

**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL**  
**COORDINACION GENERAL DE POSGRADO E INVESTIGACION**  
*ACTA DE REVISION DE TESIS*

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., siendo las 10:00 horas del día 15 del mes de Marzo del 2004 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CICIMAR para examinar la tesis de grado titulada:

**"EFECTOS DE LOS EVENTOS *EL NIÑO* Y *LA NIÑA* (1997-1999) SOBRE LA DISTRIBUCIÓN Y ABUNDANCIA DEL ATÚN ALETA AMARILLA (*Thunnus albacares*, Bonnaterre, 1788) EN EL OCÉANO PACÍFICO ORIENTAL"**

Presentada por el alumno:

**LÓPEZ**

Apellido paterno

**SÁNCHEZ**

materno

**JOSÉ LUIS**

nombre(s)

Con registro: 

B	0	0	1	1	6	1
---	---	---	---	---	---	---

Aspirante al grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

**LA COMISION REVISORA**

Director de tesis  
PRIMER VOCAL

  
DRA. SOFÍA ORTEGA GARCÍA

PRESIDENTE

  
DR. DANIEL LLUCH BELDA

SECRETARIO

  
MC. CUAHTÉMOC TURRENT THOMSON

SEGUNDO VOCAL

  
DR. FELIPE GALVÁN MAGAÑA

TERCER VOCAL

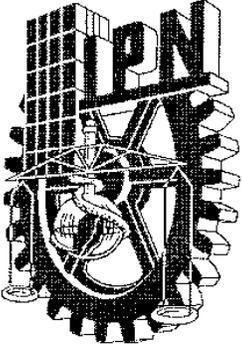
  
DR. SALVADOR LLUCH COTA

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

  
DR. FRANCISCO ARREGUÍN SÁNCHEZ



**I. P. N.**  
**CICIMAR**  
**DIRECCION**



**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL  
COORDINACION GENERAL DE POSGRADO E INVESTIGACION**

**CARTA CESIÓN DE DERECHOS**

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., el día 15 del mes Marzo del año 2004, el (la) que suscribe JOSÉ LUIS LÓPEZ SÁNCHEZ alumno(a) del Programa de MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS con número de registro B001161 adscrito al CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de tesis, bajo la dirección de: DRA. SOFÍA ORTEGA GARCÍA y cede los derechos del trabajo titulado: **“EFECTOS DE LOS EVENTOS *EL NIÑO* Y *LA NIÑA* (1997-1999) SOBRE LA DISTRIBUCIÓN Y ABUNDANCIA DEL ATÚN ALETA AMARILLA (*Thunnus albacares*, Bonnaterre, 1788) EN EL OCEÁNO PACÍFICO ORIENTAL”** al Instituto Politécnico Nacional, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: jluislopezs@yahoo.com

Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

  
**JOSÉ LUIS LÓPEZ SÁNCHEZ**  
nombre y firma

# **INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

## **CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS**

**Efectos de los eventos *El Niño* y *La Niña* (1997-1999) sobre la distribución y abundancia del atún aleta amarilla (*Thunnus albacares*, Bonnaterre, 1788) en el Océano Pacífico Oriental**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE**

**Maestro en Ciencias  
con especialidad en manejo de recursos marinos**

**PRESENTA**

**Biól. José Luis López Sánchez**

**La Paz, BCS, México.**

# DEDICATORIA

De manera muy especial y con todo mi cariño este trabajo esta dedicado a la memoria de mis padres

**Luis y Carmelita,**

por su entrega en la formación de una maravillosa familia, por todo el amor y apoyo que siempre me brindaron y me siguen brindando.

A mis hermanas Dulce y Sonia porque han sido un ejemplo de esfuerzo y de trabajo en mi vida. Por su incondicional apoyo moral y económico durante el desarrollo de este proyecto, sin el cual no habría sido posible concluirlo, sobre todo en sus últimas etapas. A mi hermana Lorena porque compartimos las alegrías y las tristezas que la biología nos ha dado y porque nunca claudicas eres un ejemplo de lucha a seguir.

## **AGRADECIMIENTOS:**

A la Dra. Sofía Ortega García por aceptar ser mi directora de tesis, por su acertada y muy valiosa asesoría, su gran solidaridad, compromiso y por todo el apoyo brindado a lo largo del desarrollo de este trabajo. Mil gracias.

A todos los investigadores que aceptaron ser parte de mi comisión revisora, muchas gracias: Al Dr. Daniel Lluch Belda por su valioso apoyo a lo largo de la maestría permitiéndome colaborar en sus proyectos PIFI, por lo que me dejaron sus interesantes cátedras, así como por las valiosas sugerencias y aportaciones que mejoraron mucho el trabajo. Al Dr. Felipe Galván Magaña por las correcciones y comentarios al trabajo y por haberme permitido compartir momentos muy agradables con su inmenso grupo de trabajo. Al Dr. Salvador E. Lluch Cota por sus invaluable aportaciones que ayudaron mucho al mejoramiento del trabajo y al M. en C. Cuauhtemoc Turrent Thomson por la exhaustiva y profunda revisión que le hiciste al trabajo, tus aportaciones fueron muy valiosas, enriquecieron y mejoraron mucho este trabajo. A todos muchas gracias.

Al IPN, institución generosa a la que le debo mucho y no solo parte de mi formación.

No habría sido posible la realización de este trabajo sin el valioso apoyo económico del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y del Programa Institucional de Formación de Investigadores (PIFI).

A todos mis profesores del CICIMAR un especial agradecimiento por ser parte importante de mi formación. A Humberto e Irene por todas sus atenciones, así como por su gran eficiencia. A Juan Pedro por tu valiosa ayuda con todo lo relacionado con el uso de las computadoras Al personal del centro de computo y de la biblioteca por haberme prestado su apoyo constante. A los chóferes, porque siempre fuimos y venimos con bien.

Al apoyo incondicional de mis hermanas: Dulce, Sonia y Lorena. Mil gracias por apechugar a la hora de los trancazos. A mis amigos de toda la vida Carlos Aranda, Adriana Miramontes, a Laura Sanvicente, Edith Zarate, Vicky Lora y Paty Hernandez, por todo el gran apoyo brindado, por las cosas buenas que hemos compartido juntos y porque quieran o no son parte de mi vida.

A mis amigos (y terapeutas) del CICIMAR: Concho, Vera y Temoc, por todos esos momentos de alegría que compartimos estos últimos años y porque a pesar de todo estuvieron en las buenas y en las malas.

Chiquita, muchas gracias por todo tu cariño y todo tu apoyo. Gracias por no dejarme morir solo, por tu compañía constante y por tratar de comprenderme.

ÍNDICE:.....	i
LISTA DE FIGURAS:.....	iii
LISTA DE TABLAS .....	vii
RESUMEN:.....	viii
ABSTRACT:.....	ix
GLOSARIO:.....	x
I. INTRODUCCIÓN:.....	1
a) El evento El Niño-Oscilación del Sur (ENOS).....	5
b) La Niña, el evento frío.....	10
II. ANTECEDENTES:.....	13
III. ÁREA DE ESTUDIO: .....	18
IV. OBJETIVO:.....	21
Objetivos específicos: .....	21
V. MATERIALES Y MÉTODOS .....	22
a) Información del recurso .....	22
b) Base de datos de la temperatura superficial del mar (TSM).....	23
c) Análisis de la información .....	24
c.1) Categorización de las embarcaciones .....	24
c.2) Estandarización del esfuerzo pesquero y cálculo de la captura por unidad de esfuerzo por áreas de 1°.....	24
c.3) Temperatura superficial del mar, asociada a la captura de atún .....	26
c.4) Mapas de distribución del esfuerzo de pesca y de la abundancia relativa.....	29
c.5) Árboles de Regresión (AR) .....	29
VI. RESULTADOS: .....	31

a) Características y actividad pesquera de las embarcaciones de la flota atunera mexicana de cerco .....	31
b) Estandarización del esfuerzo y determinación de categorías.....	32
c) Esfuerzo pesquero.....	34
c.1) Captura por unidad de esfuerzo.....	36
d) Análisis de la CPUEe y su relación con la TSM (temperatura asociada).....	40
d. 1) Distribución espacio-temporal del esfuerzo pesquero y su relación con las anomalías de la TSM inferidas a través de imágenes de satélite .....	55
d. 2) Distribución espacio-temporal de la abundancia relativa y centros de agregación determinados a través de Árboles de Regresión.....	60
Primer Trimestre (Invierno): .....	62
Segundo trimestre (Primavera): .....	62
Tercer Trimestre (Verano):.....	62
Cuarto trimestre (Otoño). .....	63
VII. DISCUSIÓN: .....	68
a) Variación estacional de la distribución y la abundancia relativa del atún aleta amarilla en condiciones normales, durante El Niño y durante La Niña en el Océano Pacífico Oriental Tropical .....	68
a.1) Variación trimestral .....	69
a.1.1) Primer trimestre .....	69
a.1. 2) Segundo trimestre.....	71
a.1. 3) Tercer trimestre.....	73
a.1. 4) Cuarto trimestre .....	75
VIII. CONCLUSIONES:.....	79
IX. BIBLIOGRAFIA: .....	81

## LISTA DE FIGURAS:

Figura 1. Celda de Walker, profundidad de la termoclina, ubicación de la Alberca Cálida y zona de precipitaciones en condiciones normales, El Niño y La Niña. Imagen tomada de la pagina de Internet <a href="http://www.pmel.noaa.gov/tao/el_nino">http://www.pmel.noaa.gov/tao/el_nino</a> . ....	7
Figura 2. Eventos El Niño de acuerdo al Índice Multivariado de El Niño (MEI), el cuál es un valor ponderado promedio que considera las principales características del ENSO (nivel del mar, componentes este-oste y norte-sur del viento superficial, temperatura superficial, temperatura del aire y nubosidad) (Imagen tomada de la pagina de Internet <a href="http://www.cdc.noaa.gov/-kew/MEI/mei.html">www.cdc.noaa.gov/-kew/MEI/mei.html</a> ). ....	10
Figura 3. Eventos La Niña caracterizados a través del Índice Multivariado de El Niño (MEI), el cual es un valor ponderado promedio que considera las principales características del ENSO (nivel del mar, componentes este-oeste y norte-sur del viento superficial, temperatura superficial, temperatura del aire y nubosidad) (Imagen tomada de la pagina de Internet <a href="http://www.cdc.noaa.gov/-kew/MEI/mei.html">www.cdc.noaa.gov/-kew/MEI/mei.html</a> ). ....	11
Figura 4. Principales áreas monitoreadas con el propósito de pronosticar la presencia de un evento de calentamiento o enfriamiento de las aguas. ....	12
Figura 5. Esquema de los sistemas de corrientes en el Océano Pacífico Oriental. ....	19
Figura 6. Composición de la flota atunera mexicana de acuerdo a su capacidad de acarreo durante 1996 – 1999. En el extremo derecho están las embarcaciones de la categoría 2 o estándar (>1000 toneladas de capacidad de acarreo). ....	31
Figura 7. CPUE de las diferentes embarcaciones de la flota atunera mexicana entre 1996 y 1999. Los óvalos encierran a los dos grupos de embarcaciones cuyo promedio de captura es más parecido entre si. ....	32
Figura 8. Número total de embarcaciones de la flota atunera mexicana que participaron durante 1996 –1999 agrupados por año y categoría. ....	33
Figura 9. Capturas anuales de la flota atunera mexicana, por categoría de embarcación, para el periodo de 1996 a 1999. ....	34
Figura 10. Esfuerzo estandarizado anual por categoría de embarcación. ....	35
Figura 11. Esfuerzo estandarizado mensual realizado por la flota atunera mexicana durante 1996 – 1999. ....	36

Figura 12. CPUEe promedio anual de la flota atunera mexicana que operó entre 1996 y 1999. ....	37
Figura 13. Captura por unidad de esfuerzo estandarizado promedio trimestral (estacional) para el periodo 1996 – 1999. ....	38
Figura 14. Captura por unidad de esfuerzo estandarizada promedio trimestral para el periodo de 1996 y 1999. ....	39
Figura 15. Comportamiento de la CPUE estandarizada mensual entre 1996 y 1999 en relación a su promedio. ....	39
Figura 16. Anomalía de la TSM del OPO (70° - 140° W; -20° S – 30° N) calculada a partir de la base de Reynolds. ....	40
Figura 17. Anomalía de la CPUEe mensual acoplada con la anomalía de la TSM de El Niño 3 (entre los 5°N y 5° S de los 95° a los 140° W) de la base Reynolds .....	41
Figura 18. Frecuencia relativa de la TSM y de la temperatura asociada a los lances de pesca en el Océano Pacífico Oriental para el primer trimestre de 1996 – 1999. ....	43
Figura 19 A-D. Imágenes de la temperatura superficial del mar asociada a los lances de atún aleta amarilla durante el primer trimestre de 1996-1999 .....	44
Figura 20. A) Análisis de varianza (ANDEVA) de la TSM del POT durante el primer trimestre de 1996 a 1999. B) ANDEVA de la TSM de los lances de pesca realizados por la flota atunera mexicana durante el primer trimestre de 1996 a 1999 .....	45
Figura 21. Frecuencia relativa de la TSM y de la temperatura asociada a los lances de pesca en el Océano Pacífico Oriental para el segundo trimestre de 1996 – 1999. ....	46
Figura 22 A-D. Imágenes de la temperatura superficial del mar asociada a los lances de atún aleta amarilla durante el segundo trimestre de 1996-1999. ....	47
Figura 23. A) Análisis de varianza (ANDEVA) de la TSM del POT durante el segundo trimestre de 1996 a 1999. B) ANDEVA de la TSM de los lances de pesca realizados por la flota atunera mexicana durante el segundo trimestre de 1996 a 1999 .....	48
Figura 24. Frecuencia relativa de la TSM y de la temperatura asociada a los lances de pesca en el Océano Pacífico Oriental para el tercer trimestre de 1996 – 1999. ....	49

Figura 25 A-D. Imágenes de la temperatura superficial del mar asociada a los lances de atún aleta amarilla durante el tercer trimestre de 1996-1999.....	50
Figura 26. A) Análisis de varianza (ANDEVA) de la TSM del POT durante el tercer trimestre de 1996 a 1999. B) ANDEVA de la TSM de los lances de pesca realizados por la flota atunera mexicana durante el tercer trimestre de 1996 a 1999.....	51
Figura 27. Frecuencia relativa de la TSM y de la temperatura asociada a los lances de pesca en el Océano Pacífico Oriental para el cuarto trimestre de 1996 – 1999.....	52
Figura 28 A-D. Imágenes de la temperatura superficial del mar asociada a los lances de atún aleta amarilla durante el cuarto trimestre de 1996-1999. ....	53
Figura 29. A) Análisis de varianza (ANDEVA) de la TSM del POT durante el cuarto trimestre de 1996 a 1999. B) ANDEVA de la TSM de los lances de pesca realizados por la flota atunera mexicana durante el cuarto trimestre de 1996 a 1999.....	54
Figura 30A. Mapas de distribución mensual del esfuerzo de captura de atún aleta amarilla realizado por la flota atunera mexicana durante 1996 (cruces blancas) a los que se les superpuso imágenes de satélite de las anomalías de la TSM del respectivo mes. ....	56
Figura 30B. Mapas de distribución mensual del esfuerzo de captura de atún aleta amarilla realizado por la flota atunera mexicana durante 1997 (cruces blancas) a los que se les superpuso imágenes de satélite de las anomalías de la TSM del respectivo mes. ....	57
Figura 30C. Mapas de distribución mensual del esfuerzo de captura de atún aleta amarilla realizado por la flota atunera mexicana durante 1998 (cruces blancas) a los que se les superpuso imágenes de satélite de las anomalías de la TSM del respectivo mes. ....	58
Figura 30D. Mapas de distribución mensual del esfuerzo de captura de atún aleta amarilla realizado por la flota atunera mexicana durante 1999 (cruces blancas) a los que se les superpuso imágenes de satélite de las anomalías de la TSM del respectivo mes. ....	59

Figura 31: Esquema de un árbol de regresión tal como lo construye la función TREE del S-plus. Este árbol corresponde al primer trimestre de 1996 .....	60
Figura 32. Mapa con todas las divisiones que su Árbol de Regresión señala para 1996 / 1 (invierno) .....	61
Figura 33A-D. Centros de agregación (encerrados en óvalos) propuestos por los Árboles de Regresión (AR) para el primer trimestre.....	64
Figura 34A-D. Centros de agregación (encerrados en óvalos) propuestos por los Árboles de Regresión (AR) para el segundo trimestre.....	65
Figura 35A-D. Centros de agregación (encerrados en óvalos) propuestos por los Árboles de Regresión (AR) para el tercer trimestre. ....	66
Figura 36A-D. Centros de agregación (encerrados en óvalos) propuestos por los Árboles de Regresión (AR) para el primer trimestre.....	67

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Número de embarcaciones, viajes y días efectivos de pesca por categoría de embarcación durante 1996-1999. ....	33
Tabla 2. Captura total, esfuerzo (nominal y estandarizado), CPUE (nominal y estandarizada). ....	35
Tabla 3. Muestra los valores de la CPUEe mensual agrupada por semestres así como el promedio y la desviación estándar de cada semestre .....	37

## RESUMEN:

Se analizó la distribución y abundancia del atún aleta amarilla (*Thunnus albacares*) con relación a los cambios en las condiciones oceanográficas del OPO debidas al fenómeno de calentamiento El Niño 1997-1998 y a su posterior enfriamiento o La Niña 1998-1999. La información pesquera utilizada de los volúmenes de captura obtenidos y la posición exacta de los lances proviene de las bitácoras de pesca de la flota atunera mexicana que operó entre 1996 y 1999. La información de temperatura superficial del mar corresponde a la Serie de Reynolds así como a imágenes de satélite del sensor *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) que representan anomalías de temperatura superficial del mar. La unidad de esfuerzo utilizada en éste estudio fue el lance de pesca, definiendo la captura por unidad de esfuerzo (CPUE) como captura por lance.

Con el objetivo de determinar la variación espacio-temporal de la CPUE, esta fue representada gráficamente mediante la elaboración de mapas. La técnica estadística de árboles de regresión fue utilizada para determinar los cambios espacio-temporales de la CPUE. A través del análisis de la CPUE nominal de las embarcaciones, se definieron dos categorías ( $<$  de 1000 t y  $\geq$  a 1000 t). Considerando a las embarcaciones  $\geq$  de 1000 t de capacidad de acarreo como unidad estándar, se estimó el poder relativo de pesca, el esfuerzo estandarizado y la CPUE estandarizada

La flota atunera en operación fue de 52 embarcaciones, siendo las unidades dominantes las de 1090 toneladas de capacidad de acarreo (43%). La captura total en el periodo fue de 309 113 toneladas en 23 908 lances (12.92 toneladas por lance).

Se encontró una marcada preferencia del atún a temperaturas entre 27° y 28° C; sin embargo, la disminución del alimento de las aguas ocasionado por El Niño, obligó a que una fracción de la población se desplazara a zonas donde la TSM fue menor (23 a 26° C). Lo anterior se observó particularmente durante el primer semestre de 1998.

La técnica estadística de árboles de regresión permitió localizar los principales centros de agregación del atún, encontrándose movimientos estacionales del recurso, los cuales se ven afectados por el evento de El Niño pero no de manera significativa con la presencia de La Niña. Durante El Niño se observó un desplazamiento del recurso hacia el noroeste por lo que ésta área presentó mayores capturas. Al sur de los 6° N los lances disminuyeron. Durante la Niña se observó una recuperación significativa en los volúmenes de captura, siendo mayores que lo normal y con una menor intensidad de esfuerzo. La distribución de los lances fue similar al periodo normal (1996).

## ABSTRACT:

The distribution and abundance of the yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) and their relationship to the changes of the environmental conditions caused by the warming phenomenon El Niño 1997-1998 and the later cooling during La Niña 1998 -1999 were analyzed. The fishing information used was the capture volumes and the geographical position of the Mexican purse seine fleet that operated during 1996 -1999, as shown in their logbook records. The Reynolds Series was used to analyze the surface temperature of the sea (SST). The unit of effort used in this study was the fishing set. Catch per set was defined as catch per unit effort.

To achieve our objective of the determination of the spatial and temporal variation of the CPUE, we represented this graphically by means of maps. The statistical technique of regression trees was used to determine the spatial and seasonal changes of the CPUE. Through the analysis of the nominal CPUE of the vessels, two categories were defined (< 1000 t & ≥ 1000 t). Using the vessels of 1000-t carrying capacity as the standard unit, the relative fishing power, the standardized effort, and the standardized CPUE were estimated.

The tuna purse seine fleet in operation consisted 52 vessels, with vessels of 1090-t carrying capacity as the dominant units (43%). The total catch in the period analyzed was 309 113 t in 23 908 sets (12.9-t per set).

A marked preference of the tuna to temperatures between 27 ° and 28 °C was observed, however the decrease of food caused by El Niño forced a portion of the population to move to areas where the SST was cooler (23 to 26 °C). This was particularly noticeable during the first half of 1998.

The statistical technique of regression trees allowed us to locate the main centers of aggregation of the tuna, showing seasonal movements of the resource, which are affected by El Niño but not significantly by La Niña. During El Niño a displacement of the resource was observed toward the northwest because there were larger captures in this area. To the south of 6°N, the number of sets decreased. During La Niña a significant recovery was observed in the capture volumes; they were larger than normal and with a lower intensity of effort, and the distribution of sets became similar to that of the normal period (1996).

## GLOSARIO:

Árboles de Regresión (AR) o TREE. Método estadístico flexible y robusto utilizado en el análisis de datos ecológicos complejos que no se comportan de manera lineal y, a pesar de esto, tienen un alto grado de interacción entre sí. Su representación gráfica permite una visualización rápida y resumida de la información. En un AR los datos son divididos en conjuntos separados. Cada conjunto agrupa a los datos más parecidos entre sí. Esta primera división de los datos continúa sucesivamente hasta que ya no encuentra más diferencias.

Capa de Mezcla: Aguas superficiales del océano que al ser movidas por el viento se mezclan y distribuyen sus características físicas, químicas y biológicas (temperatura del agua, salinidad y plancton) homogéneamente en el cuerpo de agua.

Capacidad de acarreo: Volumen físico o capacidad de almacenamiento de una embarcación pesquera.

Captura por unidad de esfuerzo (CPUE): Captura obtenida después de realizado un esfuerzo para obtenerla (número de peces, kilos o toneladas). Depende de la unidad de esfuerzo considerada y en el caso de la pesca de atún comúnmente se utiliza como unidad de esfuerzo al día de pesca, al viaje de pesca, al lance de pesca o a los días de ausencia de puerto.

Cardumen: Conjunto organizado de peces que se mueven organizada y sincrónicamente.

CIAT: Comisión Interamericana del Atún Tropical.

Cohorte: Grupo de peces que pertenecen a la misma generación, es decir, que nacieron en la misma época y tienen edad y talla muy semejante.

*Deviance*: Medida de la heterogeneidad de un nodo usado en el algoritmo de crecimiento de un árbol de regresión. Un nodo perfectamente homogéneo (datos iguales) tiene *deviance\_cero*.

Estandarización: En este análisis, considerada como una técnica utilizada para regularizar u ordenar las unidades de esfuerzo a una clase de embarcación considerada como estándar.

Gradiente térmico: Cambio de la temperatura del mar vertical u horizontalmente.

Lance de pesca: Procedimiento de lanzar (largar) la red de pesca al mar cuando ya ha sido localizado un cardumen.

Migración zonal: Desplazamiento de un recurso en el plano horizontal

**Nodo** (de un árbol de regresión): Punto de división o separación de un conjunto de datos. A la primera división de los datos se le llama nodo RAIZ, a las siguientes divisiones se les conoce como nodo RAMA y el último brazo de una división es el nodo HOJA.

**Prune** o podado (de un árbol de regresión): procedimiento mediante el cual se eliminan “hojas” y “ramas” de un “árbol de regresión” (ver Nodo). Este procedimiento mejora la calidad de la interpretación de un árbol de regresión al eliminar información innecesaria o que no aporta mayor información al reducir el número de nodos o ramificaciones a un tamaño óptimo, perdiendo el mínimo de información y consiguiendo la menor *deviance* posible.

**Reclutamiento**: Se dice de aquellos individuos que alcanzan la talla, la madurez sexual y el peso mínimo permitido para ser pescados.

**Red de cerco**: Método de pesca en el que se utiliza una red con la que se forma un cilindro que es cerrado por la parte inferior por medio de una jareta formando una bolsa en la que queda atrapado el pescado.

**Subducción**: Hundimiento de las aguas (movimiento vertical) el cual se asocia generalmente a procesos de convergencia

**Subsuperficiales**: Debajo de la superficie del océano, generalmente son aguas que se ubican a profundidades mayores de 100 m.

**Surgencia**: Movimiento vertical de agua más profunda rica en nutrientes hacia la superficie.

**Termoclina**: Región de la columna de agua donde el gradiente vertical de temperatura del agua decrece más rápidamente. Separa masas de agua superficiales menos densas de masas de agua más profundas de mayor densidad, donde no tiene lugar la mezcla vertical.

**Vara**: Caña de pescar muy larga con la que capturan al atún.

**Vulnerabilidad**: Es la disponibilidad del pescado al arte de pesca. Las artes de superficie suelen atrapar cardúmenes que están hasta los 80 m de profundidad. Si el recurso se encuentra en aguas más profundas la probabilidad de atraparlos por este método de pesca disminuye.

