

**EL GOLFO DE TEHUANTEPEC Y ÁREAS ADYACENTES:
VARIACIÓN ESPACIOTEMPORAL DE PIGMENTOS FOTOSINTÉTICOS
DERIVADOS DE SATÉLITE**

**THE GULF OF TEHUANTEPEC AND ADJACENT AREAS:
SPATIAL AND TEMPORAL VARIATION OF SATELLITE-DERIVED
PHOTOSYNTHETIC PIGMENTS**

Salvador E. Lluch-Cota¹
Saúl Álvarez-Borrego²
Eduardo M. Santamaría-del Ángel³
Frank E. Müller-Karger⁴
Sergio Hernández-Vázquez¹

¹ Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR)
Apartado postal 128
La Paz, Baja California Sur, México

² Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE)
Apartado postal 2732
Ensenada, Baja California, México

³ Facultad de Ciencias Marinas
Universidad Autónoma de Baja California
Apartado postal 453
Ensenada, Baja California, México

⁴ University of South Florida
Department of Marine Science
St. Petersburg, FL 33701-5016, USA

Recibido en abril de 1997; aceptado en junio de 1997

RESUMEN

Mediante el uso de datos de concentración de pigmentos fotosintéticos generados por el sensor Coastal Zone Color Scanner de 1978 a 1986, se describe la variación estacional e interanual de la biomasa fitoplanctónica del Golfo de Tehuantepec y zonas adyacentes. Las concentraciones de 0.3 mg m^{-3} y mayores fueron consideradas como índice de aguas productivas. Su cobertura espacial muestra las surgencias costeras de los golfos de Tehuantepec y Papagayo (en la región oriental del área de estudio) entre octubre y abril, la surgencia del domo de Costa Rica en verano y el efecto episódico de mezcla por tormentas tropicales de julio a octubre en toda el área de estudio. Los eventos de surgencia de Tehuantepec y Centroamérica no son sincrónicos. La región al occidente de Tehuantepec es oligotrófica la mayor parte del tiempo ($<0.2 \text{ mg m}^{-3}$). La variación interanual más evidente fue el efecto de El Niño 1982-1983, con muy bajas concentraciones de pigmentos asociadas con una termoclina profunda en toda el área de estudio. Además, hubo un evento anti-El Niño en 1985 en la región oriental, con concentraciones elevadas de biomasa fitoplanctónica asociadas con una termoclina somera.

Palabras clave: Golfo de Tehuantepec, pigmentos fotosintéticos, datos de satélite, CZCS.

ABSTRACT

Photosynthetic pigment concentrations retrieved from data generated from 1978 to 1986 by the sensor Coastal Zone Color Scanner were used to describe the seasonal and interannual variation of phytoplankton biomass of the Gulf of Tehuantepec and adjacent areas. The pigment concentrations 0.3 mg m^{-3} and higher were considered as an index of productive waters. Its spatial coverage shows coastal upwelling in the gulfs of Tehuantepec and Papagayo (in the eastern region of the study area) between October and April, upwelling at the Costa Rica dome during summer, and the transient effect of mixing by tropical storms from July to October throughout the study area. Upwelling events in Tehuantepec and Central America are not synchronous. The region west of the Gulf of Tehuantepec is oligotrophic most of the time ($<0.2 \text{ mg m}^{-3}$). The most evident inter-annual variation was the effect of El Niño 1982-1983, with very low pigment concentrations associated with a deep thermocline in the whole study area. Also, there was an anti-El Niño event in 1985 in the eastern region, with high phytoplankton biomass concentrations associated with a shallow thermocline.

Key words: Gulf of Tehuantepec, photosynthetic pigments, satellite data, CZCS.

INTRODUCCIÓN

El sensor Coastal Zone Color Scanner (CZCS) voló a bordo del satélite Nimbus-7 y proveyó datos de pigmentos fotosintéticos del océano entre 1978 y 1986. El procesamiento de los datos se completó en 1990, y la base de datos se archivó y se distribuyó por el Centro de Vuelos Espaciales Goddard de la NASA. Esta base de datos es una herramienta poderosa para el estudio de una diversidad de aplicaciones oceanográficas, tales como la cuantificación de la variabilidad biológica espaciotemporal y el análisis de la magnitud de la productividad primaria oceánica y su papel en el ciclo global del carbono (Martin y Perry, 1994). Después de diez años sin datos de satélite del color del océano, el sensor japonés OCTS (Ocean Color and Temperature Sensor) se puso en órbita en 1996, y el SeaWiFS (Sea-viewing Wide-field-of-view Sensor) de la NASA está programado para 1997.

Las aguas oceánicas adyacentes a México que han sido estudiadas utilizando datos del CZCS son: el sistema de la Corriente de California (Peláez y McGowan, 1986); el Golfo de México (Müller-Karger *et al.*, 1991; Biggs y Müller-Karger, 1994); el Golfo de California (Santamaría-del Ángel *et al.*, 1994a, b); y la zona del Pacífico adyacente a Baja California Sur y Cabo Corrientes (Zuria-Jordan *et al.*, 1995).

