



# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

Facultad de Ciencias Marinas

## EL COLOR DE LAS AGUAS DEL GOLFO DE CALIFORNIA REGISTRADO POR EL CZCS: RELACIONES DE LA BIOMASA FITOPLANCTONICA Y LOS PROCESOS FISICOS DE MEZCLA



**TESIS**

Que para obtener el grado de  
**DOCTOR EN OCEANOGRAFIA COSTERA**  
presenta

**Eduardo Martín Santamaría del Angel**

Ensenada, Baja California, Diciembre de 1994

**UNIVERSIDAD AUTONOMA**

**DE**

**BAJA CALIFORNIA**

**FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS**

**EL COLOR DE LAS AGUAS DEL GOLFO DE CALIFORNIA REGISTRADO  
POR EL CZCS: RELACIONES DE LA BIOMASA FITOPLANCTONICA Y LOS  
PROCESOS FISICOS DE MEZCLA**

***TESIS***

***QUE PARA OBTENER EL GRADO DE***

***DOCTOR EN OCEANOGRAFIA COSTERA***

**PRESENTA:**

**Eduardo Martín Santamaría del Angel.**

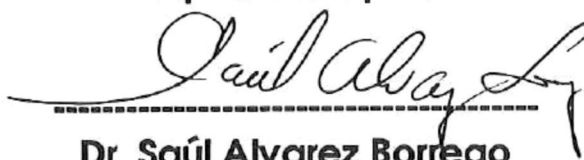
**Ensenada Baja California diciembre de 1994.**

# FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

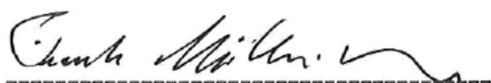
EL COLOR DE LAS AGUAS DEL GOLFO DE CALIFORNIA  
REGISTRADO POR EL CZCS: RELACIONES DE LA BIOMASA  
FITOPLANCTONICA Y LOS PROCESOS FISICOS DE MEZCLA

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTOR EN OCEANOGRAFIA COSTERA

Aprobada por:



Dr. Saúl Álvarez Borrego  
Director de Tesis



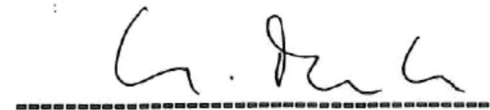
Dr. Frank Müller Karger  
Sinodal



Dr. Alberto Zirino Weiss  
Sinodal



Dr. José A. Zertuche González  
Sinodal



Dr. Helmut Maske  
Sinodal

A Minerva, quien me ha dado su amor, su apoyo, sus consejos, su dedicación y nuestro tesoro más grande..... nuestra niña.

A nuestra niña América quien con sus miradas picaras, su fruncir de cejas, sus reclamos, su empeño por acomodar todo lo que alcanza, sus ganas de probar todo, así como sus constantes BRAVO como señal de aprobación, nos ha enseñado que cualquier situación, no importa lo simple ó pequeña que esta sea, necesita la dedicación, empeño y paciencia de alguien para poderse realizar.

A mi madre María Esther así como a Daniel y Abel, quienes nos hacen sentir su apoyo y cariño incondicional sin importar las distancias.

## AGRADECIMIENTOS.

Al recordar el camino académico que he recorrido, resalta que he sido testigo y participante de la evolución de la Facultad de Ciencias Marinas: en el inicio de mis estudios de licenciatura en la carrera de Ocenólogo en la Escuela Superior de Ciencias Marinas, fui testigo del nacimiento de un nuevo enfoque universitario, en el cual la superación académica era el principal objetivo. Dicho espíritu contagió a la generación XX de la cual soy miembro. Al terminar estos estudios formé parte de la primer generación del programa de Maestría en Oceanografía Biológica que impartía la ahora Facultad de Ciencias Marinas. Hoy al formar parte de la primer generación del Doctorado en Oceanografía Costera he desempeñado en mi Facultad el papel de alumno y maestro tanto en licenciatura como en el posgrado. Por esto la parte más difícil para mí son los agradecimientos, pues no se puede expresar plenamente con palabras las actitudes de apoyo, confianza, aliento y amistad de las cuales he gozado. Con mi estilo un poco gamberro lo único que tengo que decir son **GRACIAS**.

**GRACIAS** a la Universidad Autónoma de Baja California y a mi Facultad de Ciencias Marinas, pues cuando pienso en ellas veo rostros amigos con los cuales puedo contar en cualquier momento. Cada rostro (directivos, administrativos, académicos y alumnos, ya sea quienes son o quienes eran) ha puesto su grano de arena ayudando a la construcción de mi camino.

**GRACIAS** a la University of South Florida (USF) donde realicé una estancia de 6 meses, en especial al laboratorio de Sensores Remotos del Department of Marine Science quienes proporcionaron todos los archivos del CZCS para procesar todas las imágenes de color del océano para aguas mexicanas.

**GRACIAS** al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CoNaCyT) quienes me otorgaron una beca para poder obtener el grado académico.

**GRACIAS** al Dr. Saúl Alvarez Borrego, por su amistad y por *dejarme como criterio* que "para presentar un trabajo hay que ser humildes con nuestros datos, pues así podemos conocer sus limitaciones y ponderar sus verdaderos alcances". Por su amistad y por su ejemplo de que en esta profesión nunca dejamos de estudiar y de aprender.

**GRACIAS** al Dr. Frank Müller Karger, por su amistad, por asesorarme en la estancia que realicé en la USF, así como por enseñarme que en el medio académico, varias personas pueden tener la misma idea al mismo tiempo, y solo se le adjudica la paternidad de esta, a la persona que la publique primero.

**GRACIAS** a los Doctores Alberto Zirino Weiss, José A. Zertuche González y Helmut Maske por que aparte de dar más allá de lo que cualquier sinodal puede dar, me brindaron su amistad, y me enseñaron algunas de las responsabilidades que se adquieren con el grado de Doctor.

**GRACIAS** a Roberto Millán Núñez y a Ramón Cajal Medrano por su amistad, consejos y apoyo. Ellos me han enseñado el significado de un equipo de trabajo en el cual cada logro es el resultado del trabajo integral del equipo. El que yo haya llegado hasta aquí, se debe gran parte al trabajo y ejemplo de ellos.

**GRACIAS** a toda la planta de la Facultad de Ciencias Marinas por que han estado al pendiente del progreso de este trabajo ya sea por sus comentarios de la potencialidad de este campo y desarrollo del trabajo.

Por último pero no menos importante, quiero dar un agradecimiento especial al profesor AMANDO DIEGUEZ COVARRUBIAS quien muy merecidamente es toda una leyenda académica viviente no sólo en la Facultad de Ciencias Marinas, sino que también en toda la Universidad Autónoma de Baja California. Según creo, conoce a todos los ocnólogos, pues la mayoría hemos sido sus alumnos. El trabajo del maestro Dieguez en los primeros semestres de la carrera se ve reflejado en la pasión de los Ocnólogos por los trabajos tanto de laboratorio como de campo. Con su temple y tono de voz, inculcó en los alumnos la mentalidad crítica que caracteriza a los egresados de la Facultad. Por esto, el hablar del perfil del Oceanólogo, es también hablar del trabajo del profesor Dieguez. El me enseñó cómo hay que tratar y cuidar una herramienta de precisión, como es el microscopio, así mismo, fué en su clase donde tuve el primer contacto con el fitoplancton. Muchas veces cuando trato de identificar alguna estructura ya sea en la pantalla de la computadora, en un listado de datos ó en un microscopio, recuerdo la respuesta clásica que nos dió por muchos años cuando le preguntábamos que es lo que estábamos viendo: ".....mire jovencito, lo que usted está viendo en el microscopio es nada menos que una linda y hermosa burbuja....!".

# INDICE.

PORTADA .....	i
APROBACION .....	ii
DEDICATORIA .....	iii
AGRADECIMIENTOS .....	iv
INDICE .....	vi
INDICE DE FIGURAS .....	viii
INDICE DE TABLAS .....	xi
INDICE DE PLACAS .....	xii
RESUMEN .....	1
1.- INTRODUCCION .....	2
2.- AREA DE ESTUDIO .....	8
3.- METODOLOGIA .....	11
3.1.- Coastal Zone Color Scanner (CZCS) .....	11
3.2.- Datos disponibles del CZCS para el Golfo de California .....	18
3.2.1.- Manejo de los datos de la concentración de pigmento derivada de las imágenes del CZCS .....	19
3.2.1.1.- Regiones Biogeográficas del Golfo de California basadas en las imágenes del CZCS .....	22
3.2.1.2.- Relación entre la concentración de pigmento derivada de las observaciones del CZCS y la temperatura superficial como indicadora de procesos de mezcla y/o advectivos en el Golfo de California. ....	25
3.2.1.3.- El Niño 1982-1984 en el Golfo de California, como fue detectado por las concentraciones de pigmento derivadas de las observaciones del CZCS. ....	26
3.2.1.4.- Forzamiento de la marea sobre las concentraciones de pigmento derivadas de las observaciones del CZCS en el Golfo de California .....	27
3.2.1.5.- El sistema de surgencias del Golfo de California. ....	29
4.- RESULTADOS .....	31
4.1.- Regiones biogeográficas y estacionalidad en el Golfo de California .....	31
4.2.- Relación entre los procesos de mezcla y/o advectivos con la concentración de pigmento .....	39

4.3.- El efecto de El Niño 1982-1984 sobre la concentración de pigmento en el Golfo de California . . . . .	47
4.4.- El forzamiento de las mareas sobre la concentraciones de pigmento. . . . .	53
4.5.- El sistema de surgencias en el Golfo de California . . . . .	61
5.- DISCUSIONES . . . . .	84
5.1.- Regiones biogeográficas y estacionalidad en el Golfo de California . . . . .	84
5.2.- Relación de los procesos de mezcla y/ó advectivos con la concentración de pigmento . . . . .	100
5.3.- El efecto de El Niño 1982-1984 en el Golfo de California . . . . .	104
5.4.- El efecto de las mareas sobre la concentración pigmento . . . . .	111
5.5.- El sistema de surgencias en el Golfo de California . . . . .	117
6.- CONCLUSIONES. . . . .	122
7.- REFERENCIAS . . . . .	125
Apéndice I. Análisis estadísticos. . . . .	132
I.1.- Análisis de Componentes Principales (ACP) . . . . .	132
I.2.- Índice de Potencia relativa (Pr) . . . . .	136
Apéndice II. Publicaciones derivadas de este trabajo de tesis. . . . .	137

## INDICE DE FIGURAS.

- Figura 1.- El Golfo de California. Se muestra el nombre de localidades que son mencionadas en el texto, así como la isobata de los 100 m. . . . . 9
- Figura 2.- Detalles del satélite NIMBUS-7 (tomado y traducido de Kirk, 1983). . 12
- Figura 3.- a) Detalles del sistema óptico del Coastal Zone Color Scanner; b) Diagrama de operación del CZCS en el NIMBUS-7 (tomados y traducidos de Kirk, 1983) . . . . . 13
- Figura 4.- Localización geográfica de las 33 localidades . . . . . 21
- Figura 5.- Localización geográfica de los 12 transectos . . . . . 24
- Figura 6.- Regiones Biogeográficas en el Golfo de California. Las 14 regiones son el resultado del análisis de componente principal de las series de tiempo semanales de la concentración de pigmento derivada de las observaciones del CZCS. . . . . 33
- Figura 7.- Series de tiempo de la concentración de pigmento en promedios semanales para las regiones biogeográficas I, II, III, IV, V, VI y VII ejemplificadas por las localidades; 1, 3, 4, 9, 14, 13, y 15 respectivamente. Las concentraciones de pigmento abarcan los años de 1978 a 1986, los números cerca de los picos son las concentraciones máximas alcanzadas por los mismos. Las concentraciones están expresadas en  $\text{mg m}^{-3}$  . . . . . 35
- Figura 8.- Series de tiempo de concentración de pigmento en promedios semanales para las regiones biogeográficas de la VIII a la XIV ejemplificadas por las localidades; 19, 21, 20, 24, 27, 31 y 33 respectivamente. Las concentraciones de pigmento abarcan los años de 1978 a 1986, los números cerca de los picos son las concentraciones máximas alcanzadas por los mismos. Las concentraciones están expresadas en  $\text{mg m}^{-3}$  . . . . . 36
- Figura 9.- Máximos/mínimos y promedios por región biogeográfica para el periodo de mayo de 1983 a junio de 1986: a) Temperaturas superficiales derivadas de las observaciones del AVHRR, expresadas en °C (TSS); b) Concentraciones de pigmento derivadas de las observaciones del CZCS, expresadas en  $\text{mg m}^{-3}$  . 41
- Figura 10.- Relación de la concentración de pigmento (línea) y el coeficiente  $b_1$  (barras) por región biogeográfica . . . . . 46
- Figuras 11.- Series de tiempo de la concentración de pigmento en promedios mensuales y las anomalías de dichas concentraciones para las regiones biogeográficas I, II, III, IV, V, VI y VII ejemplificadas por las localidades; 1, 3, 4, 9, 14, 13, y 15 respectivamente. Las concentraciones de pigmento abarcan los

años de 1978 a 1986, los números cerca de los picos son las concentraciones máximas alcanzadas por los mismos. Para las anomalías sólo abarcan los años de 1979 a 1985. Tanto las concentraciones de pigmento como las anomalías están expresadas en $\text{mg m}^{-3}$ .....	48
Figura 12.- Series de tiempo de la concentración de pigmento en promedios mensuales y las anomalías de dichas concentraciones para las regiones biogeográficas de la VIII a la XIV ejemplificadas por las localidades; 19, 21, 20, 24, 27, 31 y 33 respectivamente. Las concentraciones de pigmento abarcan los años de 1978 a 1986, los números cerca de los picos son las concentraciones máximas alcanzadas por los mismos. Para las anomalías sólo abarcan los años de 1979 a 1985. Tanto las concentraciones de pigmento como las anomalías están expresadas en $\text{mg m}^{-3}$ .....	49
Figura 13.- El efecto de El Niño 1982-1984 en el Golfo de California, el cual es ponderado por el índice de Potencia relativa (Pr) (barras) por región biogeográfica. Se presenta también un índice de energía cinética turbulenta por mareas (TKE) (línea), ponderado por el componente lunar semidiurno M2 de la velocidad de corriente de mareas, también por región, expresado en $\text{cm s}^{-1}$ .	52
Figura 14.- Número de imágenes del CZCS, en composiciones diarias disponibles para el Golfo de California, en todo el período de la vida útil del CZCS .....	54
Figura 15.- El efecto de la marea en el Golfo de California, el cual es ponderado por el índice de Potencia relativa (Pr) (barras) por región biogeográfica. Se presenta también un índice de energía cinética turbulenta por mareas (TKE) (línea), ponderado por el componente lunar semidiurno M2 de la velocidad de corriente de mareas, también por región, expresado en $\text{cm s}^{-1}$ .....	60
Figura 16.- Series de tiempo de la temperatura superficial derivada de las observaciones del AVHRR (TSS) en promedios mensuales para las regiones biogeográficas I, II, III, IV, V, VI y VII. La clave dentro del paréntesis es T por el número de transecto y P por el número del punto dentro del transecto .....	63
Figura 17.- Series de tiempo de la temperatura superficial derivada de las observaciones del AVHRR (TSS) en promedios mensuales para las regiones biogeográficas de la VII a la XIV. La clave dentro del paréntesis es T por el número de transecto y P por el número del punto dentro del transecto. ....	64
Figura 18.- Mapas de isolíneas de las temperaturas superficiales derivadas de las observaciones del AVHRR en condiciones de invierno para las semanas entre el 15 de febrero al 21 de marzo de 1984 .....	68
Figura 19.- Mapas de isolíneas de las temperaturas superficiales derivadas de las observaciones del AVHRR en condiciones de invierno para las semanas entre el 13 de febrero al 19 de marzo de 1985 .....	69

Figura 20.- Mapas de isolíneas de las temperaturas superficiales derivadas de las observaciones del AVHRR en condiciones de invierno para las semanas entre el 12 de marzo al 15 de abril de 1986 ..... 70

Figura 21.- Mapas de isolíneas de la concentración de pigmento derivada de las observaciones del CZCS en condiciones de invierno para los días 25 de febrero de 1984; 4 de marzo de 1985; 19 y 21 de marzo de 1986 ..... 72

Figura 22.- Mapas de isolíneas de las temperaturas superficiales derivadas de las observaciones del AVHRR en condiciones de verano para las semanas entre el 10 de agosto al 13 de septiembre de 1983 ..... 74

Figura 23.- Mapas de isolíneas de las temperaturas superficiales derivadas de las observaciones del AVHRR en condiciones de verano para las semanas entre el 9 de agosto al 12 de septiembre de 1984 ..... 75

Figura 24.- Mapas de isolíneas de las temperaturas superficiales derivadas de las observaciones del AVHRR en condiciones de verano para las semanas entre el 13 de agosto al 16 de septiembre de 1985 ..... 76

Figura 25.- Mapas de isolíneas de la concentración de pigmento derivada de las observaciones del CZCS en condiciones de verano para los días 21 y 22 de agosto, 2 y 6 de septiembre de 1983; 13 y 19 de agosto de 1985 ..... 77

Figura 26.- Mapas de isolíneas de la concentración de pigmento derivada de las observaciones del CZCS en condiciones de invierno para los días 26-28 de marzo y 1, 2, 4 de abril de 1980 ..... 81

Figura 27.- Mapas de isolíneas de la concentración de pigmento derivada de las observaciones del CZCS en condiciones de invierno para los días 5, 6, 7, 10, 11 y 12 de abril de 1980 ..... 82

Figura 28.- Divisiones geográficas del Golfo de California de acuerdo con Gilbert y Allen, (1943) [letras y líneas sólidas] y Round (1967) [números y líneas punteadas] ..... 85

## INDICE DE TABLAS.

Tabla I.- Coordenadas geográficas de las 33 localidades en el Golfo de California .....	20
Tabla II.- Caracterización geográfica de los 12 transectos que cubren la totalidad del Golfo de California .....	23
Tabla III.- Matriz de correlación de Pearson de las series de tiempo de la concentración de pigmento para cada localidad <i>versus</i> los componentes significantes, y sus Eigenanálisis .....	32
Tabla IV.- Descriptores estadísticos de las concentraciones de pigmento ( $\text{mg m}^{-3}$ ) derivada de las observaciones del CZCS en composiciones semanales por región biogeográfica para condiciones invierno y para condiciones de verano	38
Tabla V.- Resumen de los Análisis de Componentes principales aplicados exploratoriamente para definir la relación de las temperaturas derivadas de las observaciones del AVHRR y las concentraciones de pigmento derivadas de CZCS, por región biogeográfica, así como para la totalidad del Golfo. Las variables fueron codificadas binariamente (presencia-ausencia) y fueron repartidas en bloques por arriba y abajo del promedio .....	44
Tabla VI.- Coeficientes $\beta_1$ por región biogeográfica del modelo de regresión lineal descrito por; pigmento = $\beta_0 + \beta_1$ TSS. ** marca que son estadísticamente significativos a un $\alpha=5\%$ con una $t_{\text{crit}} = t_{\alpha/2, n-k} = 1.96$ . La regla de decisión es si el valor absoluto de $t_{\text{cal}} > t_{\text{crit}}$ el coeficiente es estadísticamente significativo. . . .	45
Tabla VII.- Resumen por región biogeográfica de los resultados del análisis de asociación aplicado por localidad entre el estado de la marea y el color del agua para todos los datos disponibles del CZCS en el Golfo de California .....	55
Tabla VIII.- Resumen por región biogeográfica de los resultados del análisis de asociación aplicado por localidad entre el estado de la marea y el color del agua para los datos disponibles del CZCS en el Golfo de California en condiciones de invierno .....	56
Tabla IX.- Resumen por región biogeográfica de los resultados del análisis de asociación aplicado por localidad entre el estado de la marea y el color del agua para los datos disponibles del CZCS en el Golfo de California en condiciones de verano .....	57

## INDICE DE PLACAS.

Placa 1.- Ejemplo de las imágenes en composición semanal para: a) condiciones de invierno semana del 11 al 17 de abril de 1980; b) condiciones de verano semana del 26 al 31 de agosto de 1979. Los números de la escala son la concentración de pigmento en $\text{mg m}^{-3}$ .....	37
Placa 2.- Ejemplo de las imágenes en composiciones diarias para condiciones de invierno para 25-feb-84 y 19-mar-86 .....	66
Placa 3.- Ejemplo de las imágenes en composiciones diarias para condiciones de verano para 21-ago-83 y 14-sep-84 .....	67
Placa 4.- Ejemplo de las imágenes en composiciones diarias para condiciones de invierno para 4 y 5 de abril de 1980 .....	79
Placa 5.- Ejemplo de las imágenes en composiciones diarias para condiciones de invierno para 6 y 7 de abril de 1980 .....	80

## RESUMEN.

Usando las imágenes que generó el *Coastal Zone Color Scanner* (CZCS), se caracterizó la asociación de la concentración de pigmento con y los procesos físicos (mezcla, surgencias etc.) que operan a diferentes escalas espacio-temporales en el Golfo de California. Se dividió a éste con base en las imágenes del CZCS en 14 regiones biogeográficas. Dicha división es más completa en sentido ecológico que las divisiones previas. El número y tamaño de las regiones biogeográficas está en relación directa con la energía cinética turbulenta (TKE) que opera localmente, con mayor número de regiones y más pequeñas en áreas donde operan altas TKE y viceversa. Las concentraciones de pigmento derivadas de las observaciones del CZCS tienen errores, sin embargo, sus series de tiempo son muy consistentes con la dinámica del Golfo, la estacionalidad de las masas de agua, la estacionalidad de las surgencias costeras y los procesos de mezcla que operan en distintas escalas espacio-temporales. En todas las regiones biogeográficas se observa temperaturas superficiales por abajo del promedio regional repercuten en la concentración de pigmento por arriba del promedio regional, y viceversa. La fuerza de esta asociación aumenta de sur a norte. Esto se debe a que las bajas temperaturas superficiales son indicadoras de mezclas de aguas más frías y eutróficas con aguas más cálidas y oligotróficas, originando agua superficial más fría y más rica en nutrientes. En condiciones de verano, esta agua superficial más fría y rica en nutrientes está limitada a la porción de las islas, mientras que las condiciones de invierno facilitan la dispersión de esta agua hacia la porción sur. Los procesos de mezcla y advección en el Golfo de California son los responsables de la fertilización de la capa superficial y por lo tanto de la alta concentración de pigmento. Los eventos El Niño, no afectan a la concentración de pigmento superficial en cada región de la misma manera. En algunas áreas como las regiones en la porción norte así como las de las grandes islas, donde hay una fuerte TKE, el efecto del El Niño fue enmascarado. Solamente en las regiones de la porción sur donde la TKE disminuye, El Niño claramente causó más bajas concentraciones de pigmento. El efecto de un evento El Niño es que refuerza las condiciones de verano, pero la alta TKE que presenta en condiciones de invierno neutralizan la invasión de agua caliente oligotrófica. La región de Canal de Ballenas así como la región al norte de Isla Tiburón mostraron asociaciones excepcionales de los procesos físicos con la concentración de pigmento, por lo que estas regiones son ideales como santuarios y/o zona de reserva de la biosfera, que sirve como refugio para las especies durante eventos El Niño. El sistema de surgencias en el Golfo de California para invierno se comporta como un sistema clásico en el que las aguas frías traen altas concentraciones de nutrientes, los cuales reditúan en altas concentraciones de pigmento. Mientras que en verano se comporta como el sistema de surgencias del Perú durante un evento de El Niño donde el tapón de agua oligotrófica es tan grande que el agua que emerge no cuenta con altas concentraciones de nutrientes, sin embargo se refleja en un leve incremento en la concentración de pigmento.

# 1.- INTRODUCCION.

La descripción sinóptica de la biomasa fitoplanctónica de un cuerpo de agua complejo como el Golfo de California, puede ser llevada a cabo utilizando imágenes de color del océano generadas por sensores remotos en satélite. Hasta hoy estas imágenes sólo se han usado para describir estructuras oceanográficas como remolinos y chorros, sin evaluar los factores que las provocan. En el presente trabajo se pretende explicar la variación de la concentración de pigmento derivada de las observaciones del *Coastal Zone Color Scanner* (CZCS) en función de los procesos físicos de mezcla que operan en diferentes escalas espacio-temporales en el Golfo de California.

La caracterización de los procesos biológicos en relación a los procesos físicos de una manera sinóptica en macro y mesoescala, permitiría un mayor entendimiento de aspectos como el ciclo global del carbón, hasta aspectos pesqueros.

En la actualidad el ciclo global de carbón y su componente de bióxido de carbono atmosférico ha tomado gran relevancia por que el papel de los procesos biológicos por parte del fitoplancton puede alterar significativamente el intercambio de carbón entre la atmósfera y el océano. En otras palabras, la fotosíntesis marina puede reducir la presión parcial de bióxido de carbono en las aguas superficiales, originando que una porción de carbón orgánico recién formado se hunda fuera de la zona fótica. Lo anterior provocaría un efecto neto de flujo de carbón de la atmósfera al océano. Dicho fenómeno es conocido como la "*bomba biológica*" (Lewis, 1992).

El funcionamiento, eficiencia y la existencia de la "*bomba biológica*" han sido cuestionados, principalmente por la carencia de datos que la validen. De ahí se genera

la necesidad de realizar estudios a gran escala basados en la productividad orgánica primaria, para poder tener resultados que prueben o refuten la hipótesis del funcionamiento de dicha bomba.

Para entender el papel biológico dentro de estos flujos, es necesario considerar los procesos físicos, como la irradiancia solar y la energía cinética turbulenta, que afectan fuertemente la dinámica del fitoplancton marino (v.gr. Mackas *et al.*, 1985; Santamaría-del-Angel *et al.*, 1992; entre muchos otros).

Sin embargo, la visualización global de estos procesos biogeoquímicos y físicos puede ser muy difícil tanto en espacio como en tiempo. Una vía para facilitar el estudio sinóptico global de estos procesos es el uso de sensores remotos. Antes del surgimiento de esta herramienta, los estudios oceanográficos podían describir de una manera más o menos confiable los fenómenos a mesoescala, pero cuando se incursionaba en macroescala se tenía que hacer uso de datos que no contaban con una secuencia lógica en espacio y en tiempo, ya que son resultado de diferentes campañas oceanográficas cada una con objetivos, tiempos y lugares diferentes. Aún y cuando las campañas tuvieran intereses similares, las diferencias metodológicas pueden causar una gran variación de los datos.

La NASA en la actualidad cuenta con el programa "*Misión Hacia el Planeta Tierra*" (*Mission to Planet Earth*), el cual tiene como contribuciones específicas el programa EOS (*Earth Observation System*). Dicho programa tiene como objetivo desarrollar tecnologías de observaciones globales. El EOS es el primer esfuerzo coordinado para tomar simultáneamente mediciones de variables que permitan

analizar las interacciones de la atmósfera, océano, continentes y los ciclos hidrológicos y biogeoquímicos (ESSC-NASA, 1988). Estas observaciones se usarán como base para la elaboración de modelos con los cuales se pueda comprender mejor el dinamismo del medio natural.

En la estructura del EOS, el registro del color del océano es un punto importante, representado en un inicio por los proyectos *Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor* (SeaWiFS) por parte de Estados Unidos en 1995 (Hooker *et al.*, 1992). A este sensor le sigue el *Ocean Color Temperature Sensor* (OCTS) por parte de Japón en 1986. A partir de 1988, Estados Unidos, Japón y Europa mantendrán una serie de sensores de color del océano como parte de EOS. El uso potencial de estos datos va a estar en relación directa con el entendimiento global y dinámico del medio marino a diferentes escalas. Para fortalecer este entendimiento, se puede usar la información que generó el *Coastal Zone Color Scanner* (CZCS). Estos datos constituyen una primera etapa dentro de los estudios del color del océano.

Una de las prioridades para el buen funcionamiento de dichos proyectos es la medición en barco de las variables con fines de calibración y validación de datos del color de océano obtenidos por el SeaWiFS y el OCTS (Mueller y Austin 1991). Sin embargo, la tarea de encontrar lugares adecuados de calibración no es fácil, pues dichas áreas deben de cumplir condiciones tales como un bajo porcentaje de nubosidad a lo largo del año, baja contaminación por aerosoles, polvos etc., y presentar un gradiente marcado en un área relativamente pequeña al mismo tiempo que bajos o nulos gradientes en otras áreas cercanas.

Para la calibración de los datos de radiancia del CZCS se utilizaron datos ópticos *in situ* y de concentración de clorofila a de 70 lugares de muestreo que incluyeron localidades en el Atlántico adyacente a Estados Unidos, en el Golfo de México y en aguas adyacentes a Baja California (35.71%), incluyendo el Golfo de California (21.42%) (ver Gordon *et al.*, 1983a). De éstas observaciones resultó fundamentalmente un algoritmo "universal" que se ha aplicado para las aguas oceánicas del mundo.

En dicha calibración, se consideró que la distancia a la costa reducía en gran medida la concentración de nubes y de los otros factores que interfieren en la obtención de los datos. Sin embargo en la actualidad existe un interés general de los investigadores hacia lugares "costeros", los cuales deben de cumplir con las condiciones atmosféricas para la calibración de los nuevos satélites.

Por lo anterior, se puede denotar al Golfo de California como una región de interés dentro de la comunidad científica internacional. El Golfo puede ser considerado un laboratorio natural, que se presta para experimentación de calibración, así como para estudios teóricos (*v.gr.* ver Lavin y Organista, 1988), incluyendo la validación de modelos. Esto se debe principalmente a que en un área relativamente pequeña contamos con una gran cantidad de condiciones bióticas y abióticas que delinean a su vez ecosistemas bien definidos tanto en su localización como en sus ecotonos. Por ejemplo podemos mencionar los fuertes gradientes de concentración fitoplanctónica, originados principalmente por la alta concentración de nutrientes que se encuentran en la zona eufótica que deriva en una alta biomasa fitoplanctónica y consecuentemente

en una alta productividad orgánica primaria en la época de surgencias costeras en la parte este del Golfo (Alvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991).

El Golfo de California cuenta además con una alta producción de especies económicamente importantes (tales como el camarón, pelágicos menores, especies de escamas, tiburón etc.), así como de especies en peligro de extinción (como la vaquita marina y la Totoaba). Esta alta producción secundaria esta reforzada por una alta productividad orgánica primaria.

Las imágenes de color del océano pueden mostrar cuales son las áreas de mayor productividad y se podrá corroborar dichas observaciones con datos de los niveles tróficos secundarios. El Alto Golfo es un ejemplo de dichas áreas debido a que las imágenes del CZCS resaltan altas concentraciones de pigmento, las cuales concuerdan con altas concentraciones de biomasa zooplanctónicas (Farfan y Alvarez-Borrego, 1992), principalmente en la zona aledaña a la isla Montague (en la desembocadura del Rio Colorado). Lo anterior sugiere que esta área puede ser considerada como zona de refugio y alimentación de una gran cantidad de especies. A mediados de 1993, dicha zona fue declarada como zona de reserva de la biosfera. Actualmente existe un gran interés por desarrollar proyectos de camaronicultura, y cultivos de otras especies, en la zona del Alto Golfo de California (aproximadamente la zona somera del triángulo entre San Felipe, Baja California, Santa Clara, Sonora).

El juego de imágenes del CZCS provee series de espacio y de tiempo de la concentración de pigmento, que junto con variables que representen la energía

cinética turbulenta, podemos asociar con base en su covariación las primeras con las segundas.

El objetivo general de este trabajo es caracterizar la asociación entre la concentración de pigmento superficial y los procesos físicos (mezcla, surgencias etc.) que operan a diferentes escalas espacio-temporales en el Golfo de California. Los objetivos particulares son: caracterizar las variaciones espaciales de la biomasa fitoplanctónica observando si existen gradientes asociados a mareas, remolinos y surgencias; y caracterizar la variación temporal desde corta escala con base diaria hasta la variación interanual, es decir desde la ocurrencia cíclica de las mareas vivas-muertas, fenómenos como las surgencias, y cambios causados por El Niño.

## 2.- AREA DE ESTUDIO.

El Golfo de California (Fig. 1) es un mar marginal que se encuentra entre la península de Baja California y la parte continental de México. Tiene aproximadamente 1400 Km de largo y 150 Km de ancho promedio, con una superficie aproximada de 210,000 Km<sup>2</sup> (Roden y Groves, 1959). El sistema montañoso de la península de Baja California, con una altitud de 700 a 1000 m sobre el nivel del mar funciona como una barrera de vientos minimizando la influencia marina del océano Pacífico Baja Californiano, lo cual ocasiona que el clima dentro del Golfo sea más continental que oceánico (Roden, 1964). El clima es más bien cálido y árido, que es más típico de las regiones desérticas en la porción continental que el de la costa de Baja California (Torres-Orozco, 1993).

Topográficamente está dividido en una serie de cuencas y trincheras profundas las cuales están separadas unas de otras por cordilleras transversales (Shepard, 1950). La región norte es relativamente somera (menos de 200 m) con excepción de la cuenca Delfín (Fig. 1). La región sur entre Cabo San Lucas y Cabo Corrientes, es abierta al Pacífico con una profundidad de 3000 m en la entrada (Van Andel, 1964).

El Golfo de California constituye una gran cuenca de evaporación que gana calor a través de su superficie (Lavín y Organista, 1988; Paden *et al.*, 1991). Ripa y Marinone (1989) mencionan que este flujo de calor tiene una importante modulación estacional. Por lo anterior, las aguas del Golfo de California presentan amplios intervalos anuales de temperatura, aunado a salinidades altas (Roden y Groves, 1959; Alvarez-Borrego y Schwartzlose, 1979).

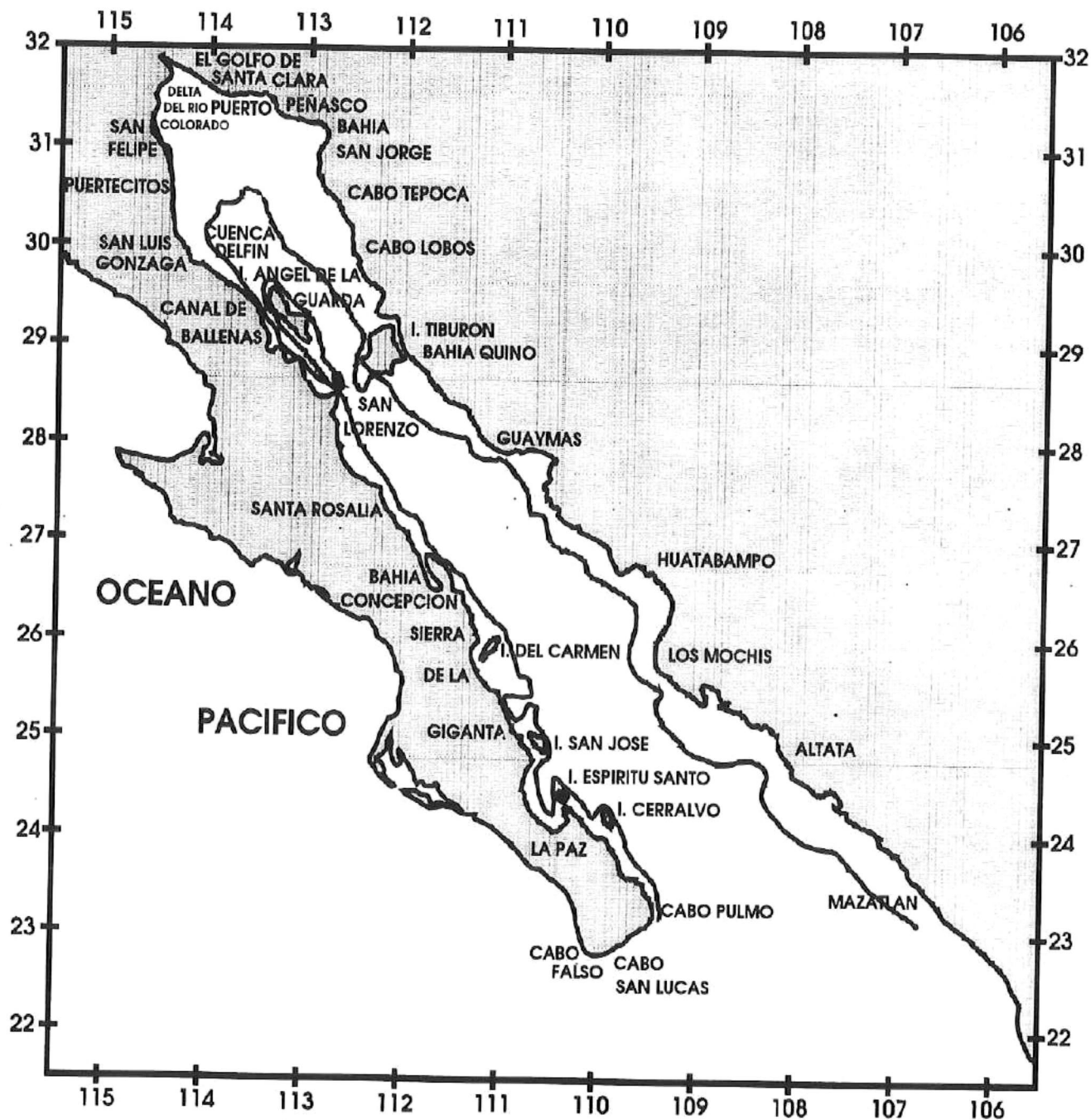


Figura 1.- El Golfo de California. Se muestran el nombre de localidades que son mencionadas en el texto, así como la isobata de los 100 m.

Los vientos dentro del Golfo de California son variables. Vientos del noroeste prevalecen de noviembre a mayo (condiciones de invierno) y del sureste durante el resto del año (condiciones de verano). Los vientos que prevalecen en las condiciones de verano introducen aire húmedo del sur, ocasionando condiciones climáticas más tropicales (Merrifield y Winant, 1989). En la región del Alto Golfo, entre diciembre y febrero es muy común la ocurrencia de eventos de vientos fuertes provenientes del noroeste con duración de dos a tres días. Estos vientos son particularmente fuertes en el Canal de Ballenas que se encuentra entre la costa montañosa de Baja California y la igualmente alta costa de la isla Angel de la Guarda, siendo en ocasiones tan fuertes que hacen imposible la navegación (Roden, 1964).

El Canal de Ballenas, entre la isla Angel de la Guarda y la península, está aislado de la región central del Golfo por una cordillera submarina, cuyo umbral cuenta con una profundidad aproximada de 450 m (Rusnak *et al.*, 1964), donde el intercambio entre la parte norte y sur del Golfo es limitado a aguas relativamente someras. La profundidad máxima del Canal de Ballenas es mayor a 1600 m.

Las masas de agua de la región norte, son de origen local, formadas por el enfriamiento y evaporación excesivas en invierno y por el calentamiento y evaporación en verano, mientras que las masas en la parte sur son aproximadamente las mismas del océano adyacente, modificadas por evaporación. Las masas de aguas superficiales en la región sur son de tres tipos: agua fría de baja salinidad, de la Corriente de California, agua del Golfo de California templada y muy salina, y agua cálida de salinidad intermedia del Pacífico Tropical Oriental (Roden y Groves, 1959).

### 3.- METODOLOGIA.

#### 3.1.- Coastal Zone Color Scanner (CZCS).

El CZCS fue un espectroradiómetro. Los datos captados por él han sido utilizados para estimar la concentración de pigmento en la primera profundidad óptica (una profundidad óptica es igual al inverso del coeficiente de atenuación vertical de luz difusa). El CZCS fue catalogado como un proyecto de "misión de prueba de concepto" (*proof-of-concept mission*) (Hooker *et al.*, 1992). El concepto del CZCS se basa en la posibilidad de estimar la concentración de pigmento fitoplanctónica en base a las radiancias a longitudes de ondas donde se observan mínimos y máximos de absorción de luz por la clorofila.

El CZCS fue lanzado en el satélite *Nimbus-7* en octubre de 1978 (Fig. 2). El sistema óptico (Fig. 3a) consta de varios fotomultiplicadores y prismas que descomponen y despolarizan la luz ascendente para ser detectada en cuatro bandas en la región del visible, cada una de 20 nm de ancho, centradas en 443, 520, 550 y 670 nm. También cuenta con una banda en el infrarrojo cercano (700-800 nm) y otra en el infrarrojo (10.5-12.5  $\mu\text{m}$ ) usada como sensor de temperatura, pero esta última no funcionó satisfactoriamente.

El sensor presentó una actividad de barrido de 78° grados centrados en el nadir y con un campo de visión de 0.0495° (Gordon *et al.*, 1983b) el cual era el resultado de la rotación a 8.1 revoluciones por segundo que realizaba su espejo principal (Kirk, 1983). Lo anterior, aunado a la altura de operación (950 Km) reducía en que captaba

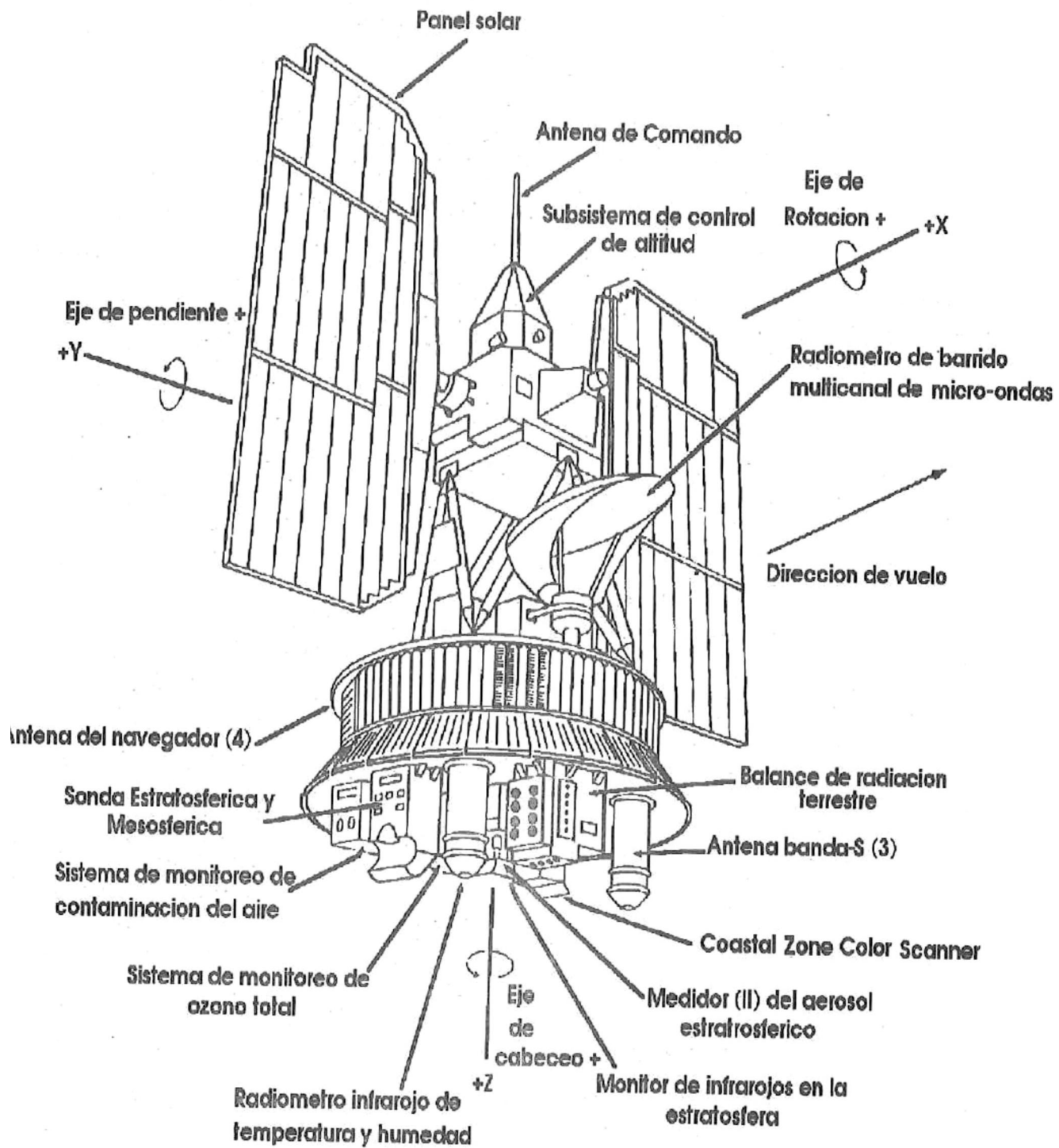


Figura 2.- Detalles del satélite NIMBUS-7 (tomado y traducido de Kirk, 1983).

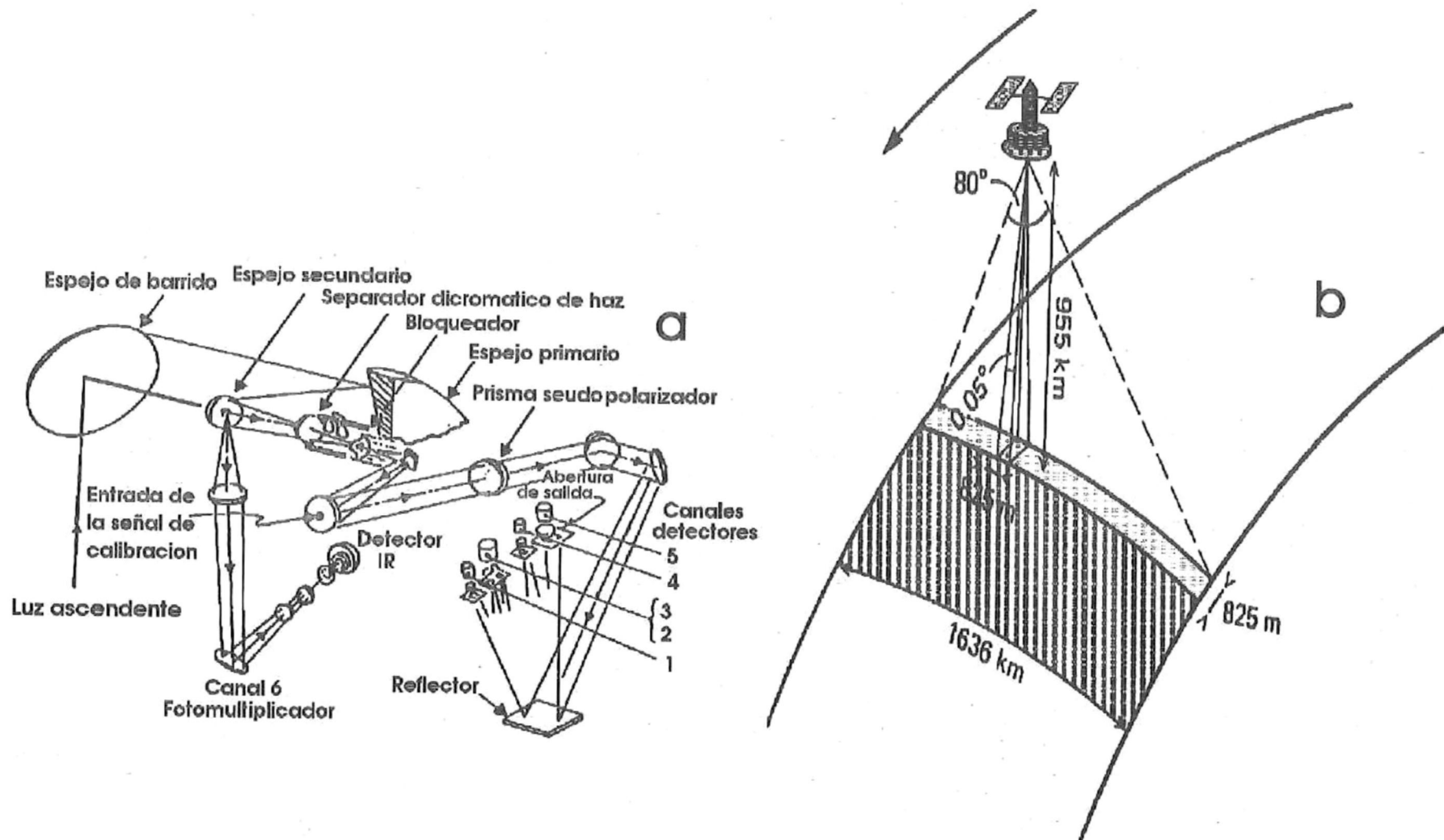


Figura 3.- a) Detalles del sistema óptico del Coastal Zone Color Scanner  
 b) Diagrama de operación del CZCS en el NIMBUS-7 (tomados y traducidos de Kirk, 1983).

elementos de fotografía (foteles) en la superficie del océano de un área de 825 x 825 m<sup>2</sup>, con una franja de barrido de 1636 Km de ancho, (Fig. 3b) (Kirk, 1983).

El satélite orbitaba en el plano del sol (órbita polar), con nodo ascendente cercano al medio día local (Gordon *et al.*, 1983a). Para evitar el reflejo solar en la superficie del mar, el sensor podía tener una inclinación de 20° del nadir (Kirk, 1983).

Las lecturas de las radiancias ascendentes en los canales del CZCS se relacionan con la concentración de clorofila a. Hoy se tienen las suficientes bases como para asegurar que existe un algoritmo confiable por lo menos en aguas Caso I (Morel y Prieur, 1977) y para latitudes menores a 31° (ver como ejemplos Müller-Karger *et al.*, 1989; Müller-Karger *et al.*, 1991; Mitchell, 1994; Banse y English, 1994 entre otros).

Estos algoritmos, utilizan el procedimiento teórico propuesto por Morel (1980), el cual considera la reflectancia de la radiancia ( $R$ ), que es la razón de la radiancia ascendente emergente que proviene justo por debajo de la superficie ( $L_u$ ) entre la irradiancia descendente (que es la integración de todas las radiancias descendentes en un punto) por debajo de la superficie ( $E_d$ ), con la relación:

$$(1) \quad R=L_u/E_d$$

Se sabe que  $R$  es proporcional al coeficiente de dispersión hacia atrás ( $b_b$ ) y al inverso del coeficiente de atenuación ( $a$ ). Por modelación numérica Monte Carlo se ha propuesto que:

$$(2) \quad R=0.33 (b_b/a)$$

Con esta expresión se relaciona la  $R$  que se infiere de los datos del satélite, con la razón  $b_b/a$ . Si se considera que el coseno promedio es constante  $b_b$  está directamente relacionado con los sólidos totales en suspensión. Si se supone que el fitoplancton es el único sólido en suspensión (que serían aguas Caso I de Morel y Prieur, 1977), con mediciones de la concentración de pigmento *in situ* sincronizados al pase del satélite se puede establecer una relación entre la concentración *in situ* y la razón de las radiancias azules y verdes estimadas por el satélite. Debido a que la espectrofotometría del sensor no es capaz de diferenciar entre clorofila de feopigmento y otros productos de degradación provenientes de la clorofila. Por esto las concentraciones de clorofila estimadas por satélite, se refiere a la suma de clorofila más feopigmento. En áreas donde existe material orgánico disuelto de color, éste también afecta las mediciones del satélite. Por lo tanto, es preferible hablar de concentración de pigmento (en el mejor de los casos: pigmentos fotosintéticos) cuando uno se refiere a datos estimados por el CZCS.

El fitoplancton absorbe fuertemente la luz de color azul por lo que un aumento en la abundancia del fitoplancton da, en las detecciones del satélite, una absorción fuerte en la banda azul. Morel y Prieur (1977) encontraron que la razón de la reflectancia de la irradiancia a 440 nm a la de 560 nm disminuye al incrementarse la concentración de pigmento. Esto implica que se puede utilizar como variable independiente el logaritmo de esta razón, y como dependiente el logaritmo de la concentración de pigmento (usaron concentraciones de 0.02 a 20 mg pigmento  $m^{-3}$ ).

Uno de los algoritmos más aceptados para relacionar los datos de radiancia del satélite con mediciones de pigmento *in situ* es el propuesto por Gordon *et al.* (1983a y

1983b). Este ha sido elaborado basado en concentraciones de 0.07 a 78 mg pigmento  $m^{-3}$ . El fundamento se puede expresar como un modelo de regresión lineal simple del cual se generan dos casos, donde su uso depende de las concentraciones. Cuando existen concentraciones menores de 1.5  $mg\ m^{-3}$ , se usa el algoritmo expresado en la ecuación 3:

$$(3) \quad \text{Log}_{10} \text{ pigmento} = 0.053 - 1.71 * \log(Lu^{440} / Lu^{550})$$

Cuando tenemos concentraciones mayores se calcula con la ecuación 4.

$$(4) \quad \text{Log}_{10} \text{ pigmento} = 0.522 - 2.44 * \log(Lu^{520} / Lu^{550})$$

La ecuación 3 se aplica a aguas Caso I. La ecuación 4 es menos precisa por que los canales 520 y 550 nm están muy cercanos. La ecuación 3 no se puede aplicar a situaciones en que la concentración de pigmento sea  $> 1.5\ mg\ m^{-3}$  por que la absorción a 440 nm es muy fuerte con concentraciones elevadas y la señal ( $Lu_{440}$ ) es muy débil.

Estos algoritmos son empíricos y su aplicación a aguas oceánicas fuera del área geográfica de las estaciones hidrográficas donde se hicieron mediciones fluorométricas de pigmentos es cuestionable. Es afortunado que el Golfo de California esté dentro de esta área, por lo que las imágenes del CZCS para el Golfo son muy aceptables.

Los datos telemétricos básicos que transmitía el satélite a tierra constituyen archivos en "nivel 0". Al aplicar los factores de calibración obtenemos las radiancias totales ( $L_T$ ) vistas por el satélite ("nivel 1").

Si a los archivos de "nivel 1" (de aprox. 1 Km de resolución), se submuestran a una tasa de cada 4, se obtienen imágenes de 4 Km de "resolución".

Cuando los datos del "nivel 1" se les aplica las correcciones atmosféricas y son transformados por el algoritmo para estimar la concentración de pigmento (Gordon *et al.*, 1983a y 1988), pasan a un "nivel 2". En este nivel los datos ya no pueden ser retransformados hacia el "nivel 0". Al ajustar estas imágenes a una proyección geográfica y al generar composiciones espacio-temporales de varias escenas individuales se obtienen el "nivel 3". En el "nivel 3" se puede hacer variar la resolución a voluntad al realizar promedios de una caja constituida por un número de foteles arbitrario.

