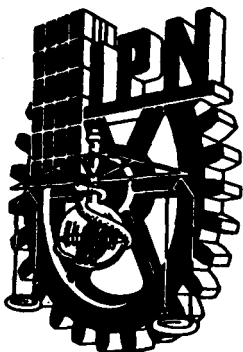


**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE**  
**CIENCIAS MARINAS**  
**BIBLIOTECA**  
**I.P. N.**  
**DONATIVO**



**Instituto Politécnico Nacional**

**Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas**



**SECRETARIA**  
**DE**  
**EDUCACION PUBLICA**

**Variación espacio-temporal de pigmentos fotosintéticos en el  
Golfo de Tehuantepec derivados de datos de satélite (CZCS)**

**Tesis que para obtener el grado de  
Maestro en Ciencias  
con especialidad en Ciencias Marinas  
presenta:**

**Salvador Emilio Lluch Cota**

## **Indice**

|                                            |    |
|--------------------------------------------|----|
| Glosario                                   | 1  |
| Listado de Figuras                         | 3  |
| Listado de Tablas                          | 4  |
| Resumen                                    | 5  |
| <b>Abstract</b>                            | 7  |
| Introducción                               | 9  |
| <b>Area de estudio</b>                     | 10 |
| Justificación                              | 17 |
| Objetivo                                   | 17 |
| Metodología                                | 19 |
| Trabajo con puntos geográficos de muestreo | 21 |
| Trabajo con intervalos de concentración    | 22 |
| Series ambientales                         | 23 |
| Resultados                                 | 25 |
| Puntos de muestreo                         | 25 |
| Intervalos de concentración                | 26 |
| Variables ambientales                      | 29 |
| Análisis                                   | 34 |
| Conclusiones                               | 40 |
| Recomendaciones                            | 41 |
| Sugerencias para trabajos futuros          | 41 |
| Bibliografía                               | 43 |
| Anexos                                     |    |

## Glosario

**Advección:** Transporte de agua (o aire, en el caso de la atmósfera) de una parte del océano a otra.

**Análisis por conglomerado:** Concepto que engloba diferentes algoritmos que tienen la función de clasificar, formar taxones. Cuando se utiliza un número fijo de conglomerados ( $k$ ), la técnica organiza los diferentes grupos de datos en  $k$  conglomerados con los criterios de minimizar las diferencias entre los componentes de cada conglomerado y maximizarla entre conglomerados.

**CDOM:** "Colored Dissolved Organic Matter"; materia orgánica disuelta que presenta una cierta absorción de luz, principalmente en las longitudes de onda corta del espectro visible. Su concentración determina en cierto grado las propiedades ópticas de la masa de agua. Se presenta en mayor medida en las regiones costeras y disminuye hacia el océano.

**CIAT:** Comisión Interamericana del Atún Tropical; Establecida desde 1950 por Estados Unidos de América y Costa Rica con el propósito de generar e interpretar información enfocada a la optimización de los niveles de captura de las especies objeto de las flotas atuneras. México se adhirió a la CIAT en 1964.

**Circulación de Hadley:** Movimiento del viento superficial de los centros de alta presión hacia zonas de convergencia, en una circulación meridional alterada por la fuerza de Coriolis y por la distribución continental.

**Circulación de Walker:** Celda de circulación del viento en sentido oeste-este en la parte superior de la atmósfera (45km), y como vientos alisios de este a oeste a lo largo del ecuador, provocado por las diferencias de presión entre ambos extremos del Pacífico ecuatorial.

**CZCS:** "Coastal Zone Color Scanner"; sensor remoto ubicado a bordo del satélite *Nimbus 7* de la NASA. Operó de noviembre de 1978 a junio de 1986, diseñado específicamente para medir concentración de pigmentos fotosintéticos mediante relaciones entre 4 diferentes canales.

***El Niño:*** Variación interanual oceánica que se sucede cuando se presenta cierto comportamiento anómalo del sistema que regula el clima del Pacífico tropical. El evento completo (componente oceánico y atmosférico) se denomina El Niño y la Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés).

***Fotel:*** Elemento de fotografía. Se refiere, en el caso de las imágenes de satélite, a la unidad mínima de información, es decir a la resolución de la imagen (en inglés "pixel").

***Perturbaciones Tropicales:*** Eventos de inestabilidad atmosférica como tormentas y huracanes originados en el trópico, como resultado de la interacción océano-atmósfera.

***Pacífico Tropical Mexicano:*** Zona del Pacífico Tropical Oriental frente a las costas de México e incluye, en el presente escrito, desde los 18°N hasta tan al sur como 8°N, frente a las costas de Nicaragua.

***Regionalización dinámica;*** Consiste en reconocer aquellas zonas en que se presentan los eventos oceanográficos más notorios dentro del área de estudio en cualquier época del año.

***Suavizado cúbico de curvas:*** Técnica de análisis de series de tiempo que tiene por objeto disminuir la señal de alta frecuencia de la serie y resaltar las bajas frecuencias, mediante el ajuste de funciones de senos y cosenos.

***Zona de Convergencia Intertropical:*** Banda atmosférica convectiva relacionada con las máximas temperaturas oceánicas en el ecuador climático. Presenta una constante elevación de aire húmedo y cálido y determina la época de lluvias en gran parte del círculo tropical.

## **Listado de Figuras**

**Figura 1. Panel superior izquierdo: Características atmosféricas y ocenográficas del Pacífico Tropical Oriental. Panel superior derecho: Área de estudio (Pacífico Tropical Mexicano). Páneles inferiores: Variación estacional de la distribución de celdas de presión y corrientes superficiales en el Pacífico Tropical Oriental.**

**Figura 2. Número de Perturbaciones Tropicales en el Pacífico oriental entre el continente y los 119°W y los 5 a 21 °N. Periodo 1921-1988.**

**Figura 3. Modelo esquemático del mecanismo de surgencias en el Golfo de Tehuantepec durante un evento de viento norte.**

**Figura 4. Red de puntos muestreados, comportamientos tipo calculados y regionalización de los puntos en función de su agrupamiento en conglomerados.**

**Figura 5. Distribución de los siete intervalos de concentración pigmentaria utilizados en el análisis, en la zona de estudio durante el año tipo.**

**Figura 6. Patrones por intervalo (7) de la cobertura relativa para cada una de las zonas consideradas.**

**Figura 7. Series por zona de la cobertura relativa de los siete intervalos de concentración pigmentaria.**

**Figura 8. Patrones y series de anomalías en base al periodo 1979-1990 de temperatura superficial del mar, para las seis zonas consideradas.**

**Figura 9. Patrones y series de anomalías en base al periodo 1979-1990 de temperatura del aire, para las seis zonas consideradas.**

**Figura 10. Patrones y series de anomalías en base al periodo 1979-1990 de presión atmosférica a nivel del mar, para las seis zonas consideradas.**

**Figura 11. Patrones y series de anomalías en base al periodo 1979-1990 de los componentes del viento, para las seis zonas consideradas.**

**Figura 12.** Patrones de precipitación estimada en base al periodo 1986-I 990, para las seis zonas consideradas.

**Figura 13.** Temperaturas y diferencias de temperaturas a varios niveles de profundidad en el Golfo de Tehuantepec y la zona sureste del área de estudio.

**Figura 14.** Patrones de diferentes variables ambientales y la cobertura relativa del intervalo 0.3-I .O mgChl $m^{-3}$  en dos zonas dentro del área de estudio.

**Figura 15.** Diagramas de dispersión y rectas de regresión entre diferentes parámetros ambientales y la cobertura relativa del intervalo 0.3-I .O mgChl $m^{-3}$  en la zona del Golfo de Tehuantepec.

**Figura 16.** Diagramas de dispersión y rectas de regresión entre diferentes parámetros ambientales y la cobertura relativa del intervalo 0.3-I .O mgChl $m^{-3}$  en la zona sureste.

## Listado de Tablas

**Tabla 1.** Intervalos de concentración pigmentaria considerados en el análisis, correspondencia de falso color, concentración pigmentaria calculada mediante el algoritmo de Gordon *et al.* (1991), tipo de agua y código de color asignado en las ilustraciones.

**Tabla 2.** Resultados del análisis de conglomerados de los patrones calculados en los 68 puntos de muestreo. Componentes de cada grupo y características básicas del comportamiento.

**Tabla 3.** Patrones anuales de algunos parámetros ambientales en las seis zonas consideradas dentro del área de estudio.

**Tabla 4.** Parámetros de regresión e índice de correlación entre los patrones de cobertura relativa del intervalo de 0.3-I .O mgChl $m^{-3}$  y algunas variables ambientales, para el Golfo de Tehuantepec y la zona sureste del área de estudio.

## Resumen

La presencia de recursos pesqueros de importancia en el Pacífico Tropical Mexicano (principalmente atún aleta amarilla, barrilete y camarón) obligan a invertir esfuerzos para comprender la dinámica ecológica y determinar el tipo de factores que actúan como limitantes de la presencia de estos recursos, por lo que es necesario conocer tanto las características físicas (atmosféricas y oceanográficas), como las biológicas. Entre las segundas destaca, por su importancia como base de la estructura trófica, el estudio de las poblaciones fitoplanctónicas;

La información generada por el "Coastal Zone Color Scanner-*Nimbus 7*" representa la única base de datos disponible para analizar la distribución de las concentraciones de pigmentos fotosintéticos en grandes áreas del océano, y su variación intra e interanual. Las técnicas de análisis de la información generada por satélites ha sufrido una evolución rápida a consecuencia del incremento constante de exigencias de información.

Con el fin de describir la variabilidad temporal en la distribución y niveles de concentración de pigmentos fotosintéticos, en el presente trabajo se muestran dos tratamientos diferentes para las composiciones mensuales de concentración pigmentaria derivada de datos de satélite del CZCS. El primero permite regionalizar la zona de estudio con base en comportamientos anuales "tipo". El segundo permite generar patrones anuales y series de tiempo donde, se maneja como variable la cobertura espacial de siete intervalos de concentración pigmentaria definidos con base en criterios biológicos. Estos patrones de cobertura espacial se contrastan con datos de variables climáticas y oceanográficas (temperatura del aire, temperatura superficial del mar, presión atmosférica a nivel del mar, componentes del viento, precipitación pluvial estimada, perfiles de temperatura, incidencia y frecuencia de perturbaciones tropicales y velocidades máximas de viento local).

Según los análisis realizados, el área de estudio mantiene aproximadamente constante a lo largo del año la proporción en cobertura de los diferentes tipos de agua, aunque se presentan distribuidos dentro del área de manera diferente en función de la época. En base a esta distribución, la zona de estudio está claramente regionalizada en cuatro zonas: a) La zona costera, con niveles de concentración siempre altos; b) La zona oceánica donde se mantienen niveles bajos; c) La zona del Golfo de Tehuantepec, sometida al efecto de los vientos invernales; y d) La zona sureste, bajo la influencia veraniega de aguas

productivas de la Corriente Costera de Costa Rica e invernada del bombeo de nutrientes a la superficie en el Golfo de Papagayo.

Interanualmente, la variación más notoria se presenta durante 1983 como una fuerte disminución en la concentración pigmentaria. Se contrasta este evento con la modificación evaluada y documentada de las características físicas del ambiente (profundidad de la termoclina, vientos, temperatura, etc.) durante el evento El Niño 1982-1983. Otro evento interanual que se resalta es un aumento en la cobertura de los intervalos altos de concentración pigmentaria en la zona sureste del área de estudio desde finales de 1984 y hasta principios de 1986; atribuido, según los análisis de variables oceanográficas y climatológicas, a una menor profundidad de la termoclina en esta zona del Pacífico Tropical Oriental durante dicho periodo.

## Abstract

The economic importance of some fishery resources in the Tropical Pacific Ocean off Mexico (Yellowfin Tuna, Skipjack, Shrimp, etc.) implies the investment of scientific efforts in order to know and understand the effect of the physical environment over the presence and abundance of these resources. To attain objective, it's necessary to study not only the physical components of the system (oceanic and atmospheric), but the biological part. Because the phytoplankton populations represent the base of the trophic structure, its knowledge is relevant.

The information generated by the Coastal Zone Color Scanner-*Nimbus* 7 represents a unique data base to analyze the pigment concentration distribution over large ocean areas and its time variations. Because of the constant increment of necessities in this field, there has been a very fast and prolific development of analyzing techniques.

In order to describe the temporal variability of the magnitude and distribution of pigment concentration, in the present study two different satellite derived pigment concentration data treatments were used: one allows to recognize different regions over the total area, based on the annual pattern. The second generates annual patterns and time series using as a variable the space coverage of pigment concentration ranges that represents "kinds of water" in terms of its phytoplankton contents. These data are compared with the behavior of some physical variables (sea surface temperature, air temperature, sea level pressure, wind components, estimated rain levels, incidence and frequency of tropical perturbations and maximum local wind velocities).

Based on the results, despite the variations in the distribution and source of the different types of water, the Tropical Pacific Ocean off Mexico has a near-constant proportion of pigment ranges over the complete year. Based on the distribution, the area can be divided into four different regions: a) the coastal zone, with high year-constant level of pigment concentration, b) the oceanic zone, presenting low level concentration, c) The Gulf of Tehuantepec, under the effects of the southward winter winds and d) The Southeast region, under the influence of the rich summer waters carried by the Costa Rica Counter Current and the winter presence of upwelling near the Gulf of Papagayo.

In the inter-annual scale, the strongest variation is detected as a low productivity level period during 1983. This event is compared with the

## Introducción

Los trabajos de investigación oceanográfica de las diferentes regiones del océano mundial no han contado con la información de un monitoreo sistemático, contínuo e integral de las propiedades físicas, químicas y biológicas (Alvarez-Borrego, 1994). Entre estas últimas son de especial interés las poblaciones fitoplanctónicas debido a su importancia dentro de una comunidad como determinante de la estructura y magnitud de la misma.

Debido la naturaleza puntual del trabajo *in situ*, una de las principales fuentes de error es el submuestreo en tiempo y espacio a causa, principalmente, de la forma de distribución de las poblaciones, a la velocidad potencial de crecimiento poblacional y a los fuertes gradientes espaciales que se pueden generar en función de las características físicas del medio.

El uso de los satélites como herramienta oceanográfica ha permitido ampliar el alcance espacial de los estudios, abarcando repetidamente grandes zonas del océano (Alvarez-Borrego, 1994), así como la posibilidad de obtener información a intervalos temporales relativamente cortos.

Las investigaciones realizadas hasta el momento en el Pacífico Tropical Oriental han estado enfocadas básicamente a las características físicas del medio o al análisis de poblaciones biológicas particulares. Existen algunas evaluaciones de concentración fitoplanctónica en algunas áreas restringidas dentro de éste o estudios temporalmente muy limitados que, si bien han permitido caracterizar algunos aspectos, no han proporcionado una visión general de los diferentes eventos oceánicos analizados desde el punto de vista de concentraciones pigmentarias (*e.g.* Owen y Zeitzschel, 1970; Trasviña, 1991; Robles-Jarero y Lara-Lara, 1993).

El presente trabajo pretende proporcionar elementos de estudio para alcanzar esta visión general, analizando la variabilidad espacial y temporal de la concentración de pigmentos fotosintéticos de la porción del Pacífico Tropical Oriental localizada entre los 8 y 18°N y entre los 105 °W y el borde continental oriental de la cuenca del Pacífico.

## Area de Estudio

La porción norte del Pacífico Tropical Oriental (Figura 1) se encuentra bajo la influencia, principalmente, de los centros de alta presión localizados en los márgenes orientales de los grandes giros en el hemisferio norte y su relación con la Zona de Convergencia Intertropical. Los vientos responden a esta configuración atmosférica tendiendo a circular bajo dos componentes principales descritos por las circulaciones de Hadley y de Walker (Phillander, 1990). Las variaciones estacionales en posición y magnitud de las celdas de alta presión de los márgenes continentales, provocan que exista en la zona de estudio una mayor influencia del centro de alta presión del Pacífico Norte durante finales de invierno y principios de primavera (febrero a abril), mientras que la celda de alta presión del Atlántico Norte tiene sus mayores efectos durante los meses de invierno.

Por su parte la Zona de Convergencia Intertropical, localizada ligeramente al norte del ecuador, se caracteriza por mantener bajas presiones y alta nubosidad debido a la elevación constante de aire húmedo cálido. Estacionalmente la Zona de Convergencia Intertropical se desplaza de junto al ecuador en marzo y abril (primavera) hasta cerca de los 12°N en agosto y septiembre (final del verano y principios del otoño). En el Pacífico Tropical Oriental, las variaciones que presenta la Zona de Convergencia Intertropical determinan de manera principal los regímenes de lluvia. Ligeras modificaciones en su posición se ven fuertemente reflejadas en la distribución de los patrones de lluvia, a consecuencia de la poca cobertura latitudinal de la banda. En las zonas localizadas entre los 10 y los 15°N el máximo de lluvias se localiza en agosto y septiembre, debido a la presencia de esta banda convectiva (Trasviña, 1991).

Por otro lado, cabe mencionar la importancia de la parte norte del Pacífico Tropical Oriental como la zona con mayor densidad de formación de perturbaciones tropicales en el mundo, a pesar de que la temperatura superficial del océano en esta región no es mayor que en el Pacífico tropical occidental o el Atlántico (Gray, 1979). Dentro del área de estudio, la principal zona de formación de estos eventos se encuentra entre los 11 y los 15°N y entre los 95 y 109 °W, con casi el 50% del total (Figura 2). Reyes y Mejía-Trejo (1991), analizando el período 1966-1988, mencionan que la presencia de las perturbaciones tropicales se puede detectar entre los meses de mayo a noviembre con el máximo de incidencia en agosto. Además de la variabilidad estacional del número de perturbaciones, existe un cambio mensual en la zona

de formación, de manera que a pesar de que agosto es el mes con el mayor número, resalta septiembre por presentarlas más cercanas a las costas mexicanas (Reyes y Mejía-Trejo, 1991).

Oceanográficamente la parte más norteña del Pacífico Tropical Oriental presenta una configuración vertical de componentes donde es detectable el Agua Antártica Intermedia con un mínimo de salinidad y Agua del Pacífico Ecuatorial identificable por un máximo de 34.8ppm a 12.5°C y una leve tendencia hacia mayor salinidad con el aumento de la temperatura hacia la superficie (Trasviña, 1991).

Las dos principales contribuciones de agua superficial al Pacífico Tropical Oriental son el agua tropical superficial de altas temperaturas y baja salinidad y el agua superficial de la Corriente de California (Figura 1), que se caracteriza por ser fría y de bajas salinidades debido a su origen en altas latitudes. La primera masa de agua debe sus características de salinidad al exceso de precipitación sobre la evaporación. Estas aguas presentan muy baja variación en la temperatura, pero un importante componente de variación estacional en cuanto a la salinidad y a la cobertura espacial. La otra masa de agua superficial, la de la Corriente de California, presenta un aumento en las temperaturas y salinidades de norte a sur. Normalmente esta masa de agua es desviada hacia el oeste antes de los 20°N, sin embargo se llega a presentar, en condiciones invernales extremas, tan al sur como el Golfo de Tehuantepec (Wyrtki, 1967).

Durante el otoño y el principio del invierno, la Contra Corriente Ecuatorial es muy intensa y presenta un flujo que alcanza la costa este del Pacífico, sitio donde se une a la Corriente Costera de Costa Rica para dar un giro y alimentar a la Corriente Norecuatorial (CNEC) entre los 10 y los 20°N. La rama más pronunciada de la circulación frente a Centroamérica es la Corriente Costera de Costa Rica, situada entre el Domo de Costa Rica y la costa.

El resto del invierno y casi toda la primavera, la Corriente de California se intensifica y se conforma como el principal aporte a la Corriente Norecuatorial. La Contra Corriente Ecuatorial se encuentra sumamente debilitada y no alcanza las costas de América; la Corriente Costera de Costa Rica desaparece. En este período las características oceanográficas del Pacífico Tropical Mexicano están determinadas por los eventos locales de viento, calentamiento solar y lluvia (Trasviña, 1991) y las únicas corrientes detectables son de este origen. En los meses de enero a marzo, principalmente, se identifica una fuerte salida de agua

del Golfo de Tehuantepec hacia el sur que se incorpora a la Corriente Norecuatorial.

Durante el verano, nuevamente se forman la Contra Corriente Ecuatorial y la Corriente Costera de Costa Rica para volver a ser el aporte principal de características a esta parte del océano. La Corriente de California se encuentra aún fuerte pero no penetra en el Pacífico Tropical Mexicano. Esta parte del año la Corriente Norecuatorial se nutre con ambas fuentes de agua, por lo que es la época en que se presenta más intensa (Trasviña, 1991). En junio y julio la Corriente Costera de Costa Rica alcanza, a lo largo de la costa, la latitud de Cabo Corrientes. En agosto el eje de la corriente cambia separándose de la costa después de atravesar el Golfo de Tehuantepec, situación que prevalece hasta diciembre. De enero a marzo la corriente se mueve directamente al oeste, entre los 9 y los 12°N, sin penetrar en el Golfo; nuevamente a partir de abril y mayo se presentan incursiones (Wyrski, 1967).