INTRODUCTION

The sensor Coastal Zone Color Scanner (CZCS) was carried by the Nimbus-7 satellite and generated oceanic photosynthetic pigment concentration data from 1978 to 1986. Data processing was completed in 1990. The CZCS data set has been processed, archived, and distributed by the NASA Goddard Space Flight Center. This resource represents a powerful tool for the study of a diversity of oceanographic applications, such as quantifying biological temporal-spatial variability and analyzing the magnitude of ocean primary productivity and its role in the global carbon cycle (Martin and Perry, 1994). After ten years without ocean color satellite data, the Japanese sensor OCTS (Ocean Color and Temperature Sensor) was put into orbit in 1996, and NASA's SeaWiFS (Sea-viewing Wide-field-of-view Sensor) is scheduled for 1997.

Oceanic waters off Mexico that have been studied with CZCS data are: the California Current system (Peláez and McGowan, 1986); the Gulf of Mexico (Müller-Karger *et al.*, 1991; Biggs and Müller-Karger, 1994); the Gulf of California (Santamaría-del Ángel *et al.*, 1994a, b); and the Pacific off southern Baja California and Cabo Corrientes (Zuria-Jordan *et al.*, 1995).

The objective of this work is to describe the spatial and temporal variation of the

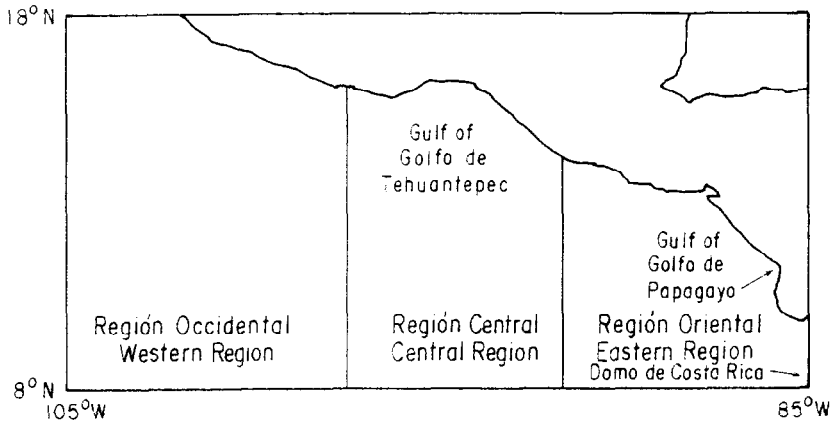


Figura 1. Área de estudio y su división en regiones.
Figure 1. Study area and its division into regions.

El propósito del presente trabajo es describir la variación espaciotemporal de la biomasa fitoplanctónica en el Golfo de Tehuantepec y zonas adyacentes, y relacionarla con variables meteorológicas y oceanográficas.

El área de estudio se encuentra entre 8° y 18°N, y 85° y 105°O (fig. 1). Los sistemas de vientos se combinan con la dinámica oceanográfica para producir dos esquemas ambientales extremos: en verano dominan las condiciones tropicales con la Corriente Costera de Costa Rica (CCCR); y en invierno la CCCR es débil y las características oceanográficas están determinadas por los eventos locales de viento, calentamiento solar y lluvia (Trasviña, 1991).

El Pacífico tropical oriental presenta alta actividad biológica, con un aporte grande de nutrientes a la superficie que se debe a una termoclina somera, en comparación con el resto del Pacífico tropical (Vinogradov, 1981), y a eventos de surgencia y mezcla vertical (Picaut, 1985). Sostiene pesquerías importantes, como la del atún aleta amarilla y la del barrilete.

Roden (1961) describió el proceso de surgencias en la costa Pacífica de Centroamérica y explicó que su motor principal son los eventos de arribo intermitente de alta presión atmosférica de Canadá al lado del Caribe de Centroamérica. Debido a los tres pasajes montañosos (Tehuantepec, Papagayo y Panamá), se forman los chorros inerciales de aire que se extienden

phytoplankton biomass in the Gulf of Tehuantepec and adjacent areas, and to relate it to meteorological and oceanographic variables.

The study area is located between 8° and 18°N, and 85° and 105°W (fig. 1). Winds are combined with the oceanographic dynamics to produce two environmental extremes: tropical conditions dominate during summer with the Costa Rica Coastal Current (CRCC); and during winter the CRCC is weak and the oceanographic characteristics are controlled by local winds, solar heating and rain (Trasviña, 1991).

The Eastern Tropical Pacific presents high biological activity, with a large input of nutrients to surface waters due to a shallow thermocline, in comparison with the rest of the Tropical Pacific (Vinogradov, 1981), and to upwelling events and vertical mixing (Picaut, 1985). It supports important fisheries, such as that of yellowfin and skipjack tuna.