## I. INTRODUCCIÓN:

El atún aleta amarilla (*Thunnus albacares*) es una especie epipelágica que se encuentra en aguas tropicales y subtropicales de todos los océanos y mares del mundo excepto en el Mar Mediterráneo (Cole, 1980), entre los 40° N y los 40° S, generalmente en aguas que superan los 20 °C en la superficie (Forsbergh, 1989).

La abundancia del recurso, su tendencia a formar grandes cardúmenes, la vulnerabilidad que presentan a diferentes tipos de artes de pesca y el hecho de ser muy apreciados como fuente alimenticia son características que hacen que su pesquería sea de gran importancia.

La pesquería del atún ha sido en las últimas décadas una de las más importantes a escala mundial registrándose una captura de alrededor 1 060 400 toneladas anuales durante el 2000 (CIAT, 2002b). En el Océano Pacífico Oriental (OPO) ésta pesquería genera anualmente el 28% de las capturas mundiales, de las cuales México participa actualmente con alrededor del 33.5% de éstas capturas (CIAT, 2002b). A nivel nacional la pesquería de atún es la segunda en volumen, después de la sardina y la segunda en valor, después del camarón (SEMARNAP, 2000)

La flota atunera mexicana ocupó el primer lugar en capacidad de acarreo de las flotas que operan en el OPO desde 1990 hasta 1998 y de 1999 al 2001 fue superada por la flota Ecuatoriana (CIAT, 2002a; 2002b).

La especie de mayor importancia comercial en la pesquería de atún en México es el atún aleta amarilla, ya que representa entre el 75 y 90% de la captura anual; estos porcentajes varían en función de la proporción del tipo de lance, las condiciones oceanográficas y la abundancia de las mismas especies (SEMARNAP, 2001).

La captura de atún en el OPO se realiza con artes de pesca de superficie, de las cuales el cerco y la vara son los más utilizados. En el 2000 la flota atunera mexicana estuvo

constituida por 54 barcos cerqueros y 10 vareros con un volumen de bodega promedio de 48,358 y 1,197 metros cúbicos respectivamente (CIAT, 2002b).

La pesca de atún con red de cerco utiliza tres indicadores principales para detectar la presencia del recurso:

- a) La pesca de cardúmenes "puros" o libres, detectados a través de signos de su presencia en la superficie del mar (observación de una ligera turbulencia en la superficie del mar a lo que se denomina "brisa", lo que frecuentemente es debido a que el atún se encuentra alimentándose) que pueden ser observados ya sea desde el barco o con la ayuda de helicópteros.
- b) La pesca sobre cardúmenes asociados a delfines, en la cual los atunes son detectados por el avistamiento de manadas de delfines; las especies más importantes por su frecuencia de asociación son el delfín manchado (*Stenella attenuata*), delfín tornillo (*S. longirostris*) y delfín común (*Delphinus delphis*).
- c) La pesca sobre cardúmenes asociados a objetos flotantes (maderas o partes de árboles, ballenas muertas, pedazos de red, bambú, algas, etc.), bajo los cuales es común encontrar concentraciones de atún.

En la pesca con vara o carnada, después de detectar un cardumen, el atún es atraído al arrojar al mar carnada viva (sardina, anchoveta, etc), creando una excitación alimenticia que es aprovechada por los pescadores para lanzar sus anzuelos y capturar el atún.

La flota atunera mexicana obtiene sus capturas principalmente en el OPO que es una de las áreas más productivas de los océanos del mundo (Chávez y Barber, 1987). El OPO es también una región de variabilidad oceánica interanual significativa, entre otras la asociada con El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), además de encontrarse bajo la influencia de grandes e importantes sistemas de corrientes, incluidos los giros subtropicales, frentes y zonas de convergencia y divergencia, que lo hacen mantener una estructura física compleja y una alta variabilidad estacional, interanual y espacial.

La elevada productividad del OPO se debe principalmente a los vientos del oriente y corrientes prevalecientes que causan afloramiento de aguas subsuperficiales. Sin embargo los cambios en la fuerza y dirección de los vientos generan una gran variabilidad ambiental, la cuál ha sido descrita en varios estudios. Entre los más sobresalientes se encuentran los de Cromwell (1958), Bjerknes (1961; 1966), Miller y Laurs (1974), Wyrcki (1964; 1975; 1981), Mysak (1986), CIAT (1960; 1974; 1985; 1999), quienes han descrito con detalle los principales cambios que ocurren. Así, en condiciones normales los vientos alisios soplan desde dos regiones de alta presión ubicadas en el borde oriental del Pacífico (una frente a Chile en el Hemisferio Sur y otra en la costa occidental de Norte América en el Hemisferio Norte) hacia la región de baja presión ubicada en el borde occidental del Pacífico en la zona de Australia (Bjerknes, 1966; Miller y Laurs, 1974).

En una primera etapa estos vientos viajan, desde latitudes medias ( $30^{\circ}$  N y  $30^{\circ}$  S), hacia el ecuador siguiendo la costa occidental del continente Americano. Cerca del ecuador, en la región conocida como zona de convergencia intertropical (ZCIT) se encuentran y se desvían al oeste dirigiéndose al Pacífico Occidental (POc) (Mann y Lazier, 1996).

En esta etapa, la fuerza de estos vientos en ambos hemisferios empuja las aguas costeras lejos de la costa, siendo reemplazadas por aguas subsuperficiales frías y ricas en nutrientes que emergen de profundidades de entre 40 y 80 m, a lo que se conoce como surgencias (Mann y Lazier, 1996; Philander, 1990; Fiedler, 1992).

Las surgencias favorecen el desarrollo de las cadenas alimenticias a lo largo de las zonas costeras, por lo que las aguas costeras del POT son muy ricas y productivas en alimento capaz de soportar grandes poblaciones de peces de importancia económica (sardina, anchoveta, atún, etc.).

Debido a este proceso oceanográfico del Pacífico Oriental, la termoclina es muy somera cerca de la costa (entre 20 y 40 m) indicando la presencia de surgencias y muy profunda en el extremo occidental, donde se ubica a 200 m de profundidad (Wyrcki, 1975;

1979; Mann y Lazier, 1996), la concentración de nitratos y de clorofilas es muy alta en el POT y muy baja en el POc (Barber y Chavez, 1991).

Esto significa que la capa de mezcla en el POT es delgada y la cantidad de calor que se acumula no es muy elevada, mientras que en el POc ocurre lo contrario, dado que las aguas empujadas hacia el oeste son cálidas, la termoclina se hunde a unos 200 m y la capa de mezcla es muy ancha, acumulándose gran cantidad de calor en esa región. Debido a esto, a esa zona se le conoce como “Alberca Cálida del Pacífico Occidental” (ACPOc), ubicada en la zona conocida como Niño 4, de los 160° E a 150° W y entre los 5° S y 5° N. El agua empujada hacia esa región tiende a apilarse o acumularse, por lo que se eleva el nivel del mar. Así, en términos generales el nivel del mar es elevado en el POc y bajo en el POT (Wyrcki, 1975, 1979; Cane, 1983; Philander, 1990; Glantz, 2001) (Figura 1A).

Dado que la TSM de la ACPOc es  $>30$  °C, hay una elevada tasa de evaporación, se acumula una enorme cantidad de humedad que genera centros de convección en la atmósfera, lo que explica los altos niveles de precipitación pluvial que ahí se registran. Por esta razón, en la zona de Indonesia la cantidad de lluvia al año es muy elevada si se le compara con la que cae en el POT (Walker, 1924; Bjerknes, 1966; Wyrcki, 1975, 1979).

Al mismo tiempo que el aire húmedo y caliente se eleva, jala aire que ocupa el espacio que dejó libre. Este aire al elevarse va enfriándose y perdiendo humedad. A nivel de la troposfera (10 a 20 Km.) una parte de este aire diverge hacia el este y otra al oeste de este punto. El aire que viaja al este se dirige al Pacífico Oriental (PO) viajando por la troposfera hasta que desciende. Este aire frío y seco no forma nubes, por lo que son muy escasas las lluvias en esta zona. Así, este aire que desciende gira al oeste cerca de la superficie terrestre jalado por el aire caliente que está subiendo en el área de la ACPOc, cerrándose el ciclo conocido como “celda de Walker” descrita por Bjerknes (1966).

Sin embargo, la interacción aire-mar puede cambiar. Si el patrón normal de vientos disminuye da lugar a un evento de calentamiento y si se intensifica da lugar a un evento de enfriamiento.

## **a) El evento El Niño-Oscilación del Sur (ENOS)**

Condiciones anómalamente cálidas del Pacífico Oriental tropical y ecuatorial

Las primeras noticias que se tienen sobre este evento provienen de los marineros y pescadores peruanos, que notaron la presencia de una corriente marina cálida que viaja hacia el sur frente a las costas del norte de Perú después de navidad, es decir, después del nacimiento del niño Jesús por lo que la denominaron como corriente de El Niño (Carrillo, 1892 citado por Glantz, 2001).

Esta corriente cuando era más cálida que de costumbre y perduraba por más de 3 meses, se le asociaba a épocas de escasez de pescado y a la muerte masiva de aves marinas (productoras de güano que era utilizado como fertilizante), así como a la presencia de lluvias torrenciales e inundaciones que ocasionaban desastres en el norte de Perú y Ecuador, región que normalmente se caracteriza por ser árida.

Walker (1924) empleando datos de presión a nivel de la superficie del mar (PSM) de Darwin (Australia), de las islas Cantón (Pacífico Central ecuatorial) y Santiago (Chile) se percató de que cuando la PSM es alta en Darwin, es intermedia en Cantón y es baja en Santiago y que cuando era baja en Darwin, lo opuesto ocurría en Santiago, registrándose el traslado de condiciones de un extremo a otro del océano que pasan a través de las islas Cantón. Es decir, observó un comportamiento de “sube y baja” de la PSM a lo que llamo “oscilación del sur”.

Esta diferencia de presión en los extremos en condiciones normales hace que los vientos alisios soplen de oriente hacia occidente sobre el océano Pacífico empujando las aguas cálidas desde el POT ecuatorial al POc ecuatorial (Bjerknes, 1966) (Figura 1A). Actualmente se sabe que un evento El Niño generalmente es precedido por un periodo prolongado (1 a 2 años) en el que soplan muy intensamente los vientos alisios, ocasionando que en el POc se acumule una mayor cantidad de agua cálida que de costumbre y aumente el grosor de la capa de mezcla, se hunda la termoclina y suba el nivel del mar, mientras que

del lado del Pacífico Oriental se incrementan las surgencias ecuatoriales y costeras que enfrían las aguas superficiales (condiciones La Niña) (Figura 1A y C).

Posteriormente, se presenta un debilitamiento anómalo de los vientos alisios (disminuye la presión del lado oriental y aumenta del lado occidental). Las razones de esto aún no son claras. Poco tiempo después, cambia la dirección en la que soplan y se dirigen hacia el este, casi siempre durante la primera mitad del año. Esta situación genera una onda interna (Kelvin) del lado del POc que viaja por el ecuador (216 Km. / d) hacia el POT hundiendo la termoclina (tarda aproximadamente 2 meses en atravesarlo), lo cual conduce a que se calienten las aguas del Pacífico Ecuatorial oriental y las aguas costeras frente a Ecuador y Perú, y a que aumente el grosor de la capa de mezcla y suba el nivel del mar en el POT (Wyrcki, 1977 y 1979; Myzak, 1985; Glantz, 2001).

En eventos fuertes, su impacto ha sido detectado hasta la costa occidental del norte de EU y sur de Canadá, ya que al chocar con el continente americano las ondas Kelvin continúan propagándose desde el ecuador hacia los polos, atrapadas a la costa, contribuyendo al hundimiento de la termoclina de la región costera, por lo que se detienen las surgencias y se presentan procesos de subducción (hundimiento de las aguas) (Myzak, 1985) (Figura 1B). El choque de estas ondas contra el continente americano también genera otro tipo de ondas que rebotan y se regresan hacia el oeste al N y S del ecuador: las ondas de Rossby, que se desplazan a 1/3 de la velocidad de las Kelvin ( $\approx 70$  Km./d), y tardan cerca de 9 meses en atravesar el océano Pacífico. Se dice que son las ondas precursoras de un evento frío (Wyrcki, 1977; Myzak, 1985).

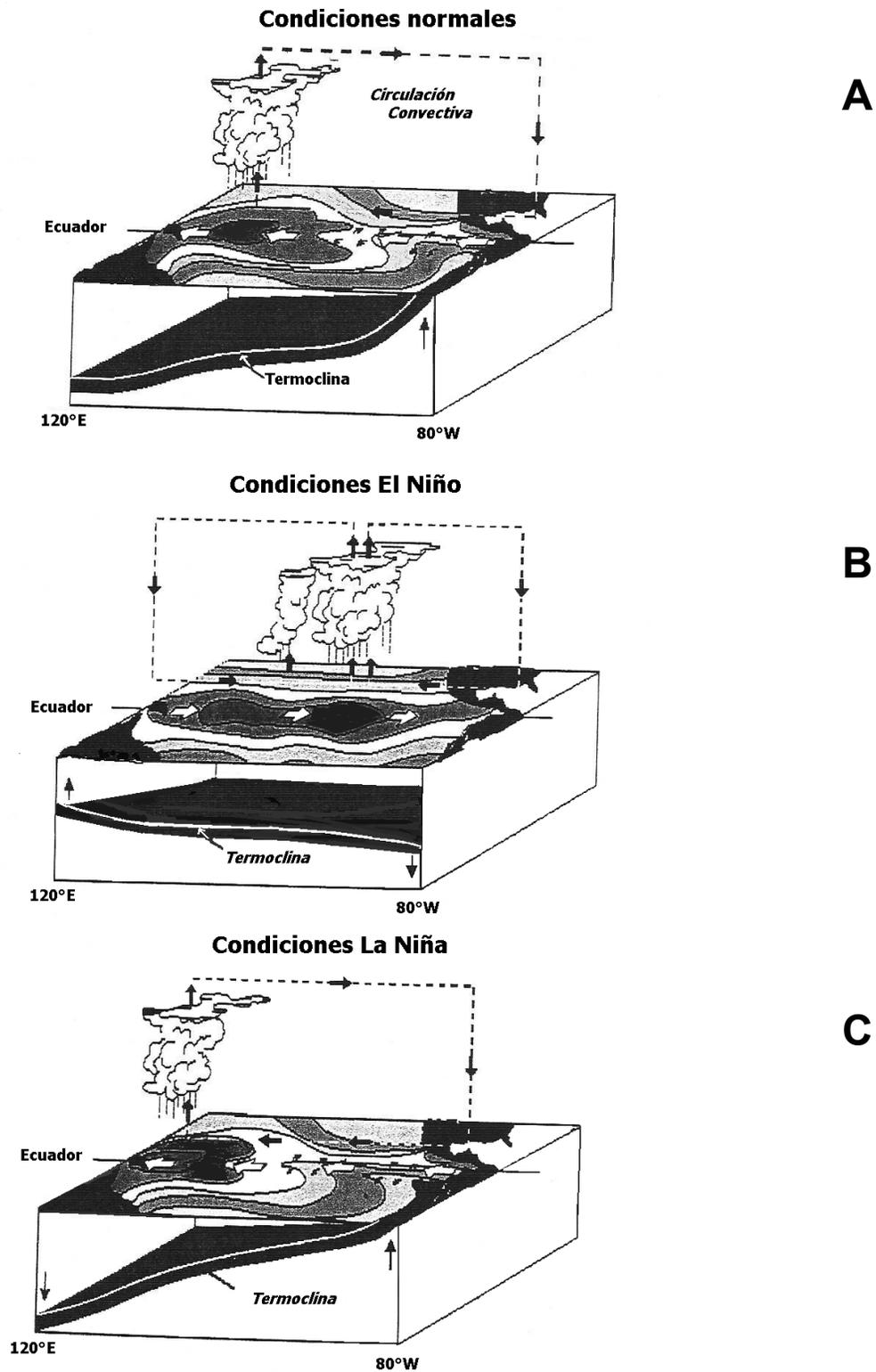


Figura 1. Celda de Walker, profundidad de la termoclina, ubicación de la Alberca Cálida y zona de precipitaciones en condiciones normales, El Niño y La Niña. Imagen tomada de la pagina de Internet <http://www.pmel.noaa.gov/tao/elniño>.

La zona lluviosa, que normalmente se ubica a los 120° E, se desplaza hacia el este ocupando el Pacífico Central (160° W), pudiendo alcanzar zonas costeras del Pacífico ecuatorial (Ecuador y norte de Perú) (Figura 1B).

Una consecuencia de El Niño es la disminución o incluso el cese de las surgencias en el POT, lo que significa que se elimina el ascenso de agua por debajo de la termoclina a la capa superficial del océano. Al no poder renovarse las aguas superficiales con esa agua profunda rica en nutrientes, se establecen condiciones oligotróficas que inhiben el desarrollo de las cadenas alimenticias (Barber y Chavez, 1983, 1986; Fiedler, 1992).

Como consecuencia de esto, se ha reportado el desplazamiento de varias especies tropicales hacia los polos, que realizan mediante movimientos pasivos (arrastrados por el aumento de la fuerza de la corriente que va hacia los polos) como ocurrió durante El Niño 1982-1983 con la merluza (*Merluccius gayi*) frente a Perú/Chile por la Corriente Subsuperficial Surecuatorial, o por movimientos activos (realizados por el organismo alejándose de las aguas anómalamente cálidas) como la anchoveta (*Engraulis rigens*), la sardina (*Sardinops sagax*). La macarela negra (*Trachurus symmetricus*), es empujada a la costa y es alimento de sus depredadores principales que son el bonito (*Sarda chilensis*), el dorado (*Coryphaena hippurus*) y el atún aleta amarilla (*Thunnus albacares*), que proliferaron cerca de la costa pues tienen mayor tolerancia a las temperaturas más altas (Barber y Chavez, 1983);

Por otro lado, en el Pacífico oriental subtropical (frente a las costas de Baja California norte) también hay registro de la llegada de especies propiamente tropicales a la zona. Durante El Niño de 1992-1993, se registró la presencia de jurel (*Seriola dorsalis*), barracuda de California (*Sphyraena argentea*), bonito del pacífico (*Sarda chiliensis*), atún aleta amarilla (*Thunnus albacares*) y dorado (*Coryphaena hippurus*). En tanto que la presencia de otras especies disminuyó como el erizo rojo de mar (*Strongylocentrotus franciscanus*), el jurel “cola amarilla” (*Seriola dorsalis*), el pez espada (*Xiphias gladius*), la lisa (*Mugil cephalus*), cabrilla (*Paralabrax* spp.). Aumentaron los desembarcos de otras especies propias de la región como la anchoveta (*Engraulis mordax*), la sardina monterrey (*Sardinops sagax caeruleus*), la

macarela del Pacífico (*Scomber japonicus*), la almeja pismo (*Tivela stultorum*), el caracol panocha y caracol chino. De la pesca recreativa se incrementaron las capturas de el pez gallo (*Nematistius pectoralis*), el dorado y el marlin rayado (*Tetrapturus audax*) (Hammann et al., 1992).

Actualmente para determinar la presencia de un evento EL Niño se utiliza la diferencia cuantitativa entre la presión de Tahití (Pacífico central) y la de Darwin (Pacífico occidental), la cual ha sido convertida en un índice conocido como Índice de Oscilación del Sur (IOS). Así, cuando la presión es alta en Tahití y baja en Darwin se tiene un valor positivo (1013 – 1008 Mb = 5), y se espera que los vientos soplen normalmente hacia el oeste. Pero si es a la inversa, es decir, baja en Tahití y alta en Darwin entonces se tiene un valor negativo (1009 – 1012 Mb = -3) que nos señala que la dirección del viento es hacia el este y por tanto hay condiciones ambientales tipo El Niño. Este índice ayuda a pronosticar la presencia de un evento cálido y su posible intensidad. Cuando es muy alta la presión del lado de Tahití y muy baja del lado de Darwin (1014 – 1007 Mb = 7) nos señala que habrá condiciones de vientos alisios soplando muy intensamente hacia el oeste, que se traducen como condiciones frías o La Niña (Glantz, 2001).

El Niño presenta todas las características que se emplean para definir a los desastres naturales, como lo es su *magnitud* o qué tanto se aleja la TSM del promedio (eventos muy fuertes han alcanzado los 7 °C por arriba del promedio en la región más caliente). La *frecuencia* se refiere a cada cuanto tiempo regresa, la que es muy irregular y se dice que es cada 2.7 a 7 años. Se dice que un Niño fuerte viene cada 8 a 11 años y uno débil a moderado cada 2 a 3 años. La *duración* del evento es muy variable oscilando entre los 12 y 18 meses. El *área de extensión* se refiere al espacio que cubre la zona de impacto, la que varía mucho, teniendo influencia a nivel mundial aquellos Niños fuertes, mientras que los débiles impactan solo regionalmente el Pacífico tropical. La *velocidad de inicio* se refiere al tiempo entre su primera aparición y lo que tarda en llegar a su máximo, el cual es de uno o más meses. La *dispersión espacial* se refiere al patrón de distribución sobre el espacio en el que su impacto puede ocurrir, y puede ocupar parte del POT o extenderse hasta el Pacífico

central. El *espaciamiento temporal* se refiere a la frecuencia con la que se repiten en el tiempo (Burton et al., 1993 citado por Glantz, 2001).

Recientemente se emplea el Índice Multivariado del ENOS como uno de los mejores indicadores que ayuda a pronosticar un evento cálido o frío. Dicho índice toma en cuenta seis variables del Pacífico tropical: la presión a nivel del mar, el componente zonal y meridional del viento superficial, la TSM, la temperatura superficial del aire y la nubosidad. De acuerdo a este índice los eventos El Niño más importantes se muestran en la Figura 2.

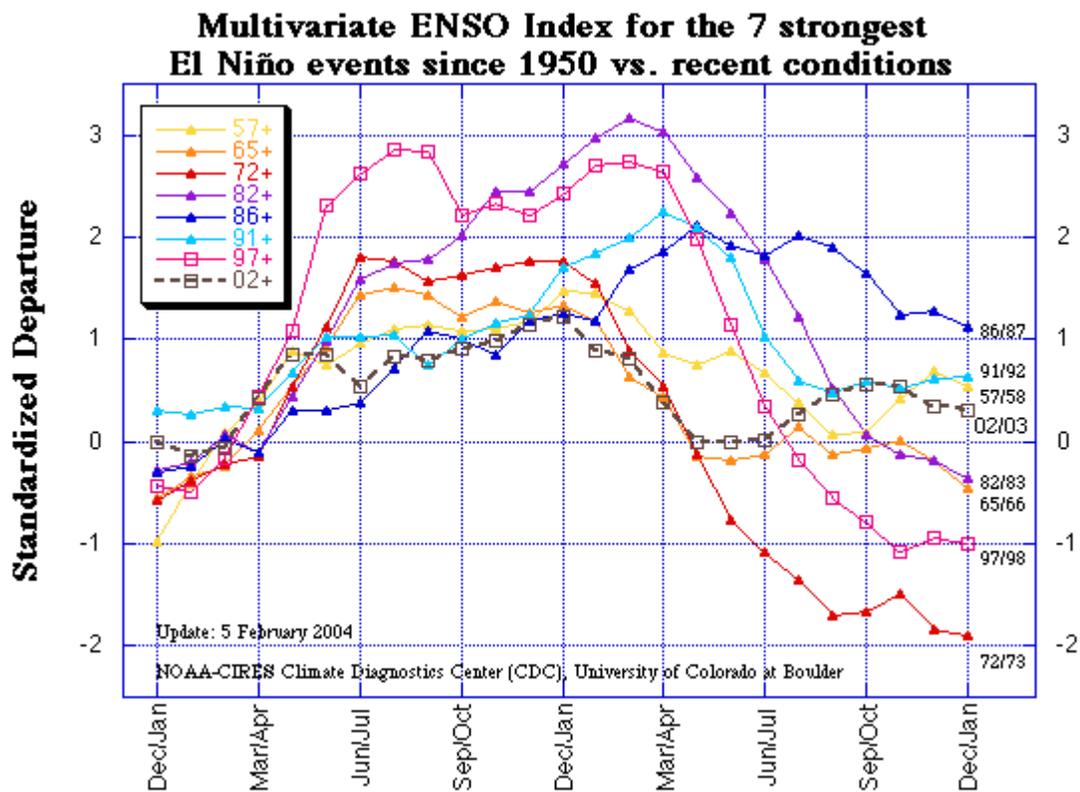


Figura 2. Eventos El Niño de acuerdo al Índice Multivariado de El Niño (MEI), el cuál es un valor ponderado promedio que considera las principales características del ENSO (nivel del mar, componentes este-este y norte-sur del viento superficial, temperatura superficial, temperatura del aire y nubosidad) (Imagen tomada de la pagina de Internet [www.cdc.noaa.gov/kew/MEI/mei.html](http://www.cdc.noaa.gov/kew/MEI/mei.html)).

### b) La Niña, el evento frío

Cuando la intensidad de los alisios aumenta anómalamente por arriba del promedio, se desarrolla el evento opuesto conocido como La Niña, caracterizado por la disminución de

la TSM (condiciones frías) en el Pacífico oriental, pues aumentan las surgencias costeras y ecuatoriales inducidas por el viento. La termoclina es muy somera y la capa de mezcla muy delgada en el POT. Este evento propicia condiciones tróficas favorables para el desarrollo de cadenas alimenticias pues con las surgencias costeras y ecuatoriales emergen aguas ricas en nutrientes (Barber y Chávez, 1983).