El Pacífico ecuatorial oriental se caracteriza como la parte más rica de la cuenca del Pacífico en concentración de nutrientes, producción primaria y actividad biológica en general (Chávez y Barber, 1987). Aunado a esta característica, existe un gradiente con aumento de esta riqueza biológica del occidente hacia el oriente en la cuenca del océano Pacífico, lo que le confiere al Pacífico Tropical Oriental uno de los niveles más altos en el mundo (Barber y Chávez, 1991). Esta característica del Pacífico Tropical Oriental es debida, entre otros efectos, a que la termoclina es sumamente superficial a comparación del resto del Pacífico tropical (Vinogradov, 1981) y a los diversos eventos que provocan surgencias y mezcla vertical (Picaud, 1985). Entre las principales zonas que presentan eventos de este tipo cabe destacar los Golfos de Tehuantepec, Papagallo y Panamá (Legeckis, 1988; Clarck, 1988), así como la región del Domo de Costa Rica.

Las características de producción primaria de una zona, así como el efecto de algunas variables físicas como la temperatura, determinan en gran medida la presencia de poblaciones de consumidores entre las que destacan por su importancia económica las de recursos pesqueros masivos. En la zona de estudio, los principales recursos pesqueros están constituidos por cuatro especies de camarón (*Penaeus spp*; Sáenz Martínez, 1981) el barrilete (*Katsuwonus pelamis*) y el atún aleta amarilla (*Thunnus albacares*) (Blackburn, 1963). Este último resulta de especial importancia debido a la presencia de una subpoblación residente, objeto de la flota atunera mexicana desde finales de la década de los 30's (Muhlia, 1987), y de manera más importante a partir del

ingreso de México a la Comisión Interamericana del Atún Tropical (CIAT) en 1964 (Ortega García, 1987). La importancia de esta pesquería para México llegó a su máximo en 1981, cuando se alcanzó una captura de 68,356 toneladas. Al año siguiente el esfuerzo de pesca, y por lo tanto los niveles de captura bajaron notablemente a consecuencia del embargo atunero impuesto por los Estados Unidos de América. Para 1983 se estimó una baja eficiencia de la flota atunera operante (entre 45 y 46%), lo que se atribuye al efecto del fenómeno de “El Niño” de 1982-1983 sobre la disponibilidad del recurso (Ortega García, 1989).

De los trabajos sobre la biología reproductiva del atún aleta amarilla en el Pacífico Oriental, se ha inferido que la principal área de desove en el Pacífico mexicano es la que se encuentra entre las Islas Marías y el norte del Golfo de Tehuantepec (Gonzalez y Ramírez, 1989). Al igual que en otras zonas reproductivas de esta especie, existen dos períodos reproductivos; uno en los meses de enero-febrero y el otro en octubre-diciembre (Castro-Ortíz y Quiñonez-Velázquez, 1987).

El Golfo de Tehuantepec es una de las tres zonas centroamericanas del Pacífico Tropical Oriental con altos niveles de productividad primaria debido a condiciones orográficas que permiten la acción pronunciada de vientos invernales intensos que repercuten en importantes procesos físicos como surgencias y mezcla vertical (Roden, 1961; Stumpf, 1975; Trasviña, 1991), gracias a que la capa de mezcla es delgada (Clarck, 1988) y la termoclina es sumamente superficial (Picaud, 1985). Estos procesos provocan, generalmente, un enriquecimiento biológico (Holmes et al., 1957) que mantiene poblaciones objeto de importantes pesquerías (Blackburn, 1962; Ritter y Guzmán, 1984).

Estos vientos actúan desde octubre hasta abril, aunque son más frecuentes y fuertes en el período noviembre a febrero (Roden, 1961; McCreary et al., 1989). Aparentemente, la respuesta del océano es de tipo ageostrófica. El agua es empujada de manera normal a la costa, lo que representa un proceso de surgencia completamente diferente al producido por viento costero paralelo a la costa (Legeckis, 1988).

El movimiento y los cambios de magnitud del centro de alta presión de Bermuda-Azores en el Atlántico Norte, provoca que los vientos alisios asociados se intensifiquen en la parte costera sur del Golfo de México (García y Trejo, 1990). Estos vientos, por ser superficiales y no poder elevarse ante una cordillera, sufren un efecto de embalse orográfico (Mosíño Alemán, 1966), es decir que son encausados por una discontinuidad física en la cordillera de la

Sierra Madre, conocida como Istmo de Tehuantepec. En su parte más estrecha este Istmo tiene una longitud de 220 km y una interrupción de aproximadamente 40 km (paso Chivela) con una elevación máxima de 250 m (Roden, 1961). Debido a las dimensiones de este corredor, se da un aumento importante en la velocidad del viento (Mosiño Alemán, 1966).

El fenómeno descrito, aunado al incremento de la velocidad del viento al pasar de una zona fría a una cálida (Roden, 1961), provoca velocidades violentas de salida de entre 10 y 20ms<sup>-1</sup> y que llegan hasta 30ms<sup>-1</sup> en casos extremos (Lavín et al., 1992). Este chorro de viento tiene influencia marcada en el Golfo de Tehuantepec y su efecto es notorio hasta varios cientos de kilómetros mar adentro (Stumpf y Legeckis, 1977; Trasviña, 1991; Lavín et al., 1992).

Entre los principales efectos de estos vientos cabe mencionar una disminución del nivel del mar de hasta 30 cm en la cabecera (Enfield y Allen, 1983), la formación de diversos giros oceánicos asociados a cambios de temperatura superficial (Stumpf, 1975), una fuerte mezcla vertical en el eje del viento y cambios en la configuración de las termoclinas (Trasviña, 1991).

Según el modelo esquemático expuesto por Lavín et al. (1992), el viento provoca un transporte de Ekman hacia la derecha de la dirección del viento que causa una modificación en la profundidad de las termoclinas, hacia el aumento en el lado oeste y a disminuir en el lado este. Cuando se han hecho más superficiales las termoclinas se llegan a romper, provocando surgencias y mezcla vertical y por lo tanto conformándose como una bomba de aguas ricas en nutrientes hacia las capas más iluminadas de la columna de agua (Figura 3).

## Antecedentes

Por su importancia en las características biológicas, así como por su dependencia de las oceanográficas, el estudio de las poblaciones fitoplanctónicas es uno de los aspectos más relevantes dentro del conocimiento de una zona.

Estos estudios han sido abordados de manera tradicional mediante mediciones *in situ* de parámetros que pueden relacionarse con la productividad primaria, tales como la producción de oxígeno por volumen de agua, la asimilación de  $^{14}\text{C}$ , la biomasa total de células fitoplanctónicas, la medición de pigmentos fotosintéticos de muestras de agua, etc. Sin embargo, se reconoce que los muestreos de este tipo presentan serias limitantes además de un alto costo cuando se trata de abarcar grandes zonas del océano. Una de las principales fuentes de error es el submuestreo en tiempo y espacio, especialmente en las zona de alta producción (costas y zonas de surgencia) ya que la dinámica del fitoplancton muestra que puede duplicar su cantidad en menos de un día, y que tiene variaciones de concentración de varios órdenes de magnitud en unos cuantos kilómetros. Otra limitante fuerte de estos métodos es que el fitoplancton no se distribuye homogéneamente en el océano, sino a manera de “parches” o zonas de conglomeración (Peláez y McGowan, 1986).

Como una respuesta a las necesidades de investigación oceanográfica, desde hace varios años se han desarrollado técnicas de percepción remota que son consideradas como uno de los principales avances en las ciencias acuáticas, ya que permiten obtener datos del medio de manera sincrónica y con amplia cobertura geográfica (Kirk, 1983). Uno de los principales productos de esta implementación de metodologías se basa en que las características ópticas del agua están íntimamente relacionadas con la concentración de pigmentos fotosintéticos (Yentsch y Phinney, 1982).

El “Coastal Zone Color Scanner” (CZCS) fue puesto en funcionamiento a bordo del satélite *Nimbus-7* de la “National Aeronautics and Space Administration” (NASA) en los últimos días de octubre de 1978 (Hovis *et al.*, 1980) y se mantuvo en operación hasta junio de 1986. Debido a que la información generada por el CZCS representa una serie de tiempo única, permanecerá por varios años en el futuro como la fuente principal para el estudio de la distribución oceánica de los pigmentos fotosintéticos y su variabilidad interanual (Banse y English, 1994).

Las imágenes resultantes de este sensor han sido objeto de diversos trabajos con la finalidad de corregirlas y validarlas (Gordon *et al.*, 1980; Yentsch y Phinney, 1982; Smith y Baker, 1982; Gordon *et al.*, 1983a, 1983b; Gordon *et al.*, 1988; Balch, 1988; André y Morel, 1991; Müller-Karger *et al.*, 1991; Fargion *et al.*, 1993).

Por su reciente implementación, el trabajo con información de concentración pigmentaria generada por satélites está sujeto a una constante transformación, innovación y cambios de técnicas de análisis. El objeto de estas técnicas es que la información obtenida por medio de satélite permita, además del estudio de las poblaciones fitoplanctónicas, que es interesante e importante por sí mismo, utilizar esta información como un trazador de eventos oceanográficos, para la optimización de pesquerías y para la planeación de esquemas de muestreo (Alvarez-Borrego, 1994). Entre las técnicas más recurridas se encuentra la descripción de imágenes particulares que muestran algún evento oceanográfico relevante como giros, frentes, lenguas, etc. (v. g. Peláez y McGowan, 1986), la utilización de valores de una o varias imágenes relacionadas en regresiones con otros parámetros (v. g. Abbot y Zion, 1985), promediados de los valores de los foteles contenidos en un área (v. g. Eslinger e Iverson, 1986; Strub *et al.*, 1990; Fargion *et al.*, 1993), transectos y series de tiempo (e.g. Zuria Jordan *et al.*, sometido a Ciencias Marinas), series de tiempo en foteles fijos (e.g. Santamaría del Angel *et al.*, 1994a y b), etc.

Entre los trabajos que se han realizado sobre aguas mexicanas basados en la información satelital, cabe mencionar los del Golfo de México con las primeras imágenes obtenidas (Gordon *et al.*, 1980) y posteriormente integrando todas las imágenes (Müller-Krager *et al.*, 1991) para la parte más norteña de la costa occidental de la Península de Baja California (v.g. Eslinger y Iverson, 1986) y en años más recientes para el Golfo de California (Santamaría del Angel *et al.*, 1995a y b; Zuria Jordan, *et al.*, sometido a Ciencias Marinas).

La zona del Golfo de Tehuantepec no ha sido estudiada mediante imágenes de satélite de concentración pigmentaria. Sin embargo, existen trabajos importantes de oceanografía física (Blackburn, 1962; Strong *et al.*, 1972; Stumpf, 1975; Trasviña, 1991; Lavín *et al.*, 1992) así como estudios sobre niveles de concentración de clorofilas (Owen y Zeitzschel, 1970) y composición fitoplanctónica y sus variaciones (Robles-Jarero y Lara-Lara, 1993) que permiten abordar el estudio del comportamiento espacial y temporal de la concentración de pigmentos.

## Justificación

Para comprender la dinámica ecológica de una zona y determinar el tipo de factores que actúan como limitantes de la presencia de recursos explotables, es necesario conocer tanto las características físicas (atmosféricas y oceanográficas) como las biológicas.

Dentro de las características biológicas la evaluación de las poblaciones fitoplanctónicas presenta especial interés debido a que la estructura de la comunidad y la magnitud de muchas poblaciones de importancia, tanto ecológica como económica, están determinadas por la disponibilidad de alimento primario.

La presencia de recursos pesqueros de importancia en el Pacífico Tropical Mexicano (v.g. el atún aleta amarilla, el barrilete y el camarón) obligan a invertir esfuerzos para su conocimiento. Esta zona del océano ha sido estudiada en los aspectos físicos, pero la información generada con respecto al comportamiento de las poblaciones de productores primarios es aún pobre.

## Objetivo

La presente tesis tiene como objetivo la descripción de las variaciones en la concentración de pigmentos fotosintéticos en la zona del Pacífico Tropical Mexicano ubicada entre los 8 a 18°N y los 85 a 105°W, a partir de imágenes de satélite del color del océano ("Coastal Zone Color Scanner"). Esta descripción abarca tanto el análisis en la escala estacional (meses) como en la escala interanual. Se efectúa paralelamente una regionalización dinámica de la zona de estudio sobre la base de los niveles de concentración pigmentaria. Finalmente se ofrecen algunas alternativas para explicar el tipo de variables ambientales que provocan esta regionalización y su variación en el tiempo.

## Objetivos específicos

- 1.- Implementar una metodología para análisis de imágenes de satélite que permita reconocer patrones y series de tiempo, aprovechando la totalidad de la información contenida en cada imagen. Simultáneamente, el método debe proporcionar una visión de los procesos que ocurren en la zona estudiada a una resolución menor, pero integral y con mayor cobertura; es decir, que permita detectar las señales más relevantes de gran escala.

- 2.- Proponer una regionalización del Pacífico Tropical Mexicano en función de los procesos presentes y los comportamientos detectados, tanto en los datos de concentración pigmentaria del CZCS como de diversas variables físicas.
- 3.- Conocer los intervalos aproximados de concentración pigmentaria dentro de los que fluctúan las diferentes regiones del área de estudio.
- 4.- Identificar el comportamiento estacional de la distribución de pigmentos fotosintéticos para cada región dentro del área de estudio, e identificar aquellas variables ambientales que participan mayormente en dichos comportamientos.
- 5.- Reconocer los niveles de variación interanual de concentración pigmentaria presentes en las diferentes regiones del área de estudio, con especial énfasis en el fenómeno de El Niño 1982-1983 e identificar aquellas series ambientales más relacionadas con dicha variabilidad.

## Metodología

Para el desarrollo del trabajo se partió de datos de imágenes de satélite de concentración pigmentaria (Coastal Zone Color Scanner) para todo el período de operación del sensor (debido a que el satélite *Nimbus-7* fué puesto en órbita en octubre, la primera imagen se obtiene en noviembre de 1978 y se matuvo hasta junio de 1986) y para el área geográfica entre los 8 y los 18°N y los 85 y 105°W. Estos datos se extrajeron del disco óptico del Dr. Frank E. Müller-Karger de la Universidad del Sur de Florida (USF) y fueron procesadas para llegar a composiciones 'mensuales por el Dr. Eduardo Santamaría del Angel de la Facultad de Ciencias Marinas de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC). La elaboración de estas composiciones mensuales implica la utilización de todos los datos existentes para cada período, mediante un promediado en cada fotel (elemento de fotografía) con resolución de aproximadamente 8 km, de manera independiente al resto de los foteles.

Los valores de concentración pigmentaria fueron derivados de los valores de radiancia del CZCS mediante el algoritmo bio-óptico y para corrección atmosférica adoptado por la NASA y desarrollado por Gordon et al. (1983a).

La estimación de la concentración pigmentaria del océano a partir de observaciones por satélite se basa en que las características ópticas de la masa (que es lo que evalúa el sensor remoto) están determinadas por ciertos componentes, entre los que destacan los pigmentos del fitoplancton . (principalmente la clorofila "a", por su concentración), la materia orgánica disuelta con color (CDOM), el detritus y el agua misma.

El primero de los componentes mencionados presenta una curva de absorción con dos máximos en el intervalo visible, el mayor de ellos localizado en los 443 nm y el segundo alrededor de los 660 nm. El segundo de los componentes presenta la mayor absorción hacia los 400 nm y disminuye hacia mayores longitudes de onda, de forma inversa a la absorción propia del agua. El detritus presenta una absorción que también disminuye con la longitud de onda, y que es despreciable a longitudes mayores a 600 nm.

Aquellas aguas donde el fitoplancton y el covariante CDOM determinan las propiedades ópticas se conocen como Caso I ( $< 1.5 \text{ mgChl m}^{-3}$ ), mientras que aquellas donde están determinadas mayormente por el material en suspensión no covariante con el fitoplancton son Caso II ( $> 1.5 \text{ mgChl m}^{-3}$ ). Las aguas oceánicas se encuentran generalmente en Caso I, mientras que las aguas

costeras, sujetas a aporte continental importante y a resuspensión constante de materiales del fondo, se encuentran generalmente en el Caso II (Alvarez-Borrego, 1994).

El algoritmo de Gordon et al. (1983a), desarrollado apartir de un análisis fluorimétrico de 60 muestras extraídas de estaciones en aguas de México y Estados Unidos de América, relaciona mediante una razón las radiancias emergentes del agua, captadas por el sensor, a dos longitudes de onda:

$$\log C_{\text{sat}} = 0.053 - 1.71 \log [Lw_{(443)} \div Lw_{(550)}] + 1$$

Donde  $C_{\text{sat}}$  es el valor de concentración pigmentaria calculado por el satélite y  $Lw$  es el valor de radiancia emergente del agua.

Si el valor de  $C_{\text{sat}}$  rebasa los  $1.5 \text{ mgChl m}^{-3}$  se recalcula utilizando:

$$\log C_{\text{sat}} = 0.522 - 2.44 \log [Lw_{(520)} \div Lw_{(550)}]$$

Una descripción de este algoritmo y su aplicación se presenta en Alvarez-Borrego (1994).

Las bases de datos resultantes son puestas a disposición de los usuarios como valores de color artificial, concentración pigmentaria o radiancia. El primero, más común, es una escala artificial de 0 a 256 que resalta, por su relación exponencial con el valor de concentración pigmentaria, los valores bajos.

Por otro lado se utilizaron datos de variables climáticas y oceanográficas obtenidas de bases existentes en el Departamento de Climatología Aplicada del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C. (CIB-NOR). Las variables temperatura del aire, temperatura superficial del mar, presión atmosférica a nivel del mar y componentes norte-sur y este-oeste del viento se extrajeron del COADS en CD-ROM volumen 5 publicado en agosto de 1994 por el programa "Climate and Eastern Ocean System" (CEOS).

Se incluyen datos de precipitación pluvial estimada mediante registros por satélite de temperaturas de nubes altas, producidos por el programa "Global Precipitation Climatology Project" (GPCP) y contenidos en la base TOGA CD-ROM publicada por el "Physical Oceanography Distributed Active Archive Center" (PODAAC) del "Jet Propulsion Laboratory" (JPL) en mayo de 1994.

Los perfiles de temperatura fueron obtenidos de la base Global Ocean Temperature and Salinity Profiles Vol. 2 Pacific Ocean, CD-ROM NODC-03 publicado por la "National Oceanic and Atmospheric Administration" (NOAA) en 1991.

Se incluye además información publicada sobre incidencia y frecuencia de perturbaciones tropicales en el Pacífico Mexicano (Reyes y Mejía-Trejo, 1991) y velocidades máximas de viento local (Roden, 1961).

Los análisis se efectuaron en las instalaciones del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. (CIB-NOR) mediante el trabajo con equipo y paquetes comerciales de computación facilitados por el Departamento de Climatología Aplicada del mismo centro, así como mediante la aplicación de programas específicos realizados por el Dr. Sergio Hernández Vázquez del Departamento de Climatología Aplicada del CIB-NOR.

#### Trabajo con puntos geográficos de muestreo

Con la finalidad de hacer una prospección de la información y de identificar regiones con comportamientos diferentes dentro del área de estudio, se realizó el muestreo de las 92 composiciones mensuales de concentración pigmentaria (noviembre de 1978 a junio de 1986) mediante una red de 68 foteles, registrando para cada posición el valor de la escala artificial de colores en la imagen y su correspondencia de concentración pigmentaria. Las distancias entre puntos son aproximadamente constantes, salvo la zona del Golfo de Tehuantepec donde se cerró la red y en la parte costera sureste donde se deformó para librar la línea de costa. Las 68 series se procesaron para eliminar datos inválidos (0 y valores de tierra) y se promediaron para construir el patrón anual.

Los patrones anuales de los 68 puntos se sometieron a una autodisgregación y agrupación mediante un análisis de conglomerados (Cluster analysis) forzado a cuatro grupos. Este método organiza los comportamientos en k grupos con la mínima variabilidad dentro del grupo y la máxima posible entre ellos. El promedio de los patrones de cada grupo se tomó como el comportamiento tipo, y se establecieron sus características en cuanto a valores máximos y mínimos dentro del año así como en cuanto a sus magnitudes.

## Trabajo con intervalos de concentración

La segunda fase de estudio implicó la extracción de todos los valores de cada imagen y su agrupamiento en siete intervalos de concentración pigmentaria (Tabla 1); los criterios utilizados para la definición de los intervalos están basados en conceptos y clasificaciones bibliográficas de tipos de agua (Morel y Prieur, 1977; Smith y Baker, 1978; Baker y Smith, 1982) así como por conceptos y asesoría del Dr. Carlos H. Lechuga Devéze del CIB-NOR.

Mediante Programas de computación, se barrió cada matriz de datos substituyendo el valor de concentración pigmentaria por un código de color asignado para el intervalo correspondiente (Tabla 1). Además de las matrices generadas, se realizó una composición por cada mes del año conteniendo el promedio de concentración pigmentaria de todos los años del estudio y posteriormente se transformaron a matrices con código de intervalo. Estas últimas se graficaron con la finalidad de identificar visualmente la presencia y transformación promedio de los diferentes eventos presentes en la zona a lo largo del año.