Roden (1961) described upwelling processes on the Pacific coast of Central America and he indicated that the main cause is the intermittent arrival of high atmospheric pressure from Canada to the Caribbean side of Central America. Due to the three mountain passages (Tehuantepec, Papagayo and Panama), inertial air jets are formed that extend hundreds of kilometers into the Pacific. These coastal upwelling events cause surface water temperatures to

cientos de kilómetros en el Pacífico. Estas surgencias costeras disminuyen la temperatura superficial del agua hasta en 10°C. Legeckis (1988) indicó que el centro de la lengüeta de surgencia de Papagayo está en 10°N y 88°O. El domo de Costa Rica es otro tipo de surgencia en la parte oriental del área de estudio, centrado en 8°N y 90°O, y causado por la circulación oceánica y tensión de viento ciclónico (Hofmann *et al.*, 1981). La zona principal de formación de tormentas tropicales está en nuestra área de estudio. La densidad promedio de perturbaciones tropicales es la más grande del mundo (Reyes y Mejía-Trejo, 1991; y otros citados por ellos). La época de ciclones es primordialmente de mayo a noviembre, pero agosto y septiembre tienen la mayor frecuencia.

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 procesamiento 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 clorofila. El error en la concentración calculada es de 30 a 40% en el intervalo de 0.08 a 1.5 mg m⁻³ (aguas Caso I); para concentraciones más altas el error es mayor (Gordon *et al.*, 1983). En el periodo de vida útil del sensor (noviembre de 1978 a junio de 1986) no se produjeron datos para todos los días, ya que en ocasiones estaba apagado o las imágenes no fueron útiles por la nubosidad o el reflejo directo del sol en la superficie del mar. Con las imágenes originales se construyeron 68 composiciones mensuales casi completas para nuestra área de estudio (promedios aritméticos de los datos válidos). No se pudieron construir 24 de las 92 composiciones mensuales. Julio fue el mes con la mayor cobertura de nubes en las imágenes. El tamaño del fotograma (elemento de fotografía) de las escenas originales fue cercano a 4 × 4 km², pero en las composiciones mensuales se promediaron áreas de 3 × 3 fotogramas.

decrease 10°C. Legeckis (1988) indicated that the center of the Papagayo upwelling plume is at 10°N and 88°W. The Costa Rica dome is another type of upwelling in the eastern part of our study area, centered at 8°N and 90°W; it is caused by the cyclonic ocean circulation and wind stress (Hofmann *et al.*, 1981).

The prime area of tropical storm formation lies in our study area. The average density of tropical perturbations is the world's largest (Reyes and Mejía-Trejo, 1991; and others cited therein). The season for these cyclones is primarily from May through November, with August and September having the maximum frequency.

METHODS

Pigment concentrations were retrieved from the 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, as if they were chlorophyll. The error of the estimated concentration is 30-40% within the range 0.08 to 1.5 mg m⁻³ (Case I waters); for higher concentrations the error is larger (Gordon *et al.*, 1983). Data were not produced for all days within the lifetime of the sensor (November 1978 to June 1986), because sometimes it was turned off or the imagery was not useful due to clouds or the sun glitter. With the original images we built 68 almost complete monthly composites for our study area (arithmetic averages of valid data). We were not able to construct 24 of the 92 monthly composites. July was the month with largest cloud coverage in the original scenes. Pixel size of the original images was about 4 × 4 km², but in the monthly composites, areas of 3 × 3 pixels were averaged.

The study area was divided into three regions according to their oceanographic characteristics (fig. 1). The Gulf of Tehuantepec region in the center of our study area often shows a shoaling of the thermocline

El área de estudio se dividió en tres regiones de acuerdo con sus características oceanográficas (fig. 1). La región del Golfo de Tehuantepec, en el centro del área de estudio, a menudo presenta una elevación de la termoclina (Brandhorst, 1958). Ésta es la "cresta" reportada por Blackburn (1962) y usualmente se manifiesta con temperaturas superficiales más bajas que en las aguas adyacentes. La región oriental tiene la lengüeta de surgencia de Papagayo y el centro del domo de Costa Rica, donde también hay una elevación de la termoclina. La región occidental tiene una termoclina profunda y sus aguas superficiales son muy oligotróficas la mayor parte del tiempo. No hay eventos que causen surgencia en esta región occidental.

Para analizar la variabilidad temporal de los patrones de distribución de las concentraciones de pigmentos, seleccionamos las concentraciones de 0.3 mg m^{-3} y mayores como un índice de aguas productivas. Para seleccionar este intervalo, seguimos el criterio de Morel y Berthon (1989). Se generaron series de tiempo del porcentaje de cobertura espacial de este intervalo para cada región en el área de estudio, para analizar su comportamiento estacional e interanual y para compararlo con variables climáticas.

Se calculó el año promedio a partir de las 68 composiciones mensuales y se graficó la cobertura espacial del índice de aguas productivas para cada mes promedio. Desafortunadamente, sólo contamos con ocho años de datos para caracterizar un año promedio. Más aún, algunos de los meses promedio tienen menos que ocho años. Contamos con ocho composiciones mensuales para enero, febrero y marzo, y sólo seis para abril, dos para mayo y junio, uno para julio, cuatro para agosto, seis para septiembre, siete para octubre y, de nuevo, ocho para noviembre y diciembre.