Lo opuesto ocurre del lado del Pacífico Occidental, donde se apila una mayor cantidad de agua cálida, se hunde la termoclina, es muy gruesa la capa de mezcla, y aumentan considerablemente las precipitaciones, pudiendo llegar a presentarse inundaciones. Sin embargo, este evento frío puede presentarse o no después de un evento cálido. Generalmente tiene menos repercusiones que El Niño pues sus condiciones se parecen más a las normales por lo que, cuando son de moderados a débiles, pasan desapercibidos.

De acuerdo con el Índice Multivariado del ENOS (MEI) los eventos fríos de La Niña más importantes del último siglo se presentan en la Figura 3.

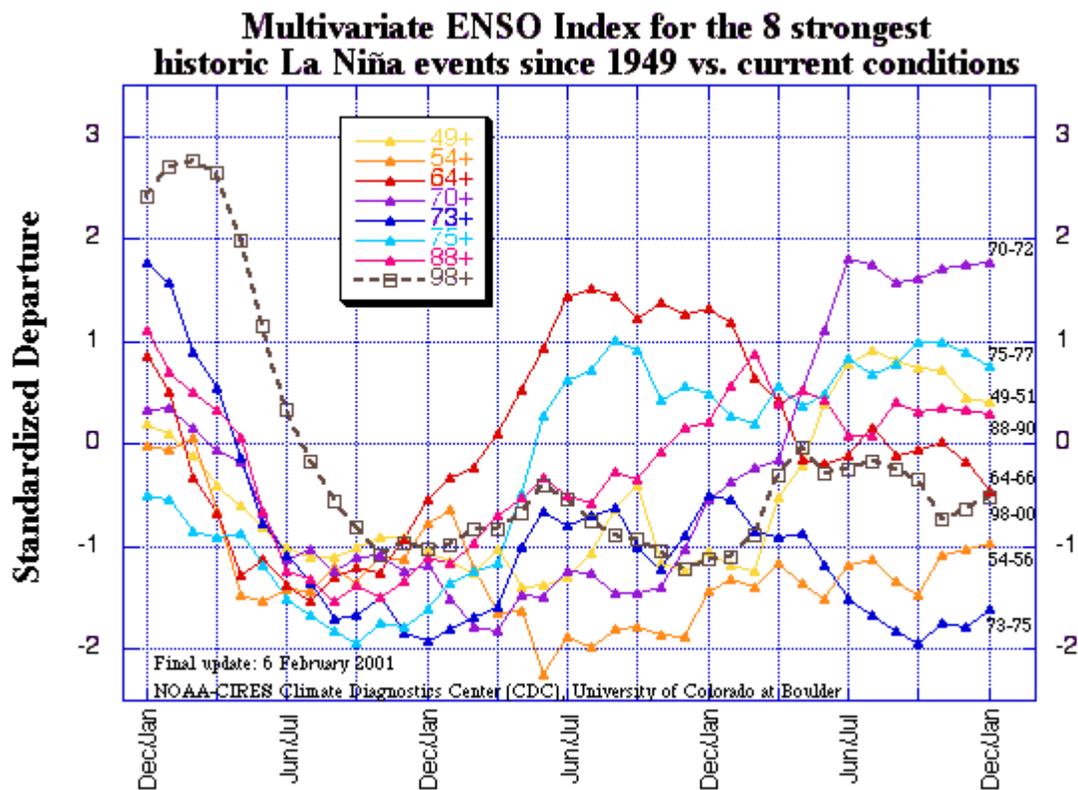


Figura 3. Eventos La Niña caracterizados a través del Índice Multivariado de El Niño (MEI), el cual es un valor ponderado promedio que considera las principales características del ENSO (nivel del mar, componentes este-oeste y norte-sur del viento superficial, temperatura superficial, temperatura del aire y nubosidad) (Imagen tomada de la pagina de Internet [www.cdc.noaa.gov/-kew/MEI/mei.html](http://www.cdc.noaa.gov/-kew/MEI/mei.html)).

Todos estos eventos se caracterizaron porque las anomalías fueron de al menos una desviación estándar negativa. Aquellos eventos en los que la anomalía fue menor de una desviación estándar son considerados eventos débiles en los que las condiciones se acercan mucho a lo normal, como ocurrió durante 1996, por lo que no aparece en este esquema.

Con el propósito de pronosticar el inicio de un fenómeno cálido o frío y su posible magnitud los investigadores han elegido cinco diferentes regiones del océano Pacífico en las que obtienen datos de la TSM, el nivel del mar, la profundidad de la termoclina, etc. Estas cinco regiones son conocidas como Niño 1, Niño2, Niño 3, Niño 4 y Niño3.4 (Figura 4).

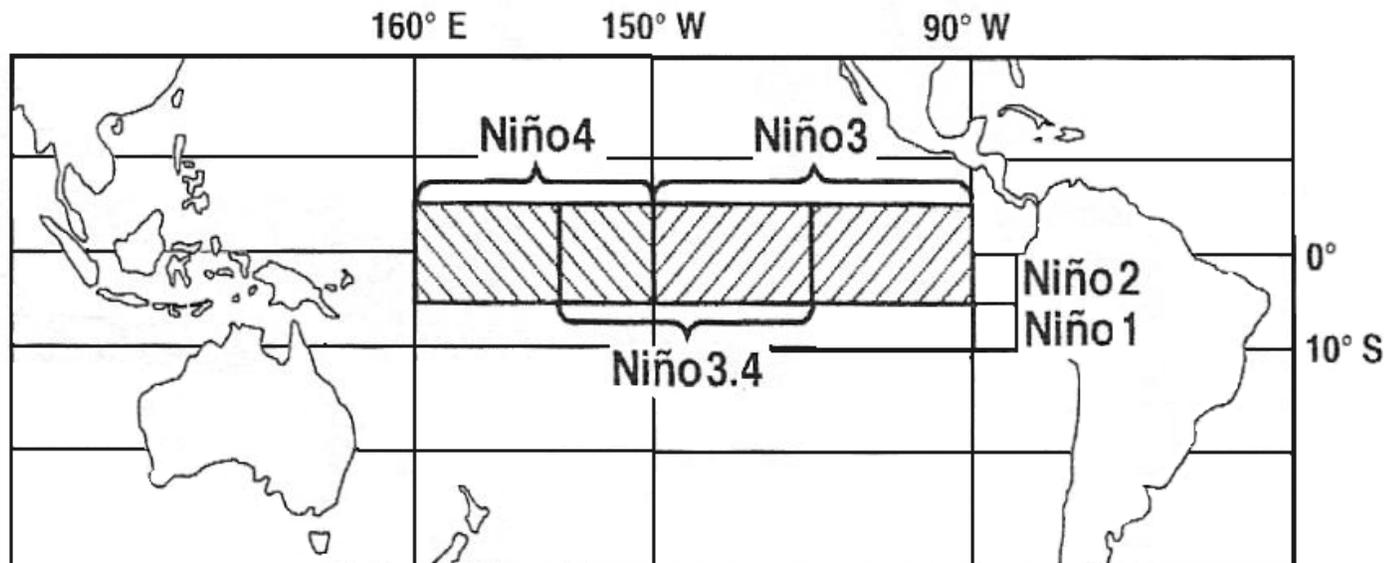


Figura 4. Principales áreas monitoreadas con el propósito de pronosticar la presencia de un evento de calentamiento o enfriamiento de las aguas.

## II. ANTECEDENTES:

Los estudios que han abordado los cambios de la distribución y abundancia de los atunes debido al efecto de El Niño o de La Niña son el de Schaefer et al. (1962), quienes mencionan que durante El Niño de 1957-1958 se registraron abundancias bajas frente a Centro América, por lo que sugirieron que el atún tiende a evitar aguas con temperaturas mayores a los 28 °C.

Blackburn (1963) después de analizar datos de captura por unidad de esfuerzo (CPUE) de barcos vareros que operaron entre 1951 y 1960 en aguas del Golfo de Tehuantepec, no encontró diferencias en las capturas de atún aleta amarilla entre los años analizados, a pesar de que la temperatura superficial del mar presentó variaciones significativas (incluidos tres eventos de calentamiento El Niño en 1951, 1953 y 1957-1958); mientras que para el barrilete se presentaron capturas escasas durante años cálidos y capturas abundantes en años fríos. Lo que sugiere que el aleta amarilla es capaz de soportar un mayor intervalo de temperaturas que el barrilete.

El Niño 1982-1983, considerado como el más intenso del siglo (antes del de 1997-1998), ocasionó disminuciones importantes en las capturas de aleta amarilla obtenidas en el Área Reglamentaria de la Comisión para el Aleta Amarilla (ARCAA) en 1983, las cuales fueron 25% inferiores a las que se obtuvieron en 1982. Algo parecido ocurrió con las capturas de barrilete, las que disminuyeron un 40% en comparación a las capturas obtenidas en 1982 (CIAT, 1984).

La Comisión Interamericana del Atún Tropical (CIAT) ha venido monitoreando la abundancia relativa del atún en el OPO desde 1950, utilizando tres índices de abundancia (método de cohortes, método de captura por día de pesca y el método de tiempo de búsqueda). Estos tres métodos indican cómo ha variado la abundancia relativa del atún a través del tiempo en relación con algunos factores como el esfuerzo de pesca, la demanda del mercado y los factores ambientales. Estos índices muestran que entre 1969 y 1983 hubo una tendencia general hacia una disminución continua de la abundancia de atún. Esta

tendencia coincide con la presencia de 4 eventos El Niño en dicho período, tres de los cuales fueron considerados como eventos fuertes (1972-1973, 1977-1978 y 1982-1983) y uno débil (1969-1970). Posteriormente, los índices señalan un cambio en la tendencia, notándose una recuperación significativa entre 1984 y 1996. Desde entonces ha permanecido en niveles altos. En éste período también se desarrollaron 4 eventos cálidos de los cuales sólo uno es considerado como fuerte (1991-1992), los demás fueron moderados (1987, 1993, 1994-1995) (CIAT, 1998).

En general se ha observado que, durante eventos prolongados de El Niño, hay un efecto en la vulnerabilidad del atún ya que al incrementarse la profundidad de la termoclina el atún se vuelve menos vulnerable a la red de cerco. Como consecuencia se presenta una reducción en la disponibilidad de los atunes en el POT, siendo ésta más evidente frente al Ecuador (CIAT, 1984; 1985).

Barber y Chavez (1983), Fiedler (1992), Fiedler et al., (1992) abordan las consecuencias y los efectos biológicos de El Niño. Recientemente Fiedler (2002) hace una exhaustiva revisión de los trabajos que tratan del impacto del ENOS y de la variabilidad decadal sobre una gran variedad de especies en el OPO. Señala que mientras unas especies se ven seriamente afectadas por el calentamiento (cambian las rutas migratorias, aumenta la mortalidad en algunas especies y al disminuir el alimento se genera un decremento en el reclutamiento,) otras se ven beneficiadas (aumenta el reclutamiento, pues algunas especies prefieren aguas más cálidas para reproducirse con mayor éxito) (Sinclair et al., 1985; Connolly y Roughgarden, 1999). La reducción de las surgencias en el borde oriental del Océano Pacífico y el hundimiento de la termoclina impiden que suban los nutrientes del fondo, lo cual tiene efectos muy negativos sobre la producción primaria, debido a que se desencadena una serie de efectos sobre los recursos marinos que habitan en el Océano Pacífico. En relación con los túnidos, se han registrado cambios en el patrón de migración del atún aleta azul y la migración zonal del barrilete del Pacífico Occidental.

Diversos estudios han demostrado que la estructura térmica del océano cambia por efecto de la presencia de El Niño y La Niña, repercutiendo tanto en la distribución del atún como en el éxito de la pesca.

Entre los trabajos que muestran la relación del atún con la temperatura superficial y la estructura térmica se encuentra el de Green (1967), quien relaciona que el mayor éxito de pesca con red de cerco se logró en zonas donde la termoclina estuvo a menos de 20 m de profundidad y donde el gradiente térmico vertical fue muy marcado ( $> 0.5 \text{ }^\circ\text{C/m}$ ). Cuando se combinaron ambos aspectos (termoclina somera y un marcado gradiente vertical de temperatura) se obtuvieron las tasas de captura más altas.

Sharp (1978) estudió el comportamiento y la fisiología de cuatro especies de atunes en aguas frente a Centro América. Encontró que el atún aleta amarilla es más vulnerable a la captura en la temporada del año en la que la profundidad de la isoterma de los  $23 \text{ }^\circ\text{C}$  está a menos de 50 m (marzo - mayo) y la de  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  está a menos de 80 m; mientras que las menores capturas se obtuvieron cuando éstas isotermas están más profundas (enero - febrero) Además, prefieren aguas cuyas concentraciones de oxígeno sean superiores a los 2 ml / l.

Sund et al., (1981) confirman que, además de la temperatura del agua, la concentración de oxígeno limita la distribución del atún. En el POT la oxiclina sigue muy de cerca a la termoclina y generalmente se ubica ligeramente por debajo de ella. Por lo que los peces buscan las zonas donde encuentren la combinación de ambas características. Es decir, prefieren aguas al menos de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  y concentraciones de oxígeno no menores de 2 ml / l.

Recientemente, Brill et al. (1999) y Brill et al. (2001) han monitoreado el movimiento vertical y horizontal de varias especies de túnidos (*Thunnus albacares*, *T. alalunga*, *T. obesus*, *Katsuwonus pelamis*) y peces picudos (familias Istiophoridae y Xiphiidae), relacionándolo con la temperatura, la concentración de oxígeno de la columna de agua y con la velocidad de las corrientes de la zona. Encuentran que el aleta amarilla tiene una tendencia a ocupar el agua más caliente que esté disponible en la zona. Juveniles y adultos

durante el día y la noche se distribuyen ocupando la misma capa superficial (0-120 m) donde la temperatura es más uniforme. Sus movimientos verticales (cuando las concentraciones del oxígeno disuelto son adecuadas), están fuertemente limitados por el gradiente térmico del agua. Es decir, el cambio de temperatura máximo que soportan es de 8° C menos que la temperatura de la superficie, pues a temperaturas menores no responde el músculo cardiaco.

Lehodey et al. (1997) y Lehodey (2001) describen la migración estacional del barrilete (*Katsuwonus pelamis*) en el Océano Pacífico Occidental - Central (OPOc-C), la cual sigue la expansión y contracción de la alberca cálida y el consecuente cambio de lugar de las zonas óptimas de alimentación en relación directa con el desarrollo de El Niño. Encuentran que éste evento cálido favorece el desarrollo de surgencias que enriquecen las aguas del Pacífico Occidental, lo que desencadena el desarrollo de cadenas alimenticias que permiten la sobrevivencia y el desarrollo larvario del barrilete, por lo que esperan un reclutamiento grande a la pesquería 6 o 12 meses después. en el Pacífico Occidental.

Ortega-García (1998) y Ortega-García et al. (2003), con datos de CPUE de atún aleta amarilla de la flota atunera mexicana que operó entre 1984 y 1990, describen la fluctuación espacio-temporal de la abundancia relativa del recurso. Encuentran un patrón estacional definido que consiste en que el recurso ocupa aguas de la región costera desde México (30° N) hasta Sudamérica (10° S), alejándose hacia alta mar hasta no más allá de los 120° W durante el primer trimestre del año (invierno). Durante el tercer trimestre del año (verano) la mayor parte del recurso se ha desplazado hacia aguas de alta mar a lo largo de los 10° N, alcanzando los 140° W, abandonando notoriamente las aguas costeras. El segundo y cuarto trimestre son considerados como épocas de transición entre uno y otro trimestre. El evento El Niño (1986-87) no le ocasionó ningún cambio a este patrón de desplazamientos, a pesar de haber sido considerado como un evento de moderado a fuerte.

Considerando que las anomalías ambientales propician la presencia o ausencia del recurso en las zonas tradicionales de pesca, es importante analizar y determinar con mayor precisión los cambios en la distribución y abundancia relativa del recurso para entender el aspecto biológico de los atunes que lo obliga a modificar su comportamiento y la importancia económica que significaría el poder predecir dichos cambios.

Si bien, en varios estudios se ha determinado el efecto que la temperatura superficial tiene sobre el atún aleta amarilla, no se han analizado comparativamente en periodo normal, durante El Niño y La Niña, lo cual es el objetivo principal de este trabajo. Además será aplicada una técnica reciente en este tipo de análisis como lo es los árboles de regresión, así como bases de datos ambientales que en trabajos previos no se han utilizado.

### III. ÁREA DE ESTUDIO:

El área de operación de la flota atunera nacional se ubica dentro del OPO, el cual abarca desde la Península de Baja California (30° N) hasta las costas de Perú (20° S), y desde la costa oeste del continente americano, hasta el meridiano 150° W (Hall et al., 1999).

De acuerdo con Wyrcki (1964) en el OPO se encuentran tres tipos de aguas distintas según la temperatura y la salinidad que presentan. Las *Aguas Superficiales Tropicales* (AST) se caracterizan porque siempre tienen una temperatura superior a los 25 °C y su salinidad es baja (< 34‰) pues en la zona en la que se localizan es mayor la cantidad de lluvia que la evaporación. Se ubican a los 10° N; sin embargo, se extienden cubriendo desde la región vestibular del GC hasta el ecuador.

En particular, frente a las costas del Pacífico mexicano se reconoce la zona denominada como Alberca Cálida Mexicana (ACM) que tiene como base la costa desde Jalisco hasta Oaxaca y forma una lengüeta que se extiende hacia alta mar hasta los 130° W, y se caracteriza por presentar aguas cálidas que oscilan entre los 25 y 31 °C, las cuales varían muy poco a lo largo del año. Esta ACM tiene su límite sur en el Golfo de Tehuantepec (GT) donde las aguas son enfriadas por la presencia de aguas subsuperficiales frías generadas por los fuertes vientos que soplan del “norte” durante el primero y segundo trimestre del año (Trasviña-Castro, 2001).

Las *Aguas Superficiales Ecuatoriales* (ASE) se ubican a lo largo del Ecuador y presentan salinidades un poco más elevadas (entre 34 y 35 ‰). En ella se desarrollan procesos importantes de surgencias oceánicas y son enfriadas estacionalmente por la Corriente de Perú. Durante el segundo semestre del año la temperatura de sus aguas no excede los 25 °C, cuando se intensifica la Corriente de Perú (invierno austral).

Las *Aguas Superficiales Subtropicales* (ASS) se ubican en zonas donde la evaporación excede a la precipitación, por lo que la salinidad es alta (> 35‰). Se ubican al

norte y sur de las *Aguas Superficiales Ecuatoriales y Tropicales* y su temperatura fluctúa entre los 15 y 28 °C.

De acuerdo con Au et al. (1979), entre las características oceanográficas más relevantes del OPO están la presencia de 7 corrientes marinas y giros importantes (Figura 5). Tanto la Corriente de California (CC), que se desplaza desde el Pacífico Norte hacia el sur cercana a la costa occidental de América del Norte hasta los 20° N, como la Corriente de Perú (CP), que se dirige al norte siguiendo la costa occidental de América del Sur hasta el Ecuador, giran al oeste formando las Corrientes Norecuatorial (CNE) y Surecuatorial (CSE) respectivamente, ambas dirigiéndose al Pacífico Central hasta llegar al Pacífico Occidental. Entre ellas y en sentido contrario (de oeste a este) fluye la Contracorriente Norecuatorial (CCNE).

Al sur del Ecuador también fluye una corriente subsuperficial de oeste a este que es la Corriente de Cromwell (CCr). La Corriente Costanera de Costa Rica (CCCR) fluye cercana a la costa desde Costa Rica hasta los 9° a 12° N, girando al oeste integrándose a la CNE (De la Lanza, 1991), aunque estudios recientes han puesto en duda su existencia (Trasviña-Castro, 2001). Estas corrientes fluyen a diferentes intensidades de acuerdo con la época del año, lo que se relaciona estrechamente con los cambios en el sistema de vientos alisios del norte y del sur.

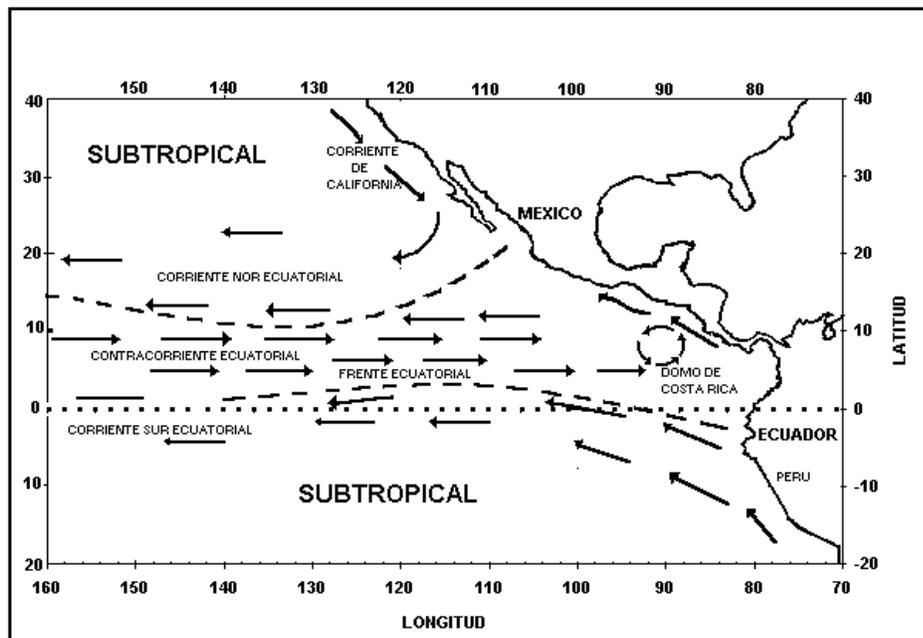


Figura 5. Esquema de los sistemas de corrientes en el Océano Pacífico Oriental.

Otra de las características importantes de ésta región del Pacífico es la presencia de una termoclina que presenta un cambio térmico muy fuerte (en poca distancia vertical cambia mucho la temperatura por lo que se dice que la termoclina es delgada). Es muy somera, pues se ubica a menos de 50 m de profundidad y llega a estar a 10 m en aguas cercanas al Domo de Costa Rica (DCR) y el Golfo de Tehuantepec (GT). En general es somera cerca de la costa, pues ahí se desarrollan importantes surgencias; también es somera en zonas donde divergen las aguas, como la que ocurre a nivel del Ecuador y a los 10° N, entre la CCNE y la CNE. Se utiliza la isolínea de los 20 °C para representar la profundidad de la termoclina en el Pacífico tropical (Donguy y Meyers, 1987). Es empleada la profundidad de la termoclina como un indicador del espesor de la capa de mezcla dentro de la cual pueden fluir corrientes superficiales impulsadas por el viento (Wyrki, 1966), mientras que la isoterma de los 15 °C indica el fondo de la termoclina (Sharp, 1978).

La profundidad de la termoclina se incrementa gradualmente conforme se aleja de las costas americanas y se acerca a la región de la Alberca Cálida del Pacífico Occidental donde alcanza profundidades de 200 m.

#### IV. OBJETIVO:

Analizar y describir los efectos que El Niño y La Niña (1997 - 1999) tuvieron sobre la distribución y abundancia del atún aleta amarilla (*Thunnus albacares*) en el Océano Pacífico Oriental.

Objetivos específicos:

- a) Determinar la Captura por Unidad de Esfuerzo nominal de pesca (CPUE<sub>n</sub>) mensual, trimestral y anual de la flota atunera mexicana que operó de 1996 a 1999.
- b) Estimar la CPUE estandarizada de pesca (CPUE<sub>e</sub>) promedio mensual, trimestral y anual analizando su variabilidad espacio-temporal como un indicador de la abundancia relativa del atún aleta amarilla en el OPO de 1996 a 1999.
- c) Determinar los cambios espacio-temporales en la distribución y la abundancia relativa del recurso, comparando un año normal (1996), con condiciones El Niño (1997-1998) y La Niña (1998-1999).
- d) Determinar si existe relación entre la variabilidad de la abundancia relativa del recurso con los cambios de la temperatura superficial del mar.

## **V. MATERIALES Y MÉTODOS**

La información utilizada en la realización del presente trabajo considera dos aspectos básicos: la información pesquera del recurso y la de temperatura superficial del mar para el periodo 1996-1999. La primera de ellas forma parte del proyecto “Pelágicos mayores” del CICIMAR, la cual contiene información de las bitácoras de pesca de la flota atunera mexicana. La segunda corresponde a la base de datos de la temperatura superficial del mar (TSM) de Reynolds. Como apoyo a la información obtenida de la base de Reynolds y para tener un panorama general de las anomalías de la TSM del área de estudio se emplearán imágenes de satélite a las que se les sobrepondrán datos de captura.

### **a) Información del recurso**

El Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas (CICIMAR) desde 1984 ha recopilado información de la flota atunera mexicana en colaboración con los Centros Regionales de Investigaciones Pesqueras (CRIP) de la Secretaría del Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP) ahora Secretaria de Agricultura Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA).

La información consiste de la capacidad de acarreo de las embarcaciones y del registro de la actividad pesquera que realiza: número de viajes que realiza al año, posición geográfica de cada lance y las toneladas de atún obtenidas, fecha, duración del lance, indicador o tipo de pesca (si la captura fue sobre cardúmenes libres comúnmente llamados “brisa”, cardúmenes asociados a delfines o a objetos flotantes), ayuda aérea, etc. De ésta base de datos, que representa una muestra de la flota completa, se extrajeron los lances de pesca realizados durante el periodo 1996-1999, debido a que durante éste período estuvieron presentes eventos El Niño y La Niña.