También utilizando programas computacionales se realizó el cálculo de la cobertura espacial en kilómetros cuadrados de cada intervalo de concentración para cada matriz del período, incluyendo las resultantes de las composiciones mensuales. A partir de este proceso se generaron siete series de tiempo (una por cada intervalo) donde se maneja como variable independiente la cobertura espacial, además del patrón mensual de cobertura por intervalo para el período en estudio.

A partir de las siete series generadas se calculó la cobertura mensual relativa (porcentaje de área ocupada por cada intervalo) para la zona completa de estudio, para la zona del Golfo de Tehuantepec y para la zona sureste del área de estudio, misma que se encuentra bajo la influencia de la Corriente Costera de Costa Rica. El uso de la cobertura relativa responde a la necesidad de normalizar valor entre imágenes; ya que existen algunas en las que se presentan áreas sin información o con información muy dispersa, por lo que el uso de la cobertura calculada proporcionaría información sesgada sobre los niveles de variación de mes a mes.

Además de normalizar los valores de cobertura, fué necesario eliminar algunas de las imágenes por la mencionada falta de datos, el criterio para este paso fué la presencia de menos del 60% de foteles válidos en cada imagen.

## Series ambientales

Se construyeron series de tiempo, patrones anuales y series de anomalías de temperatura superficial del mar, temperatura del aire, presión a nivel del mar y componentes zonal y meridional del viento para seis áreas dentro del Pacífico tropical mexicano. La primera zona correspondiente al área de influencia de la Corriente de California y la menos tropical, ubicada entre 98-105°W y 12-20°N, la segunda zona hacia el sur de la primera y hasta los 8°N. La tercera zona, correspondiente al Golfo de Tehuantepec, abarca entre los 93-98°W y de los 12°N hasta el continente. La cuarta hacia el sur de la tercera hasta los 8°N. La quinta hacia el este del Golfo de Tehuantepec y hasta la costa de Centroamérica y la sexta, la parte más sureste del área en cuestión, entre el continente y los 93°W y entre los 8-12°N (pánel inferior, Figuras 8-1 2).

Las series de anomalías fueron calculadas a partir del período 1970-1990 y con respecto al patrón anual de comportamiento por zona. Posteriormente, fueron sometidas a un suavizado cúbico de curvas con grado de 0.01 (Anónimo, 1990) con la finalidad de identificar eventos interanuales anómalos y eliminar las señales de alta frecuencia.

En el trabajo con vientos se consideran los componentes zonal y meridional donde el primero corresponde en dirección y sentido (signo) al eje X (abscisas) y el segundo al eje Y (ordenadas) del plano cartesiano típico.

Se presentan también los patrones de lluvia estimada contruidos a partir de matrices con resolución geográfica de 2.5° y temporal de 5 días, abarcando el período 1986-1990.

Se construyeron series de tiempo de temperaturas a diferentes profundidades en dos zonas dentro del área de estudio, la correspondiente al Golfo de Tehuantepec y la sureste. A partir de estas series se construyeron series de gradientes verticales de temperatura expresadas como diferencia en grados centígrados por cada 20 metros de profundidad entre los diferentes niveles utilizados, a fin de detectar la posición vertical del máximo cambio de temperatura correspondiente a la posición del núcleo de la termoclina. Ambas series fueron sometidas a suavizado para eliminar las frecuencias altas y observar las señales interanuales con mayor claridad.

## Series ambientales

Se construyeron series de tiempo, patrones anuales y series de anomalías de temperatura superficial del mar, temperatura del aire, presión a nivel del mar y componentes zonal y meridional del viento para seis áreas dentro del Pacífico tropical mexicano. La primera zona correspondiente al área de influencia de la Corriente de California y la menos tropical, ubicada entre 98-105°W y 12-20°N, la segunda zona hacia el sur de la primera y hasta los 8°N. La tercera zona, correspondiente al Golfo de Tehuantepec, abarca entre los 93-98°W y de los 12°N hasta el continente. La cuarta hacia el sur de la tercera hasta los 8°N. La quinta hacia el este del Golfo de Tehuantepec y hasta la costa de Centroamérica y la sexta, la parte más sureste del área en cuestión, entre el continente y los 93°W y entre los 8-12°N (pánel inferior, Figuras 8-1 2).

Las series de anomalías fueron calculadas a partir del período 1970-1990 y con respecto al patrón anual de comportamiento por zona. Posteriormente, fueron sometidas a un suavizado cúbico de curvas con grado de 0.01 (Anónimo, 1990) con la finalidad de identificar eventos interanuales anómalos y eliminar las señales de alta frecuencia.

En el trabajo con vientos se consideran los componentes zonal y meridional donde el primero corresponde en dirección y sentido (signo) al eje X (abscisas) y el segundo al eje Y (ordenadas) del plano cartesiano típico.

Se presentan también los patrones de lluvia estimada contruidos a partir de matrices con resolución geográfica de 2.5° y temporal de 5 días, abarcando el período 1986-1990.

Se construyeron series de tiempo de temperaturas a diferentes profundidades en dos zonas dentro del área de estudio, la correspondiente al Golfo de Tehuantepec y la sureste. A partir de estas series se construyeron series de gradientes verticales de temperatura expresadas como diferencia en grados centígrados por cada 20 metros de profundidad entre los diferentes niveles utilizados, a fin de detectar la posición vertical del máximo cambio de temperatura correspondiente a la posición del núcleo de la termoclina. Ambas series fueron sometidas a suavizado para eliminar las frecuencias altas y observar las señales interanuales con mayor claridad.

Con la finalidad de identificar los factores determinantes de la abundancia de aguas productivas en las diferentes regiones del área de estudio, se contrastaron gráficamente los patrones anuales de cobertura relativa del agua verde con los patrones de aquellas variables que, de manera teórica, pueden influir en estos niveles de concentración pigmentaria.

Se consideró para estos análisis a la temperatura superficial del mar debido a la relación documentada entre esta variable y eventos de surgencia y advección. El resto de las variables consideradas responden a la expectativa de que el mayor aporte de aguas productivas a la zona es resultado del efecto de variables atmosféricas sobre las características oceanográficas. Se analizaron la temperatura del aire, presión a nivel del mar, componentes del viento y velocidad total del viento (resultante de los componentes), precipitación pluvial estimada para las zonas del Golfo de Tehuantepec y la zona sureste, así como los patrones de vientos máximos locales de las estaciones de Salina Cruz, Oax. y Coatzacoalcos, Ver., y el número de perturbaciones tropicales. Se realizó un análisis de correlación estandar entre los patrones de cobertura relativa de aguas del intervalo 0.3-1 .0 mgChl m<sup>-3</sup> y las variables analizadas.

## Resultados

### Puntos de muestreo

La información generada sobre la base del muestreo de una red de 68 foteles por cada imagen permitió aplicar un análisis por conglomerados en cuatro grupos (Tabla 2). El primero de los comportamientos tipo, representado gráficamente como rojo (Figura 4) corresponde a un patrón de verano, con altos niveles de concentración pigmentaria durante los meses de mayo a octubre y con un máximo entre junio y agosto (mínimo de 0.5 y máximo de  $1.7\text{mgChl m}^{-3}$ ). El segundo comportamiento tipo corresponde a un patrón mixto de niveles de concentración bajos y medios (mínimo de 0.25 y máximo de  $0.75\text{mgChl m}^{-3}$ ), este patrón presenta dos épocas con mayores valores dentro del año una ubicada en los meses invernales de enero y diciembre y el otro en verano, centrado en julio. El tercer comportamiento diferenciado es el invernal, con niveles bajos y medios de concentración pigmentaria y con las máximas concentraciones ( $0.6\text{mgChl m}^{-3}$ ) entre los meses de noviembre a febrero y las mínimas ( $0.15\text{mgChl m}^{-3}$ ) entre mayo y julio. El último de los tipos presentes no muestra estacionalidad en su comportamiento y mantiene niveles bajos ( $0.15$  a  $0.25\text{ mgChl m}^{-3}$ ) todo el año.

Los gráficos de los puntos muestreados y el tipo de comportamiento al que pertenecen se presenta en la Figura 4. En este mapa se hace notoria la regionalización de los comportamientos y su coherencia con las características de las zonas.

El tipo uno, representado como rojo en la figura, se distribuye mayormente en la zona sureste del área de estudio, que se encuentra bajo la influencia de la Corriente Costera de Costa Rica y de procesos locales relacionados principalmente con la Zona de Convergencia Intertropical; ambos componentes presentan su mayor influencia en la parte veraniega del año. La influencia de los eventos invernales en el Golfo de Papagayo no es notoria. El segundo tipo (verde en la figura) se presenta de manera difusa entre las diferentes regiones, por lo que representa puntos transicionales entre las zonas bien definidas. El tipo invernal, el tercero (azul), se presenta principalmente en la zona de Golfo de Tehuantepec, especialmente alrededor del eje de los vientos “nortes” característicos del invierno, según ha sido manejado en la literatura (e. g. Roden, 1961; Stumpf y Legeckis, 1977; McCreary *et al.*, 1989; Trasviña, 1991; Lavín *et al.*, 1992). El cuarto tipo (color amarillo en la figura) está presente mayormente en las partes más oceánicas del área de estudio y en las zonas

cercanas a la costa donde no existen procesos importantes de surgencias, mezcla vertical costera, aporte continental, etc., que puedan provocar altos niveles de concentración pigmentaria.

### Intervalos de concentración

Mediante el trabajo con intervalos de concentración y la transformación de las imágenes en matrices numéricas conteniendo por punto el valor respectivo del intervalo, se generó una composición del año tipo (Figura 5), donde se presenta en código de color el intervalo correspondiente a cada fotel para cada uno de los meses de año. En dicha figura se hacen notorios los principales procesos presentes en la zona y el área que los presenta. Uno de los procesos se ubica principalmente en la zona del Golfo de Tehuantepec y consiste en el desarrollo de una lengua de aguas “verdes” ( $0.3 - 1.0 \text{ mgChl m}^{-3}$ ) que intruye en aguas “azules” ( $0.06 - 0.3 \text{ mgChl m}^{-3}$ ) durante la parte otoñal e invernal del año. Dicha lengua es notoria a partir del mes de octubre, donde se presenta bien desarrollada en la parte más interna del golfo y disminuye rápidamente hacia afuera. Durante los meses de noviembre a enero esta lengua alcanza grandes proporciones (desde la cabecera del Golfo hasta cerca de los  $10^{\circ}\text{N}$  y entre cerca de los  $93$  a los  $100^{\circ}\text{W}$ ) para posteriormente debilitarse entre febrero y abril y desaparecer entre mayo y agosto. Esta lengua presenta una formación a lo largo del eje del viento pero muestra una desviación hacia el oeste conforme madura el proceso.

El segundo de los procesos importantes es notorio principalmente en la zona sureste del área de estudio y consiste en la intrusión de aguas ricas en concentración pigmentaria (aguas “verdes”). Este proceso se presenta durante casi todo el año, como un evento similar al anteriormente descrito durante los meses invernales, pero presente de manera muy notoria en primavera y finales del verano. Desafortunadamente las imágenes en esta zona durante los meses de mayo a junio no cuentan con datos o son tan escasos que no permiten construir adecuadamente las gráficas debido a nubosidad abundante.

El tercer proceso relevante en estas gráficas es el del comportamiento de la concentración pigmentaria de las zonas más costeras. Este comportamiento responde a un patrón de verano con aumentos muy importantes (hasta  $> 10 \text{ mgChl m}^{-3}$ ) durante los meses de julio y agosto y con los mínimos valores durante el periodo octubre a marzo, salvo la zona del Golfo de Tehuantepec donde existe un aumento costero a la par que se desarrolla la lengua de agua verde descrita anteriormente.

El análisis de cobertura relativa de cada uno de los siete intervalos de concentración pigmentaria utilizados en el trabajo, de las matrices numéricas que representan el patrón anual, muestra tres resultados diferentes en función de la zona considerada en el análisis (Figura 6).

En el caso del área completa de estudio el intervalo de menor concentración ( $<0.06 \text{ mgChl m}^{-3}$ ) muestra un máximo entre los meses de junio a agosto de hasta un 11.3% y la mínima importancia relativa entre octubre y diciembre.

El intervalo de agua “azul” (entre  $0.06$  y  $0.3 \text{ mgChl m}^{-3}$ ), correspondiente a aguas pobres, presenta su mayor importancia durante la primera mitad del año con un máximo ubicado en mayo de hasta 81% de cobertura. La menor participación de este tipo de agua en el área total de estudio se presenta entre julio y septiembre con únicamente un 65%.

El intervalo entre  $0.3$  y  $1.0 \text{ mgChl m}^{-3}$ , correspondiente al agua “verde” presenta un comportamiento de dominancia invernal, con máximos en noviembre y diciembre de hasta cerca del 24% de participación, mientras que su presencia mínima se ubica en mayo cuando abarca menos del 10% del área.

El resto de los intervalos presentan máximos en verano, entre los meses de julio a septiembre. Estos intervalos corresponden a las aguas costeras que, si bien alcanzan valores de concentración pigmentaria muy altos, no contribuyen nunca con más del 8% del área completa de estudio.

Considerando la importancia relativa de los siete intervalos, dada por la proporción de área que ocupan en la zona, mayo y junio se presentan como los meses más pobres debido a la dominancia del segundo intervalo ( $0.06 - 0.3 \text{ mgChl m}^{-3}$ ) y el período julio-septiembre resulta el de mayor concentración pigmentaria a pesar de la participación del primer intervalo ( $<0.06 \text{ mgChl m}^{-3}$ ).

En el análisis de la zona del Golfo de Tehuantepec, considerada entre los  $93-98^\circ \text{ W}$  y de los  $12^\circ \text{ N}$  hasta la línea de costa, las aguas correspondientes a los intervalos uno y dos (hasta  $0.3 \text{ mgChl m}^{-3}$ ) presentan su mayor importancia relativa en la parte primaveral del año, con la mayor presencia entre abril y mayo y la menor cobertura en los meses de diciembre y enero. La participación de estos intervalos fluctúa entre el 54% y el 90%.

El tercer y cuarto intervalo de concentración pigmentaria (entre  $0.3$  y  $3.0$

$\text{mgChl m}^{-3}$ ) presentan un patrón de predominio invernal, con máximos ubicados en diciembre y los valores mínimos en mayo. Existe dentro de los patrones de estos dos intervalos un pequeño máximo en los meses de julio y agosto sin llegar a romper la configuración invernal del patrón. La proporción que estos intervalos llegan a ocupar dentro de la zona del Golfo se ubica entre 10.5% y 43.5% con valores en julio y agosto de hasta 25.5%.

El resto de los intervalos se comporta de manera similar a la mencionada para el área completa, con los máximos en el mes de julio (hasta 2.5%) y los valores mínimos de participación porcentual entre febrero y marzo (0.35%).

La zona sureste considerada entre el continente y los  $93^{\circ}\text{W}$  y entre el límite sur del área de estudio ( $8^{\circ}\text{N}$ ) y la línea de costa, presenta un comportamiento diferente a las dos mencionadas. La cobertura relativa de los intervalos más pobres presenta su valor máximo durante junio, de cerca de 87% y una importancia menor durante septiembre con únicamente 50%. De manera inversa, el tercer y cuarto intervalo de concentración (entre 0.3 y  $3.0 \text{ mgChl m}^{-3}$ ) presentan su mayor participación durante septiembre con cerca de 49% de cobertura y los menores valores en junio.

El resto de los intervalos en la zona sureste presentan los mínimos valores en los meses de invierno (desde 1.5%) y los máximos durante junio y septiembre (hasta de 6.5%).

Estos patrones presentan en la parte veraniega una configuración posiblemente errónea, debida a la falta de datos por nubosidad; sin embargo, puede reconocerse un comportamiento de máximos valores hacia el verano y los mínimos hacia el invierno en el caso de los intervalos del cuarto en adelante.

La Figura 7 presenta en el primer. pánel las siete series relativas correspondientes a los siete intervalos de manera acumulada, es decir al 100%. El área ocupada por color corresponde al porcentaje de ese intervalo en el área total de estudio a través del tiempo. Las discontinuidades en la gráfica (barras blancas) corresponden a las imágenes eliminadas del proceso por falta de representatividad de foteles (menos del 50%). Cabe resaltar la participación acentuada de los dos primeros intervalos durante 1983 y 1984, con la consecuente disminución en la importancia del resto de los intervalos.

El segundo pánel de la Figura 7 presenta una gráfica similar pero considerando exclusivamente el área del Golfo de Tehuantepec. En esta gráfica

resalta el aumento porcentual anual durante los meses de invierno de los intervalos de aguas ricas (tercero en adelante). De manera similar a la gráfica anterior, existe una disminución en la participación de estos intervalos durante 1983 e incluso 1984.

El tercer pánel corresponde al análisis de la zona sureste del área de estudio. La participación de los intervalos del cuarto en adelante es mayor que para las otras dos regiones, pero la disminución durante 1983 y 1984 es también notoria. Esta zona difiere del área total y del Golfo de Tehuantepec en el comportamiento durante 1985, donde se presenta un aumento importante de concentración pigmentaria con menor variabilidad intra-anual que el resto del período de estudio.

### **Variables ambientales**

De los análisis realizados sobre series ambientales en diferentes regiones dentro del área de estudio, se desprenden patrones y series de anomalías con la finalidad de determinar el comportamiento tipo de cada zona y la presencia de eventos interanuales con posible efecto en los niveles de concentración pigmentaria (Figuras 8-1 2; Tabla 3).

Con respecto a la temperatura superficial del mar (Figura 8), se reconocen tres comportamientos principales. Se presenta en la zona 1 un desfazamiento, con respecto al resto de las zonas, con los máximos valores de agosto a octubre y los menores centrados en el mes de marzo.

Las zonas 2, 4 y 6 presentan los valores máximos durante abril-junio y el resto del año valores relativamente bajos y muy constantes. Dentro de este comportamiento, la zona 6 es la que presenta las diferencias menos marcadas entre los valores extremos dentro del año, además de los menos altos.

El tercer comportamiento se presenta en las zonas 3 (correspondiente al Golfo de Tehuantepec) y 5. Los valores máximos se dan igualmente en mayo, pero la época de altas temperaturas se prolonga hasta octubre, con los valores mínimos en invierno.

La temperatura del aire (Figura 9) se comporta de manera muy similar a la descrita para la temperatura superficial del mar, pero con mayores fluctuaciones entre los meses fríos y cálidos.

Con respecto a la presión atmosférica a nivel del mar (Figura 10) se presenta, en términos generales, el mismo comportamiento en todas las zonas, con altos valores en invierno y bajos en verano salvo julio-agosto que muestran un pequeño aumento; sin embargo, existen diferencias en cuanto a los niveles. Los mayores valores se registran en la zona 1 y los menores en la 6, con valores intermedios en el resto de las zonas.

El patrón de viento (Figura 11) para la zona 1, muestra en el componente zonal valores mayores entre los meses de marzo a mayo y los menores entre julio y agosto (donde además se presenta el único cambio de sentido). El componente meridional presenta igualmente las mayores velocidades en la primavera y las menores durante julio-agosto, igualmente, con el único cambio de sentido. La dirección del viento se ubica entre norte y oeste casi todo el año, a excepción de los meses mencionados del verano donde es tanto el debilitamiento de la velocidad que la dirección se vuelve muy variable.

En la zona 2, los vientos presentan magnitudes y variación intra-anual mayor. Existe en el componente zonal una parte del año con sentido oeste entre noviembre y abril y el sentido opuesto el resto del año. Las máximas velocidades se presentan entre diciembre y febrero, mientras que las mínimas en los meses en que se da el cambio de sentido ( mayo y octubre). El componente meridional presenta un comportamiento similar, con vientos del norte entre noviembre y abril y del sur el resto del año. La dirección resultante del viento se presenta noreste en el primer período mencionado y con la dirección opuesta el resto del año.

En el patrón de viento de la zona 3, el componente zonal se muestra muy débil todo el año y con cambios en sentido durante la primavera, mientras que la componente meridional mantiene un sentido norte-sur todo el año y presenta las mayores velocidades en la parte invernal del ciclo. La dirección resultante del viento es principalmente del norte por la dominancia de la velocidad.

La zona 4 muestra un comportamiento similar al expuesto para la zona 2, aunque se registran valores menores de velocidad, especialmente en el componente zonal.

Las zonas 5 y 6 se presentan muy similares en cuanto a dirección a lo largo del año, con valores menores para la zona 5.

El patrón de lluvia (Figura 12) para las seis zonas es similar, con

diferencias de duración de la época de máxima precipitación y en la magnitud de las épocas de mínima. Se trata de un comportamiento con un sólo máximo centrado entre julio y agosto con valores mínimos en los primeros tres meses del año. Las zonas 3, 4, 5 y 6 presentan niveles casi nulos de precipitación durante el invierno y principio de primavera. La mayor precipitación se registra para la zona 2, 4 y 6 durante junio y julio.