Se calcularon series de tiempo de anomalías de presión atmosférica al nivel del mar, temperatura superficial del mar, y los componentes zonal y meridional del viento para cada región del área de estudio. Para ello se usó información de bancos de datos (COAD-CD ROM Vol. 5: CEOS/ORTOM). También se calcularon los perfiles verticales promedio de temperatura del

(Brandhorst, 1958). This is the "ridge" reported by Blackburn (1962) and it usually manifests with lower surface temperatures than in the surrounding waters. The eastern region includes the Papagayo upwelling plume and the center of the Costa Rica dome, where there is also a shoaling of the thermocline. The western region has a deep thermocline and its surface waters are very oligotrophic most of the time. There are no events causing upwelling in this western region.

To analyze the temporal variability of the pigment concentration distribution patterns, we selected the concentrations 0.3 mg m^{-3} and higher as index of productive waters. To select this interval, we followed Morel and Berthon's (1989) criteria. We generated time series of the percentage of spatial coverage of this interval for each region in our study area, to analyze its seasonal and interannual behavior and to compare it with climatic variables.

We calculated the average year from the 68 monthly composites, and we graphed the spatial coverage of the index of productive waters for each average month. Unfortunately, we only have eight years of data to characterize an average year. Furthermore, some of the average months have less than eight years. We have eight monthly composites for January, February and March, and only six for April, two for May and June, one for July, four for August, six for September, seven for October and, again, eight for November and December.

We used historical information from data banks (COAD-CD ROM Vol. 5: CEOS/ORTOM) to calculate time series of anomalies of atmospheric pressure at sea level, surface water temperature and the two wind components, for the study period and for each region within our study area. We also calculated the average vertical profile of water temperature from historical data (NODC-CD ROM Vol. 3: NOAA), for each month and each region. We obtained the depth of the thermocline from each average profile as the middle point in the depth interval where the temperature gradient was maximum. Then, we built smooth time series for this depth.

agua utilizando datos históricos (NODC-CD ROM Vol. 3: NOAA), para cada mes y región. Se calculó la profundidad de la termoclina de cada perfil promedio como el punto medio del intervalo donde el gradiente de temperatura fue máximo. Luego se construyó la serie de tiempo suavizada de esta profundidad para el periodo de estudio.

RESULTADOS

Las regiones central y oriental tienen aporte estacional de aguas productivas ($>0.3 \text{ mg m}^{-3}$); la occidental es consistentemente oligotrófica (casi siempre $<0.2 \text{ mg m}^{-3}$), con la excepción de algunas "manchas" de aguas productivas de julio a octubre y la intrusión de la lenguaeta del Golfo de Tehuantepec en noviembre y diciembre (fig. 2).

La cobertura espacial del índice de aguas productivas a lo largo del año promedio muestra los principales procesos oceanográficos (fig. 2). En el Golfo de Tehuantepec resalta una lengua de aguas productivas, de octubre a abril, con máximo desarrollo de noviembre a enero. Esto también causa algo de cobertura de aguas productivas en la región occidental adyacente al Golfo de Tehuantepec en noviembre y diciembre. En el extremo oriental del área de estudio también se aprecia una lenguaeta de aguas productivas de octubre a abril, pero con menor desarrollo que la del Golfo de Tehuantepec en otoño e invierno y máxima cobertura espacial en abril. El tercer aspecto es la presencia de aguas productivas en la región oriental durante el verano (fig. 2). De julio a octubre hubo una distribución en forma de manchas de aguas productivas en toda nuestra área de estudio, pero con mayor cobertura en la región oriental.

Las series de tiempo de cobertura espacial de aguas productivas, para las regiones del Golfo de Tehuantepec y oriental, muestran máximos de hasta más de 80% de cobertura en invierno y mínimos en verano (fig. 3F). Sin embargo, los mínimos de verano del Golfo de Tehuantepec son muy pronunciados, hasta menos de 5% de cobertura, mientras que en la región oriental los mínimos son 10% o mayores. El periodo que abarcó todo 1983 y el inicio de 1984 fue una excepción, con cobertura del

RESULTS

The central and eastern regions have seasonal inputs of productive waters ($>0.3 \text{ mg m}^{-3}$). The western region is consistently oligotrophic (almost always $<0.2 \text{ mg m}^{-3}$), with the exception of some patches of productive waters from July to October, and the intrusion of the Gulf of Tehuantepec plume in November and December (fig. 2).

The coverage of productive waters shows the main oceanographic processes throughout the average year (fig. 2). In the Gulf of Tehuantepec there is a plume of productive waters, from October through April, with maximum development from November through January. At the eastern extreme of our study area there is also a plume of productive waters from October through April, but less developed than the one at the Gulf of Tehuantepec during fall and winter and with maximum spatial coverage during April. A third aspect is the presence of productive waters in the eastern region during summer (fig. 2). From July to October there was a patchy distribution of productive waters throughout the whole study area, but with greatest coverage in the eastern region.