## **b) Base de datos de la temperatura superficial del mar (TSM)**

Esta base corresponde a la base de Reynolds, la cuál se obtiene mediante el análisis de la interpolación óptima de la TSM promedio semanal de cuadrantes de 1° de todo el océano. El análisis emplea datos *in situ* y de satélite de la TSM más datos de TSM simulados para las zonas de hielos, los que han sido ajustados para evitar sesgos usando el método de Reynolds y Smith (1994), quienes utilizan el análisis de interpolación óptima. Este método está descrito y puede consultarse en la página de Internet del centro de diagnóstico climático (<http://www.cdc.noaa.gov/>).

Otra fuente de información fue la correspondiente a las imágenes de satélite de las anomalías promedio mensuales de la TSM obtenidas a través del radiómetro avanzado de muy alta resolución cuyas siglas en inglés son AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) del Jet Propulsion Laboratory (JPL) de la NASA que consiste de datos promedio semanales de la TSM, que fueron conseguidos a través de la página de Internet de la NASA (<http://www.jpl.nasa.gov/mcsst>). Estas imágenes de satélite no fueron procesadas, solo se sobrepusieron a los datos de captura (ver sección **c.4** más adelante).

Con la finalidad de comparar el efecto de las condiciones presentes durante un evento El Niño, La Niña y condiciones normales sobre la distribución y abundancia relativa del atún aleta amarilla se tomaron en cuenta las anomalías de la TSM obtenidas de la serie Reynolds así como los valores del MEI, definiendo 1996 como condiciones normales (ya que las anomalías de TSM fueron menores de 0.5 °C y las del MEI menores a 1 desviación estándar), 1997-1998 como condiciones El Niño y 1998-1999 como condiciones La Niña.

## **c) Análisis de la información**

### **c.1) Categorización de las embarcaciones**

A través de la aplicación de un análisis de variancia (ANDEVA), se analizó la captura por unidad de esfuerzo nominal de las embarcaciones con la finalidad de determinar grupos o categorías entre las cuales no hubiera diferencias significativas en los valores de captura por unidad de esfuerzo (CPUE) y al mismo tiempo detectar aquellos grupos cuyos valores de captura fueron significativamente diferentes de los demás. Esto se hizo aplicando la Prueba de  $F$  (de Fisher) que utiliza la comparación de las dos estimaciones de la  $\sigma^2$  (variancia) calculando la razón de variancias (R.V. = cuadrado medio entre grupos / cuadrado medio dentro de grupos) y el valor crítico de  $F$  (que se verifica en las tablas correspondientes a los percentíles de la distribución de  $F_{.95}$ ). Este valor nos indica si se acepta o se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$  = todas las medias son iguales) con una probabilidad de error que generalmente es del 5% ( $\alpha = 0.05$ ). Si la R.V. es mayor al valor crítico de  $F$  se rechaza la  $H_0$ . El ANDEVA y la prueba de  $F$  se hicieron empleando un paquete estadístico comercial StatSoft, Inc. (2003).

La unidad de esfuerzo empleada en éste trabajo fue el lance de pesca de tal forma que la CPUE fue definida como captura por lance.

### **c.2) Estandarización del esfuerzo pesquero y cálculo de la captura por unidad de esfuerzo por áreas de 1°**

Una vez definidas las categorías, la estandarización del esfuerzo pesquero de la flota atunera mexicana se hizo siguiendo la metodología descrita por Ehrhardt (1981). Para cada categoría se generaron bases mensuales, trimestrales y anuales con datos de captura y esfuerzo. Estimando la CPUE por cuadrantes de 1°.

Es decir,

$$CPUE_n_t = \frac{\sum Cn_t}{\sum fn_t}$$

$CPUE_n_t$  = captura por unidad de esfuerzo nominal en el tiempo t

t = tiempo t (mes, trimestre o año).

$Cn_t$  = Captura nominal (toneladas) obtenida por toda la flota en el tiempo t

$fn_t$  = Esfuerzo nominal (número de lances ) en el tiempo t

Las bases de datos mensuales generadas con ésta información fueron empleadas para la elaboración de los mapas de distribución del esfuerzo pesquero.

Para estimar el poder relativo de pesca de cada categoría se consideró como categoría estándar aquella predominante en la flota y cuyos valores de CPUE fueran más constantes (Ehrhardt, 1981)

$$PRP_t = \frac{(CPUE_n_t)}{(CPUE_n_{ts})}$$

$PRP_t$  = Poder relativo de pesca en el tiempo t

$CPUE_n_t$  = CPUE nominal en el tiempo t

$CPUE_n_{ts}$  = CPUE nominal de la categoría estándar en el tiempo t

Multiplicando el poder relativo de pesca por el esfuerzo nominal se obtuvo el esfuerzo estandarizado de pesca.

$$FEP_t = PRP_t \cdot fn$$

$FEP_t$  = Esfuerzo estandarizado de pesca al tiempo t

$PRP_t$  = Poder relativo de pesca al tiempo t

$fn_t$  = Esfuerzo nominal de pesca al tiempo t

Una vez que se ha calculado el esfuerzo estandarizado se procedió a estimar la captura por unidad de esfuerzo estándar (CPUEe).

$$CPUEe_t = \frac{Cn_t}{FEP_t}$$

$CPUEe_t$  = Captura por unidad de esfuerzo estándar al tiempo t

$Cn_t$  = Captura total nominal en toneladas al tiempo t

$FEP_t$  = Esfuerzo estandarizado de pesca al tiempo t

Las bases generadas para el cálculo de la CPUEe trimestral fueron empleadas para la elaboración de los mapas de distribución de la abundancia relativa

### **c.3) Temperatura superficial del mar, asociada a la captura de atún**

Para observar el comportamiento mensual de largo plazo de la TSM del área de estudio (140° - 70° W; 20° S – 35° N) se obtuvieron datos mensuales por cuadrante de 1° desde enero de 1982 hasta diciembre de 1999 de la TSM de la base Reynolds (Reynolds y Smith, 1994), con los que se obtuvo un valor promedio mensual representativo de toda el área de estudio para cada año. Para cada mes se calculó el promedio general empleando la serie de datos completa; es decir, se promediaron los 18 eneros (de 1982 a 1999) y así sucesivamente. A cada valor mensual se le resto el promedio general para obtener la anomalía de largo plazo y observar el comportamiento general de la zona, para poder determinar que tan alejado o cercano a lo normal se encuentra cada año del período de estudio. Para visualizar este comportamiento general se graficaron estas anomalías en el tiempo (Figura 16).

Posteriormente, para conocer el comportamiento mensual de la CPUEe en relación con las anomalías de la TSM obtenidas de la base Reynolds, en particular de la zona conocida como Niño 3 (los datos de las anomalías de la temperatura a largo plazo fueron

bajadas de la página de Internet <http://www.cdc.noaa.gov/>), ambas variables se graficaron juntas (Figura 17).

Además, con el propósito de conocer la temperatura del agua en el momento de las capturas, que indirectamente nos habla de la temperatura que prefiere el atún y determinar que tan estrecha es ésta relación, se calculó la frecuencia relativa de la temperatura a la que se realizaron los lances sobre atún.

Se estimó la frecuencia relativa de la temperatura superficial del mar del área de estudio, que describe el valor (en porcentaje) de cuadrantes con los valores de TSM encontrados respecto del total. Es decir, del espectro de TSM registradas durante un mes determinado (ejm. desde 12 hasta 29 °C), nos dice el porcentaje de cuadrantes que presentaron una TSM determinada (ejm. del 100% de cuadrantes del área de estudio, 25% presentan una TSM de 29 °C), lo que nos permite determinar la TSM predominante del área de estudio (Figura 18).

Por otro lado, se calculó la frecuencia relativa de la temperatura de los cuadrantes donde hubo captura. Es decir, del total de cuadrantes donde hubo captura, se calculó el porcentaje de cuadrantes para todo el espectro de temperaturas registradas ese mes (ejm. el 2% de cuadrantes con capturas tuvieron una TSM de 17 °C). Lo que nos refleja la temperatura preferencial para el organismo, es decir aquellas en las cuales se realizaron las capturas respecto a las temperaturas prevalecientes en toda el área de estudio (Figura 18, 21, 24 y 27).

Este análisis se llevó a cabo de manera trimestral para observar el comportamiento estacional, donde

$$FRT_t = \frac{F_{asoc}}{FT}$$

$FRT_t$  = frecuencia relativa de temperatura superficial en el trimestre t

$F_{asoc. (a, b)}$  = frecuencia de temperatura superficial asociada a la captura de atún aleta amarilla

$FT$  = Frecuencia de temperatura superficial total en el área de estudio

Con la finalidad de representar de manera visual la distribución espacio-temporal de la temperatura y de la distribución del esfuerzo pesquero (CPUE) se elaboraron mapas trimestrales (Figuras 19, 22, 25, 28) para lo cual se utilizó un software comercial (Golden Software, Inc., 2000).

Así mismo, para determinar si había diferencias significativas entre la TSM promedio trimestral para los 4 años del período de estudio, se aplicaron análisis de variancia tanto a la TSM (base de Reynolds) como a la de la temperatura a la que se realizaron las capturas (Figuras 20, 23, 26 y 29), utilizando para ello un paquete estadístico comercial (StatSoft, Inc., 2003).

#### **c.4) Mapas de distribución del esfuerzo de pesca y de la abundancia relativa**

Los mapas de distribución se hicieron empleando las bases mensuales de datos de la CPUE para cada cuadrante del área de estudio. A cada mapa de distribución mensual del esfuerzo pesquero se le sobrepusieron imágenes de satélite de las anomalías de la TSM del mes correspondiente, con la finalidad de observar gráficamente los cambios espacio-temporales de la distribución del recurso en relación a las anomalías de la temperatura.

Los mapas de abundancia relativa se elaboraron empleando los datos trimestrales de la CPUE por cuadrante de 1°. En estos mapas se definieron 5 niveles de captura que representan la abundancia relativa del recurso en cada cuadrante de 1°, que van desde el esfuerzo sin captura, capturas < de 20 t, entre 20 y 100 t, 100 y 250 t y > 250 t. Esto nos permitió tener una primera imagen de la distribución de la abundancia del recurso. Estos mapas también fueron elaborados con la ayuda de un paquete de cómputo comercial (Golden Software, Inc., 2000).

#### **c.5) Árboles de Regresión (AR)**

Con el propósito de analizar con mayor precisión los datos de la captura (abundancia) en cuanto a la distribución espacial y temporal del atún asociado con variables ambientales, se empleó la función Árboles de Regresión (AR) o TREE (Breiman et al. 1984, Clark y Pregibon 1992, De'ath et al., 2000). Este método estadístico, considerado como un método analítico flexible y robusto, es útil cuando se utilizan datos ecológicos complejos que no se comportan de manera lineal y, a pesar de esto, tienen un alto grado de interacción entre sí.

La representación gráfica de los árboles de regresión permite la exploración rápida del comportamiento general de los datos, además de que permite localizar las principales zonas de interés, que en nuestro caso son los cuadrantes donde se obtuvieron las capturas más elevadas, que aquí identificamos como “centros de agregación” (CA), además de que presenta la información de forma resumida.

Este método puede ayudar a describir y predecir patrones de comportamiento, además de que representa una alternativa a muchas técnicas estadísticas tradicionales como la regresión múltiple, el ANOVA, la regresión logística, los modelos Log - Lineales, el análisis lineal discriminante, los modelos de supervivencia y los modelos lineales generalizados (GLM), ya que define relaciones que otros métodos no logran.

Los árboles de regresión funcionan de manera semejante a como trabajan las claves dicotómicas. El procedimiento inicia dividiendo los datos de la variable dependiente (en éste caso, los datos de captura y TSM) en grupos lo más homogéneo posible y mutuamente excluyentes, usando combinaciones de las variables independientes (como los datos de posición de los lances). Este procedimiento es conocido como *particionamiento recursivo binario*. Así, el árbol separa los datos en “*mayores que*” o “*menores que*” repetidamente (de acuerdo a un algoritmo) hasta que cada nodo es lo más homogéneo posible o contiene 5 observaciones o menos (Clark y Pregibon, 1992).

Para su aplicación se usó un software estadístico (Statistical Science, 1994). Las bases de información utilizadas corresponden a 16 bases trimestrales. Los primeros AR se hicieron combinando los datos de ubicación geográfica de los lances (latitud - longitud) con los datos obtenidos de la CPUEe.

Dado que el tamaño de los AR que se obtuvieron por primera vez fue muy grande y debido a que el método busca calcular la menor *deviance* (medida de la heterogeneidad de un conjunto de datos o nodo. Un nodo perfectamente homogéneo = datos iguales tiene *deviance* cero) que se obtiene con el mayor número de nodos, éstos fueron recortados o “podados” empleando la función *PRUNE*, la cual da la opción de reducir el número de nodos o ramificaciones a un tamaño óptimo, perdiendo el mínimo de información y consiguiendo la menor *deviance* posible (Clark y Pregibon, 1992; Mathsoft, 1999).

## VI. RESULTADOS:

### a) Características y actividad pesquera de las embarcaciones de la flota atunera mexicana de cerco

La información analizada correspondió a 17 tamaños de embarcaciones que fluctuaron entre 76 y 1350 toneladas de capacidad de acarreo. Entre 1996 y 1999 operaron 65 embarcaciones, de las cuales las de 1090 t fueron las más numerosas (21), seguidas por las de 680 t (15) (Figura 6).

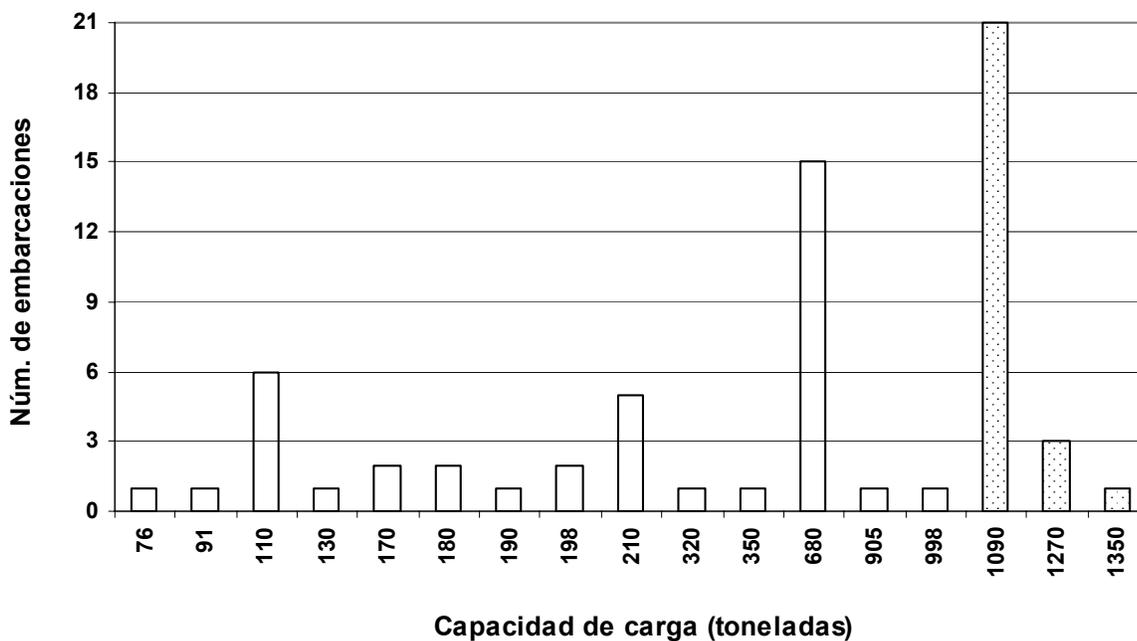


Figura 6. Composición de la flota atunera mexicana de acuerdo a su capacidad de acarreo durante 1996 – 1999. En el extremo derecho están las embarcaciones de la categoría 2 o estándar (>1000 toneladas de capacidad de acarreo).

## b) Estandarización del esfuerzo y determinación de categorías

El análisis de variancia de la CPUEn por tamaño de embarcación mostró diferencias significativas ( $F_{(15,17775)} = 95.97$ ,  $p < .05$ ) determinándose a través de un análisis de comparaciones múltiples (Tukey) dos categorías: la categoría 1 integrada por embarcaciones menores de 1000 toneladas de capacidad de acarreo, que representan el 62% de la flota y la categoría 2 por embarcaciones mayores de 1000 toneladas que constituyen el 38% (Figura 7). Aunque la segunda categoría no fue la más numerosa, sí fue la más homogénea en cuanto a sus características físicas (capacidad de acarreo), y la que empleó los mayores avances tecnológicos (lanchas rápidas, helicóptero, información vía satélite). El 78% de las capturas totales se obtuvo por ésta categoría, además de que registró los valores de CPUEn más altos, por lo que se consideró a ésta como la categoría estándar (poder de pesca de 1.0). El poder relativo de pesca de la categoría 1 fue en promedio de 0.42.

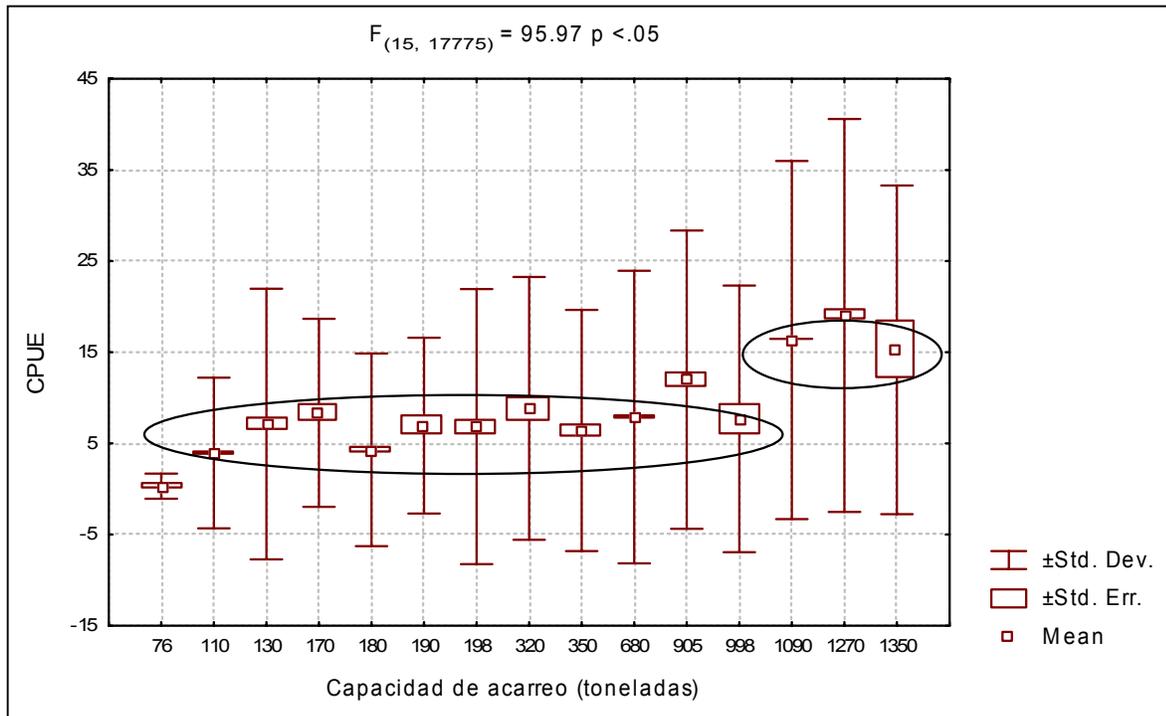


Figura 7. CPUEn de las diferentes embarcaciones de la flota atunera mexicana entre 1996 y 1999. Los óvalos encierran a los dos grupos de embarcaciones cuyo promedio de captura es más parecido entre sí.

El número total de embarcaciones de la flota atunera mexicana que participaron en las actividades pesqueras entre 1996 y 1999, agrupadas por año y categoría, se presentan en la Figura 8. De acuerdo a la CIAT en esos años México participó con un total de 57, 54, 53 y 54 embarcaciones. Es decir, la muestra con la que se realizó este trabajo representa el 86, 81, 87 y 85% respectivamente del total de la flota atunera mexicana (CIAT, 1998, 1999, 2000, 2001).

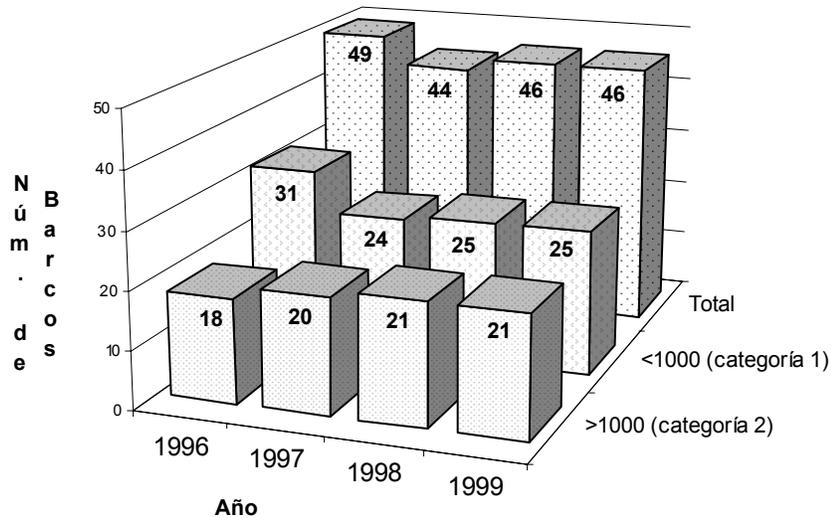


Figura 8. Número total de embarcaciones de la flota atunera mexicana que participaron durante 1996 –1999 agrupados por año y categoría.

Las embarcaciones de la categoría 1 (< 1000 t) realizaron un mayor número de viajes al año que las de la categoría 2 (> 1000 t) con 104.5 y 87.5 viajes promedio respectivamente. Debido a su menor autonomía, la duración promedio por viaje en las embarcaciones de la categoría 1 fue menor (21.8 días) que los de la categoría 2 (36.1 días) (Tabla 1).

Tabla 1. Número de embarcaciones, viajes y días efectivos de pesca por categoría de embarcación durante 1996-1999.

Año	Número de barcos			Número de viajes			Días efectivos de pesca		
	C 1 < 1000 t	C 2 > 1000 t	Total	C 1 < 1000 t	C 2 > 1000 t	Total	C 1 < 1000 t	C 2 > 1000 t	Total
1996	31	18	49	124	89	213	2365	2889	5254
1997	24	20	44	90	96	186	2109	3264	5373
1998	25	21	46	109	86	195	2543	3275	5818
1999	25	21	46	95	79	174	2036	3203	5239
promedio	26.25	20	46.25	104.5	87.5	192	2263.25	3157.75	5421

Tabla 1. Continuación.....

Año	Promedio de días efectivos de pesca x barco (días/barcos)			Promedio duración de un viaje (días/viajes)		
	C 1 (< 1000 t)	C 2 (> 1000 t)	Total	C 1 (< 1000 t)	C 2 (> 1000 t)	Total
1996	76.3	160	107.2	19	32	24.6
1997	87.8	163.2	122	23.4	34	28.9
1998	101.7	156	126	23.3	38	29.8
1999	81.4	152.5	113.8	21.4	40.5	30.1
promedio	86.8	157.9	117.3	21.8	36.1	28.4

Las capturas por categoría de embarcación se presenta en la Figura 9, donde se aprecia que las de la categoría 1 capturaron en promedio 16 626 (21.5%) toneladas anuales, en tanto que las de la categoría 2 obtuvieron 60 771 t (78.5%). Las capturas más bajas se registraron durante 1998 en ambas categorías.

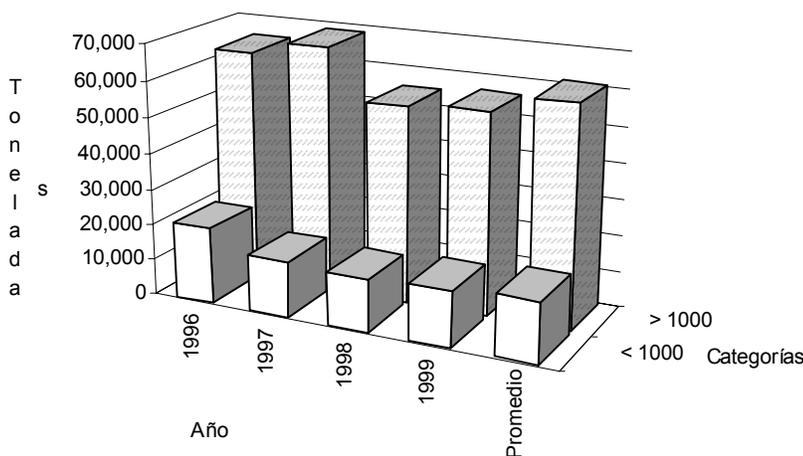


Figura 9. Capturas anuales de la flota atunera mexicana, por categoría de embarcación, para el periodo de 1996 a 1999.

### c) Esfuerzo pesquero

Los valores de esfuerzo (nominal y estandarizado) así como la captura por unidad de esfuerzo (nominal y estandarizada) se presentan en la Tabla 2. El esfuerzo estandarizado anual aumentó de 1996 a 1998, disminuyendo notoriamente en 1999. A pesar de que en 1998 se aplicó el mayor esfuerzo, la CPUEe fue la más baja del periodo. En promedio, el

21.5% del esfuerzo estandarizado lo realizaron las embarcaciones de la categoría 1 y el 78.5% las de la categoría 2 (Figura 10).

Tabla 2. Captura total, esfuerzo (nominal y estandarizado), CPUE (nominal y estandarizada).