La variabilidad interanual de la zona 1 en cuanto a temperatura superficial del mar y temperatura del aire, es alta con respecto a frecuencia y alternancia de anomalías positivas y negativas, pero es baja en cuanto a la magnitud de estas anomalías. Es notorio, sin embargo, la presencia de anomalías positivas durante 1982 y 1983 y de anomalías negativas durante 1981 y 1985 (Figuras 8 y 9).

Con respecto a la presión atmosférica a nivel del mar es notoria la fuerte anomalía negativa durante 1983, mientras que en viento no se presentan para esta zona anomalías importantes (Figuras 10 y 11).

La variabilidad interanual en la zona 2 es muy similar a la de la zona 1 en cuanto a temperatura superficial del mar y temperatura del aire, mientras que en presión atmosférica a nivel del mar se diferencia en la mayor magnitud de la anomalía negativa durante 1983, presenta 1984 como año transicional y posteriormente 1985 como un año anómalo positivo. La serie de anomalías de viento presenta fuertes desviaciones en 1983 y 1985 en ambos componentes del viento (Figuras 8 a 11).

Las series de anomalías de temperatura superficial del mar y temperatura del aire no muestran, para la zona 3, variaciones interanuales importantes, aunque se reconoce ligeramente la anomalía positiva en 1983. En la serie de presión atmosférica a nivel del mar, en cambio, es muy notoria la anomalía negativa a partir de 1982 y durante todo 1983 con el resto del período muy estable. Las series de vientos no muestran tampoco anomalías relevantes en período trabajado.

En la zona 4, las anomalías de todos los parámetros son fuertes en el período 1982-1983 y bajas el resto del intervalo temporal, salvo el caso del componente zonal del viento que muestra además una anomalía en 1985.

La variabilidad interanual en la zona 5 es similar en los parámetros de temperatura superficial del mar, temperatura del aire y presión atmosférica a

nivel del mar a la zona 3, pero difiere en las series de anomalías de los componentes del viento en que 1983 presenta anomalías mas fuertes y son notorias principalmente para el componente zonal.

Las anomalías de todos los parámetros en la zona 6 son las más importantes del área de estudio, resaltando 1982-1 984.

Considerando exclusivamente las zonas del Golfo de Tehuantepec y la zona sureste del área de estudio, se presenta en la Figura 13 la configuración en el tiempo de la estructura térmica de la columna de agua. En los paneles A y B se muestran las series suavizadas de temperatura a diferentes profundidades para el período 1978-1 987, resalta para ambas zonas el importante aumento de temperatura a todas las profundidades a partir de 1982 y hasta principios de 1984.

Los paneles C y D muestran para ambas zonas el cambio vertical de temperatura por cada 20 metros de profundidad a diferentes niveles de la columna de agua, a través del tiempo y para el mismo intervalo que el caso anterior. En estas gráficas resalta que la profundidad donde en años normales se presenta el máximo gradiente térmico (posición de la termoclina) es de 20 a 40 m, situación que se rompe, en el caso de Golfo de Tehuantepec a partir de mediados de 1982 y durante todo 1983, reestableciendose en 1984. La profundidad a la que se desplaza este gradiente máximo es de 40-60m de mediados de 1982 a principios de 1983 y hasta los 60-80m durante algunos meses de 1983.

En el caso de la zona sureste, la estructura vertical es menos definida, pero igualmente la diferencia máxima de temperatura se presenta a mayor profundidad (hasta los 60-80m) durante el período de 1984. A diferencia de la zona del Golfo de Tehuantepec, la configuración vertical no se normaliza durante 1984, sino que el gradiente máximo se coloca entre los 0 y los 20m durante este año y el siguiente, alcanzando las condiciones originales hasta finales de 1985.

La Figura 14 presenta para la zona del Golfo de Tehuantepec y la zona sureste la comparación entre los patrones de los parámetros ambientales analizados y los patrones de cobertura relativa del intervalo 3 (entre 0.3 y 1 .0 mgChl $m^{-3}$ ) que corresponde, según la figura 5 al tipo de agua presente en los eventos de surgencia y advección de importancia en el área de estudio.

En el caso del Golfo de Tehuantepec, es relevante la correspondencia que existe entre la presencia del agua de alta concentración y los patrones de presión atmosférica a nivel del mar y viento. En el caso del viento, la correspondencia es con la velocidad resultante; en el caso del pico de verano ubicado en julio, la velocidad total es provocada principalmente por el viento zonal, mientras que en la parte de invierno el viento meridional es el componente de mayor relevancia. Para la zona sureste no existe una correspondencia clara, es decir que los parámetros analizados no provocan los niveles de concentración pigmentaria registrados.

Este análisis es más claro en las Figuras 15 y 16 donde se presentan los diagramas de dispersión y las rectas de regresión entre la cobertura relativa del intervalo mencionado de concentración pigmentaria y las diferentes variables consideradas. Según la Figura 15 (zona del Golfo de Tehuantepec), existe una mayor correlación ( $r=0.6747$ ) con respecto a presión atmosférica (pánelB) y viento (-0.5879 para componente zonal, -0.6254 para el componente meridional, 0.6864 para la velocidad total del viento y 0.7299 para vientos locales en Coatzacoalcos; páneles C y E) que para el resto de las variables. En el caso de la zona sureste (Figura 16), existe poca correlación (máxima de -0.2475) con cualquiera de los parámetros. Los parámetros de regresión se presentan en la Tabla 4.

## **Análisis**

El área de estudio mantiene aproximadamente constante a lo largo del año la proporción en cobertura de los diferentes tipos de agua, aunque se presentan distribuidos dentro del área de manera diferente en función de la época. En base a esta distribución, está claramente regionalizada en cuatro zonas:

a) La zona costera, donde los niveles de concentración varían pero son siempre altos gracias al hecho de que los nutrientes se encuentren en la zona fótica. El comportamiento de esta zona es principalmente alto en verano, ya que es en esta época que se presentan lo máximos niveles de precipitación y escurrimiento continental rico en nutrientes. Se ha reconocido la relación entre esta zona y las actividades de reproducción y crianza de especies de camarón (Pérez-Farfante, 1967; Barreiro y Lopez, 1969). Sáenz Martínez (1981) demostró que para tres especies comercialmente importantes (camarón azul, blanco y café) el máximo rendimiento por hora de arrastre por barcos camaroneros en las costas del Golfo de Tehuantepec se presenta en agosto.

b) La zona oceánica donde se mantienen niveles bajos de concentración pigmentaria independientemente de los eventos físicos que se presenten.

c) La zona del Golfo de Tehuantepec, sometida al efecto de los vientos invernales causantes de surgencias y/o mezcla vertical importante y que presenta una lengua de agua “verdes” hasta muy afuera del Golfo. Esta zona se encuentra dentro del área principal de desove de atún aleta amarilla (Gonzalez y Ramírez, 1989), con la principal de las dos épocas anuales en enero-abril (Compeán, 1988).

d) La zona sureste, bajo la influencia veraniega de aguas productivas de la Corriente Costera de Costa Rica e invernal del bombeo de nutrientes a la superficie en el Golfo de Papagayo.

En la zona del Golfo de Tehuantepec es evidente el papel que juegan los parámetros de viento, los vientos máximos locales en Veracruz y Oaxaca (reflejo de los nortes) y la presión atmosférica en la configuración del patrón de concentración pigmentaria, mientras que parámetros que en otras regiones costeras tienen marcada influencia, como la precipitación y las tormentas y huracanes, no se relacionan.

Para la zona sureste, en cambio, ninguno de los parámetros estudiados logra explicar de manera satisfactoria el comportamiento del patrón de concentración, lo que significa que se trata principalmente de advección, a pesar de que se alcance a detectar un pequeño componente de la pluma de producción originada en el Golfo de Papagayo.

La relación entre los cambios de la producción pesquera de pelágicos mayores y los niveles de productividad es reconocida, pero difícil de establecer directamente. Existen dos fuentes de variación en los niveles de captura, una debida a las condiciones ambientales y producción primaria y su repercusión en los tamaños poblacionales, distribución y disponibilidad del recurso, y otra debida a variaciones propias de la actividad pesquera; es decir, cambios en el esfuerzo por la selección de sitios diferentes de pesca, presencia de perturbaciones tropicales, presencia de mar borrascoso, etc. (Anónimo, 1986).

Interanualmente, la variación más notoria en el área completa de estudio se presenta durante 1983 como una fuerte disminución en la importancia relativa de los intervalos de aguas “verdes” y de mayor productividad. El evento documentado más notorio en dicho período, y especialmente para la zona tropical, fué el evento El Niño de 1982-1 983.

Los cambios biológicos vinculados con este tipo de eventos están claramente relacionados con la secuencia de cambios físicos en el ambiente marino (Barber *et al.*, 1985).

Entre los efectos físicos más notorios de un evento El Niño destacan los cambios en los parámetros de vientos (Taft, 1985), cambio en los campos de presión (Wyrtkí, 1984) y los cambios en la estructura vertical de la columna de agua; durante un Niño la nutriclina se hace más profunda, lo que evita o dificulta el aporte de nutrientes a la superficie con la consecuente disminución de productividad y de consumidores (Barber *et al.*, 1985).

A pesar de que no existe un evento tipo *sensu stricto* para describir un Niño, ya que históricamente se han presentado muy diversos fenómenos (Phillander, 1989), el de 1982-1 983 difiere del evento tipo descrito utilizando los seis casos presentes entre 1950 y 1973 por Rasmusson y Carpenter (1982) en diversos factores, entre los que destacan: 1) el evento se inició a finales de primavera y no a finales de otoño; 2) Las anomalías de temperatura superficial del mar son al menos del doble que en el evento tipo; 3) las anomalías de

temperatura superficial del mar se movieron de oeste a este, contrario al tipo y 4) Las anomalías de vientos oestes penetraron mucho más al este, hasta cerca de la costa en el ecuador (Taft, 1985).

La magnitud y temporalidad que se registran de este evento en el área total de estudio, son reflejo de lo sucedido en las zonas que proveen el agua "verde", el Golfo de Tehuantepec y la zona sureste.

Las anomalías en el primer caso se pueden atribuir principalmente al efecto del abatimiento de la termoclina, que impidió que los vientos nortes (no alterados de manera importante) provocaran surgencia de aguas ricas en nutrientes. La surgencia continuó pero aportó aguas pobres en nutrientes de una manera similar a lo reportado para la zona de Perú.

En la zona sureste el efecto puede ser una combinación de 1) que las aguas provenientes del sureste fueron pobres ese año por el efecto de la termoclina abatida en la zona donde las surgencias normalmente las originan, 2) el efecto de la modificación en el comportamiento de los parámetros físicos como vientos (donde se presenta un cambio en la dirección, normalmente sureste) y 3) la disminución en la intensidad del fenómeno invernal del Golfo de Papagayo.

Durante un evento el Niño, el abatimiento de la termoclina, el debilitamiento de vientos, la modificación en los patrones de circulación oceánica y otros factores provocan en el Pacífico Tropical Oriental una disminución en la productividad de zonas como el Domo de Costa Rica, que se afecta la presencia de especies pesqueras. Por otro lado, durante estos eventos se presentan un mayor número de perturbaciones tropicales que impiden la actividad pesquera (Anónimo, 1986).

Otro evento interanual, que vale la pena mencionar, es el aumento de la importancia relativa de los intervalos de aguas productivas a partir de finales de 1984 y hasta principios de 1986 en la zona sureste. Este evento no se presenta de manera notoria en la zona del Golfo de Tehuantepec. Durante este período, el único parámetro que se presenta de manera anómala y exclusivamente para la zona sureste es la configuración térmica de la columna de agua; en este período, la diferencia máxima de temperatura entre los 0 y los 1 00 m se ubica en los primeros 20 m. La consecuencia de esta configuración es, o que en las zonas de formación de estas aguas productivas la termoclina se ubicó

igualmente superficial permitiendo que la mezcla vertical y surgencias fueran más intensas de lo normal, o que se presentaron durante ese período eventos locales de bombeo de nutrientes más intensos de lo normal. En el informe anual de la CIAT de 1985, se menciona que en base a algunas variables climáticas como nivel medio del mar y temperatura superficial, se consideró la presencia de un evento antiniño durante el primer trimestre de 1985, que se vió reflejado en las capturas de algunos pelágicos mayores.

En su calidad de nueva técnica de investigación científica, el uso de las imágenes de satélite ha sido objeto de diversas investigaciones con la intención de definir el grado de utilidad objetiva que tienen. Entre los argumentos más recurridos dentro de esta línea cabe mencionar la poca representatividad de las condiciones de la columna de agua que ofrecen las características de concentración pigmentaria de la superficie y el grado de error que por diversos factores presentan las medidas de concentración pigmentaria derivadas de los valores de radiancia del sensor.

A pesar de los resultados presentados por Lorenzen (1970) sobre la alta asociación que existe entre los valores superficiales de concentración fitoplanctónica y los integrados de la columna de agua utilizando valores de cruceros realizados en Sudáfrica, Baja California y Perú-Ecuador, es importante reconocer que el sensor no proporciona información sobre la estructura vertical de la distribución del fitoplancton (Platt y Herman, 1983). En virtud de este hecho, normalmente se supone una distribución homogénea en la capa eufótica, por lo que es factible caer en una sobre o subestimación del valor real si la columna no está bien mezclada (Alvarez-Borrego, 1994). Una de las soluciones posibles para esta deficiencia es el contar con mediciones *in situ* que permitan caracterizar la columna en términos de ciertos parámetros, como los definidos en base a la curva Gausiana por Platt *et al.*, (1988; en Alvarez-Borrego, 1994); sin embargo esta posibilidad es pocas veces aplicable debido a la falta de programas de cruceros adecuados en grandes zonas del océano. Otra posibilidad es el de utilizar la información del satélite, aprovechando su amplitud geográfica y su repetitividad en períodos largos de tiempo, enfocando la investigación a la búsqueda de señales más globales.

La otra problemática, relacionada con las discrepancias que existen entre los valores de satélite y los valores *in situ*, dependiendo de latitud (Platt y Herman, 1983), época del año (Fargion *et al.*, 1993), concentración de pigmentos, material suspendido, etc, presenta en principio las mismas

soluciones. Sería preferible contar con mediciones *in situ* que permitieran ajustar los algoritmos empíricos de conversión del valor de radiancia al valor de concentración pigmentaria por zona y en diferentes épocas; sin embargo este tipo de medidas son insuficientes incluso en las zonas más muestreadas. La segunda forma de salvar este aspecto es la mencionada anteriormente como la búsqueda de señales de mayor magnitud.

La búsqueda de estas señales provoca forzosamente que se pierda resolución, pero permite analizar la distribución de tipos de aguas en una región grande del océano, caracterización de una zona en función de tipos de comportamiento anual (tropicales, templadas, etc.), regionalización de un área en zonas de diferente comportamiento, etc.

El utilizar este tipo de información como un indicador del tipo de sistema e incluso como un rastreador de sus cambios en las escalas temporales intra e interanuales parece factible a juzgar por la coherencia que existe en los resultados de distribución, estacionalidad y cambios interanuales de concentración pigmentaria y variables ambientales en el presente trabajo.

Las técnicas de análisis de la información generada por satélites ha sufrido una evolución rápida a consecuencia del incremento constante de exigencias de información. Uno de los objetivos del presente trabajo fué la implementación de una metodología de análisis que permitiera estudiar las señales de gran escala.

Cabe señalar que entre los pasos recorridos para llegar a la metodología de intervalos de concentración se realizaron varios intentos entre los que destacan la elaboración de isolíneas de concentración pigmentaria utilizando la matriz de datos completa. Este método presentó la dificultad de asignar una importancia muy alta a los valores extremos de la imagen que, si bien pueden ser correctos, no permiten reconocer las estructuras importantes y la distribución de los tipos de agua.

Se abordó también el análisis que aquí se presenta utilizando el muestreo de una red de foteles de cada imagen. Esta metodología resultó de utilidad para la exploración de los datos y para la definición de regiones, pero presentó problemas tanto para el manejo de series de tiempo en el análisis interanual (por la cantidad de series, por lo extremo de algunos valores y por la falta de datos en las series), como para la observación en el tiempo de los cambios en la distribución de los tipos de agua.

La utilización de intervalos de concentración permite: 1) Restar importancia a los valores extremos que no son reflejo de un evento a escala oceánica. 2) Reconocer estructuras y comportamientos tipo y a lo largo del tiempo, lo que facilita la descripción de una zona y su relación con las características físicas. 3) Resumir la información a unas cuantas series de tiempo, más fáciles de analizar y de relacionar.

La idea de este tipo de metodologías es simplificar el análisis de esta clase de información para optimizarlo en estudios de gran escala.

Cabe señalar que este método presenta algunas exigencias y limitantes, entre los que destacan: 1) El no proporcionar valores puntuales de concentración pigmentaria, lo que resta resolución a los datos de satélite y no permite utilizar la información generada bajo este método en trabajos finos sobre alguna región reducida; 2) Por la misma razón expuesta, es posible que se enmascaren eventos importantes de poca cobertura geográfica; 3) Es necesario, para que el método funcione, que se reconozcan las regiones de comportamiento diferente dentro del área, por lo que es recomendable antes de adoptar las series de cobertura relativa como el indicador de variación en la concentración de pigmentos, graficar el comportamiento anual de cada fotel de la imagen (como el caso de la Figura 5). Este punto queda bien ilustrado si se comparan los patrones de cobertura del área total (con muy poca variación a lo largo del año) con los de las dos regiones manejadas, del Golfo de Tehuantepec y la zona sureste (con fuertes variaciones intra-anales que sumadas se enmascaran).

## Conclusiones

La regionalización del área de estudio y su caracterización en cuanto a variabilidad inter e intra anual de concentración pigmentaria, fué posible gracias a la aplicación de una nueva técnica de análisis de información derivada de satélites que permite no sólo utilizar toda la información contenida en las composiciones mensuales, sino también el manejo de series de tiempo que reflejan las condiciones de concentración pigmentaria en toda el área y en "subáreas" definidas en base a los mismos datos. La intención de la aplicación de esta técnica' es utilizar este tipo de información aprovechando su amplitud geográfica y temporal para la búsqueda de señales en la mesoescala; es decir, como un indicador del tipo de sistema e incluso como un rastreador de sus cambios en las escalas temporales intra e interanuales.

Las dos zonas oceánicas del Pacífico Tropical Mexicano de importancia en cuanto a niveles de concentración fitoplanctónica, son el Golfo de Tehuantepec (considerado en este trabajo como la zona entre los 93 y 98°W y los 12°N hasta la línea de costa continental) y la zona sureste (de los 93°W hasta la línea continental de costa y de los 8°N hasta la línea de costa), el resto del área analizada presenta características de zonas costeras u oceánicas.

En la zona del Golfo de Tehuantepec se presentan niveles desde 0.25 hasta 0.6mgChl $m^{-3}$ , salvo las zonas más costeras o aledañas a la zona sureste donde se alcanzan valores de arriba de 1.5mgChl $m^{-3}$ . Para la zona sureste se reconocen niveles de concentración pigmentaria de entre 0.5 y 1.7mgChl $m^{-3}$ . El resto del área estudiada se encuentra dividida en costa (con niveles muy altos de concentración pigmentaria) y zonas costeras, sin influencia de eventos de surgencia o advección de aguas con altas concentraciones, y que mantienen niveles cercanos a 0.05mgChl $m^{-3}$ .

En la zona del Golfo de Tehuantepec son reconocidos los efectos de los vientos invernales (nortes), mientras que para la zona sureste se presentan tanto eventos invernales de surgencia similares a los mencionados para el Golfo de Tehuantepec en la zona del Golfo de Papagayo, como la intrusión veraniega de aguas ricas provenientes del sureste y acarreadas por la Corriente Costera de Costa Rica.

Estos niveles de concentración pigmentaria son afectados interanualmente por las modificaciones en las características físicas del sistema. Las modificaciones al patrón anual en vientos y profundidad de la termoclina, provocan más directamente estos cambios interanuales de concentración, ya sea por debajo (condiciones El Niño) o por arriba (condiciones antiniño) del promedio.

### Recomendaciones

Uno de los principales problemas que se han presentado en el uso de la base de datos derivada del CZCS, es el de la falta de mediciones *in situ* para corroborar el comportamiento y veracidad de los algoritmos de corrección y del sensor en el tiempo y para las diferentes latitudes. Es importante conocer esta problemática y no sustituir las mediciones en el campo por la de satélite. Ambas son necesarias. Afortunadamente, será puesto en funcionamiento en el futuro cercano el SeaWiFS, un nuevo sensor, con modificaciones hechas en base a la experiencia obtenida con el CZCS. Sin embargo, pasarán varios años antes de contar con una serie de datos suficientes para analizar los patrones anuales y la variabilidad interanual del océano en cuanto a la concentración pigmentaria, por lo que es sumamente recomendable continuar utilizando la información existente y proveer de diferentes técnicas de análisis para diferentes objetos de estudio.

### Sugerencias para trabajos futuros

Los estudios de la distribución pigmentaria en el tiempo y espacio, así como la mayor parte de los estudios en el campo de la ecología, deben tener como uno de los objetivos principales servir de base para el análisis de las poblaciones de importancia comercial. En este caso particular, es recomendable que se utilice la información aquí generada para el estudio de las poblaciones de pelágicos tropicales. Una de las principales líneas de trabajo en este contexto, es relacionar las regiones analizadas y la variación temporal definida en la presente contribución con las variaciones en abundancia y distribución de atún aleta amarilla.