The time series of the spatial coverage of the index of productive waters, for the Gulf of Tehuantepec and eastern regions, show maxima of more than 80% coverage during winter and minimal coverage during summer (fig. 3F). However, the summer minima of the Gulf of Tehuantepec are very pronounced, of less than 5% coverage, while in the eastern region, minimal coverages are 10% or greater. The period covering all of 1983 and the beginning of 1984 was an exception, with the coverage of productive waters persistently low in all the study area.

At the interannual scale, the most notable event was present from the end of 1982 through the beginning of 1984, and it was shown by both the meteorological and oceanographic variables and by the relative coverage of productive waters (fig. 3). This event was detected as negative anomalies of atmospheric pressure at sea level (fig. 3A), as positive anomalies of surface water temperature (larger in the eastern region than in the Gulf of Tehuantepec)

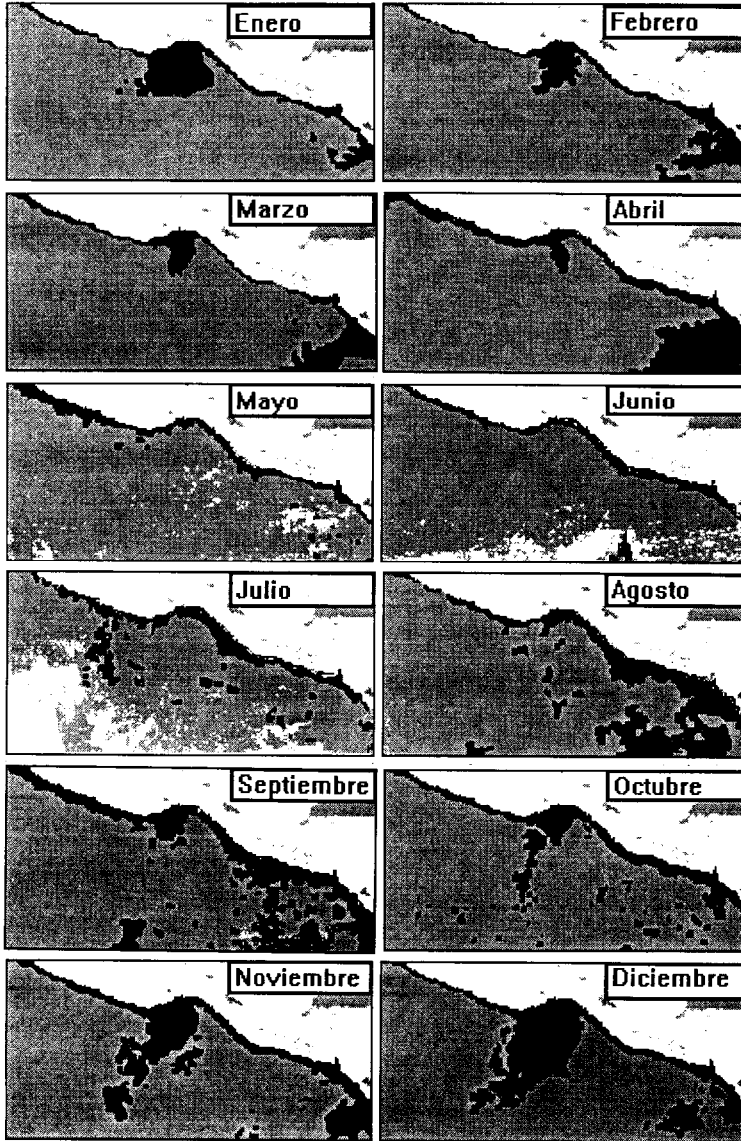


Figura 2. Cobertura espacial del índice de aguas productivas (0.3 mg m^{-3} y mayores) para el año promedio (color negro). El color blanco significa tierra o nubes. El color gris representa aguas oligotróficas, con concentración de pigmentos $<0.3 \text{ mg m}^{-3}$.

Figure 2. Spatial coverage of the index of productive waters (0.3 mg m^{-3} and greater) for the average year (black color). White color means land or clouds. Grey color represents oligotrophic waters, with pigment concentration $<0.3 \text{ mg m}^{-3}$.