En las imágenes del CZCS las nubes fueron enmascaradas usando una prueba de umbral en la banda 750 nm (canal 5). El procesado de las imágenes del CZCS también incluye máscaras contra el reflejo solar.

Los archivos originales a escala mundial los posee la NASA en el *Goddard Space Flight Center (GSFC)*. Además 8 centros de investigación en Estados Unidos poseen copias de los archivos globales (EOS, 1989). La *University of South Florida, USF*, maneja uno de estos bancos de datos, y fue ahí donde procesé todas las imágenes que generó en su vida útil el CZCS para aguas del Golfo de California, en composiciones mensuales, semanales y diarias. A continuación se describen detalladamente los pasos para la elaboración de estas imágenes y los procesos posteriores a los que fueron sometidas.

### 3.2.- Datos disponibles del CZCS para el Golfo de California.

El objetivo del procesamiento de los datos del CZCS fue generar composiciones cuasi-sinópticas de la concentración de pigmento en aguas superficiales del Golfo de California en el período de toda la vida útil de este sensor (desde octubre de 1978 hasta julio de 1986).

Las imágenes fueron seleccionadas mediante un sistema de proyección de video llamado *BROWSE*. De la revisión de los archivos *BROWSE* se obtuvo un catálogo de imágenes las cuales contienen alguna porción del Golfo de California. Este catálogo se usó para extraer las imágenes a "nivel 2" del archivo digital de la USF.

Una vez obtenidas las imágenes individuales de la concentración de pigmento para las aguas del Golfo, se cartografiaron a una proyección cilíndrica equidistante en un recuadro comprendido por las coordenadas 35° N; 122° W; 18° N; 105° W.

Se llevó a cabo una depuración del número de imágenes, mediante una revisión visual, eliminando las que tuvieron problemas irremediables en el proceso de cartografiado (posiblemente por errores en las rutas de navegación y deriva). Luego se hicieron composiciones diarias, semanales y mensuales, utilizando el promedio aritmético de cada fotel en unidades de pigmento. Para los procesos de cartografiado, depuración y composición, se utilizó el sistema de programas *DSP* de la Universidad de Miami.

En el presente trabajo se usaron como datos auxiliares las temperaturas superficiales (TSS) derivadas de las observaciones del *Advanced Very High Resolution*

*Radiometer (AVHRR)*. Se utilizaron imágenes de 1980 a junio de 1986. Las imágenes del AVHRR se manejaron a nivel semanal, con una resolución espacial de 18 Km por fotel. Para el período de enero de 1980 a abril de 1983 se encontraron muy pocos datos de temperatura del AVHRR para el Golfo California, lo cual fue debido a problemas de nubosidad unidos a la gran cantidad de cenizas en la atmósfera debidas a la erupción del Chichonal .

### **3.2.1.- Manejo de los datos de la concentración de pigmento derivada de las imágenes del CZCS.**

Cuando ya se cuenta con los archivos en nivel 3, se pueden elaborar fotografías con falsos colores que representan las concentraciones de pigmento. Sin embargo, aún se puede explotar más a esta imagen, al submuestrearla colocando estaciones y/o transectos dentro del recuadro del mapa. Con este submuestreo podemos obtener las concentraciones promedio en cajas de ciertas dimensiones, desde una caja de 1X1 fotel (una caja de 4X4 Km) hasta una de 100X100 foteles. En este trabajo, el proceso de submuestreo constó de dos estrategias, siendo la primera la ubicación de 33 localidades individuales y la segunda la generación de 12 transectos dentro del Golfo.

Se ubicaron 33 estaciones dispersas en la totalidad del Golfo de California (Tabla I; Fig. 4). Entre la desembocadura del Río Colorado hasta San Luis Gonzága (B.C.) y Cabo Lobos (Sonora), se localizan 10 estaciones. En el área que cubre la zona entre las Islas de Angel de la Guarda y Tiburón hay 6 estaciones. El área desde Guaymas (Sonora) hasta Los Mochis (Sinaloa) esta cubierta por 10 estaciones. De la Paz (B.C.S.) hasta Altata (Sinaloa) son 4 estaciones. La boca del Golfo esta cubierta con 3 estaciones que van desde Los Cabos (B.C.S.) hasta Mazatlán (Sinaloa). Las 33

**Tabla I.- Coordenadas geográficas de las 33 localidades en el Golfo de California.**

LOCALIDAD GEOGRAFICA	UBICACION	
	LATITUD NORTE	LONGITUD OESTE
1	31° 25'	114° 35'
2	30° 55'	114° 40'
3	31° 15'	114° 15'
4	30° 25'	113° 45'
5	30° 25'	114° 30'
6	30° 20'	113° 50'
7	29° 45'	113° 00'
8	29° 45'	114° 10'
9	29° 50'	113° 35'
10	29° 25'	112° 55'
11	29° 25'	113° 15'
12	29° 35'	113° 05'
13	28° 35'	112° 35'
14	28° 55'	113° 25'
15	28° 50'	113° 00'
16	28° 20'	112° 20'
17	28° 00'	112° 10'
18	28° 00'	111° 30'
19	27° 35'	111° 40'
20	27° 45'	110° 50'
21	26° 55'	111° 30'
22	26° 45'	110° 55'
23	26° 25'	109° 40'
24	25° 55'	111° 00'
25	25° 50'	110° 25'
26	25° 50'	109° 35'
27	24° 30'	110° 32'
28	24° 35'	110° 00'
29	24° 35'	109° 55'
30	24° 35'	108° 10'
31	22° 55'	109° 55'
32	23° 00'	108° 00'
33	23° 15'	106° 45'

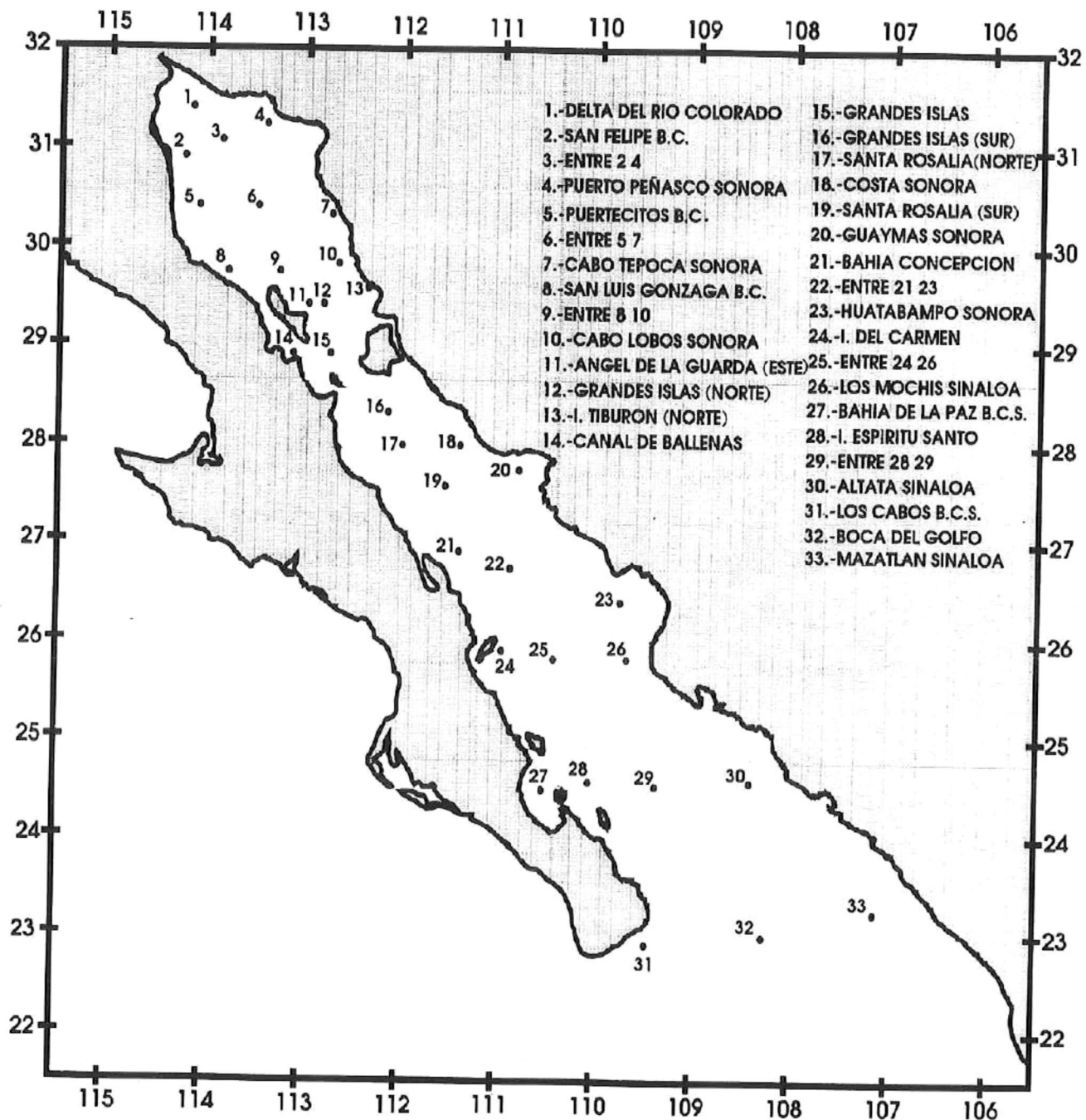


Figura 4.- Localización geográfica de las 33 localidades.

localidades fueron escogidas para que representaran todas las áreas hidrológicas descritas en la literatura, así como que representaran estructuras de color en las imágenes del CZCS.

Así mismo, se generaron 12 transectos a lo largo del Golfo (Tabla II; Fig. 5), tres de ellos desde el Delta hasta la región de las grandes Islas, otros tres en dicha área, tres más en el Golfo central, y los últimos en la porción sur del Golfo. Para cada área con tres transectos, uno está localizado del lado costero de la península, otro cerca de la costa del continente y el último entre ambos.

Todo el proceso anterior dio como resultado que para las 33 localidades y los puntos que constituyen cada uno de los 12 transectos se cuenta con series de tiempo continuas a nivel mensual y cuasi-continuas para la composiciones semanales y diarias.

A las imágenes del AVHRR se les aplicó sólo el mismo procedimiento de extracción de datos en los transectos en que se les aplicó a las imágenes del CZCS, con la salvedad que las imágenes de temperatura se encontraban en composiciones semanales.

### **3.2.1.1.-Regiones Biogeográficas del Golfo de California basada en las imágenes del CZCS.**

El primer paso en este trabajo fue el definir regiones biogeográficas dentro del Golfo a partir de un análisis de covariación de las series de tiempo de la concentración pigmento en las 33 localidades. Para tal fin se usaron las series de 8 años de las 33 estaciones con un dato cada semana, los cuales fueron asociadas en co-variaciones

**Tabla II.- Caracterización geográfica de los 12 transectos que cubren la totalidad del Golfo de California.**

TRANSECTO (CLAVE)	CARACTERIZACION		
	PUNTO INICIAL	PUNTO FINAL	LONGITUD EN Km
T1	31° 25' N; 114° 45' W	29° 50' N; 113° 55' W	208.46
T2	31° 25' N; 114° 35' W	29° 55' N; 113° 30' W	188.42
T3	31° 30' N; 114° 20' W	30° 00' N; 113° 00' W	178.54
T4	29° 30' N; 113° 50' W	27° 45' N; 112° 10' W	197.29
T5	29° 45' N; 113° 25' W	27° 55' N; 111° 50' W	311.38
T6	30° 05' N; 113° 05' W	28° 00' N; 111° 30' W	329.91
T7	27° 30' N; 112° 10' W	24° 30' N; 110° 00' W	380.56
T8	27° 40' N; 111° 40' W	24° 40' N; 109° 30' W	380.44
T9	27° 50' N; 111° 20' W	24° 50' N; 109° 00' W	372.62
T10	24° 00' N; 109° 35' W	21° 00' N; 108° 00' W	336.31
T11	24° 00' N; 108° 45' W	21° 00' N; 107° 00' W	334.56
T12	24° 00' N; 107° 55' W	21° 00' N; 106° 00' W	333.69

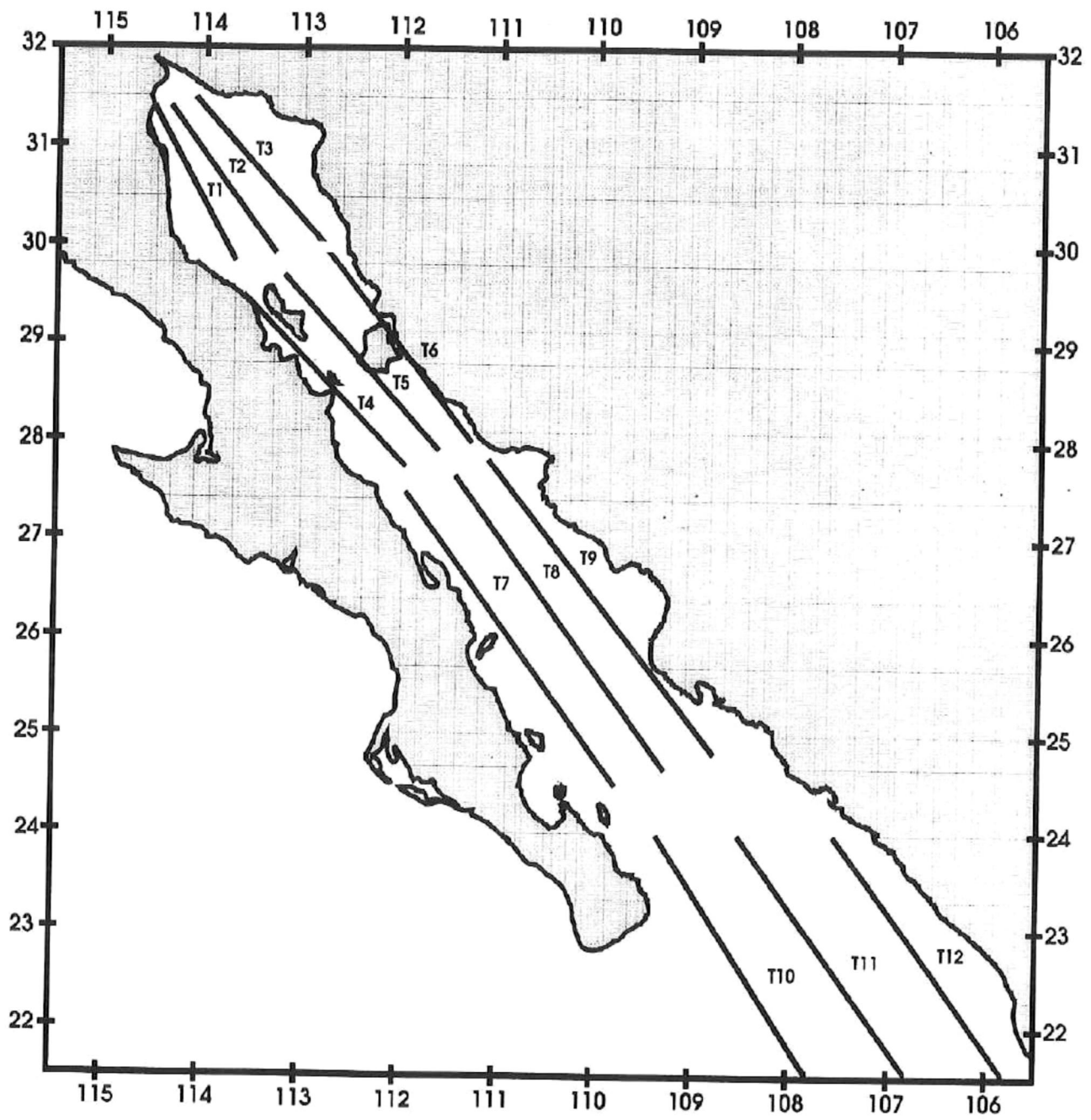


Figura 5.- Localización geográfica de los 12 transectos.

espacio-temporales utilizando un Análisis de Componentes Principales (ACP) basado en una matriz cuadrática de correlación (Apéndice I).

Las localidades que se asociaron dentro del mismo componente no necesariamente forman parte la misma región pues pueden estar espacialmente separadas, lo que puede implicar que un componente pudo representar una ó más regiones biogeográficas. Las 33 localidades por si mismas no son suficientes para delinear las regiones, por lo que fueron usadas las imágenes para delimitar los límites geográficos de dichas regiones.

Debido a que en algunas semanas no hubo imágenes, las series de tiempo semanales de las 33 localidades fueron editadas eliminando dichas semanas que no tienen datos, para evitar el artefacto de concentraciones de pigmento igual a cero; es por esto que algunos meses presentados en las gráficas de las series son más cortos que otros en las mismas series de tiempo.

### **3.2.1.2.- Relación entre la concentración de pigmento derivada de las observaciones del CZCS y la temperatura superficial como indicadora de procesos de mezcla y/o advectivos en el Golfo de California.**

Para explorar esta relación se usaron las series de tiempo de las concentraciones de pigmento y la TSS a nivel mensual, de los puntos de los transectos. Si consideramos que la temperatura superficial puede ser un indicador de los afloramientos de agua, se presenta la hipótesis de una relación inversa entre la TSS y la concentración de pigmento.

Se utilizaron los datos obtenidos considerando todo el Golfo como una sola región, así como los datos dentro de cada región biogeográfica que se generó en el capítulo anterior.

Considerando a la concentración de pigmento y a la TSS como variables, se aplicó un ACP con ambas variables codificadas binariamente (presencia-ausencia), considerando si el dato se encontraba por arriba del promedio o por debajo de él. Una vez obtenida la relación entre las variables codificadas, para ponderar la fuerza de esta relación, se utilizaron los coeficientes  $\beta_1$  como índices de relación. Estos coeficientes fueron derivados mediante un modelo lineal simple (pigmento =  $\beta_0 + \beta_1$  TSS).

### **3.2.1.3.- El Niño 1982-1984 en el Golfo de California, como fue detectado por las concentraciones de pigmento derivadas de las observaciones del CZCS.**

En el período de operación del CZCS ocurrió el evento de El Niño más documentado en la historia de la oceanografía. Con el fin de estudiar su efecto, se usaron los datos mensuales de las concentraciones de pigmento derivadas de las observaciones del CZCS para las 33 localidades. Estos datos fueron transformados en anomalías usando la siguiente ecuación;

$$(5) \text{ Anomalía}_i = X_i - \mu_i$$

donde  $X_i$  es la concentración de pigmento del mes correspondiente y  $\mu_i$  representa el promedio del mes en la serie para la localidad  $i$ .

Para el cálculo de las anomalías sólo se usaron los datos de los años completos de operación del CZCS (de 1979 a 1985). Las anomalías fueron codificadas en dos bloques para los períodos de No-El Niño y de El Niño respectivamente. Para decidir el intervalo de los períodos arriba mencionados se usaron los criterios expuestos por Mee *et al.* (1985), quienes mencionan que el evento de El Niño duró en el Golfo de California desde septiembre de 1982 a junio de 1984.

Para cada localidad fueron contadas el número de anomalías negativas, siendo  $A$  las ocurridas en el período de El Niño y  $B$  las que ocurrieron en No-El Niño. Con estos datos se calculó la probabilidad condicionada, mediante el *Índice de Poder Relativo (Pr)* (Navarro-Fierro, 1988) (Apéndice I), descrito por la siguiente ecuación:

$$(6) \quad Pr = 1 - (Br_1 / Ar_2)$$

donde  $r_1$  es el número de meses para el período de El Niño y  $r_2$  es el número de meses en el período de No-El Niño.

#### **3.2.1.4.- Forzamiento de la marea sobre las concentraciones de pigmento derivadas de las observaciones del CZCS en el Golfo de California.**

Para estudiar las variaciones de la concentración de pigmento de período corto, como las causadas por el efecto de fenómenos asociados a las mareas, se usaron las imágenes a nivel diario. Uno de los problemas principales es que el CZCS no generó datos para el Golfo en forma continua día tras día, ya sea por la presencia de nubes y/o que el sensor estaba apagado. Lo anterior dió como resultado que en las series originales se encuentren muchos días sin datos.

Cada serie para cada localidad fue depurada de los días donde no existían datos de concentraciones de pigmento para evitar el artefacto de concentraciones igual a cero. Estos datos de pigmentos fueron codificados en 8 "colores de agua" en base al siguiente criterio: *agua magentas* aquellas que presentaron concentraciones menores de  $0.1 \text{ mg m}^{-3}$ ; *agua azul* con concentraciones entre 0.1-0.19; *agua verde-azul* con 0.2-0.29; *agua verde* 0.3-0.49; *agua amarilla* 0.5-0.9; *agua roja* 1.00-2.99; *agua café* 3.00-6.99 y *agua blanca* con concentraciones mayores de  $7 \text{ mg pigmento m}^{-3}$ . Para decidir el estado de la marea de cada día se usaron las alturas máximas y mínimas diarias reportadas por la estación mareográfica de Bahía de Los Angeles (B.C.) para el periodo comprendido desde 1-nov-1978 hasta el 30-jun-1986. Con estos datos se calcularon día a día la amplitud de marea, al restar el mínimo del máximo. Dichas amplitudes fueron transformadas a datos Z utilizando la fórmula:

$$(7) \quad Z_{\text{amplitud}_i} = (\text{amplitud}_i - \mu_{\text{amplitud}}) / SD_{\text{amplitud}}$$

donde la  $\mu_{\text{amplitud}}$  y  $SD_{\text{amplitud}}$  son la media aritmética y desviación estándar respectivamente, de todos los días del periodo. En base a estas transformaciones, se codificaron todos los días en 6 condiciones de marea:

- a) *mareas previvas*.- Aquellos días que presentaron valores de  $Z_{\text{amplitud}}$  positivos y en aumento hacia el máximo.
- b) *mareas vivas*.- Aquellos días que presentaron  $Z_{\text{amplitudes}}$  positivas en el máximo.
- c) *mareas posvivas*.- Aquellos días que presentaron  $Z_{\text{amplitudes}}$  positivas pero decreciendo.
- d) *mareas premuertas*.- Aquellos días que presentaron  $Z_{\text{amplitudes}}$  negativas y seguían decreciendo.

- e) *mareas muertas*.- Aquellos días que presentaron  $Z_{amplitudes}$  *negativas* en el mínimo.
- f) *mareas posmuertas*.- Aquellos días que presentaron  $Z_{amplitudes}$  *negativas* pero en aumento.

De los días codificados en las condiciones de marea arriba mencionadas fueron seleccionados aquellos para los que se contaba con datos de concentraciones de pigmento para cada localidad.

Las codificaciones de color de agua y estado de marea fueron usadas para generar nuevas variables cero-valor=>real obteniendo así 8 variables para color de agua y 6 para estado de mareas por localidad. A estas variables se les aplicó un ACP (apéndice 1) con la finalidad de obtener la asociación entre las condiciones de marea y la concentración de pigmento. Una vez obtenidas las asociaciones se ponderó la fuerza de estas, mediante el cálculo de las probabilidades condicionadas derivado del Índice de Potencia Relativa (Pr) (Apéndice I), usando el número de días con  $Z_{amplitudes}$  *negativas* que presentaron concentraciones de pigmento  $> 1 \text{ mg m}^{-3}$  y el número de días en mareas con  $Z_{amplitudes}$  *positivas* con concentraciones  $< 1 \text{ mg m}^{-3}$ .

### **3.2.1.5.- El sistema de surgencias del Golfo de California.**

Se ha estudiado las surgencias por medio de las imágenes del AVHRR en el Golfo de California (ver Badan-Dangon *et al.*, 1985), para el área al sur de las grandes islas surgencias bien desarrolladas el 29 de marzo y el 12 de abril de 1980. Tomando esas fechas se buscaron los datos del CZCS para dos días antes y dos días después de las fechas obteniendo dos períodos, del 27 al 31 de marzo de 1980 y del 10 al 14 de abril del mismo año.

El área que se considera para este capítulo está comprendida entre 24° y 28° 30" N y 110° y 113° W. Se usaron los datos de los transectos T4 al T9 (Fig. 5). Dichos transectos fueron extraídos con una resolución de fotel de 4 Km para los días que cayeron dentro de los dos períodos arriba mencionados. Estos dos períodos sólo abarcaban condiciones de invierno de 1980.

Con el fin de detectar más períodos de surgencias, se usaron los datos extraídos de los transectos T4 al T9 para las imágenes de *temperatura superficial derivada de satélite* (TSS) a nivel semanal con una resolución de fotel de 20 Km. Con estos datos se generaron series de tiempo que fueron depuradas en base al número de semanas continuas de datos para el AVHRR y en base al número de días continuos para el CZCS (del primer tercio de 1983 a la primera mitad de 1986).

Se tomó el criterio de que una surgencia es detectada en la superficie por cambios bruscos de temperatura (de  $\pm 2$  °C) en un período corto. Analizando las series de tiempo de la TSS, se tomaron dos semanas antes, y dos después de la surgencia, así como la semana en que se detectó, quedando la evolución del evento de surgencia cubierto por cinco semanas. Basándose en la malla de puntos/transectos obtenida, se realizaron mapas de isotermas superficiales por semana de los eventos. Para los datos de la concentración de pigmento se seleccionaron los días de los eventos de surgencias detectados por el AVHRR, y se generaron mapas de isolíneas esta para cada día.

## **4.- RESULTADOS.**

### **4.1.- Regiones biogeográficas y estacionalidad en el Golfo de California.**

Considerando a las series de tiempo semanales de la concentración de pigmento por localidad como variables independientes, se les aplicó un análisis de asociación con el fin de definir las localidades que presentaran una co-variación espacio-temporal. La interpretación del ACP fue en su forma numérica, basada en los coeficientes de correlación de Pearson de las variables contra los componentes (ver apéndice 1) (Tabla III).

Resultaron 14 regiones biogeográficas (Tabla III), cuya forma y tamaño (Fig. 6) se definió al detalle con ayuda de las imágenes del CZCS. La región biogeográfica I (localidades 1 y 2) corresponde al Delta del Río Colorado e incluye la parte marina de la reserva de la Biosfera del Alto Golfo; la región II (localidades 2, 3, 5, 6 y 8), es el Alto Golfo de Baja California; la III (localidades 4 y 7) es el Alto Golfo de Sonora; la IV (localidad 9) representa el giro central en el Norte del Golfo; la V (localidad 14) es el Canal de Ballenas; la VI (localidad 13) se ubica al norte de Isla Tiburón; la VII (localidades 10, 11, 12, 15, 16, y 17) es la región entre las Grandes Islas; la VIII (localidad 19) corresponde al área de Santa Rosalía; la IX (localidades 21 y 22) a la de Bahía Concepción; la X (localidades 18, 20, 23, 26, y 30) representa todo el sistema costero de Sonora-Sinaloa (con surgencias de invierno), desde Bahía Quino hasta Altata; la XI (localidades 24, 25, 28 y 29) es el área frente a la Sierra de la Giganta; la XII (localidad 27) es la Bahía de la Paz; la XIII (localidades 31 y 32) es la Boca del

**Tabla III.- Matriz de correlación de Pearson de las series de tiempo de la concentración de pigmento para cada localidad versus los componentes significantes y sus Eigenanálisis.**

Localidades	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9
1	+0.08	-0.25	+0.12	-0.16	-0.15	<u>+0.33</u>	-0.04	+0.20	-0.17
2	+0.12	<u>-0.26</u>	+0.18	-0.18	-0.21	<u>+0.26</u>	-0.05	+0.06	-0.15
3	+0.15	<u>-0.30</u>	+0.11	-0.26	+0.07	-0.27	-0.14	-0.10	+0.11
4	+0.12	-0.23	+0.12	-0.06	-0.04	+0.12	-0.12	<u>-0.39</u>	-0.04
5	+0.18	<u>-0.26</u>	+0.16	-0.23	+0.02	-0.08	-0.11	+0.08	+0.16
6	+0.19	<u>-0.29</u>	+0.05	-0.18	+0.16	-0.28	-0.13	-0.01	+0.13
7	+0.14	-0.18	-0.00	+0.20	+0.11	+0.10	+0.13	<u>-0.37</u>	-0.15
8	+0.15	<u>-0.25</u>	+0.00	+0.24	-0.04	+0.18	+0.21	-0.02	+0.15
9	<u>+0.25</u>	-0.10	-0.08	+0.09	+0.13	-0.19	+0.04	+0.12	-0.02
10	+0.16	+0.01	<u>-0.21</u>	+0.19	+0.13	-0.10	-0.08	-0.01	-0.08
11	+0.18	-0.16	<u>-0.22</u>	+0.17	-0.11	-0.12	-0.05	-0.00	-0.00
12	+0.21	-0.01	<u>-0.21</u>	+0.22	-0.04	-0.17	-0.14	+0.07	-0.08
13	+0.18	-0.09	-0.13	+0.18	+0.15	<u>+0.25</u>	-0.04	-0.12	-0.00
14	+0.09	-0.09	-0.08	+0.21	-0.24	+0.23	-0.11	+0.30	<u>+0.35</u>
15	+0.18	-0.11	<u>-0.25</u>	+0.20	-0.12	-0.04	-0.08	+0.09	+0.02
16	+0.20	+0.03	<u>-0.36</u>	-0.27	+0.03	+0.01	+0.14	+0.03	-0.03
17	+0.18	+0.12	<u>-0.37</u>	-0.35	-0.00	+0.13	+0.09	+0.00	+0.01
18	+0.20	+0.07	+0.13	-0.09	-0.20	-0.08	<u>+0.25</u>	+0.05	-0.06
19	+0.18	+0.11	+0.02	-0.13	-0.11	-0.20	+0.07	+0.13	<u>-0.23</u>
20	+0.16	-0.01	+0.12	+0.08	-0.19	+0.13	<u>+0.43</u>	-0.08	+0.07
21	+0.22	+0.18	+0.04	-0.06	<u>-0.27</u>	-0.02	+0.00	+0.03	+0.06
22	+0.20	+0.23	+0.05	-0.09	<u>-0.31</u>	-0.06	+0.07	+0.03	-0.02
23	+0.20	+0.07	+0.17	+0.08	+0.16	+0.00	<u>+0.31</u>	-0.04	-0.02
24	+0.21	<u>+0.25</u>	+0.09	+0.04	-0.02	+0.02	-0.18	-0.10	-0.09
25	+0.20	<u>+0.24</u>	+0.01	+0.11	+0.02	-0.08	-0.16	-0.07	-0.10
26	+0.19	+0.14	+0.18	+0.00	+0.15	+0.00	<u>+0.23</u>	-0.02	-0.11
27	+0.07	+0.12	-0.31	-0.35	+0.30	<u>+0.37</u>	+0.05	-0.09	+0.13
28	+0.20	<u>+0.30</u>	+0.15	+0.00	+0.05	+0.08	-0.21	-0.17	+0.15
29	+0.19	<u>+0.28</u>	+0.22	+0.01	+0.10	+0.17	-0.22	-0.14	+0.11
30	+0.15	-0.08	+0.14	+0.11	+0.22	+0.05	<u>+0.37</u>	+0.19	+0.02
31	+0.08	+0.09	+0.12	+0.07	+0.11	+0.22	-0.21	<u>+0.39</u>	+0.21
32	+0.00	+0.10	+0.04	-0.02	-0.01	-0.20	+0.24	<u>+0.68</u>	-0.11
33	+0.06	+0.03	+0.15	-0.02	<u>-0.43</u>	-0.05	+0.07	+0.35	-0.15
Eigenvalor	9.07	2.61	2.10	1.60	1.46	1.23	1.20	1.04	1.02
Proporcional	0.27	0.07	0.06	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03
Acumulativa	0.27	0.35	0.41	0.46	0.51	0.54	0.58	0.61	0.64
Región	IV	II,XI	VII		IX,XIV	I,VI,XII	X	III,XIII	V,VIII

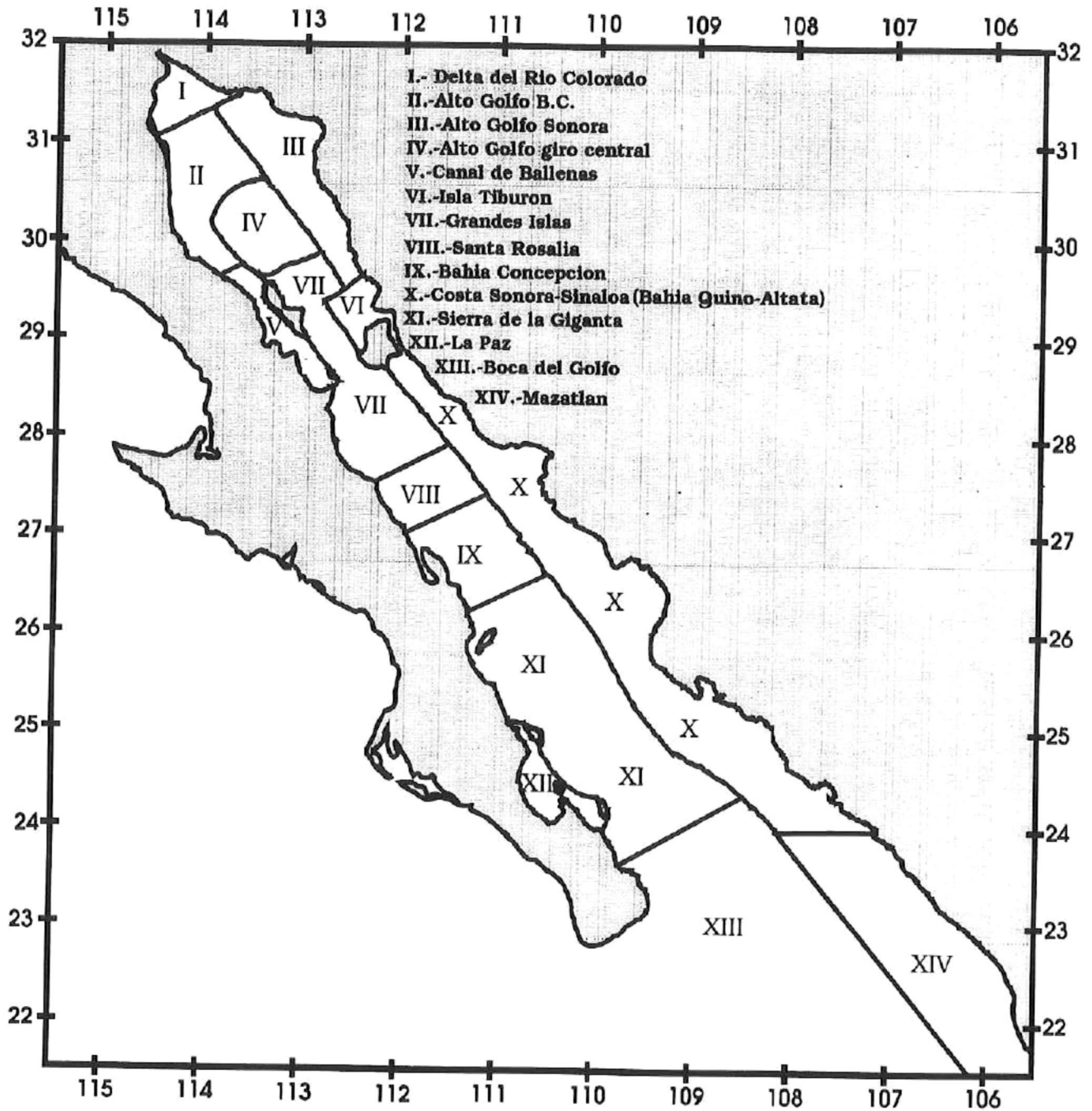


Figura 6.-Regiones Biogeográficas en el Golfo de California. Las 14 regiones son el resultado del análisis de componente principal de las series de tiempo semanales de la concentración de pigmento derivada de las observaciones del CZCS.

Golfo; y la XIV (localidad 33) representa la parte costera continental de la boca del Golfo aledaña a Mazatlán.

En general el tamaño de las regiones biogeográficas aumenta de norte a sur, así mismo el número de ellas decrece de norte a sur, encontrándose el mayor número de regiones, así como las más pequeñas en las regiones de mezcla más intensa por la presencia de islas (V, VI y XII) y el norte del Golfo ( I, II, III y IV) (Fig. 6).

Las series de tiempo de la concentración de pigmento (Fig. 7 para las regiones I-VII y Fig. 8 para las regiones VIII-XIV), muestran en general una clara variación estacional, con concentraciones máximas entre noviembre y mayo ("*condiciones de invierno*") y mínimas entre junio y octubre ("*condiciones de verano*"). Estas condiciones se reflejan claramente en las imágenes del CZCS (Placa 1a para condiciones de invierno y 1b para verano). En general se observa que durante condiciones de invierno, las concentraciones de pigmento son altas en casi todo el Golfo, y solamente son bajas en la boca del Golfo. Para condiciones de verano, se encuentran en general bajas concentraciones de pigmento en la totalidad del Golfo, solamente hay altas concentraciones de pigmento en las aguas adyacentes a las grandes Islas (Angel de la Guarda y Tiburón, región biogeográfica VII) y en las aguas adyacentes al Delta del Río Colorado (región I).

En general, a lo largo de todo el Golfo la diferencia entre las dos estaciones es dramática, (Tabla IV) con valores tan altos como  $10 \text{ mg m}^{-3}$  durante condiciones de invierno y tan bajas como menos de  $0.1 \text{ mg m}^{-3}$  durante el verano. Las regiones de la reserva de la Biosfera y el Canal de Ballenas (regiones I y V) son la excepción, la

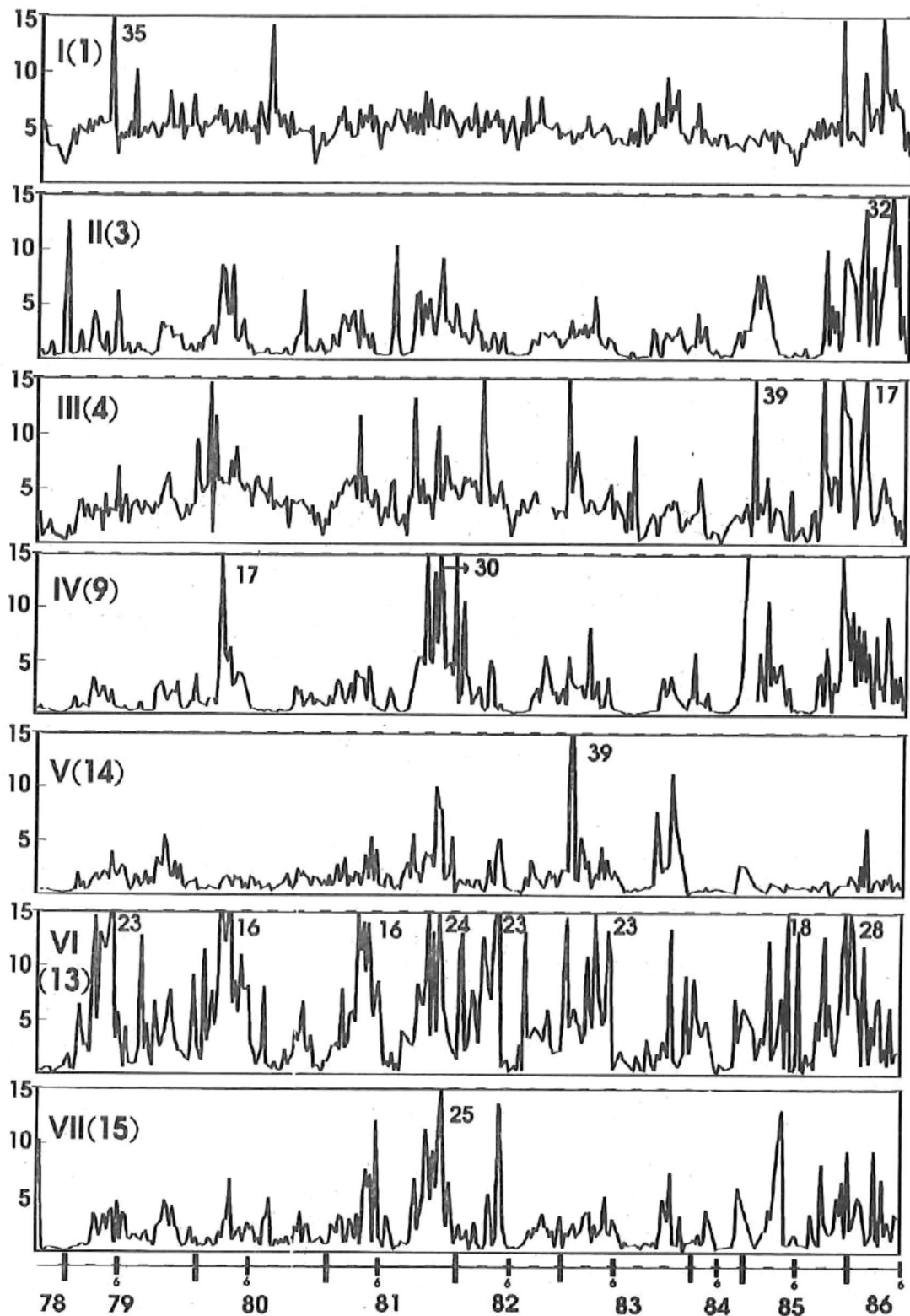


Figura 7.- Series de tiempo de la concentración de pigmento en promedios semanales para las regiones biogeográficas I, II, III, IV, V, VI y VII ejemplificadas por las localidades; 1, 3, 4, 9, 14, 13 y 15 respectivamente. Las concentraciones de pigmento abarca los años de 1978 a 1986, los números cerca de los picos son las concentraciones máximas alcanzadas por los mismos. Las concentraciones están expresadas en  $\text{mg m}^{-3}$ .

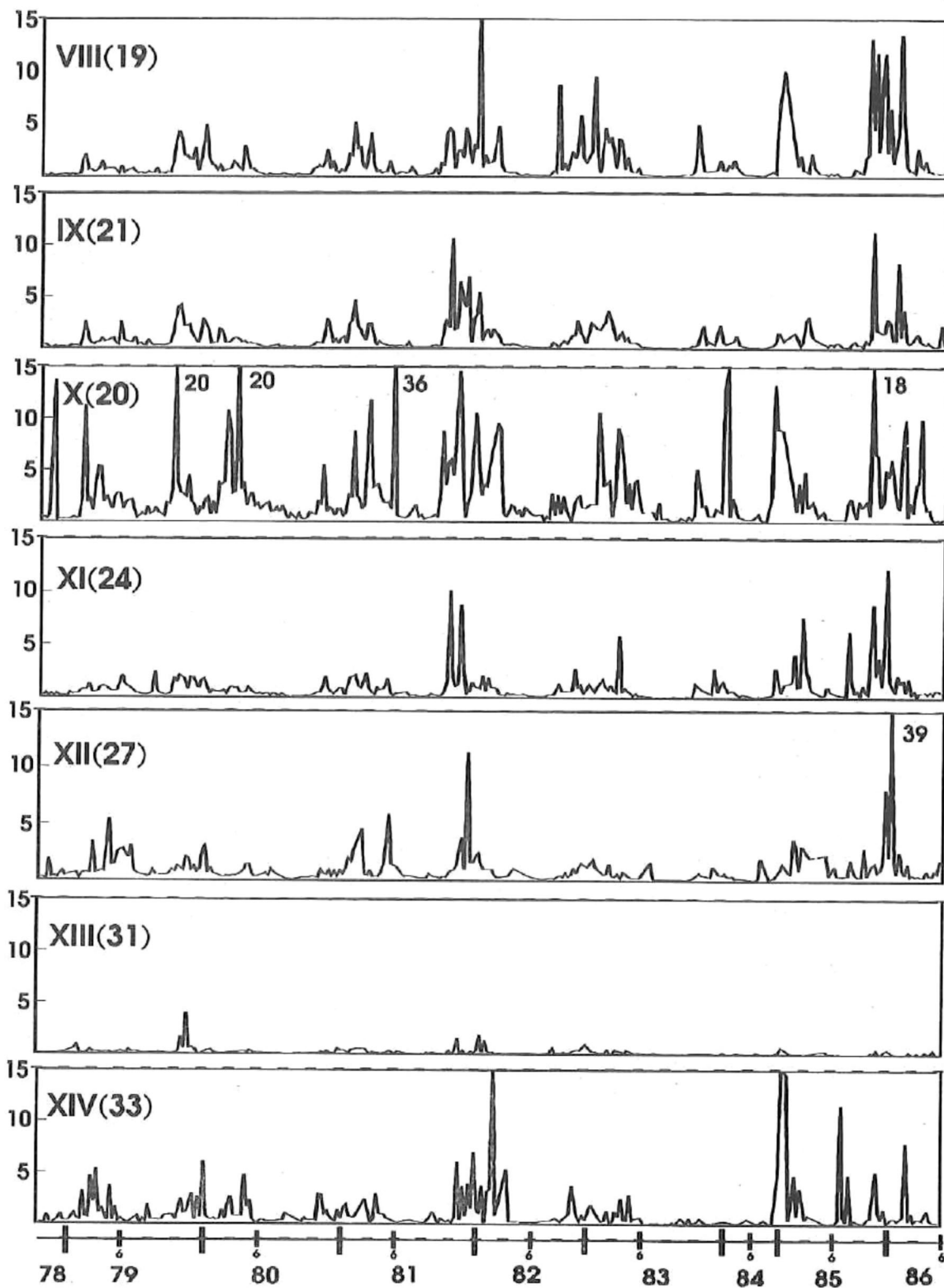
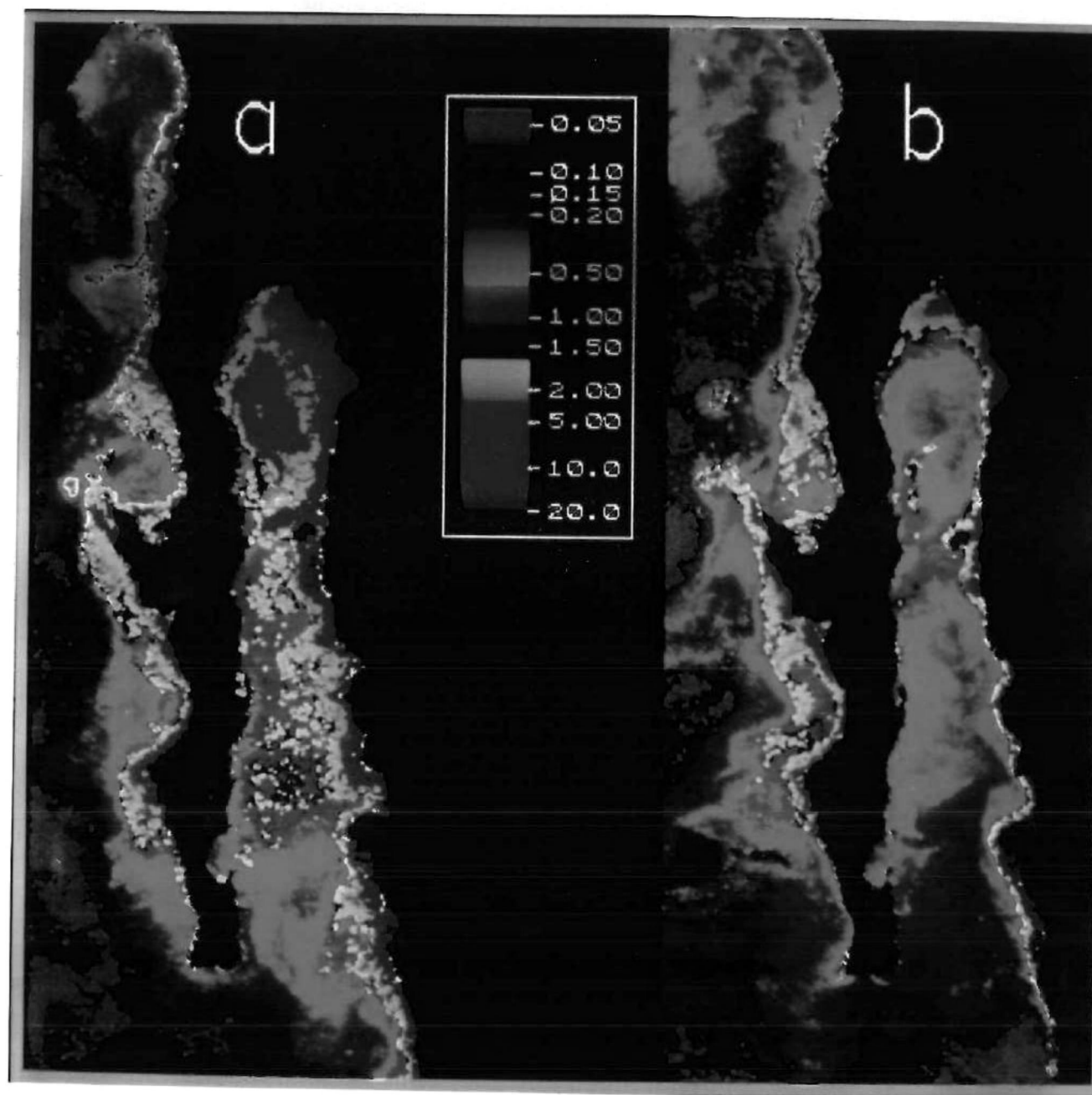


Figura 8.- Series de tiempo de la concentración de pigmento en promedios semanales para las regiones de la VIII a la XIV ejemplificadas por las localidades 19, 21, 20, 24, 27, 31 y 33 respectivamente. Las concentraciones de pigmento abarcan los años de 1978 a 1986, los números cerca de los picos son las concentraciones máximas alcanzadas por los mismos. Las concentraciones están expresadas  $\text{mg m}^3$ .



Placa 1.- Ejemplo de las imágenes en composición semanal para; a) condiciones de invierno semana del 11 al 17 de abril de 1980; b) condiciones de verano semana del 26 al 31 de agosto de 1979. Los números de la escala son la concentración de pigmento en mg m<sup>-3</sup>.

**Tabla IV.- Descriptores estadísticos de las concentraciones de pigmento ( $\text{mg m}^{-3}$ ) derivadas de las observaciones del CZCS en composiciones semanales por región biogeográfica para condiciones de invierno y para condiciones de verano.**

Región	Promedio		Mediana		Mínimo		Máximo	
	invierno	verano	invierno	verano	invierno	verano	invierno	verano
I	5.34	5.06	5.85	4.85	1.65	1.69	35.55	14.25
II	3.33	1.30	2.15	0.60	0.30	0.13	32.55	10.33
III	4.47	3.37	3.63	3.32	0.34	0.08	39.81	14.93
IV	3.24	0.94	2.01	0.41	0.10	0.04	30.52	6.36
V	1.94	1.49	1.36	0.97	0.05	0.26	39.81	7.81
VI	6.03	3.33	4.55	1.97	0.04	0.17	29.82	23.78
VII	2.62	1.85	1.76	1.14	0.08	0.33	25.43	13.74
VIII	1.95	0.51	1.00	0.29	0.06	0.07	16.83	8.74
IX	1.41	0.41	0.81	0.29	0.16	0.10	11.31	2.82
X	3.69	1.09	2.17	0.70	0.06	0.12	36.26	20.11
XI	1.21	0.49	0.75	0.30	0.14	0.04	12.25	6.29
XII	1.35	0.60	0.72	0.41	0.09	0.12	39.81	3.14
XIII	0.28	0.15	0.18	0.14	0.05	0.04	4.01	0.61
XIV	1.53	0.63	0.61	0.35	0.09	0.06	28.67	11.65

**Tabla IV.- Descriptores estadísticos de las concentraciones de pigmento ( $\text{mg m}^{-3}$ ) derivadas de las observaciones del CZCS en composiciones semanales por región biogeográfica para condiciones de invierno y para condiciones de verano.**

Región	Promedio		Mediana		Mínimo		Máximo	
	invierno	verano	invierno	verano	invierno	verano	invierno	verano
I	5.34	5.06	5.85	4.85	1.65	1.69	35.55	14.25
II	3.33	1.30	2.15	0.60	0.30	0.13	32.55	10.33
III	4.47	3.37	3.63	3.32	0.34	0.08	39.81	14.93
IV	3.24	0.94	2.01	0.41	0.10	0.04	30.52	6.36
V	1.94	1.49	1.36	0.97	0.05	0.26	39.81	7.81
VI	6.03	3.33	4.55	1.97	0.04	0.17	29.82	23.78
VII	2.62	1.85	1.76	1.14	0.08	0.33	25.43	13.74
VIII	1.95	0.51	1.00	0.29	0.06	0.07	16.83	8.74
IX	1.41	0.41	0.81	0.29	0.16	0.10	11.31	2.82
X	3.69	1.09	2.17	0.70	0.06	0.12	36.26	20.11
XI	1.21	0.49	0.75	0.30	0.14	0.04	12.25	6.29
XII	1.35	0.60	0.72	0.41	0.09	0.12	39.81	3.14
XIII	0.28	0.15	0.18	0.14	0.05	0.04	4.01	0.61
XIV	1.53	0.63	0.61	0.35	0.09	0.06	28.67	11.65

región I (Fig. 7 localidad 1; Tabla IV) generalmente presenta concentraciones de pigmento más altas que  $4 \text{ mg m}^{-3}$ . En la región V (Canal de Ballenas localidad 14 Fig. 7; Tabla IV) los valores máximos se presentan en noviembre-mayo, pero en general en condiciones de verano, los valores mínimos no son tan pequeños como en otras regiones.

Para la región XIII (Fig. 8, localidad 31 que es muy similar a la localidad 32 la cual no está ilustrada), en general las concentraciones de pigmento fueron muy bajas en la porción central y en la parte oeste de la boca del Golfo. Los valores máximos fueron menores que  $1 \text{ mg m}^{-3}$  y tuvieron muy corta duración (Tabla IV).

En las regiones que se encuentran en la parte central y sur del Golfo (regiones VIII, IX, X, XI, XII, XIII y XIV Fig. 8), los valores de la concentración de pigmento fueron generalmente más altos en la porción este (regiones X y XIV) que en la oeste (Tabla VI).