Para la utilización de información generada por satélite en estudios de grandes zonas oceánicas es recomendable el uso de la técnica de intervalos de concentración combinada con alguna otra técnica que permita regionalizar parcialmente el área de estudio.

En la investigación de zonas de poca cobertura geográfica, se debe ser cauteloso en el uso de esta técnica y, en general, en el uso de la información derivada de satélites.

## Bibliografía

- Abbott, M.R. and P.M. Zion. 1985. Satellite observations of phytoplankton variability during an upwelling event. *Continental Shelf Research*. 4(6). 661-680.
- Alvarez-Borrego, S. 1995. Satellite derived Photosynthetic pigments: marine phytoplankton biomass and productivity. *Sometido a J. Geophys. Res.*
- André, J. M. y A. Morel. 1991. Atmospheric corrections and interpretation of marine radiances in CZCS imagery, revisited. *Oceanologica Acta*. 14(1):3-22
- Anónimo. 1986. Reporte anual de la Comisión Interamericana del Atún Tropical 1985. CIAT. 118-I 24.
- Anónimo. 1990. Graftool, Graphical analysis system for scientific users, User's guide. 3-d Visions Corporation.
- Anónimo. 1991. CD-ROMs NODC-02 and NODC-03: Global Ocean Temperature and Salinity Profiles. Informal Rep. 12. NOAA. 7pp.
- Baker, K. and R.C. Smith. 1982. Bio-optical classification and model of natural waters. *Limnol. Oceanogr.* 27(3). 500-509.
- Balch, W.M., M.R. Abbott and R.W. Eppley. 1988. Remote sensing of primary production-I. A comparison of empirical and semi-analytical algorithms. *Deep Sea Research*. 36(2): 281-255.
- Barber, R.T., J.E. Kogelschartz and F.P. Chávez. 1985. Origin of productivity anomalies during the 1982-1983 El Niño. *CalCOFI REP*. 26. 65-71.
- Barber, R.T. and F.P. Chávez. 1991. Regulation of primary productivity rate in the equatorial Pacific. *Limnol. Oceanogr.* 36(8). 1803-1815.
- Barreiro, M.T. y L. López G. 1972. Estudio de los recursos pesqueros demersales del Golfo de California, 1968-1969. II Camarones Mem. IV Cong. Nal. Ocean. México. Noviembre 17-19, 1969. 245-259.
- Banase, K. and D.C. English. 1994. Seasonality of Coastal Zone Color Scanner phytoplankton pigment in offshore oceans. *J. Geophys. Res.* 99(C4):7323-7345.
- Blackburn, M. 1962. An Oceanographic study of the Gulf of Tehuantepec. U.S. Fish and Wildlife special scient Rep. 404.
- Blackburn, M. 1963. Distribution and abundance of tuna related to wind forcing and oceanic conditions in the Gulf of Tehuantepec, Mexico, FAO fisheries report 6(3). 1557-1583.
- Castro Ortiz, J.L. y V. Quiñonez Velázquez. 1987. Distribución y abundancia del atún aleta amarilla *Thunnus albacares* en relación a la temperatura superficial en el Pacífico Nororiental (1982-1985). in *Memorias del Simposium sobre Investigación en Biología y Oceanografía Pesquera en México*. 21-34.
- Chávez, F.P. and R.T. Barber. 1987. An estimate of new production in the equatorial Pacific. *Deep-sea Research*. 12. 1229-1243.

- Clarck, A.J. 1988. Inertial Wind Path and Sea Surface Temperature Patterns Near the Gulf of Tehuantepec and Gulf of Papagayo. *J. Geophys. Res.* 93(C12).15,491-15,501.
- Compeán, G. 1988. Zonas de reproducción del atún en aguas mexicanas. *Panorama Atunero*. 12. 10-1 2.
- Endfield, D.B. and J.S. Allen. 1983. The generation and propagation of sea level variability along the Pacific Coast of Mexico. *J. Geophys. Res.* 13: 1. 012-1,033.
- Eslinger, D.L. and R.L. Iverson. 1986. Wind effects on Coastal Zone Color Scanner Chlorophyll patterns in the U.S. Mid-Atlantic Bight during spring 1979. *J. Geophysical Research*. 91 (cl 1). 12,985-1 2,992.
- Fargion, G.S., J.A. McGowan y R.H. Stewart. 1993. Seasonality of chlorophyll concentrations in the California Current: a comparison of two methods. *CalCOFI Reps.* 34. 35-50.
- Finch, C.J. 1994. TOGA CD-ROM User's guide. Physical Oceanography DAAC, JPL.
- García, E. y R. I. Trejo. 1990. Causas de la precipitación en Nayarit. *Mem. XII Congreso Nacional de Geografía. INEGI*.
- Gonzalez, P.G. y M. Ramírez. 1989. Zonas y épocas de reproducción del atún aleta amarilla *Thunnus albacares* en el Pacífico Mexicano. *Investigaciones marinas CICIMAR*. 4(2):201-209.
- Gordon, H.R., J.W. Brown, O.B. Brown, R.H. Evans and D.K. Clark. 1983b. Nimbus 7 CZCS: Reduction of its radiometric sensitivity with time. *Appl. Opt.* 22. 3,929-3,931.
- Gordon, H. R., D. K. Clark, J. L. Mueller y W. A. Hovis. 1980. Phytoplankton pigments from the Coastal Zone Color Scanner: Comparison with surface measurements. *Science*. 2 10. 63-66
- Gordon, H.R., O.B. Brown, R.H. Evans, J.W. Brown, R.C. Smith, K.S. Baker and D.K. Clark. 1988. A semianalytic radiance model of ocean color. *J. Geophys. Res.* 93(D9). 10,909-1 0,924.
- Gordon, H.R., D.K. Clark, J.W. Brown, O.B. Brown, R.H. Evans and W.W. Broenkow. 1983a. Phytoplankton pigment concentrations in the middle Atlantic Bight: Comparison of Ship determinations and CZCS estimates. *Appl. Opt.* 22. 20-35.
- Gray, W.M. 1979. Hurricanes: their formation, structure and likely role in the tropical circulation. en Shaw, D.B. (edit). 1979. *Meteorology Over the tropical oceans*. Royal Met. Soc. 155-218.
- Holmes, R. W., M. B. Sheaffer y B. M. Shimada. 1957. Producción primaria, clorofila y volúmenes del zooplancton en la zona tropical del Océano Pacífico Oriental. *Comisión Interamericana del atún tropical (Boletín)*. 1 1(4):127-1 69.
- Hovis, W. A., D. K. Clark, F. Anderson, R. W. Austin, W. H. Wilson, E. T. Baker, D. Ball, H. R. Gordon, J. L. Mueller, S. Z. El-Sayed, B. Sturm, R. C. Wrigley and C. S. Yentsch. 1980. Nimbus-7 Coastal Zone Colour Scanner: system description and initial imagery. *Science*. 210. 60-63

- Kirk, J. T. O. 1983. Light and Photosynthesis in the aquatic ecosystems. Cambridge Univ. Press. England. 135-171 pp.
- Lavín, M. F., J. M. Robles, M. L. Argote, E. D. Barton, R. Smith, J. Brown, M. Kosro, A. Trasviña, H. S. Vélez y J. García. 1992. Física del Golfo de Tehuantepec. Ciencia y Desarrollo. 8(103):97-108
- Legeckis, R. 1988. Upwelling off the Gulfs of Panama and Papagayo in the Tropical Pacific During March 1985. J. Geophys. Res. 93(C12). 15,485-15,489.
- Lorenzen, C.J. 1970. Surface chlorophyll as an index of depth, chlorophyll content and primary productivity of the euphotic layer. Limnol Ocean. 15. 479-480.
- McCreary, J. P., H. S. Lee and D. B. Enfield. 1989. The response of the coastal ocean to strong offshore winds: with application to circulation in the Gulfs of Tehuantepec and Papagayo. Journal of Marine Research. 47:81-109.
- Morel, A. and L. Prieur. 1977. Analysis of variations in ocean color. Limnol. Oceanogr. 22(4). 709-722.
- Mosiño-Aleman, P. 1966. Factores del clima en la Republica Mexicana con referencia especial a las zonas áridas. Instituto Nacional de Antropología e Historia.
- Muhlia, M. A. 1987. The Mexican Tuna Fishery. CalCOFI Reports. 28:37-42.
- Müller-Karger, F.E., J.J Walsh, R.H. Evans and M.B. Meyers.. 1991. On the seasonal phytoplankton concentration and the sea surface temperature cycles of the Gulf of Mexico as determined by satellites. J. Geophys. Res. 96(C7). 12,645-12,665.
- Ortega-García, S. 1987. Distribución y análisis de las operaciones de pesca de la flota atunera mexicana durante el periodo 1975-1986. *In* Memorias del Simposium Sobre Investigación en Biología y Oceanografía Pesquera en México. 1-20.
- Ortega García, S. 1989. Análisis y normalización del esfuerzo de pesca de la flota atunera mexicana de cerco y vara que opera en el Pacífico Oriental. Tesis de maestría. CICIMAR-IPN.
- Owen, R.W. and B. Zeitzschel. 1970. Phytoplankton production: seasonal change in the oceanic eastern tropical Pacific. Marine Biology. 7. 32-36
- Peláez, J. y J. A. McGowan. 1986. Phytoplankton pigment patterns in the California Current as determined by satellite. Limnol. Oceanogr. 31(5):927-950.
- Perez-Farfante, I. 1967. Sinopsis de datos biológicos sobre el camarón blanco *Penaeus schmitti*. Act. Cont. Cient. Mun. Biol. Cult. Cam. Cam. Gamb. México. Junio 12-21, 1967. 1417-1438.
- Phillander, S.G.H. 1989. El Niño, La Niña and the Southern Oscillation. Academic Press, New York. 293pp.
- Picaut, J. 1985. Major Dynamics affecting the Eastern Tropical Atlantic and Pacific Oceans. CalCOFI Reports. 25:41-50.
- Platt, T. and A.W. Herman. 1983. Remote sensing of phytoplankton in the sea: surface-layer chlorophyll as an estimate of water-column chlorophyll and primary production. Int. J. Remote Sensing. 4(2). 343-351.

- Rasmusson, E.M. and T.H. Carpenter. 1982. Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the southern oscillation/El Niño. *Monthly Weather Review*. 110. 354-348.
- Reyes, S. and A. Mejia-Trejo. 1991. Tropical perturbations in the Eastern Pacific and the precipitation field over North-Western Mexico in relation to ENSO Phenomenon. *International Journal of Climatology*. 11. 515-528.
- Ritter, O.W. y S. Guzmán Ruiz. 1984. Modelo generalizado de producción pesquera con dependencia ambiental Una aplicación al Golfo de Tehuantepec. *Revista Geofísica UNAM*. 21-29.
- Robles-Jarero, E. G. y J. R. Lara-Lara. 1993. Phytoplankton Biomass and Primary Productivity by size classes in the Gulf of Tehuantepec, México. *Journal of Plankton Research*. 15(12): 1341-1358.
- Roden, G. I. 1961. Sobre la circulación producida por el viento en el Golfo de Tehuantepec y sus efectos sobre las temperaturas superficiales. *Geofísica Internacional*. 1. 55-72.
- Sáenz Martínez, P. 1981. Análisis de las poblaciones de camarón en el Golfo de Tehuantepec. ENCB-IPN. Inf. Tec.
- Santamaria-del-Angel, E., S. Alvarez-Borrego y F.E. Müller-Karger. 1994a. The El Niño 1982-1984 in the Gulf of California as seen in the Coastal Zone Color Scanner Imagery. *Journal of Geophysical Research*. 99(c4). 7411-7421.
- Santamaría-del-Angel, E., S. Alvarez-Borrego y F.E. Müller-Karger. 1994b. Gulf of California Biogeographic Regions Based on Coastal Zone Color Scanner Imagery. *J. Geophys. Res.* 99(C4). 7411-7421.
- Smith, R.C. and K. Baker. 1978. Optical classification of natural waters. *Limnol. Oceanogr.* 23(2). 260-267.
- Smith, R.C. y K. S. Baker. 1982. Oceanic chlorophyll concentrations as determined by satellite (Nimbus 7 Coastal Zone Color Scanner). *Marine Biology*. 66:269-279.
- Strong, A.E., R.J. De Ricke and H.G. Stumpf. 1972. Satellite detection of upwelling and cold water eddies. *Proc. of the 8th Int. Symp. on remote sensing of the environment*. 1067-1080.
- Strub, P.T., C. James, A.C. Thomas and M.R. Abbot. 1990. Seasonal and nonseasonal variability of satellite-derived surface pigment concentration in the California Current. *J. Geophys. Res.* 95(c7). 11,501-11,530.
- Stumpf, H. G. 1975. Satellite detection of Upwelling in the Gulf of Tehuantepec, Mexico. *Journal of Physical Oceanography*. 5(2):383-388
- Stumpf, H. G. and R. V. Legeckis. 1977. Satellite observations of mesoscale eddy dynamics in the Eastern Tropical Ocean. *Journal of Physical Oceanography*. 7:648-658.
- Taft, B.A. 1985. El Niño of 1982-1983 in the Tropical Pacific. en Wooster, W.S. and D.L. Fluharty (edit). 1985. *El Niño North*. Washington Sea Grant. 31 Opp.
- Tiasviña, A. 1991. Offshore wind forcing in a coastal ocean: observations and modeling of the Gulf of Tehuantepec, México. Ph. D. Thesis. University of Wales. 88pp.

- Vinogradov, M.E. 1981. Ecosystems of equatorial upwellings. en Longhurst, A.R. (edit). 1981. Analysis of marine ecosystems. Academic press. 741 pp.
- Wyrski, K. 1967. Circulation and water masses in the eastern Equatorial Pacific Ocean: International Journal of Oceanology and Limnology. 1: 117-147
- Wyrski, K. 1984. The slope of the sea level along the equator during the 1982/1983 El Niño, J. Geophys. Res. 89. 10,419-10,424.
- Yentsch, C. S. and D. A. Phinney. 1982. The use of light by particulate matter for the estimate of phytoplankton chlorophyll with reference to the Coastal Zone Color Scanner. Jour. Plank. Res. 4(1): 93-102.
- Zurita Jordan, I.L. 1993. Variaciones estacionales e interanuales de la biomasa fitoplanctónica derivadas de satélite en la boca del Golfo de California y en la costa occidental de Baja California Sur. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias, UNAM. 93pp.

## **Anexo 1. Figuras**

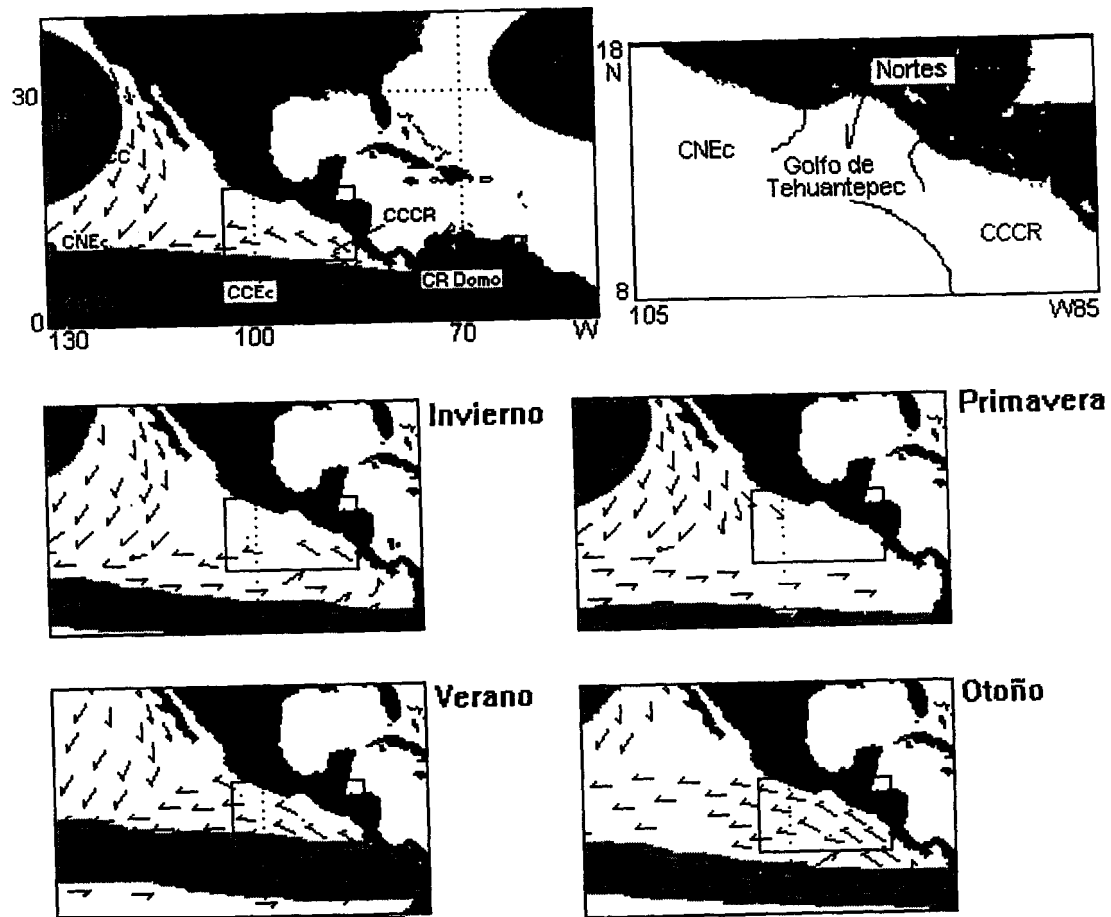


Figura 1 .Panel superior izquierdo: Características atmosféricas y oceanográficas de Pacífico Tropical Oriental. Panel superior derecho: Area de estudio (Pacífico Tropical Mexicano). Páneos inferiores: Variación estacional de la distribución de celdas de presión y corrientes superficiales en el Pacífico Tropical Oriental.

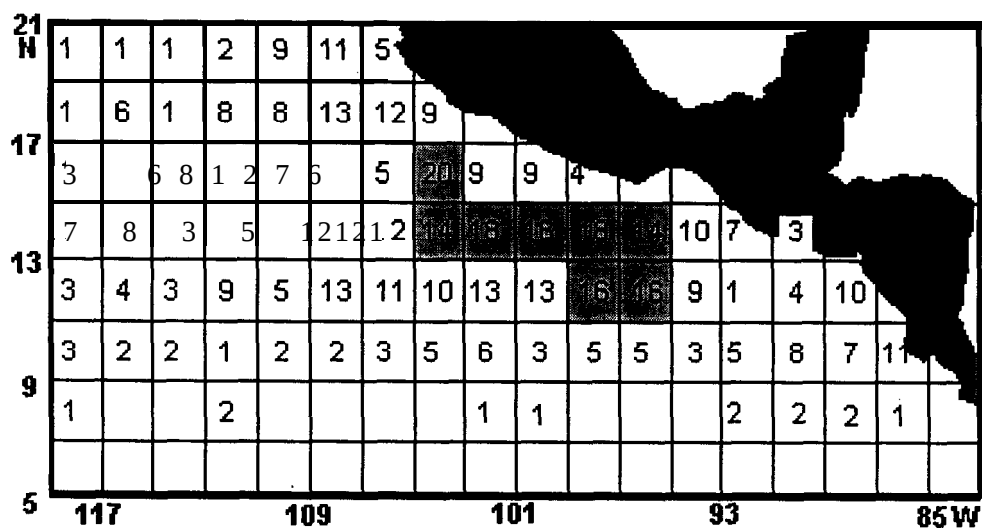


Figura 2. **Número** de Perturbaciones Tropicales en el Pacífico oriental entre el continente y los  $117^{\circ}\text{W}$  y los  $5^{\circ}\text{N}$  a  $21^{\circ}\text{N}$ . Periodo 1921-I 988. Los cuadros corresponden a áreas de  $2^{\circ}$  de latitud x  $2^{\circ}$  de longitud. Los sombreados indican 14 o más PT formadas en esa área. Tomado de Reyes and Mejía-Trejo (1991).