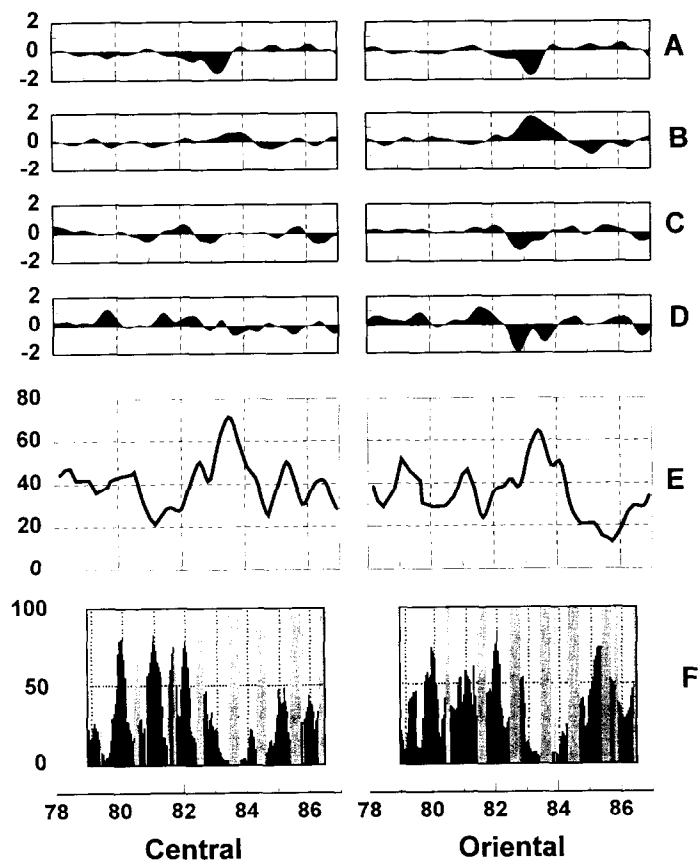


Figura 3. Series de tiempo para las regiones central y oriental. Paneles A-D: anomalías de presión atmosférica (mb), temperatura superficial del mar ($^{\circ}\text{C}$), componente zonal de velocidad de viento (m s^{-1}) y componente meridional de la velocidad del viento (m s^{-1}). Paneles E: profundidad de la termoclina (m). Paneles F: cobertura espacial relativa del índice de aguas productivas (% del área) (áreas sombreadas con gris significan que no hubo datos para esos meses, principalmente por nubosidad).

Figure 3. Time series for the central and eastern regions. Panels A-D: anomalies of atmospheric pressure (mb), sea surface temperature ($^{\circ}\text{C}$), zonal component of the wind velocity (m s^{-1}), and meridional component of the wind velocity (m s^{-1}). Panels E: depth of the thermocline (m). Panels F: relative spatial coverage of the index of productive waters (% area) (shaded gray areas mean that there are no data for those months, mainly due to cloud coverage).

índice de aguas productivas persistentemente baja en toda el área de estudio.

En la escala interanual, el evento más notorio se presentó de finales de 1982 a principios de 1984, y se mostró tanto en las variables meteorológicas y oceanográficas como en la cobertura relativa del índice de aguas productivas

(fig. 3B), and as negative anomalies of the wind components (fig. 3C, D). The thermocline was deepest in 1983, coinciding with minimum values of the coverage of productive waters (fig. 3E, F).

Another interannual event was present in the eastern region during 1985 and 1986, with

(fig. 3). Este evento se detectó como anomalías negativas de presión atmosférica al nivel del mar (fig. 3A), como anomalías positivas de la temperatura superficial del mar (más grandes en la región oriental que en el Golfo de Tehuantepec) (fig. 3B), y como anomalías negativas de los componentes del viento (fig. 3C, D). La termoclina alcanzó su mayor profundidad en 1983, coincidiendo con mínimos de cobertura de aguas productivas (fig. 3E, F).

En la región oriental durante 1985 y 1986, se presentó otro evento interanual, con valores altos de la cobertura relativa de aguas productivas y una termoclina más somera (fig. 3).

DISCUSIÓN

Los datos de concentración de clorofila que se han obtenido directamente analizando agua de mar son escasos para el área de estudio. En sentido estricto, la comparación directa de la clorofila con datos derivados del CZCS no es apropiada, porque los dos conjuntos de datos tienen escalas diferentes de tiempo y espacio. Los datos del CZCS son promedios para áreas de $12 \times 12 \text{ km}^2$ y para un mes, mientras que los datos de clorofila son mediciones instantáneas para un punto (Santamaría-del Ángel *et al.*, 1994a).

A pesar de la relativa imprecisión de los datos del CZCS, es interesante notar que su serie de tiempo es muy consistente; sus ciclos estacionales y la variación interanual se comportan como se espera de acuerdo con fenómenos físicos tales como las surgencias y El Niño (fig. 3). Gordon *et al.* (1988) sugirieron que el algoritmo usado para corregir los valores de radiancia del satélite por el efecto del esparcimiento de Rayleigh en la atmósfera es válido para ángulos del zenit del sol menores que $50\text{-}55^\circ$, que corresponde a latitudes de 26.5° a 31.5°N al final de diciembre. Para latitudes grandes, el síntoma de este error es un máximo estacional en invierno (Strub *et al.*, 1990). El intervalo de latitud de nuestra área de estudio es apropiado para evitar errores sistemáticos debido a los algoritmos de corrección atmosférica, por lo que no debe haber un incremento artificial de la concentración de pigmentos en invierno.

high values of the relative coverage of productive waters and with a shallower thermocline (fig. 3).

DISCUSSION

Chlorophyll concentration data obtained directly by water sampling from the study area are scarce. Strictly, a comparison of chlorophyll versus CZCS pigment data is not appropriate, because the two sets of data have totally different time and space scales: the CZCS data are averages for areas of $12 \times 12 \text{ km}^2$ and for one month, whereas the chlorophyll data are instantaneous point measurements (Santamaría-del Ángel *et al.*, 1994a).