#### **4.2.- Relación entre los procesos de mezcla y/o advectivos con la concentración de pigmento.**

Con el fin de evaluar la influencia de los procesos de mezcla sobre la concentración de pigmento en el Golfo de California, se utilizaron los datos en composiciones mensuales de la concentración de pigmento y la TSS para el período de mayo 83 a junio 86. Para cada una de estas imágenes se extrajeron los 12 transectos de la figura 5. Esta base de datos dió como resultado 24524 pares de datos totales, los cuales fueron distribuidos por región biogeográfica, dando como resultado 826 pares de datos para la región I, 1684 para la II, 1767 para la III, 892 para la IV, 579

para la VI, 2174 para la VII, 229 para la VIII, 898 para la IX, 4058 para la X, 3368 para la XI, 5237 para la XIII y 2804 para la región XIV. Solamente dos regiones no pudieron ser representadas por este análisis (la región V y la región XII), la primera porque el Canal de Ballenas mide en promedio menos de 20 Km y los datos de TSS fueron extraídos en áreas de 20 Km, y la segunda por que ningún transecto caía dentro de la Bahía.

En general el promedio de la TSS para el período examinado (primer tercio de 1983 a primera mitad de 1986) (Fig. 9a) aumenta de norte a sur, mientras que el promedio de la concentración de pigmento (Fig. 9b) se comporta de una manera inversa. La parte norte del Golfo, la zona de las grandes Islas, y el sistema costero Sonora-Sinaloa son las que presentan menores temperaturas con mayores concentraciones de pigmento. Hacia el sur, las temperaturas aumentan y las concentraciones de pigmento decrecen. Los valores más altos de concentraciones de pigmento ( $> 30 \text{ mg m}^{-3}$ ) se presentan en las regiones I (Delta del Río Colorado), VI (Isla Tiburón) y X (sistema costero Sonora-Sinaloa), donde las temperaturas más bajas son entre 14.75 (en la región I) y 16.5 °C en la región VI.

Tanto la TSS (Fig. 9a), como la concentración de pigmento (Fig. 9b) muestran claramente cuatro grandes grupos de regiones biogeográficas. Estos grandes grupos podemos denominarlos como el grupo del Golfo norte, el grupo de las Grandes Islas, el grupo del Golfo medio y el grupo de la Boca del Golfo.

El grupo del Golfo norte está representado por las regiones biogeográficas I, II, III y IV. Muestra una variación de la TSS uniforme con un intervalo general de 17 a 31 °C,

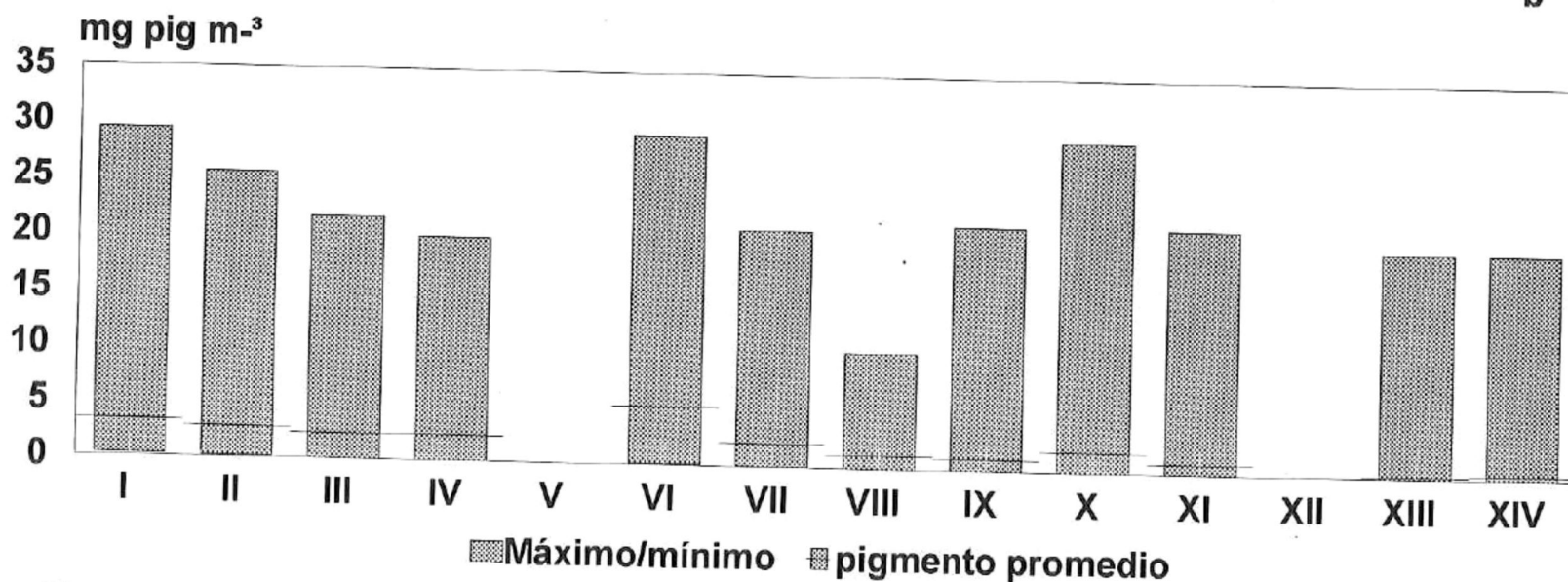
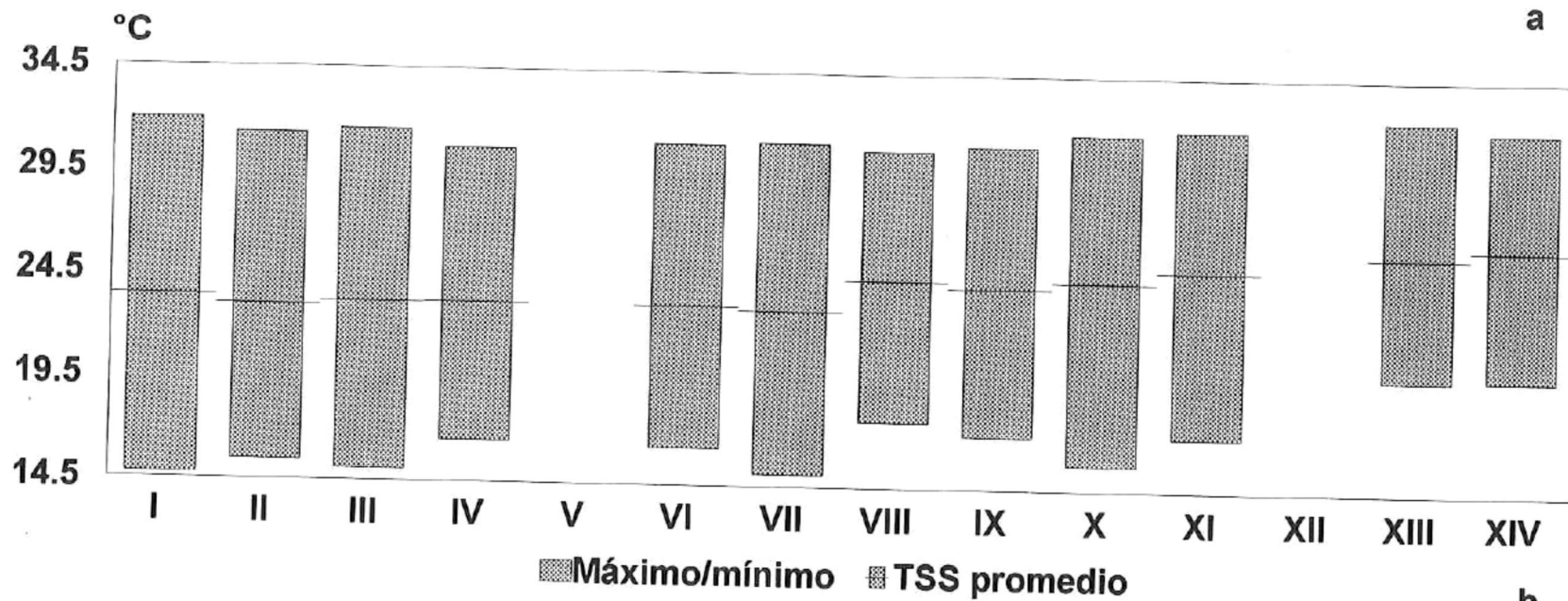


Figura 9.- Máximos/mínimos y promedios por región biogeográfica para el periodo de mayo de 1983 a junio de 1986; a) Temperaturas superficiales derivadas de las observaciones del AVHRR, expresadas en °C (TSS); b) Concentraciones de pigmento derivadas de las observaciones del CZCS, expresadas en mg m<sup>-3</sup>.

siendo la región I la que presenta una variación mayor (aproximadamente de 15 a 32 °C). Para la concentración de pigmento en esta misma área los máximos van decayendo monotónicamente de la región I a la IV, siendo el valor máximo de los máximos el de la región I (de 29 mg m<sup>-3</sup>) mientras que en la región IV se presenta el valor menor de los máximos (19 mg m<sup>-3</sup>).

El grupo de las Grandes Islas esta representado en esta parte del trabajo sólo por las regiones biogeográficas VI y VII, donde la región VI es la que presenta menos variaciones en TSS (16 a 31 °C), que la región VII (15 a 31 °C), presentando ambas un promedio de TSS igual (23 °C). En cuanto a la concentración de pigmento, la región VI se denota con los valores máximos del grupo, de hasta de 29 mg m<sup>-3</sup> (la región VII tiene un máximo de 21 mg m<sup>-3</sup>). Así mismo se observa en la región VI el mayor promedio (5 mg m<sup>-3</sup>; la región VII tiene un promedio de 2 mg m<sup>-3</sup>).

En el grupo del Golfo medio, que comprende las regiones biogeográficas VIII, IX, X y XI, se destaca la región X la cual cuenta con una mayor variabilidad de la TSS ( de 15 a 32 °C). En la concentración de pigmento, también resalta esta región al contar con los máximos valores de 29 con un promedio de 2 mg m<sup>-3</sup>.

El grupo que representa a la Boca del Golfo, (constituído por las regiones XIII y XIV), es el que presenta menos variación de TSS de todo el Golfo (aproximadamente de 20 a 32 °C, con un promedio 26 °C para ambas regiones biogeográficas) y representa las condiciones más cálidas del Golfo. Los valores máximos de las concentraciones de pigmento son en general, los más bajos de todas las regiones, siendo la única excepción la región VIII.

Todo lo anterior sugiere una relación entre la TSS y la concentración de pigmento. Con el fin de explorar esta posibilidad, de una forma preliminar, se aplicó un ACP (apéndice 1) de ambas variables codificadas binariamente (presencia-ausencia), repartiendo en bloques los datos por arriba del promedio de la variable y por debajo de éste. El resumen de dicho análisis para las regiones biogeográficas se presenta en la Tabla V. En todas las regiones se observa que cuando se presentan TSS por abajo del promedio de la región, se presentan concentraciones de pigmento por arriba del promedio regional, y cuando las TSS son mayores del promedio regional se presentan concentraciones de pigmento por debajo del promedio de la región.

Para ponderar la fuerza de esta relación inversa entre la TSS (como variable independiente) y la concentración de pigmento (como variable dependiente), se usó un modelo lineal para todos los datos disponibles para cada región biogeográfica. Los coeficientes  $\beta_1$  para todos los modelos obtenidos fueron negativos y estadísticamente significativos (Tabla VI), lo cual vuelve a confirmar la relación inversa entre la temperatura superficial y los pigmentos. En general el valor absoluto del coeficiente aumenta de sur a norte, y obtiene su valor más alto ( $> 0.29$ ), en las regiones I, II, III, IV, VI y X.

Comparando la concentración de pigmento promedio ( $\mu_{[pig]}$ ) por región biogeográfica y el coeficiente  $\beta_1$  (Fig. 10), se observa para la  $\mu_{[pig]}$  una curva bimodal, donde el primer pico se encuentra en la región VI es el mayor (con una  $\mu_{[pig]}$  de  $5.178 \text{ mg m}^{-3}$ ) y está asociado al mayor  $\beta_1$  (en valor absoluto). El segundo pico se presenta en la región X (Sistema costero Sonora-Sinaloa) y se asocia con un  $\beta_1$  grande ( $> 0.29$ ).

**Tabla V.- Resumen de los Análisis de Componentes principales aplicados exploratoriamente para definir la relación de las temperaturas derivadas de las observaciones de AVHRR y las concentraciones de pigmento derivadas de CZCS, por región biogeográfica, así como para la totalidad del Golfo. Las variables fueron codificadas binariamente (presencia-ausencia) y fueron bloqueadas por arriba y por abajo del promedio.**

	<b>TSS por abajo del promedio</b>	<b>TSS por arriba del promedio</b>
<b>pigmento arriba del promedio</b>	I, II, III, IV, VI, VII, VIII, IX, X, XI, XIV	
<b>pigmento por abajo del promedio</b>		I, II, III, IV, VI, VII, VIII, IX, X, XI, XIV

Tabla VI.- Coeficientes  $\beta_1$  por región biogeográfica del modelo de regresión lineal descrito por; pigmento=  $\beta_0 + \beta_1 TSS$ . \*\* marca que son estadísticamente significativos a un  $\alpha=5\%$ , con una  $t_{crit} = t_{\alpha/2, n-k} = 1.96$ . La regla de decisión es si el valor absoluto de  $t_{cal}$  es  $>$  que  $t_{crit}$  el coeficiente es estadísticamente significativo.

Región biogeográfica	$\beta_1$	$t_{cal}$	E. significativo
I	-0.297	-10.64	**
II	-0.346	-18.33	**
III	-0.293	-21.18	**
IV	-0.299	-14.92	**
V	-----	-----	--
VI	-0.476	-11.61	**
VII	-0.221	-18.31	**
VIII	-0.126	-05.08	**
IX	-0.167	-12.07	**
X	-0.317	-27.78	**
XI	-0.177	-23.82	**
XII	-----	-----	--
XIII	-0.034	-12.15	**
XIV	-0.080	-10.62	**

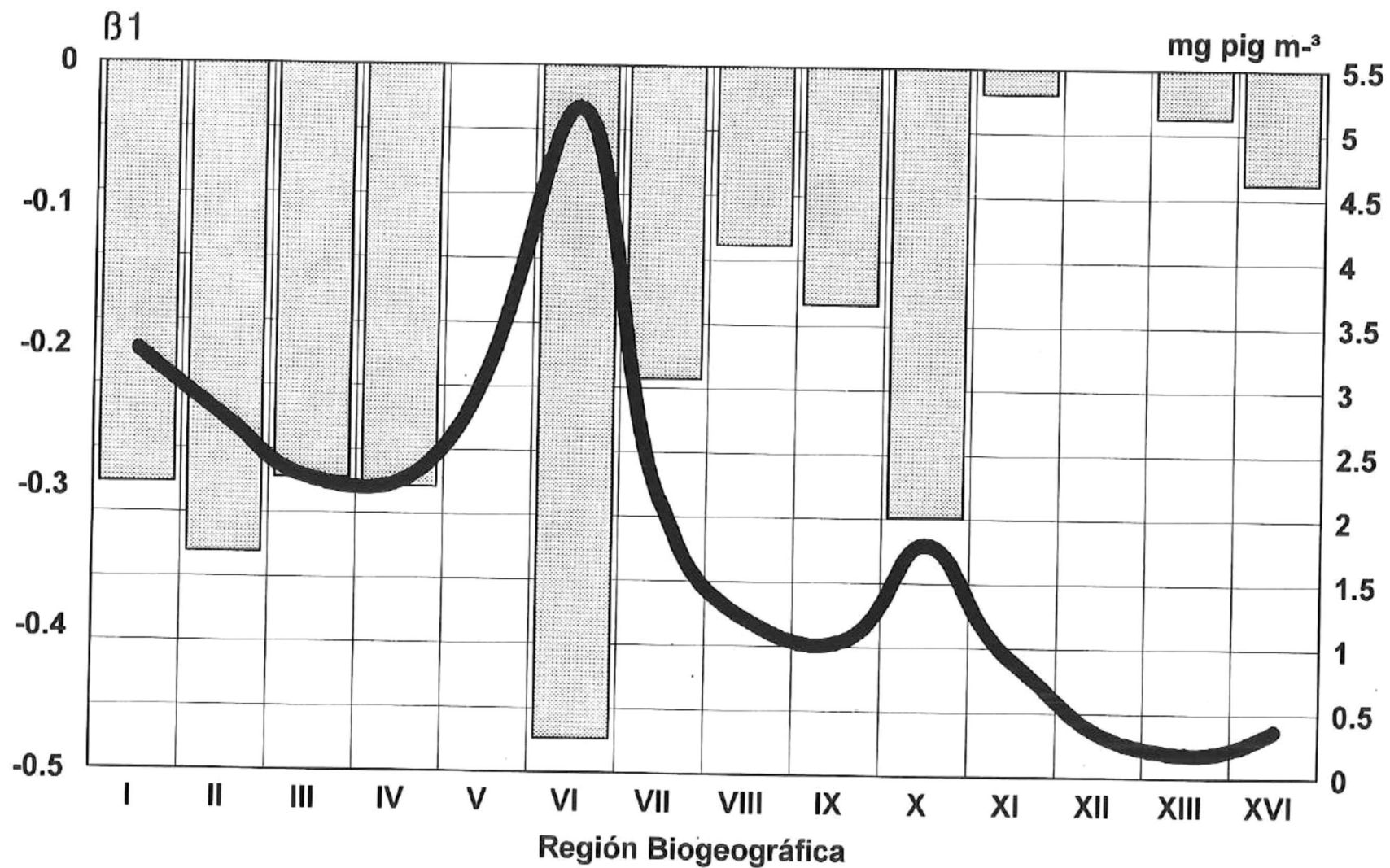


Figura 10.- Relación de la concentración de pigmento (línea) y el coeficiente b1 (barras) por región biogeográfica.

Este pico es más chico que los valores de la concentración promedio ( $\mu_{[pig]}$ ) para las regiones I, II, III Y IV, y la  $\beta_1$  del pico es más grande (con excepción de  $\beta_1$  para II). Las otras regiones que presentan un  $\beta_1 > 0.29$  corresponden al área del Golfo norte y al área de las Grandes Islas.

En general los  $\beta_1$  siempre son  $> 0.177$ , a excepción de las regiones XIII y XIV, lo cual indica que la mínima relación TSS y la concentración de pigmento esperada en el Golfo de California implica que cada vez que baje la temperatura superficial  $1^\circ\text{C}$ , la concentración de pigmento se incrementará en promedio un mínimo de  $0.177 \text{ mg m}^{-3}$ . En la región VI este incremento será de casi medio  $\text{mg m}^{-3}$ .

#### **4.3.- El efecto de El Niño 1982-1984 sobre la concentración de pigmento en el Golfo de California.**

Al revisar el período de operación del CZCS, resalta que durante ese tiempo ocurrió uno de los fenómenos ENSO-El Niño más documentado. Al observar las series de tiempo de la concentración de pigmento en promedios mensuales (Fig. 11 y 12), se observa más claramente la variación estacional que en las series en base a los promedios semanales (Fig. 7 y 8). En general, durante las condiciones de invierno de 1983-1984 (El Niño) los picos de máxima concentración fueron de 70 a 80% más bajos que los valores máximos de invierno presentados en otros años (aproximadamente en el 70% de las regiones).

Las regiones en la parte este media, así como las de la boca (v.gr. regiones IX, XII, XIII y XIV) muestran un pico considerable durante invierno de 1981-1982, seguido por picos de menor concentración para los inviernos de 1982-83 y 1983-84 (Fig. 12).

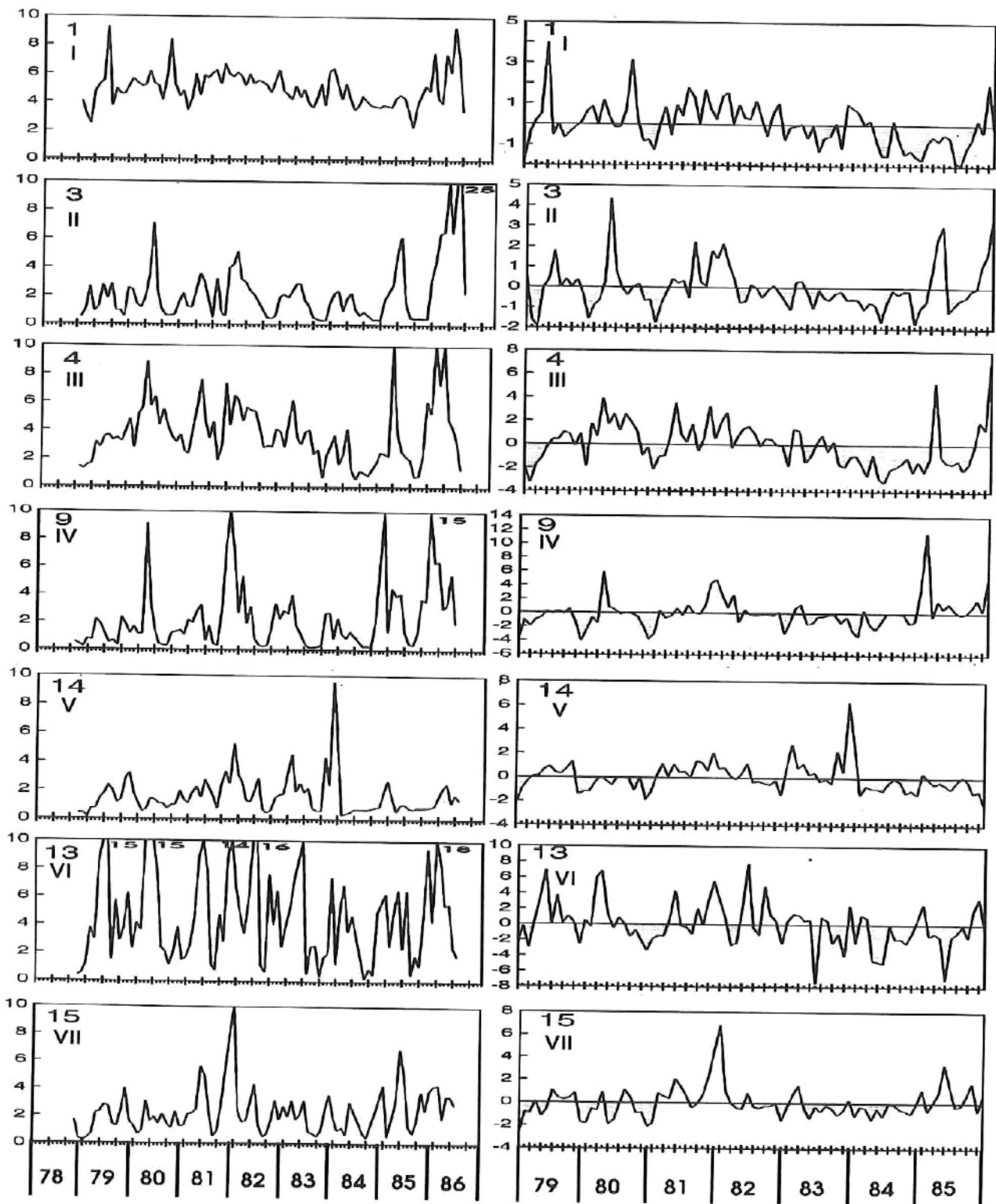


Figura 11.- Series de tiempo de la concentración de pigmento en promedios mensuales para las regiones biogeográficas I, II, III, IV, V, VI y VII ejemplificadas por las localidades; 1, 3, 4, 9, 14, 13 y 15 respectivamente. Las concentraciones de pigmento abarcan los años de 1978 a 1986, los números cerca de los picos son las concentraciones máximas alcanzadas por los mismos. Para las anomalías sólo abarcan los años de 1979 a 1985. Tanto las concentraciones de pigmento como las anomalías están expresadas en  $\text{mg m}^{-3}$ .

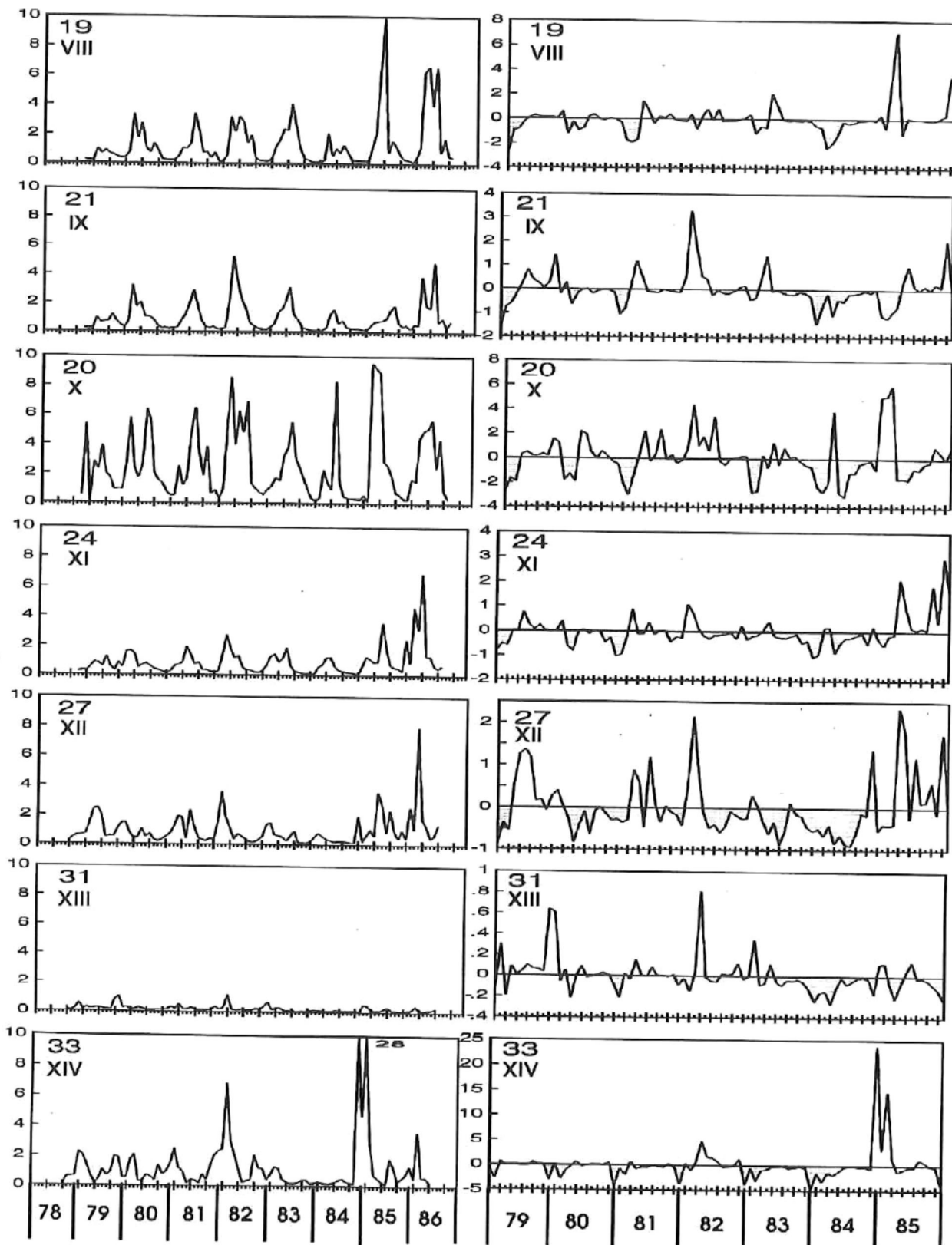


Figura 12.- Series de tiempo de la concentración de pigmento en promedios mensuales y las anomalías de dichas concentraciones para las regiones de la VIII a la XIV son ejemplificadas por las localidades; 19, 21, 20, 24, 27, 31 y 33 respectivamente. Las concentraciones de pigmento abarcan los años de 1978 a 1986, los números cerca de los picos son las concentraciones máximas alcanzadas por los mismos. Para las anomalías sólo abarcan los años de 1979 a 1985. Tanto las concentraciones de pigmento como las anomalías están expresadas en  $\text{mg m}^{-3}$ .

No obstante, en más del 30% de las regiones el máximo de invierno fue también bajo durante 1979-80, 1980-81, 1981-82 (Fig. 11 y 12), años que según Quinn *et al.* (1986) fueron de No-El Niño. Aproximadamente la mitad de las regiones presentan un bajo máximo invernal en 1978-79 y 1983-84.

La serie de tiempo para el Canal de Ballenas (región V localidad 14 Fig. 11) presenta valores altos a finales de 1983 y bajos a través de 1984 a 1986. En las regiones del Golfo norte I, II y III se presentaron bajos valores durante 1984 y altos en 1985 y 1986. En las regiones X y XI no fue apreciable la diferencia entre el máximo invernal en años de Niño contra los de No-El Niño.

Con la excepción del Canal de Ballenas, las series de tiempo del CZCS no muestran un incremento en la biomasa fitoplanctónica durante 1983 con respecto a los años previos.

Si la variabilidad interanual de la biomasa fitoplanctónica es controlada por la secuencia El Niño-No-El Niño, esperaríamos anomalías negativas grandes para años de El Niño y anomalías relativamente pequeñas en años No-El Niño. Sin embargo, esto no se ve tan claro en las series de tiempo de las anomalías mensuales (Fig. 11 y 12). En general se observan anomalías negativas y positivas mezcladas sin importar si fue año El Niño o No-El Niño. Sin embargo se observa que para muchas regiones existen principalmente anomalías positivas para 1981 y el invierno de 1981-82, con las excepciones de las regiones más al sur (XIII y XIV). Es de notar que durante el período de El Niño, sólo el Canal de Ballenas (región V) y en menor proporción la región del Delta del Río Colorado presentaron anomalías positivas (Fig. 11).

Con el fin de ponderar el efecto de El Niño sobre la concentración de pigmento, basándose en el razonamiento que el mayor número de anomalías negativas se presentaron en el período de El Niño, se calculó el Índice de Potencia Relativa ( $Pr$ ) (apéndice 2) por región biogeográfica. Considerando que el  $Pr$  es una ponderación potencial de que tan fuerte puede ser el efecto de El Niño sobre la concentración de pigmento, si fuera igual a 1.0 indicaría que todas las anomalías negativas cayeron en período de El Niño, mientras que a menor valor el efecto va decayendo y cuando es más cercano a cero ó a un valor negativo, indica que la presencia de las anomalías negativas no ocurren sólo con la presencia de El Niño (ver apéndice 1).

En base al  $Pr$  se puede observar en general (Fig. 13) que el efecto de El Niño fue muy bajo en el Golfo de California. Presenta un valor máximo de 0.421 en la región XI y un mínimo de -0.419 en la región VI. Para las regiones que comprenden el área del Golfo norte (I, II, III y IV) se observa que el menor valor lo presentó la región I y de ahí se incrementó poco a poco hasta la región IV. En el Canal de Ballenas (región V) así como la región al norte de Isla Tiburón (VI) y la región entre las Grandes Islas (VII) se observan los valores menores. En el resto de las regiones, el valor se incrementó poco a poco a medida que nos acercamos al sur.

Si consideramos al componente de la velocidad de corrientes de mareas M2 en cada región, y lo confrontamos con los valores de  $Pr$  que se obtuvieron (Fig. 13), se puede observar que en las regiones donde se tienen una mayor velocidad de corriente se obtuvieron los valores más bajos de  $Pr$  y viceversa. En realidad es más apropiado utilizar la  $u^2$  como índice de la energía turbulenta, pero aquí se presentó  $u$  para mostrar

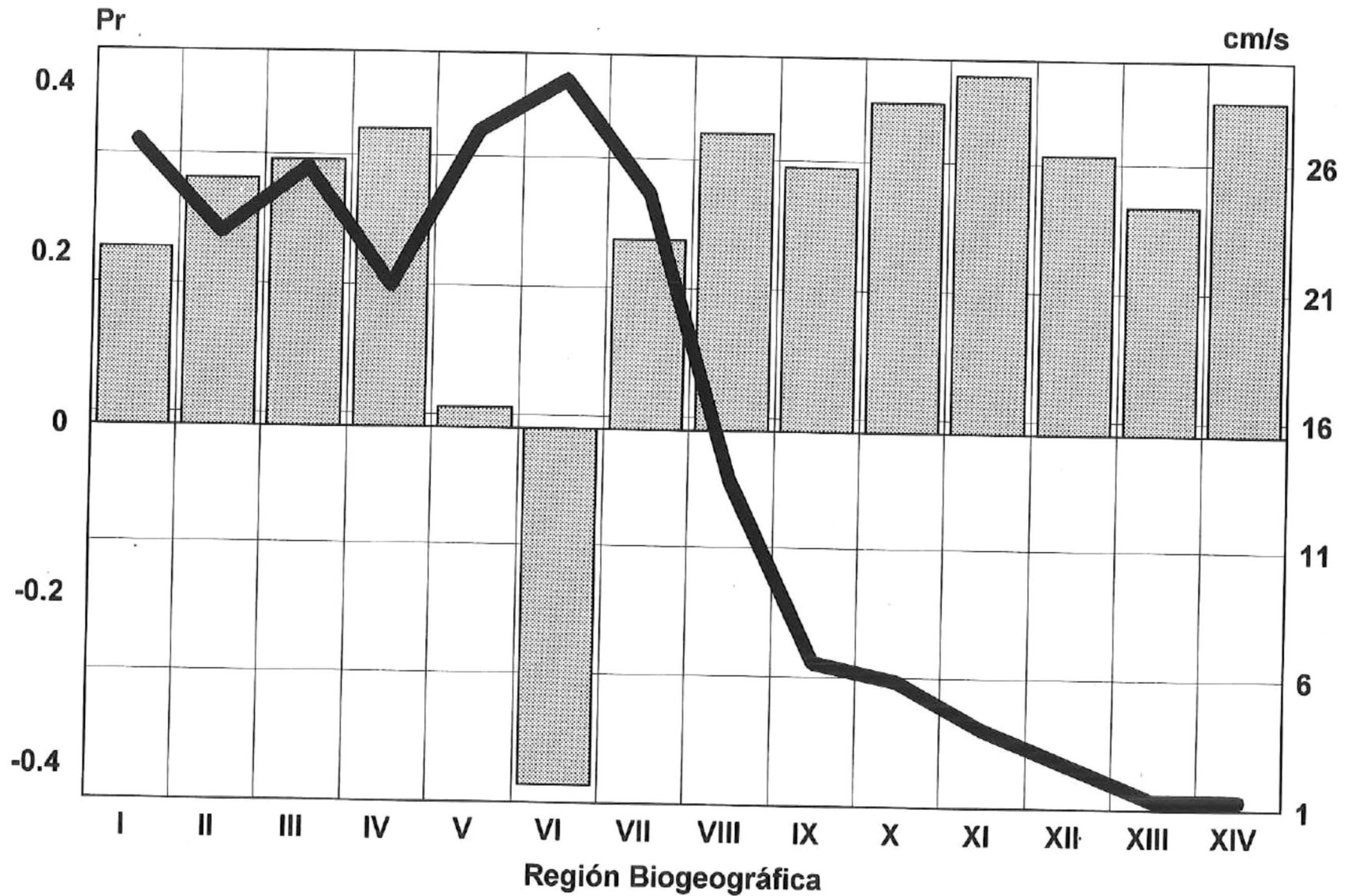


Figura 13.- El efecto de El Niño 1982-1984 en el Golfo de California, el cual es ponderado por el índice de Potencia relativa (Pr) (barras) por región biogeográfica. Se presenta también un índice de energía cinética turbulenta por mareas (TKE) (línea), ponderado por el componente lunar semidiurno M2 de la velocidad de la corriente de marea también por región, expresado en cm/s.

que la relación entre la velocidad de las corrientes de marea son inversamente proporcionales a  $Pr$ .

#### **4.4.- El forzamiento de la marea sobre la concentración de pigmento.**

En un esfuerzo por entender los factores que controlan al fitoplancton en el Golfo de California, estudiaremos la relación entre fenómenos asociados a la marea y la concentración de pigmento, usando los datos de las composiciones diarias de la imágenes del CZCS. Si obtuviéramos la serie de tiempo diaria de cada localidad, podríamos asociar esta serie con una curva de marea. Sin embargo, en promedio tenemos 10 imágenes por mes (Fig. 14) existiendo muy pocos períodos de operación continua del CZCS.

Por lo anterior, se uso la codificación de los días según las condiciones de las mareas, así como la codificación de la concentración de pigmento en color del agua por día. Dichas variables codificadas fueron asociadas en cada localidad, mediante un ACP (apéndice 1), tomando en cuenta todos los datos disponibles, así como separando los datos de condiciones de invierno y los de condiciones de verano. Considerando solamente las asociaciones directas entre el estado de la marea y el color del agua, se resumieron los resultados por región biogeográfica en las tablas VII, VIII y IX. La tabla VII corresponde a los datos de todos los días, tomados como un sólo conjunto. La tabla VIII corresponde solamente los días de invierno y la tabla IX corresponde a los datos de los días de verano respectivamente. La parte inferior de estas tablas se realizó bajo el criterio de que las mareas vivas son las que tienen mayor poder de mezcla y presentan una  $Z_{\text{amplitud}}$  positiva. Ambas mareas vivas y



**Tabla VII.- Resumen por región biogeográfica de los resultados del análisis de asociación aplicado por localidad entre el estado de la marea y el color del agua para todos los datos disponibles del CZCS en el Golfo de California.**

Marea ⇒	con $Z_{amplitudes}$ positivas			con $Z_{amplitudes}$ negativas		
Color del agua ↓	previvas	vivas	posvivas	premuertas	muertas	posmuertas
Magenta < 0.1	VII	XI				
Azul 0.1-0.19		II, X				II
Azul-Verde 0.2-0.29		VII	IX		IX	VI
Verde 0.3-0.49	VII		X	VIII	VII	
Amarillo 0.5-0.99	X	I, II, VII	III, VI			
Rojo 1.0-2.99				II, VI	VII, XI	
Café 3.0-6.99			V		VII	
Blanco > 7.0			II		III, XI	I, II

pigmento/ $Z_{amplitudes}$	positivas	negativas
< a $1 \text{ mg m}^{-3}$	I, II, III, VI, VII, IX, X, XI	II, VI, VII, VIII
> a $1 \text{ mg m}^{-3}$	II, V	I, II, III, VI, VII, XI

Tabla VIII.- Resumen por región biogeográfica de los resultados del análisis de asociación aplicado por localidad entre el estado de la marea y el color del agua para los datos disponibles del CZCS en el Golfo de California en condiciones de invierno.

Marea ⇒	con Z <sub>amplitudes</sub> positivas			con Z <sub>amplitudes</sub> negativas		
Color del agua ↓	previvas	vivas	posvivas	premuertas	muertas	posmuertas
Magenta < 0.1						
Azul 0.1-0.19		VIII	IV			III
Azul-Verde 0.2-0.29	III, XI	II, X, XI				II, X, XI
Verde 0.3-0.49	XIV		II, IX, XIII	III		X
Amarillo 0.5-0.99			X	X	I, II	
Rojo 1.0-2.99				II	XI	
Café 3.0-6.99	XI		XI, XII	X		
Blanco > 7.0	V, X	VII		X	III, XI	

pigmento/Z <sub>amplitudes</sub>	positivas	negativas
< a 1 mg m <sup>-3</sup>	II, III, IV, VIII, IX, X, XI, XIII, XIV	I, II, III, X, XI
> a 1 mg m <sup>-3</sup>	V, VII, X, XI, XII	II, III, X, XI

**Tabla IX.- Resumen por región biogeográfica de los resultados del análisis de asociación aplicado por localidad entre el estado de la marea y el color del agua para los datos disponibles del CZCS en el Golfo de California en condiciones de verano.**

Marea ⇒	con Z <sub>amplitudes</sub> positivas			con Z <sub>amplitudes</sub> negativas		
Color del agua ↓	previvas	vivas	posvivas	premuertas	muertas	posmuertas
Magenta < 0.1	III, VII, VIII, X, XII	XI	IX	XIV	XI	
Azul 0.1-0.19	II, V, VII				II	X
Azul-Verde 0.2-0.29	II, XIII	VII, VIII, XI		IV, X	VI, XIV	X
Verde 0.3-0.49	VII, IX	I, II, XI		X, XIII	X	II, VII
Amarillo 0.5-0.99		X	VIII	VI, XI	II, IX	
Rojo 1.0-2.99		II, III		VII	IX	IV
Café 3.0-6.99		VII, X	VII, XIV		IV, XI	X
Blanco > 7.0	XI	II, IV				VIII

pigmento/Z <sub>amplitudes</sub>	positivas	negativas
< a 1 mg m <sup>-3</sup>	I, II, III, V, VII, VIII, IX, X, XI, XII, XIII	II, IV, VII, IX, X, XI, XIII, XIV
> a 1 mg m <sup>-3</sup>	II, III, IV, VII, X, XI, XIV	IV, VII, VIII, IX, X, XI

mueras son los dos extremos y el efecto de mezcla es extrapolable al signo de la  $Z_{\text{amplitud}}$  en menor proporción. Por otra parte se tiene como criterio que una zona eutrófica (v.gr. una zona de surgencias), se caracteriza por presentar concentraciones de clorofila  $a > a 1 \text{ mg chl } a \text{ m}^{-3}$ , mientras que una zona oligotrófica cuenta con concentraciones menores.

Al revisar la tabla VII resalta la región X donde se observa que en mareas vivas se presentan aguas azules, mientras que en estados de marea de menor poder de mezcla (previvas y posvivas) se presentan aguas de mayor concentración de pigmento (aguas amarillas y verdes). Algo similar se presenta en las regiones I, III y IX en las cuales se asocian concentraciones de pigmento  $< a 1 \text{ mg m}^{-3}$  con mareas de alto poder de mezcla ( $Z_{\text{amplitudes}}$  positivas) mientras que las concentraciones  $> a 1 \text{ mg m}^{-3}$  se asocian a estados de mareas de bajo poder de mezcla ( $Z_{\text{amplitudes}}$  negativas).

Es también notorio que la región II presenta concentraciones tanto mayores como menores de  $1 \text{ mg m}^{-3}$  en condiciones de  $Z_{\text{amplitudes}}$  positivas y negativas, lo cual sugiere que las fluctuaciones de las concentraciones de pigmento varían en una escala mayor que la escala de operación de la marea. Lo anterior puede extrapolarse a la región VI, VII. La región del Canal de Ballenas, (V) es la única que aún en mareas positivas presenta aguas de alta concentración de pigmento.

Así mismo la región VIII presenta una asociación directa entre concentraciones de pigmento bajas y mareas de bajos efectos de mezcla. Para poder explicar un poco más el tipo de asociaciones que no encajan dentro del patrón, se consideró la posible influencia de la gran modulación biestacional que ya se ha descrito anteriormente.

Para condiciones de invierno (Tabla VIII) las regiones IV, VIII, IX, XIII y XIV presentan que en mareas de mayor poder de mezcla se presentan la más bajas concentraciones. Las regiones en el Canal de Ballenas (V) entre las Grandes Islas (VII), y la Bahía de la Paz (XII) son las únicas que presentan altas concentraciones en mareas de alto poder de mezcla. Las regiones II, III, X y XI pueden no estar controladas por la marea pues presentan altas y bajas concentraciones en mareas con bajo y alto poder de mezcla. La región del Alto Golfo (I) es la única en la que bajas concentraciones de pigmento están asociadas a bajos poderes de mezcla.

En condiciones de verano, (Tabla IX) se cuenta con un mayor número de asociaciones directas entre el color del agua y el estado de la marea. Las regiones I, V, VIII y XII presentan una baja concentración cuando hay mareas de alto poder de mezcla. Las regiones que son independientes del estado de la marea fueron II, III, IV, VII, IX, X, XI, XIII y la XIV.

Considerando que en general las altas concentraciones se presentan cuando el poder de mezcla es menor, y que cuando aumenta este se diluyen los parches superficiales lo que repercute en detectar concentraciones menores, se calculó el *Pr* (apéndice 2) para ponderar el efecto de la marea por región biogeográfica tomando en cuenta todos los días disponibles (Fig. 15). Se denota que el mayor efecto se encuentra en el área que comprende las Grandes Islas (regiones IV, V y VII). Esta área corresponde a la mayor velocidad de corriente de marea M2. El resto de las regiones el efecto es nulo o casi nulo, correspondiendo en la parte sur a las menores velocidades. El área del Alto Golfo (I, II y III) aún y cuando tenemos velocidades de corrientes de

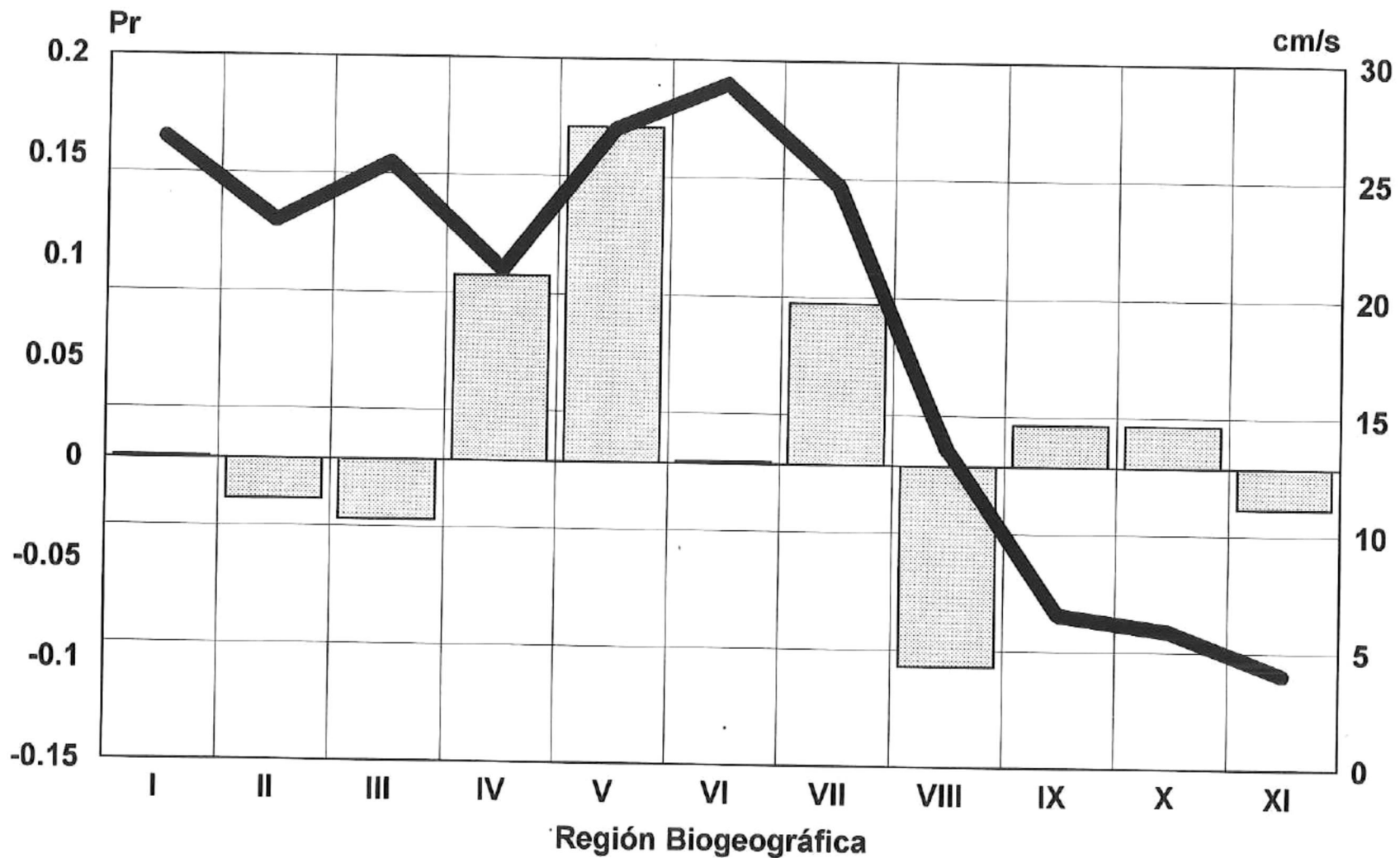


Figura 15.- El efecto de la marea en el Golfo de California, el cual es ponderado por el índice de potencia relativa (Pr) (barras), por región biogeográfica. Se presenta también un índice de energía cinética turbulenta por marea (TKE) (línea), ponderado por el componente lunar semidiurno M2 de la velocidad de corriente de mareas, también por región, expresado en cm/s.

mareas M2 considerables el efecto de la marea en la concentración de pigmento no es significativo.

De los resultados anteriormente descritos, se observa que un gran número de regiones (9 para verano Tabla IX y 4 para invierno Tabla VIII) pueden ser independientes de la marea, pues el efecto que tiene esta sobre la concentración de pigmento es insignificante (Fig. 15). Esto sugiere que las fluctuaciones de la concentración de pigmento en estas regiones, pueden estar asociadas a eventos de mezcla con una escala temporal mayor que la marea. Uno de estos eventos puede ser el sistema de surgencias que se puede presentar en el Golfo de California.

#### **4.5.- El sistema de surgencias en el Golfo de California.**

Se ha dicho que en base al patrón de vientos en el Golfo de California, se deben de esperar surgencias del lado del litoral continental mexicano para condiciones de invierno y para el litoral Bajacaliforniano en condiciones de verano. Sin embargo sólo se han podido comprobar las surgencias de invierno mediante cruceros, y no existen datos *in situ* que refuten ó demuestren las surgencias de verano.

Analizando las imágenes del CZCS, resalta que para el sistema costero Sonora-Sinaloa (región X) (Placa 1a), se observan muy altos valores de concentraciones de pigmento. Se pueden ver lengüetas de altas concentraciones elongándose del lado este del Golfo hacia la península de Baja California. En general para el área del Golfo norte y para las Grandes Islas (regiones I a VII) se pueden observar altas concentraciones de pigmento en ambas costas en todas las imágenes del CZCS.

Por otra parte, el efecto de las surgencias de verano que teóricamente se debe de presentar en el litoral Bajacaliforniano no es obvio en las imágenes del CZCS (Placa 1b). Analizando las series de tiempo de la concentración de pigmento para las regiones biogeográficas VIII, IX y XI (Fig. 8 para las composiciones semanales y Fig. 12 para las composiciones mensuales) se denotan la modulación estacional, con los más bajos valores en verano y los valores máximos en condiciones de invierno, por lo que no es claro un efecto de la surgencia de verano.

Para poder aclarar más el efecto del sistema de surgencias del Golfo de California en base a la biomasa fitoplanctónica, se analizaron las series de tiempo derivadas de las composiciones semanales de la TSS por región biogeográfica (Fig. 16 para las regiones de la I a la VII y Fig. 17 para la VIII a la XIV), en las cuales se observa la variación estacional con altas temperaturas en condiciones de verano y bajas en condiciones de invierno. Tomando la idea de que una surgencia se puede detectar en la superficie por cambios bruscos y de corta duración de temperatura ( $\pm 2$  °C), se buscaron dichos cambios en los valles para condiciones de invierno y en los picos para las condiciones de verano. Una vez detectados estos cambios bruscos, se ubicó la semana en la cual se presentaron y se tomaron dos semanas antes y dos semanas después, quedando cada evento de surgencia cubierto por 5 semanas de datos.

Para condiciones de invierno, se detectaron 3 eventos (Fig 16 y 17) que corresponden a 15-febrero $\leftrightarrow$ 15-marzo de 1984; 13-febrero $\leftrightarrow$ 13-marzo de 1985; 12-marzo $\leftrightarrow$ 9-abril de 1986. Para condiciones de verano, fueron: 10-agosto $\leftrightarrow$ 7-septiembre

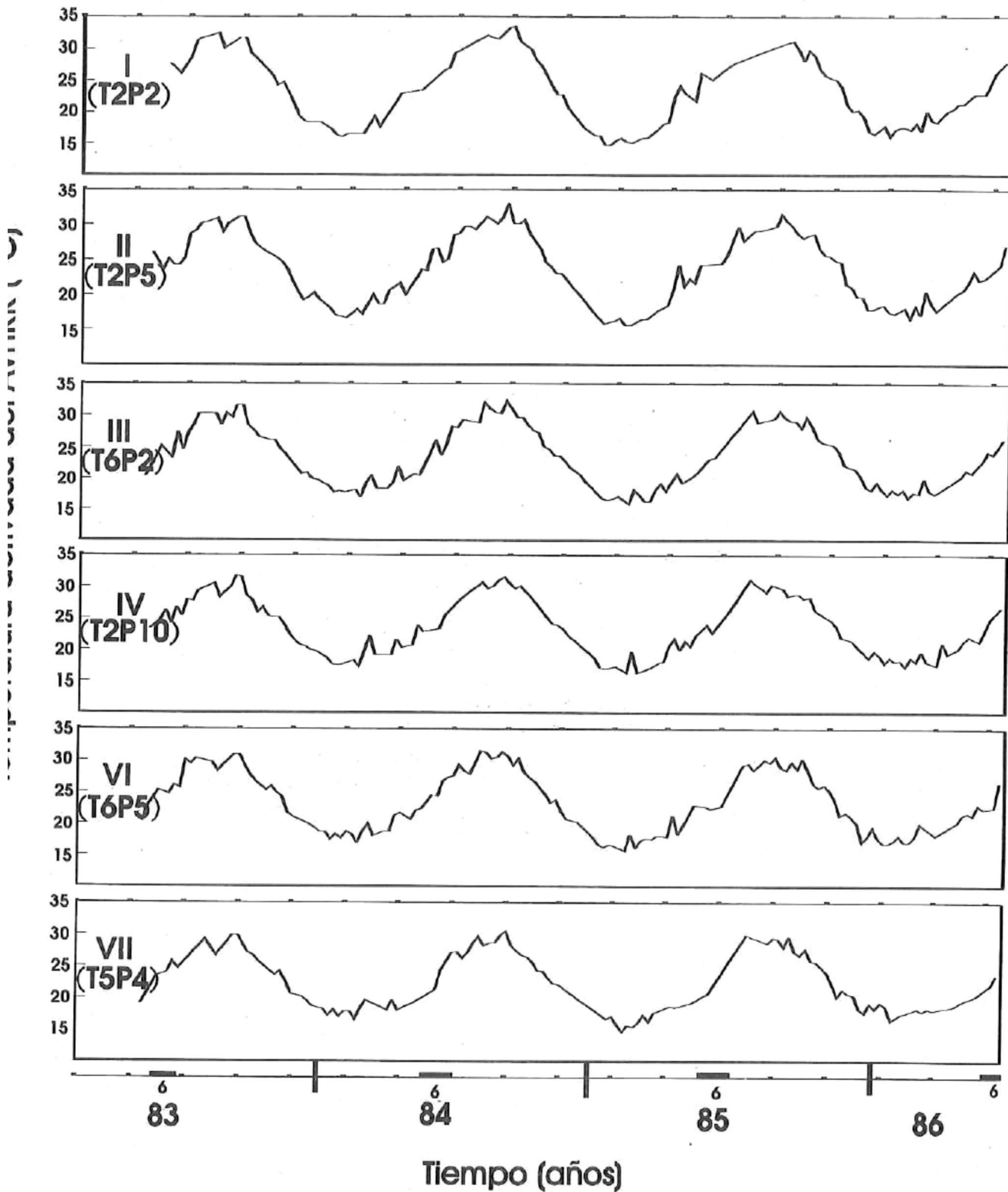


Figura 16.- Series de tiempo de la temperatura superficial derivada de las observaciones del AVHRR (TSS) en promedios mensuales para las regiones biogeográficas I, II, III, IV, V, VI y VII. La clave dentro del paréntesis es T por el número de transecto y P es por el número del punto dentro del transecto.