Año	Captura Total (toneladas)	Esfuerzo nominal (F) (lances)	CPUE (t/l)	Esfuerzo estandarizado de pesca	CPUE estandarizada (t/le)
1996	85595	5893	14.52	4417.55	19.37
1997	83809	5839	14.35	4592.50	18.24
1998	<b>69063</b>	<b>6052</b>	<b>11.39</b>	<b>4643.59</b>	<b>14.87</b>
1999	71122	5392	13.19	4242.14	16.76
Total	309589.00	23176.00	53.45	17895.78	
Promedio	77397.25	5794.00	13.36	4473.95	17.31

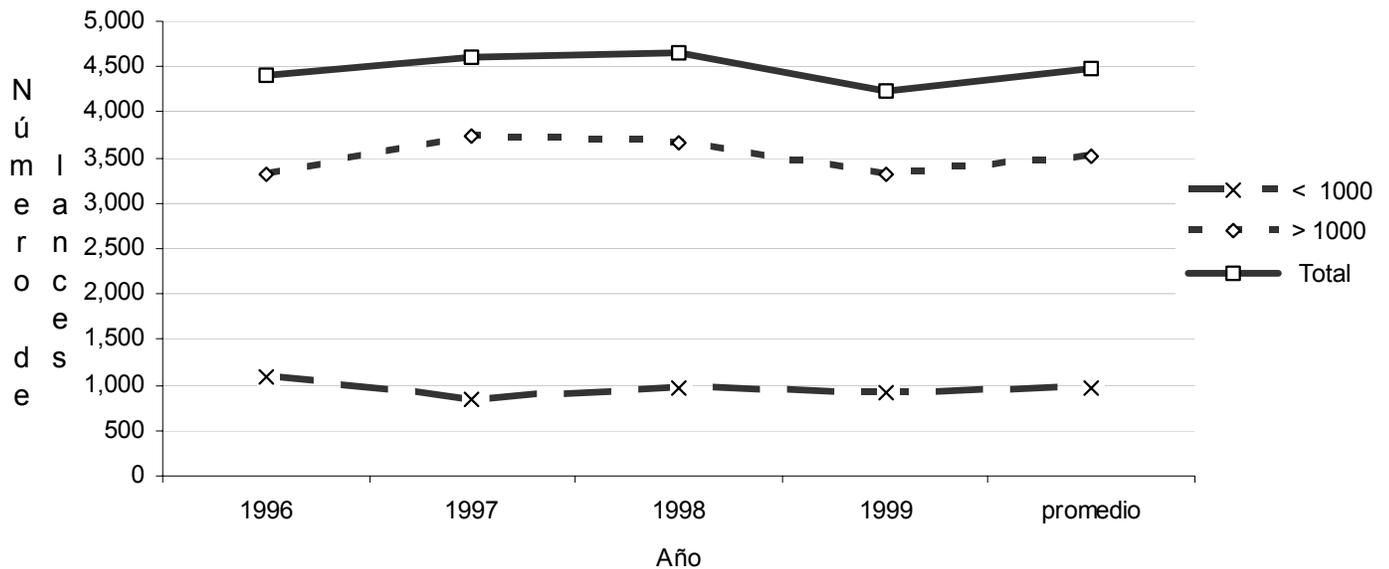


Figura 10. Esfuerzo estandarizado anual por categoría de embarcación.

La serie del esfuerzo estandarizado mensual realizado por la flota durante los cuatro años de estudio se presenta en la Figura 11. En general, durante el mes de marzo se registró un máximo y aunque se observa una recuperación de agosto a noviembre no se alcanza el nivel de marzo. Durante 1998 la distribución fue bimodal con valores similares en los máximos (marzo y octubre).

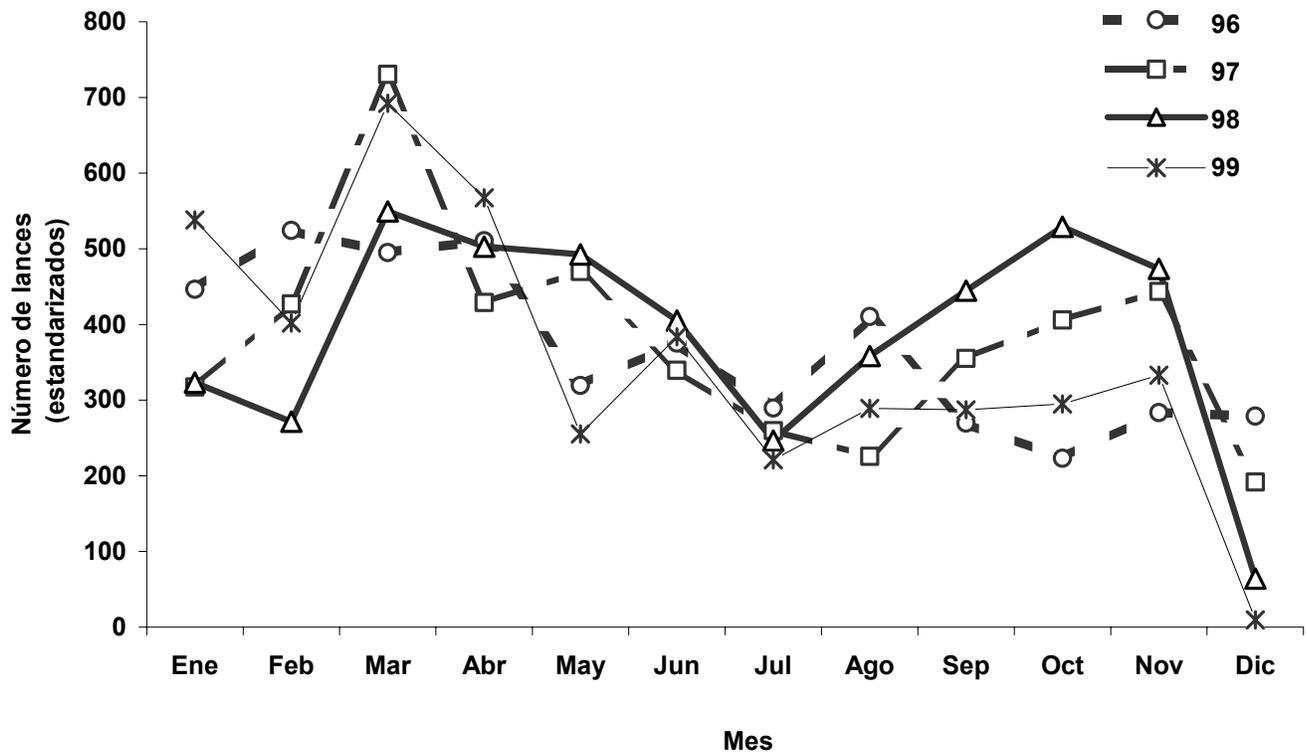


Figura 11. Esfuerzo estandarizado mensual realizado por la flota atunera mexicana durante 1996 – 1999.

### c.1) Captura por unidad de esfuerzo

La captura por unidad de esfuerzo promedio anual mostró diferencias significativas ( $F_{(3,4007)}=5.34$   $p<.0011$ ) (Figura 12). En particular, la prueba de comparaciones múltiples mostró que la CPUEe promedio obtenida durante 1998 fue significativamente más baja que las obtenidas en los otros años.

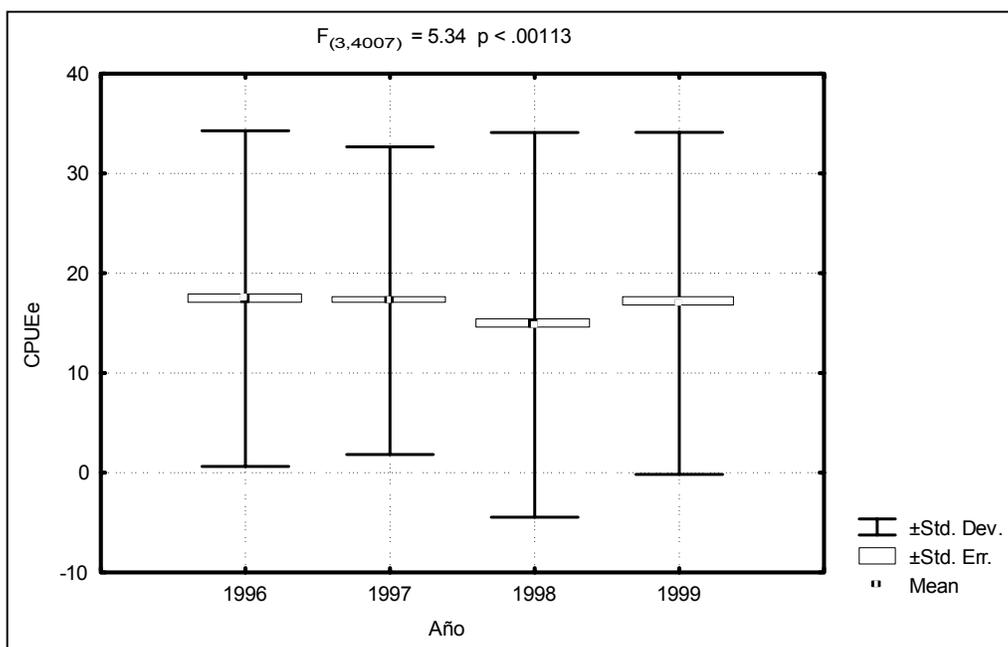


Figura 12. CPUEe promedio anual de la flota atunera mexicana que operó entre 1996 y 1999.

En general durante el primer semestre de cada año la CPUEe promedio fue mayor que la registrada en el segundo (Tabla 3).

Tabla 3. Muestra los valores de la CPUEe mensual agrupada por semestres así como el promedio y la desviación estándar de cada semestre

	1er Semestre	2do Semestre						
	1996	1996	1997	1997	1998	1998	1999	1999
	18.77	19.26	20.98	31.96	16.12	13.27	19.84	18.32
	20.38	16.01	20.39	16.51	10.46	14.19	18.06	16.51
	21.61	23.02	17.27	16.70	14.49	17.32	11.84	17.53
	19.78	22.25	19.12	13.76	15.26	13.16	18.61	17.13
	20.39	18.33	23.08	11.93	16.59	14.17	17.24	12.43
	20.59	10.68	17.48	10.53	17.07	9.07	17.91	12.60
media =	<b>20.25</b>	<b>18.26</b>	<b>19.72</b>	<b>16.90</b>	<b>15.00</b>	<b>13.53</b>	<b>17.25</b>	<b>15.75</b>
desv. estand. =	<b>0.94</b>	<b>4.52</b>	<b>2.22</b>	<b>7.78</b>	<b>2.41</b>	<b>2.65</b>	<b>2.79</b>	<b>2.58</b>

Al comparar estacionalmente con el total de datos, las capturas obtenidas en el segundo y tercer trimestre fueron significativamente más altas que las registradas en el primero y cuarto trimestre ( $F_{(3,4007)} = 9.72$   $p < .000$ ) (Figura 13). Los valores críticos de  $F_{(3, \infty)} = 2.6$  y para  $F_{(15, \infty)} = 1.67$ , por lo que valores mayores a éstos significan que si hay diferencias significativas entre los trimestres.

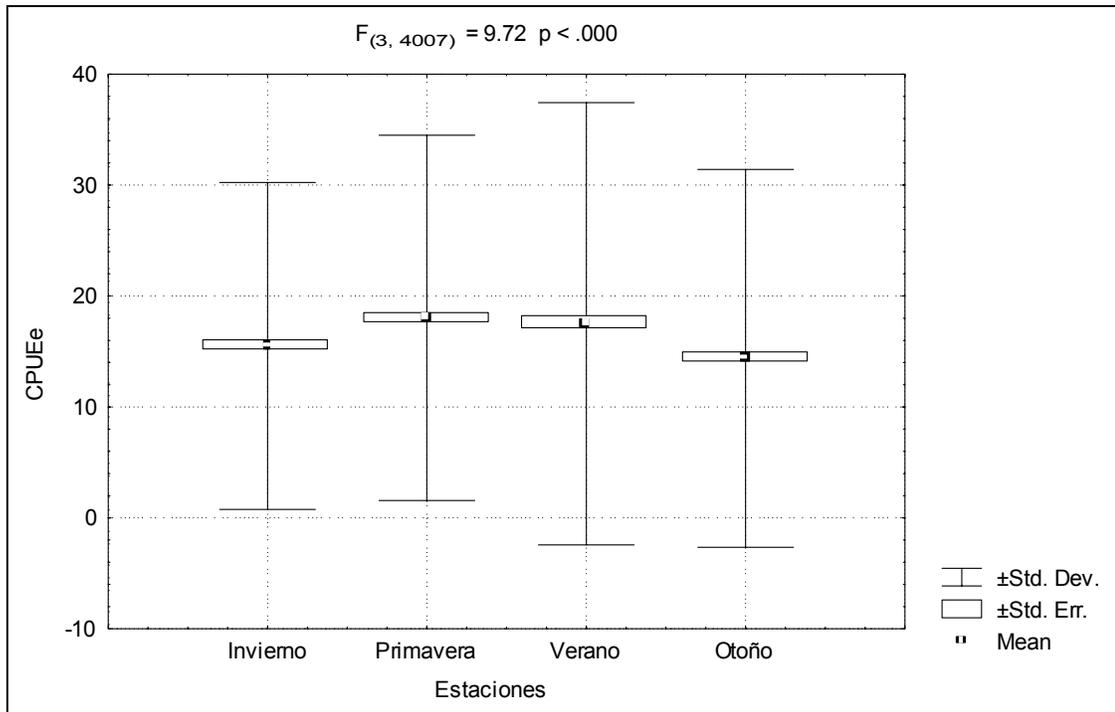


Figura 13. Captura por unidad de esfuerzo estandarizado promedio trimestral (estacional) para el periodo 1996 – 1999.

Comparando los valores de CPUEe correspondientes al primero, segundo, tercero y cuarto trimestre de los años analizados se encontraron diferencias significativas ( $F_{(15,3994)} = 5.69$   $p < .000$ ). En el primer trimestre la diferencia se dió debido a los bajos valores que se registraron durante 1998 y 1999, en el tercero por el valor de 1998, en tanto que en el cuarto fue debida al de 1997 (Figura 14).

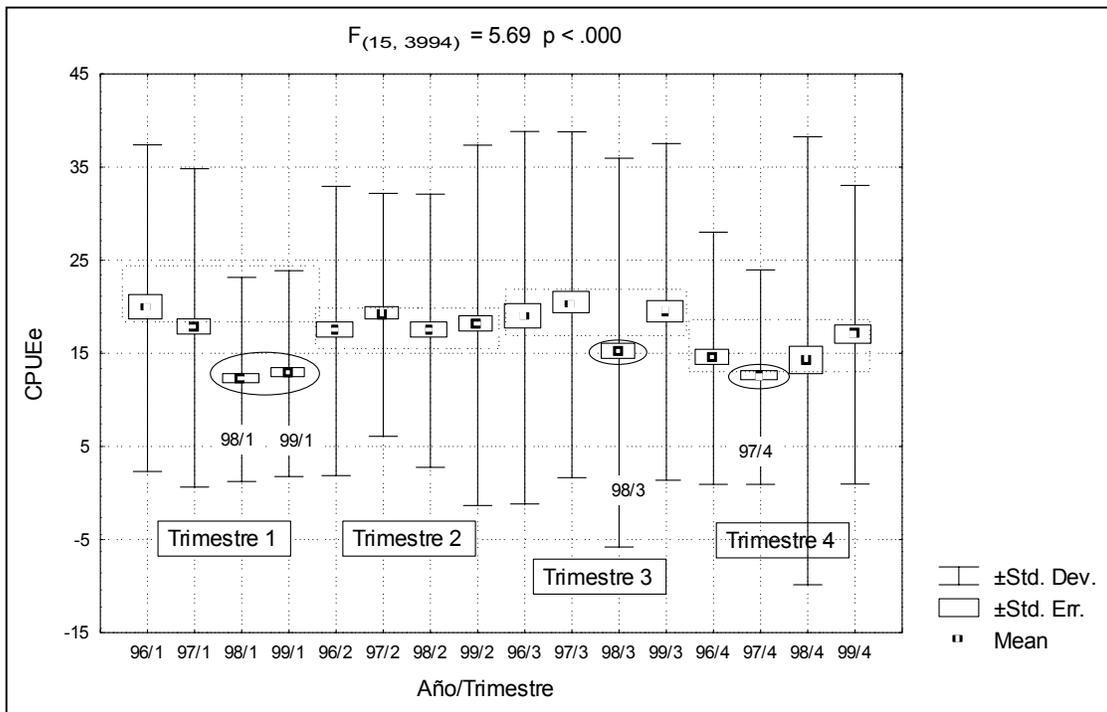


Figura 14. Captura por unidad de esfuerzo estandarizada promedio trimestral para el periodo de 1996 y 1999

La serie de la CPUEe promedio mensual para el periodo de estudio se presenta en la Figura 15. Se puede apreciar que de julio de 1997 y hasta diciembre de 1999 los valores estuvieron por abajo del promedio, excepto durante el mes de enero de 1999.

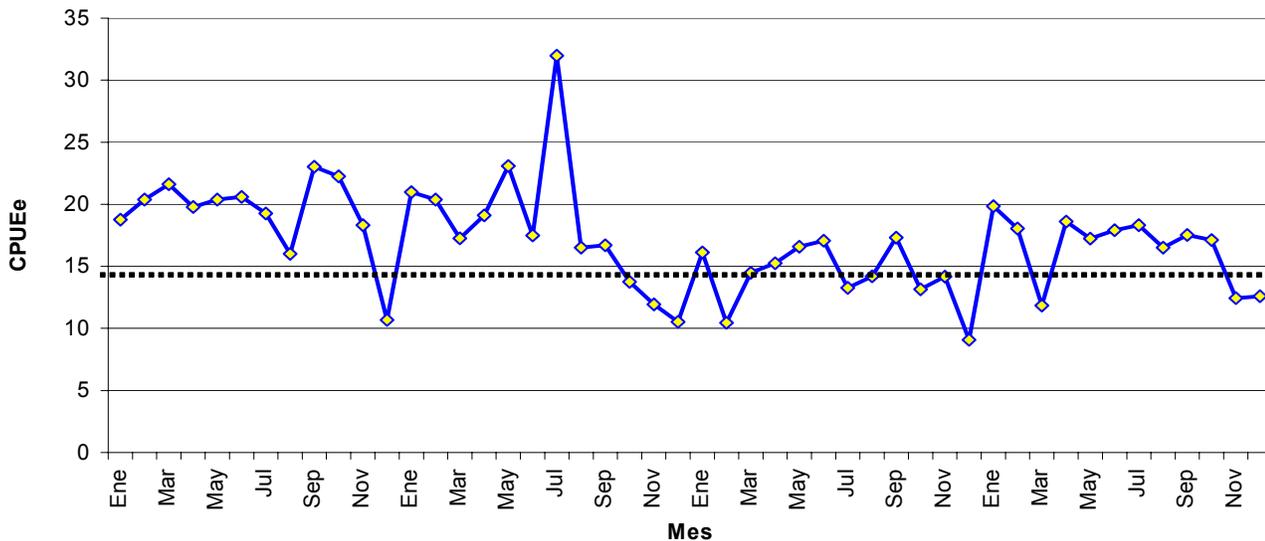


Figura 15. Comportamiento de la CPUEe estandarizada mensual entre 1996 y 1999 en relación a su promedio.

#### d) Análisis de la CPUEe y su relación con la TSM (temperatura asociada)

La Figura 16 muestra el comportamiento de la TSM (anomalías mensuales) del OPO, señalado por la serie de Reynolds para el periodo 1982 - 1999. Se observan las anomalías presentes durante El Niño 1982-1983, superadas por las registradas en El Niño 1997-1998. Se aprecian también dos eventos importantes de La Niña (1984 - 1985 y 1988 - 1989), además de condiciones de una Niña muy débil que se prolonga hasta 1996, por lo que a este último año se le ha considerado muy cercano a los valores promedio, que nos permite considerarlo como un año normal.

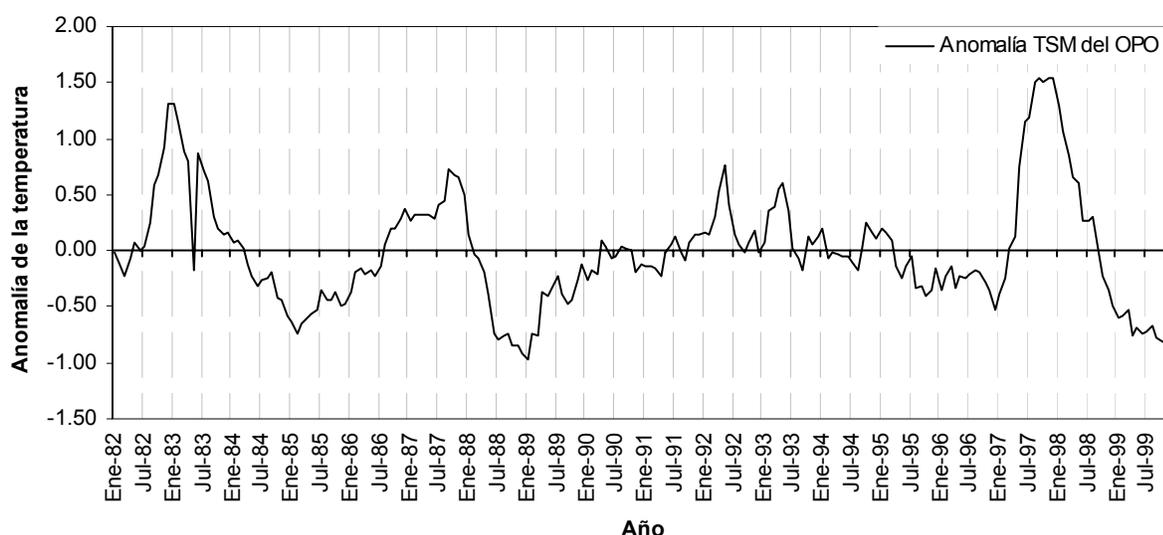


Figura 16. Anomalia de la TSM del OPO (70° - 140° W; -20° S - 30° N) calculada a partir de la base de Reynolds.

En la Figura 17 se presentan las anomalías promedio mensual de la CPUEe junto con las anomalías de la TSM de la serie Reynolds. Durante 1996 y el primer semestre de 1997, cuando las anomalías de TSM fueron ligeramente negativas, las anomalías de la CPUEe fueron positivas, excepto diciembre de 1996.

A partir de agosto de 1997 las capturas disminuyeron drásticamente y se mantuvieron por abajo del promedio hasta diciembre de 1999. Las máximas anomalías negativas de las capturas se observaron a fines de 1997 y principios de 1998, cuando la TSM estuvo 3 °C por arriba del promedio. En abril de 1998 se alcanza la máxima anomalía de la TSM, llegando aproximadamente a 4 °C por arriba del promedio. La presencia del evento La Niña se

empieza a registrar en julio con la TSM ligeramente por abajo del promedio. Durante 1999 las capturas continuaron por abajo del promedio, sin embargo las anomalías ya no son tan grandes, lo que podría considerarse como una leve mejoría en las capturas. Los valores bajos de las capturas que se registraron en los dos últimos meses de 1998 y 1999 fue por el establecimiento de la veda.

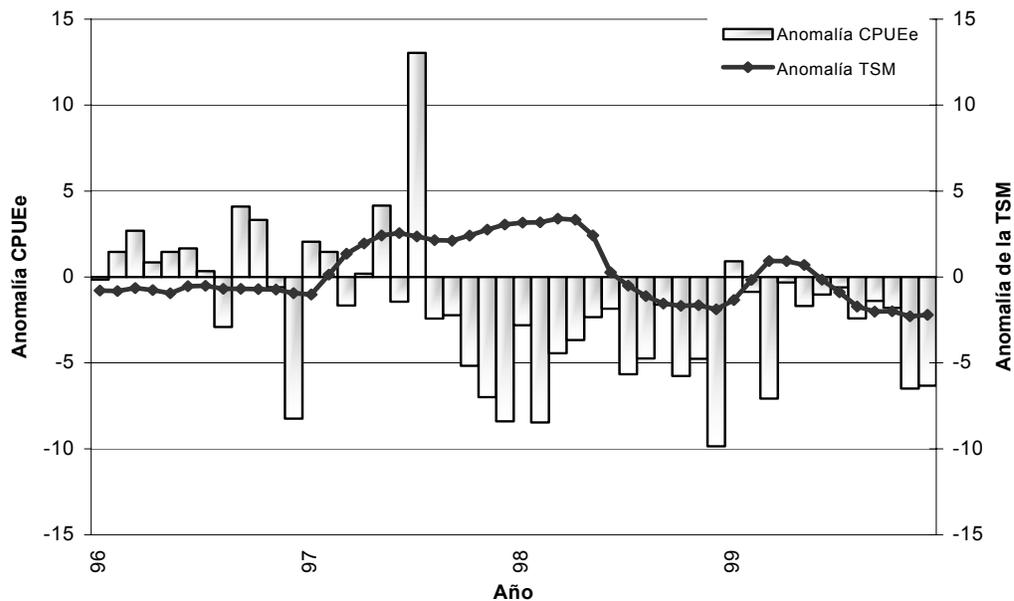


Figura 17. Anomalía de la CPUEe mensual acoplada con la anomalía de la TSM de El Niño 3 (entre los 5°N y 5° S de los 95° a los 140° W) de la base Reynolds

Las frecuencias relativas por trimestre (temperatura asociada a la captura/ temperatura del POT) se presentan en las figuras 18 a 29 para el primero, segundo, tercero y cuarto trimestre respectivamente. Durante el primer trimestre de 1996 y 1997 la mayoría de los lances (entre el 78 y el 80%) se realizaron entre los 25 y 27 °C, con una marcada preferencia por temperaturas entre 25 y 27 °C (Figura 18A-B y 19A-B). En 1998 (Figura 18C y 19C colores rojos), las condiciones en el OPO fueron considerablemente más cálidas ( $F_{(3,10916)} = 65.3$   $p < 0.05$ ) (Figura 20A), la mayoría de las capturas se realizaron en áreas con temperaturas de 28 °C (Figura 18C línea) y se notó un ligero incremento de lances en áreas con temperaturas entre 23 - 24 °C, aunque éste no fue significativo ( $F_{(3,816)} = 2.15$   $p < .09$ ) (Figuras 20B).