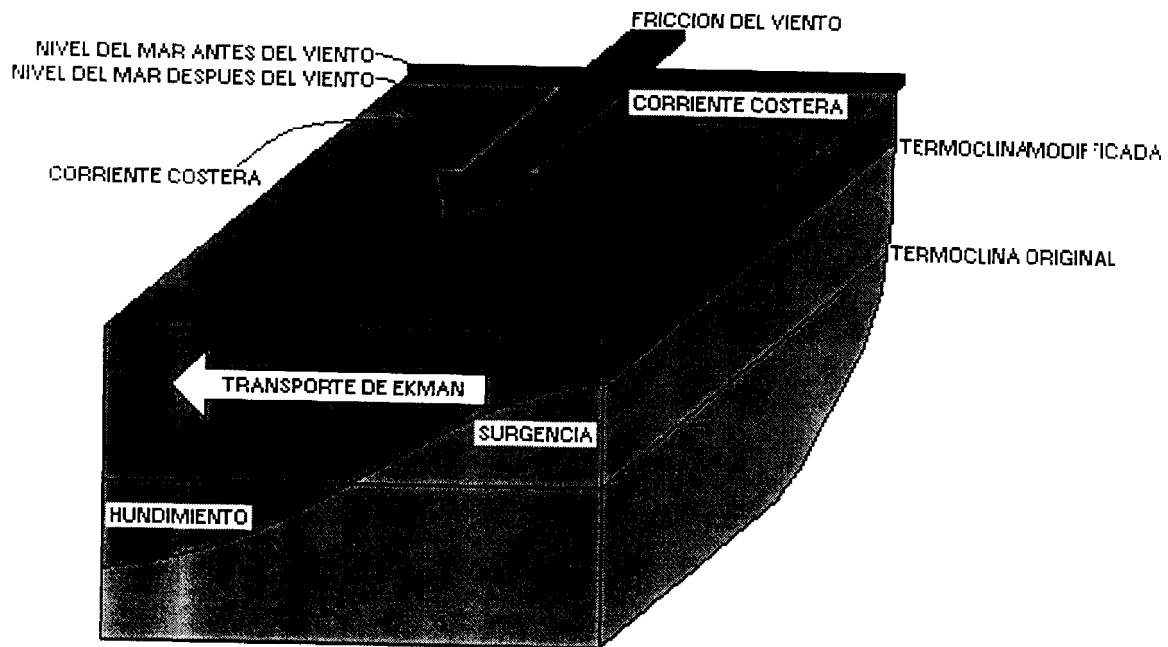


Figura 3. Modelo esquemático del mecanismo de surgencias en el Golfo de Tehuantepec durante un evento de viento norte. Tomado de Lavin et al. (1992).

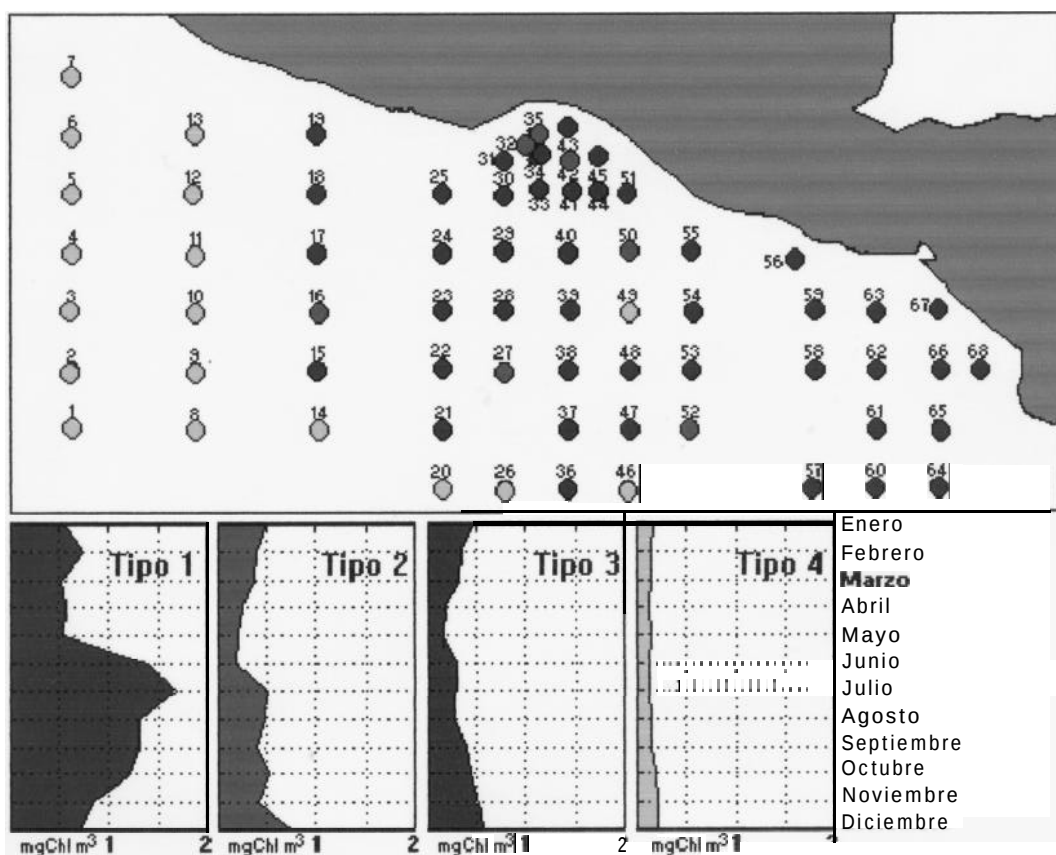


Figura 4. Red de puntos muestreados, comportamientos tipo calculados y regionalización de los puntos en función de su agrupamiento en conglomerados.

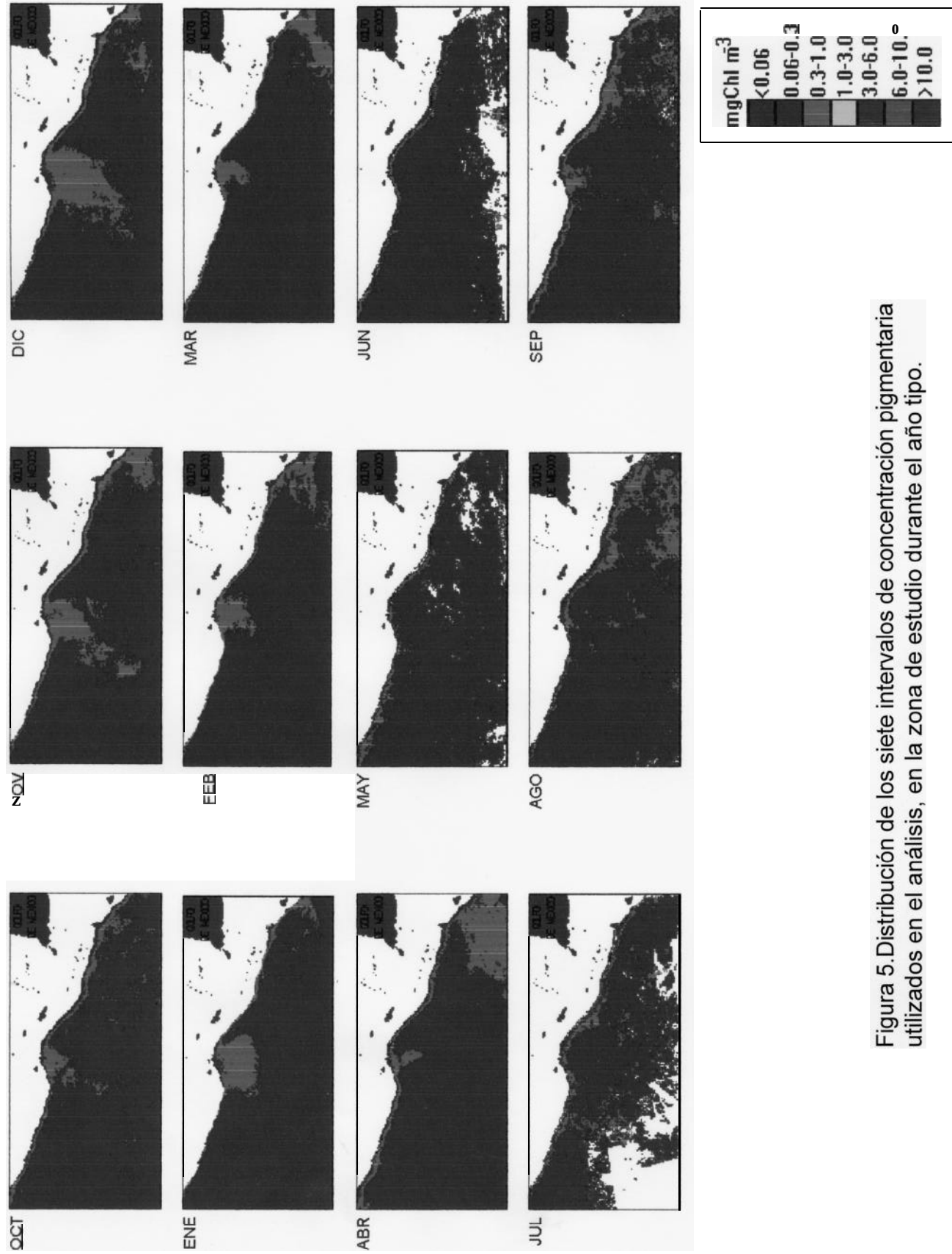


Figura 5. Distribución de los siete intervalos de concentración pigmentaria utilizados en el análisis, en la zona de estudio durante el año tipo.

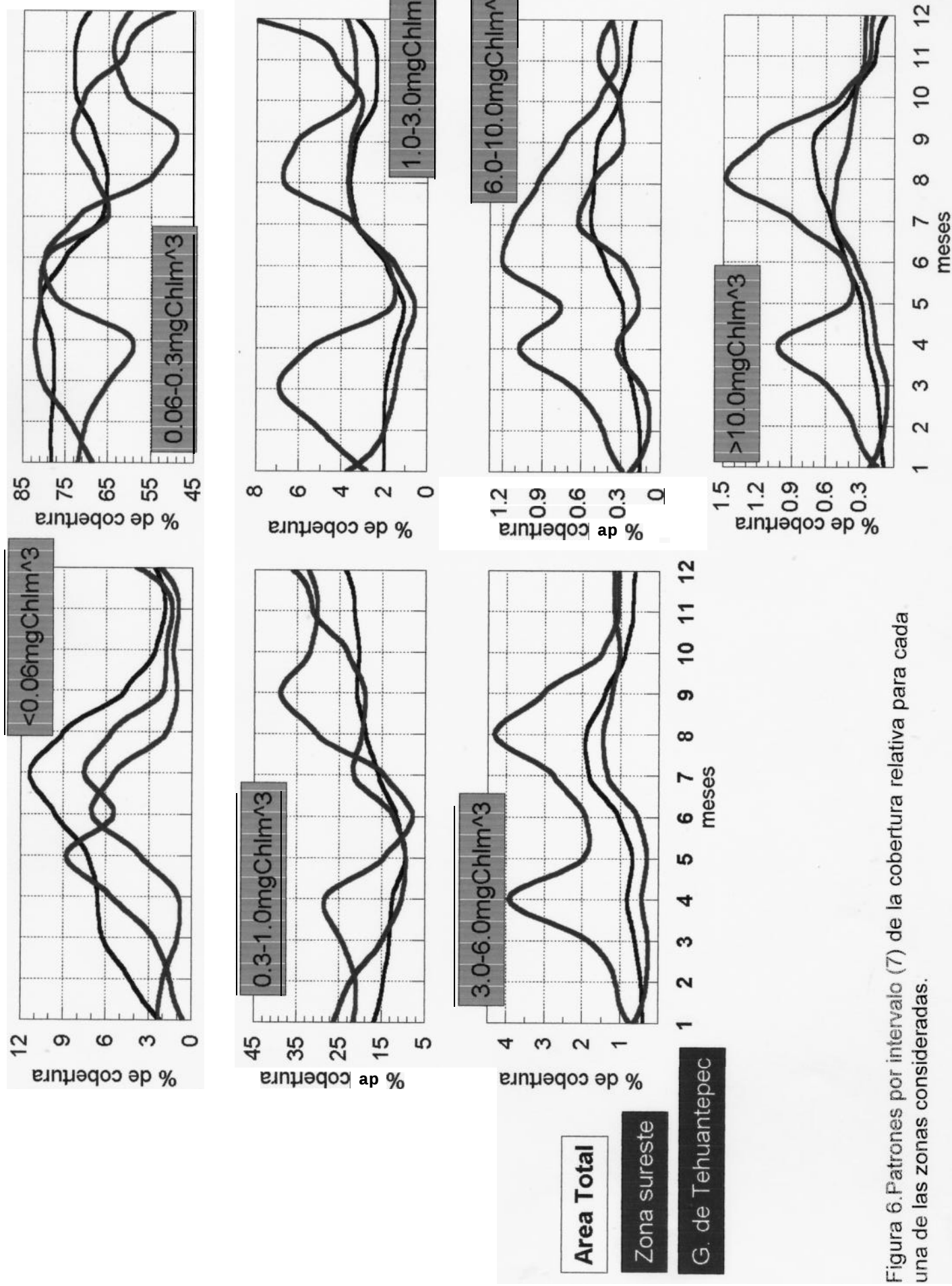


Figura 6. Patrones por intervalo (7) de la cobertura relativa para cada una de las zonas consideradas.

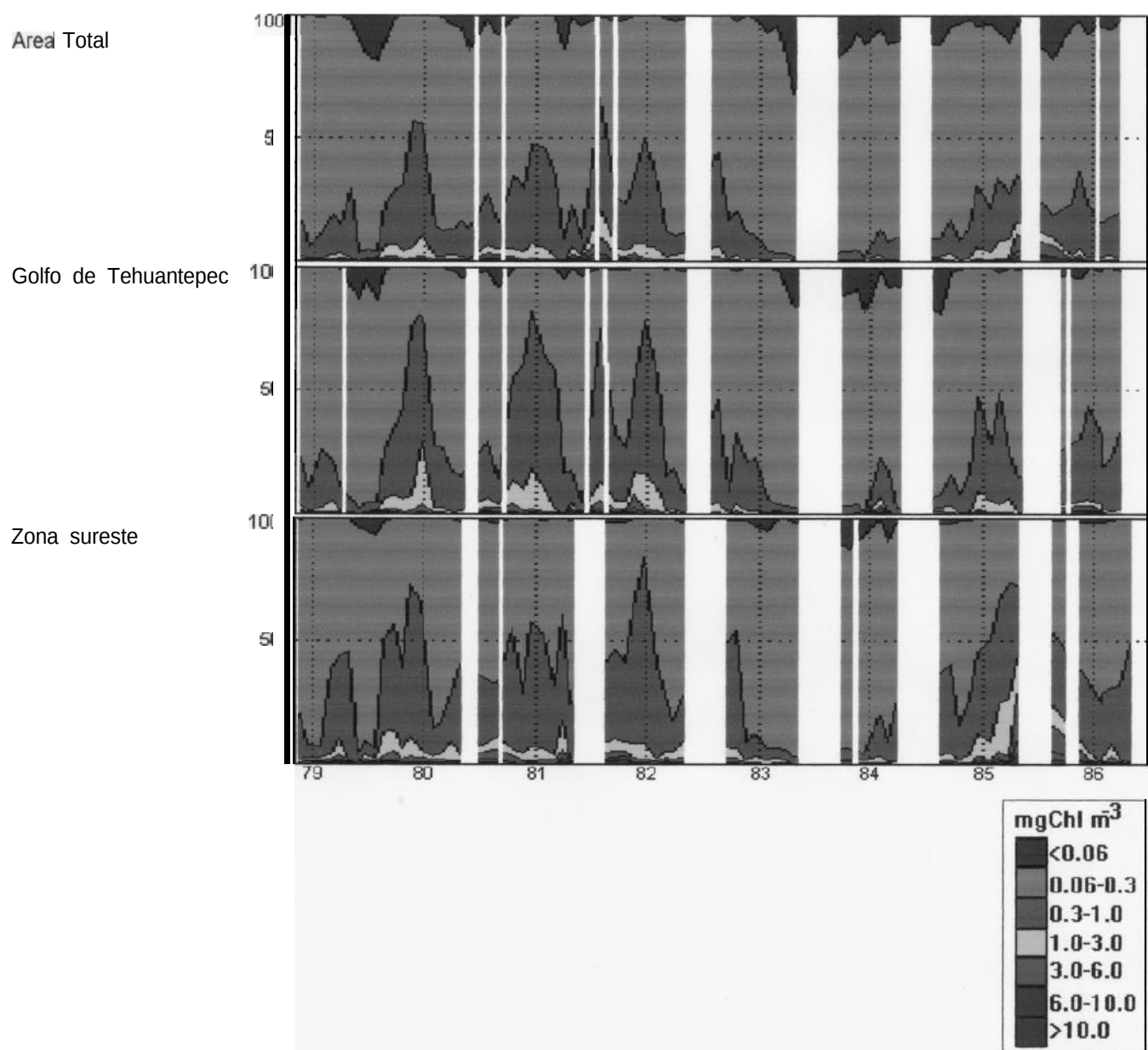


Figura 7. Series por zona de la cobertura relativa de los siete intervalos de concentración pigmentaria.

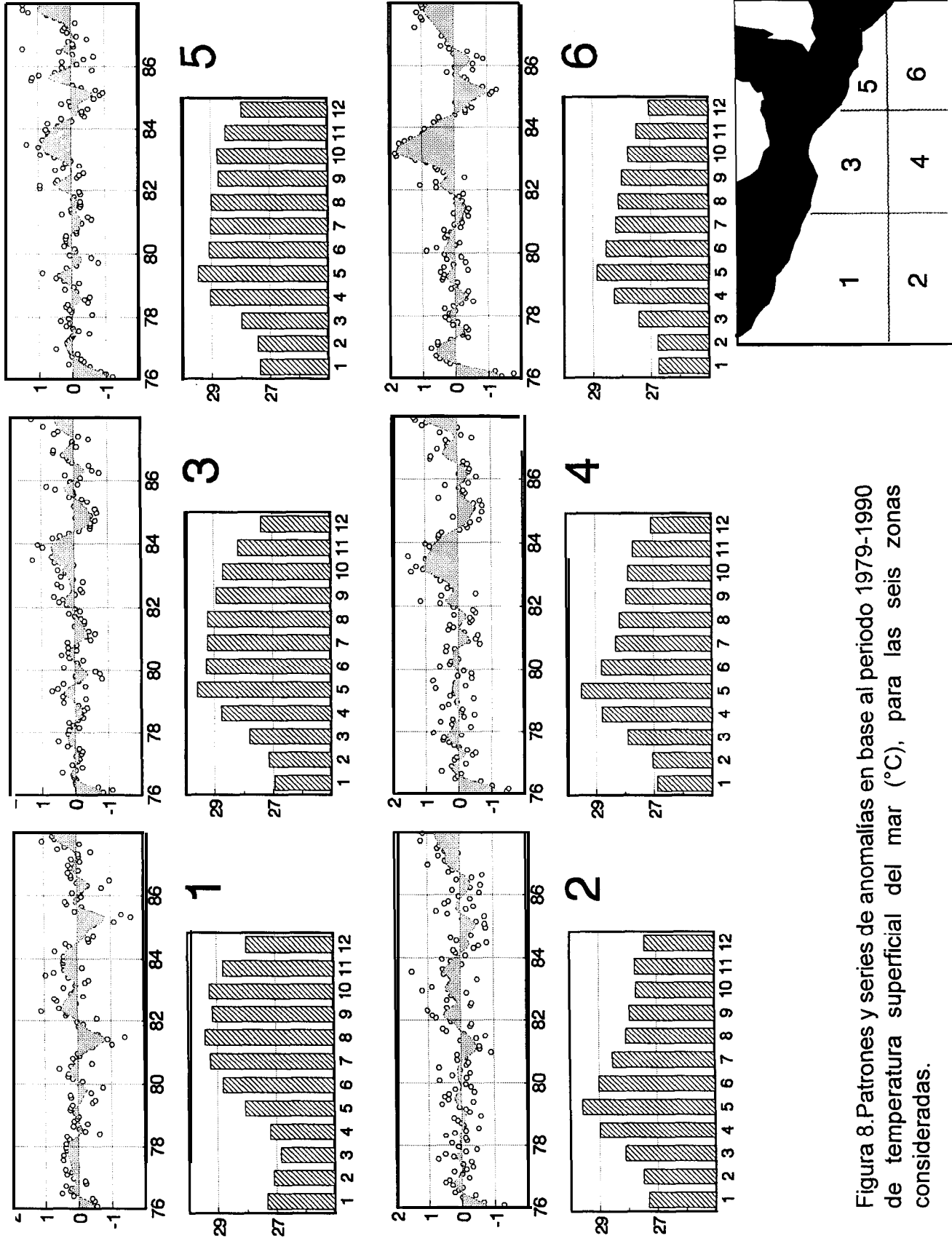


Figura 8. Patrones y series de anomalías en base al periodo 1979-1990 de temperatura superficial del mar ( $^{\circ}\text{C}$ ), para las seis zonas consideradas.