Temperatura derivada del AVHRR (°C)

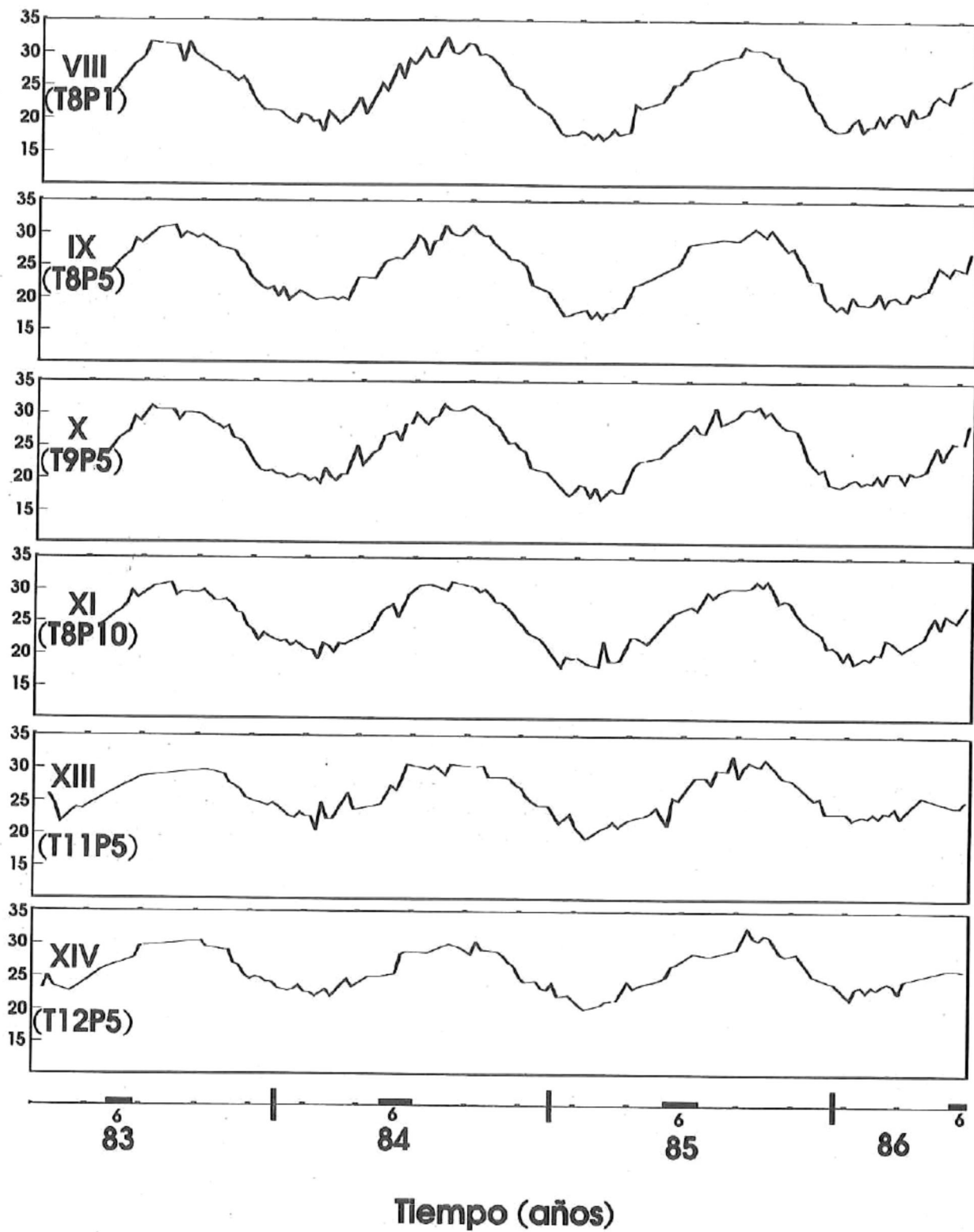
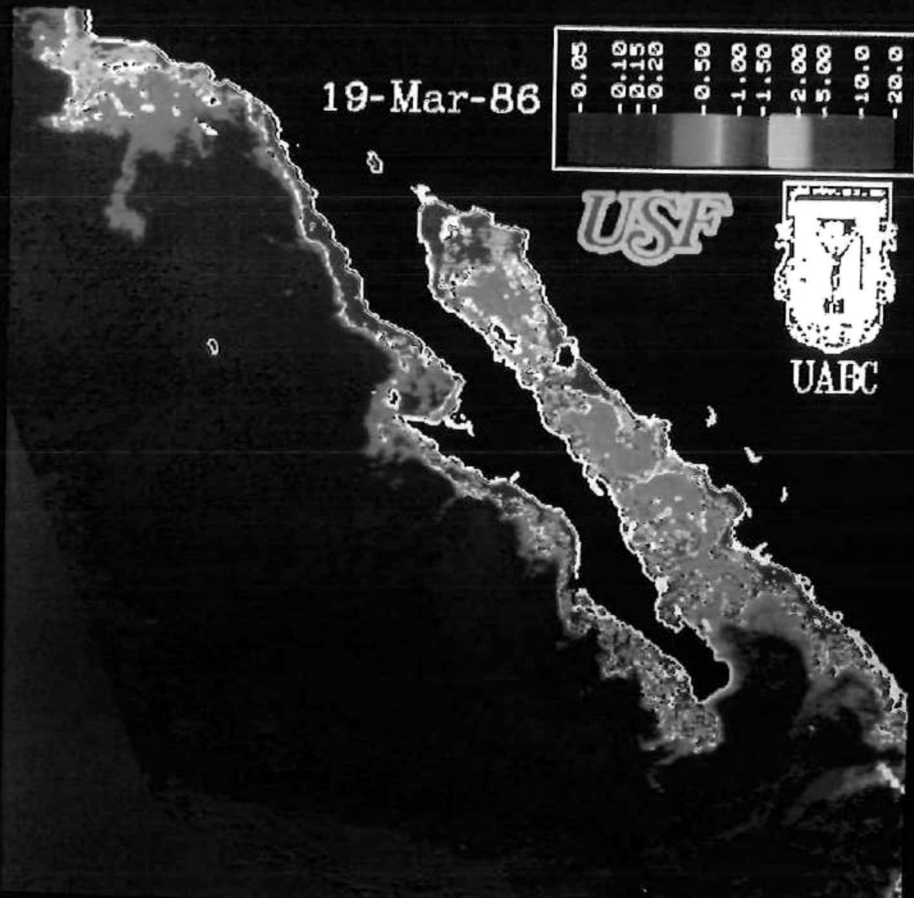


Figura 17.- Series de tiempo de la temperatura superficial derivada de las observaciones del AVHRR (TSS) en promedios mensuales para las regiones biogeográficas de la VIII a la XIV. La clave dentro del paréntesis es T por el número de transecto y P por el número del punto dentro del transecto.

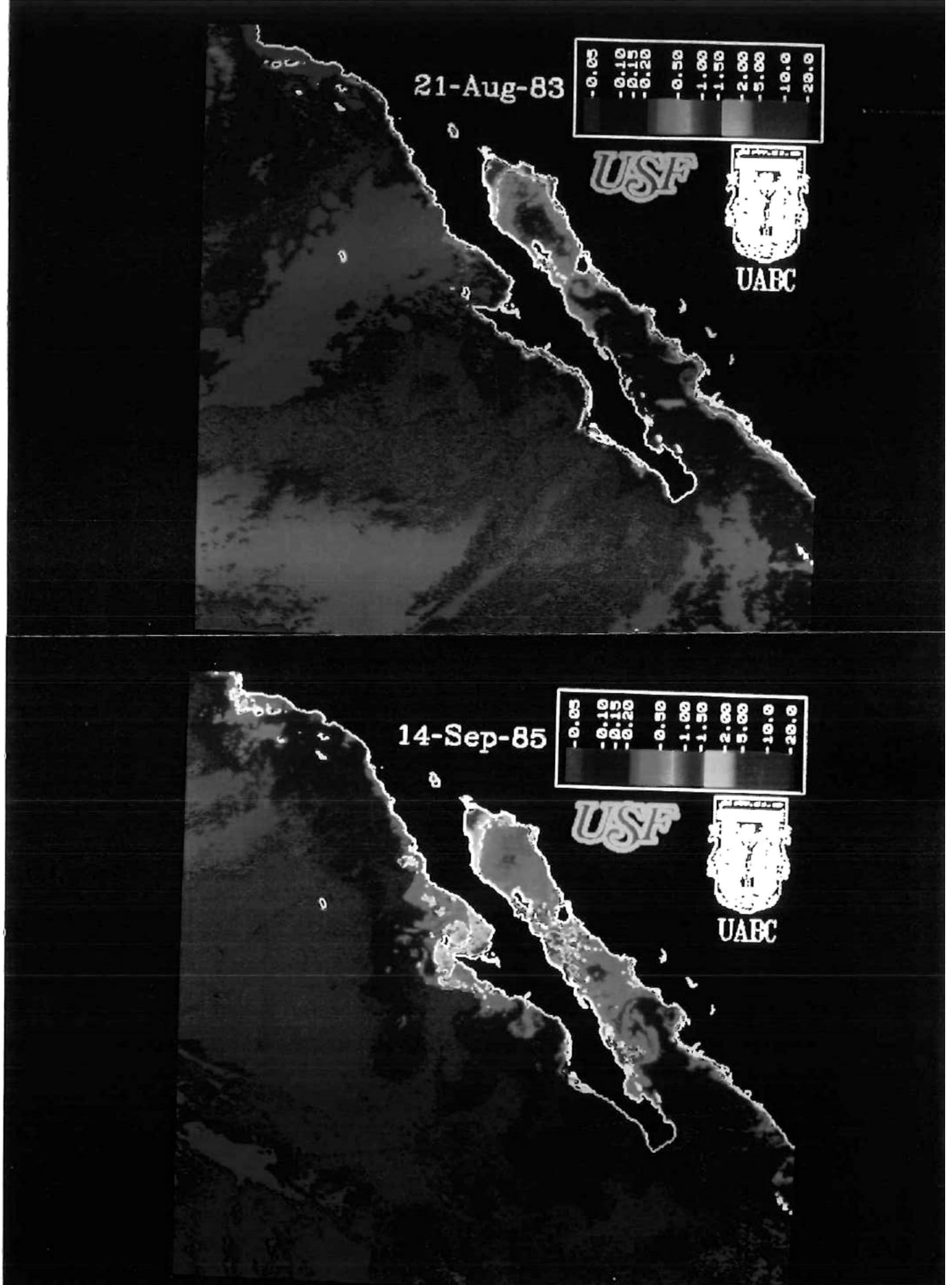
de 1983; 9-agosto⇔6-septiembre de 1984; 13-agosto⇔11-septiembre de 1985. Analizando algunos ejemplos de las imágenes del CZCS, se observa que para condiciones de invierno (Placa 1a ejemplo en composición semanal y Placa 2 con muestras de composiciones diarias para el 25-feb-84 y 19-mar-86) se observan al sur de las grandes Islas lengüetas de alta concentración de pigmento elongándose hacia la costa Bajacaliforniana y formando celdas de circulación este-oeste. Así mismo la región X se encuentra como una banda de alta concentración de pigmento. Para condiciones de verano (Placa 1b semanal y Placa 3 para ejemplos diarios 21-ago-1983 y 14-sep-85) se observan celdas de circulación que aparentemente siguen la estructura de la invasión de agua oligotrófica del Pacífico aledaño. Solamente para el 14-sep-1985 se observan focos de alta concentración en la costa de Baja California, pero esto no es común en el resto de las imágenes para verano.

Se construyeron mapas de isotermas superficiales para los 6 eventos antes mencionados, en un recuadro entre los 109° a 113° Oeste y 24° a 28°30' Norte, que es donde se observa la máxima estructuración (Placa 1, 2 y 3). No se consideró la región al norte de las islas pues casi no presenta estructuras, es decir las temperaturas superficiales son muy homogéneas.

Para condiciones de invierno (Fig. 18, 19 y 20) podemos observar que la mayoría de los mapas resultantes, presentan un gradiente con mayor TSS en la parte más al sur y disminuyendo gradualmente hacia el norte, con valores entre 16 y 22 °C. En todos los mapas la isoterma de 19 °C fue tomada como guía para mostrar los desplazamientos de la lengüeta fría de este-oeste cargada al norte para invierno. En la mayoría de los mapas, las isotermas son perpendiculares a la costa (15-21 de febrero



Placa 2.- Ejemplo de las imágenes en composición diarias para condiciones de invierno para 25-feb-84 y 19-mar-86.



Placa 3.- Ejemplo de las imágenes en composición diarias para condiciones de verano para 21-ago-83 y 14-sep-84.

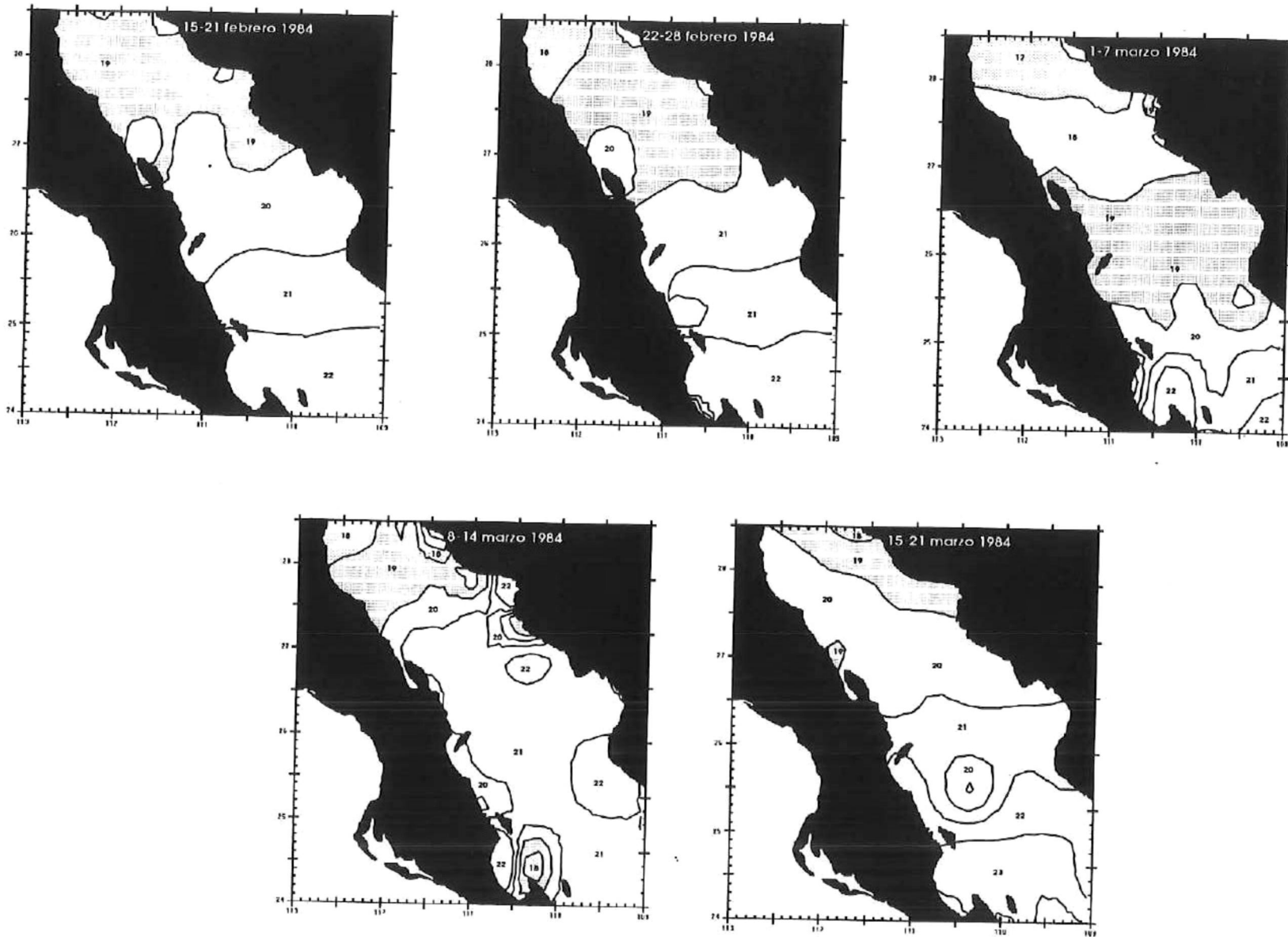


Figura 18.- Mapas de isolíneas de las temperaturas superficiales derivadas de las observaciones del AVHRR en condiciones de invierno para las semanas entre el 15 de febrero al 21 de marzo de 1984.

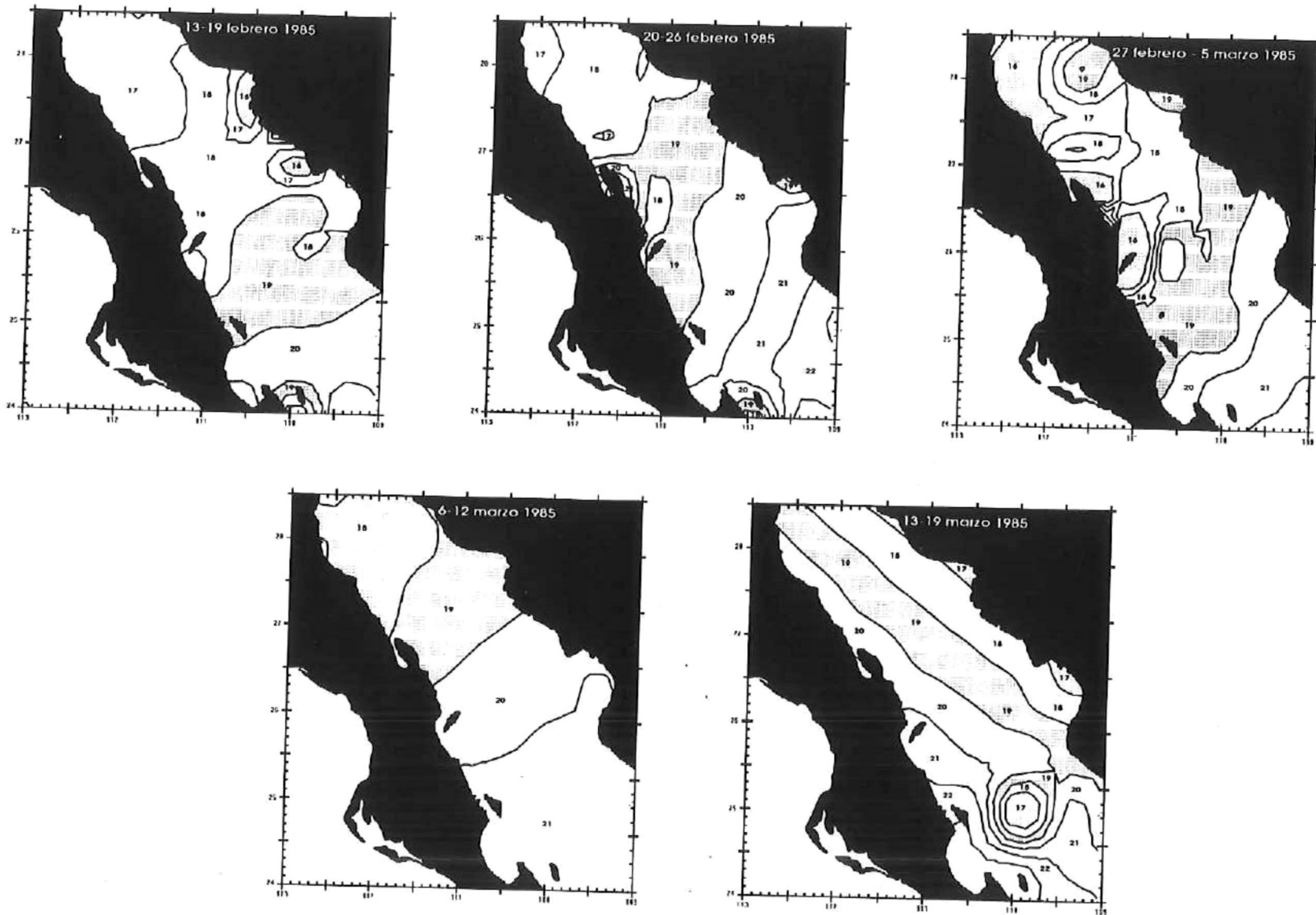


Figura 19.- Mapas de isóneas de las temperaturas superficiales derivadas de las observaciones del AVHRR en condiciones de invierno para las semanas entre el 13 de febrero al 19 de marzo de 1985.

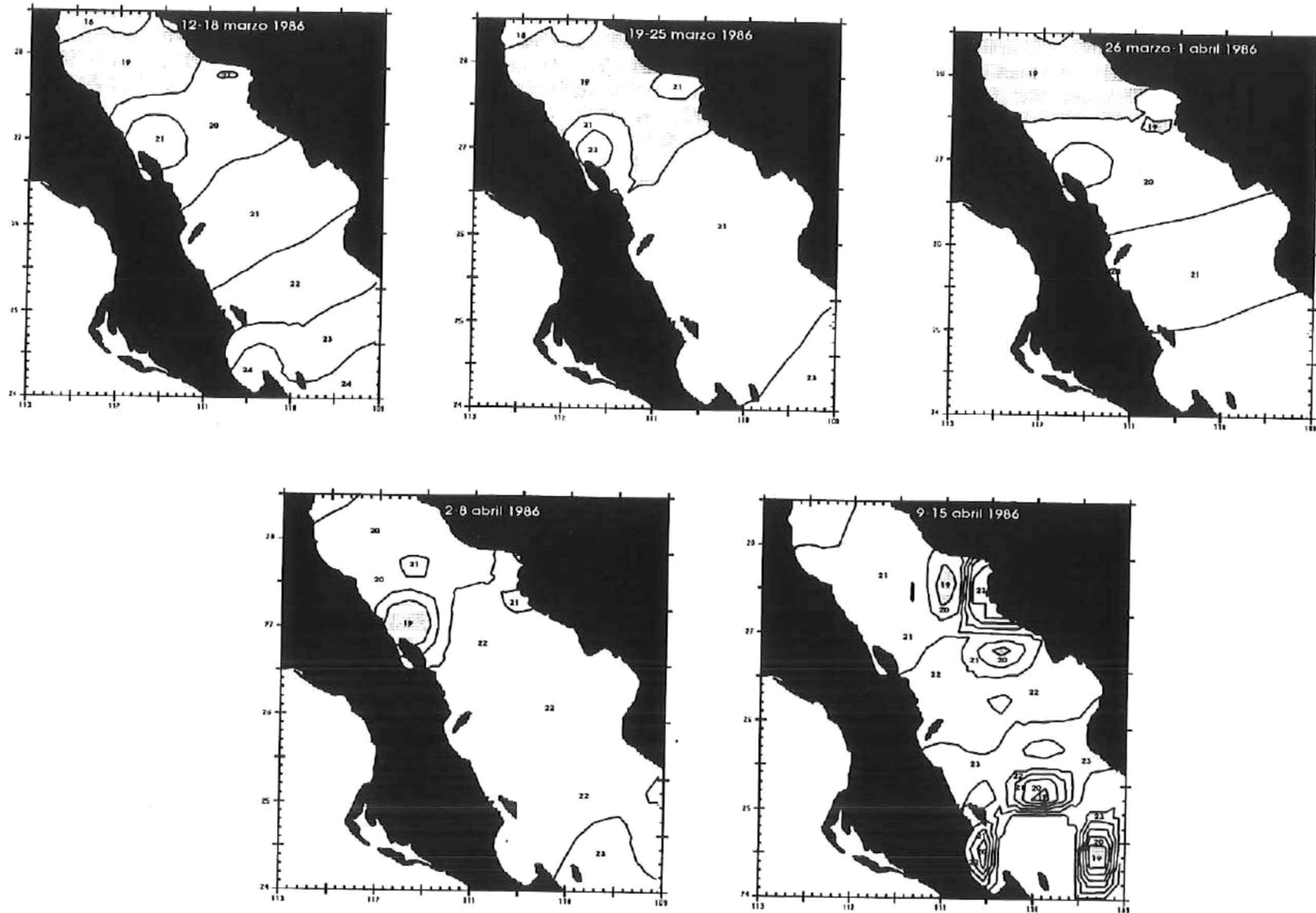


Figura 20.- Mapas de isolíneas de las temperaturas superficiales derivadas de las observaciones del AVHRR en condiciones de invierno para las semanas entre el 12 de marzo al 15 de abril de 1986.

de 1984 Fig. 18, 12-18 de marzo y 26 marzo-1 abril 1986 Fig. 20), pero en algunos casos las isotermas se ubican paralelamente a la costa, presentando los menores valores de TSS pegados a la costa este (13-19 de marzo de 1985 Fig. 19).

También se puede observar la presencia de estructuras de baja TSS de regular y pequeño tamaño, pudiendo representar lengüetas de menor TSS extendiéndose y circulando de una costa a otra, siendo la dirección más común de este a oeste (22-28 de febrero de 1984 Fig. 18; 13-19 y 20-26 de febrero de 1985 Fig. 19; 19-25 de marzo de 1986 Fig. 20). Así mismo estas formaciones de las isotermas pueden verse integradas en complejos patrones de estructuración en los cuales existen uno o más puntos muy localizados de bajas TSS, que en general se localiza en la costa este (8-14 de marzo de 1984 Fig. 18; 13-19 de febrero de 1985 Fig. 19; 9-15 de abril de 1986 Fig. 20), pero excepcionalmente también se pueden presentar en la costa Bajacaliforniana (27 de febrero al 5 de marzo de 1985 Fig. 19; 2-8 de abril de 1986 Fig. 20), siendo los puntos aún más localizados y limitados que los que se presentan en la costa oriental.

Solamente se pudieron obtener para los períodos de eventos de surgencia invernales 4 días en los cuales se cuenta con datos útiles de concentraciones de pigmento derivadas de las observaciones del CZCS, siendo estas fechas 25 de febrero de 1984, 4 de marzo de 1985, 19 de marzo de 1986 y 21 de marzo de 1986 (Fig. 21). Las isogramas de las concentraciones de pigmento llegaron a ser tan altas como 3 y 7  $\text{mg m}^{-3}$ . Los patrones más claros de las isolíneas de la concentración de pigmento que concuerdan con los patrones generales de las isotermas invernales, se presentaron para el 25 de febrero de 1984 y no tan claro para el 4 de marzo de 1985. Tanto el 19 como el 21 de marzo de 1986 presentan valores más altos de concentración de

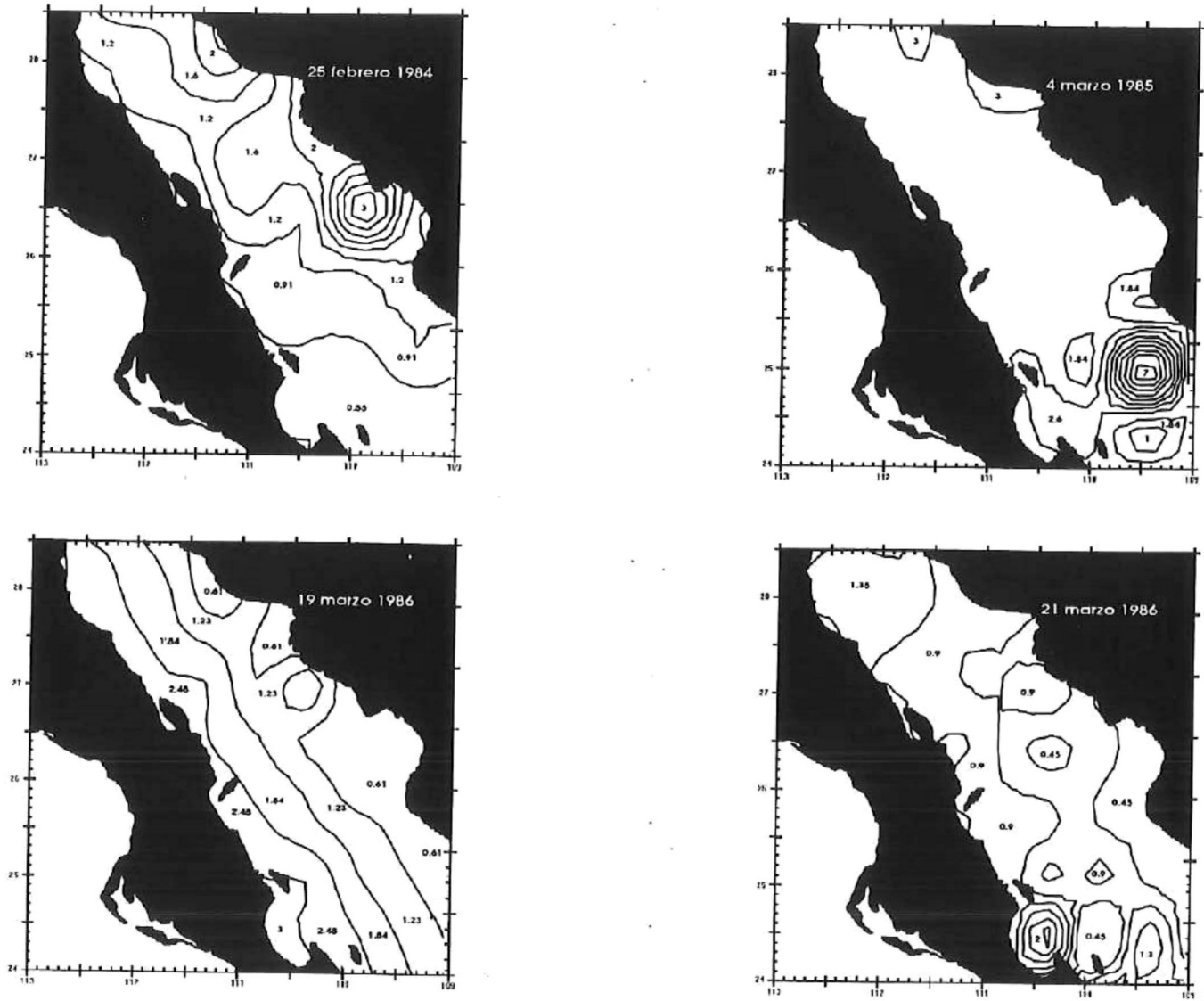


Figura 21.- Mapas de isólinas de la concentración de pigmento derivada de las observaciones del CZCS en condiciones de invierno para los días 25 de febrero de 1984; 4 de marzo de 1985; 19 y 21 de marzo de 1986.

pigmento en la costa oeste, siguiendo un patrón de distribución de las isolíneas de una forma totalmente paralela a la línea de costa para el 19 de marzo. Hay que hacer notar que el patrón de las isotermas también se invierte en 1986 (Fig. 20 2-8 abril de 1986).

Para las condiciones de verano, las isotermas muestran dos patrones (Fig. 22-24). El primero es representado por la dominancia de una sola temperatura (7-13 de septiembre de 1983 Fig. 22; 20-26 de agosto de 1985 Fig. 24), mientras que el segundo presenta cierto grado de estructuración. Las TSS fluctuaron entre 27 y 32 °C, siendo 30 °C la temperatura escogida como isoterma guía para detectar desplazamientos oeste-este. En general siempre las más bajas temperaturas se presentaron en la costa oeste, ya sea como un frente con gradiente hacia la costa este (13-19 de agosto; 3-9 y 10-16 de septiembre de 1985 Fig. 24), ó como focos de baja temperatura muy localizados (31 de agosto-6 de septiembre de 1983 Fig. 22; 9-15 y 16-22 de agosto de 1984 Fig. 23; 27 agosto-2 septiembre de 1985 Fig. 24), que pueden extenderse en forma de lengüetas muy gruesas hacia la costa este (17-23 de agosto de 1983 Fig. 22; 9-15 de agosto de 1984 Fig. 23; 13-19 de agosto de 1985 Fig. 24).

Los patrones de isolíneas de las concentraciones de pigmento concuerdan perfectamente con los descritos para las isotermas de verano (Fig. 25). Las concentraciones de pigmento máximas (de 0.2 a 2 mg m<sup>-3</sup>) siempre se presentan asociadas a la costa oeste. Podemos localizar focos de alta concentración de pigmento (22 de agosto de 1983; 2 de septiembre de 1983 Fig. 25), ó gradientes oeste-este con las isolíneas en forma paralela a la línea de costa (6 de septiembre de

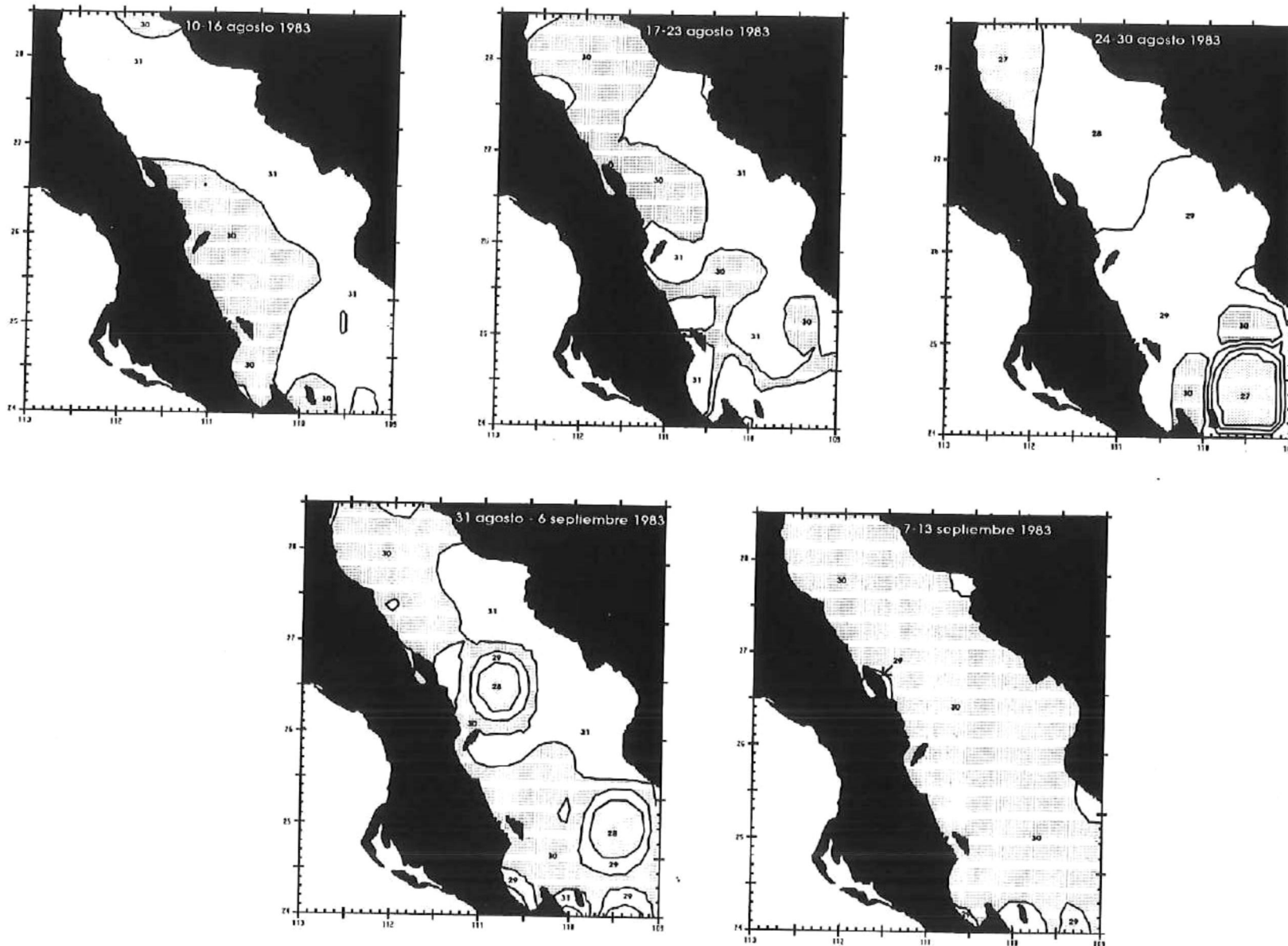


Figura 22.- Mapas de isolíneas de las temperaturas superficiales derivadas de las observaciones del AVHRR en condiciones de verano para las semanas entre el 10 de agosto al 13 de septiembre de 1983.

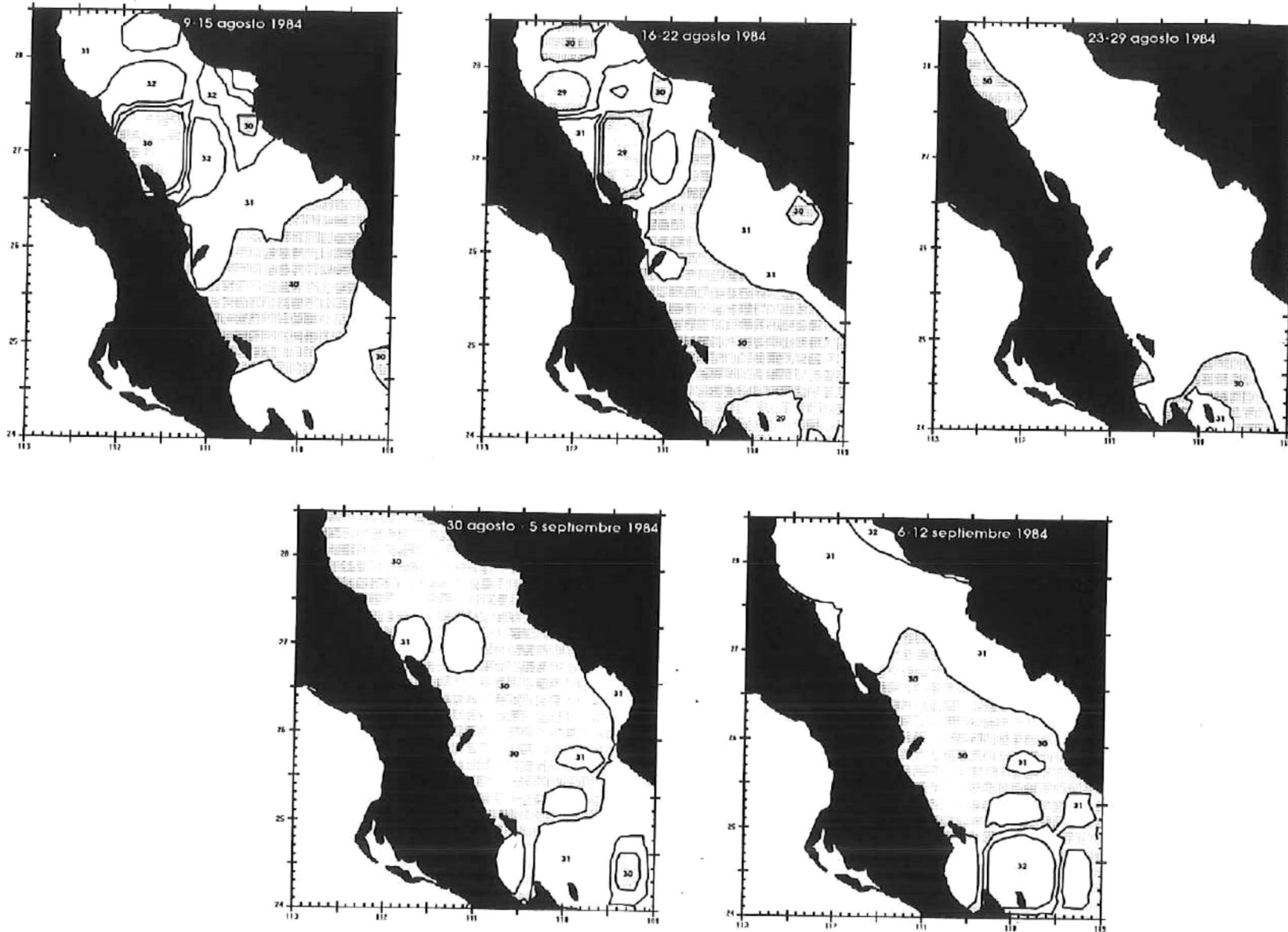


Figura 23.- Mapas de isólinas de las temperaturas superficiales derivadas de las observaciones del AVHRR en condiciones de verano para las semanas entre el 9 de agosto al 12 de septiembre de 1984.

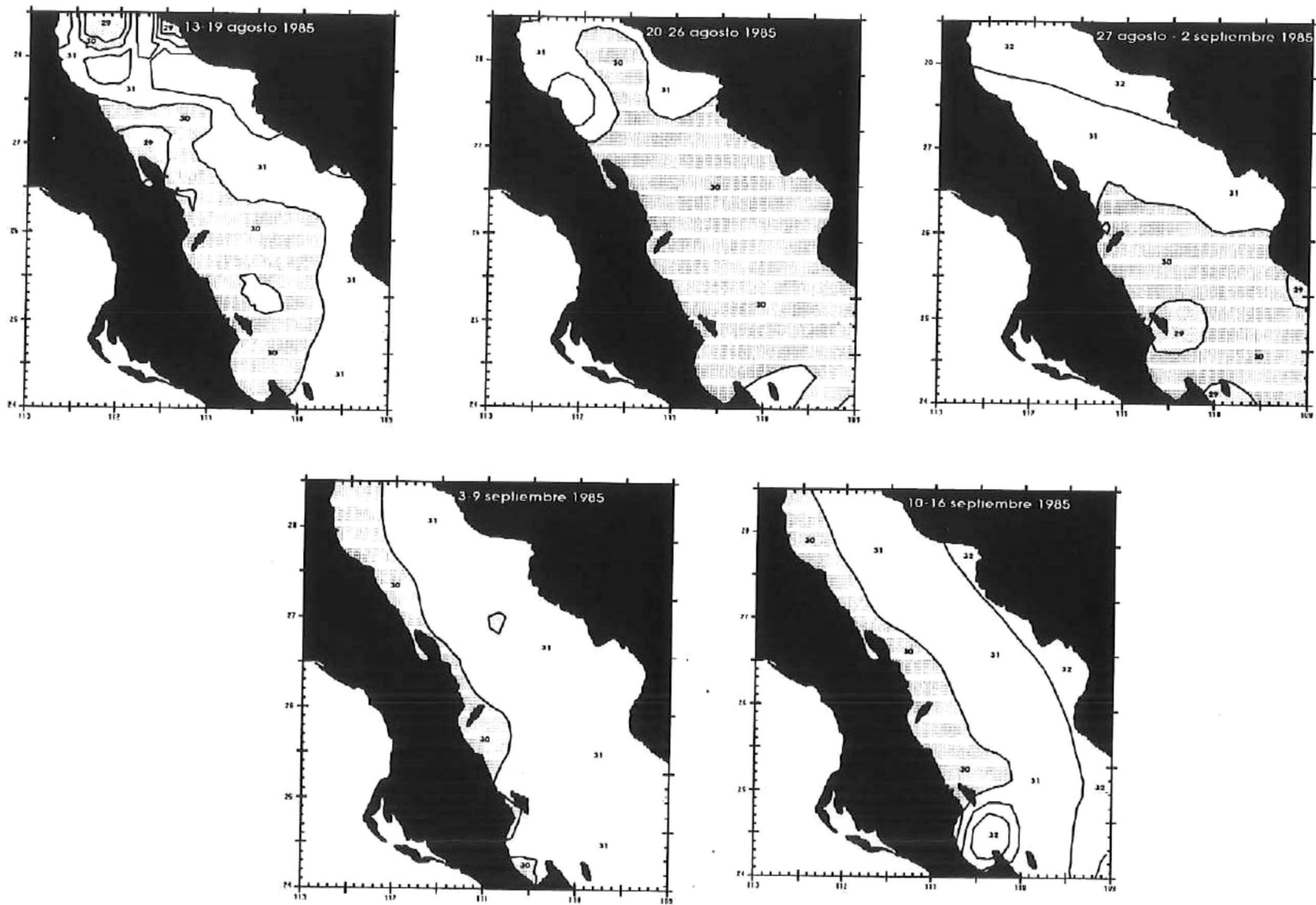


Figura 24.- Mapas de isolíneas de las temperaturas superficiales derivadas de las observaciones del AVHRR en condiciones de verano para las semanas entre el 13 de agosto al 16 de septiembre de 1985.

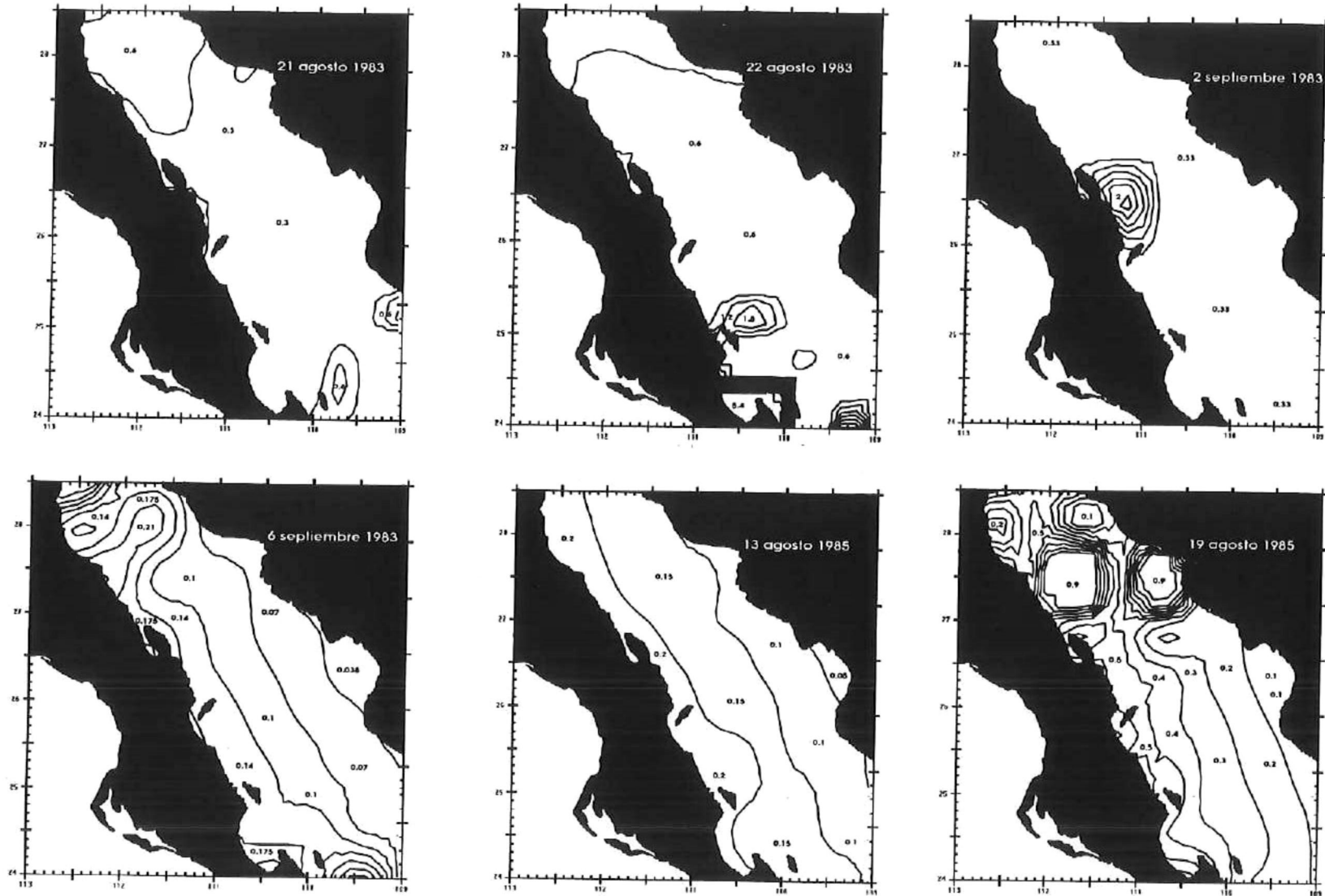


Figura 25.- Mapas de isóneas de la concentración de pigmento derivada de las observaciones del CZCS en condiciones de verano para los días 21 y 22 de agosto, 2 y 6 de septiembre de 1983; 13 y 19 de agosto de 1985.

1983; 13 y 19 de agosto de 1985 Fig. 25), así como detectar lengüetas de alta concentración extendiéndose de la costa de Baja California hacia la costa este (6 de septiembre de 1983 Fig. 25).

Los patrones espaciales del comportamiento del sistema de surgencias en el Golfo de California es muy claro para condiciones de verano y un poco menos claro para condiciones de invierno en éstas imágenes, siendo el año 1986 en el que se invierte el patrón general. Tratando de aclarar un poco más el patrón de las surgencias invernales, se tomaron los días 29 de marzo y 12 de abril de 1980, fechas para las que Badan-Dangon *et al.* (1985), basándose en imágenes del AVHRR reportan surgencias bien desarrolladas.

Aparentemente este evento de surgencias (Placa 4 para 4 y 5 de abril; Placa 5 para 6 y 7 de abril de 1980 que son los días que presentan el período más largo con imágenes continuas) sigue el mismo patrón para el sistema de surgencias de invierno descrito anteriormente. Lo que es notable en esta secuencia es como la parte sur de la región X presenta valores muy altos (Placa 4; 4 de abril), y al siguiente día presenta valores medios (Placa 4; 5 de abril) y al siguiente día vuelve a presentar valores altos (Placa 5; 6 de abril). Es más marcado el patrón de celdas de circulación que se presentan en varias zonas.

Se buscaron los datos de las concentraciones de pigmento derivadas de las imágenes diarias del CZCS que estuvieran comprendidas en ese período ó lo más cercano a él, quedando ambos eventos cubiertos con los datos de los días 26, 27 y 28 de marzo; 1, 2, 4, 5, 6, 7, 10, 11 y 12 de abril de 1980 (Fig. 26 y 27).



Placa 4.- Ejemplo de las imágenes en composición diarias para condiciones de invierno para 4 y 5 de abril 1980.



Placa 5.- Ejemplo de las imágenes en composición diarias para condiciones de invierno para 6 y 7 de abril 1980.

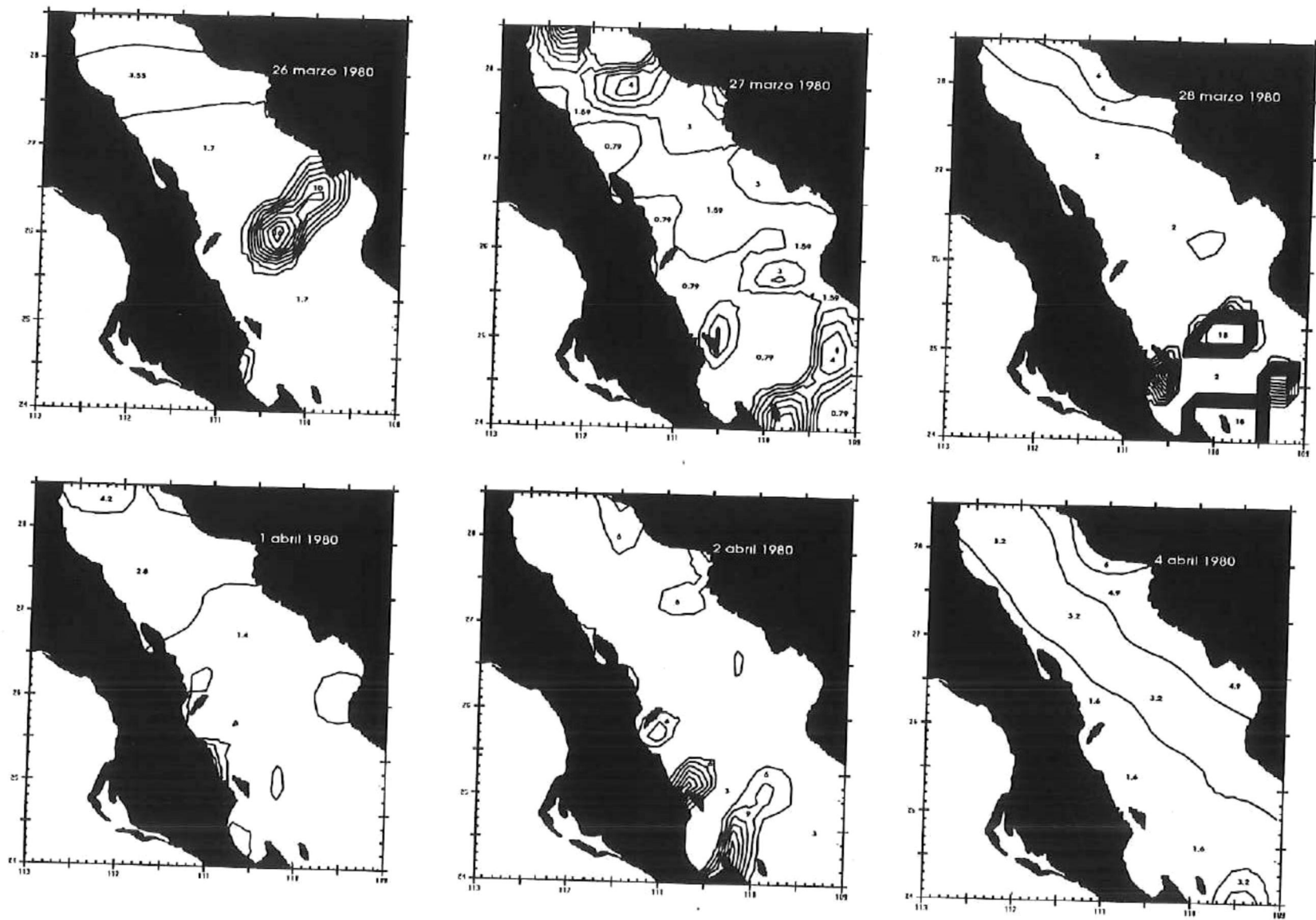


Figura 26.- Mapas de isolíneas de la concentración de pigmento derivada de las observaciones del CZCS en condiciones de invierno para los días 21-28 de marzo y 1, 2, 4 de abril de 1980.