Durante el segundo trimestre de 1997 y 1998 las condiciones cálidas fueron muy marcadas, predominando temperaturas superiores a los 28 °C (Figura 21B-C y 22B y C), siendo este incremento significativo ( $F_{(3,10916)} = 121.2$   $p < .05$ ) (Figura 23A); durante 1997 el mayor esfuerzo se aplicó en áreas de 28 °C en tanto que en 1998 fue en áreas de 26 °C, difiriendo significativamente respecto a 1996 y 1999 ( $F_{(3,957)} = 10.55$   $p < .05$ ) (Figura 23B).

Las condiciones cálidas generadas por el fenómeno de El Niño fueron aún más evidentes durante el tercer trimestre de 1997, cuando aumenta el área que presenta una temperatura de 28 °C, siendo en estas aguas donde se aplicó el mayor esfuerzo (Figura 24B y 25B). En este trimestre, la temperatura fue significativamente superior a la de los otros años ( $F_{(3,10916)} = 274.33$   $p < .05$ ) (Figura 26A). Además, en cuanto a la temperatura a la que se realizó el mayor esfuerzo, el tercer trimestre de 1997 fue significativamente distinto de 1996, 1998 y 1999 ( $F_{(3,918)} = 3.77$   $p < .05$ ) (Figura 26B). Las condiciones del OPO regresan a la normalidad en 1998 y 1999, manteniéndose el esfuerzo entre los 27 y 28 °C (Figura 24C-D, 25C-D y 26 A-B).

Durante el cuarto trimestre de 1997 las condiciones cálidas de El Niño cubren una mayor extensión del OPO con temperaturas de 28 °C, donde se realizó el mayor esfuerzo (Figuras 27B y 28B), haciéndolo significativamente diferente de los demás años ( $F_{(3,10916)} = 412.3$   $p < .05$ ) (Figura 29A). En 1997 el esfuerzo se concentró en áreas donde la temperatura fue de 28 °C, significativamente diferente de los demás años ( $F_{(3,958)} = 52.39$   $p < .05$ ) (Figura 29B). Durante 1998 y 1999 las condiciones regresan a la normalidad, aunque en éste último año el esfuerzo estuvo localizado en áreas donde la temperatura fue de 26 ° y 27 °C (Figura 27C-D).

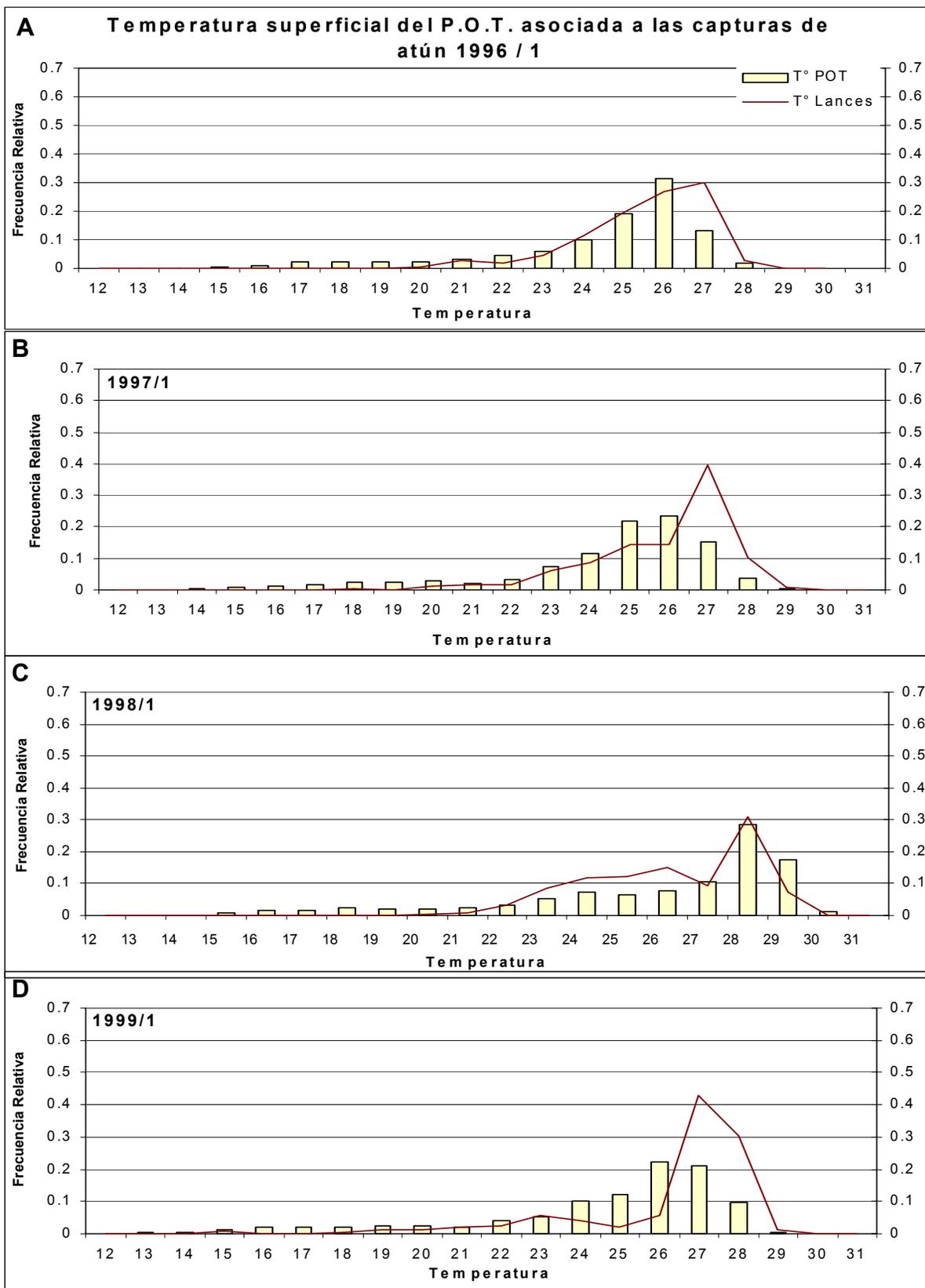


Figura 18. Frecuencia relativa de la TSM y de la temperatura asociada a los lances de pesca en el Océano Pacífico Oriental para el primer trimestre de 1996 – 1999.

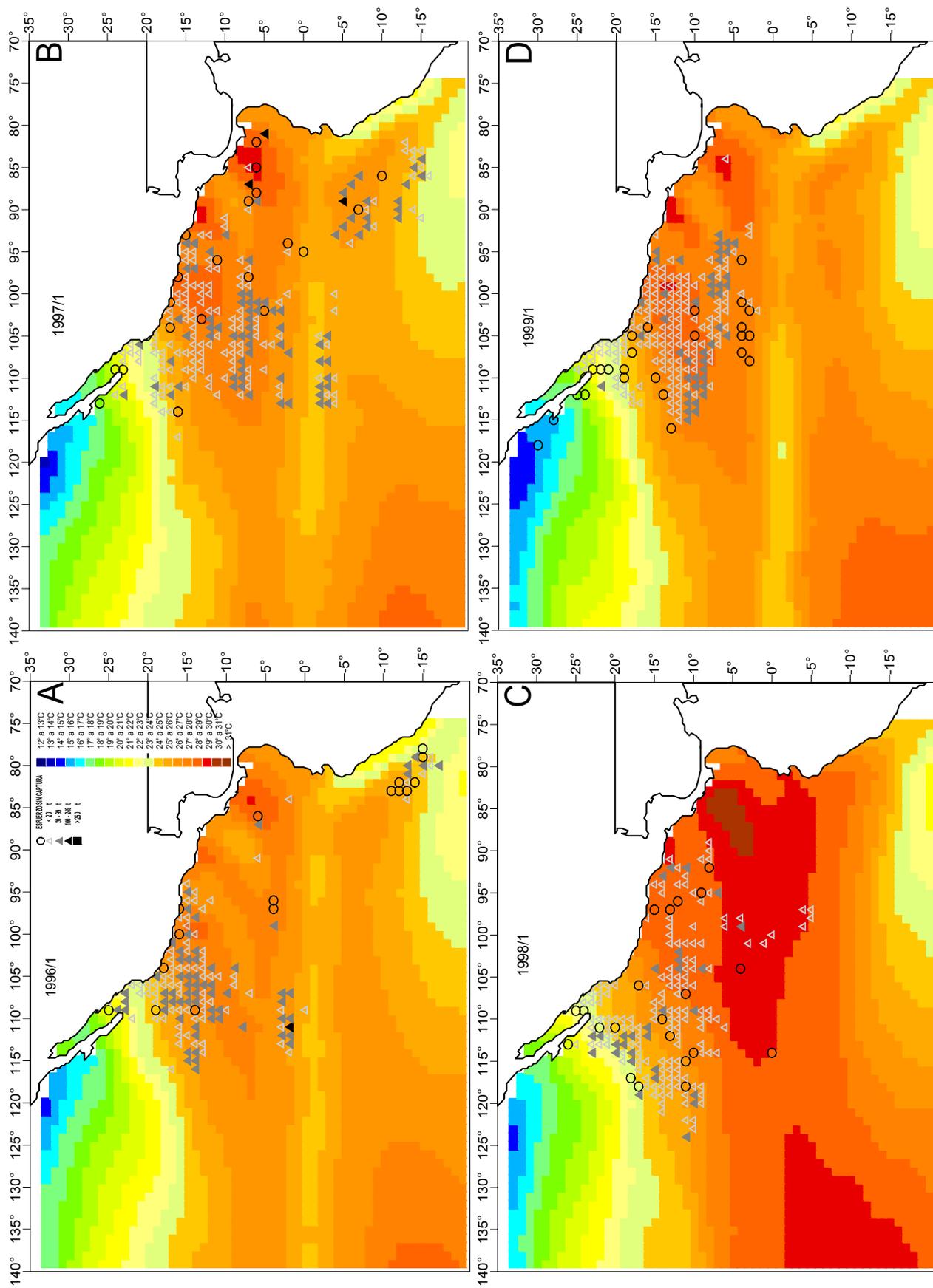


Figura 19 A - D. Imágenes de la temperatura superficial del mar asociada a los lances de atún aleta amarilla durante el primer trimestre de 1996 - 1999

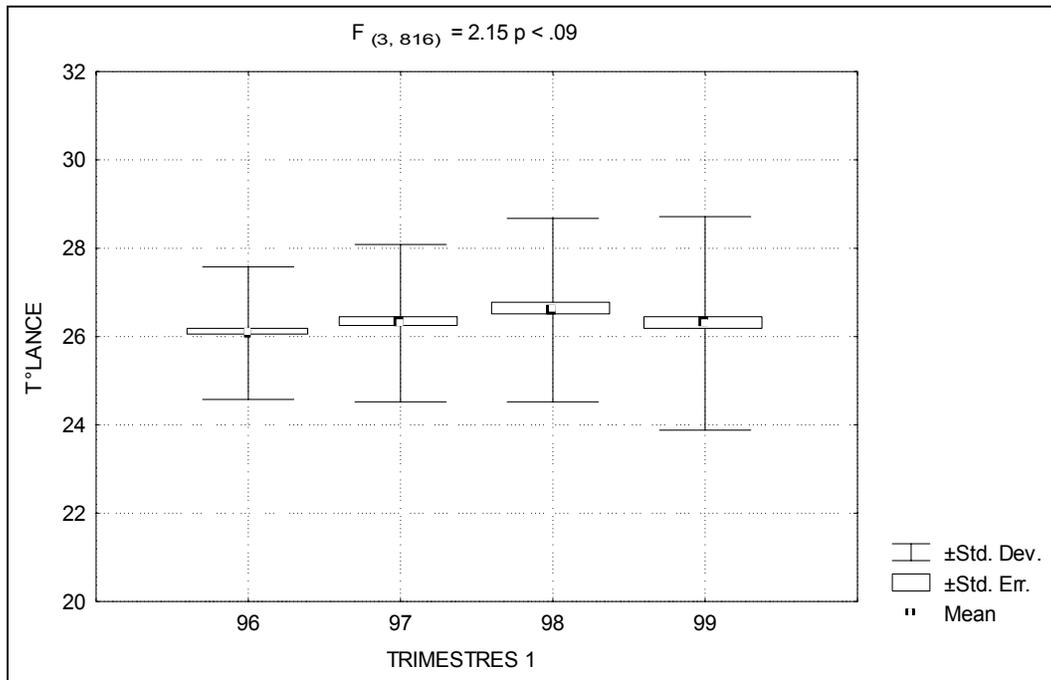
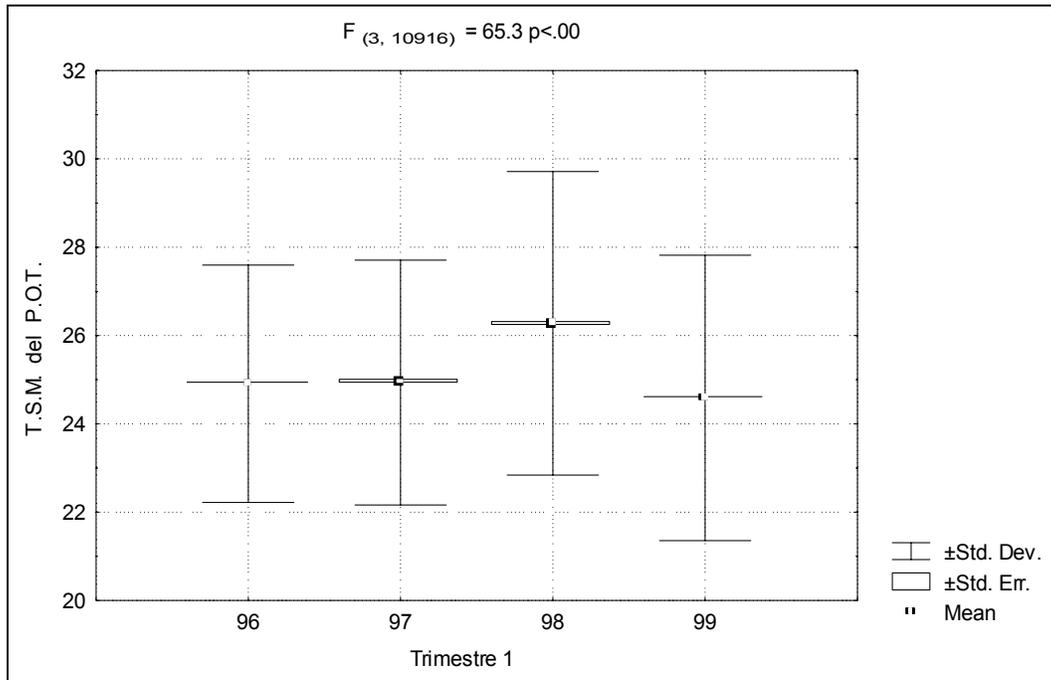


Figura 20. A) Análisis de varianza (ANDEVA) de la TSM del POT durante el primer trimestre de 1996 a 1999. B) ANDEVA de la TSM de los lances de pesca realizados por la flota atunera mexicana durante el primer trimestre de 1996 a 1999

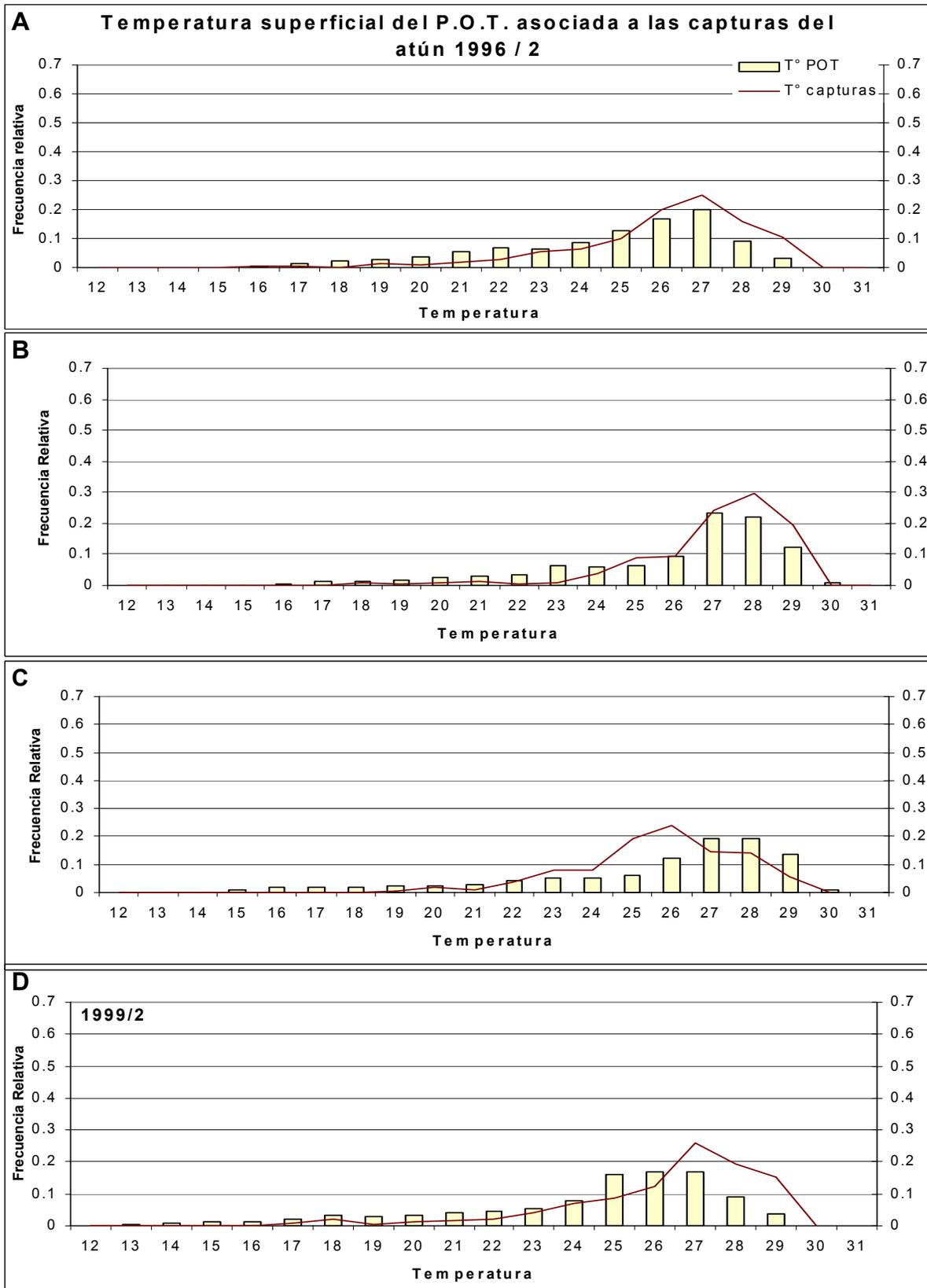


Figura 21. Frecuencia relativa de la TSM y de la temperatura asociada a los lances de pesca en el Océano Pacífico Oriental para el segundo trimestre de 1996 – 1999.

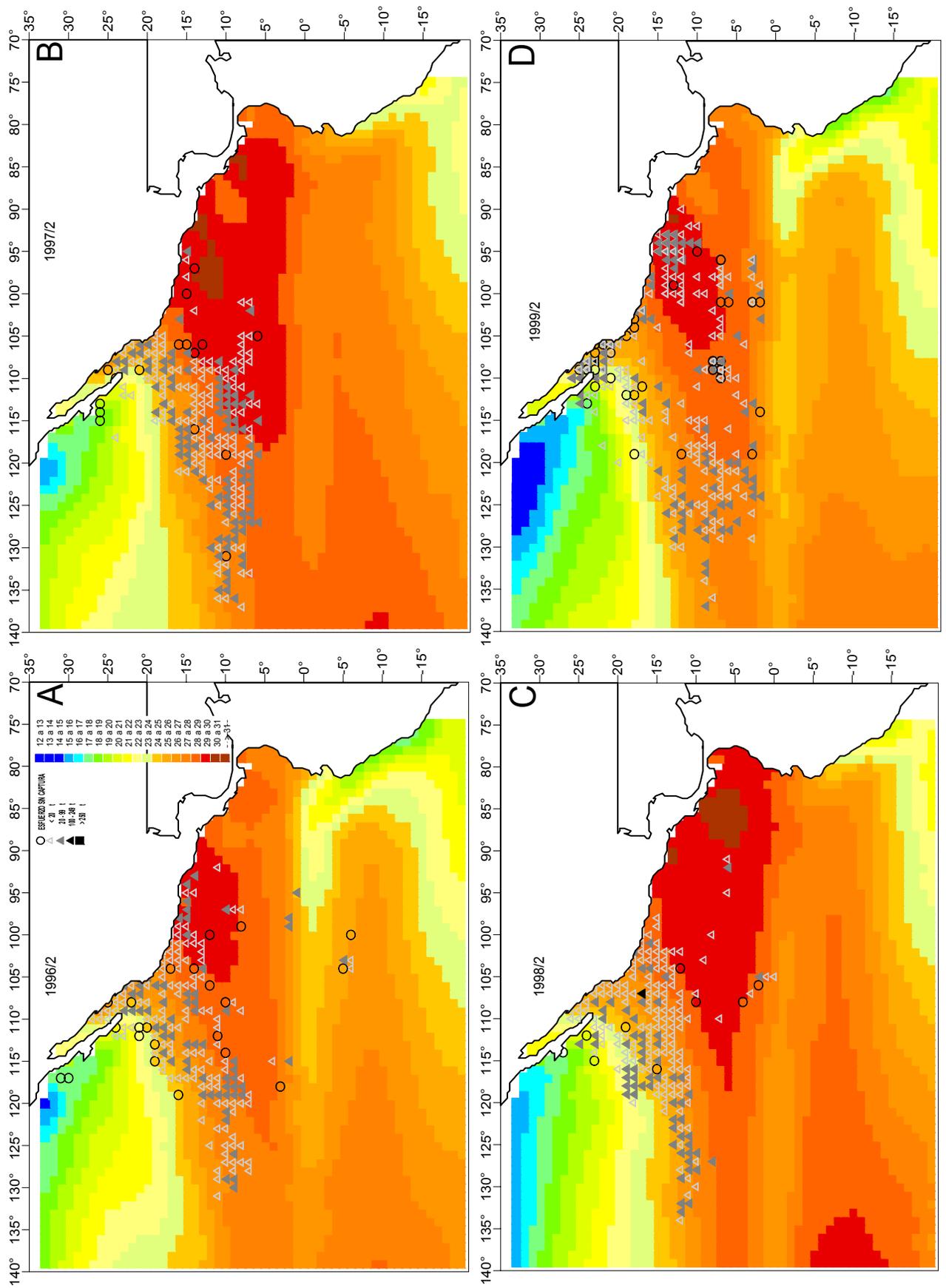


Figura 22 A - B. Imágenes de la temperatura superficial del mar asociada a los lances de atún aleta amarilla durante el segundo trimestre de 1996 - 1999