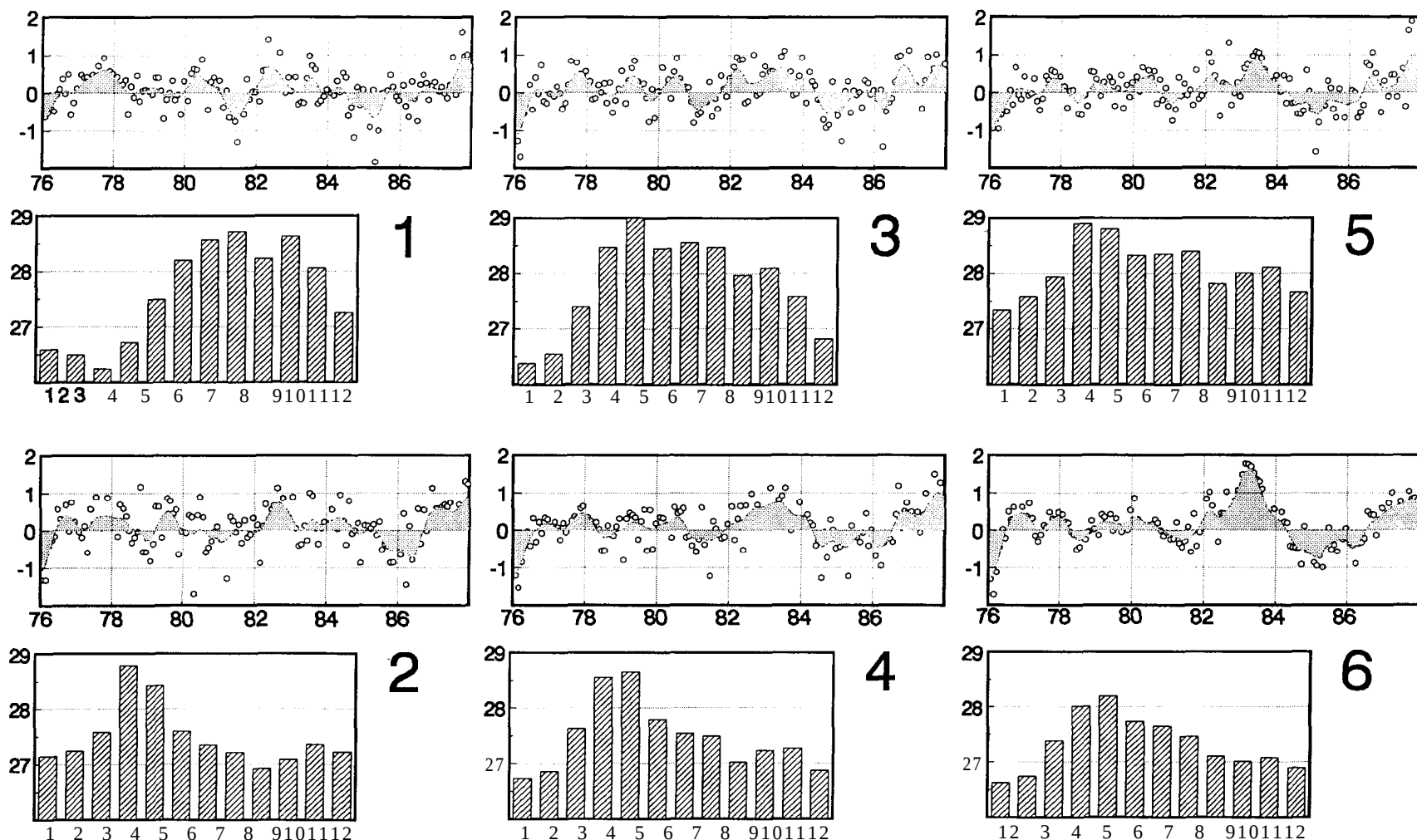
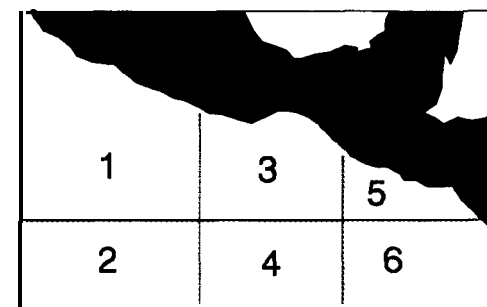


Figura 9. Patrones y series de anomalías en base al periodo 1979-1990 de temperatura del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ), para las seis zonas consideradas.



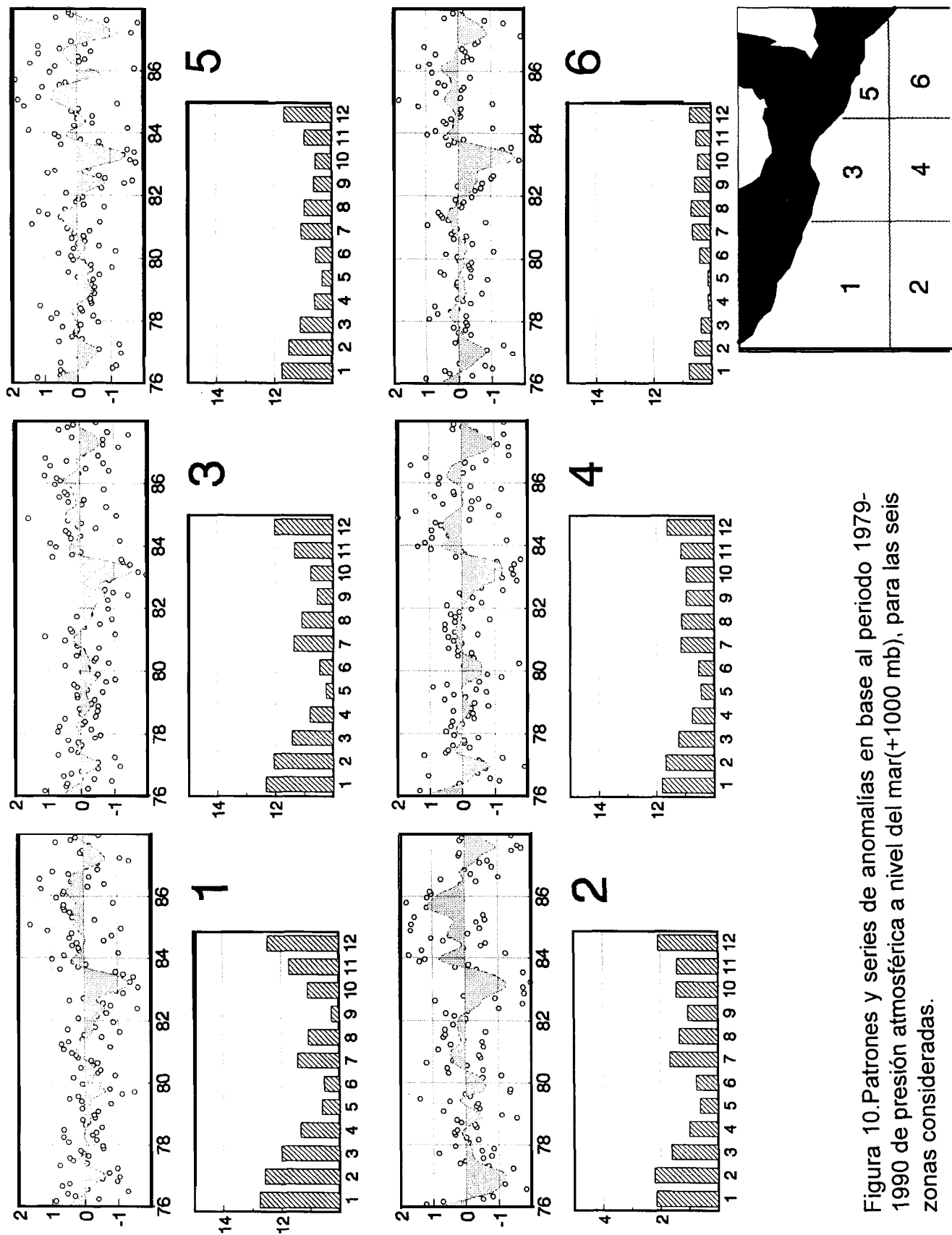


Figura 10. Patrones y series de anomalías en base al periodo 1979-1990 de presión atmosférica a nivel del mar (+1000 mb), para las seis zonas consideradas.

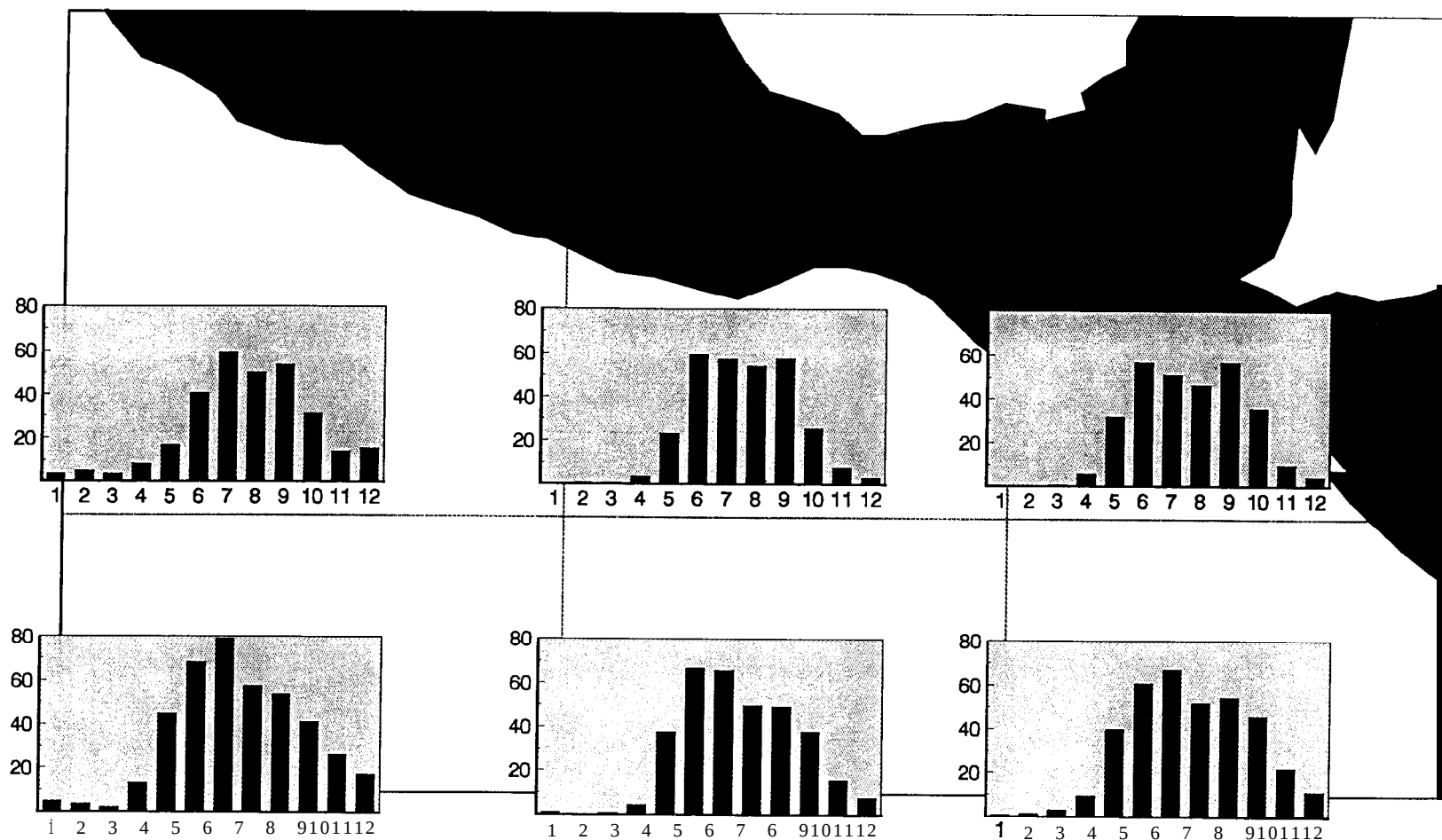


Figura 12. Patrones de precipitación estimada en base al periodo 1986-1990, para las seis zonas consideradas.

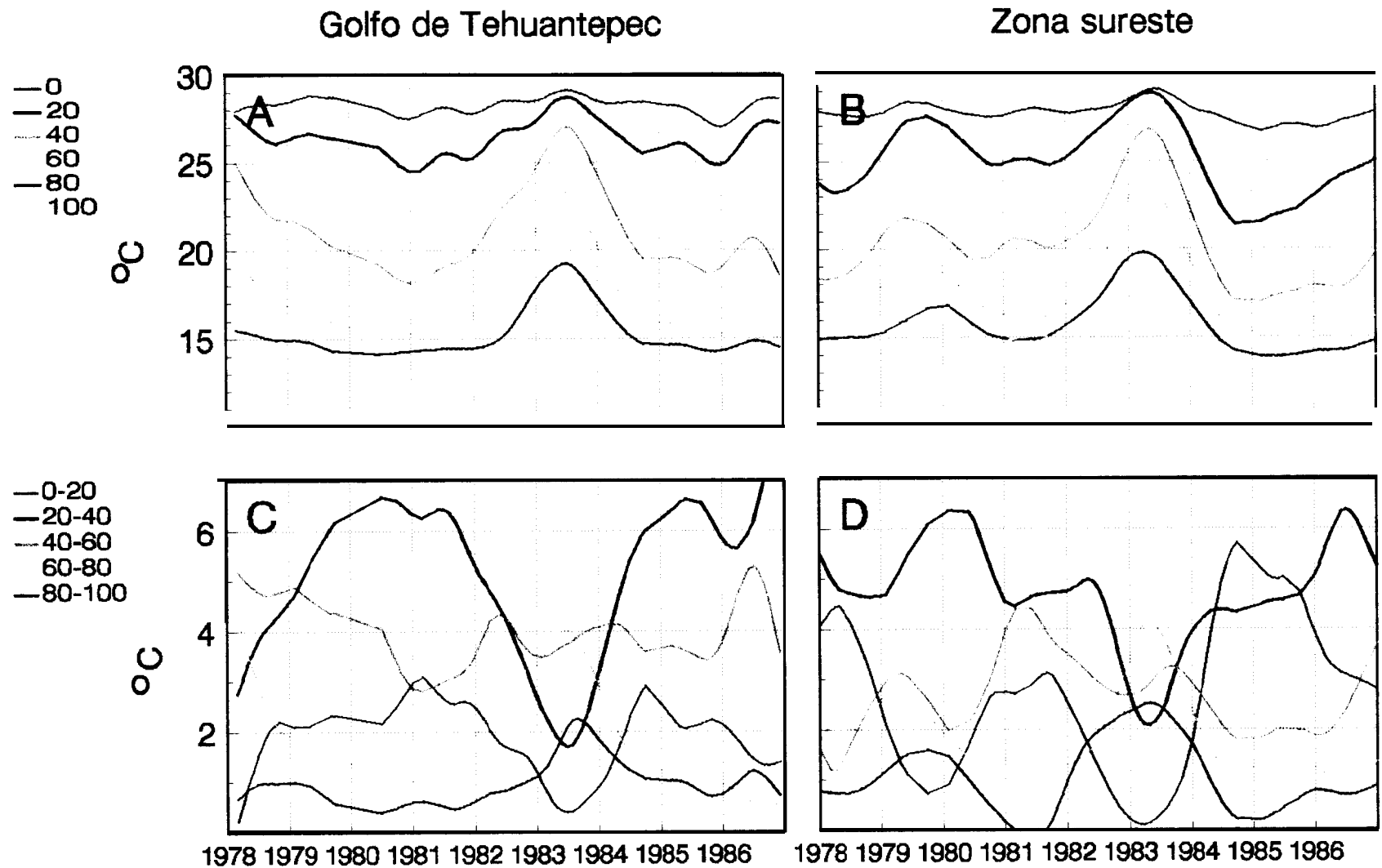


Figura 13. Temperaturas y diferencias de temperaturas (°C) a varios niveles de profundidad (m) en dos zonas dentro del área de estudio. Páneos A y B: Temperaturas a diferentes profundidades para el Golfo de Tehuantepec la zona sureste. Páneos C y D: Gradientes de temperatura (diferencia de temperatura entre niveles de profundidad) para el Golfo de Tehuantepec y la zona sureste.

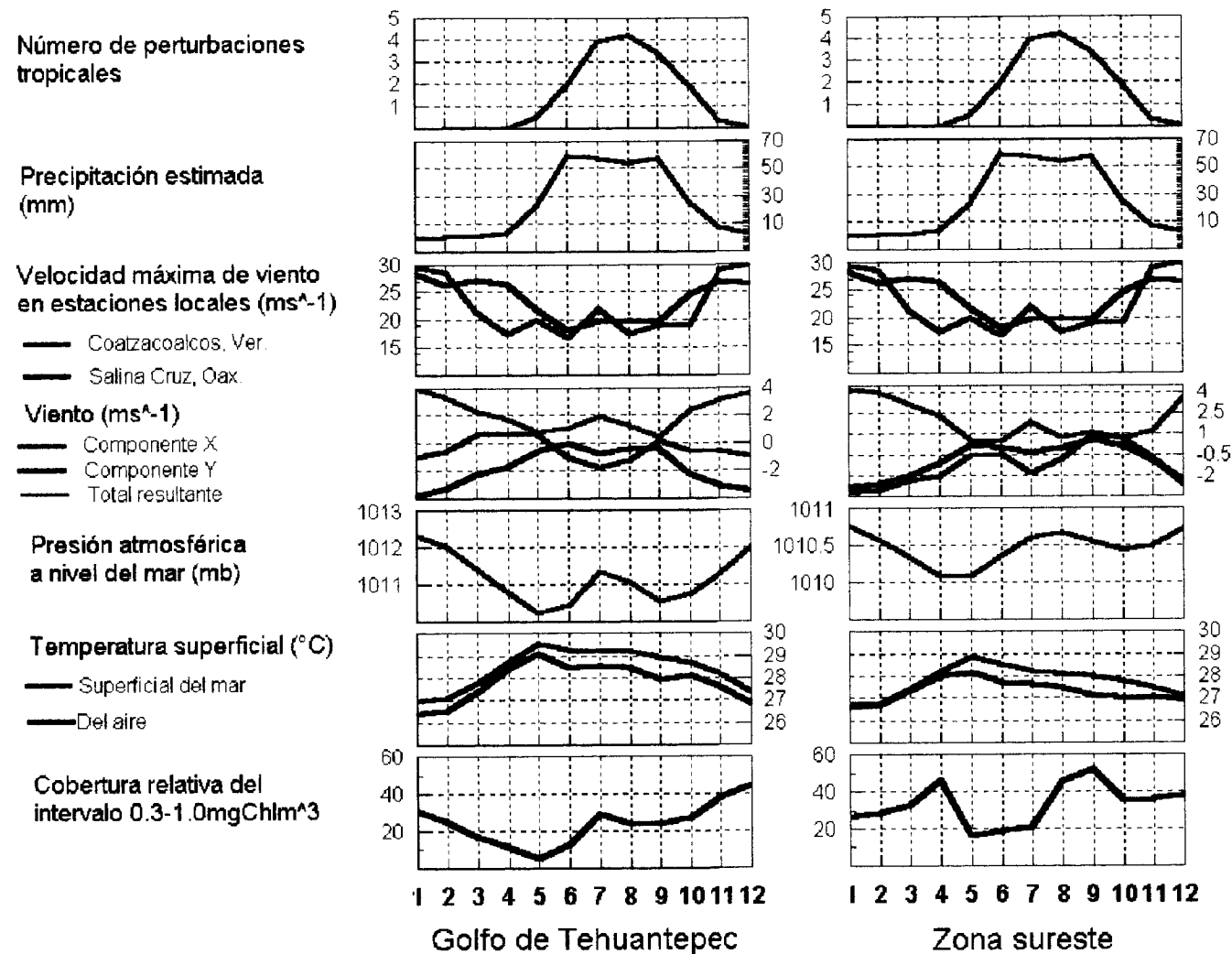


Figura 14. Patrones de diferentes variables ambientales y la cobertura relativa del intervalo 0.3-1.0mgChl/m<sup>3</sup> en dos zonas dentro del área de estudio.