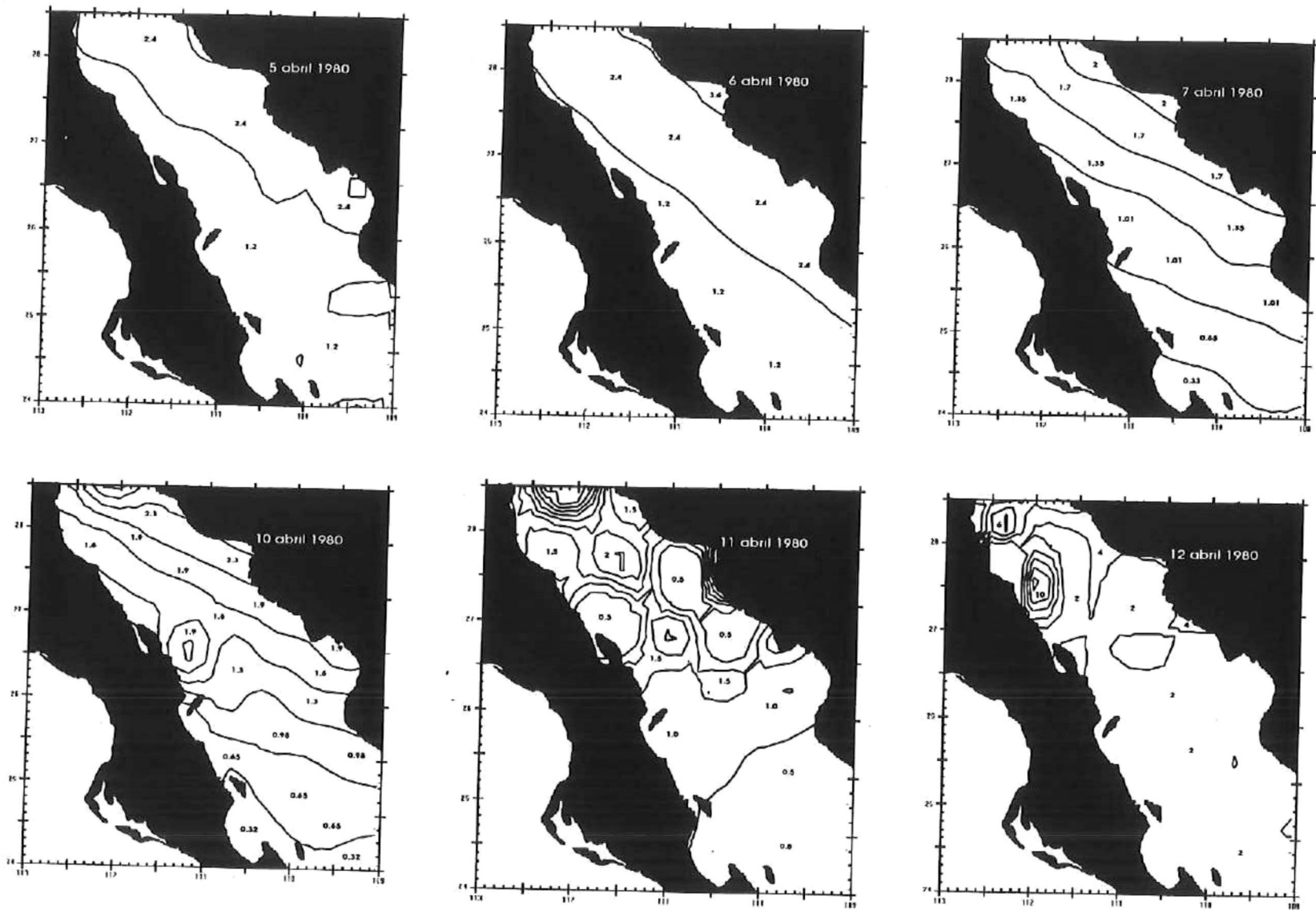


Figura 27.- Mapas de isolíneas de la concentración de pigmento derivada de las observaciones del CZCS en condiciones de invierno para los días 5, 6, 7, 10, 11 y 12 de abril de 1980.

Los valores máximos de la concentración de pigmento son más altos que los descritos en la figura 21, llegando hasta  $18 \text{ mg m}^{-3}$ . Solamente el 7 y 11 de abril (Fig. 27) presentan valores muy cercanos a  $1.0 \text{ mg m}^{-3}$ . En general los valores más altos en cada mapa se asocian a la costa este, presentándose como focos de alta concentración (26 de marzo de 1980 Fig. 26) ó como isolíneas con gradientes este-oeste tendiendo a ser las isolíneas paralelas a la línea de costa (4 de abril Fig. 26; 5, 6, 7 y 10 de abril Fig. 27). El 2 de abril (Fig. 26), así como el 10 y 12 del mismo mes (Fig. 27), se presentan puntos de alta concentración en la costa de Baja California.

En síntesis, para condiciones de verano las más bajas temperaturas (entre  $27$  a  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ) se presentan en la costa oeste, mientras que para las condiciones de invierno las temperaturas más bajas ( $16$  a  $19 \text{ }^\circ\text{C}$ ) se presentan en la región abajo de las grandes islas. Siguiendo la isoterma guía para cada condición (para verano de  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  y para invierno de  $19 \text{ }^\circ\text{C}$ ), se puede observar un desplazamiento de la lengüeta fría de oeste-este cargada hacia el sur para verano y de este-oeste cargada al norte para invierno. Se puede observar que los focos de más alta concentración de pigmento se localizan en la costa oeste en verano ( $0.2$  a  $2 \text{ mg m}^{-3}$ ) y en la oriental en invierno (desde  $2$  hasta  $18 \text{ mg m}^{-3}$ ). Se denota un desplazamiento oeste-este en verano e inverso en invierno. El patrón del efecto de las surgencias en la distribución espacial superficial de la biomasa fitoplanctónica presentado para condiciones de invierno es claro, pero es más claro el presentado para condiciones de verano, sobre todo con relación al origen de los valores altos de la concentración de pigmento.

## **5.- DISCUSIONES.**

### **5.1- Regiones biogeográficas y estacionalidad en el Golfo de California.**

La regionalización del Golfo de California, con fines explicativos y bases científicas, ha sido la inquietud de varios investigadores, resultando que clásicamente se ha dividido en base a cuatro criterios. El primer criterio es el basado en la topografía-batimetría, que da como resultado tres regiones (Merrifield y Winant, 1989): la Parte Norte, que es somera con una profundidad generalmente menor a 200 m, a excepción de la cuenca Delfín (Alvarez-Borrego, 1983); la Parte Sur, constituida por una serie de cuencas profundas (1000-3000 m) y la Boca del Golfo con una profundidad aproximada 3000 m. El segundo criterio es en base a la hidrología, resaltando sólo las Partes Norte y Sur (Alvarez-Borrego, 1983; Alvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991). El tercer criterio es en base a la estructura vertical termohalina (Roden y Emilsson, 1979), y divide al Golfo en cuatro regiones: el Alto Golfo, entre la desembocadura del Río Colorado y la Isla Tiburón, con una fuerte mezcla por mareas; el Canal de Ballenas, con condiciones oceanográficas inusuales en gran profundidad; el Bajo Golfo, desde la Isla Tiburón hasta Cabo San Lucas y Mazatlán; y la entrada del Golfo, desde Cabo San Lucas-Mazatlán hasta Cabo Corrientes. Tanto el Bajo Golfo, como la Entrada a éste, cuentan con una estructura termohalina complicada, caracterizada por remolinos, frentes e intrusiones que pueden ser originadas por la confluencia de tres distintas corrientes (Alvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991). El cuarto criterio es la distribución de especies fitoplanctónicas (Fig. 28), del cual se generan dos clasificaciones. La primera en base a la taxocenosis fue propuesta por Gilbert y Allen

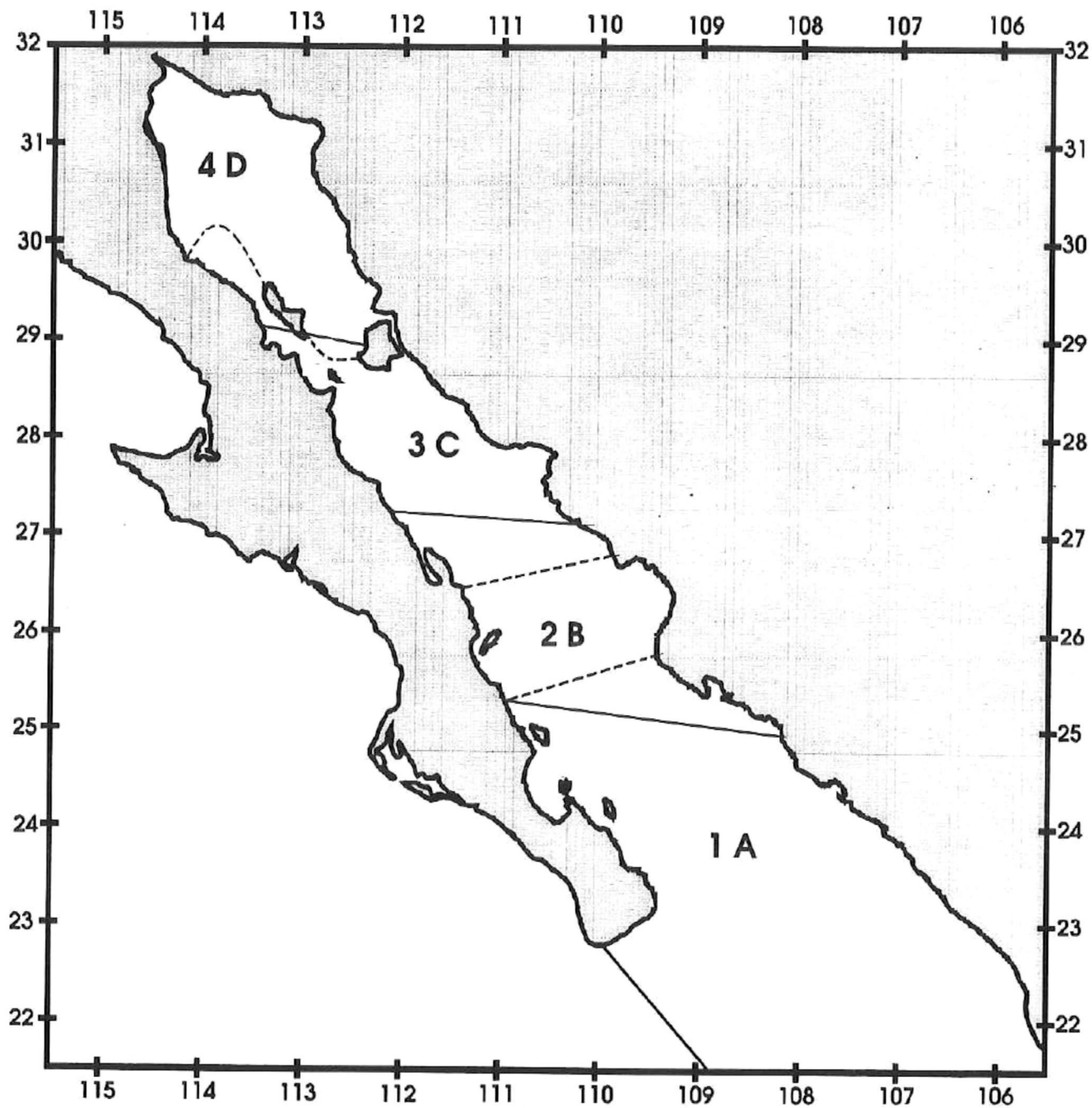


Figura 28.- Divisiones geográficas del Golfo de California de acuerdo con Gilber y Allen (1943) [letras y líneas solidas] y Round (1967) [números y líneas punteadas].

(1943), con 4 regiones: la región A "oceánica sureña", la B "central" (caracterizada por *Coscinodiscus wailesii*), la C "norteña" (caracterizada por *Asterionella japonica*) y la D "intermedia" (caracterizada por *Gonyaulax catanella*). Esta clasificación se basa en los datos de distribución de los taxa fitoplanctónicos, con los estudios que existían hasta 1943. Con la generación de más estudios sobre la distribución de la estructura fitoplanctónica, hoy se sabe que estos taxa pueden presentarse en todo el Golfo en diferentes épocas (Brinton *et al.*, 1986), lo cual puede poner en duda la validez de estas regiones. La segunda clasificación, con base en la tanatocenosis de las diatomeas en sedimentos (Round, 1967), divide al Golfo en cuatro regiones: la región 1 cuenta con una productividad orgánica primaria usualmente baja y correspondería a la boca del Golfo; la región 2, donde la diversidad de las especies del fitoplancton decrece en comparación con la zona 1; la región 3 que correspondería a la región intermedia; y la región 4 (Fig. 28). La abundancia aumenta de sur a norte y la diversidad aumenta de norte a sur.

Todas las anteriores clasificaciones coinciden en que la región de las grandes islas (Angel de la guardia y Tiburón) es la frontera entre la parte norte y la sur, las cuales están comunicadas por el canal de Ballenas que se localiza entre las islas. Las últimas tres clasificaciones han sido forjadas con estudios con muestreos discretos aislados en el tiempo y que, en general, no abarcan la totalidad del Golfo en un sólo crucero.

Las clasificaciones pueden coincidir en sus regiones (Paden *et al.*, 1991) y han sido utilizadas en la planeación de cruceros y otro tipos de estudios generales, considerándolas homogéneas en espacio y tiempo. La pregunta que surge

inmediatamente es de que si en realidad estas regiones se mantienen en el Golfo. Se sabe que en el Golfo de California operan altas tasas de mezcla en diferentes escalas temporales, por lo que el considerar la clasificación de las grandes regiones en base a los criterios arriba mencionados, y considerarlas permanentes, puede causar problemas interpretativos, pues lo que se está haciendo en la realidad es mezclar los resultados de dos ó más regiones que pueden comportarse muy diferentes en el tiempo.

Los datos derivados de las imágenes del CZCS nos dan idea, en escala global y sinóptica, de la variación que existe en las grandes regiones arriba mencionadas. La regionalización en base a estos datos, no da una ideal más real y operacional de las regiones biogeográficas en que puede dividirse el Golfo de California.

El número de regiones biogeográficas aumenta de norte a sur, así como que en áreas donde se presentan mayor número de regiones, estas son más pequeñas, lo cual coincide con la observación de la energía cinética turbulenta (TKE) va incrementándose de sur a norte, por lo menos en algunos de sus componentes más significativos (ver corrientes de mareas en Alvarez-Borrego, 1983), siendo el área de las grandes islas la que presenta una regionalización mayor siendo estas más pequeñas debido a que es un área de fuerte mezcla por fenómenos asociados a las mareas.

El termino de TKE considera a todos los procesos de mezcla, por lo que su intensidad dentro del Golfo de California puede depender de mareas, vientos,

calentamiento por insolación (Badan-Dagon *et al.*, 1985; Bray 1988a; Paden *et al.*, 1991), batimetría, (Alvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991), y la fisiografía.

La división del Golfo de California en estas 14 regiones biogeográficas es más completa y ecológicamente más válida que las clasificaciones previas. Algunas de estas regiones coinciden con áreas de ciclos de vida ó distribución geográfica de varios grupos faunísticos importantes, incluyendo al bentos.

Por ejemplo en la región I (región de la reserva de la biosfera del Delta del Río Colorado) ha sido reconocida como una área de alimentación y cría de muchas especies, muchas de ellas de importancia comercial como el camarón azul (*Penaeus stylirostris*), el café (*P. californiensis*), y el blanco (*P. vannamei*), además de la curvina boca amarilla (*Cynoscion xanthulus*). Esta región además cuenta con un alto grado endemismo, con especies como el gruñón (*Colpichthys hubbsi*), y con algunas que están consideradas en peligro de extinción como la Totoaba (*Totoaba macdonaldi*), y el pequeño delfín conocido como vaquita (*Phocoena sinus*). Como una medida de protección a esta región biogeográfica, el gobierno mexicano decidió ampliar la zona de reserva ya existente, que correspondía solamente al Delta del Río Colorado, hasta el triángulo que forma el Delta, San Felipe Baja California y Puerto Peñasco Sonora, decretándola como Reserva de la Biosfera de la región del Delta del Río Colorado, en el Diario Oficial de la Federación con fecha de 10 de junio de 1993.

La región I, esta caracterizada por una fuerte mezcla por mareas y con alta turbidez, reportándose enfrente al poblado de Santa Clara Sonora, profundidades del disco de Secchi desde los 5 cm en mareas vivas, hasta 1.5 m en mareas muertas (De-

La-Peña-Nettel, 1991). Bray (1988a) observa que las grandes marismas con las que cuenta esta zona pueden tener una influencia en la salinidad del Alto Golfo y por lo tanto jugar un papel muy importante en la circulación termohalina de Golfo. Así mismo, la concentración de nutrientes es siempre muy alta en el Delta del Río Colorado (Hernández-Ayón *et al.*, 1993).

Por lo anterior, se podría pensar que la luz puede ser limitante para la producción orgánica primaria en esta región. Sin embargo, se ha encontrado que las células del fitoplancton en esta región están adaptadas a un flujo fotónico intermitente, unido posiblemente a tiempos de procesamiento de un fotón sumamente bajos, lo que reditúa que con altas tasas de mezcla, el fitoplancton está adaptado a captar la luz en el poco tiempo que está dentro de la zona eufótica (Santamaría-del-Angel *et al.*, en preparación).

En las imágenes del CZCS siempre se observa a esta región, con muy altas concentraciones de pigmento (> de  $5 \text{ mg m}^{-3}$ , Placas 1-4; Figs. 7 y 11; Tabla IV). La concentración de clorofila *a* *in situ* reportada fluctúa entre 1.82 y  $18.27 \text{ mg chl a m}^{-3}$  para 1988 y 1989 (Barocio-León, 1991) y entre 2 y  $5 \text{ mg chl a m}^{-3}$  para septiembre de 1990 y febrero y mayo de 1991 (Santamaría-del-Angel y Alvarez-Borrego en preparación). La productividad orgánica primaria reportada es 0.47-0.56 en verano, y hasta  $3.47\text{-}10.67 \text{ mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$  en invierno (Barocio-León, 1991). Es interesante notar que a pesar de la alta turbidez, las concentraciones de pigmento derivadas de las observaciones del CZCS (Figs. 7 y 11; Tabla IV) son muy similares a las reportadas *in situ*. Aunado a todo lo anterior, se han reportado valores de biomasa zooplanctónica

de 1 a 154 mg (de peso seco)  $m^{-3}$  para esta región I (Farfán y Alvarez-Borrego, 1992), que son similares a los encontrados en regiones marinas muy ricas y zonas estuarinas.

La región II que corresponde al Golfo norte del lado Bajacaliforniano, es caracterizada por concentraciones intermedias de pigmento, sin valores extremadamente bajos en condiciones de verano (desde 1.75 a 2 ó 3  $mg\ m^{-3}$ , Figs. 7 y 11; Placas 1-4; Tabla IV). Para condiciones de invierno, Gendrop-Funes *et al.*, (1978) muestrearon en marzo de 1973 en la región II, y reportaron concentraciones de clorofila de 2 a 40  $mg\ m^{-3}$  para superficie, de 1.5 a 29  $mg\ m^{-3}$  para 5 m y de 2 a 24  $mg\ m^{-3}$  para 10 m, donde los valores más altos se presentaron frente a la costa de Baja California. En contraste para condiciones de verano, Alvarez-Borrego y Gaxiola-Castro (1988) reportaron para la última semana de junio de 1982 valores de 1.0, 0.9 y 0.8  $mg\ m^{-3}$  para superficie, 6 y 12 m de profundidad, respectivamente. Las concentraciones de pigmento derivadas de las observaciones del CZCS para esta región, son muy similares a los reportados con mediciones discretas (Tabla IV).

La región IV representa el giro central del Golfo norte. Difiere de la región II, pues presenta muy bajos valores de concentraciones de pigmento en condiciones de verano (Placas 1a y 3). En condiciones de verano la concentración de pigmento varía de 0.04 a 6.4  $mg\ m^{-3}$  (Figs. 7 y 11; Tabla IV), mientras que en condiciones de invierno, varía 0.1 a 30.6  $mg\ m^{-3}$  (Figs. 7 y 11; Tabla IV).

Los valores generados en cruceros oceanográficos de verano varían de 0.5 y 1.1  $mg\ m^{-3}$  para superficie y 8 m de profundidad, respectivamente (Alvarez-Borrego y Gaxiola-Castro, 1988; para la última semana de junio de 1982), mientras que para condiciones de invierno son 2.5 a 10 (marzo de 1973, Gendrop-Funes *et al.*, 1978), y

1.9 a 4 mg m<sup>-3</sup> (diciembre de 1981, Alvarez-Borrego y Gaxiola-Castro, 1988) para superficie, y de 3 a 10 (marzo de 1973, Gendrop-Funes *et al.*, 1978), 1.8 a 5.6 (diciembre de 1981, Alvarez-Borrego y Gaxiola-Castro, 1988) para profundidades entre los 5 y 10 m.

Las concentraciones de pigmento derivadas de las observaciones del CZCS, para diciembre de 1981 (Fig. 11) son muy similares a los valores reportados por los autores arriba mencionados, mientras que los valores para junio de 1982 son el doble de los reportados para estas fechas en aguas superficiales.

Una posible explicación de la distinción de esta región se puede apoyar en los patrones de circulación superficial en el Golfo norte.

Las regiones III, VI, X y XIV representan al sistema de surgencias costeras invernales. Los resultados de la asociación obtenidos por el ACP (Tabla III), posiblemente diferencian en estas 4 regiones por los desfases en tiempo con los que van ocurriendo los eventos de surgencias invernales, pues se ha reportado que estos eventos no ocurren simultáneamente en la costa este (Badan-Dangon *et al.*, 1985). Para condiciones de invierno Gendrop-Funes *et al.* (1978) reportaron valores *in situ* de concentración de clorofila en la región III de 5 a 29, 5 a 24 y 10 a 14 mg m<sup>-3</sup> para superficie, 5 y 10 m de profundidad, con altos valores en la porción norte. Estos mismos autores reportaron para la región VI, en condiciones de invierno, valores de 10 a 11, 10 a 13 y 8 a 12 mg m<sup>-3</sup> para superficie, 5 y 10 m de profundidad, respectivamente.

Para la región X, Valdez-Holguín (1986) reportó para condiciones de invierno, valores de concentración de clorofila de 5, 7 y 7.5 mg m<sup>-3</sup> para 0, 5 y 10 m

respectivamente. En la parte norte de la región X, Bazán-Guzmán (1990) reportó para invierno de 1984, reporta valores superficiales de 0.5 a 0.9 mg m<sup>-3</sup>. Las concentraciones de pigmento del CZCS, en la región X, para condiciones de invierno, son muy similares a la de estos autores (Tabla IV).

Las regiones V y VII forman un área que se ha considerado como una frontera entre el Golfo norte y el resto (Alvarez-Borrego, 1983; Bray, 1988b; Merrifield y Winant, 1989; Paden *et al.*, 1991). Recientemente, estas regiones en la zona de las Grandes Islas, ha sido caracterizada en base a la hidrología (Cajal-Medrano *et al.*, en preparación), producción orgánica primaria (Millán-Núñez *et al.*, 1993), y en base al coeficiente fotosintético (Cajal-Medrano *et al.*, 1992) en otoño de 1987, presión parcial de CO<sub>2</sub> (Hidalgo-González, 1993) y por flujo de calor de las aguas (Castro *et al.*, 1994). Curiosamente, ya Sverdrup (1941) en base solamente a datos hidrológicos hipotetizó la existencia de un umbral o frontera transversal a 350 m de profundidad entre las islas Tiburón, San Esteban y San Lorenzo que en el presente estudio puede coincidir en la capa superficial con la frontera sur de la región VII.

En general, en todas las anteriores regiones se denota una concentración de pigmento relativamente alta (Tabla IV), la cual puede ser reflejo de la alta energía cinética turbulenta (TKE), resultante de la marea y la cercanía de las islas, dando como consecuencia que la zona eufótica siempre esté fertilizada. Alvarez-Borrego y Gaxiola-Castro (1988) encuentran en la región entre las islas, una estructura vertical termohalina homogénea en la zona eufótica, lo cual indica la alta mezcla resultante de la energía cinética turbulenta en la zona.

La región V (canal de Ballenas) se caracteriza por tener alta concentración de nutrientes, aunque su máximo valor de la concentración de pigmento no es el más alto detectado el Golfo (Figs. 7 y 11; Tabla IV), posiblemente debido al efecto que tiene la alta turbulencia en un canal profundo. Para condiciones de invierno, Gendrop-Funes *et al.* (1978) reportaron valores de 3.5 a 7, 5 a 7 y 3.5 a 5  $\text{mg m}^{-3}$  para 0, 5 y 10 m de profundidad, respectivamente, mencionando que los valores más altos se encontraron en el área adyacentes a la Isla Angel de la Guarda. Alvarez-Borrego y Gaxiola-Castro (1988), para el invierno de 1981, reportaron valores de 1.0 a 2.7, 3.0 a 3.5 y 2.7 a 3.2  $\text{mg m}^{-3}$  para 0, 4 y 8 m de profundidad, respectivamente. Las concentraciones de pigmento del CZCS, para diciembre de 1981, son igualmente altas. Millán-Núñez *et al.* (1993) reportaron para el invierno de 1987 valores de 0.5 a 1.7  $\text{mg m}^{-3}$  a 0 y 5 m de profundidad, respectivamente. Para condiciones de verano (julio-agosto de 1990) Cortés-Lara (1994) reportó en esta región valores de clorofila a superficiales de 0.01 a 0.82  $\text{mg m}^{-3}$  en mareas posmuertas y 0.48 a 4.62  $\text{mg m}^{-3}$  en mareas posvivas, lo cual es consistente con las imágenes del CZCS para condiciones de verano (Tabla IV).

El encontrar que el Canal de Ballenas es una región independiente no es algo nuevo, pues se debe a las características particulares que presenta, las cuales son el resultados de la interacción de fuertes vientos (Alvarez-Borrego, 1983) y fuerte mezcla por marea (Alvarez-Borrego, 1983; Alvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991; Paden *et al.*, 1991, entre otros) aunados a que topográficamente el Canal es aislado del resto del área de las Islas por una cordillera submarina que conecta a la Isla Angel de la Guarda con Punta San Gabriel (Alvarez-Borrego, 1983).

El agua en el canal de Ballenas proviene de la mezcla producida por el fuerte fenómeno de marea entre la superficie y la profundidad del umbral (Alvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991) lo que provoca que las condiciones oceanográficas en el Canal, sean inusuales a profundidades elevadas (Roden y Emilsson, 1979). Las estructuras hidrográficas en el canal son: altas temperaturas, salinidades y oxígeno en grandes profundidades. No existe un mínimo de oxígeno en esta región (Sverdrup, 1941). También son características, las bajas temperaturas superficiales (Robinson, 1983) y la alta concentración de nutrientes superficiales (Alvarez-Borrego *et al.*, 1978) las cuales se encuentran de una manera persistente en la región.

Es por las características anteriormente citadas que en el Canal se reporten productividades orgánicas primarias más elevadas que en las otras regiones aledañas (Cajal-Mendrano *et al.*, 1992; Millán-Núñez *et al.*, 1993).

Badan-Dagon *et al.* (1985) mediante imágenes de TSS describen que el Canal de Ballenas se presenta como una zona constantemente fría, la cual está delimitada por un sistema de frentes, que dependen de la dirección de los vientos locales. El Canal de Ballenas tiene una alta energía cinética turbulenta, la cual se disipa en las otras regiones aledañas por la fricción del fondo (Alvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991; Paden *et al.*, 1991) y la generación de las ondas internas (Alvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991).

La región VII es caracterizada por la presencia de ondas internas que son generadas por las grandes amplitudes de marea (arriba de 4 m, Fu y Holt, 1984). En la parte norte de esta región, para condiciones de invierno, Gendrop-Funes *et al.* (1978)

reportaron valores de concentración de clorofila de 3 a 5, 3 a 8 y de 4 a 8  $\text{mg m}^{-3}$  para 0, 5 y 10 m respectivamente, mientras que Alvarez-Borrego y Gaxiola-Castro, (1988), reportaron (diciembre de 1981) valores de 2.6, 2.4 y 2.8  $\text{mg m}^{-3}$  para 0, 4 y 7 m de profundidad, respectivamente. Estos mismos autores para condiciones de verano (junio de 1982), reportaron valores de 2.4 a 3.5, 2.7 a 3.2 y 2.4 a 3.2  $\text{mg m}^{-3}$  para 0, 5 y 9 m respectivamente. Las concentraciones de pigmento derivadas de las observaciones del CZCS, para esta región, en diciembre de 1981 (Figs. 7 y 11) son cerca del 40 % más altas que las medidas directamente, mientras que los valores para junio de 1982 son desde muy parecidas hasta 50 % menores que los valores más altos reportados por los últimos autores.

Para la parte sur de la región VII, Valdez-Holguín (1986) reportó para condiciones de invierno (marzo de 1983) valores de clorofila de 2.2 a 3.0  $\text{mg m}^{-3}$  para profundidades entre 0 y 10 m. Así mismo, Bazán-Guzmán (1990), también para condiciones de invierno (diciembre de 1984), reportó valores de clorofila superficial de 0.5 a 0.9  $\text{mg m}^{-3}$ . Para condiciones de verano (julio-agosto de 1990), Cortés-Lara (1994) reportó valores superficiales de clorofila a de 0.01 a 0.82  $\text{mg m}^{-3}$  para mareas posmuertas y de 0.41 a 2.37  $\text{mg m}^{-3}$  para mareas posvivas. Los valores del CZCS para la porción sur de esta región son muy similares a los reportados por Valdez-Holguín (1986), Bazán-Guzmán (1990) y Cortés-Lara (1994) para condiciones de invierno y de verano respectivamente (Tabla IV).

La región VII, ya había sido caracterizada con anterioridad con datos generados en cruceros oceanográficos. Alvarez-Borrego (1983) menciona que las gráficas construidas por Sverdrup (1941) y por Granados-Gallegos (1974) indican que las

condiciones hidrológicas en la cuenca Tiburón, entre ambas islas, son muy similares a las encontradas en el Canal de Ballenas, sin embargo la diferencia entre ambas regiones se puede deber a la menor profundidad de la cuenca Tiburón (550 m Alvarez-Borrego, 1983). Aunado a lo anterior, hay que agregar que tiene una buena comunicación en la parte sur hacia el resto del Golfo. Se ha observado la existencia de frentes térmicos (en base a las observaciones del AVHRR) en esta región que se mueven según las mareas encontrándose en mareas vivas una intrusión de agua "cálida" proveniente de la parte sur de las islas, hacia la región entre ellas, mientras que en mareas muertas se observa una intrusión de aguas frías provenientes de la región de las islas hacia la cuenca de Guaymas (Paden *et al.*, 1991).

Las regiones VIII, IX y XI tienen sucesivamente bajas concentraciones de pigmento (Tabla IV). Para la parte oeste de la región VIII, Alvarez-Borrego y Gaxiola-Castro (1988) reportaron para condiciones de verano (junio de 1982) valores de concentración de clorofila de 0.3 y 0.9 para superficie y 12 m de profundidad, respectivamente. Los valores derivados por el CZCS para junio de 1982 en esa porción de la región son casi el 25 % más bajos que los reportados para superficie, por lo autores antes mencionados. Para abril de 1985, Lara-Lara *et al.* (1993) reportaron para la región VIII valores de clorofila tan altos como 5.2, 6.3 y 1.6 mg m<sup>-3</sup> para 0, 5 y 9 m respectivamente.

Para la parte central de la región XI, Valdez-Holguín (1986) reportó para marzo de 1984 valores cercanos a 0.15 mg m<sup>-3</sup> para profundidades entre la superficie y 10 m. Bazán-Guzmán (1990) para la misma porción reportó valores superficiales de 0.3 a 0.4 mg m<sup>-3</sup> para noviembre de 1984. Las concentraciones de pigmento derivadas de las

observaciones del CZCS para las regiones IX y XI son muy similares a las reportados por Lara-Lara *et al.*, (1993), Valdez-Holguín (1986) y Bazán-Guzmán (1990) (Tabla IV).

La región XII representa a Bahía de La Paz. Su existencia como una región separada es posiblemente por el efecto de barrera que crean las islas San José, Espíritu Santo y Cerralvo, aunado al efecto de intercambio con la laguna costera Ensenada de la Paz en su porción suroeste. Lo anterior puede ocasionar como resultado que las concentraciones de pigmento sean muy variables (Figs. 8 y 12).

La región XIII representa un área más oceánica y oligotrófica. Las series de tiempo de las concentraciones de pigmento (Figs. 8 y 12) muestran un pico máximo en condiciones de invierno, pero a comparación con las otras regiones, es muy bajo y breve (Tabla IV). Stevenson (1970) reportó valores superficiales de concentración de clorofila de 0.6 a 1.0 mg m<sup>-3</sup> de abril a agosto de 1967 en la entrada del Golfo. Valdez-Holguín (1986) reportó valores de 0.2 a 0.4 mg m<sup>-3</sup> para superficie y 10 m, respectivamente, en el área cercana a Cabo San Lucas y en la parte central de la región XIII en marzo de 1983.

Esta región es la delimitación de la entrada de la masa de agua del Pacífico dentro del Golfo, pues presenta concentraciones parecidas a las del Pacífico del lado de Baja California (0.1 a 0.2 mg m<sup>-3</sup> Figs. 8 y 12). Se ha observado que el intercambio entre el Golfo y el Pacífico responde rápidamente (meses) a los cambios de forzamiento atmosférico (Bray, 1988b), aunque la influencia del primero sobre el segundo es pequeña (Alvarez-Borrego, 1983). Algunos autores ya habían caracterizado esta región en base a datos oceanográficos (*v. gr.* Griffiths, 1968).

Al revisar las imágenes del CZCS (Placas 1-4) se denotan dos condiciones extremas dentro del Golfo de California: "invierno" y "verano". Las condiciones de invierno, se caracterizan en que todo el Golfo presenta altas concentraciones de pigmento, mientras que para condiciones de verano se caracteriza por presentar bajas concentraciones de pigmento, solamente con excepción de las regiones VII, V y I (Tabla IV). Esto coincide con las observaciones de Cortés-Lara (1994) y de Simpson *et al.* (1994), quienes tipifican a las condiciones de verano, mencionando que en general todo el Golfo presenta: termoclinas bien desarrolladas hasta 100 m de profundidad; bajas concentraciones superficiales de nutrientes; bajas concentraciones superficiales de clorofila.

Esta modulación biestacional es detectada por las series de tiempo de las concentraciones de pigmento derivadas de las observaciones del CZCS en todas las regiones (Figs. 7, 8, 11 y 12), así como por las series de tiempo de la TSS derivada de las observaciones del AVHRR (Figs. 16 y 17). Se observa que las condiciones de invierno abarcan desde noviembre a mayo y las condiciones de verano abarcan desde junio a octubre.

En general, a lo largo de todo el Golfo de California, la diferencia de la concentración de pigmento derivada de las observaciones del CZCS es muy drástica con valores tan altos como  $10 \text{ mg m}^{-3}$  en condiciones de invierno y tan bajos como  $0.1 \text{ mg m}^{-3}$  durante el verano. Solamente la región de la reserva de la biosfera del Delta del Río Colorado (región I Fig. 7) y el canal de Ballenas (región V Fig. 7) son la excepción. Para la región I los valores siempre fueron más altos de  $4 \text{ mg m}^{-3}$  y los valores mínimos de verano no son evidentes (Tabla IV). Para la región V los valores mínimos de verano

no son tan pequeños como en el resto de las regiones. En estas dos regiones, la fuerte mezcla por fenómenos asociados a la marea, el viento y el calentamiento solar crean una vigorosa circulación pueden enmascarar la variación estacional.

Estas dos estaciones han sido caracterizadas con datos discretos tanto meteorológicos como oceanográficos (v.gr. Granados-Guzmán e Hidalgo-González, 1994) y las variaciones han sido explicadas en base a cambios de vientos, temperatura atmosférica, irradiación solar, y sus efectos combinados en la circulación superficial.

Los vientos en condiciones de invierno predominan del noroeste, mientras que en verano soplan del sureste. En condiciones de invierno, el agua Superficial del Pacífico Tropical Este y el agua Subsuperficial Subtropical, con altas temperaturas y bajas concentraciones de nutrientes están presentes sólo en la boca del Golfo, mientras que en condiciones de verano los vientos favorecen la invasión de estas masas de agua hasta la porción sur de la Isla Angel de la Guarda (Alvarez-Borrego y Schwartzlose, 1979). Castro *et al.* (1994) mencionan que esta invasión de agua oligotrófica y caliente en condiciones de verano, se denota por un flujo en la costa este y/o fueran de la costa peninsular, lo cual es visible en las imágenes del CZCS para condiciones de verano (como ejemplos ver las Placas 1b y 3) formando estructuras, como remolinos ó celdas de circulación de agua de muy bajas concentraciones de pigmento.

Alvarez-Borrego y Schwartzlose (1979) indican que durante el verano de 1957 (año El Niño) se encontraron fuertes incursiones del agua Superficial Tropical del Pacífico Este y agua Subsuperficial Subtropical. Usando datos de temperatura y salinidad, Torres-Orozco (1993) calculó los volúmenes de agua Superficial Tropical del

Pacífico Este en el Golfo, para el período de 1939-1986, y aun que los datos son escasos y la mayoría de los cruceros sólo cubrían una porción del Golfo, reportó una estacionalidad y variación interanual clara. El mínimo volumen fue estimado para invierno incrementándose durante condiciones de verano, con un máximo en la primera mitad de las condiciones de invierno, con máximos valores en años El Niño siendo el más alto en 1983.

El clima en el Golfo de California es más continental que oceánico, lo cual contribuye a la presencia de intervalos muy grandes de temperatura, tanto diurnos como anuales (Roden, 1964). En condiciones de invierno, la temperatura del aire decrece hacia el interior del golfo, mientras que en verano ocurre lo contrario, encontrándose diferencias entre la costa este y oeste hasta de 10 °C (Roden, 1964; Alvarez-Borrego, 1983). La temperatura superficial del agua en la parte norte del Golfo varía entre 14 °C en invierno y 30 °C en verano, mientras que en la porción sur varía entre 20 a 30 °C para ambas condiciones (Roden, 1964; Brinton, et al., 1986; Robles y Marinone, 1987; Bray, 1988a). Castro *et al.* (1994) reportaron que en condiciones de invierno el agua del Golfo pierde calor, principalmente por el fuerte enfriamiento ocasionado por los vientos fríos y secos que soplan del noroeste, presentándose esta situación en fase para todo el Golfo.

## **5.2- Relación de los procesos de mezcla y/o advectivos con la concentración de pigmento.**

Una de las características más notorias del Golfo de California es su alta productividad orgánica primaria. Lo anterior es por que aparentemente en la zona

eufótica del Golfo siempre existe una concentración de nutrientes alta (Alvarez-Borrego 1983; Alvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991), por lo menos en condiciones de invierno. En general se observa que la concentración de nutrientes puede llegar a incrementarse de sur a norte, al igual que la productividad orgánica primaria, la abundancia fitoplanctónica (Alvarez-Borrego 1983; Alvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991), la presión parcial de CO<sub>2</sub> (Hidalgo-González, 1993), así como algunos procesos de mezcla, por ejemplo las velocidades de las corrientes de mareas en su componente M2 (Stock, 1976), tanto en su fase y amplitud (Quiros *et al.*, 1992). Por lo anterior, se puede esperar que la fuerza de mezcla por marea siga el mismo patrón (Alvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991).

El patrón arriba mencionado es evidente al realizar un análisis visual de las imágenes, así como en los promedios de la concentración de pigmento derivados de las observaciones del CZCS (Fig. 9b), mientras que los valores promedios de la TSS derivada de las observaciones del AVHRR se observa un patrón inverso (Fig. 9a). Por lo anterior podemos decir que en la boca del Golfo se encuentran aguas superficiales cálidas con bajas concentraciones de pigmento y a medida que nos movemos hacia el norte se presentan aguas frías con altas concentraciones de pigmento (Fig. 9).

La relación anterior fue probada al encontrar que en todas las regiones biogeográficas las TSS por abajo del promedio regional están asociadas a concentraciones de pigmento por arriba del promedio regional (Tabla V). Así mismo, los coeficientes  $\beta_1$  son negativos (Tabla VI). En general, la fuerza de esta relación

aumenta de sur a norte (Fig. 10), siendo las regiones con mayor fuerza (tienen un valor absoluto de  $\beta_1 > 0.29$ ) I, II, III, IV, VI y la X.

Considerando la idea de que si la fertilización del Golfo se debe a los procesos de mezcla y que la TSS es un indicador de estos procesos, la relación inversa entre la TSS y la concentración de pigmento indica que en escala mensual los procesos físicos de mezcla son los responsables de la alta productividad orgánica primaria.

Al comparar la concentración de pigmento promedio contra el  $\beta_1$  (Fig. 10), se observa que la primera sigue una curva bimodal cuya moda mayor corresponde a la región VI que es la que presenta mayor relación TSS-concentración de pigmento mientras que el segundo pico, de menor concentración lo presenta la región X. Lo anterior indica que los procesos de fertilización pueden ser más constantes ó de periodicidad más corta en la región VI que en la X. El proceso de fertilización más importante de la región X son los eventos de surgencias invernales que cuentan con una periodicidad estacional, mientras que en la región VI como parte de la porción de las grandes islas, además de contar con períodos de surgencias invernales, cuenta con otros procesos de mezcla que tienen un período menor al mes, como por ejemplo la marea.

Cabe hacer notar que en las regiones biogeográficas de la porción norte del Golfo (I, II, III y IV) (Fig. 10) aunque cuentan con alto  $\beta_1$ , la concentración de pigmento promedio es menos variable de región a región. Lo anterior puede ser explicado en base a dos procesos que no son excluyentes: por un lado, los fuertes procesos de mezcla que se presentan en esta porción pueden homogeneizar las concentraciones

de pigmento en todas estas regiones mientras que, por otro lado, esta porción es muy somera (< a 200 m). En general, estas concentraciones deben de ser muy altas en todas las regiones a excepción de la región IV que en condiciones de verano se presenta como un giro de concentraciones de pigmento más baja (Placas 1b y 3). El valor  $\beta_1$  de la región VI hace tomar en cuenta a esta región casi igualmente de singular que en el Canal de Ballenas.

En base a las observaciones de Alvarez-Borrego (1983), quien menciona que las condiciones hidrológicas en la cuenca Tiburón (región VII) son muy similares a las reportadas en el Canal de Ballenas (V), podríamos pensar que ambas regiones pueden presentar un valor de  $\beta_1$  similares (aproximadamente de -0.221). Sin embargo, la menor profundidad de la cuenca Tiburón (550 m, Alvarez-Borrego, 1983) y la comunicación de ésta en su parte sur, con el resto del Golfo, puede causar que aunque la relación TSS-concentración de pigmento es fuerte, no lo es tanto como el de la región del Canal de Ballenas.

En síntesis, el Golfo de California es un lugar que cuenta con alta energía cinética turbulenta (TKE) a lo largo del año. Esta TKE es originada por las distintas fuentes advectivas que operan dentro del Golfo en distintas escalas espacio-temporales. Así la intensidad de la TKE puede depender de las mareas, los vientos, el calentamiento por insolación (Badan-Dagon *et al.*, 1985; Bray 1988a; Paden *et al.*, 1991), y su interacción con la batimetría (Alvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991) y la morfología, dan como resultado una vigorosa circulación y por consecuencia alta mezcla en el Golfo (Bray, 1988a).

Las bajas temperaturas pueden ser indicadores de mezcla de aguas profundas y frías con aguas superficiales y más cálidas. Esta mezcla fertiliza la zona eufótica al combinar aguas más profundas frías y ricas en nutrientes, con aguas superficiales más cálidas y menos ricas en nutrientes. Se ha observado para la Corriente de California que la presencia de aguas frías esta relacionada con altas productividades orgánicas primarias y secundarias (McGowan, 1983). Estas características de las aguas superficiales son las principales causas de que el Golfo de California cuente con una alta productividad orgánica primaria (Alvarez-Borrego 1983; Alvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991), originando que la concentración de nutrientes dentro del Golfo la mayor parte del año no sean limitantes para los productores primarios.

Dado lo anterior, se puede pensar que el Golfo funciona de una manera independiente del Pacífico circundante, y solamente en condiciones de verano el agua oligotrófica del Pacífico penetra dentro del Golfo (Placas 1b y 3) limitando la influencia de la fertilización a la porción de las grandes islas, siendo sólo las regiones comprendidas en esa porción las que presentan altas concentraciones de pigmento en condiciones de verano.

### **5.3- El efecto de El Niño 1982-1984 en el Golfo de California.**

El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) tiene como efecto oceanográfico principal el reducir la productividad orgánica primaria a lo largo de la costa de Pacífico este desde Perú hasta Baja California y California (*v.gr.* Barber y Chavez, 1983; Cane, 1983). Algunos de los cambios observados durante el evento son temperaturas superficiales

inusualmente altas, fuertes lluvias, invasión de organismos tropicales y mortalidad masiva de varios organismos marinos locales. Wooster (1960) fue el primero en sugerir que las anomalías tanto en Perú como en California tenían las mismas causas de origen.

McGowan (1983) indica que altas productividades orgánicas primarias y secundarias son altas en la Corriente de California cuando el transporte de agua fría, de baja salinidad desde el norte es fuerte, y son bajas cuando el agua es caliente y baja en nutrientes.

El más fuerte evento de El Niño registrado empezó a desarrollarse en el Pacífico ecuatorial durante el verano de 1982 (Rasmusson, 1984). Registros de altura de mareas para el Pacífico mexicano incluyendo el Golfo de California detectaron a este evento a finales de 1982 como anomalías positivas del nivel medio del mar (Robles-Pacheco y Christensen, 1983).

Mee *et al.* (1985) reportan series de tiempo para temperaturas (1979-1983) y clorofila *a* (1979-1983) en la Boca del Golfo de California, a 30 Km de la costa. Ellos encontraron anomalías positivas en temperaturas superficiales relacionadas con eventos de El Niño desde septiembre-octubre de 1982 hasta junio de 1984. Así mismo los autores arriba mencionados utilizaron un índice de estratificación y de surgencia encontrando evidencias para sugerir que las surgencias fueron suprimidas durante 1983 en el sureste del Golfo.

Datos sedimentológicos dentro del Golfo de California indican que la estructura fitoplanctónica responde a eventos El Niño en diferente manera que lo hace frente a

Perú y a la costa del Pacífico en Baja California. Períodos de El Niño son generalmente marcados por incrementos en la abundancia de sedimentos silicios, donde resaltan la presencia de especies tropicales y subtropicales (Baumgartner *et al.*, 1985).

Lara-Lara *et al.* (1984) reportaron valores promedios de productividad de 3.1 gC m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup> en marzo y de 1.8 gC m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup> en octubre de 1983 cerca de las regiones de las grandes Islas. Lo anterior sugiere un gran incremento en la productividad orgánica primaria durante estos meses si los comparamos con los datos históricos reportados por Zeitzschel (1969) para 1960, 1967 y 1968, los cuales son de años No-El Niño (Quinn *et al.*, 1978). Lara-Lara *et al.* (1984) concluyen que el gran forzamiento y mezcla por mareas puede enmascarar los efectos asociados a eventos de El Niño.

Así mismo, Gaxiola-Castro y Alvarez-Borrego (1986) estimaron valores altos de productividad orgánica primaria para la porción norte del Golfo de California en diciembre de 1981 y junio de 1982 con condiciones de No-El Niño. Estos valores son muy similares a los reportados por Lara-Lara *et al.* (1984) pero el gran petacheo ocasionado por los grandes cambios de la TKE en períodos cortos pueden hacer muy difícil la descripción apropiada de cambios a meso escala en el espacio y tiempo.

Si consideramos las discusiones en las cuales se remarcaba que las aguas superficiales del Golfo de California cuentan con concentraciones de nutrientes que no son limitantes para los productores primarios, en la mayor parte del año. La fuerte TKE del Golfo puede minimizar los efectos negativos de El Niño, sobre la productividad orgánica primaria, debido a que la concentración de nutrientes superficiales se mantuvo alta durante el desarrollo del fenómeno (Alvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991).

Los datos discretos arriba mencionados sugieren que eventos de El Niño no necesariamente reducen la productividad orgánica primaria especialmente en la parte norte del Golfo donde existe una gran TKE. Sin embargo en la región de la Boca donde las condiciones hidrográficas son similares a las del Pacífico abierto, El Niño puede reducir fuertemente la biomasa fitoplanctónica.

Como ya se mencionó anteriormente, las series de tiempo para las concentraciones de pigmento en promedios mensuales (Figs. 11 y 12) muestran claramente la variación estacional. En general durante las condiciones de invierno de 1983-1984 (El Niño), los picos de máxima concentración fueron del 70 al 80 % más bajas que los valores máximos presentados en años previos (aproximadamente en el 70% de las regiones) (Figs. 11 y 12).

De acuerdo con los datos de Mee *et al.* (1985), las series de tiempo para las regiones de la parte este así como en la Boca del Golfo muestra un aumento del efecto de la surgencia sobre la biomasa fitoplanctónica durante el invierno de 1981-1982, y una supresión de la concentración de pigmento durante 1982-83 y 1983-84 (Fig. 12). Sin embargo, estas supresiones también se presentaron en más del 30 % de las regiones, para las condiciones de invierno 1979-80, 1980-81, 1981-82, (Fig. 12), años que según Quinn *et al.* (1986) fueron de No-El Niño. Es de notar que aproximadamente la mitad de las regiones presentan un bajo máximo invernal tanto en No-El Niño (1978-1979) como en El Niño (1983-1984).

Con la excepción del Canal de Ballenas, las series de tiempo del CZCS no muestran un incremento en la biomasa fitoplanctónica durante 1983 con respecto a los

años previos (Fig. 11), como lo sugirieron Lara-Lara *et al.* (1984). Alvarez-Borrego y Lara-Lara (1991) explican el por qué Lara-Lara *et al.* (1984) encontraron valores más altos en El Niño que los reportados por Zeitzschel (1969) en No-El Niño: la primera explicación sería que los valores de Zeitzschel (1969) fueron del crucero FRESNEL el cual fue realizado en noviembre-diciembre de 1968 antes de la temporada de surgencia, y usaron incubaciones de medio día, que tienden a dar resultados más bajos que las incubaciones cortas.

La región V (Fig. 11) presenta valores de concentraciones de pigmento excepcionalmente altos a finales de 1984 y bajos a través de 1984. Lo anterior se ajusta a las observaciones de Tershby *et al.* (1991) quienes reportan un gran número de cetáceos y aves marinas en el Canal de Ballenas durante 1983, decreciendo durante 1984 y 1985, sugiriendo que la región V puede servir de refugio para consumidores secundarios. En general, lo anterior es confirmado por las imágenes derivadas por el CZCS donde durante el evento de El Niño, en el Canal de Ballenas se observan altas concentraciones de pigmento, confirmando la idea de que esta región puede servir como un refugio para los animales marinos de alta movilidad como varias especies de ballenas, delfines y pájaros marinos. Con los resultados de la figura 13, volvemos a confirmar que la región VI puede ser igualmente particular como lo es la región del Canal de Ballenas (V), pues la región al norte de la Isla Tiburón (VI) presentan el más bajo efecto de El Niño en todo el Golfo, teniendo la región V el segundo efecto más bajo. Como ya se discutió previamente, lo anterior puede ser el resultado de los fuertes procesos de mezcla ocasionado por la alta TKE presentes en esas regiones. Por lo que podríamos considerar también a la región VI como un refugio para todos los

niveles de la trama trófica durante eventos de El Niño, aunque no se han monitoreado a los grandes depredadores dentro de esta región durante un evento ENSO.

El encontrar más bajo efecto de El Niño para la región VI que para el canal de Ballenas (V), se puede explicar en base a la excesiva mezcla que se presenta en el Canal (Fig. 13) la cual puede causar que las células de fitoplancton sean exportadas fuera de la zona eufótica. Se ha observado que cuando la TKE es moderada, se obtienen mayores números de asimilación que cuando se tienen TKE mayores ó menores (Alvarez-Borrego y Gaxiola-Castro, 1983). En 1983 esta TKE pudo verse reducida por lo que se presentaron altos valores de pigmentos en la región V, en 1984 la TKE aumento, lo que puede verse reflejado en una baja superficial de la concentración de pigmento. Torres-Orozco (1993), estimó que durante octubre de 1983, la incursión de "verano" de el agua Superficial Tropical del Pacífico Este se incrementó por el efecto de El Niño. Los volúmenes estimados por Torres-Orozco (1993) para marzo de 1984, son la cuarta parte que los estimados para marzo de 1983 y son más bajos que el promedio de volumen de todos los meses de marzo en el periodo analizado. Lo anterior sugiere una condición intensa de No-El Niño en el Golfo durante 1984, caracterizada por un aumento considerable de la TKE.

En las regiones I, II, y III también se presentaron bajos valores de la concentración de pigmento durante 1984 y altos en 1985 y 1986 (Fig. 11). En las regiones X y XI no fue apreciable la diferencia entre el máximo invernal en años de El Niño contra los de No-El Niño. Lo anterior puede deberse a las fuertes surgencias costeras que enmascararon los efectos de El Niño 1982-1984.