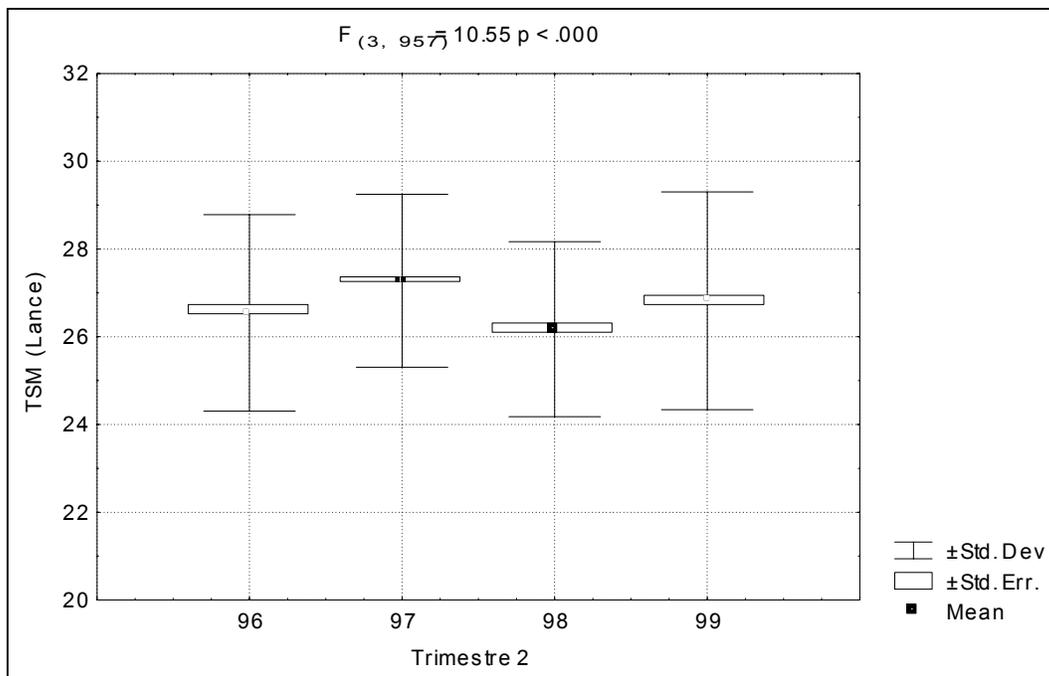
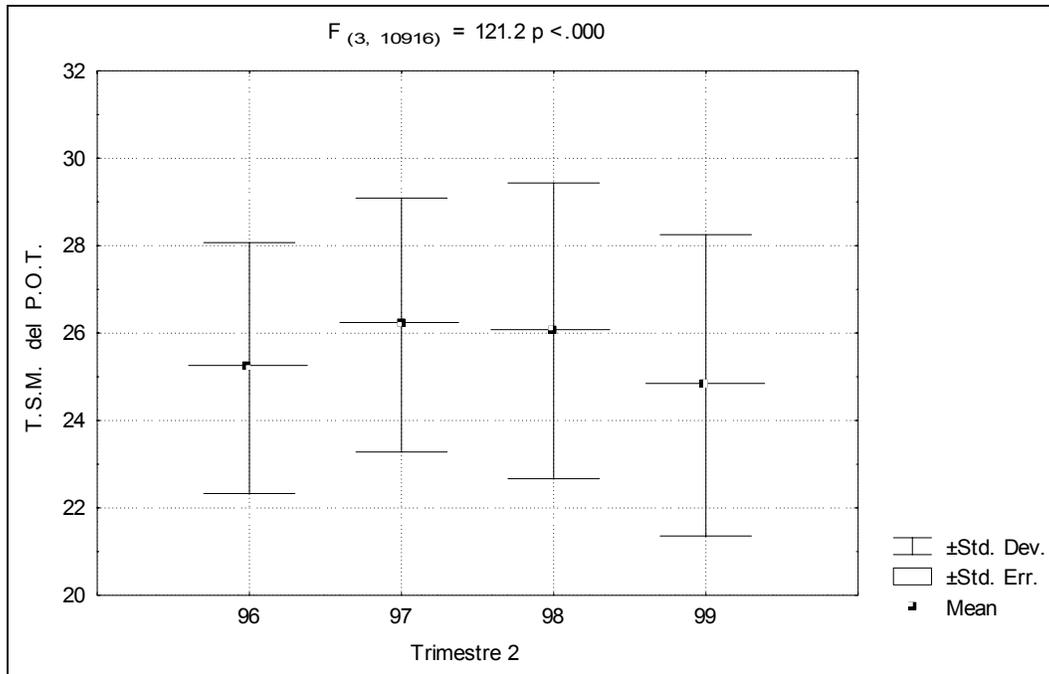


Figura 23. A) Análisis de varianza (ANDEVA) de la TSM del POT durante el segundo trimestre de 1996 a 1999. B) ANDEVA de la TSM de los lances de pesca realizados por la flota atunera mexicana durante el segundo trimestre de 1996 a 1999

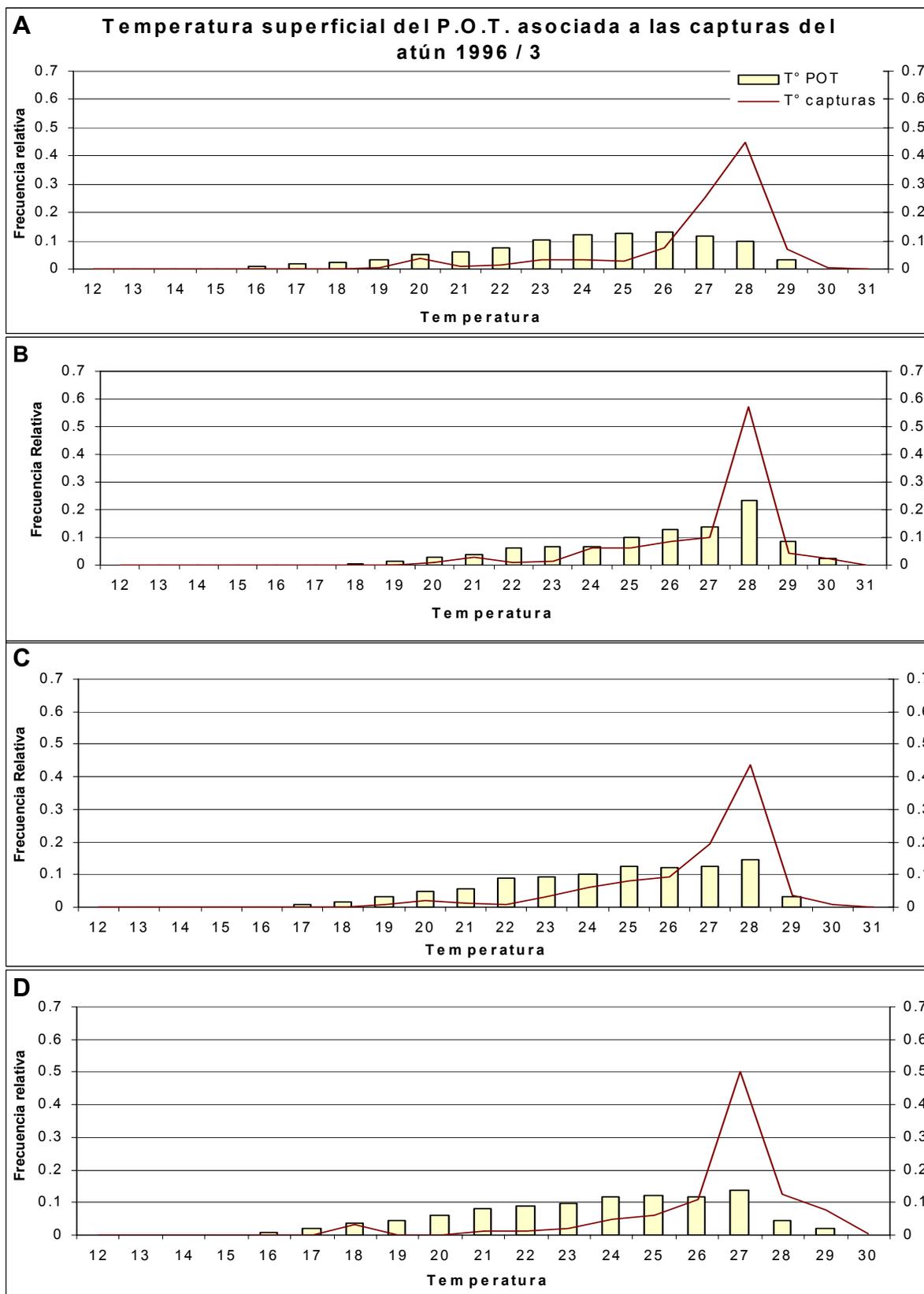


Figura 24. Frecuencia relativa de la TSM y de la temperatura asociada a los lances de pesca en el Océano Pacífico Oriental para el tercer trimestre de 1996 – 1999.

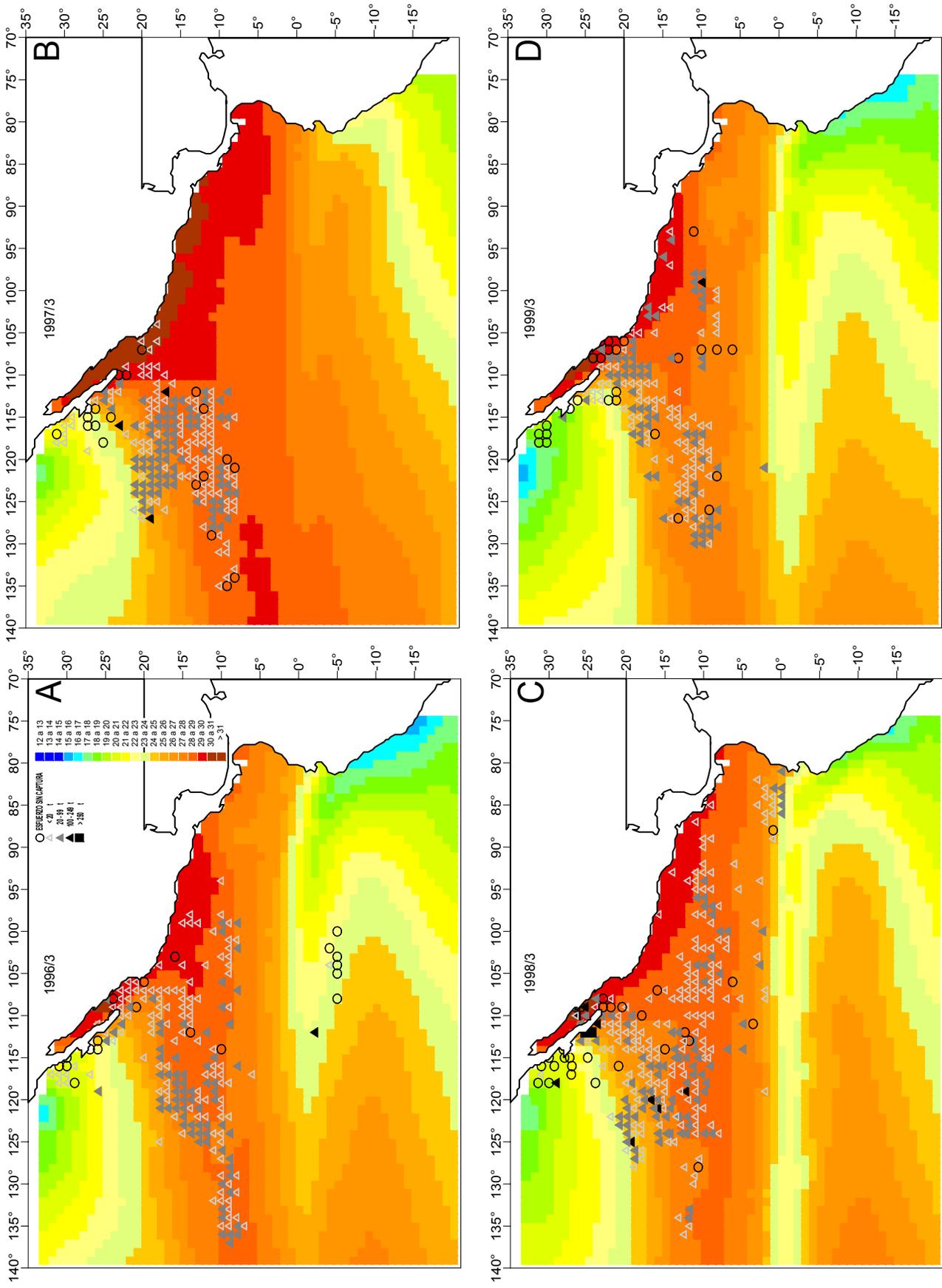


Figura 25 A - D. Imágenes de la temperatura superficial del mar asociada a los lances de atún aleta amarilla durante el tercer trimestre de 1996 - 1999

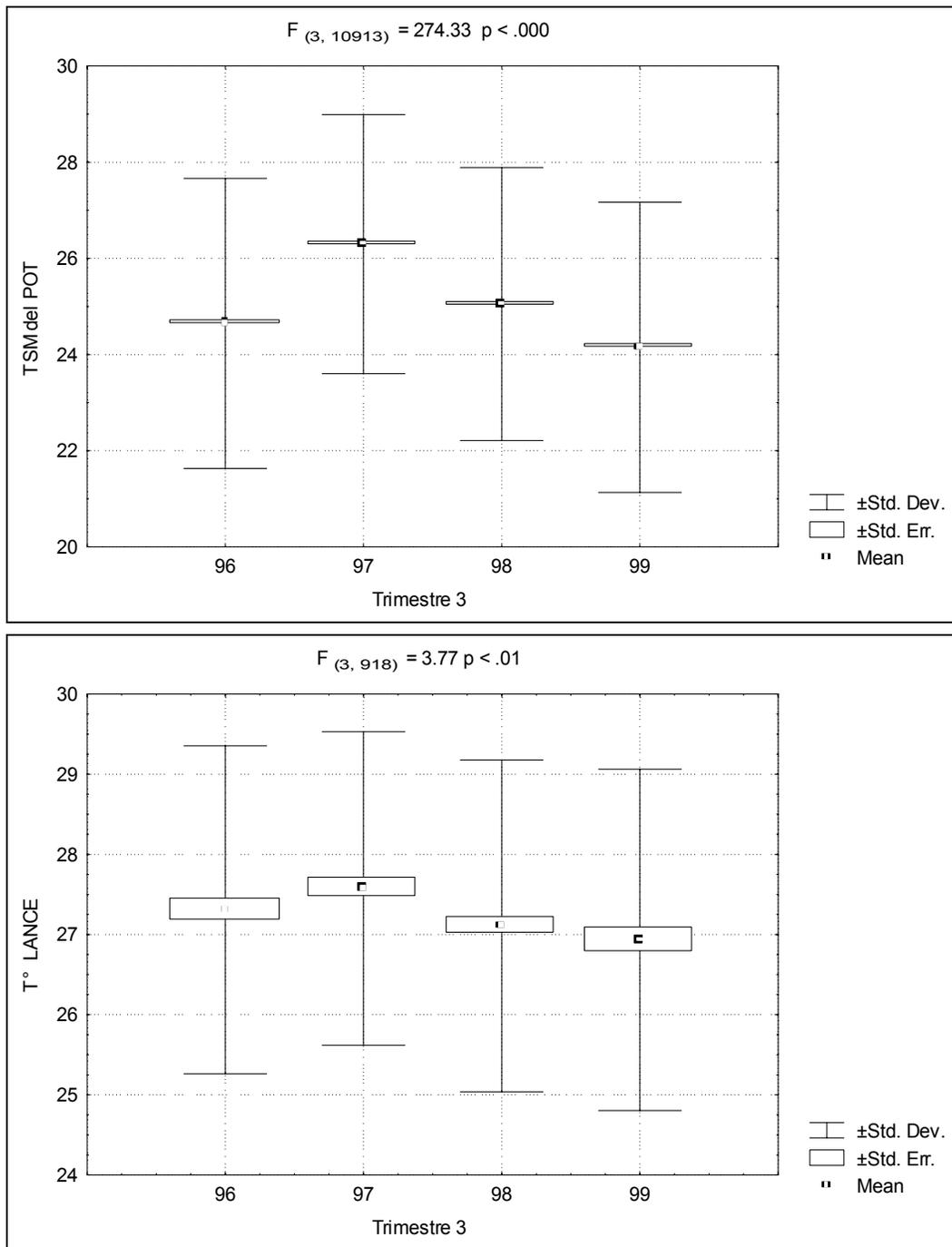


Figura 26. A) Análisis de varianza (ANDEVA) de la TSM del POT durante el tercer trimestre de 1996 a 1999. B) ANDEVA de la TSM de los lances de pesca realizados por la flota atunera mexicana durante el tercer trimestre de 1996 a 1999

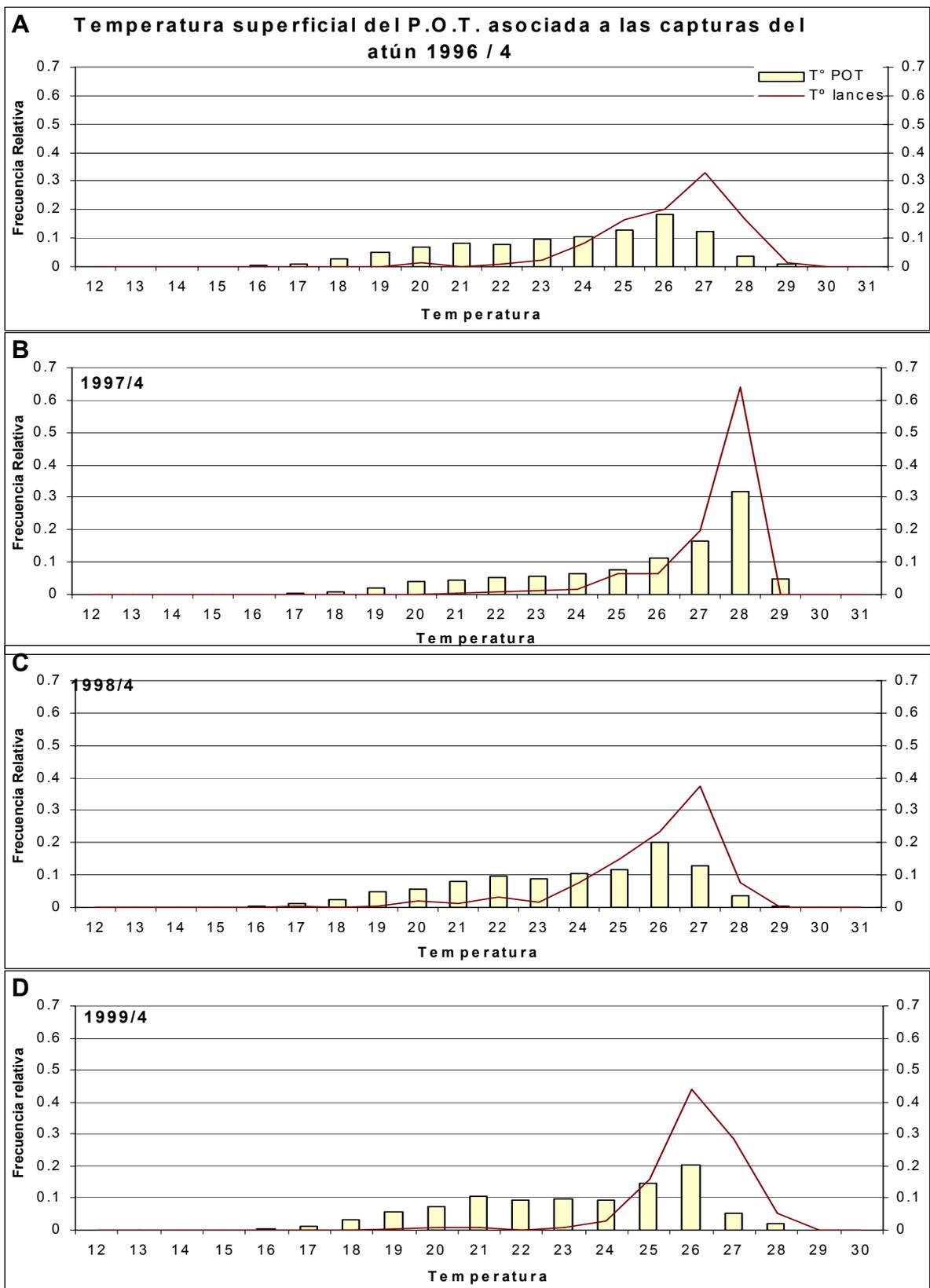


Figura 27. Frecuencia relativa de la TSM y de la temperatura asociada a los lances de pesca en el Océano Pacífico Oriental para el cuarto trimestre de 1996 – 1999.



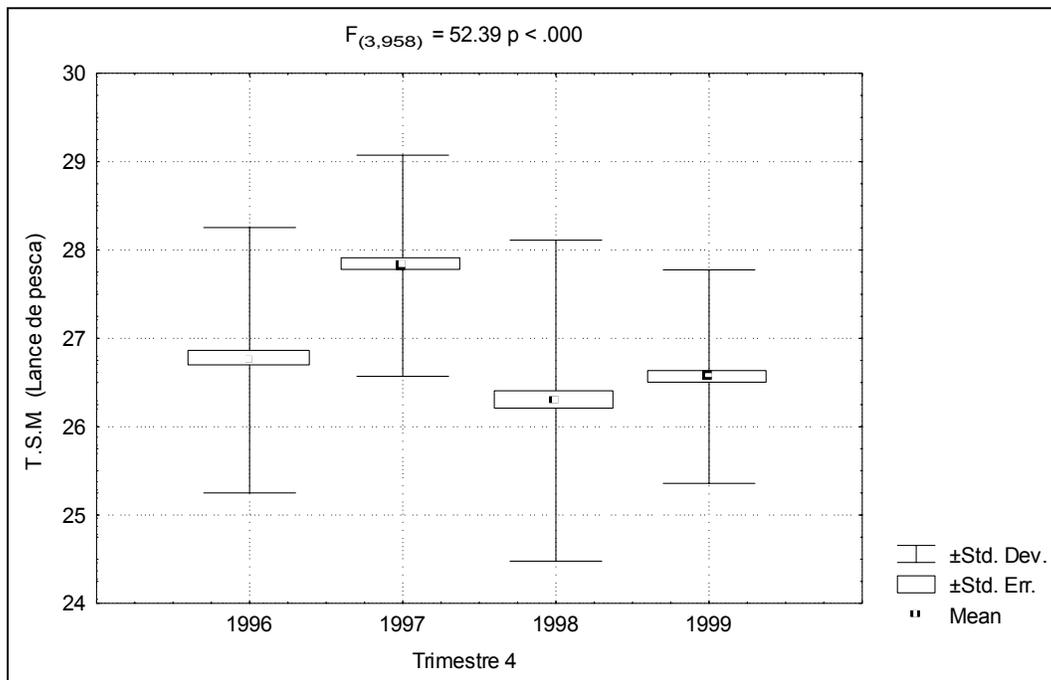
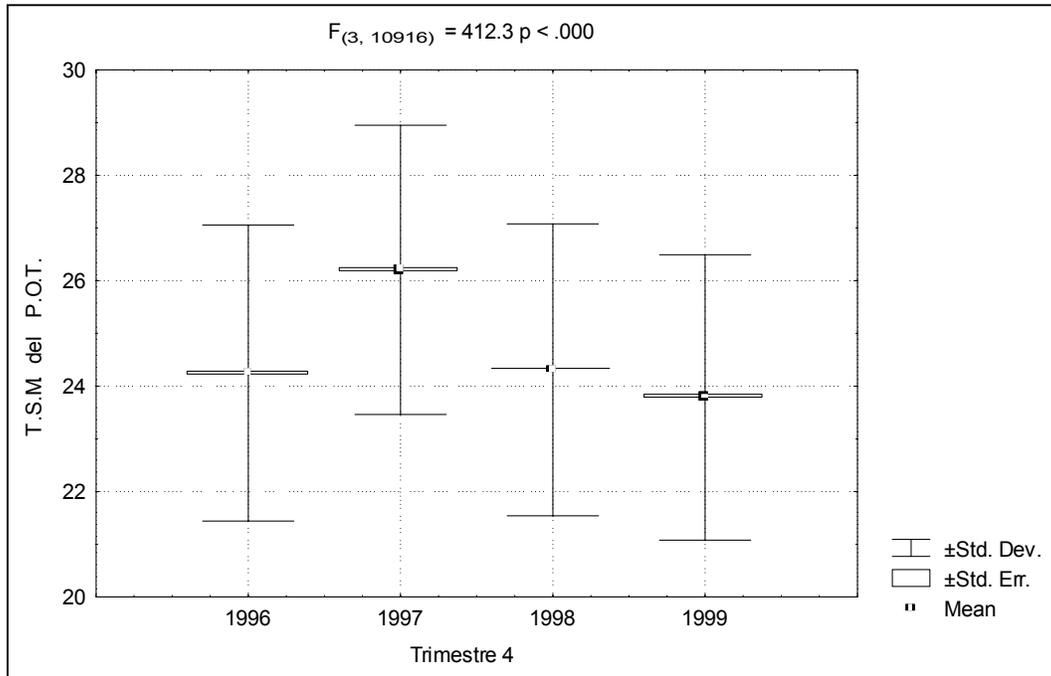


Figura 29. A) Análisis de varianza (ANDEVA) de la TSM del POT durante el cuarto trimestre de 1996 a 1999. B) ANDEVA de la TSM de los lances de pesca realizados por la flota atunera mexicana durante el cuarto trimestre de 1996 a 1999

**d. 1) Distribución espacio-temporal del esfuerzo pesquero y su relación con las anomalías de la TSM inferidas a través de imágenes de satélite**

En la Figura 30 A-D se muestra la distribución mensual de los lances realizados durante el periodo de estudio sobre la imagen de satélite de las anomalías de la TSM promedio mensual correspondiente. Se puede notar que la actividad se desarrolló principalmente en zonas donde la TSM estuvo cercana al promedio, estando prácticamente ausente en zonas donde las anomalías fueron de 4 o 5 °C o en áreas con anomalías negativas. En las imágenes se aprecia la secuencia del calentamiento del agua durante el evento de El Niño (abril de 1997 a junio de 1998) y su posterior enfriamiento o La Niña (julio de 1998 a diciembre de 1999). Cuando la flota hizo incursiones en zonas con anomalías positivas altas, se registraron capturas bajas.

