner and Christensen (1985) postulated the existence of two main sources of interannual variability in the gulf. These are fluctuations of: a) the north Pacific gyre, and b) the equatorial circulation; both may result in a non-seasonal predominance or in the intensification of a seasonal circulation pattern with respect to the other.

Ocean color sensors like SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field of View Sensor), OCTS (Ocean Color Temperature Sensor) and others (see Abbott *et al.*, 1994) will generate simultaneous temperature and pigment concentration imagery, with much better spatial and temporal coverage. Such time series will enable better analyses of the interactions between the environment and the phytoplankton. The CZCS imagery allowed us to describe strong seasonal and interannual variations of photosynthetic pigment concentration in our study area. Sea-

Al estudiar el acoplamiento del golfo de California a la variabilidad climática interanual de gran escala, Baumgartner y Christensen (1985) postularon la existencia de dos fuentes principales de variabilidad interanual en el golfo. Éstas son fluctuaciones de: a) el giro del Pacífico norte, y b) la circulación ecuatorial; de cualquiera de éstas puede resultar un predominio no estacional o una intensificación de un patrón de circulación estacional sobre el otro.

Sensores del color del océano como el SeaWiFS (*Sea-viewing Wide Field of View Sensor*), OCTS (*Ocean Color Temperature Sensor*) y otros (véase Abbott *et al.*, 1994) generarán simultáneamente imágenes de temperatura y de concentración de pigmentos, con mucha mejor cobertura espacial y temporal. Estas series de tiempo permitirán mejorar los análisis de las interacciones entre el medio ambiente y el fitoplancton. Las imágenes del CZCS permitieron describir fuertes variaciones estacionales e interanuales de la concentración de pigmentos fotosintéticos en el área de estudio. La variación estacional se debió principalmente a surgencias, y la variación interanual se debió a El Niño y otros fenómenos.

AGRADECIMIENTOS

Los datos de mareas de bahía San Quintín fueron proporcionados por el grupo de Mareografía del Departamento de Oceanografía Física del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.

REFERENCIAS

Abbott, M.R., Brown, O.B., Evans, R.H., Gordon, H.R., Carder, K.L., Müller-Karger, F. E. and Esaias, W.E. (1994). **Ocean Color in the 21st Century: A Strategy for a 20-Year Time Series**. Hooker, S.B. and Firestone E.R. (eds.). SeaWiFS Technical Report Series, NASA Technical Memorandum 104566, Vol. 17, 20 pp.

Álvarez-Borrego, S., Rivera, J.A., Gaxiola Castro, G., Acosta-Ruiz, M.J. y Schwartzlose, R.A. (1978). Nutrientes en el Golfo de California. **Ciencias Marinas**, 5(2): 53-71.

sonal variation was mainly due to upwelling, and interannual variation was due to El Niño and other phenomena.

ACKNOWLEDGEMENTS

Sea level data for San Quintín Bay were supplied by the Tidal Studies Group from the Department of Physical Oceanography at *Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada*.

English translation by the authors.

Álvarez-Borrego, S. (1983). Gulf of California. Chapter 17. In: B.H. Ketchum (ed.) **Estuaries and Enclosed Seas**, Elsevier Sci. Publ., Amsterdam, pp. 427-449.

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

Bakun, A. and Nelson, C. (1975). Climatology of the upwelling related processes off Baja California. **CalCOFI Rep.**, 19: 128-137.

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

Chávez, F. (1987). El Niño y la oscilación del sur. **Investigación y Ciencia**, 128: 46-57.

Gaxiola-Castro, G. and Álvarez-Borrego, S. (1986). Photosynthesis-irradiance relationship for winter phytoplankton in Pacific waters off Mexico. **Oceanologica Acta**, 9 (4): 497-501.

Gordon, H.R., Clark, D.K., Brown, J.W., Brown, O.B., Evans, R.H. and Broenkow, W.W. (1983). Phytoplankton pigment concentrations in the Middle Atlantic Bight: Comparison of ship determinations and CZCS estimates. **Appl. Opt.**, 22: 20-36.

Griffiths, R.C. (1968). Physical, chemical, and biological oceanography of the entrance to the Gulf of California, spring of 1960. **U.S. Fish Wildl. Serv. Spec. Sci. Rep. Fish.**, 573, 47 pp.