Considerando la idea de que si la variabilidad interanual de la biomasa fitoplanctónica fuera controlada por la secuencia El Niño-No-El Niño, esperaríamos grandes anomalías negativas para años de El Niño y anomalías relativamente pequeñas en años No-El Niño. Sin embargo, esto no se ve tan claro en las series de tiempo de las anomalías mensuales (Figs. 11 y 12). Contrariamente a los casos reportados en la literatura para la temperatura y el nivel del mar, las anomalías de las concentraciones de pigmento no muestran un patrón claro. Se observan anomalías negativas y positivas mezcladas para muchos de los años muestreados en varias regiones. Sin embargo son principalmente anomalías positivas para 1981 y el invierno de 1981-82 para muchas de las regiones, con las excepciones de las regiones localizadas más al sur. Es de notar que el Canal de Ballenas (región V) y en menor proporción la región del Delta del Río Colorado (región I) presentan anomalías positivas.

Posiblemente el no encontrar unos patrones claros, en cuanto a las anomalías de las concentraciones de pigmento podría deberse a que nuestras series de tiempo son muy cortas, o porque la secuencia de eventos El Niño y No-El Niño, no domina la variabilidad interanual de la concentración de pigmento superficial. Este último punto es de gran interés pues indica que la compleja dinámica en las diferentes regiones del Golfo enmascaran el efecto de los eventos de El Niño 1982-84 y solamente en la entrada del Golfo, donde la TKE no es muy fuerte, el Niño ocasionó bajas concentraciones de pigmento.

Los valores de  $Pr$  muestran en general (Fig. 13) que el efecto de El Niño como causante de anomalías negativas en las concentraciones de pigmento en el Golfo de

California es muy bajo, presentando el efecto mayor en la región XI, y el menor en la región VI. En la porción al norte de las islas, observamos que el menor efecto lo tiene la región I y se incrementan poco a poco hacia la región IV. Después el efecto es mayor a medida que nos acercamos a las regiones al sur del Golfo.

Si el evento de El Niño se denota como un tapón superficial de agua caliente y oligotrófica, podríamos pensar que en base a la modulación biestacional que presenta el Golfo de California, las condiciones de verano se ven "reforzadas" cuando se presenta un evento de El Niño, mientras que la alta TKE presentada en condiciones de invierno pueden en mayor ó menor medida mezclar esa agua superficial caliente oligotrófica, con aguas profundas más frías y con mayor concentración de nutrientes.

#### **5.4- El efecto de las mareas sobre la concentración de pigmento.**

En la porción de las Islas, las mareas son principalmente semidiurnas con amplitudes cercanas a los cuatro m. En la porción Norte del Golfo también son principalmente semidiurnas, pero con amplitudes mayores, desde 2 m hasta un máximo de 10 en el Delta del Río Colorado (Roden y Groves, 1959; Roden 1964; Alvarez-Borrego, 1983). Esta gran amplitud de marea en la porción norte causa una fuerte corriente de marea, que aumenta a medida que el Golfo se hace más estrecho. Por ejemplo, se han reportado en las regiones del Golfo norte velocidades de corrientes de mareas de  $3 \text{ m s}^{-1}$  (Roden 1964), mientras que en la región de Delta del Río Colorado (I), pueden ir desde  $1 \text{ m s}^{-1}$  en mareas muertas, hasta  $2.10 \text{ m s}^{-1}$  en mareas vivas (Cupul-Magaña, 1994). A lo anterior hay que agregar que en promedio se

dan 5.5 horas de estado de flujo y 6 horas de reflujo generalizando toda la región del Golfo norte (Alvarez-Borrego, 1983).

Los fuertes flujos de marea generan ondas internas que contribuyen a un 10 % de disipación de la marea semidiurna (Fu y Holt, 1984). Alvarez-Borrego y Lara-Lara (1991) discuten sobre la relación de las ondas internas y su asociación con las áreas en las que se divide el Golfo en base a la distribución y abundancia fitoplanctónica, marcando que las ondas internas pueden ser asociadas a estas áreas o zonas con fronteras en los antinodos. Las corrientes horizontales, fuertes en los nodos, pueden disminuir a cero en los antinodos. Por el largo periodo de esta onda (7 días), la Fuerza de Coriolis, puede producir corrientes circulares en cada zona, siendo la dirección en la zona central al principio opuesta a la dirección en la zona norte y en la sur. Lo anterior trae como consecuencia que la corriente horizontal simple, se invierte cada mitad de periodo, lo cual ocasiona que las regiones queden aisladas una de otras. Sin embargo, frecuentes rompimientos de estas fronteras pueden ser esperados (Brinton *et al.*, 1986).

Stock (1976) calculó las corrientes de mareas para distintos puntos en el Golfo, encontrando que las elipses de corriente para el componente principal lunar semidiurno (M2) tiene un eje mayor que se incrementa desde la boca ( $3 \text{ cm s}^{-1}$ ) hasta la cabeza ( $60 \text{ cm s}^{-1}$ ). Las corrientes de mareas en regiones topográficamente restringidas como la región al oeste de la isla Tiburón, excede los  $2 \text{ m s}^{-1}$  (Bray y Robles, 1991).

Paden *et al.* (1991), mediante un análisis de regresión entre datos de TSS y el forzamiento de la marea, muestra que la mezcla por mareas ocurre en la región de las grandes islas y en el Golfo norte. Esta mezcla es el resultado del rompimiento de ondas internas en el umbral o de saltos hidráulicos sobre el umbral entre 300-500 m. Estos mismos autores han observado para la región VII la existencia de frentes térmicos (en base a las observaciones del AVHRR) que se mueven según las mareas encontrándose en mareas vivas una intrusión de agua "cálida" proveniente de la parte sur de las islas, hacia la región entre ellas, mientras que en mareas muertas se observa una intrusión de aguas frías provenientes de la región de las islas hacia la cuenca de Guaymas. La importancia de la mezcla por mareas tiene una influencia significativa en la circulación del Golfo, según lo observado por Bray (1988b), puesto que provee la energía de mezcla durante los procesos de formación de masas de agua, debiendo de ser esta energía y por lo tanto la mezcla que ocasiona, es más intensas en mareas vivas.

En este trabajo se considero que los días que presentaron  $Z_{\text{amplitudes}}$  positivas tienen mayor poder de mezcla que aquellos días que cuentan con  $Z_{\text{amplitudes}}$  negativas, siendo los puntos de mayor mezcla los días que presentaron mareas vivas, mientras que los días de menor mezcla fueron los días que presentaron mareas muertas.

Las región I, III, IX y X (en base a todos los datos disponibles, Tabla VII), IV, VIII, IX, XIII y XIV (para condiciones de invierno, Tabla VIII) y I, V, VIII y XII (para condiciones de verano, Tabla IX) se observa que mareas de mayor poder de mezcla están asociadas con concentraciones de pigmento menores que las concentraciones asociadas a condiciones de menor poder de mezcla. Lo anterior puede ser explicado

por las observaciones de Alvarez-Borrego y Gaxiola-Castro (1983) quienes en base a datos en barco muestran que la turbulencia moderada causa mayores números de asimilación que aquellos asociados a una intensa turbulencia ó estratificación, lo cual se explican como el exceso de turbulencia puede ocasionar que las células de fitoplancton sean exportadas fuera de la zona eufótica, mientras que con menor turbulencia las células permanecen más tiempo en niveles altos de irradiancia.

Considerando que las concentraciones de pigmento mayores se presentan cuando el poder de mezcla es menor y que cuando aumenta esta mezcla diluye los parches superficiales, lo que reditúa en menores concentraciones detectadas, este efecto es más marcado en las regiones que forman la porción de las grandes islas (Fig. 15), que coincidentemente son las que presentan mayor velocidad de corriente de marea. Al sur de esa porción, el efecto de las mareas es nulo ó casi nulo.

La mayoría de los trabajos en el Golfo de California consideran a la mezcla por mareas como un factor de primer orden en el efecto de fertilización de las aguas superficiales. Sin embargo son contados los trabajos que pretenden evaluar su efecto. Como ya se mencionó anteriormente, el trabajo de Paden *et al.* (1991), se basó en imágenes del AVHRR para evaluar el forzamiento por la marea. Así mismo, los trabajos basados en datos de barco son, el de Simpson *et al.* (1994), que evalúa la mezcla por mareas mediante datos de salinidad y temperatura, y el trabajo de Cortés-Lara (1994) quien caracteriza los efectos de las mareas en los nutrientes, clorofilas y abundancia fitoplanctónica. Estos dos últimos trabajos son el producto de una misma campaña oceanográfica, la cual se desarrolló en condiciones de verano (julio-agosto

de 1991), siguiendo como técnica de muestreo transectos de estaciones en mareas posvivas y posmuertas.

Si usamos la desviación estándar (SD) de los perfiles de nutrientes de 0 a 600 m, que reporta Cortés-Lara (1994) para condiciones de verano, en las regiones biogeográficas de la porción de las islas (V y VII) se observa que en mareas posmuertas tienen mayor SD, mientras que en mareas posvivas cuentan con menor SD. Lo anterior indica que en mareas de muy bajo poder de mezcla, los perfiles de nutrientes tienden a tener concentraciones extremas, desde estados oligotróficos en la superficie hasta condiciones bastante eutróficas a profundidad. Si aumentamos el poder de mezcla, la diferencia entre los valores superficiales y los profundos se reduce, lo cual repercutiría en SD menores.

Es de notar que las regiones en la porción al norte de las islas (Fig. 15 regiones I a IV), aunque la amplitud de marea es considerable, el efecto por mareas en la concentración de pigmento es insignificante, lo cual podemos atribuirlo a que la mezcla por marea en esta porción puede tener componentes que sean la combinación de otras fuentes de TKE, aunados a su interacción con la topografía y la batimetría, lo cual da como resultado un estado cuasi-continuo de mezcla.

Nuestros datos pueden indicar que la reducción de la TKE para reeditar en altas concentraciones de pigmento tiene que tener un límite, lo cual se puede observar en los resultados en la región VIII (Tabla VII), en la cual se asocia una baja concentración de pigmento con mareas de bajos efectos de mezcla. Desgraciadamente no podemos hablar de magnitud pues esta varía de región a región, por lo que lo más probable es

que una TKE que se considere moderada para la región V ó I sea de las más altas en otras regiones, por lo que puede representar un exceso de mezcla, por ejemplo VIII o la XIV, si pensamos que la taxocenosis de la región está adaptada a todas las fluctuaciones a corto período que se presentan en ella. Lo anterior concuerda con las observaciones de Cortés-Lara (1994) quien reporta para condiciones de verano, en condiciones de mareas posvivas (que representarían unas condiciones de mezcla moderadas), valores mayores de clorofila a superficial, que en condiciones de mareas posmuertas (que representarían una supresión excesiva de la mezcla). En otras palabras cuando se presentan muy altas TKE y por lo tanto se dan condiciones de mezcla excesivas, las células de fitoplancton pueden ser exportadas fuera de la zona eufótica, lo que reditúa en bajos valores superficiales de pigmento. Cuando esta mezcla se hace más moderada se presentan condiciones adecuadas de fertilización lo que reditúa en altas concentraciones de pigmento superficiales. Cuando la mezcla es suprimida, ya no se dan los procesos de fertilización y por lo tanto la concentración de pigmento superficial es baja.

Las regiones V del Canal de Ballenas (en general Tabla VII), I, V, VIII Y XII (para condiciones de invierno, Tabla VIII), VII y XII (para condiciones de verano, Tabla IX) son las únicas que presenta concentraciones mayores a  $1 \text{ mg m}^{-3}$  en condiciones de mareas de con  $Z_{\text{amplitudes}}$  positivas que representan altos poder de mezcla regionales.

En general, las regiones II, VI y VII (Tabla VII), I (para condiciones de invierno Tabla VIII) y II, III, IV, IX, X, XI, XIII y XIV (para condiciones de verano Tabla IX), no presentan un patrón claro de asociación entre el estado de la marea y la concentración de pigmento, lo cual puede sugerir que las fluctuaciones de la concentración de

pigmento pueden ser a una escala mayor que la escala de operación de la marea, tal como la modulación biestacional y otros componentes de la TKE, por ejemplo las surgencias.

### **5.5- El sistema de surgencias en el Golfo de California.**

Los vientos en el Golfo de California son extremadamente variables, pero se ajustan al patrón de modulación biestacional; vientos del NW prevalecen de noviembre a mayo (condiciones de invierno), mientras que el resto del año dominan vientos del SE (condiciones de verano) (Merrifield y Winant, 1989). Según estos patrones de viento, se pueden esperar surgencias en la costa este para condiciones de invierno y en la costa oeste para condiciones de verano (Roden, 1964; Robinson, 1973; Alvarez-Borrego, 1983; Merrifield y Winant, 1989; Badan-Dangon *et al.*, 1991). Badan-Dangon *et al.* (1985), usando imágenes al infrarrojo de satélite, observaron que en condiciones de invierno se presentan surgencias bien desarrolladas cuyas lengüetas se originan en un punto de la costa continental, cruzando todo el golfo hasta la costa peninsular. Esta lengüeta se observó que se movía en dirección del viento alejándose de la costa continental, cruzando el Golfo hasta la costa opuesta, donde se dividía en dos penachos que se extendían de regreso hacia la costa continental. Para condiciones de verano en cuanto a temperatura superficial no hay ningún reporte.

En las imágenes del CZCS para condiciones de invierno (Placas 1a, 4 y 5) es de notarse que las concentraciones de pigmento son altas en la mayor parte del Golfo. El efecto de las surgencias es evidente frente a las costas continentales, y en el Golfo

norte son evidentes los valores muy altos de la concentración de pigmento. Se pueden apreciar las lengüetas de las altas concentraciones de pigmento moviéndose del lado oriental hacia las costas de Baja California. Las concentraciones de pigmento son bajas solamente a la entrada del Golfo, al sur de los 25° N. Se observa que las máximas concentraciones se encuentran en ambos lados del golfo, siguiendo patrones de celdas de circulación para condiciones de invierno. Al sur de las grandes Islas, se observan lengüetas de alta concentración de pigmento elongándose hacia la costa Bajacaliforniana y formando celdas de circulación este-oeste. Es de notar que la región X que representa el sistema costero de Sonora-Sinaloa, se marca como un franja de alta concentración de pigmento.

El efecto de las surgencias de verano frente a las costas de Baja California no es evidente en las imágenes del CZCS (Placas 1b, 2 y 3), pues en general no se denotan altas concentraciones de pigmento. En dichas imágenes se observan celdas de circulación que aparentemente siguen la invasión de agua oligotrófica del Pacífico aledaño.

En 1985 la condición No-El Niño puede haber sido la responsable de que se hayan observados algunos puntos aislados de altas concentraciones de pigmento en las costas Baja California en condiciones de verano (Placa 3, 14-septiembre-1985), aunado a los patrones de circulación que pueden transportar altas concentraciones de una costa a otra.

Las series de tiempo de las regiones IX y XI (Fig. 7 para composiciones semanales y Fig. 12 para composiciones mensuales), no muestran el efecto de estas surgencias de verano en base a las concentraciones de pigmento. Cortés-Lara (1994)

reporta que para condiciones de verano, las máximas concentraciones de clorofila a tienden a estar hacia la península (aproximadamente de  $1.57 \text{ mg m}^{-3}$ ).

En general, para condiciones de verano, la mayoría de las aguas del Golfo tienen muy bajas concentraciones de pigmento. Con los vientos del sureste la masa de agua Superficial Tropical del Pacífico Este entra en el Golfo con altas temperaturas y bajas concentraciones de nutrientes (Alvarez-Borrego y Schwartzlose, 1979). Las concentraciones de pigmento son altas solamente en las aguas adyacentes a las grandes Islas, a la desembocadura del Río Colorado, en el Golfo norte, y en las cercanías a la costa continental.

En este trabajo, se tomó el concepto básico de definición de surgencias, y se buscaron en las gráficas de la TSS (Figs. 16 y 17), diferencias bruscas de más de  $2^\circ \text{C}$  en períodos cortos semanales. De este análisis se detectaron 6 eventos de surgencias, tres en condiciones de verano y tres en condiciones de invierno. En general, se puede observar en dichos diagramas que, para condiciones de verano (Figs. 22, 23 y 24), las más bajas temperaturas (entre  $27$  a  $30^\circ \text{C}$ ) se presentan en la costa oeste, mientras que para las condiciones de invierno (Figs. 18, 19 y 20), las temperaturas más bajas ( $17$  a  $19^\circ \text{C}$ ) se presentan en la región abajo de las grandes islas, coincidiendo con la conclusión de Robinson (1973). Se tomó en cada condición una isoterma guía, siendo para verano de  $30^\circ \text{C}$  y para invierno de  $19^\circ \text{C}$ , las cuales pueden mostrar un desplazamiento de la lengüeta fría de oeste-este cargada hacia el sur para verano y de este-oeste cargada al norte para invierno.

En base a los diagramas de isolíneas para la concentración de pigmento, se observa que los focos de más alta concentración de pigmento se localizan en la costa

oeste en verano (Fig. 25) y este en invierno (Figs. 21, 26 y 27). Se denota un desplazamiento oeste-este en verano e inverso en invierno. En general estas altas concentraciones resultados de las fertilizaciones provocadas por los eventos de surgencias, para condiciones de verano son en general menores de  $1.0 \text{ mg m}^{-3}$ , fluctuando de 0.2 a 2, mientras que en condiciones de invierno son generalmente  $> 1.0 \text{ mg m}^{-3}$ , pudiendo llegar hasta 18 (Fig. 21).

Los desplazamientos observados de las lengüetas, tanto en base a los datos de la TSS como a los de las concentraciones de pigmento, se deben a las corrientes superficiales en el Golfo de California. Se ha reportado que existe un flujo neto en verano hacia el norte (Granados-Gallegos y Schwartzlose, 1974; Alvarez-Borrego, 1983; Marinone y Ripa, 1988), pegado a la costa este (Torres-Orozco, 1993), provocando celdas de circulación superficial ciclónicas (Bray, 1988a). Para condiciones de invierno el flujo neto va hacia el sur (Granados-Gallegos y Schwartzlose, 1974; Alvarez-Borrego, 1983; Marinone y Ripa, 1988) con celdas de circulación anticiclónicas (Bray, 1988a). Estas últimas celdas ya habían sido detectadas por imágenes del AVHRR (Badan-Dagon *et al.*, 1985).

El que las imágenes de color del océano del CZCS no detecten el efecto de las surgencias de verano sobre la biomasa fitoplanctónica es un problema de construcción de la paleta con la cual asociamos los 256 números digitales con un espectro de concentraciones.

El sistema de surgencias del Golfo de California para condiciones de verano se ve afectado por la presencia de la masa de agua Superficial Tropical del Pacífico Este. Esta masa de agua actúa como un "tapón" caliente que enmascara el efecto de la

surgencia en el transporte de nutrientes a la zona eufótica, de una manera similar como "El Niño" enmascara el efecto de surgencias en regiones como frente a Perú. Chavez (1987) expresó que contrario a lo que se creía en el pasado, durante el evento "El Niño" los vientos que causan las surgencias frente a Perú se intensifican, pero la acumulación de agua caliente y pobre en nutrientes y una nutriclina más profunda resultan en que el agua de surgencia es pobre y no permite el crecimiento del fitoplancton. En síntesis, para condiciones de verano con el tapón de agua caliente y pobre que forma la intrusión de la masa de agua del Pacífico tropical este, el agua que emerge no cuenta con altas concentraciones de nutrientes, y aunque sí tiene una mayor concentración que el agua superficial, lo que se refleja en un leve incremento en la concentración de pigmento, sin embargo en escala global este aumento es pequeño.

Las surgencias de invierno en el Golfo se comportan como un sistema de surgencias clásicas, en el que el agua fría que emerge trae una alta concentración de nutrientes lo que reditúa en una alta concentración de pigmento. Cabe hacer notar que esta alta fertilización, según los criterios de Alvarez-Borrego (1983) y Alvarez-Borrego y Lara-Lara (1991) se ve favorecida a causa de que las isopletras de 2.5  $\mu\text{M}$  de fosfatos son muy someras (cerca de 100 m de profundidad en la costa de la parte sur del Golfo), dando condiciones de fertilización muy alta en la zona eufótica como las más altas en el mundo. Mientras que para condiciones de verano se comporta como el sistema de surgencias del Perú en tiempo del fenómeno El Niño donde el tapón de agua oligotrófica es tan grande que el agua que surge no tiene altas concentraciones de nutrientes.

## 5.- CONCLUSIONES.

El Golfo de California presenta una gran gama de ambientes y ecotonos, los cuales son el resultado de la alta complejidad-dinámica del medio. La alta TKE de las regiones al norte y centrales da como resultado una columna de agua fertilizada y por consiguiente una alta biomasa fitoplanctónica.

La división del Golfo de California en 14 regiones biogeográficas es más completa en sentido ecológico que las divisiones previas. Las clasificaciones previas pueden conducir a problemas interpretativos de los datos pues estaríamos mezclando la respuesta de 2 ó más regiones biogeográficas.

El número y tamaño de las regiones biogeográficas está en relación directa con la energía cinética turbulenta que opera localmente, con mayor número de regiones y más pequeñas en áreas donde operan altas TKE y a medida que ésta disminuye, también lo hace el número de regiones por área, siendo éstas más grandes.

Las concentraciones de pigmento derivadas de las observaciones del CZCS tienen errores. Sin embargo, sus series de tiempo son muy consistentes con la dinámica del Golfo, la estacionalidad de las masas de agua, la estacionalidad de las surgencias costeras y los procesos de mezcla que operan en distintas escalas espacio-temporales. En las series de tiempo de la concentración de pigmento muestra claramente una modulación biestacional compuesta por condiciones de "invierno" (de noviembre a mayo) y condiciones de verano (de junio a octubre).

En todas las regiones biogeográficas del Golfo de California los datos del CZCS, muestran que temperaturas superficiales por abajo del promedio regional repercuten

en concentraciones de pigmento por arriba del promedio regional, y viceversa. La fuerza de esta asociación aumenta de sur a norte. Esto se debe a que las bajas temperaturas superficiales son indicadoras de mezclas de aguas más frías y eutróficas con aguas más cálidas y oligotróficas, originando agua superficial más fría y más rica en nutrientes. En condiciones de verano, esta agua superficial más fría y rica en nutrientes está limitada a la porción de las islas, mientras que las condiciones de invierno facilitan la dispersión de esta agua hacia la porción sur. Los procesos de mezcla y advección en el Golfo de California son los responsables de la fertilización de la capa superficial y por lo tanto de la alta concentración de pigmento.

Datos de las concentraciones de pigmento derivados de las observaciones del CZCS muestran que los eventos El Niño, no afectan a la concentración de pigmento superficial en cada región de la misma manera. En algunas áreas como las regiones en la porción norte así como las de las grandes islas, donde hay una fuerte TKE, el efecto del El Niño fue enmascarado. Solamente en las regiones de la porción sur donde la TKE disminuye, El Niño claramente causó más bajas concentraciones de pigmento.

El canal de Ballenas es una región excepcional. Mostró durante el evento de El Niño un incremento de la concentración de pigmento durante 1983, y un decremento en 1984. Lo anterior fue debido a que durante 1983 la estratificación fue mayor, lo que ocasionó una turbulencia moderada, mientras que en 1984 la TKE pudo volver a sus condiciones previas provocando un exceso de turbulencia, lo que provocó una fuerte condición No-El Niño, decreciendo los valores de la concentración de pigmento. Lo anterior se debe a que el fitoplancton crece mejor en turbulencia moderada que en alta

turbulencia. Por lo anterior la región V es ideal como santuario y/o zona de reserva de la biosfera, que sirve como refugio para las especies durante eventos El Niño. La región VI al norte de Isla Tiburón cuenta con una TKE similar al Canal de Ballenas.

El efecto de un evento El Niño es que refuerza las condiciones de verano, pero la alta TKE que presenta en condiciones de invierno neutralizan la invasión de agua caliente oligotrófica.

El encontrar anomalías negativas en época de No-El Niño nos indica que pueden existir otros factores que regulan la variación interanual de las concentraciones de pigmento. Un ejemplo de estos otros factores pueden ser las variaciones meteorológicas interanuales, las cuales afectan la velocidad de los vientos, y el flujo de calor tierra-mar, los cuales pueden afectar la estratificación o turbulencia de las aguas del Golfo.

El sistema de surgencias en el Golfo de California para invierno se comporta como un sistema clásico en el que las aguas frías traen altas concentraciones de nutrientes, los cuales reditúan en altas concentraciones de pigmento. Mientras que en verano se comporta como el sistema de surgencias del Perú durante un evento de El Niño donde el tapón de agua oligotrófica es tan grande que el agua que emerge no cuenta con altas concentraciones de nutrientes, sin embargo se refleja en un leve incremento en la concentración de pigmento.

## 6.- REFERENCIAS.

- ALVAREZ-BORREGO S., J.A. Rivera, G. Gaxiola-Castro, M.J. Acosta-Ruiz y R.A. Schwartzlose. (1978) Nutrientes en el Golfo de California. *Ciencias Marinas* 5:53-71.
- ALVAREZ-BORREGO, S. y R.A. Schwartzlose. (1979) Masas de agua del Golfo de California. *Ciencias Marinas* 6:43-63.
- ALVAREZ-BORREGO, S. (1983) Gulf of California. Chapter 17 pp 427-449 In: Ketchum B.H. (eds.) Estuaries and Enclosed Seas. Elsevier Scientific Publis. Amsterdam.
- ALVAREZ-BORREGO, S. and G. Gaxiola-Castro. (1988) Photosynthetic parameters of northern Gulf of California phytoplankton. *Continental Shelf Res.*, 8:37-47.
- ALVAREZ-BORREGO, S. and J.R. Lara-Lara. (1991) The Physical Environment and Primary Productivity of the Gulf of California. Chapter 26 In: Simoneit, B.R.T. and J.P. Dauphin (eds.) The Gulf and Peninsular Province of the Californias. Am. Assoc. Petr. Geol. Memor.47.
- BADAN-DAGON A., D.J. Koblinsky and T. Baumgartner. (1985) Spring and summer in the Gulf of California: Observation of surface thermal patterns. *Oceanol. Acta.* 8;13-22.
- BARBER R.T. and F.P. Chavez. (1983) Biológica consequences of El Niño. *Science* 222: 1203-1210.
- BANSEN K. and D.C. English. (1994) Seasonality of coastal zone color scanner phytoplankton pigment in the offshore oceans. *J. Geophys. Res.* 99(C4):7323-7345.
- BAROCIO-LEON O.A. (1991) POP en la región del Delta del Rio Colorado. Tesis de Licenciatura de la Facultad de Ciencias Marinas de la Universidad Autónoma de Baja California. 52 pp.
- BAUMGARTNER, T.R., V. Ferreira-Bartrina, H. Schrader and A. Soutar. (1985) A 20-years varve of siliceous phytoplankton variability in the central Gulf of California. *Mar. Geol.* 64:113-129.
- BAZAN-GUZMAN, M.C. (1990) Productividad primaria en la parte sur y central del Golfo de California durante noviembre-diciembre de 1984. Tesis de Licenciatura de la Facultad de Ciencias Marinas de la Universidad Autónoma de Baja California. 70 pp.
- BRAY, N.A. (1988a) Thermohaline circulation in the Gulf of California. *J. Geophys. Res.* 93(C2): 4993-5020.

- BRAY, N.A. (1988b) Water mass formatio in the Gulf of California. *J. Geophy. Res.* 93(C8): 9223-9240.
- BRAY, N.A. and J.M. Robles. (1991) Physical Oceanography of the Gulf of California. Chapter 25 In: Simonet, B.R.T. and J.P. Dauphin (eds.) The Gulf and Peninsular Provinces of the Californias. Am. Assoc. Petro. Geol., Memoir 47.
- BRINTON E., A. Fleminger and D. Siegel-Causey. (1986) The temperate and tropical planktonic biotas of the Gulf of California. *CalCoFi Rep.* XXVII;228-266.
- CAJAL-MEDRANO R., R. Millán-Núñez y E. Santamaría-del-Angel. (1992) Coeficientes fotosintéticos en el Golfo de California durante otoño de 1987 en la región central y primavera de 1989 en Puerto Don Juan. *Ciencias Marinas* 18(3):1-16.
- CAJAL-MEDRANO R., R. Millán-Núñez y E. Santamaría-del-Angel. (1994) Hidrología de la región central del Golfo de California (Otoño, 1987). (en preparación).
- CANE M.A. (1983) Oceanographic events during El Niño. *Science* 222: 1189-1195.
- CASTRO R., M.F. Lavín and P. Ripa. (1994) Seasonal heat balance in the Gulf of California. *J. Geophy. Res.* 99(C2); 3249-3261.
- CHAVEZ, F. (1987) El Niño y la Oscilación del Sur. *Investigación y Ciencia* (Spanish edition of Scientific American), 128: 46-55.
- CORTES-LARA M.C. (1994) Efecto de la mezcla vertical sobre la distribución del fitoplancton, nutrientes y clorofila *a* en dos regiones del Golfo de California en condiciones de verano. Tesis de Maestría de la Facultad de Ciencias Marinas de la Universidad Autónoma de Baja California. 130 pp.
- CUPUL-MAGAÑA A.L. (1994) Flujos de sedimento en suspensión y de nutrientes en la cuenca estuarina del Río Colorado. Tesis de Maestría de la Facultad de Ciencias Marinas de la Universidad Autónoma de Baja California. 115 pp.
- DE-LA-PEÑA-NETTEL G. (1991) Influencia de la turbidez sobre la Producción orgánica primaria en la región del Delta del Río Colorado. Tesis de Licenciatura de La Facultad de Ciencias Marinas de la Universidad Autónoma de Baja California 80 pp.
- EOS (Earth Observation System), (1989). Ocean color. Availability of the global data set. *Transactions, Amer. Geophy. Union* Vol. 70(23);63435- 64041.
- ESSC-NASA (Earth System Sciences Committee, National Aeronautics & Space Administration). (1988) *Earth System Science: A program for global change*. NASA, Washington D.C. 208 pp.

- FARFAN, C. and S. Alvarez-Borrego. (1992) Zooplankton biomass of the northern most Gulf of California. *Ciencias Marinas*, 18(3):17-36.
- FU L.L. and B. Holt. (1984) Internal waves in the Gulf of California: Observations from spaceborne radar. *J. Geophys. Res.* 89(C2); 2053-2060.
- GAXIOLA-CASTRO G. and S. Alvarez-Borrego. (1986) Photosynthesis-irradiance relationship for winter phytoplankton in Pacific waters off México. *Oceanol. Acta* 9:497-501.
- GENDROP-FUNES, V., M.J. Acosta-Ruiz y R.A. Schwartzlose. (1978) Distribución horizontal de la clorofila *a* durante la primavera en la parte Norte del Golfo de California. *Ciencias Marinas* 5:71-89.
- GILBERT, J.Y. and W.A. Allen. (1943) The phytoplankton of the Gulf of California obtained by the E.W. Scripps in 1939 and 1940. *J. Mar. Res.* 5:89-110.
- GORDON, H.R., D.K. Clark, J.W. Brown, O.B. Brown, R.H. Evans and W.W. Broenkow. (1983a) Phytoplankton pigment concentration in the Middle Atlantic bight: Comparison of ship determinations and CZCS estimates. *Appl. Opt.* 22:20-35.
- 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 the time. *Appl. Opt.* 22:3929-3931.
- 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):10909-10924.
- GRANADOS-GALLEGOS, J. L. (1974) Distribución de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto en el Golfo de California en noviembre de 1972. Tesis. Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada Baja California 56 pp.
- GRANADOS-GALLEGOS J.L. y R.A. Schwartzlose. (1977) Corrientes superficiales en el Golfo de California. En: Memorias del V Congreso Nacional de Oceanografía. Escuela Superior de Ciencias Marítimas del Instituto Tecnológico y de estudios Superiores de Monterrey. Guaymas Sonora México.
- GRANADOS-GUZMAN A. y R. Hidalgo-González. (1994) Variabilidad temporal de temperatura en dos localidades del Alto Golfo de California de marzo de 1990 a marzo de 1993. Informe Técnico Comunicaciones académicas. Serie Ecología, CICESE CIECT9402 27 pp.

- GRIFFITHS, R.C. (1968) Physical, chemical and biological oceanography of the entrance to the Gulf of California, spring of 1960. U.S. Fish Wildl. Serv. Spec. Sci. Rep. Fish. #543, 47 pp.
- HERNANDEZ-AYON J.M., M.S. Galindo-Bect, B.P. Flores-Báez and S. Alvarez-Borrego. (1993) Nutrient concentrations are high in the turbid waters of the Colorado River Delta. *Estuarine Coastal Shelf Sci.*, 37; 551-561.
- HIDALGO-GONZALEZ R. (1993) Presión parcial del bioxido de carbomo en el Golfo de California. Tesis de Maestría CICESE, Ensenada Baja California, México, 58 pp.
- HOOKE S.B., W.E. Esaias, G.C. Feldman, W.W. Gregg and C.R. McClain (1992) SeaWiFS Technical Report series. Volume 1, An overview of SeaWiFS and ocean color. NASA Technical memorandum 104566, vol. 1 Maryland 24pp.
- HOPE, K. (1982) Manual práctico de estadística avanzada. Ed. Trillas. México D.F., 111 pp.
- KIRK, J.T.O. (1983) Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. Cambridge University Press. Cambridge 401 pp.
- LARA-LARA J.R., J.E. Valdez-Holguin and L.C. Jimenez-Perez. (1984) Plankton studies in the Gulf of California during the 1982-1983 El Niño. *Tropical Ocean and atmosphere Newsletter* 28:16-17.
- LARA-LARA, J.R., R. Millán-Núñez, J.L. Lara-Osorio y C. Bazán-Guzmán. (1993) Productividad y biomasa del fitoplancton por clases de tamaño, en la parte central del Golfo de California durante primavera, 1985. *Ciencias Marinas* 19(2):1377-154.
- LAVIN M.F. and S. Organista. (1988) Surface heat flux in the northern Gulf of California. *J. Geophys. Res.* 93:14033-14038.
- LEWIS M.R. (1992) Satellite ocean color observations of global biogeochemical cycles pags. 139-154 In: P.G. Falkowski and A.D. Woodhead (eds) Primary Productivity and Biogeochemical Cycles in the Sea. Plenum Press N.Y. 550 pp.
- MACKAS, D.L., K.L. Denman and M.R. Abbott. (1985) Plankton patchiness: Biology in the physical vernacular. *Bull. Mar. Sci.* 37:652.
- MARINONE S.G. and P. Ripa. (1988) Geostrophic flow in the Guaymas Basin, central Gulf of California. *Continental Shelf Res.* 8(2): 159-166.
- McGOWAN, J.A. (1983) El Niño and biological production in the California Current. *Tropical Ocean and Atmosphere Newsletter* 21:23.

- MEE, L.D., A. Ramírez-Flores, F. Flores-Verdugo and F. González-Farías. (1985) Coastal upwelling and fertility of the southern Gulf of California: impact of the 1982-1983 ENSO event. *Tropical Ocean and Atmosphere Newsletter* 31:9-10.
- MERRIFIELD M.A. and C.D. Winant. (1989) Shelf circulation in the Gulf of California: A description of the Variability. *J. Geophys. Res.* 94 (C12):18133-18160.
- MITCHELL G.B. (1994) Coastal zone color scanner retrospective. *J. Geophys. Res.* 99 (C4): 7291-7292.
- MILLAN-NUÑEZ, R., R. Cajal-Medrano, E. Santamaría-del-Angel y E. Millán-Núñez. (1993) Primary productivity and chlorophyll *a* in the central part of the Gulf of California (autumn, 1987). *Ciencias Marinas* 19(1):29-40.
- MOREL A. (1980) In-water and remote measurement of ocean colour. *Boundary-Layer Meteorol.* 18:177-203.
- MOREL A. and Prieur L. (1977) Analysis of variations in ocean colour. *Limnol. Oceanogr.* 19:591-600.
- MUELLER, J.L. and R.W. Austin. (1991) Ocean optics protocols for SeaWiFS validation. Volumen 5 SeaWiFS Technical Report Series NASA Technical Memorandum 104566, Vol.5.
- MÜLLER-KARGER F.E., C.R. McClain, T.R. Fisher, W.E. Evans and R. Varela. (1989) Pigment distribution in the Caribbean sea: Observations from space. *Prog. Oceanog.* 23:23-64.
- MÜLLER-KARGER F.E., J.J. Walsh, R.H. Evans and M.B. Meyers. (1991) On the seasonal phytoplankton concentration and seas surface temperature cycles of the Gulf of Mexico as determined by satellite. *J. Geophys. Res.* 96 (C7):12645-12645.
- NAVARRO-FIERRO R. (1988) *Introducción a la biestadística. Análisis de Variables Binarias.* Mc Graw Hill. Mexico. 170 pp.
- PADEN, C.A., M.R. Abbott, C.D. Winant. (1991) Tidal and atmospheric forcing of the upper ocean in the Gulf of California 1. Sea Surface temperature variability. *J. Geophys. Res.* 96:18337-18359.
- QUINN W.H., D.O. Zopf, K.S. Short and R.T.W. Kuo-yang (1978) Historical trends and statistics of the Southern Oscillation, El Niño and Indonesian Droughts. *Fish. Bull.* 76:663-678.
- QUINN, W.H., V.T. Neal, and S.E. Antunez-de-Mayolo. (1986) Preliminary report on El Niño occurrences over the past four and a half centuries. Reference 86-16, College of Oceanography, Oregon State University, Corvallis, Or., 36 pp.

- QUIROS G., A., Badan-Dangon and P. Ripa. (1992) M2 currents and residual flow in the Gulf of California. *Netherlands Journal of Sea Research* 28(4); 251-259.
- RASMUSSEN, E.M. (1984) El Niño: the ocean-atmosphere connection. *Oceanus* 27:5-12.
- RIPA, P. and S.G. Marinone. (1989) Seasonal variability of temperature, salinity, velocity, vorticity and sea level in the Central Gulf of California, as inferred from historical data. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 115:887-913.
- ROBINSON, M.K. (1973) Atlas of monthly mean sea surface and surface temperatures in the Gulf of California, Mexico. *San Diego Soc. Nat. Hist., Mem.* 597 pp.
- ROBLES-PACHECO, J.M. and N. Chistensen. (1984) Effects of the 1982-83 El Niño on the Gulf of California. *EOS (Amer. Geophys. Trans.)* 64:1039.
- ROBLES, J.M. and S.G. Marinone. (1987) Seasonal and interannual thermohaline variability in the Guaymas Basin of the Gulf of California. *Continental Shelf Res.* 7: 715-733.
- RODEN, G.I. and G.W. Groves. (1959) Recent oceanographic observations in the Gulf of California. *J. Mar. Res.* 18;10-35.
- RODEN, G.I. (1964) Oceanographic aspects of the Gulf of California. In: T.J.H. Van Andel and G.G. Shor (eds.) Marine geology of the Gulf of California: a symposium. AAPG Memoir 3; 30-58.
- RODEN, G.I. and I. Emilsson. (1979) Physical oceanography of Gulf of California: Paper presented at the Gulf of California Symposium, Universidad Autónoma de México, Mazatlán, Sinaloa, México. unpublished.
- ROUND, F.E. (1967) The phytoplankton of the Gulf of California. Part I. Its composition, distribution and contribution to the sediments. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 1:76-97.
- RUSNAK, G.A., R.L. Fisher and F.P. Shepard. (1964) Bathymetry and faults of the Gulf of California In: T.J.H. Van Andel and G.G. Shor (eds.) Marine geology of the Gulf of California: a symposium. AAPG Memoir 3; 59-75.
- SANTAMARIA-DEL-ANGEL E., R. Millán-Núñez and R. Cajal-Medrano. (1992) Effect of turbulent kinetic energy on the spatial distribution of chlorophyll *a* in a small coastal lagoon. *Ciencias Marinas* 18(4):1-16.
- SHEPARD, F. P. (1950) Submarine topography of the Gulf of California, Part 3 of the 1940 E.W. Scripps cruise to the Gulf of California. *Geol. Soc. Am., Mem.* 43, 32 pp.

- SIMPSON J. H., A.J. Souza and M. F. Lavín. (1994) Tidal mixing in the Gulf of California 169-179. Chapter 9 in: Mixing and transport in the enviromental K.J. Beven, P.C. Chatwin and J.H. (eds). Ed. John Wiley & Sons.
- STEVENSON, M.R. (1970) On the physical and biological oceanography near the entrance to the Gulf of California, October 1966-August 1967. Bull. Inter. Am. Trop. Tuna Comm. 4(3):389-504.
- STOCK, G.G. (1976) Modeling of tides and tidal dissipation in the Gulf of California. Ph D. Thesis, Scripps Institution of Oceanography. University of California, San Diego, La Jolla, California, 102 pp.
- SVERDRUP, H.Y. (1941) The Gulf of California: Preliminary discussion on the cruise of the E.W. Scripps in February and March 1939: Sixth Pacific Science Congress Proceeding, 3;161-166.
- TERSHEY B.R., D. Breese and S. Alvarez-Borrego. (1991) Increase in cetacean and seabird numbers in the Canal de Ballenas during an El Niño-Souther Osillation event. Mar. Ecol. Prog. Series 69:299-302.
- TORRES-OROZCO, E. (1993) Análisis volumétrico de las masas de agua del Golfo de California. Tesis de Maestría CICESE, Ensenada Baja California, México, 80 pp.
- VALDEZ-HOLGUIN J.E. (1986) Distribución de la biomasa y productividad del fitoplancton en el Golfo de California durante el evento de El Niño 1982-1983. Tesis de Maestría CICESE, Ensenada Baja California, México, 90 pp.
- VALDEZ-HOLGUIN J.E. and J.R. Lara-Lara (1987) Productividad primaria en el Golfo de California: efectos del evento El Niño 1982-1983. Ciencias Marinas 13:34-50.
- VAN ANDEL, Tj. H. (1964) Recent marine sediments of the Gulf of California. In: Tj. H. Van Andel and G.G. Shor Jr. (Eds.), Marine Geology of the Gulf of California: A symposium, Am. ssoc. Pet. Geol., Mem. 3:216-310.
- WOOSTER, W.S. (1960) El Niño, in Symposium on the changing Pacific Ocean in 1957 and 1958 Part II Section I The physical evidence: CalCofi Reports. 7:43-46.
- ZEITZSCHEL, B. (1969) Primary Productivity in the Gulf of California. Mar. Biol. 3: 201-207.

## Apéndice I. Análisis estadísticos.

### I.1.-Análisis de Componente Principal (ACP).

El análisis de componente principal (ACP) es uno de los temas de análisis multivariado más usado en la actualidad. A grandes rasgos el ACP es la versión para datos cuantitativos de un análisis factorial, mientras que la versión para datos cualitativos sería el Análisis Factorial de correspondencia. El ACP fue teóricamente propuesto por primera vez por Kendall en 1930. Su uso y desarrolló fue retrasado hasta la aparición del FORTRAN. Según Hope (1982) puede recibir también los nombre de análisis factorial ortogonal, análisis ortogonal, método de componentes principales, método de ejes principales, método de sumas pesadas (ó ponderadas) y método de Hotelling.

El problema principal del ACP radica en reducir un enjambre de datos de conjunto de variables (multidimensional) a un número menor, (denominadas componentes), para encontrar los patrones intrínsecos que el enjambre pueda poseer. Básicamente, existen dos maneras de enfocar el ACP, la primera es un enfoque geométrico y la segunda es un enfoque numérico, siendo el primer enfoque el más popular y consiste en la rotación de los ejes de la gráfica tratando de que el ángulo sea de tal magnitud que nos de una variación grande en el eje  $Y_{\text{rotado}}$  y una pequeña en el eje  $X_{\text{rotado}}$ . Matemáticamente es posible calcular el ángulo de rotación, más sin embargo el enfoque geométrico puede presentar serios problemas al decidir cual variable se encuentra en tal o cual componente, pues como es un enfoque gráfico en

el que se proyecta una nube de puntos la pregunta es que tan separado debe de estar un punto para ser o no ser considerado dentro de la agrupación. Este problema no se presenta en el enfoque numérico pues las reglas para decidir si una variable pertenece a un componente son inflexibles. A continuación desarrollaremos el enfoque numérico como mejor aproximación del ACP.

Podemos definir cada componente como la mejor combinación lineal de un conjunto de variables, en el sentido de que explica más variancia que cualquier otra combinación lineal de esas variables. En palabras cada componente puede ser matemáticamente descrito por una ecuación polinomial de primer orden.

Tomemos un caso hipotético con  $j$  variables cada una con  $n_i$  observaciones, las cuales pueden ser tabuladas en la siguiente matriz  $M$ :

A	B	C	D	.....	j
$n_{1A}$	$n_{1B}$	$n_{1C}$	$n_{1D}$	.....	$n_{1j}$
$n_{2A}$	$n_{2B}$	$n_{2C}$	$n_{2D}$	.....	$n_{2j}$
$n_{3A}$	$n_{3B}$	$n_{3C}$	$n_{3D}$	.....	$n_{3j}$
$n_{4A}$	$n_{4B}$	$n_{4C}$	$n_{4D}$	.....	$n_{4j}$
:	:	:	:	.....	:
$n_{iA}$	$n_{iB}$	$n_{iC}$	$n_{iD}$	.....	$n_{ij}$

Con esta matriz podemos calcular una matriz de correlación o de co-varianza, la cual es cuadrática y simétrica, donde  $r_{Aj}$  es el coeficiente de correlación (o co-varianza) de la variable A v.s. la variable j y es igual a  $r_{jA}$ :

	A	B	C	D	.....	j
A	1	$r_{AB}$	$r_{AC}$	$r_{AD}$	.....	$r_{Aj}$

B	$r_{BA}$	1	$r_{BC}$	$r_{BD}$	.....	$r_{Bj}$
C	$r_{CA}$	$r_{CB}$	1	$r_{CD}$	.....	$r_{Cj}$
D	$r_{DA}$	$r_{DB}$	$r_{DC}$	1	.....	$r_{Dj}$
:	:	:	:	:	.....	:
j	$r_{jA}$	$r_{jB}$	$r_{jC}$	$r_{jD}$	.....	1

De esta matriz cuadrática, por álgebra matricial podemos calcular los eigenvalores (valores propios) y los eigenvectores (vectores propios). Los eigenvalores son los valores críticos para saber si el componente es o no estadísticamente significativo, en base a la regla de decisión de que todos aquellos componentes con eigenvalores menores a 1.0 no son significativos.

Si se retoma la idea de que un componente puede ser expresado por una ecuación polinomial de primer orden, podemos definir a los eigenvectores como los coeficientes de dicha ecuación, es decir, los componentes principales uno (PC1) y dos (PC2), pueden estar descritos por:

$$(1) \quad PC1 = b_{1a} * A + b_{1b} * B + b_{1c} * C + b_{1d} * D + \dots + b_{1j} * j$$

$$(2) \quad PC2 = b_{2a} * A + b_{2b} * B + b_{2c} * C + b_{2d} * D + \dots + b_{2j} * j$$

donde el conjunto de  $b_1$  constituyen el eigenvector uno y las  $b_2$  el dos.

Así al desarrollar todos y cada uno de los polinomios vamos a obtener un número igual de componentes que el número inicial de variables (j), teniendo cada uno de ellos igual número de observaciones que las variables originales. Como ya se mencionó podemos reducir el número de componentes en base al eigenvector, lo único que cabría agregar es que cada componente explica cierto porcentaje de la varianza de los

datos y el porcentaje explicado por los componentes con eigenvalores menores a 1.0 es ínfimo.

El siguiente paso en el ACP es el de decidir que variables varían o co-varían juntas o en otras palabras que variables se asocian dentro de un componente. En base al coeficiente de correlación de las variables v.s. los PC podemos definir si cada variables pertenece al componente, al presentar el mayor coeficiente de correlación (en valor absoluto) de la primera con el segundo. Por ejemplo supóngase que se obtuvo los siguientes coeficientes de correlación:

Variable	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
A	-0.25	+0.12	-0.16	-0.15	<u>+0.33</u>
B	<u>-0.36</u>	+0.18	-0.18	-0.21	+0.26
C	<u>-0.30</u>	+0.11	-0.26	+0.07	-0.27
D	+0.01	<u>-0.26</u>	-0.23	+0.02	-0.08
E	-0.05	<u>-0.29</u>	+0.18	+0.16	-0.28
F	-0.18	-0.00	+0.11	<u>+0.26</u>	+0.10
.					
.					
.					
j	<u>+0.25</u>	+0.00	+0.24	-0.04	+0.18

la interpretación es: las variables B, C y j se asocian en el primer componente, teniendo B y C una variación directa y ambas inversa con respecto a j; D y E se asocian directamente en el PC2 y las variables F y A no se asocian a ninguna variables al encontrarse solas en los PC4 y PC5 respectivamente.

## 1.2.-Índice de Potencia relativa (Pr).

El índice de potencia relativa (Pr) es una prueba de valoración basada en el análisis binario derivado de tablas de contingencia 2X2. Se utiliza para estimar con que efectividad un factor puede favorecer la frecuencia de alguna condición antagónica-excluyente de nuestro juego de datos (Navarro-Fierro, 1988). Se puede expresar como:

$$(3) \quad Pr=1-[(c/r_1)/(a/r_0)]$$

simplificando esta ecuación obtenemos que:

$$(4) \quad Pr=1-[(cr_0/ar_1)]$$

donde a es la frecuencia con la que se presenta la condición para el juego de datos en presencia del factor;  $r_0$  es el número total de datos obtenidos en presencia del factor; c es la frecuencia con la que se presentó la condición para el juego de datos en ausencia del factor y  $r_1$  es el número total de observaciones obtenidos en ausencia del factor.

El valor del Pr es una ponderación proporcional de que tan fuerte puede ser el efecto del factor sobre la condición. El Pr puede tomar valores negativos hasta 1.0 positivo. Los valores negativos muestran que la condición aparece cuando no está presente el factor; valores de cero muestran que un número ponderado igual de condiciones se presentan con o sin la presencia del factor 1.0 positivo indicando que todas las observaciones de la condición se presenta cuando el factor está presente. Por último sólo cabe mencionar que Pr no toma en consideración la magnitud de la condición sino que sólo su presencia.

## **Apéndice II. Contribuciones ya publicadas derivadas de esta tesis.**

SANTAMARIA-DEL-ANGEL, E., S. Alvarez-Borrego and F.E. Müller-Karger. (1994a)  
Gulf of California biogeographic regions based on coastal zone color scanner  
imagery. J. Geophy. Res. 99(C4):7411-7421.

SANTAMARIA-DEL-ANGEL, E., S. Alvarez-Borrego and F.E. Müller-Karger. (1994b)  
The 1982-1984 El Niño in the Gulf of California biogeographic as seen in coastal  
zone color scanner imagery. J. Geophy. Res. 99(C4):7423-7431

## Gulf of California biogeographic regions based on coastal zone color scanner imagery

Eduardo Santamaría-del-Angel and Saúl Alvarez-Borrego

Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, Baja California, México

Frank E. Müller-Karger

Department of Marine Science, University of South Florida, St. Petersburg

**Abstract.** Topographically, the Gulf of California is divided into a series of basins and trenches that deepen to the south. Maximum depth at the mouth is greater than 3000 m. Most of the northern gulf is less than 200 m deep. The gulf has hydrographic features conducive to high primary productivity. Upwelling events have been described on the basis of temperature distributions at the eastern coast during winter and spring and at the western coast during summer. Tidal amplitude may be as high as 9 m in the upper gulf. On the basis of discrete phytoplankton sampling, the gulf was previously divided into four geographic regions. This division took into consideration only the space distribution, taxonomic composition, and abundance of microphytoplankton. With the availability of the coastal zone color scanner (CZCS) imagery, we were able to include the time variability of pigments to make a more detailed biogeographic division of the gulf. With weekly composites of the imagery, we generated time series of pigment concentrations for 33 locations throughout the gulf and for the whole life span of the CZCS. The time series show a clear seasonal variation, with maxima in winter and spring and minima in summer. The effect of upwelling at the eastern coast is clearly evident, with high pigment concentrations. The effect of the summer upwelling off the Baja California coast is not evident in these time series. Time series from locations on the western side of the gulf also show maxima in winter and spring that are due to the eddy circulation that brings upwelled water from the eastern side. Principal-component analysis was applied to define 14 regions. Ballenas Channel, between Angel de la Guarda and Baja California, and the upper gulf always appeared as very distinct regions. Some of these 14 regions relate to the geographic distributions of important faunal groups, including the benthos, or their life cycles. For example, the upper gulf is a place for reproduction and the nursery of many fish species, marine mammals and birds are specially abundant in Ballenas Channel, sardine spawning mostly occurs in the central gulf in spring, and shrimp are abundant off mainland Mexico.

### Introduction

The Gulf of California (Figure 1) represents a subtropical area with exceptionally high rates of primary productivity [Zeitzschel, 1969]. Topographically, it is divided into a series of basins and trenches that deepen to the south and are separated from each other by transverse ridges [Shepard, 1950]. It has been previously divided into geographic areas on the basis mainly of two kinds of criteria: hydrographic and phylogeographic characteristics.