In spite of the relative imprecision of the CZCS data, it is interesting to notice that its time series is very consistent; its seasonal cycles and its interannual variation behave as expected in agreement with physical phenomena such as upwelling and El Niño (fig. 3). Gordon *et al.* (1988) suggested that the algorithm used to correct the satellite radiance values for Rayleigh scattering in the atmosphere is valid for solar zenith angles less than $50\text{-}55^\circ$, which corresponds to latitudes of $26.5^\circ\text{-}31.5^\circ\text{N}$ in late December. For high latitudes, the symptom for this error is a seasonal maximum in winter (Strub *et al.*, 1990). The latitude range of our study area is appropriate to avoid systematic errors due to the algorithms for atmospheric correction. Thus, there should be no artificial increase of pigment concentration during winter.

The development of the high pigment concentration plumes at the gulfs of Tehuantepec and Papagayo are out of phase (fig. 2). Using satellite surface water temperature (AVHRR data), Legeckis (1988) studied an upwelling event in March 7-22, 1985, and described that while the Panama upwelling plume was much larger ($>1,000 \text{ km}$) than that of Papagayo, the upwelling plume off Tehuantepec was very weak. This indicates that there is no synchrony in the wind events of these three regions.

There are two complementary mechanisms that produce rich waters in the eastern region: the Papagayo coastal upwelling, from October through April, causing a larger spatial coverage

El desarrollo de las lenguetas de alta concentración de pigmentos fotosintéticos en los golfos de Tehuantepec y Papagayo están desfasados (fig. 2). Legeckis (1988) utilizó información de satélite de temperatura del agua (datos del AVHRR) para estudiar un evento de surgencias ocurrido del 7 al 22 de marzo de 1985, y describió que mientras la lengua de surgencia de Panamá fue mucho más extensa (más de 1,000 km) que la de Papagayo, la de Tehuantepec fue muy débil. Esto indica que no hay sincronía en los eventos de viento de estas tres regiones.

En la región oriental existen dos mecanismos complementarios que producen aguas ricas: la surgencia costera de Papagayo, de octubre a abril, que causa una amplia cobertura espacial de aguas productivas de febrero a abril; y la surgencia del domo de Costa Rica, con altas concentraciones de pigmentos en agosto y septiembre. Hofmann *et al.* (1981) indicaron que la surgencia del domo de Costa Rica se intensifica en julio por el aumento de la tensión del viento ciclónico. Sin embargo, los datos de concentración de pigmentos del año promedio muestran una cobertura más amplia de aguas productivas en agosto y septiembre que en julio (fig. 2). Posiblemente la explicación de esto es el efecto transitorio de las tormentas tropicales. El número promedio por año de ciclones tropicales observados de 1965 a 1983 fue 14.8. En el periodo de noviembre de 1978 a junio de 1986, tanto agosto como septiembre tuvieron un máximo de seis tormentas tropicales, tres de ellas con fuerza de huracán (Reyes y Mejía-Trejo, 1991). Estas tormentas tropicales causan mezcla vertical con aporte de nutrientes a la capa eufótica, que a su vez causan aumentos episódicos de la biomasa fitoplanctónica superficial.

La anomalía interanual más evidente corresponde al periodo de El Niño 1982-1983. El efecto más importante de estos eventos es el hundimiento de la termoclina, lo que dificulta el aporte de nutrientes a la superficie con la consecuente disminución de productividad biológica (Barber *et al.*, 1985).

El evento interanual de 1985-1986 en la región oriental, con alta cobertura espacial de aguas productivas, fue causada por una termo-

of productive waters from February to April; and upwelling at the Costa Rica dome, with high pigment concentrations in August and September. Hofmann *et al.* (1981) indicated that upwelling at the Costa Rica dome intensifies in July due to the increase of the cyclonic wind stress. However, the pigment concentration data for the average year show larger coverage of productive waters in August and September than in July (fig. 2). The explanation for this may be the transient effect of tropical storms. The mean number of observed tropical cyclones per year was 14.8 for 1965-1983. In the period November 1978 to June 1986, both August and September had a maximum of six tropical storms, three of them with hurricane strength (Reyes and Mejía-Trejo, 1991). These tropical storms cause vertical mixing with input of nutrients to the euphotic layer, which in turn cause episodic increases of surface phytoplankton biomass.

The most evident interannual anomaly corresponds to El Niño 1982-1983 (fig. 3). The most important effect of these events is the thermocline depth increase. This impedes the nutrient input to the surface, decreasing biological production (Barber *et al.*, 1985).

The interannual 1985-1986 event in the eastern region, with a large spatial coverage of productive waters, was caused by a shallower thermocline (fig. 3E, F). The thermocline and the nutricline coincide in the Eastern Tropical Pacific (Chávez *et al.*, 1983). With a similar wind intensity and a shallower nutricline there is greater input of rich waters to the euphotic zone. Lower mean sea level and surface temperatures, and larger catches of big pelagic fishes during 1985 (CIAT, 1986), are evidence of an anti-El Niño event in this region.