Mann, K.H. and Lazier, J.R.N. (1991). **Dynamics of Marine Ecosystems, Biological**

- Physical Interactions in the Oceans.** Blackwell Scient. Pub., Boston, 466 pp.
- Martínez-López, A. (1993). Efectos del evento "El Niño" 1982-83 en la estructura del fitoplancton en la costa occidental de Baja California Sur. Tesis de maestría en ciencias, **CICIMAR, IPN**, La Paz, BCS, 95 pp.
- Mee, L.D., Ramírez-Flores, A., Flores-Verdugo, F. and González-Farías, F. (1985). Coastal upwelling and fertility of the southern Gulf of California: impact of the 1982-1983 ENSO event. **Tropical Ocean and Atmosphere Newsletter**, 31: 9-10.
- Müller-Karger, F.E., Walsh, J.J., Evans, R.H. and Meyers, M.B. (1991). On the seasonal phytoplankton concentration and sea surface temperature of the Gulf of Mexico as determined by satellites. **J. Geophys. Res.**, 96: 12,645-12,665.
- Navarro-Fierro, R. (1988). **Introducción a la bioestadística. Análisis de variables binarias.** McGraw-Hill, Nueva York, 170 pp.
- Reid, J.L., Roden, G.I. and Wyllie, J.C. (1958). Studies of the California Current System. **CalCOFI Rep.**, 6: 21-56.
- Robles-Pacheco, J.M. and Christensen, N. (1984). Effects of the 1982-83 El Niño in the Gulf of California. **EOS**, 64: 1039.
- Roden, G.I. (1964). Oceanographic aspects of the Gulf of California. In: T.H. Van Andel and G.G. Shor, Jr. (eds.), **Marine Geology of the Gulf of California: A Symposium.** Mem. Am. Assoc. Pet. Geol., 3: 30-58.
- Santamaría-del-Ángel, E., Álvarez-Borrego, S. and Müller-Karger, F.E. (1994a). Gulf of California biogeographic regions based on coastal zone color scanner imagery. **J. Geophys. Res.**, 99: 7,411-7,421.
- Santamaría-del-Ángel, E., Álvarez-Borrego, S. and Müller-Karger, F.E. (1994b). The 1983-1984 El Niño in the Gulf of California as seen in coastal zone color scanner imagery. **J. Geophys. Res.**, 99: 7,423-7,431.
- Simpson, J.J. (1983). Large-scale thermal anomalies in the California Current during the 1982-1983 El Niño. **Geophysic. Res. Lett.**, 10: 937-940.
- Stevenson, M.R. (1970). On the physical and biological oceanography near the entrance to the Gulf of California, October 1966-August 1967. **Inter-Am. Trop. Tuna Comm. Bull.**, 4(3): 389-504.
- Thomas, A.C., Huang, F., Strub, P.T. and James, C. (1994). Comparison of the seasonal and interannual variability of phytoplankton pigment concentrations in the Peru and California Current systems. **J. Geophys. Res.**, 99: 7,355-7,370.
- Thorade, H. (1909). Über die Kalifornische Meeresströmung. **Hidrogr. Marit. Meteorol. Ann.**, 37: 17-34; 63-76.
- Torres-Moye, G. and Álvarez-Borrego, S. (1987). Effects of the 1984 El Niño on the summer phytoplankton of a Baja California upwelling zone. **J. Geophys. Res.**, 92(C13): 14,383-14,386.
- Traganza, E.D. (1985). Application of satellites to chemical oceanography. In: A. Zirino (ed.), **Mapping Strategies in Chemical Oceanography**, American Chemical Society, Advances in Chemistry Series, 209: 373-392.
- Valdez Holguín, J.E. (1986). Distribución de la biomasa y productividad del fitoplancton en el Golfo de California durante el evento de El Niño 1982-1983. Tesis de maestría en ciencias, **Centro de Investigación y de Educación Superior de Ensenada**, Ensenada, Baja California, México, 90 pp.
- Walsh, J.J., Whittedge, T.E., Kelley, J.C., Huntsman, S.A. and Pillsbury, R.D. (1977). Further transition states of the Baja California upwelling ecosystem. **Limnol. Oceanogr.**, 22: 264- 380.
- Wyrtki, K. (1966). Oceanography of the eastern equatorial Pacific ocean. **Oceanogr. Mar. Biol. An. Rev.**, 4: 33-68.
- Yentsch, C.S. (1981). Phytoplankton growth in the sea, a coalescence of disciplines. In: P. G. Falkowski (ed.), **Primary Productivity in the Sea**, Plenum Press, New York, 19: 17-32.
- Zeitzschel, B. (1969). Primary productivity in the Gulf of California. **Marine Biology**, 3: 201- 207.