On the basis of the vertical thermohaline structure, Roden and Emilsson [1979] proposed a division of the gulf into four distinct regions: the northern gulf, between the mouth of the Colorado River and Tiburón Island (Figure 1a), with strong tidal currents and convective overturn during winter; Ballenas Channel, with unusual oceanographic conditions; the lower gulf, between Tiburón Island and a line joining Cape San Lucas with Mazatlán; and the gulf entrance, defined as

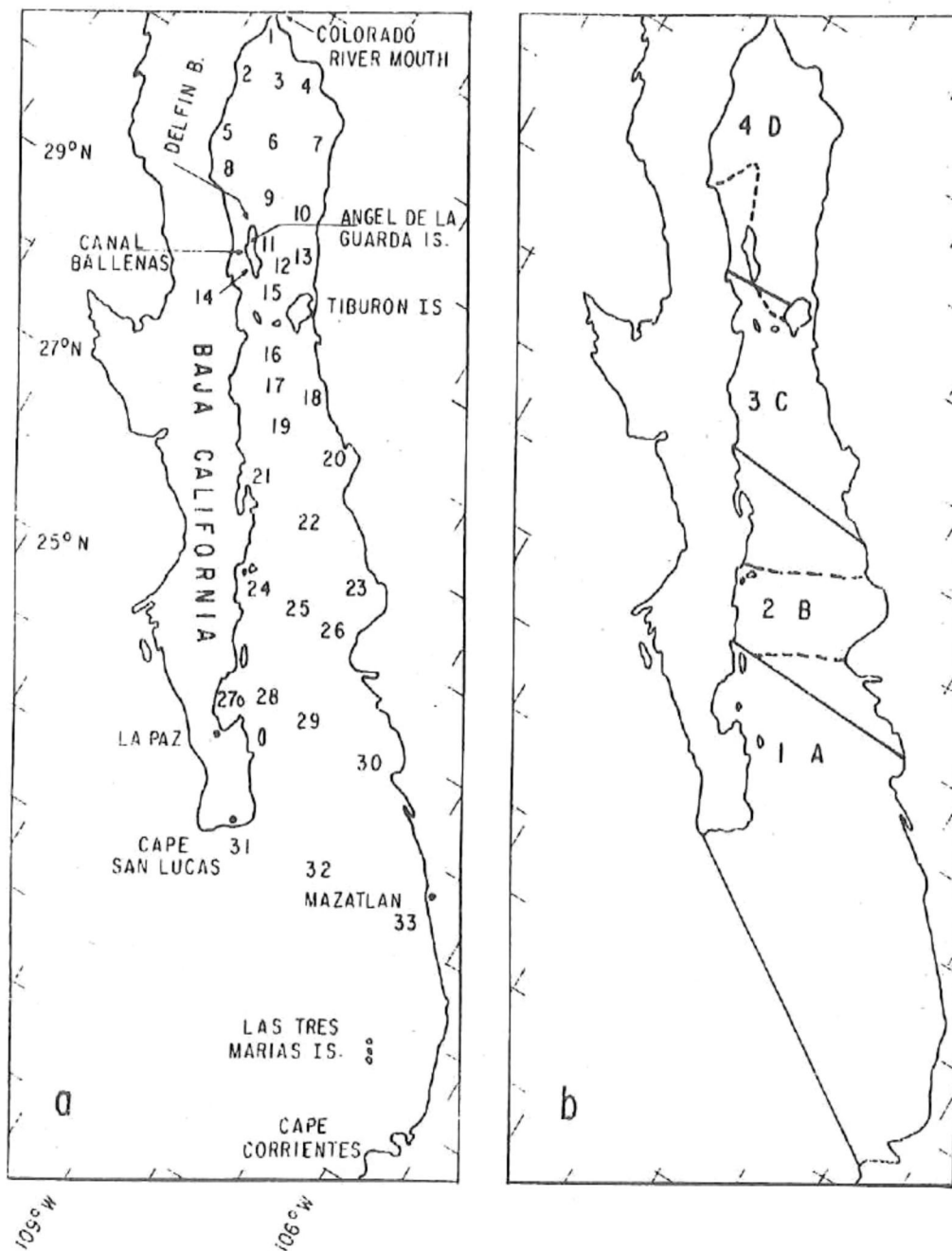
the triangular area between Cape San Lucas, Mazatlán, and Cape Corrientes, with a very complicated thermohaline structure characterized by fronts, eddies, and intrusions which can be linked to the confluence of three distinct currents.

Allen [1937] and Cupp and Allen [1938] divided the gulf into three geographical regions for convenience in comparing abundance of diatoms: the region south of 25°N ("southern oceanic"), the region between 25° and 27°N ("central"), and the gulf north of 27°N ("northern"). Gilbert and Allen [1943] further distinguished the "inner" region of the gulf north of 29°N (Figure 1b), considering the northern gulf only as the portion between 27° and 29°N. The divisions for the outer gulf were retained by Gilbert and Allen [1943] because these divisions correspond to the regions between the antinodes of Sverdrup's [1941] theorized standing internal wave along the axis of the gulf. These authors thought that as a result of this wave, the surface waters from these three regions are more or less segregated.

The southern oceanic region is characterized by the smallest phytoplankton populations of the entire gulf. The central

Copyright 1994 by the American Geophysical Union.

Paper number 93JC02154.  
0148-0227/94/93JC-02154\$05.00.



**Figure 1.** (a) Geographic locations for the generation of the time series and names of locations mentioned in the text. (b) Geographic divisions of the Gulf of California according to *Gilbert and Allen* [1943] (letters and solid lines) and according to *Round* [1967] (numbers and dashed lines).

region has been found to have diatom populations larger than those of the southern oceanic area but still relatively small compared to those of the more northern regions. Greatest abundances have been reported for the northern region; samples with over  $3 \times 10^6$  cells per L were taken in 1937 and 1939 [*Gilbert and Allen*, 1943]. *Round* [1967] found that standing crops of diatoms were very low in the inner region in March 1959, with few species from the south extending into this region. In March 1939, *Gilbert and Allen* [1943] found large numbers of diatoms in the inner region, with some sampling stations having over 100,000 cells per L. *Round* [1967] derived a zonation scheme from the deposition

of diatoms in surface sediments. He also distinguished four zones, and differences from *Gilbert and Allen's* [1943] zonation are small (Figure 1b). *Round* [1967] concluded that lateral displacement of the phytoplankton during sedimentation is not great.

These previous studies were based on few discrete samples, often covering only a few months of the year, with most samples from the beginning of spring and almost no samples from summer or the beginning of winter. *Alvarez-Borrego and Lara-Lara* [1991] noted that although the Gulf of California has been described as an area of great fertility, few details about the variability in space and time of phytoplank-

ton abundance, photosynthetic pigments, and primary productivity are known. To date, no systematic measurements have been made to study the seasonal variability of chlorophyll *a* ([Chl]) and primary productivity in any location of the gulf.

It is now well known that satellite imagery shows physical oceanic phenomena in great detail. *Badan-Dangon et al.* [1985] used infrared satellite imagery to describe a persistent pool of cool water in Ballenas Channel delineated by a system of fronts whose configuration depends on the direction of the local wind; they also described highly visible and fast-moving plumes of cool upwelled water across the southern part of the gulf. Now, with coastal zone color scanner (CZCS) imagery, we can attempt to derive a biogeographic division of the gulf that takes into consideration the space and time variations of phytoplankton biomass. This could provide a more meaningful geographic division of the gulf for ecological purposes and the management of fisheries.

### Study Area

The Gulf of California is approximately 1000 km long and 150 km wide. The moderating effect of the Pacific Ocean upon the climate of the gulf is greatly reduced by an almost uninterrupted chain of mountains 1 to 3 km high along Baja California. The climate of the gulf is therefore more continental than oceanic, a fact which contributes to the large annual and diurnal temperature ranges observed there [*Roden*, 1964]. In winter the air temperatures decrease from the mouth to the upper gulf, and in summer they increase in the same direction. There is more precipitation on the east than on the west side of the gulf. The northern half of the gulf is dry, with annual rainfall of less than 100 mm. In the southeast, rainfall along the coast increases to about 1000 mm/yr [*Roden*, 1964]. Winds in the gulf are extremely variable. Winds from the NW prevail from November to May (winter condition), and winds from the SE prevail during the rest of the year ("summer" condition). Freshwater input by rivers has only a local impact. Most river water has been impounded and used for agricultural and urban purposes.

According to *Roden* [1964], wind-driven upwelling occurs on the east coast during winter and spring and on the west coast during summer. Temperature charts show that upwelling is better developed and extends over a greater distance along the east coast than off the Baja California coast [*Roden*, 1964; *Robinson*, 1973]. Tidal mixing is very strong in the northern gulf, mainly in the region of the midrift islands (Tiburón and Angel de la Guarda; Figure 1) [*Alvarez-Borrego*, 1983], and in the upper gulf, where amplitudes of spring tides may be as large as 9 m [*Hernández-Ayón et al.*, 1993]. Very low oxygen concentrations at intermediate depths (300–900 m) are very characteristic of the gulf waters [*Sverdrup*, 1941; *Roden*, 1964]. It is interesting to note that because isopleths of 1 ml L<sup>-1</sup> O<sub>2</sub> and 2.5 μM phosphate are very shallow (near 100 m deep in the southern part of the gulf, away from the coasts), upwelling areas in the gulf have some of the highest surface nutrient concentrations of any of the oceans of the world [*Alvarez-Borrego et al.*, 1978].

Ballenas Channel is isolated from the central part of the gulf by a submarine ridge. The sill depth of this ridge is approximately 450 m [*Rusnak et al.*, 1964], so that exchange between Ballenas Channel and the southern part of the gulf

is limited to relatively shallow waters. Maximum depth of Ballenas Channel is more than 1600 m. Since the *E. W. Scripps* cruises of 1939 and 1940, it has been recognized as an area with very strong mixing due to tides [*Sverdrup*, 1941; *Roden*, 1964]. The lowest surface temperatures in the entire gulf are persistently found here [*Robinson*, 1973]. Except for Delfin Basin, the rest of the northern area is relatively shallow. Much of it is at shelf depth. The southern area of the gulf is open to the Pacific and is deeper than 3000 m at the entrance, between Cape San Lucas and Cape Corrientes [*Van Andel*, 1964].

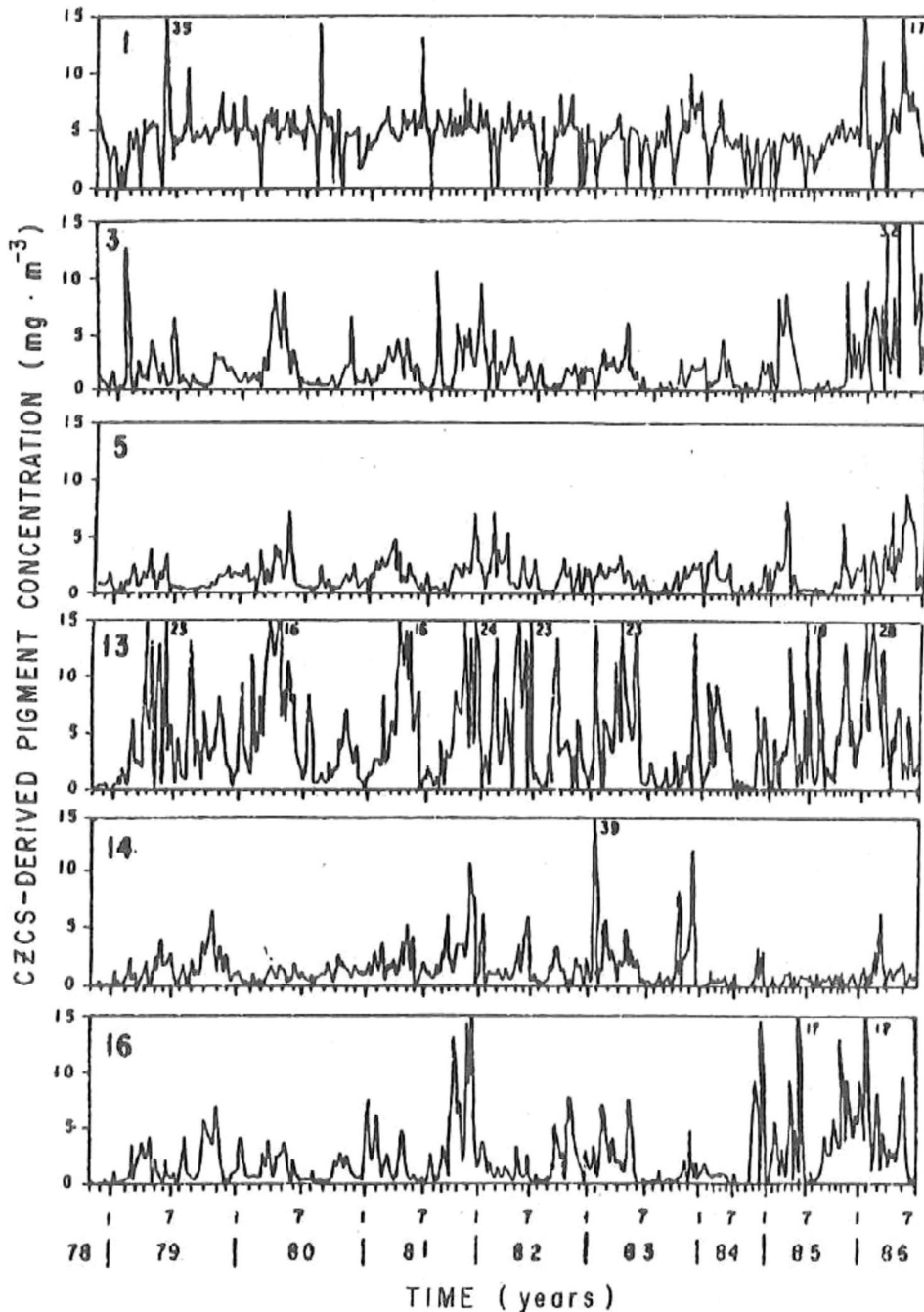
*Granados-Gallegos and Schwartzlose* [1974] used drift bottles to study the surface currents of the gulf. They concluded that there is a general pattern of southward flow in winter throughout the entire gulf, northward flow in summer south of Tiburón Island, and some northward flow in the northern gulf, with some eddy circulation. During the spring and fall the flow appears to be more random.

*Lavin and Organista* [1988] estimated an annual mean net heat flux into the sea of 69 to 85 W m<sup>-2</sup> for the northern gulf, with a mean evaporation rate of 0.9 m yr<sup>-1</sup>. They indicated that these results require an oceanic export of heat and salt out of the northern gulf to achieve balance and imply that the annual mean thermohaline circulation must have an inflowing component at depth. That is contrary to what happens in the Mediterranean and Red seas. Outflow from the gulf tends to be less dense than inflow from the Pacific. This kind of thermohaline circulation for the gulf was reported by *Gilbert and Allen* [1943] and *Bray* [1988]. *Gilbert and Allen* postulated that the general water circulation of the gulf is characterized by an inflow of deep water and an outflow of surface water, and as a consequence of this circulation, deep water rich in nutrients is brought to the euphotic zone, where the nutrients can be utilized by the phytoplankton. On the basis of hydrographic observations, *Bray* [1988] proposed a three-layer circulation: outflow mostly between 50 and 250 m, inflow mostly between 250 and 500 m, and a surface layer in which the direction of transport changes with seasonal changes in the large-scale winds. This conceptual circulation model implies a net input of inorganic nutrients from the Pacific Ocean into the gulf with winter conditions.

The intense forcing by tides, winds, solar heating, and interactions with the open Pacific Ocean creates a vigorous circulation in the gulf. This circulation in turn interacts with the variable bathymetry to create a complex kinetic energy spectrum in time and space, which is largely limited to periods of less than 1 month [*Badan-Dangon et al.*, 1985]. Thus, to properly describe the effect of the circulation on the phytoplankton biomass, sampling intervals have to be a week or less.

### Methods

We generated pigment concentration time series for 33 locations in the gulf (Figures 1a and 2) from weekly composites of the CZCS imagery produced for the entire life span of the sensor (November 1978–June 1986) (for examples, see Plate 1). Pigment concentrations were derived from CZCS radiance data using the atmospheric correction and bio-optical algorithms of *Gordon et al.* [1983a, b, 1988] (for details of image processing, see *Müller-Karger et al.* [1991]). Pixel size was about 4 × 4 km<sup>2</sup>. To produce the weekly composites, we used a total of 3493 original scenes taken



**Figure 2a.** Examples of the pigment concentration time series for locations 1, 3, 5, 13, 14, and 16. Numbers by the peaks are the maximum concentrations off the scale. In most cases, the sampling interval is 1 week; however, notice that some months are shorter because there were no data for 1 or more weeks.

from the BROWSE file: 68 for 1978, 625 for 1979, 766 for 1980, 507 for 1981, 447 for 1982, 378 for 1983, 158 for 1984, 298 for 1985, and 246 for 1986. To make the composites, we used software developed at the University of Miami (display system program). We used software developed at the University of South Florida to generate time series at selected locations by calculating average pigment concentration from each weekly composite in a  $3 \times 3$  pixel box centered at the chosen location.

There were no images for some weeks, owing in part to cloud cover and in part to experimental scheduling of the

CZCS. To avoid the artifact of zero pigment concentration, we did not leave empty spaces for those weeks in the time series. When some locations had data for a certain week while other locations did not, we took those data out so that series could be treated together in statistical analysis. Thus some months are shorter than others in the time series, but the time scale is the same for all locations. In Figures 2a and 2b, data that look like zero are in reality low values.

The 33 locations were chosen to represent all hydrographic areas described in the literature and to lie within the color structures in the imagery. To define the biogeographic

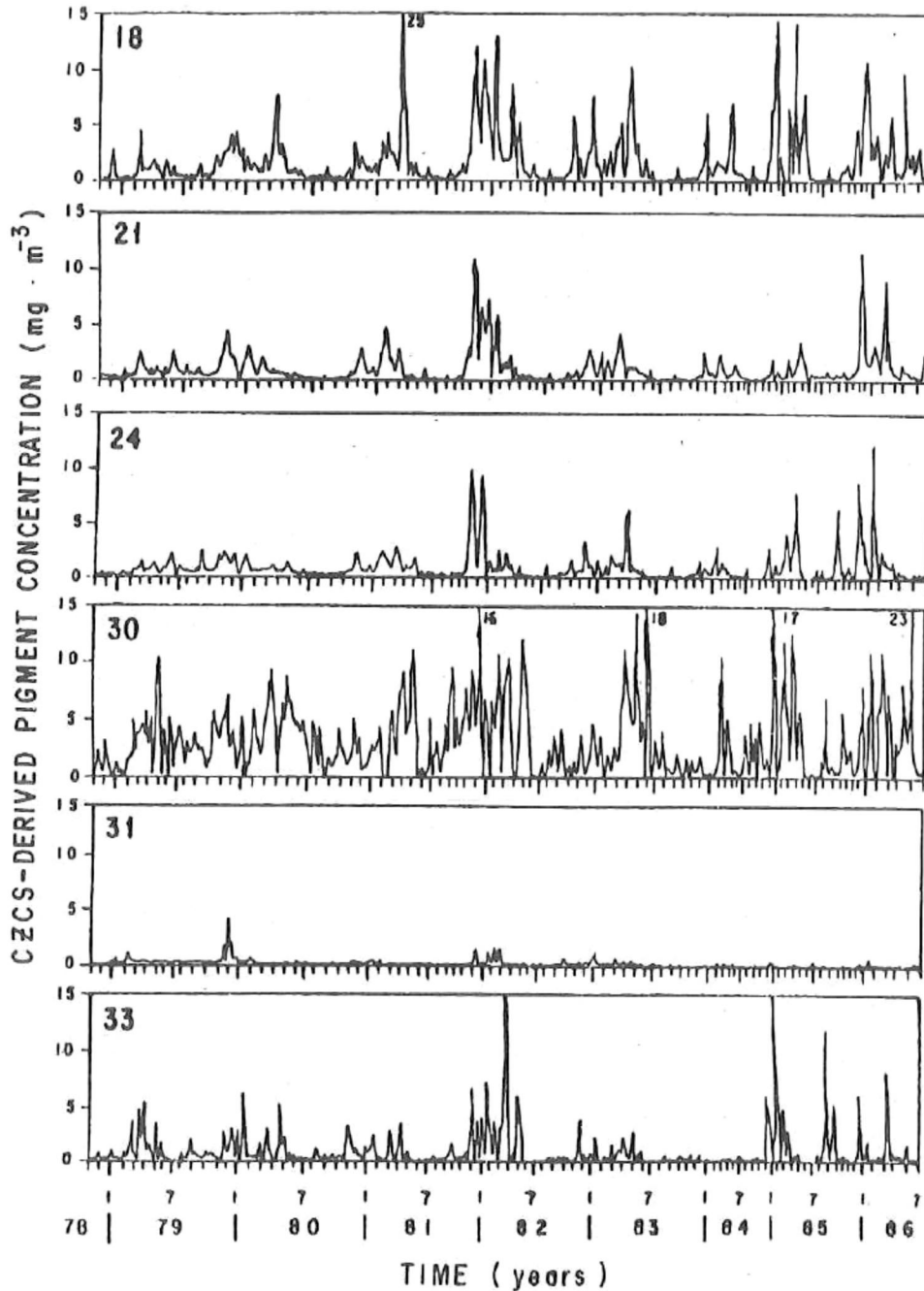


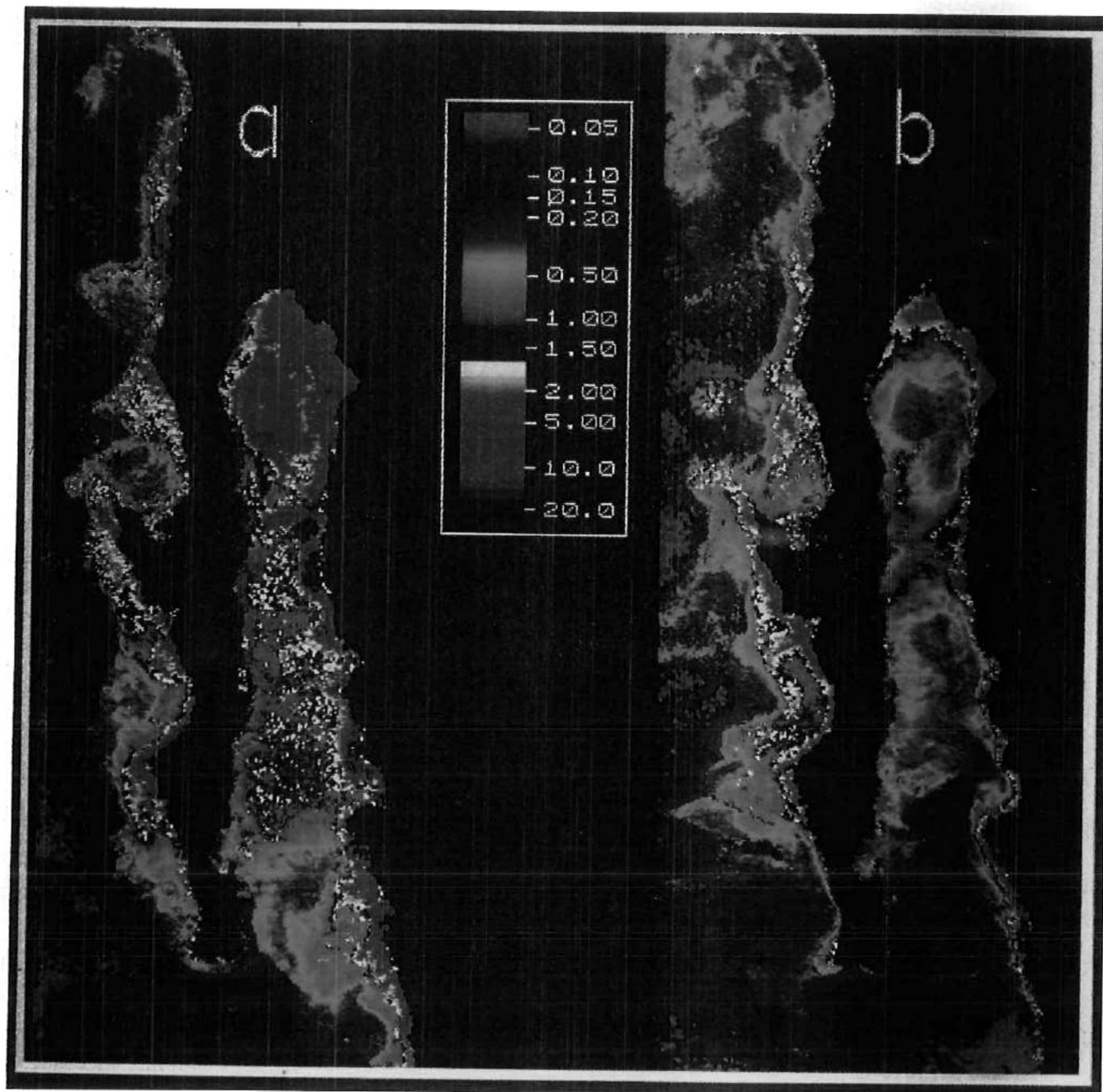
Figure 2b. Same as Figure 2a but for locations 18, 21, 24, 30, 31, and 33.

areas, we applied a principal component analysis (PCA) to the set of time series. In other words, we treated each location as a separate variable and then found the principal components into which the variables were grouped. Components which had an eigenvalue greater than 1.0 were taken as significant. Locations were clustered according to the correlation matrix (Table 1). Each location was grouped with the component with the highest correlation coefficient. Locations within the same cluster are not necessarily part of the same biogeographic region. Some of the clusters have locations that are spatially separated (i.e., locations 1, 2, 13, and 27 in component 6, Table 1). Thus we further partitioned them into geographic groups. These groups of locations were

used to build the map with the biogeographic regions (Figure 3). The 33 locations were not enough to delineate the boundaries between regions. Therefore we used the color structures in the imagery itself to decide about their shape.

### Results and Discussion

Plate 1 is representative of the extreme conditions in the gulf: winter (Plate 1a) and summer (Plate 1b). During winter, pigment concentrations are high in most of the gulf. The effect of upwelling is evident off the coast of mainland Mexico, and very high pigment values are also evident in the northern gulf. Plumes of high pigment concentration may be



**Plate 1.** Gulf of California weekly composites of the CZCS scenes available for the periods (a) April 11–17, 1980, and (b) August 26–31, 1979. Numbers by the color scale are pigment concentrations in milligrams per cubic meter. Numbers at the bottom are the year (first two digits) and the first Julian day of the week.

seen elongating from the eastern side of the gulf toward the Baja California coast. Pigment concentrations are low only at the entrance to the gulf, south from 25°N (Plate 1a). During summer, most of the gulf has very low pigment concentrations (Plate 1b). With winds from the SE, the Surface Eastern Tropical Pacific water enters into the gulf with high temperatures and low nutrients [Alvarez-Borrego and Schwartzlose, 1979]. Pigment concentrations were higher only in the waters around the midriff islands (Angel de la Guarda and Tiburón), in the upper gulf adjacent to the Colorado River mouth, and in a narrow strip off mainland Mexico.

Most of the time series show a very clear seasonal

variation, with pigment concentration maxima between November and May (winter) and minima between June and October (summer) (Figure 2). In general, throughout the gulf the difference between the two “seasons” was dramatic, with values as high as more than  $10 \text{ mg m}^{-3}$  during winter and as low as less than  $0.1 \text{ mg m}^{-3}$  during summer. Location 1, in the upper gulf, and location 14, in Ballenas Channel, are exceptions (Figure 2a). At location 1, pigment concentrations were in general greater than  $4 \text{ mg m}^{-3}$ , and the summer minima were not evident. At location 14, although pigment maxima tended to appear between November and May, summer values in general were not as low as at the other locations. Strong tidal mixing is superimposed on the sea-

**Table 1.** Pearson Correlation Matrix of Pigment Time Series for Each Location Versus Significant Components and Its Eigenanalysis

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9
Location									
1	+0.08	-0.25	0.12	-0.16	-0.15	+0.33*	-0.04	+0.20	-0.17
2	+0.12	-0.26*	+0.18	-0.18	-0.21	+0.26*	-0.05	+0.06	+0.15
3	+0.15	-0.30*	+0.11	-0.26	+0.07	-0.27	-0.14	-0.10	+0.11
4	+0.12	-0.23	+0.12	-0.06	-0.04	+0.12	-0.12	-0.39*	-0.04
5	+0.18	-0.26*	+0.16	-0.23	+0.02	-0.08	-0.11	+0.08	+0.16
6	+0.19	-0.29*	+0.05	-0.18	+0.16	-0.28	-0.13	-0.01	+0.13
7	+0.14	-0.18	-0.00	+0.20	+0.11	+0.10	+0.13	-0.37*	-0.15
8	+0.15	-0.25*	+0.00	+0.24	-0.04	+0.18	+0.21	-0.02	+0.15
9	+0.25*	-0.10	-0.08	+0.09	+0.13	-0.19	+0.04	+0.12	-0.02
10	+0.16	+0.01	-0.21*	+0.19	+0.13	-0.10	-0.08	-0.01	-0.08
11	+0.18	-0.16	-0.22*	+0.17	-0.11	-0.12	-0.05	-0.00	-0.00
12	+0.21	-0.01	-0.21*	+0.22	-0.04	-0.17	-0.14	+0.07	-0.08
13	+0.18	-0.09	-0.13	+0.18	+0.15	+0.25*	-0.04	-0.12	-0.00
14	+0.09	-0.09	-0.08	+0.21	-0.24	+0.23	-0.11	+0.30	+0.35*
15	+0.18	-0.11	-0.25*	+0.20	-0.12	-0.04	-0.08	+0.09	+0.02
16	+0.20	+0.03	-0.36*	-0.27	+0.03	+0.01	+0.14	+0.03	-0.03
17	+0.18	+0.12	-0.37*	-0.35	-0.00	+0.13	+0.09	+0.00	+0.01
18	+0.20	+0.07	+0.13	-0.09	-0.20	-0.08	+0.25*	+0.05	-0.06
19	+0.18	+0.11	+0.02	-0.13	-0.11	-0.20	+0.07	+0.13	-0.23*
20	+0.16	-0.01	+0.12	+0.08	-0.19	+0.13	+0.43*	-0.08	+0.07
21	+0.22	+0.18	+0.04	-0.06	-0.27*	-0.02	+0.00	+0.03	+0.06
22	+0.20	+0.23	+0.05	-0.09	-0.31*	-0.06	+0.07	+0.03	-0.02
23	+0.20	+0.07	+0.17	+0.08	+0.16	+0.00	+0.31*	-0.04	-0.02
24	+0.21	+0.25*	+0.09	+0.04	-0.02	+0.02	+0.18	-0.10	-0.09
25	+0.20	+0.24*	+0.01	+0.11	+0.02	-0.08	-0.16	-0.07	-0.10
26	+0.19	+0.14	+0.18	+0.00	+0.15	+0.00	+0.23*	-0.02	-0.11
27	+0.07	+0.12	-0.31	-0.35	+0.30	+0.37*	+0.05	-0.09	+0.13
28	+0.20	+0.30*	+0.15	+0.00	+0.05	+0.08	-0.21	-0.17	+0.15
29	+0.19	+0.28*	+0.22	+0.01	+0.10	+0.17	-0.22	-0.14	+0.11
30	+0.15	-0.08	+0.14	+0.11	+0.22	+0.05	+0.37*	+0.19	+0.02
31	+0.08	+0.09	+0.12	+0.07	+0.11	+0.22	-0.21	+0.39*	+0.21
32	+0.00	+0.10	+0.04	-0.02	-0.01	-0.20	+0.24	+0.68*	-0.11
33	+0.06	+0.03	+0.15	-0.02	-0.43*	-0.05	+0.07	+0.35	-0.15
Eigenvalue	9.07	2.61	2.10	1.60	1.46	1.23	1.20	1.04	1.02
Proportion	0.27	0.07	0.06	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03
Cumulative	0.27	0.35	0.41	0.46	0.51	0.54	0.58	0.61	0.64
Region	IV	II, XI	VII		IX, XIV	I, VI, XII	X	III, XIII	V, VIII

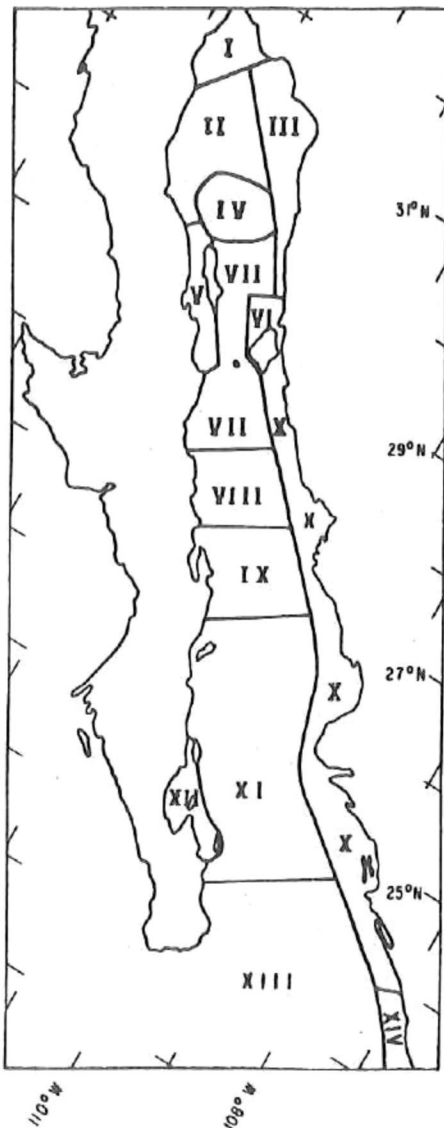
Matrix was generated by principal component analysis.

\*Clusters according to principal components.

sonal variation in the upper gulf and Ballenas Channel. The time series from locations 31 (Figure 2b) and 32 (very similar to 31 and not illustrated) show that in general, pigment concentrations were very low in the center and at the western side of the entrance to the gulf; maxima were often less than  $1 \text{ mg m}^{-3}$  and of very short duration. In the central and southern parts of the gulf, pigment values were generally higher on the eastern than on the western side, and this is much more evident for locations near or at the entrance to the gulf.

The effect of the summer upwelling off the Baja California coast is not evident in the CZCS imagery; there were no high pigment concentrations there. Time series from locations 21 and 24, on the western side of the gulf (Figure 1), show no effect of the summer upwelling on the pigment concentrations (Figure 2b). At these locations, pigment maxima were also present with winter conditions, possibly because of the eddy circulation that brings upwelled water from the eastern coast as described by *Badan-Dangon et al.* [1985]. During

summer, upwelling off the western coast of the gulf has been detected with infrared images taken from the NOAA 6 and TIROS N satellites, but it is less intense than during winter [*Badan-Dangon et al.*, 1985]. Failure of the CZCS imagery to detect the summer upwelling effect on the phytoplankton biomass is due to the presence of the Surface Eastern Tropical Pacific water. This water acts as a warm water cap and masks the upwelling effect on the nutrient input to the euphotic zone, very much as El Niño masks the effect of the upwelling in regions such as off Peru. *Chavez* [1987] indicates that contrary to what was believed in the past, during an El Niño the winds responsible for upwelling off Peru intensify, but accumulation of warm, nutrient-poor water and a deeper nutricline result in upwelled water that does not support phytoplankton growth. In the Gulf of California there is eddy circulation from coast to coast throughout the year, and during summer the Surface Eastern Tropical Pacific water penetrates up to the midriff islands [*Alvarez-Borrego and Schwartzlose*, 1979]. Because of this, the



**Figure 3.** Biogeographic division of the gulf into 14 regions as a result of principal component analysis of the pigment time series.

seasonal variation of pigment biomass at locations on the western side is in phase with that on the eastern side in spite of upwelling on both sides of the gulf being half a year out of phase.

The PCA resulted in nine principal components that clustered locations into 14 biogeographic regions (Figure 3). Region I is the upper gulf, characterized by strong tidal mixing and high turbidity. Nutrient concentrations are high in this region, especially in the northernmost part (the Colorado River delta) [Hernández-Ayón *et al.*, 1993]. Measured surface [Chl] values in region I range from 2 to 5 mg m<sup>-3</sup> for September 1990 and February and May 1991 (E. Santamaría-del-Angel and S. Alvarez-Borrego, manuscript in preparation, 1994). It is interesting to note that despite high turbidity, the CZCS pigment concentration values of region I (Figure 2a) are similar to those reported by Santamaría-del-Angel and Alvarez-Borrego (manuscript in preparation, 1994). Reported values for zooplankton biomass are

in the range of 1 to 154 mg (dry weight) m<sup>-3</sup> [Farfán and Alvarez-Borrego, 1992], similar to those found in rich oceanic waters and in estuaries.

Region II is the central and western northern gulf. It is characterized by intermediate pigment concentrations without extremely low values during summer. *Gendrop-Funes et al.* [1978] sampled the inner gulf in March 1973 and reported measured [Chl] values for region II in the ranges 2–40, 1.5–29, and 2–24 mg m<sup>-3</sup> for 0-, 5-, and 10-m depths, respectively, with highest values off the Baja California coast. *Alvarez-Borrego and Gaxiola-Castro* [1988] reported [Chl] values of 1.0, 0.9, and 0.8 mg m<sup>-3</sup> for 0-, 6-, and 12-m depths, respectively, for the last week of June 1982. The CZCS-derived pigment concentration is about twice as high as these latter values.

Region IV, north of Angel de la Guarda Island, differs from region II mainly by its very low pigment values during summer (Plate 1b). The summer thermocline is very strongly developed there. *Gendrop-Funes et al.* [1978] reported [Chl] values for region IV in the ranges 2.5–10 mg m<sup>-3</sup> for 0 m and 3–10 mg m<sup>-3</sup> at 5- and 10-m depths for March 1973, with lowest values at the center of region IV. *Alvarez-Borrego and Gaxiola-Castro* [1988] reported [Chl] values of 1.9–4.0, 1.8–5.9, and 2.1–5.6 mg m<sup>-3</sup> for 0-, 5-, and 8-m depths, respectively, for early December 1981, and they reported [Chl] values of 0.5 and 1.1 mg m<sup>-3</sup> for 0- and 8-m depths, respectively, for late June 1982. The CZCS-derived pigment concentration for early December 1981 is very similar to the highest values reported by these latter authors, and that for late June is about twice as high as that reported for surface waters.

Regions III, VI, X, and XIV, adjacent to the eastern coast of the gulf, are the winter upwelling areas. These regions show the highest pigment concentrations in the imagery (Plate 1a, Figures 2a and 2b). Possibly, the PCA differentiated them into four regions because of differences in the timing of the upwelling events. *Badan-Dangon et al.* [1985] described the behavior of upwelling centers and estimated that the development of atmospheric forcing along the gulf shifted southeastward at a rate of about 300 km in 5 to 10 days during April 1980. Thus upwelling events are not simultaneous along the eastern coast of the gulf. *Gendrop-Funes et al.* [1978] reported [Chl] values for region III of 5–29, 5–24, and 10–14 mg m<sup>-3</sup> for 0-, 5-, and 10-m depths, respectively, for March 1973, with highest values in the northern part. These authors reported [Chl] values for region VI of 10–11, 10–13, and 8–12 mg m<sup>-3</sup> for 0-, 5-, and 10-m depths, respectively. For region X, *Valdez-Holguín* [1986] reported [Chl] values of 5, 7, and 7.5 mg m<sup>-3</sup> for 0-, 5-, and 10-m depths, respectively, for late March 1983. *Bazán-Guzmán* [1990] reported [Chl] surface values of 0.5–0.9 mg m<sup>-3</sup> for the northern part of region X for early December 1984. The CZCS-derived pigment concentrations for region X are similar to *Valdez-Holguín's* [1986] and *Bazán-Guzmán's* [1990] values.

Region V is Ballenas Channel. In general, in spite of high nutrient concentrations, pigment maxima in region V are not the highest of the gulf (location 14, Figure 2a) because of high turbulence. For region V, *Gendrop-Funes et al.* [1978] reported [Chl] values of 3.5–7, 5–7, and 3.5–5 mg m<sup>-3</sup> for 0-, 5-, and 10-m depths, respectively, for March 1973, with highest values in the area adjacent to Angel de la Guarda Island. *Alvarez-Borrego and Gaxiola-Castro* [1988] reported

[Chl] values of 1.0–2.7, 3.0–3.5, and 2.7–3.2  $\text{mg m}^{-3}$  for 0-, 4-, and 8-m depths, respectively, for early December 1981. The CZCS-derived pigment concentration for early December 1981 is very similar to the highest of these latter values. Millán-Núñez *et al.* [1993] reported [Chl] values of 0.5–1.7  $\text{mg m}^{-3}$  for 0- to 5-m depth for early November 1987.

Region VII is characterized by the presence of internal waves that are generated by the large tidal ranges (up to 4 m) [Fu and Holt, 1984]. For the northern part of region VII, Gendrop-Funes *et al.* [1978] reported [Chl] values of 3–5, 3–8, and 4–8  $\text{mg m}^{-3}$  for 0-, 5-, and 10-m depths, respectively, for March 1973. Alvarez-Borrego and Gaxiola-Castro [1988] reported [Chl] values of 2.6, 2.4, and 2.8  $\text{mg m}^{-3}$  for 0-, 4-, and 7-m depths, respectively, for early December 1981, and they reported [Chl] values of 2.4–3.5, 2.7–3.2, and 2.4–3.2  $\text{mg m}^{-3}$  for 0-, 5-, and 9-m depths, respectively, for late June 1982. The CZCS-derived pigment concentration for early December 1981 is about 40% higher and those for late June are between a few percent and 50% lower than the highest value reported by these last authors. For the southern part of region VII, Valdez-Holguín [1986] reported [Chl] values of 2.2–3.0  $\text{mg m}^{-3}$  for a depth of 0–10 m for March 1983, and Bazán-Guzmán [1990] reported surface values of 0.5–0.9  $\text{mg m}^{-3}$  for early December 1984. The CZCS-derived pigment concentrations for the southern part of region VII are similar to Valdez-Holguín's [1986] and Bazán-Guzmán's [1990] values.

Regions VIII, IX, and XI have successively lower pigment concentrations. These are regions where effects associated with the El Niño phenomenon were most evident in the winters of 1982–1983 and 1983–1984, lowering the pigment concentrations to as much as one third of values in previous and later years. The effect of the 1982–1984 El Niño is the subject of a separate contribution to this issue [Santamaría-del-Angel *et al.*, this issue]. For the western part of region VIII, Alvarez-Borrego and Gaxiola-Castro [1988] reported [Chl] values of 0.3 and 0.9  $\text{mg m}^{-3}$  for 0- and 12-m depths, respectively, for June 1982; the CZCS-derived pigment concentration for late June 1982 is about 25% lower than their value for 0 m. Lara-Lara *et al.* [1993] reported [Chl] values for region VIII as high as 5.2, 6.3, and 1.6  $\text{mg m}^{-3}$  for 0-, 5-, and 9-m depths, respectively, and as low as 0.2  $\text{mg m}^{-3}$  for a depth of 0–10 m for early April 1985; the CZCS value is 1.6  $\text{mg m}^{-3}$  for this week. For region IX, Valdez-Holguín [1986] reported [Chl] values of 0.7–0.9  $\text{mg m}^{-3}$  for a depth of 0–10 m for late March 1984, and Lara-Lara *et al.* [1993] reported [Chl] values of 1.3 and 1.6  $\text{mg m}^{-3}$  for 0- and 8-m depths, respectively, for April 1985. For the central part of region XI, Valdez-Holguín [1986] reported [Chl] values around 0.15  $\text{mg m}^{-3}$  for a depth of 0–10 m for March 1984, and Bazán-Guzmán [1990] reported surface values of 0.3–0.4  $\text{mg m}^{-3}$  for late November 1984. The CZCS-derived pigment concentrations for regions IX and XI are similar to those reported by Lara-Lara *et al.* [1993], Valdez-Holguín [1986], and Bazán-Guzmán [1990].

Region XII is La Paz Bay. Its existence as a separate region is perhaps due to the effect of the islands on its dynamics and the effect of the exchange with the coastal lagoon Ensenada de La Paz in its southwestern part.

Region XIII is the most oceanic and oligotrophic area. The time series from locations 31 (Figure 2b) and 32 (not illustrated) still show maxima with winter conditions, but they are very low and brief. Stevenson [1970] reported median

values of surface [Chl] increasing from 0.6 to 1.0  $\text{mg m}^{-3}$  from April to August 1967 at the entrance to the gulf, with the highest values near Las Tres Marias Islands. Valdez-Holguín [1986] reported [Chl] values of 0.2–0.4  $\text{mg m}^{-3}$  for a depth of 0–10 m in the area near Cape San Lucas and the central part of region XIII in March 1983.

## General Remarks

The division of the Gulf of California into these 14 regions is more complete and ecologically meaningful than previously proposed divisions. Some of these regions relate to the life cycles or geographic distribution, including the benthos, of important faunal groups. For example, region I has been recognized as an area of reproduction and a nursery for many fish species, some of which, such as the totoaba, *Totoaba macdonaldi*, have been considered to be in danger; marine mammals are also abundant in this region. It is part of the small habitat of the endangered small dolphin commonly known in Spanish as la vaquita, *Phocoena sinus*. It includes an area, adjacent to the Colorado River mouth, where fishing is permanently banned. Regions III, VI, X, and XIV, adjacent to the eastern coast of the gulf, are the main areas for the shrimp fishery of the gulf.

Region V is Ballenas Channel. It has no oxygen minimum at depth because of strong tidal mixing. Surface nutrient and total carbon dioxide concentrations are very high [Alvarez-Borrego *et al.*, 1978; Gaxiola-Castro *et al.*, 1978]. It has been suggested that during El Niño events, Ballenas Channel may serve as a refugium of high productivity and prey abundance for highly mobile marine animals like mammals and birds [Tershy *et al.*, 1991]. Regions V and VII are characterized by winter carbon dioxide partial pressure surface values as high as more than 500 ppm, which are well above atmospheric values (A. Zirino *et al.*, manuscript in preparation, 1994).

Region VII is characterized by the presence of internal waves. Paden *et al.* [1991] analyzed advanced very high resolution radiometer thermal infrared data to demonstrate the influence of tidal stirring on surface temperature distributions. This approach indicates the presence of a marked fortnightly modulation of surface temperature gradients which is most pronounced in the vicinity of the midrift islands. Regions VIII, IX, and XI comprise most of the spawning grounds of the sardine [Hammann, 1991]. The sardine is one of the major pelagic fish in the gulf, with recent yearly landings exceeding 400,000 t [Food and Agriculture Organization, 1988].

Gulf of California chlorophyll data obtained directly by water sampling are very scarce. Thus it is difficult to make a comparison with CZCS data to test their validity. Nevertheless, the CZCS time series are very consistent; their seasonal cycles and the space variation behave very much as expected according to physical phenomena such as the movement of water masses and the occurrence of upwelling events. With the few data available we constructed a diagram of CZCS pigment data versus [Chl] (Figure 4). Strictly, this diagram is not appropriate, because the two sets of data have totally different time and space scales: the CZCS data are averages for areas  $12 \times 12 \text{ km}^2$  and for 1 week, whereas the [Chl] data are instantaneous point measurements. However, it is encouraging to note that in spite of these differences, most of the CZCS data with the 1-standard-deviation bars are crossed by the 45° line. The bars in Figure 4 are the

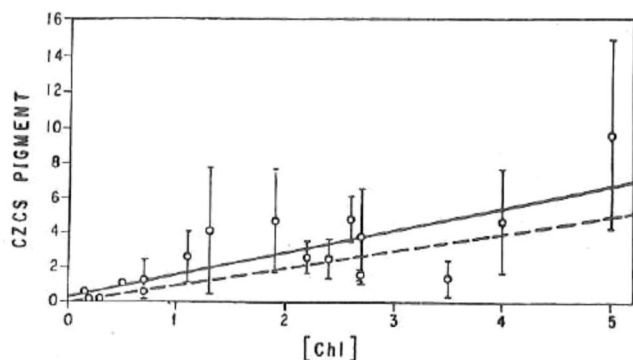


Figure 4. CZCS pigment data versus concentration of chlorophyll *a* ([Chl]) measured in water samples (milligrams per cubic meter). Vertical bars represent 1 standard deviation of CZCS data in the weekly composites. The solid curve is the least squares fit, and the dashed curve is the one-to-one relation.

result of variations of pigment concentration from pixel to pixel within the  $12 \times 12 \text{ km}^2$  boxes in the weekly CZCS composites. These variations are due to strong phytoplankton patchiness in the gulf.

Future work with the CZCS data may include work on the effect of the sequence of spring and neap tides in the northern regions, mainly in region VII and possibly in regions I and V; a study of the space variability of pigment biomass and its relation to physical phenomena, such as the one done by Smith *et al.* [1988] for the California Current System; and the application of bio-optical models to estimate primary productivity. As mentioned earlier, the effect of the 1982–1984 El Niño event in the different regions of the Gulf of California is the subject of a separate contribution to this issue [Santamaría-del-Angel *et al.*, this issue]. The Gulf of California has relatively low cloud coverage throughout the year, and with the CZCS data there are many opportunities to describe phenomena related to phytoplankton biomass.

**Acknowledgments.** We thank three anonymous reviewers for their suggestions to improve the manuscript. We thank Christine Harris for her help with the language.

## References

- Allen, W. E., Plankton diatoms of the Gulf of California obtained by the G. Allan Hancock Expedition of 1936, in Hancock Pacific Expedition, *Publ. 3*, pp. 47–59, Univ. of South. Calif., Los Angeles, 1937.
- Alvarez-Borrego, S., Gulf of California, in *Estuaries and Enclosed Seas*, edited by B. H. Ketchum, pp. 427–449, Elsevier, New York, 1983.
- Alvarez-Borrego, S., and G. Gaxiola-Castro, Photosynthetic parameters of northern Gulf of California phytoplankton, *Cont. Shelf Res.*, **8**, 37–47, 1988.
- Alvarez-Borrego, S., and J. R. Lara-Lara, The physical environment and primary productivity of the Gulf of California, in *The Gulf and Peninsular Province of the Californias*, edited by J. P. Dauphin and B. R. T. Simoneit, *AAPG Mem.*, **47**, 555–567, 1991.
- Alvarez-Borrego, S., and R. A. Schwartzlose, Masas de agua del Golfo de California, *Cienc. Mar.*, **6**, 43–63, 1979.
- Alvarez-Borrego, S., J. A. Rivera, G. Gaxiola-Castro, M. J. Acosta-Ruiz, and R. A. Schwartzlose, Nutrientes en el Golfo de California, *Cienc. Mar.*, **5**, 53–71, 1978.
- Badan-Dangon, A., C. J. Koblinksky, and T. Baumgartner, Spring and summer in the Gulf of California: Observations of surface thermal patterns, *Oceanol. Acta*, **8**, 13–22, 1985.
- Bazán-Guzmán, M. C., Productividad primaria en la parte sur y central del Golfo de California durante noviembre-diciembre de 1984, B.S. thesis, 70 pp., Fac. de Cienc. Mar., Univ. Autón. de Baja Calif., Ensenada, Baja California, Mexico, 1990.
- Bray, N. A., Thermohaline circulation in the Gulf of California, *J. Geophys. Res.*, **93**(C5), 4993–5020, 1988.
- Chavez, F., El Niño y la Oscilación del Sur, *Invest. Cienc.*, **128**, 46–55, 1987.
- Cupp, E. E., and W. E. Allen, Plankton diatoms of the Gulf of California obtained by the Allan Hancock Pacific Expedition of 1937, in Hancock Pacific Expedition, *Publ. 3*, pp. 61–74, Univ. of South. Calif., Los Angeles, 1938.
- Farfán, C., and S. Alvarez-Borrego, Zooplankton biomass of the northernmost Gulf of California, *Cienc. Mar.*, **18**, 17–36, 1992.
- Food and Agriculture Organization, Catches and landings, 1986, *Yearb. Fish. Stat.*, **62**, 479 pp., 1988.
- Fu, L. L., and B. Holt, Internal waves in the Gulf of California: Observations from a spaceborne radar, *J. Geophys. Res.*, **89**(C2), 2053–2060, 1984.
- Gaxiola-Castro, G., S. Alvarez-Borrego, and R. A. Schwartzlose, Sistema a del bióxido de carbono en el Golfo de California, *Cienc. Mar.*, **5**, 25–40, 1978.
- Gendrop-Funes, V., M. J. Acosta-Ruiz, and R. A. Schwartzlose, Distribución horizontal de clorofila *a* durante la primavera en la parte norte del Golfo de California, *Cienc. Mar.*, **5**, 71–89, 1978.
- Gilbert, J. Y., and W. E. Allen, The phytoplankton of the Gulf of California obtained by the "E. W. Scripps" in 1939 and 1940, *J. Mar. Res.*, **5**(2), 89–110, 1943.
- Gordon, H. R., D. K. Clark, J. W. Brown, O. B. Brown, R. H. Evans, and W. W. Broenkow, Phytoplankton pigment concentrations in the Middle Atlantic Bight: Comparison of ship determinations and CZCS estimates, *Appl. Opt.*, **22**, 20–35, 1983a.
- Gordon, H. R., J. W. Brown, O. B. Brown, R. H. Evans, and D. K. Clark, Nimbus 7 CZCS: Reduction of its radiometric sensitivity with time, *Appl. Opt.*, **22**, 3929–3931, 1983b.
- Gordon, H. R., O. B. Brown, R. H. Evans, J. W. Brown, R. C. Smith, K. S. Baker, and D. K. Clark, A semianalytic radiance model of ocean color, *J. Geophys. Res.*, **93**(D9), 10,909–10,924, 1988.
- Granados-Gallegos, J. L., and R. A. Schwartzlose, Corrientes superficiales en el Golfo de California, in *Memorias del V Congreso Nacional de Oceanografía*, Esc. de Cienc. Mar. del Inst. Tecnol. y de Estud. Super. de Monterrey, Guaymas, Sonora, Mexico, 1974.
- Hammann, M. G., Spawning habitat and egg and larval transport, and their importance to recruitment of Pacific sardine, *Sardinops sagax caeruleus*, in the Gulf of California, in *Long-Term Variability of Pelagic Fish Populations and Their Environment*, edited by T. Kawasaki, S. Tanaka, Y. Toba, and A. Taniguchi, pp. 271–278, Pergamon, New York, 1991.
- Hernández-Ayón, J. M., M. S. Galindo-Bect, B. P. Flores-Báez, and S. Alvarez-Borrego, Nutrient concentrations are high in the turbid waters of the Colorado River Delta, *Estuarine Coastal Shelf Sci.*, **37**, 551–561, 1993.
- Lara-Lara, J. R., R. Millán-Núñez, J. L. Lara-Osorio, and C. Bazán-Guzmán, Productividad y biomasa del fitoplancton por clases de tamaño en la parte central del Golfo de California durante primavera 1985, *Cienc. Mar.*, **19**(2), 137–154, 1993.
- Lavin, M. F., and S. Organista, The surface heat flux in the northern Gulf of California, *J. Geophys. Res.*, **93**(D2), 1433–1445, 1988.
- Millán-Núñez, R., R. Cajal-Medrano, E. Santamaría-del-Angel, and E. Millán-Núñez, Primary productivity and chlorophyll *a* in the central part of the Gulf of California (autumn 1987), *Cienc. Mar.*, **19**, 29–40, 1993.
- Müller-Karger, F. E., J. J. Walsh, R. H. Evans, and M. B. Meyers, On the seasonal phytoplankton concentration and sea surface temperature cycles of the Gulf of Mexico as determined by satellites, *J. Geophys. Res.*, **96**(C7), 12,645–12,665, 1991.
- Paden, C. A., M. R. Abbott, and C. D. Winant, Tidal and atmospheric forcing of the upper ocean in the Gulf of California, 1, Sea surface temperature variability, *J. Geophys. Res.*, **96**(C10), 18,337–18,359, 1991.
- Robinson, M. K., Atlas of monthly mean sea surface and subsurface

- temperatures in the Gulf of California, Mexico, *Mem. 5*, 97 pp., San Diego Soc. Nat. Hist., San Diego, Calif., 1973.
- Roden, G. I., Oceanographic aspects of the Gulf of California, in *Marine Geology of the Gulf of California: A Symposium*, edited by T. H. van Andel and G. G. Shor, Jr., *Mem. Am. Assoc. Pet. Geol.*, 3, 30-58, 1964.
- Roden, G. I., and I. Emilsson, Physical oceanography of the Gulf of California, paper presented at the Gulf of California Symposium, Univ. Nac. Autón. de Méx., Mazatlán, Sinaloa, Mexico, 1979.
- Round, F. E., The phytoplankton of the Gulf of California, I, Its composition, distribution and contribution to the sediments, *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 1, 76-97, 1967.
- Rusnak, G. A., R. L. Fisher, and F. P. Shepard, Bathymetry and faults of the Gulf of California, in *Marine Geology of the Gulf of California: A Symposium*, edited by T. H. van Andel and G. G. Shor, Jr., *Mem. Am. Assoc. Pet. Geol.*, 3, 59-75, 1964.
- Santamaría-del-Angel, S. Alvarez-Borrego, and F. E. Müller-Karger, The 1982-1984 El Niño in the Gulf of California as seen in coastal zone color scanner imagery, *J. Geophys. Res.*, this issue.
- Shepard, F. P., Submarine topography of the Gulf of California, *Mem. Geol. Soc. Am.*, 43, 32 pp., 1950.
- Smith, R. C., X. Zhang, and J. Michaelsen, Variability of pigment biomass in the California Current System as determined by satellite imagery, I, Spatial variability, *J. Geophys. Res.*, 93(D9), 10,863-10,882, 1988.
- Stevenson, M. R., On the physical and biological oceanography near the entrance to the Gulf of California, October 1966-August 1967, *Bull. Inter. Am. Trop. Tuna Comm.*, 4(3), 389-504, 1970.
- Sverdrup, H. U., The Gulf of California; Preliminary discussion on the cruise of the *E. W. Scripps* in February and March 1939, *Pac. Sci. Congr.*, 6th(3), 161-166, 1941.
- Tershy, B. R., D. Breese, and S. Alvarez-Borrego, Increase in cetacean and seabird numbers in the Canal de Ballenas during an El Niño-Southern Oscillation event, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 69, 299-302, 1991.
- Valdez-Holgún, J. E., Distribución de la biomasa y productividad del fitoplancton en el Golfo de California durante el evento de El Niño 1982-1983, M.S. thesis, 90 pp., Cent. de Invest. Cient. y Educ. Super. de Ensenada, Ensenada, Baja California, México, 1986.
- Van Andel, T. H., Recent marine sediments of the Gulf of California, in *Marine Geology of the Gulf of California: A Symposium*, edited by T. H. van Andel and G. G. Shor, Jr., *Mem. Am. Assoc. Pet. Geol.*, 3, 216-310, 1964.
- Zeitzschel, B., Primary productivity in the Gulf of California, *Mar. Biol.*, 3, 201-207, 1969.
- S. Alvarez-Borrego, División de Oceanología, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Ensenada, Baja California, Mexico.
- F. E. Müller-Karger, Department of Marine Science, University of South Florida, 140 Seventh Avenue South, St. Petersburg, FL 33701.
- E. Santamaría-del-Angel, Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, P.O. Box 453, Ensenada, Baja California, Mexico.