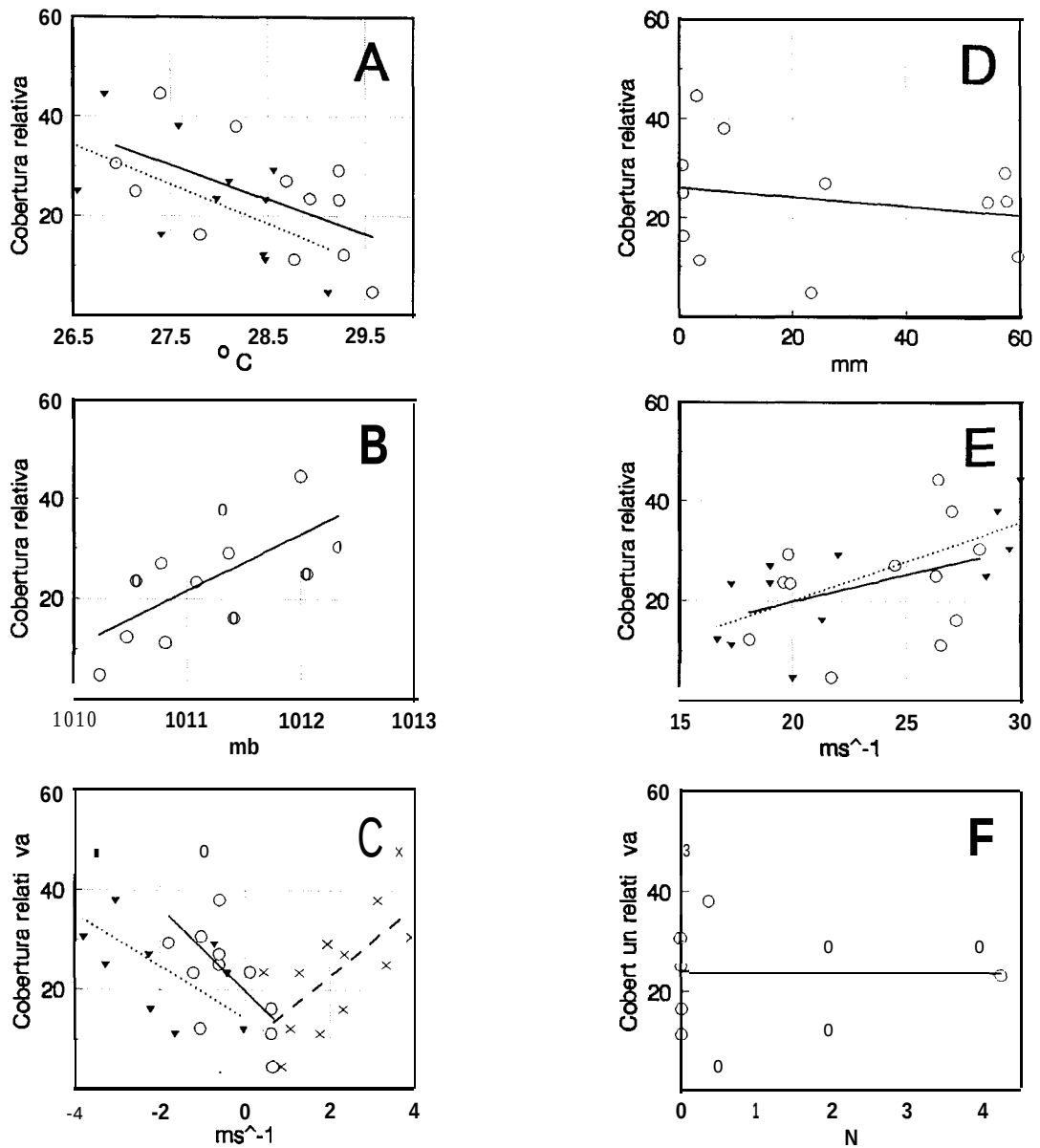


Figura 15. Diagramas de dispersión y rectas de regresión entre diferentes parámetros ambientales y la cobertura relativa del intervalo 0.3-1.0  $\text{mgChl m}^{-3}$  en la zona del Golfo de Tehuantepec. Panel A: Temperatura superficial del mar ( $^{\circ}\text{C}$  —) y temperatura del aire ( $^{\circ}\text{C}$  .....). Panel B: Presión atmosférica. Panel C: Componente zonal ( $\text{ms}^{-1}$  —), Componente meridional ( $\text{ms}^{-1}$  .....), y velocidad total resultante ( $\text{ms}^{-1}$  ---). Panel D: Precipitación estimada. Panel E: Vientos máximos locales en Salina Cruz, Oax ( $\text{ms}^{-1}$  —) y Coatzacoalcos, Ver. ( $\text{ms}^{-1}$  .....). Panel F: Número de perturbaciones tropicales.

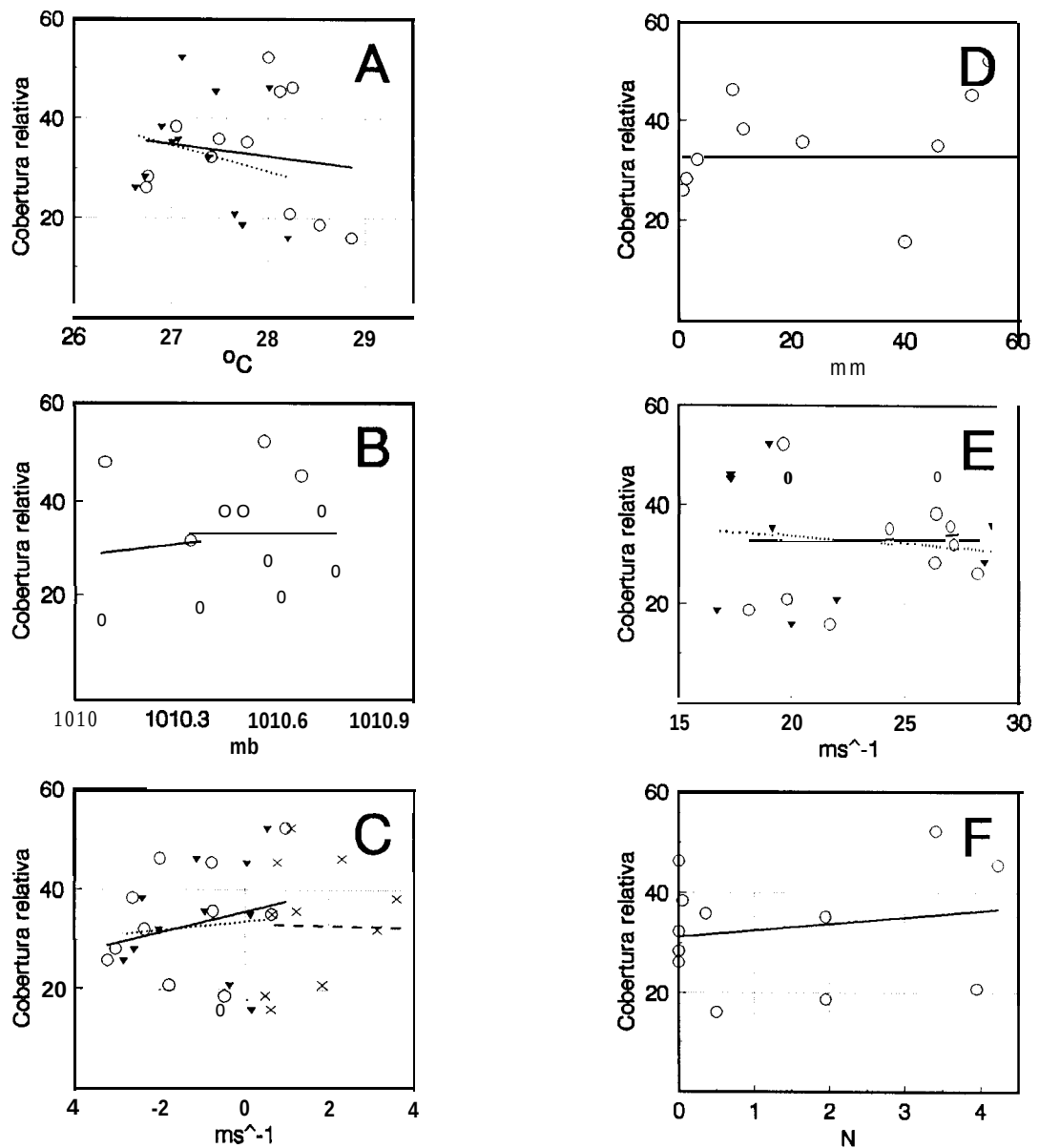


Figura 16. Diagramas de dispersión y rectas de regresión entre diferentes parámetros ambientales y la cobertura relativa del intervalo 0.3-1.  $\text{mgChl}/\text{m}^3$  en la zona sureste. Panel A: Temperatura superficial del mar ( $^{\circ}\text{C}$  —) y temperatura del aire ( $^{\circ}\text{C}$  .....). Panel B: Presión atmosférica. Panel C: Componente zonal ( $^{\circ}\text{C}$  —), Componente meridional ( $^{\circ}\text{C}$  .....), y velocidad total resultante (xxx---). Panel D: Precipitación estimada. Panel E: Vientos máximos locales en Salina Cruz, Oax ( $^{\circ}\text{C}$  —) y Coatzacoalcos, Ver. ( $^{\circ}\text{C}$  .....). Panel F: Número de perturbaciones tropicales.

## **Anexo 2. Tablas**

| Valor en<br>escala de color<br>artificial | Concentración<br>Pigmentaria<br>(mgChl / m <sup>3</sup> ) | Tipo de agua                    | Código de<br>color |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------|--------------------|
| 3-20                                      | <0.06                                                     | Aguas<br>oligotróficas          |                    |
| 20-74                                     | 0.06-0.3                                                  |                                 |                    |
| 74-117                                    | 0.3-1.0                                                   | Aguas verdes                    |                    |
| 117-157                                   | 1.0-3.0                                                   | Aguas<br>eutróficas<br>costeras |                    |
| 158-182                                   | 3.0-6.0                                                   |                                 |                    |
| 182-200                                   | 6.0-10.0                                                  |                                 |                    |
| 200-254                                   | >10.0                                                     |                                 |                    |

Tabla 1 .Intervalos de concentración pigmentaria considerados en el análisis, correspondencia de falso color, concentración pigmentaria calculada mediante el algoritmo de Gordon et al . (1991), tipo de agua y código de color asignado en las ilustraciones.

| PATRON                      | NUMERO DE<br>ELEMENTOS | COMPONENTES DEL<br>GRUPO                                                            | TIPO DE<br>PATRON | NIVEL |
|-----------------------------|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------|
| <b>TIPO 1</b><br>(ROJO)     | 27                     | 17 18 19 31 38 39 43 45 47 48 51 53 54 55<br>56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 | VERANO            | ALTO  |
| <b>TIPO 2</b><br>(VERDE)    | 7                      | 16 27 32 35 42 50 52                                                                | MIXTO             | MEDIO |
| <b>TIPO 3</b><br>(AZUL)     | 16                     | 15 21 22 23 24 25 28 29 30 33 34 36 37 40<br>141 44                                 | INVIERNO          | MEDIO |
| <b>TIPO 4</b><br>(AMARILLO) | 18                     | 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14<br>20 26 46 49                                     | NULO              | BAJO  |

Tabla 2. Resultados del análisis de conglomerados de las **patrones** calculados para los 68 puntos de la red de muestreo. Componentes de cada grupo y características básicas del comportamiento.

|                                      | ZONA 1 | ZONA 2 | ZONA 3 | ZONA 4 | ZONA 5 | ZONA 6 |
|--------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR (°C) |        |        |        |        |        |        |
| ENERO                                | 27.319 | 27.314 | 26.944 | 26.890 | 27.352 | 26.741 |
| FEBRERO                              | 27.089 | 27.480 | 27.143 | 27.051 | 27.411 | 26.761 |
| MARZO                                | 26.828 | 28.093 | 27.803 | 27.904 | 27.975 | 27.413 |
| ABRIL                                | 27.203 | 28.978 | 28.767 | 28.793 | 29.040 | 28.250 |
| MAYO                                 | 28.054 | 29.580 | 29.584 | 29.504 | 29.465 | 28.856 |
| JUNIO                                | 28.821 | 29.019 | 29.278 | 28.802 | 29.079 | 28.527 |
| JULIO                                | 29.248 | 28.525 | 29.225 | 28.312 | 29.020 | 28.216 |
| AGOSTO                               | 29.422 | 28.065 | 29.231 | 28.173 | 28.985 | 28.119 |
| SEPTIEMBR                            | 29.170 | 27.928 | 28.931 | 27.929 | 28.748 | 28.000 |
| OCTUBRE                              | 29.261 | 27.708 | 28.695 | 27.873 | 28.776 | 27.777 |
| NOVIEMBRE                            | 28.792 | 27.765 | 28.167 | 27.688 | 28.508 | 27.491 |
| DECIEMBRE                            | 28.000 | 27.413 | 27.389 | 27.060 | 27.964 | 27.055 |

|                           |        |        |        |        |        |        |
|---------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| TEMPERATURA DEL AIRE (°C) |        |        |        |        |        |        |
| ENERO                     | 26.585 | 27.143 | 26.374 | 26.726 | 27.341 | 26.626 |
| FEBRERO                   | 26.492 | 27.242 | 26.554 | 26.855 | 27.582 | 26.733 |
| MARZO                     | 26.240 | 27.582 | 27.400 | 27.625 | 27.942 | 27.380 |
| ABRIL                     | 26.722 | 28.789 | 28.475 | 28.556 | 28.897 | 28.014 |
| MAYO                      | 27.490 | 28.427 | 29.120 | 28.649 | 28.799 | 28.197 |
| JUNIO                     | 28.200 | 27.600 | 28.449 | 27.787 | 28.330 | 27.730 |
| JULIO                     | 28.562 | 27.344 | 28.561 | 27.543 | 28.342 | 27.647 |
| AGOSTO                    | 28.710 | 27.211 | 28.474 | 27.490 | 28.397 | 27.464 |
| SEPTIEMBR                 | 28.232 | 26.923 | 27.970 | 27.022 | 27.816 | 27.107 |
| OCTUBRE                   | 28.622 | 27.081 | 28.097 | 27.229 | 28.008 | 27.011 |
| NOVIEMBRE                 | 28.056 | 27.356 | 27.581 | 27.268 | 28.114 | 27.071 |
| DECIEMBRE                 | 27.250 | 27.216 | 26.820 | 26.877 | 27.663 | 26.896 |

|                                   |        |        |        |        |        |        |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| PRESION A NIVEL DEL MAR (+1000mb) |        |        |        |        |        |        |
| ENERO                             | 12.754 | 12.150 | 12.326 | 11.807 | 11.743 | 10.771 |
| FEBRERO                           | 12.577 | 12.209 | 12.047 | 11.679 | 11.489 | 10.574 |
| MARZO                             | 11.986 | 11.610 | 11.409 | 11.229 | 11.112 | 10.338 |
| ABRIL                             | 11.337 | 10.987 | 10.801 | 10.761 | 10.611 | 10.090 |
| MAYO                              | 10.587 | 10.623 | 10.234 | 10.445 | 10.338 | 10.081 |
| JUNIO                             | 10.507 | 10.744 | 10.461 | 10.544 | 10.572 | 10.371 |
| JULIO                             | 11.426 | 11.663 | 11.363 | 11.151 | 11.073 | 10.612 |
| AGOSTO                            | 11.063 | 11.343 | 11.082 | 11.117 | 10.952 | 10.674 |
| SEPTIEMBR                         | 10.256 | 11.038 | 10.546 | 10.945 | 10.625 | 10.558 |
| OCTUBRE                           | 11.081 | 11.442 | 10.772 | 10.951 | 10.548 | 10.441 |
| NOVIEMBRE                         | 11.735 | 11.422 | 11.323 | 11.128 | 10.944 | 10.501 |
| DECIEMBRE                         | 12.454 | 12.066 | 11.998 | 11.612 | 11.650 | 10.733 |

| ZONA 1                                | ZONA 2 | ZONA 3 | ZONA 4 | ZONA 5 | ZONA 6 |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| COMPONENTE ZONAL (X) DEL VIENTO (m/s) |        |        |        |        |        |
| 0.436                                 | -5.443 | -1.041 | -4.143 | -2.314 | -3.239 |
| 1.030                                 | -4.939 | -0.609 | -3.840 | -1.852 | -3.046 |
| 2.050                                 | -3.225 | 0.615  | -2.993 | -0.809 | -2.384 |
| 2.163                                 | -3.002 | 0.613  | -2.821 | -1.181 | -1.996 |
| 2.157                                 | -0.129 | 0.656  | -0.336 | -0.739 | -0.571 |
| 0.992                                 | 1.810  | -1.063 | 0.508  | -1.579 | -0.478 |
| -0.412                                | -0.035 | -1.802 | -1.780 | -2.680 | -1.790 |
| -0.027                                | 1.092  | -1.213 | 0.069  | -2.124 | -0.782 |
| 0.336                                 | 2.930  | 0.125  | 1.989  | -0.571 | 0.967  |
| 0.678                                 | 0.522  | -0.606 | 0.423  | -0.550 | 0.630  |
| 0.723                                 | -3.073 | -0.613 | -1.996 | -0.952 | -0.756 |
| 0.350                                 | -4.948 | -0.952 | -4.074 | -1.915 | -2.660 |

|                                            |        |        |        |        |        |
|--------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| COMPONENTE MERIDIONAL (Y) DEL VIENTO (m/s) |        |        |        |        |        |
| -1.524                                     | -2.527 | -3.785 | -3.520 | -1.544 | -2.855 |
| -1.692                                     | -2.640 | -3.270 | -3.478 | -1.076 | -2.623 |
| -1.746                                     | -2.682 | -2.229 | -2.770 | -0.719 | -2.038 |
| -1.426                                     | -2.199 | -1.652 | -1.928 | -0.070 | -1.134 |
| -1.141                                     | -0.315 | -0.548 | 0.009  | 0.181  | 0.168  |
| -0.250                                     | 0.843  | -0.045 | 0.654  | 0.345  | 0.036  |
| 0.194                                      | 1.287  | -0.723 | 0.207  | -0.118 | -0.372 |
| 0.244                                      | 1.877  | -0.420 | 0.612  | 0.233  | 0.055  |
| 0.545                                      | 2.078  | -0.425 | 0.890  | 0.181  | 0.537  |
| -0.427                                     | 1.257  | -2.265 | -0.395 | -0.070 | 0.125  |
| -1.212                                     | -1.090 | -3.048 | -2.151 | -1.006 | -0.953 |
| -1.402                                     | -1.941 | -3.476 | -3.263 | -1.300 | -2.427 |

|                             |        |        |        |        |        |
|-----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| PRECIPITACION ESTIMADA (mm) |        |        |        |        |        |
| 3.631                       | 4.844  | 0.585  | 1.079  | 0.158  | 0.765  |
| 4.713                       | 3.603  | 0.682  | 0.352  | 0.502  | 1.355  |
| 3.486                       | 2.129  | 0.710  | 0.796  | 0.778  | 3.251  |
| 8.328                       | 13.056 | 3.579  | 4.367  | 5.522  | 9.594  |
| 16.973                      | 44.845 | 23.327 | 37.544 | 31.959 | 40.020 |
| 40.874                      | 68.372 | 59.599 | 66.852 | 56.885 | 60.927 |
| 59.305                      | 79.005 | 57.367 | 65.603 | 51.200 | 66.959 |
| 50.077                      | 57.858 | 54.261 | 49.665 | 46.581 | 51.825 |
| 53.694                      | 54.243 | 57.567 | 49.126 | 56.876 | 54.753 |
| 31.272                      | 41.298 | 25.766 | 37.830 | 36.020 | 45.838 |
| 14.092                      | 26.708 | 7.882  | 15.854 | 9.890  | 21.955 |
| 15.564                      | 17.345 | 3.020  | 7.804  | 4.233  | 11.481 |

Tabla 3. Patrones anuales de algunos parámetros ambientales en las seis zonas consideradas dentro del área de estudio.

|                                            | GOLFO DE TEHUANTEPEC |        |         |
|--------------------------------------------|----------------------|--------|---------|
|                                            | a                    | b      | r       |
| TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR            | 219.854              | -6.894 | -0.5527 |
| TEMPERATURA DEL AIRE                       | 245.062              | -7.950 | -0.6141 |
| PRESION ATMOSFERICA A NIVEL DEL MAR        | -11520.000           | 11.416 | 0.6747  |
| COMPONENTE(X) DEL VIENTO                   | 19.814               | -8.266 | -0.5879 |
| COMPONENTE(Y) DEL VIENTO                   | 14.361               | -5.216 | -0.6254 |
| VELOCIDAD TOTAL DEL VIENTO                 | 9.082                | 6.839  | 0.6864  |
| PRECIPITACION ESTIMADA                     | 26.108               | -0.091 | -0.2043 |
| VEL. MAX. DEL VIENTO (SALINA CRUZ, OAX.)   | -2.179               | 1.096  | 0.3523  |
| VEL. MAX. DEL VIENTO (COATZACOALCOS, VER.) | -11.710              | 1.584  | 0.7299  |
| NUMERO DE PERTURBACIONES TROPICALES        | 23.936               | -0.048 | -0.0070 |

|                                            | /ZONA SURESTE |          |         |
|--------------------------------------------|---------------|----------|---------|
|                                            | a             | b        | r       |
| TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR            | 99.944        | -2.411   | -0.1439 |
| TEMPERATURA DEL AIRE                       | 175.467       | -5.214   | -0.2268 |
| PRESION ATMOSFERICA A NIVEL DEL MAR        | -8264.580     | 8.212    | 0.1611  |
| COMPONENTE(X) DEL VIENTO                   | 35.747        | 0 2.0512 | 4 7 5   |
| COMPONENTE(Y) DEL VIENTO                   | 33.826        | 0.871    | 0.0937  |
| VELOCIDAD TOTAL DEL VIENTO                 | 33.299        | -0.152   | -0.0189 |
| PRECIPITACION ESTIMADA                     | 34.393        | -0.046   | -0.0997 |
| VEL. MAX. DEL VIENTO (SALINA CRUZ, OAX.)   | 24.515        | 0.357    | 0.1137  |
| VEL. MAX. DEL VIENTO (COATZACOALCOS, VER.) | 39.856        | -0.305   | -0.1395 |
| NUMERO DE PERTURBACIONES TROPICALES        | 31.207        | 1.308    | 0.1899  |

Tabla 4. Parámetros de regresión y coeficiente de correlación entre los patrones de cobertura relativa del intervalo 0.3-1.0mgChlm<sup>-3</sup> y algunas variables ambientales, para dos zonas dentro del área de estudio