English translation by the authors.

clina más somera (fig. 3E, F). En el Pacífico tropical oriental, la termoclina y la nutriclina coinciden (Chávez *et al.*, 1983). Con una intensidad similar de vientos y una nutriclina más somera se produce mayor aporte de aguas ricas a la zona eufótica. El más bajo nivel medio del mar, menores temperaturas superficiales y más

abundantes capturas de pelágicos mayores, en 1985 (CIAT, 1986), evidencian condiciones anti-El Niño en esta región.

REFERENCIAS

- Barber, R.T., Kogelschartz, J.E. and Chávez, F.P. (1985). Origin of productivity anomalies during the 1982-1983 El Niño. *CalCOFI Rep.*, 26: 65-71.
- Blackburn, M. (1962). An oceanographic study of the Gulf of Tehuantepec. US Fish and Wildlife Service Special Scientific Report. Fisheries, 404, 64 pp.
- Brandhorst, W. (1958). Thermocline topography, zooplankton standing crop, and mechanisms of fertilization in the Eastern Tropical Pacific. *J. du Conseil*, 24(1): 16-31.
- Biggs, D.C. and Müller-Karger, F.E. (1994). Ship and satellite observations of chlorophyll stocks in interacting cyclone-anticyclone eddy pairs in the western Gulf of Mexico. *J. Geophys. Res.*, 99: 7371-7384.
- Chávez, F.P., Barber, R.T. and Vásquez, F. (1983). Progression of the 1982-83 El Niño off northern Peru. *Trop. Ocean-Atmosphere Newslett.*, 21: 26-28.
- CIAT (1986). Reporte Anual de la Comisión Interamericana del Atún Tropical 1985, pp. 118-124.
- 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.
- Gordon, H.R., Brown, J.W. and Evans, R.H. (1988). Exact Rayleigh scattering calculations for use with the Nimbus-7 coastal zone color scanner. *Appl. Opt.*, 27: 862-871.
- Hofmann, E.E., Busalacchi, A.J. and O'Brien, J.J. (1981). Wind generation of the Costa Rica dome. *Science*, 214: 552-553.
- Legeckis, R. (1988). Upwelling off the gulfs of Panama and Papagayo in the Tropical Pacific during March 1985. *J. Geophys. Res.*, 93: 15485-15489.
- Martin, D.L. and Perry, M.J. (1994). Minimizing systematic errors from atmospheric multiple scattering and satellite viewing geometry in coastal zone color scanner level IIA imagery. *J. Geophys. Res.*, 99: 7309-7322.
- Morel, A. and Berthon, J-F. (1989). Surface pigments, algal biomass profiles, and potential production of the euphotic layer: Relationships reinvestigated in view of remote-sensing applications. *Limnol. Oceanogr.*, 34(8): 1545-1562.
- Müller-Karger, F.E., Walsh, J.J., Evans, R.H., and Meyers, M.B. (1991). On the seasonal phytoplankton concentration and sea surface temperature cycles of the Gulf of Mexico as determined by satellites. *J. Geophys. Res.*, 96: 12645-12665.
- Peláez, J. and McGowan, J.A. (1986). Phytoplankton pigment in the California Current as determined by satellite. *Limnol. Oceanogr.*, 31: 927-950.
- Picaut, J. (1985). Major dynamics affecting the Eastern Tropical Atlantic and Pacific Oceans. *CalCOFI Rep.*, 25: 41-50.
- Reyes, S. and Mejía-Trejo, A. (1991). Tropical perturbations in the Eastern Pacific and the precipitation field over north-western Mexico in relation to ENSO phenomenon. *Int. J. Climatol.*, 11: 515-528.
- Roden, G.I. (1961). On the wind driven circulation in the Gulf of Tehuantepec and its effect upon surface temperatures. *Geofisica Internacional*, 1: 55-72.
- Santamaría-del Ángel, E.M., 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: 7411-7421.
- Santamaría-del Ángel, E.M., Álvarez-Borrego, S. and Müller-Karger, F.E. (1994b). The 1982-1984 El Niño in the Gulf of California as seen in coastal zone color scanner imagery. *J. Geophys. Res.*, 99: 7423-7431.
- Strub, P.T., James, C., Thomas, A.C. and Abbott, M.R. (1990). Seasonal and non-seasonal plankton concentrations, hydrography, and satellite-measured sea surface temperature. *J. Geophys. Res.*, 95: 11501-11530.

- Trasviña, A. (1991). Offshore wind forcing in a coastal ocean: observations and modelling of the Gulf of Tehuantepec, Mexico. Ph.D. thesis, University of North Wales, Bangor, UK, 91 pp.
- Vinogradov, M.E. (1981). Ecosystems of equatorial upwellings. In: A.R. Longhurst (ed.), *Analysis of Marine Ecosystems*. Academic Press, New York, 741 pp.
- Zuria-Jordan, I., Álvarez-Borrego, S., Santamaría-del Ángel, E.M. and Müller-Karger, F.E. (1995). Estimación de biomasa fitoplanctónica, derivada de datos de satélite, frente a Baja California Sur. *Ciencias Marinas*, 21(3): 265-280.