(Received October 30, 1992; revised April 28, 1993; accepted August 4, 1993.)

## The 1982-1984 El Niño in the Gulf of California as seen in coastal zone color scanner imagery

Eduardo Santamaría-del-Angel

Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, Baja California, México

Saúl Alvarez-Borrego

División de Oceanología, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Ensenada, Baja California, México

Frank E. Müller-Karger

Department of Marine Science, University of South Florida, St. Petersburg

**Abstract.** The 1982-1984 El Niño was well documented for the Gulf of California, primarily with sea level anomalies. However, owing to strong tidal and atmospheric forcing, the general effects on chlorophyll concentrations ([Chl]) and phytoplankton productivity (PP) are not clear. The literature reports low [Chl] and PP for the mouth region and high values for both variables in the central gulf and in the region of the midrift islands. No data were collected in situ in the northern gulf. Using monthly composites of coastal zone color scanner (CZCS) satellite imagery, we generated time series for 33 locations throughout the gulf. We calculated pigment concentration anomalies and derived a relative power index that provides a measure of the relationship between negative anomalies and El Niño episodes. Our analyses show that during 1978-1986, variability in phytoplankton biomass in the Gulf of California was not dominated by El Niño events. Rather, strong tidal mixing and upwelling in the interior of the gulf masked the effect of El Niño 1982-1984 that otherwise showed so clearly in other coastal ecosystems of the eastern Pacific. Lower pigment concentrations were in fact detected with the CZCS at and near the entrance of the gulf, where vertical mixing is not as strong. Locations in the central and northern gulf showed either a weak effect or no effect of El Niño. Ballenas Channel showed an exceptional behavior, with an increase of pigment concentrations toward the end of 1983. Despite the Ballenas Channel having the highest surface nutrient concentrations, pigment maxima there are not in general the highest of the gulf. The excess vertical turbulence in the channel leads to light limitation of phytoplankton. Reduced mixing at the end of 1983 promoted the increase of phytoplankton biomass in Ballenas Channel. Strong non-El Niño conditions in 1984 caused lower phytoplankton biomass in Ballenas Channel than during other years of the period analyzed.

### Introduction

El Niño-Southern Oscillation episodes severely reduce primary productivity throughout most of the coastal eastern Pacific, from Peru to Baja California and California [Barber and Chavez, 1983; Cane, 1983]. Some of the changes observed during an event are unusually high sea surface temperatures, poleward coastal currents, heavy rainfall, invasion by tropical organisms, and mass mortality of various local marine organisms. Wooster [1960] was the first to suggest that the anomalies in both Peru and California had the same underlying causes.

McGowan [1983] indicated that primary and secondary production in the California Current are high when the transport of cool, low-salinity water from the north is strong and low when it is weak; the periods of warming and low

production in the California Current tend to coincide with El Niño events in the eastern equatorial Pacific.

The strongest recorded El Niño event began to develop in the equatorial Pacific during the summer of 1982 [Rasmusson, 1984]. Tidal records show the El Niño developing at the end of 1982 as positive anomalies of mean sea level along the Mexican Pacific coast, including the Gulf of California [Robles-Pacheco and Christensen, 1983].

In situ and sedimentological data from the Gulf of California indicate that phytoplankton communities here respond to El Niño events differently from the communities off Peru and the Pacific coast of Baja California. For example, siliceous phytoplankton assemblages are preserved in the laminated sediments of the Guaymas Basin. A 20-year record, from 1953 through 1972, of year-to-year variability of these assemblages shows a strong correlation with interannual sea level anomalies. El Niño periods are generally marked by increases in preserved abundances of the total siliceous assemblage and in particular by greater numbers of individuals within species whose distributions are limited to tropical and

Copyright 1994 by the American Geophysical Union.

Paper number 93JC02147.  
0148-0227/94/93JC-02147\$05.00

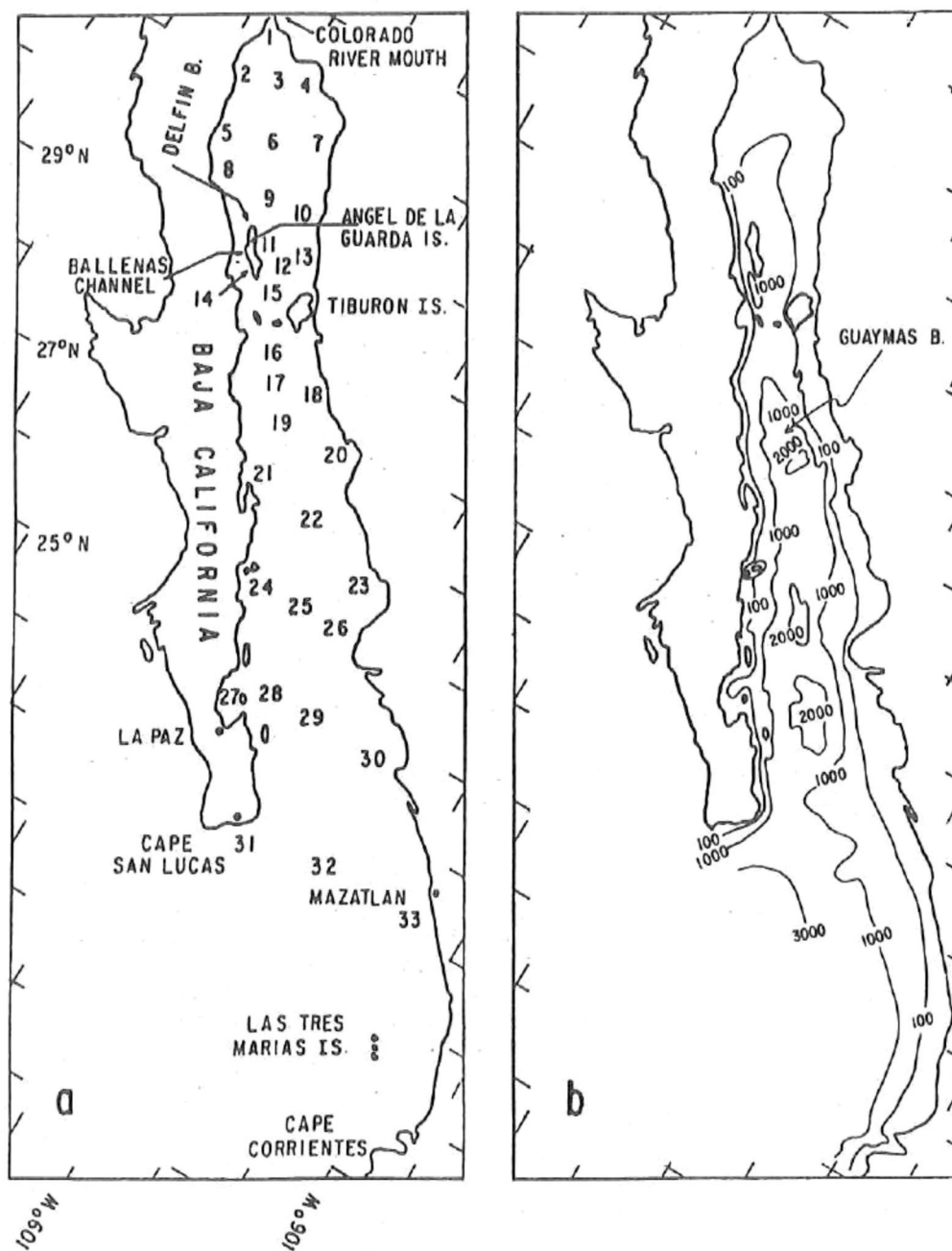


Figure 1. (a) Geographic locations for the generation of the time series and names of locations mentioned in the text, and (b) general bathymetry.

subtropical waters [Baumgartner *et al.*, 1985]. Siliceous phytoplankton studied by Baumgartner *et al.* [1985] represent only the  $>24\text{-}\mu\text{m}$ -size fraction of the heavily silicified diatoms and silicoflagellates. Also, Lara-Lara *et al.* [1984] reported a large increase in primary productivity during March and October 1983 compared with historical data reported by Zeitzschel [1969] for 1960, 1967, and 1968, which were non-El Niño years according to Quinn *et al.* [1978]. Productivity values averaged  $3.1\text{ g C m}^{-2}\text{ d}^{-1}$  in March and  $1.8\text{ g C m}^{-2}\text{ d}^{-1}$  in October 1983 near the midrift islands (Angel de la Guarda and Tiburón; Figure 1) and the central gulf regions. Here, the water column experiences intense

forcing and mixing by tides and winds, which might counteract the stabilizing effects associated with El Niños.

Gaxiola-Castro and Alvarez-Borrego [1986] estimated high productivity values for the northern region of the gulf for December 1981 and June 1982 with non-El Niño conditions; their values are similar to those reported by Lara-Lara *et al.* [1984]. However, patchiness and great changes within relatively short periods make it very difficult to properly describe long-period changes in the gulf with the few discrete data we now have. Proper time series data need to be generated.

Mee *et al.* [1985] reported temperature (1979–1984) and

chlorophyll *a* (1979–1983) time series obtained at the mouth of the gulf 30 km from the eastern coast. Their positive temperature anomalies show that the El Niño event occurred in the southern gulf from September–October 1982 through June 1984. They used the temperature difference between 0 and 10 m as an index of stratification and upwelling, reporting enhanced upwelling in 1981 and suppressed upwelling in 1983. Their chlorophyll *a* data show that the enhanced upwelling of 1981 resulted in a large standing crop of phytoplankton with an average surface value of  $12 \text{ mg m}^{-3}$ . There was no large seasonal chlorophyll *a* maximum during 1983, and average surface values were  $<2 \text{ mg m}^{-3}$ . They took this as further evidence of the suppression of upwelling during the 1983 El Niño in the southeastern gulf.

Thus the scarce discrete data available suggest that El Niño events reduce the phytoplankton biomass in the southeastern gulf, where hydrographic conditions are similar to those of the open Pacific [Mee *et al.*, 1985]. However, these events do not lead to decreasing primary productivity in the interior of the gulf, especially in the northern gulf, where there is intense forcing by tides and winds [Lara-Lara *et al.*, 1984]. There, nutrient concentrations remain high in the euphotic zone in spite of positive surface temperature anomalies.

The satellite-borne coastal zone color scanner (CZCS) has provided information on the spatial distribution of phytoplankton at scales impossible to cover in ship-based studies. The CZCS generated data from November 1978 through June 1986. With these data we can attempt to describe the spatial and temporal changes of surface photosynthetic pigment concentrations, with the goal of detecting significant differences between El Niño and non-El Niño years.

## Study Area

The Gulf of California is approximately 1000 km long by 150 km wide (Figure 1). Topographically, it is divided into a series of basins and trenches deepening to the south and separated from each other by transverse ridges [Shepard, 1950]. Except for Delfin Basin, the northern area is relatively shallow. Much of it is at shelf depth (Figure 1b). The southern area of the gulf, between Cape San Lucas and Cape Corrientes, is open to the Pacific and is deeper than 3000 m at the entrance [Van Andel, 1964].

The potentially moderating effect of the Pacific Ocean upon the climate of the gulf is greatly reduced by an almost uninterrupted chain of mountains 1 to 3 km high along Baja California. The climate of the gulf is therefore more continental than oceanic, a fact that contributes to the large annual and diurnal temperature ranges observed there [Rodén, 1964]. Winds in the gulf are extremely variable. Winds from the NW prevail from November to May ("winter" condition), and those from the SE prevail during the rest of the year ("summer" condition). Using data from weather satellites, Harris [1969] indicated that in the period 1961–1968, there were 93 tropical cyclones in the eastern North Pacific, with wind velocities higher than  $63 \text{ km h}^{-1}$ . According to Harris [1969], the eastern North Pacific is an area of frequent tropical cyclone activity, second in the world only to the typhoon region of the western Pacific. Moderate northwest gales that last 2 or 3 days at a time are frequently experienced in the upper gulf between December and February. These winds are particularly strong in Ballenas Chan-

nel between the mountainous Baja California coast and the equally high Angel de la Guarda Island; they may on occasion raise such a heavy sea that navigation becomes impossible [Rodén, 1964].

At the entrance to the gulf there are three surface water masses: cold California Current water of low salinity ( $<34.60$  practical salinity units (psu)), which flows southward along the west coast of Baja California; warm, nutrient-poor Surface Eastern Tropical Pacific water of intermediate salinity ( $34.65\text{--}34.85$  psu), which flows into the area from the southeast; and warm, highly saline ( $>34.9$  psu) Gulf of California water [Griffiths, 1968]. Beneath these three water masses are (from shallower to deeper) nutrient-rich Subtropical Subsurface water, with a salinity maximum of about 34.80 psu, which is obscured in the gulf; Antarctic Intermediate water, characterized by a deep salinity minimum of about 34.50 psu [Griffiths, 1968]; and Pacific Bottom water, characterized by an increase in salinity to about 34.68 psu [Alvarez-Borrego, 1983]. During winter, Surface Eastern Tropical Pacific water and Subtropical Subsurface water are present only at the mouth of the gulf, whereas during summer, these waters invade all of the gulf south of Angel de la Guarda Island [Alvarez-Borrego and Schwartzlose, 1979].

According to Rodén [1964], wind-driven upwelling occurs on the east coast during winter and on the west coast during summer. Temperature charts show that upwelling is better developed and extends over a greater distance along the east coast of the gulf than off the Baja California coast [Rodén, 1964; Robinson, 1973]. The effect of the summer upwelling off the Baja California coast is not evident in the CZCS imagery. Time series from locations on the western side of the gulf show no effect of the summer upwelling on the CZCS-derived pigment concentration [Santamaría-del-Angel *et al.*, this issue]. Pigment maxima occurred on both sides of the gulf during winter, possibly because of the surface circulation that brings upwelled water from the eastern to the western coast, as described by Badan-Dangon *et al.* [1985]. Using satellite infrared imagery, Badan-Dangon *et al.* found that the plume of upwelled water originates at one point on the eastern coast, moves along in the direction of the wind to the nearest major cape, and then moves offshore. In that way the plume of upwelling crosses the gulf to the opposite coast, where it divides into two branches that extend back across the gulf. Failure of the CZCS imagery to detect the summer upwelling effect on the phytoplankton biomass is due to the presence of the Surface Eastern Tropical Pacific water. This water acts as a warm water cap and inhibits upwelling, very much as El Niño caps upwelling off Peru [Santamaría-del-Angel *et al.*, this issue; Chavez, 1987].

Alvarez-Borrego and Schwartzlose [1979] indicated that during the summer of 1957, an El Niño year, there were stronger incursions of the Surface Eastern Tropical Pacific and Subsurface Subtropical water masses into the Gulf of California than during 1974, a non-El Niño year. Using temperature and salinity data, Torres-Orozco [1993] calculated volumes of the Surface Eastern Tropical Pacific water in the gulf for the period 1939–1986, and although data are scarce and most cruises cover only a fraction of the gulf, seasonal and interannual variability is clear. The minimum volume was estimated to occur winter; the volume increased during spring and summer and reached a maximum in fall. The largest volume was estimated for October 1983, and the

second largest was estimated for March 1983. During October 1983, the summer incursion of Surface Eastern Tropical Pacific water was augmented by the El Niño effect. *Torres-Orozco's* [1993] volume estimate for March 1984 is about one fourth of that estimated for March 1983, and it is lower than the average volume for all data for March in the period analyzed. This suggests an intense non-El Niño condition in the gulf during 1984.

Tidal mixing is very strong in the northern gulf, mainly in the region of the midrift islands (Angel de la Guarda and Tiburón) [Alvarez-Borrego, 1983], and in the upper gulf, where the amplitude of spring tides may be as large as 9 m [Hernández-Ayón et al., 1993]. Stock [1976] computed tidal currents for different points in the gulf and found that the current ellipses for the principal lunar semidiurnal component ( $M_2$ ) have the major axis increasing from the mouth ( $3 \text{ cm s}^{-1}$ ) to the head ( $60 \text{ cm s}^{-1}$ ). Tidal currents in topographically restricted areas, like the island region west of Tiburón Island, exceed  $2 \text{ m s}^{-1}$  [Bray and Robles, 1991]. A regression analysis of satellite-derived surface temperature relative to fortnightly tidal range shows that tidal mixing occurs over the sill in the island region as well as on the shallow northern shelf. Mixing over the sills occurs as a result of large breaking internal waves or internal hydraulic jumps which mix water over the upper 300–500 m [Paden et al., 1991].

Ballenas Channel, between Angel de la Guarda Island and the peninsula, is isolated from the central part of the gulf by a submarine ridge. The sill depth of this ridge is approximately 450 m [Rusnak et al., 1964], so that exchange between the northern and southern parts of the gulf is limited to relatively shallow waters. Maximum depth of Ballenas Channel is more than 1600 m. The water in the basin comes from mixing by strong tidal phenomena between the surface and sill depths. The outstanding hydrographic features of the channel are high temperatures, high salinities, and high oxygen concentrations at great depths. There is no oxygen minimum there [Sverdrup, 1941]. The lowest surface temperatures [Robinson, 1973] and the highest surface nutrient concentrations [Alvarez-Borrego et al., 1978] in the entire gulf are persistently found here.

Very low oxygen concentrations at intermediate depths (300–900 m) are very characteristic of gulf waters [Sverdrup, 1941; Roden, 1964]. Note that because isopleths of  $1 \text{ ml L}^{-1} \text{ O}_2$  and  $2.5 \mu\text{M}$  phosphate are very shallow (nearly 100 m deep in the southern part of the gulf, away from the coasts), upwelling areas in the gulf have some of the highest surface nutrient concentrations of any of the oceans of the world [Alvarez-Borrego et al., 1978].

## Methods

We generated pigment concentration time series for 33 locations in the gulf (Figures 1, 2a, and 2b) from monthly composites (arithmetic averages of valid data) of CZCS imagery covering November 1978 through June 1986. The 33 locations were chosen to represent all hydrographic areas described in the literature and to lie within color structures in the imagery. Pigment concentrations were derived from CZCS radiance data using the atmospheric correction and bio-optical algorithm of Gordon et al. [1983a, b, 1988] (for details of image processing, see Müller-Karger et al. [1991]).

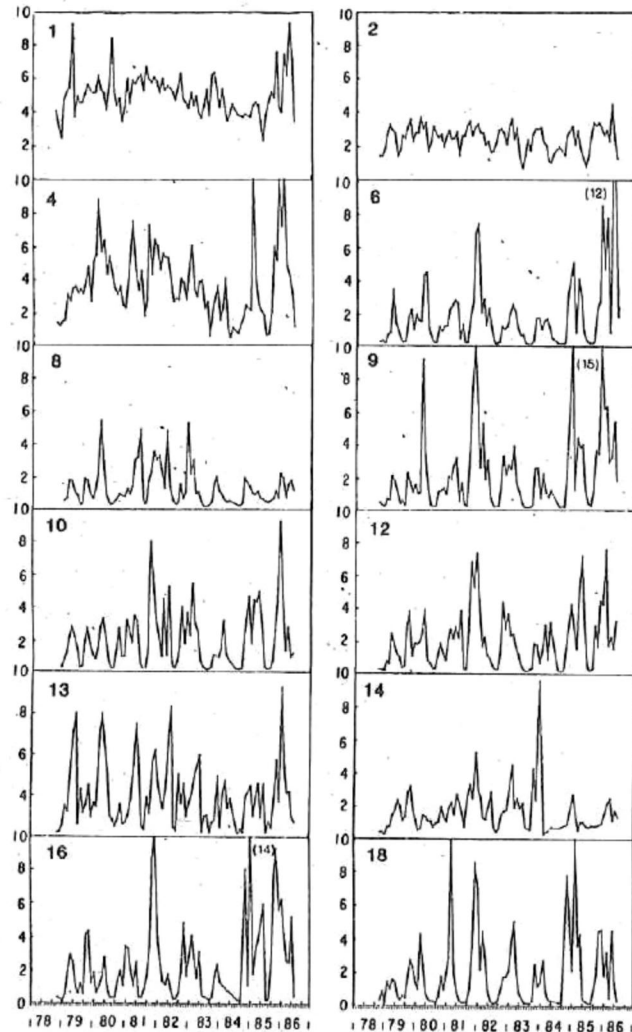


Figure 2a. Examples of pigment concentration time series from monthly composites of the CZCS imagery, for locations 1–18. Pigment concentrations are in milligrams per cubic meter. Location numbers are indicated in the top left corner in each case. Numbers in parentheses are the values for the peaks off scale.

This algorithm lumps all photosynthetic pigments and their degradation products with significant absorption at 443 nm, as if they were chlorophyll. Pixel size was about  $4 \times 4 \text{ km}^2$ . To produce the monthly composites, we used a total of 3493 original scenes: 68 for 1978, 625 for 1979, 766 for 1980, 507 for 1981, 447 for 1982, 378 for 1983, 158 for 1984, 298 for 1985, and 246 for 1986. To generate time series at selected locations, we calculated average pigment concentration within boxes of  $3 \times 3$  pixels centered at the chosen location from each monthly composite.

To detect any El Niño effect on pigment concentrations, we transformed the data into anomalies,  $X_i - \bar{X}_i$ , (Figure 3), where  $X_i$  is the respective monthly concentration,  $\bar{X}_i$  represents the average month for the series, and  $i$  is the location number. For this, we used only data for complete years (from January 1979 through December 1985) (Figures 3a and 3b). Further, we coded the set of anomalies into two blocks by defining periods of non-El Niño and El Niño conditions.

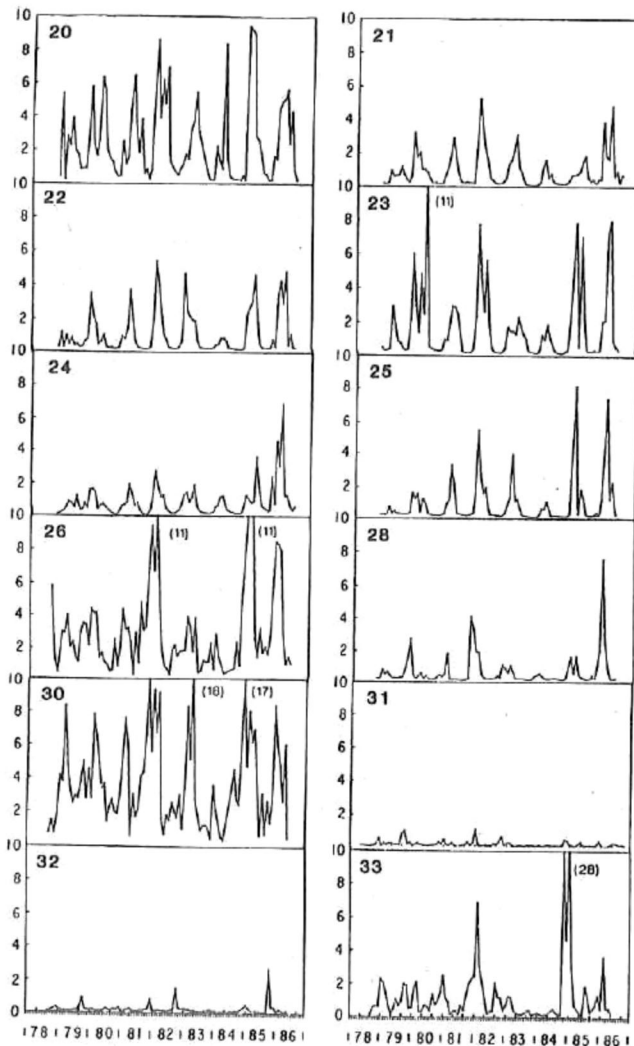


Figure 2b. Same as for Figure 2a, for locations 20–33.

According to Mee *et al.* [1985], the El Niño period was September 1982 to June 1984. For each location we counted the negative anomalies within the El Niño period *A* and those that fell into non-El Niño periods *B*. We then calculated the relative power index (RPI) [Navarro-Fierro, 1988]:

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

where  $r_1$  is the number of months for the El Niño period, and  $r_2$  is the number of months for non-El Niño periods (Table 1). RPI gives us a measure of the association of negative anomalies with the El Niño condition. It may change from negative values to 1.0 positive. Whereas negative values mean that negative anomalies are mostly associated with non-El Niño conditions, zero means that an equal number of negative anomalies are associated with El Niño and non-El Niño conditions, and 1 means that all negative anomalies are associated with El Niño condition. RPI does not take into consideration the magnitude of the anomalies.

## Results and Discussion

Most of the time series show a very clear seasonal variation, with pigment concentration maxima between No-

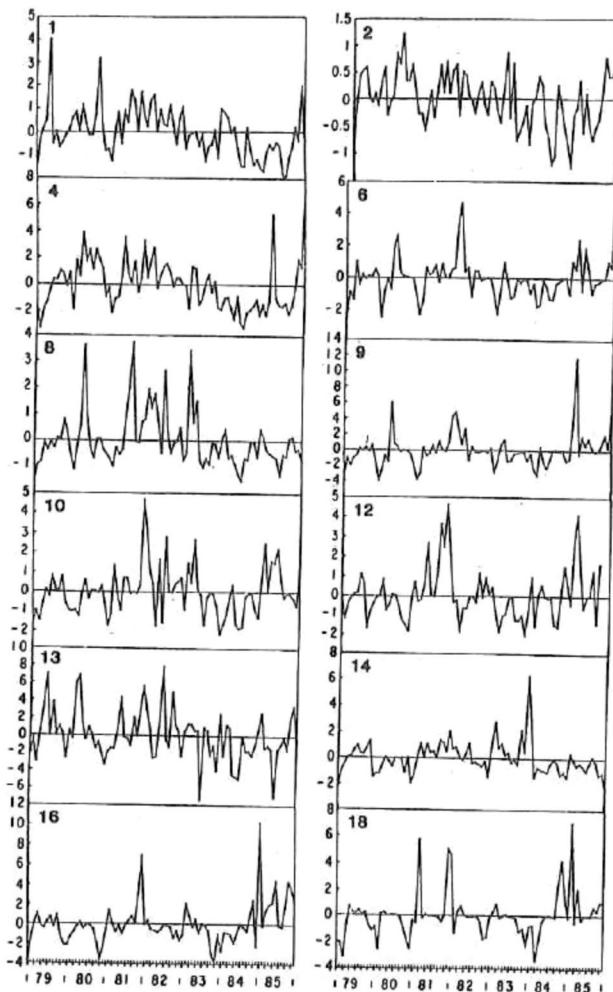


Figure 3a. Examples of pigment concentration anomalies for locations 1–18. Units are milligrams per cubic meter.

vember and May (winter) and minima between June and October (summer) (Figures 2a and 2b). In general, throughout the gulf, the difference between the two seasons was dramatic, with values as high as  $>10 \text{ mg m}^{-3}$  during winter and as low as  $<0.1 \text{ mg m}^{-3}$  during summer. Locations 1, 2, 4, and 14 are exceptions (Figures 2a): because of strong tidal mixing in the upper gulf and the Ballenas Channel, summer minima either do not occur or are not as low there as in other places [Santamaría-del-Angel *et al.*, this issue]. The time series from locations 31 and 32 show that in general, pigment concentrations were very low at the center and the western side of the entrance to the gulf (Figure 2b). Nevertheless, the time series from location 33 shows that pigment values during winter were high at the eastern side of the entrance to the gulf owing to the effect of the upwelling there.

Pigment concentration winter maxima were higher for locations on the eastern side of the gulf than for those on the western side. As was mentioned earlier, upwelled waters from the eastern side are carried to the western coast by eddy circulation, and possibly they lose some of their phytoplankton biomass by grazing and sinking during the transport. With the exception of Ballenas Channel, all time series for locations on the western side of the gulf have very low summer pigment concentrations. During summer, the

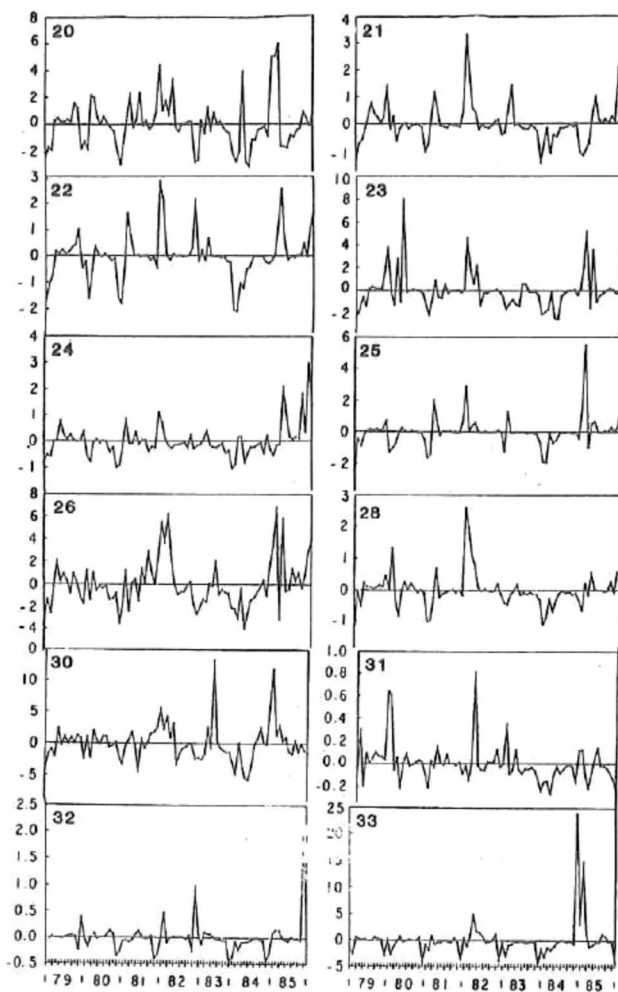


Figure 3b. Same as for Figure 3a, for locations 20–33.

warm, nutrient-poor Surface Eastern Tropical Pacific water invades all of the gulf south of Angel de la Guarda Island [Alvarez-Borrego and Schwartzlose, 1979]. Beginning in June and extending through September, the surface isotherms run along the length of the gulf, with warmer water on the mainland coast and upwelling along the Baja California coast [Roden, 1964; Robinson, 1973] but with a temperature difference of only 1°C from one side of the gulf to the other. South of Tiburón Island, the thermocline is well developed between April and October; stability reaches its maximum strength in August, when the temperature difference between the surface and 150-m depth is about 16°C [Roden, 1964]. This strong stratification inhibits input of nutrients to the euphotic zone.

At some locations, double and triple peaks of pigment concentration are evident during winter (i.e., locations 10, 20, 23, and 30; Figures 2a and 2b). Relatively low values between these peaks may be due to wind intensification events that increase turbulence and cause lower surface pigment values within a general trend of greater fertility during this season.

During the 1983–1984 winter, pigment maxima were 20–30% of those of previous and later years at most of the 33 locations (Figures 2a and 2b). During the 1982–1983 winter,

Table 1. Relative Power Index and Index of Turbulent Kinetic Energy for the Locations Sampled

Location	Index-TKE, $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$	RPI, %
1	441	0.181141
2	1024	0.263027
3	441	0.383701
4	729	0.313978
5	361	0.000000
6	576	0.538710
7	576	0.268145
8	361	0.157258
9	441	0.349462
10	729	0.087558
11	729	0.245968
12	1024	0.112903
13	841	0.000000
14	729	0.024194
15	729	0.383701
16	361	0.270609
17	256	0.290323
18	169	0.383701
19	169	0.349462
20	64	0.264977
21	25	0.310036
22	64	0.269450
23	25	0.290323
24	64	0.290323
25	25	0.450000
26	9	0.421053
27	9	0.327674
28	9	0.467742
29	1	0.421053
30	1	0.467742
31	1	0.369176
32	1	0.195699
33	1	0.391705

TKE, turbulent kinetic energy; RPI, relative power index.

pigment maxima were also relatively low at some few locations. Nevertheless, suppression of the 1982–1983 and 1983–1984 winter pigment concentration maxima was not strong enough to cause a complete collapse of primary productivity. Note that often these suppressed peaks were more than 1 or even 2  $\text{mg m}^{-3}$ . In agreement with Mee *et al.*'s [1985] data, the time series from location 33 at the eastern side of the entrance to the gulf shows an enhanced effect of upwelling on the phytoplankton biomass during the winter of 1981–1982 and a suppression of the pigment concentration during 1982–1983 and 1983–1984, with lowest values during the last period (Figure 2b). However, in the upper gulf and at locations in the northern and central gulf, there was no appreciable difference in pigment maxima between El Niño and non-El Niño years (locations 1, 2, and 20 (Figures 2a and 2b) and locations 3, 5, 11, and 15 (not illustrated). Furthermore, winter pigment maxima were also lower during 1978–1979 than during the winters of 1979–1980, 1980–1981, and 1981–1982. Most locations show negative anomalies for the beginning of 1979 (Figures 3a and 3b), and according to Quinn *et al.* [1987], 1978, 1979, 1980, and 1981 were non-El Niño years.

The time series for location 14 in Ballenas Channel (Figure 2a) presented exceptional behavior, with highest pigment maxima at the end of 1983 and lowest concentrations throughout much of 1984, remaining relatively low for 1985–1986. *Tershy et al.* [1991] reported the greatest numbers of cetaceans and seabirds in Ballenas Channel during 1983, with a decline during 1984 and 1985. These authors suggested that Ballenas Channel may serve as a refugium of high productivity and prey abundance for these highly mobile marine animals during El Niño years. *Santamaría-del-Angel et al.* [this issue] reported that in spite of highest nutrient concentrations, pigment maxima in Ballenas Channel are not the highest of the gulf. The excess turbulence in the channel causes phytoplankton cells to be carried away from the euphotic zone. Ship data show that moderate turbulence causes higher phytoplankton assimilation numbers than either strong turbulence or stratification [*Alvarez-Borrego and Gaxiola-Castro*, 1988]. Reduced mixing at the end of 1983 promoted the increase of phytoplankton biomass in Ballenas Channel. Lowest pigment values during 1984 indicate very high turbulence with more intense non-El Niño conditions. As was mentioned earlier, *Torres-Orozco's* [1993] Surface Eastern Tropical Pacific water volume estimate for March 1984 is lower than the average volume for all data for March in the period analyzed. *Hidalgo-González* [1993] analyzed the data for cruises in the winter months of 1974, 1981, and 1984 and found for Ballenas Channel the highest surface nutrient and total inorganic CO<sub>2</sub> concentrations, which are indicative of highest turbulence in the channel, in March–April 1984.

With the exception of that for Ballenas Channel, the CZCS time series do not show an enhancement of phytoplankton biomass during 1983 with respect to previous years, as was suggested by *Lara-Lara et al.* [1984]. *Alvarez-Borrego and Lara-Lara* [1991] put forward two possible explanations for *Zeitzschel's* [1969] values, which were lower than those of *Lara-Lara et al.* [1984]: the data from *Zeitzschel's* [1969] *Fresnel* cruise, the only cruise covering the northern and inner regions of the gulf, were taken in November–December 1968 before the upwelling season, and productivity data were obtained using half-day incubations, whereas *Lara-Lara et al.* [1984] and *Gaxiola-Castro and Alvarez-Borrego* [1986] performed 2-hour incubations. Generally, short-term incubations yield greater production rates than long-term incubations (often at least double) [*Carpenter and Lively*, 1980].

If the interannual variability of phytoplankton biomass is controlled mostly by El Niño and non-El Niño sequences, we would expect high negative pigment anomalies for the El Niño years and relatively small anomalies of either sign for non-El Niño years. However, this does not seem to be the case in our time series (Figures 3a and 3b). Contrary to the cases reported in the literature for sea surface temperature and sea level anomalies, the pigment concentration anomalies do not show clear patterns. We have negative and positive pigment anomalies for most of the sampled years at most locations. However, there are primarily positive anomalies for 1981 and the winter of 1981–1982 for most locations, and except for the locations in the upper gulf and the Ballenas Channel, most of the time series show negative pigment anomalies for much of 1983 and 1984.

Possibly, there are no clear patterns of pigment anomalies because our time series is too short, or it may be that the

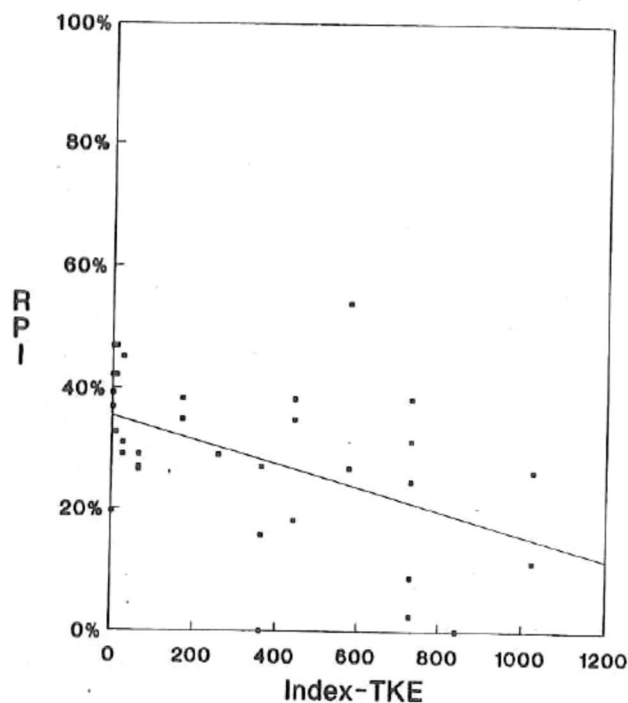


Figure 4. Relative power index (RPI) versus index-turbulent kinetic energy (TKE), in square meters per second squared.

sequence of El Niño and non-El Niño events does not dominate the interannual variability of surface concentration of photosynthetic pigments in the gulf. Another source of surface pigment variability may be the interannual variations in the meteorology of the gulf, that is, variations in wind speed and thus strength of upwelling and air-sea heat flux, which in turn affect water stratification and turbulence.

In order to explore the possibility that the effect of the sequence of El Niño and non-El Niño phenomena on the phytoplankton biomass was masked by the turbulent kinetic energy (TKE) inside the Gulf of California, we interpolated *Stock's* [1976] tidal currents  $v$  for the lunar semidiurnal component  $M_2$  for our locations and compared  $v^2$  with the RPI as defined earlier. We used  $v^2$  as an index of TKE (index-TKE) and ran a linear regression of RPI versus index-TKE (Figure 4). These  $M_2$  tidal currents are the maximum values for spring tides and have a fortnightly period. Tidal currents are a gross index of TKE, and at best they are only one of the main factors that create turbulence; the interaction between currents and bathymetry is very important, and winds and upwelling are other important factors. Nevertheless, strong tidal currents in the region of the midriff islands and northern gulf are one of the main characteristics that differentiate the gulf from other coastal ecosystems of the eastern Pacific.

The slope of the regression of RPI versus index-TKE is negative, and it is significant at the 95% confidence level. The correlation coefficient ( $r$ ) is 0.50. With low index-TKE, as at or near the entrance to the gulf, the El Niño event had a greater contribution to the creation of negative pigment anomalies, and high values of RPI were produced (up to 50%; Table 1). With high index-TKE, as in Ballenas Channel and the upper gulf, the El Niño event contributed less to the

creation of negative anomalies, and low values of RPI were produced (as low as 5%; Table 1).

### Concluding Remarks

With the scarce chlorophyll data obtained by water sampling, there was a controversy over the effect of El Niño in the gulf. Data from the CZCS show that during 1978–1986, the sequence of El Niño and non-El Niño events did not affect the surface phytoplankton biomass in all regions of the Gulf of California in the same manner. In some areas of the gulf, mainly the midrift islands and the upper gulf, local physical phenomena causing strong turbulence, such as the combined effect of bathymetry, tidal mixing, and atmospheric forcing, masked the effect of the 1982–1984 El Niño that showed so clearly in other coastal ecosystems of the eastern Pacific.

The El Niño caused lower pigment concentrations at and near the entrance to the gulf, where vertical mixing is not strong. Locations in the central and northern gulf showed either a weak effect of El Niño or no effect at all. Ballenas Channel showed exceptional behavior, with an increase of pigment concentrations during 1983 and a decrease in 1984. Moderate turbulence promoted phytoplankton growth more than strong turbulence in this channel.

In the winter of 1978–1979 (non-El Niño years), pigment concentrations were low relative to those of subsequent years. Most locations show negative pigment anomalies for the beginning of 1979. This indicates the effect of other factors causing interannual variability of surface pigment concentrations. An example of these factors may be the interannual variations in the meteorology of the gulf, that is, variations in wind speed and thus strength of upwelling and air-sea heat flux, which in turn affect water stratification and turbulence.

The Gulf of California CZCS imagery has proven to be adequate to generate time series to describe interannual variability. It documented the effects of the strong 1982–1984 El Niño in a very complete fashion. In spite of possible errors, the CZCS time series are very consistent; their seasonal cycles and the spatial variation behave very much as expected according to physical phenomena such as the movement of water masses and the occurrence of upwelling events. With improved technology, the sea-viewing wide-field sensor (SeaWiFS), a new color sensor to be launched by NASA during the first half of 1994, will provide better opportunities to describe photosynthetic pigment interannual variability caused by phenomena such as El Niño.

**Acknowledgments.** We thank two anonymous reviewers for their constructive criticism. Their suggestions helped improve the manuscript significantly. We thank Christine Harris for her help with the language.

### References

- Alvarez-Borrego, S., Gulf of California, in *Estuaries and Enclosed Seas*, edited by B. H. Ketchum, chap. 17, pp. 427–449, Elsevier Science, New York, 1983.
- Alvarez-Borrego, S., and G. Gaxiola-Castro, Photosynthetic parameters of northern Gulf of California phytoplankton, *Cont. Shelf Res.*, **8**, 37–47, 1988.
- Alvarez-Borrego, S., and J. R. Lara-Lara, The physical environment and primary productivity of the Gulf of California, in *The Gulf and Peninsular Province of the California*, edited by B. R. T. Simoneit and J. P. Dauphin, *AAPG Mem.*, **47**, 555–567, 1991.
- Alvarez-Borrego, S., and R. A. Schwartzlose, Masas de agua del Golfo de California, *Cienc. Mar.*, **6**, 43–63, 1979.
- Alvarez-Borrego, S., J. A. Rivera, G. Gaxiola-Castro, M. J. Acosta-Ruiz, and R. A. Schwartzlose, Nutrientes en el Golfo de California, *Cienc. Mar.*, **5**, 53–71, 1978.
- Badan-Dagon, A., D. J. Koblinksky, and T. Baumgartner, Spring and summer in the Gulf of California: Observation of surface thermal patterns, *Oceanol. Acta*, **8**, 13–22, 1985.
- Barber, R. T., and F. P. Chavez, Biological consequences of El Niño, *Science*, **222**, 1203–1210, 1983.
- Baumgartner, T. R., V. Ferreira-Bartrina, H. Schrader, and A. Soutar, A 20-years varve of siliceous phytoplankton variability in the central Gulf of California, *Mar. Geol.*, **64**, 113–129, 1985.
- Bray, N. A., and J. M. Robles, Physical oceanography of the Gulf of California, in *The Gulf and Peninsular Province of the California*, edited by B. R. T. Simoneit and J. P. Dauphin, *AAPG Mem.*, **47**, 511–553, 1991.
- Cane, M. A., Oceanographic events during El Niño, *Science*, **222**, 1189–1195, 1983.
- Carpenter, E. J., and J. S. Lively, Review of estimates of algae growth using <sup>14</sup>C tracer techniques, in *Primary Productivity in the Sea*, edited by P. G. Falkowski, pp. 161–178, Plenum, New York, 1980.
- Chavez, F., El Niño y la Oscilación del Sur: *Invest. cienc.*, **128**, 46–55, 1987.
- Gaxiola-Castro, G., and S. Alvarez-Borrego, Primary productivity of the Mexican Pacific, *Cienc. Mar.*, **12**, 26–33, 1986.
- Gordon, H. R., D. K. Clark, J. W. Brown, O. B. Brown, R. H. Evans, and W. W. Broenkow, Phytoplankton pigment concentrations in the Middle Atlantic Bight: Comparison of ship determinations and CZCS estimates, *Appl. Opt.*, **22**, 20–35, 1983a.
- Gordon, H. R., J. W. Brown, O. B. Brown, R. H. Evans, and D. K. Clark, Nimbus 7 CZCS: Reduction of its radiometric sensitivity with time, *Appl. Opt.*, **22**, 3929–3931, 1983b.
- Gordon, H. R., O. B. Brown, R. H. Evans, J. W. Brown, R. C. Smith, K. S. Baker, and D. K. Clark, A semianalytic radiance model of ocean color, *J. Geophys. Res.*, **93**, 10,909–10,924, 1988.
- Griffiths, R. C., Physical, chemical and biological oceanography of the entrance to the Gulf of California, spring of 1960, *Spec. Sci. Rep. Fish 543*, 47 pp., U.S. Fish and Wildlife Serv., La Jolla, Calif., 1968.
- Harris, M. F., Effects of tropical cyclones upon southern California, M.S. thesis, 89 pp., San Fernando Val. State Coll., San Fernando, Calif., 1969.
- Hernández-Ayón, J. M., M. S. Galindo-Bect, B. P. Flores-Báez, and S. Alvarez-Borrego, Nutrient concentrations are high in the Colorado River delta, *Estuarine Coastal Shelf Sci.*, in press, 1993.
- Hidalgo-González, R., Presión parcial del bióxido de carbono en el Golfo de California, M.S. thesis, Cent. de Invest. Cient. y Educ. Super. de Ensenada, Ensenada, Baja California, México.
- Lara-Lara, J. R., J. E. Valdez-Holguín, and L. C. Jimenez-Pérez, Plankton studies in the Gulf of California during the 1982–1983 El Niño, *Trop. Ocean Atmos. Newsl.* **28**, pp. 16–17, Univ. of Miami, Miami, Fla., 1984.
- McGowan, J. A., El Niño and biological production in the California Current, *Trop. Ocean Atmos. Newsl.* **21**, p. 23, Univ. of Miami, Miami, Fla., 1983.
- Mee, L. D., A. Ramírez-Flores, F. Flores-Verdugo, and F. González-Farías, Coastal upwelling and fertility of the southern Gulf of California: Impact of the 1982–1983 ENSO event, *Trop. Ocean Atmos. Newsl.* **31**, pp. 9–10, Univ. of Miami, Miami, Fla., 1985.
- Müller-Karger, F. E., J. J. Walsh, R. H. Evans, and M. B. Meyers, On the seasonal phytoplankton concentration and sea surface temperature cycles of the Gulf of Mexico as determined by satellite, *J. Geophys. Res.*, **96**(C7), 12,645–12,665, 1991.
- Navarro-Fierro, R., *Introducción a la Bioestadística, Análisis de Variables Binarias*, 170 pp., McGraw-Hill, New York, 1988.
- Paden, C. A., M. R. Abbott, and C. D. Winant, Tidal and atmospheric forcing of the upper ocean in the Gulf of California, I, Sea surface temperature variability, *J. Geophys. Res.*, **96**(C10), 18,337–18,359, 1991.
- Quinn, W. H., D. O. Zopf, K. S. Short, and R. T. W. Kuo-Yang, Historical trends and statistics of the Southern Oscillation, El Niño and Indonesian droughts, *Fish. Bull.*, **76**, 663–678, 1978.

- Quinn, W. H., V. T. Neal, and S. E. Antúnez-de-Mayolo, El Niño occurrences over the past four and a half centuries, *J. Geophys. Res.*, 92(C13), 14,449–14,461, 1987.
- Rasmusson, E. M., El Niño: The ocean-atmosphere connection, *Oceanus*, 27, 5–12, 1984.
- Robinson, M. K., Atlas of monthly mean sea surface and subsurface temperatures in the Gulf of California, Mexico, *San Diego Soc. Nat. Hist. Mem.*, 5, 97 pp., 1973.
- Robles-Pacheco, J. M., and N. Christensen, Effects of the 1982–83 El Niño on the Gulf of California, *Eos Trans. AGU*, 64, 103, 1983.
- Roden, G. I., Oceanographic aspects of the Gulf of California, in Marine Geology of the Gulf of California: A Symposium, edited by T. H. Van Andel and G. G. Shor, Jr., *Mem. Am. Assoc. Pet. Geol.*, 3, 30–58, 1964.
- Rusnak, G. A., R. L. Fisher, and F. P. Shepard, Bathymetry and faults of the Gulf of California, in Marine Geology of the Gulf of California: A Symposium, edited by T. H. van Andel and G. G. Shor, Jr., *Mem. Am. Assoc. Pet. Geol.*, 3, 59–75, 1964.
- Santamaría-del-Angel, E., S. Alvarez-Borrego, and F. E. Müller-Karger, Gulf of California biogeographic regions based on coastal zone color scanner imagery, *J. Geophys. Res.*, this issue.
- Shepard, F. P., Submarine topography of the Gulf of California, *Mem. Geol. Soc. Am.*, 43, 32 pp., 1950.
- Stock, G. G., Modeling of tides and tidal dissipation in the Gulf of California, Ph.D. thesis, 102 pp., Scripps Inst. of Oceanogr., Univ. of Calif., San Diego, La Jolla, 1976.
- Sverdrup, H. Y., The Gulf of California: Preliminary discussion on the cruise of the *E. W. Scripps* in February and March 1939, *Sixth Pac. Sci. Congr. Proc.*, 3, 161–166, 1941.
- Tershy, B. R., D. Breese, and S. Alvarez-Borrego, Increase in cetacean and seabird numbers in the Canal de Ballenas during an El Niño-Southern Oscillation event, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 69, 299–302, 1991.
- Torres-Orozco, E., Análisis volumétrico de las masas de agua del Golfo de California, M.S. thesis, 80 pp., Cent. de Invest. Cient. y Educ. Super. de Ensenada, Ensenada, Baja California, Mexico, 1993.
- Van Andel, T. H., Recent marine sediments of the Gulf of California, in Marine Geology of the Gulf of California: A Symposium, edited by T. H. Van Andel and G. G. Shor, Jr., *Mem. Am. Assoc. Pet. Geol.*, 3, 216–310, 1964.
- Wooster, W. S., El Niño, in Symposium on the Changing Pacific Ocean in 1957 and 1958, II, section I, The physical evidence, *CalCOFI Rep.* 7, 43–46, Calif. Coop. Oceanic Fish. Invest., La Jolla, 1960.
- Zeitzschel, B., Primary productivity in the Gulf of California, *Mar. Biol.*, 3, 201–207, 1969.
- S. Alvarez-Borrego, División de Oceanología, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Ensenada, Baja California, Mexico.
- F. E. Müller-Karger, Department of Marine Science, University of South Florida, 140 Seventh Avenue South, St. Petersburg, FL 33701.
- E. Santamaría-del-Angel, Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, P. O. Box 453, Ensenada, Baja California, Mexico.

(Received February 8, 1993; revised May 28, 1993; accepted August 4, 1993.)