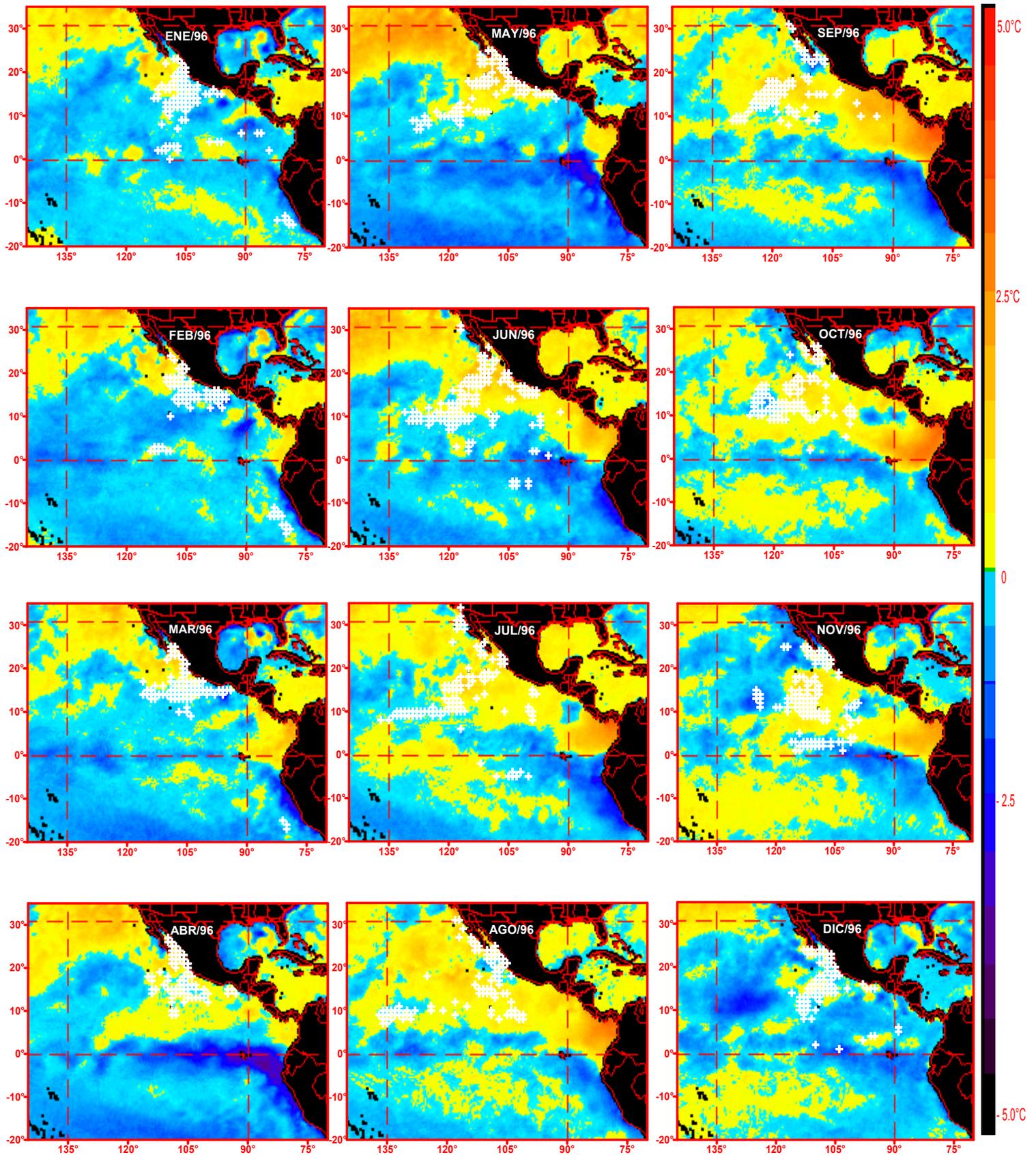


Figura 30A. Mapas de distribución mensual del esfuerzo de captura de atún aleta amarilla realizado por la flota atunera mexicana durante 1996 (cruces blancas) a los que se les superpuso imágenes de satélite de las anomalías de la TSM del respectivo mes.

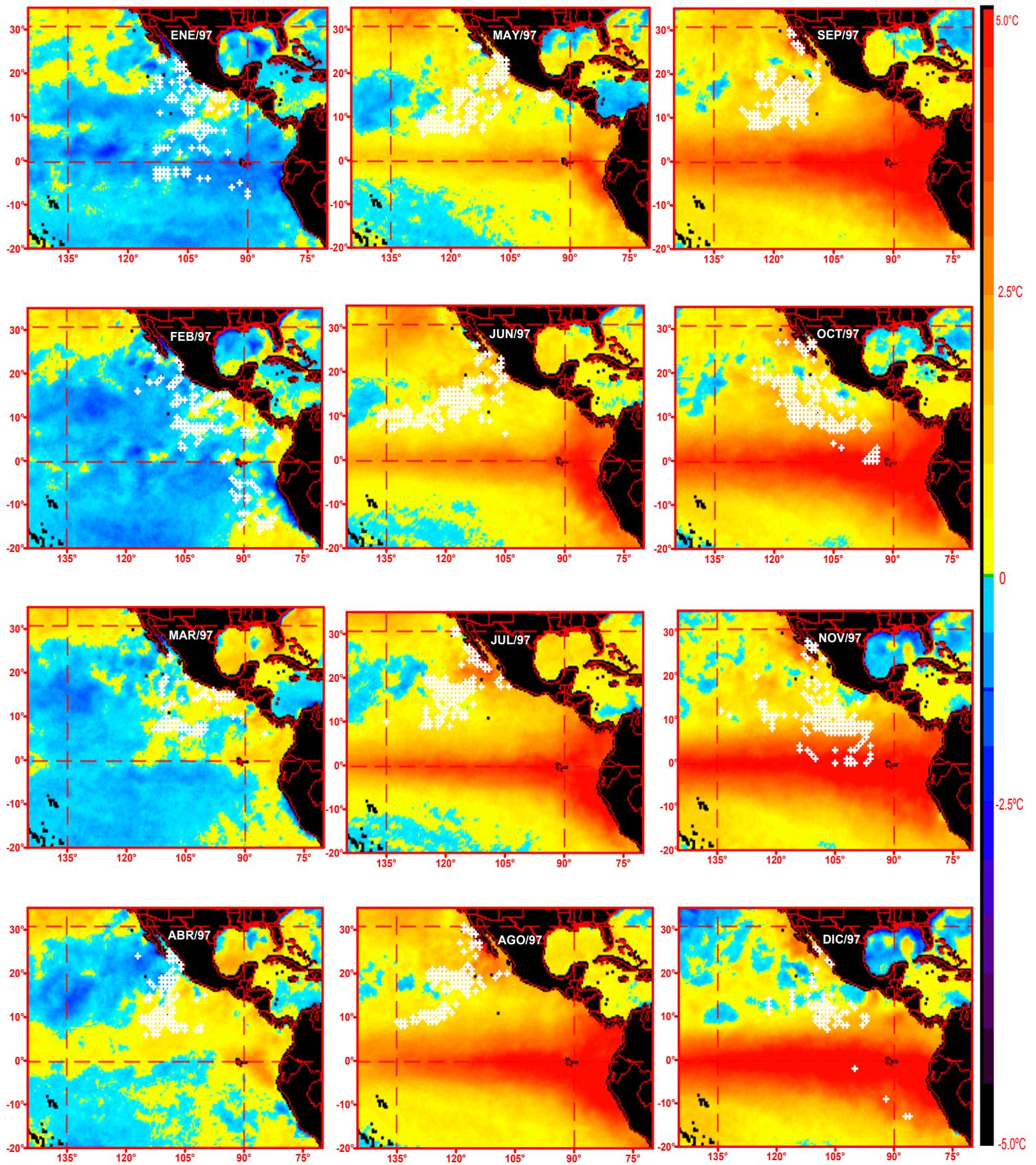


Figura 30B. Mapas de distribución mensual del esfuerzo de captura de atún aleta amarilla realizado por la flota atunera mexicana durante 1997 (cruces blancas) a los que se les superpuso imágenes de satélite de las anomalías de la TSM del respectivo mes.

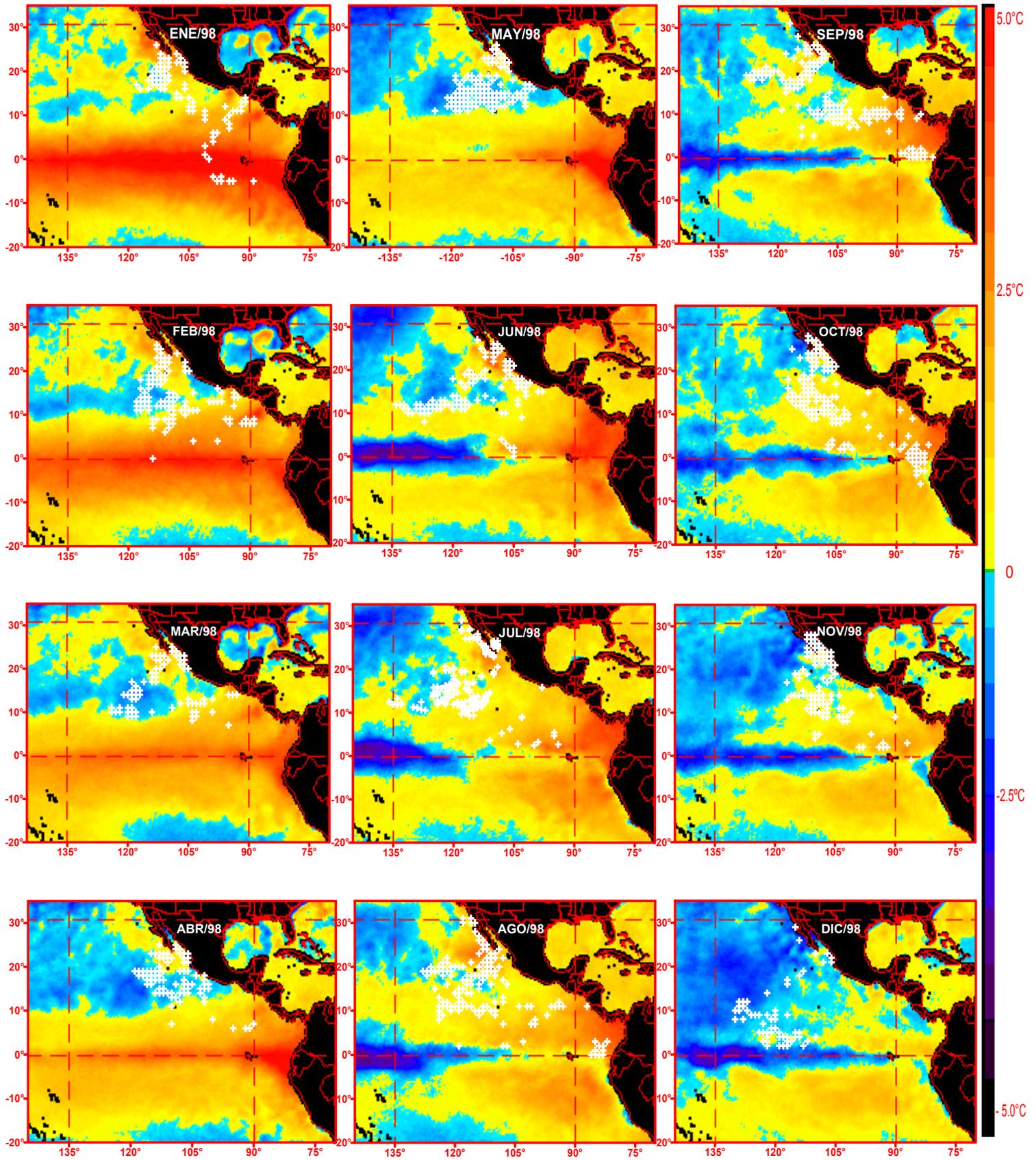
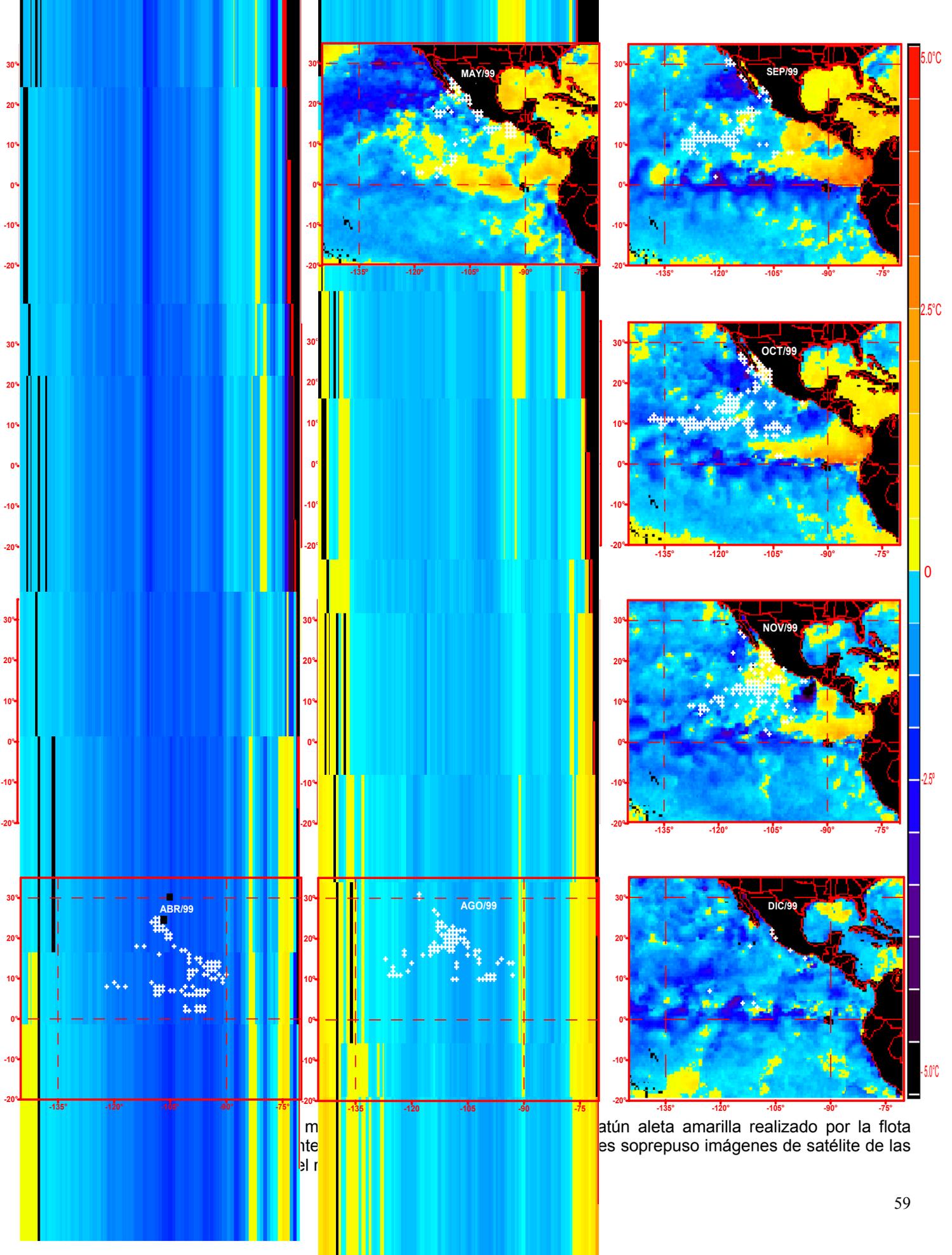


Figura 30C. Mapas de distribución mensual del esfuerzo de captura de atún aleta amarilla realizado por la flota atunera mexicana durante 1998 (cruces blancas) a los que se les superpuso imágenes de satélite de las anomalías de la TSM del respectivo mes.



matún aleta amarilla realizado por la flota  
 mte  
 el r  
 es superpuso imágenes de satélite de las

### d. 2) Distribución espacio-temporal de la abundancia relativa y centros de agregación determinados a través de Árboles de Regresión

La distribución de la abundancia relativa así como las principales zonas donde se obtienen los mayores volúmenes de capturas, que de aquí en adelante identificaremos como centros de agregación (CA), fueron encontrados a través de la técnica de Árboles de Regresión (AR) se presentan en las Figuras 31 y 32.

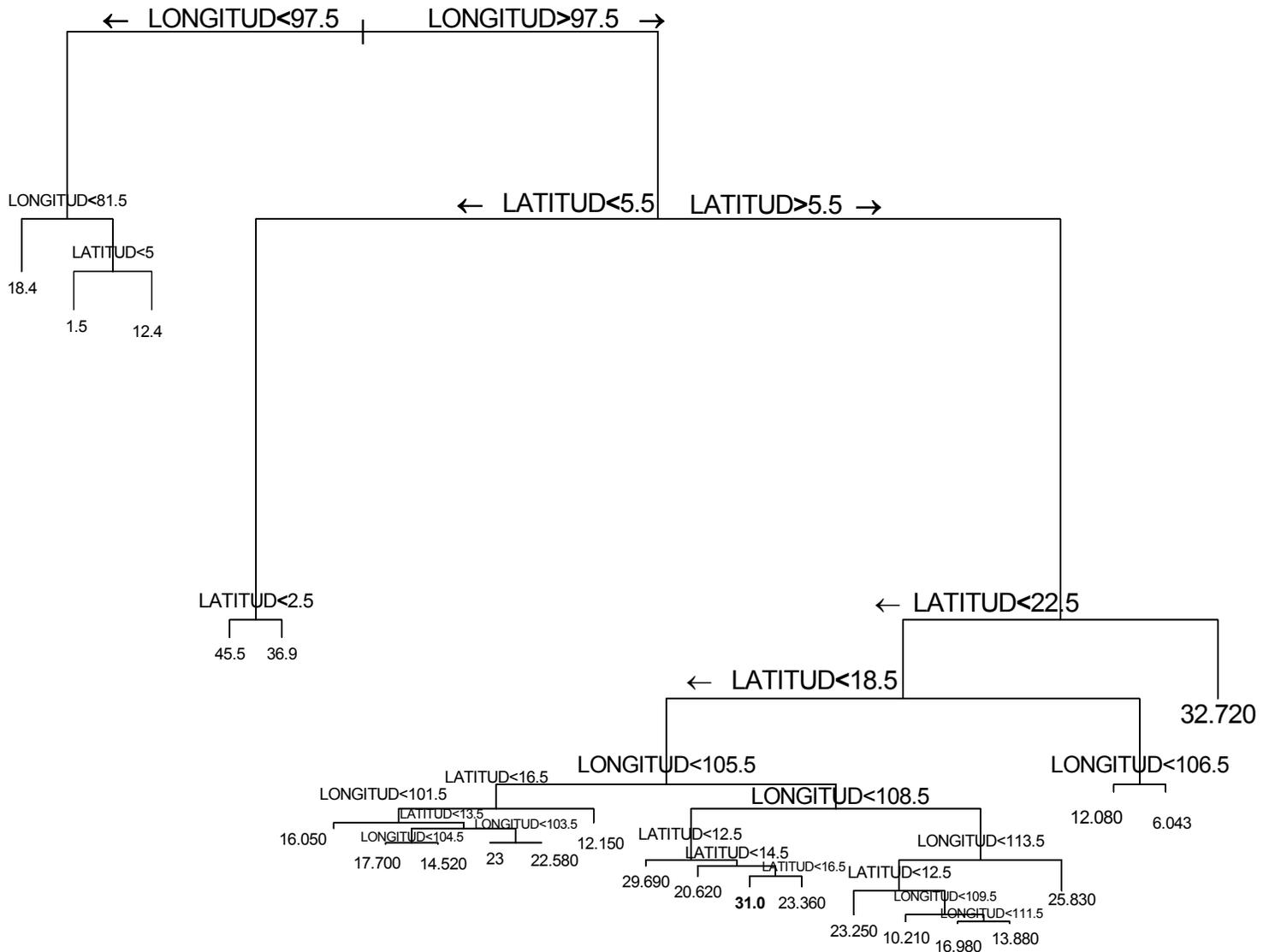


Figura 31: Esquema de un árbol de regresión tal como lo construye la función TREE del S-plus. Este árbol corresponde al primer trimestre de 1996.

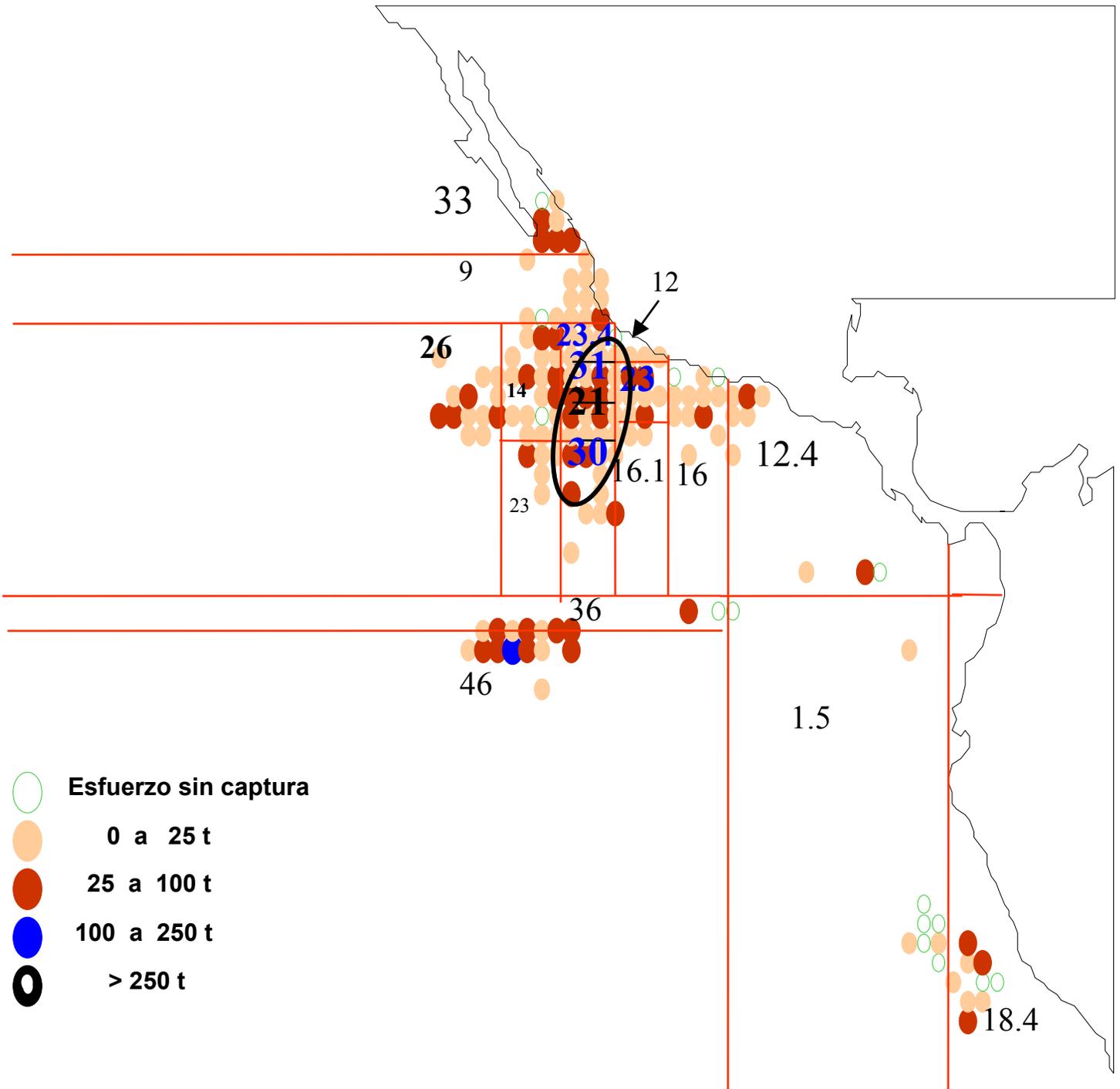


Figura 32. Mapa con todas las divisiones que su Árbol de Regresión señala para 1996 / 1 (invierno).

A continuación se hace una descripción de la distribución de la abundancia por trimestres o temporadas del año. Primero se analizan y se comparan entre si los trimestres 1 (4 inviernos) y así consecutivamente con el resto. Los principales CA descubiertos por los AR son encerrados dentro de un óvalo.

### **Primer Trimestre (Invierno):**

En general, el recurso estuvo presente frente a las costas de México desde la boca del Golfo de California hasta el Golfo de Tehuantepec y hasta los 120° W, excepto en 1998 cuando su ausencia es notoria en aguas cercanas a la costa y se desplazan al oeste. En este trimestre el calentamiento de la zona es muy importante por el efecto de El Niño (1997-1998). No hubo CA al oeste de los 120° W y fueron muy escasos al norte de los 23° N. (Figura 33 A-D).

### **Segundo trimestre (Primavera):**

Se amplía su distribución, extendiéndose al oeste más allá de los 135° W (Figura 34A-D). En 1997, cuando está iniciando el calentamiento, las capturas registradas en las aguas frente a las costas del sur de México fueron mínimas (Figura 34B). Aunque hubo un incremento de CA, la mayoría se presentaron hacia el oeste. En 1999, con la presencia de La Niña, los principales CA estuvieron en la boca del Golfo de California y en el Golfo de Tehuantepec.

### **Tercer Trimestre (Verano):**

En 1997 El Niño está a punto de alcanzar su máximo nivel y los CA se concentran en una amplia zona localizada al oeste de los 110° W y al norte de los 10° N. El atún está completamente ausente en aguas frente a las costas de México. Durante este periodo en 1998, se iniciaron las condiciones de La Niña y los principales CA se registraron al oeste de los 110° W, en la boca del Golfo de California y frente a Ecuador. No hay actividad en aguas cercanas a la costa (Figura 35C).

### **Cuarto trimestre (Otoño).**

En éste trimestre los principales CA están en alta mar. En general, están ausentes frente a las costas desde el sur de México hasta Perú. En 1997, en el clímax de El Niño, los CA estuvieron muy dispersos, lejos de la costa y predominaron volúmenes de captura bajos. En 1998, ya bien establecida La Niña, el recurso estuvo ausente de las costas del Pacífico mexicano al sur de Jalisco, aunque hubo registros en la boca y dentro del Golfo de California hasta los 28° N. La mayoría de los CA fueron pequeños y muy dispersos en la parte oceánica, excepto el localizado al NE de las Islas Galápagos, donde los volúmenes de captura fueron extraordinariamente elevados (Figura 36C).

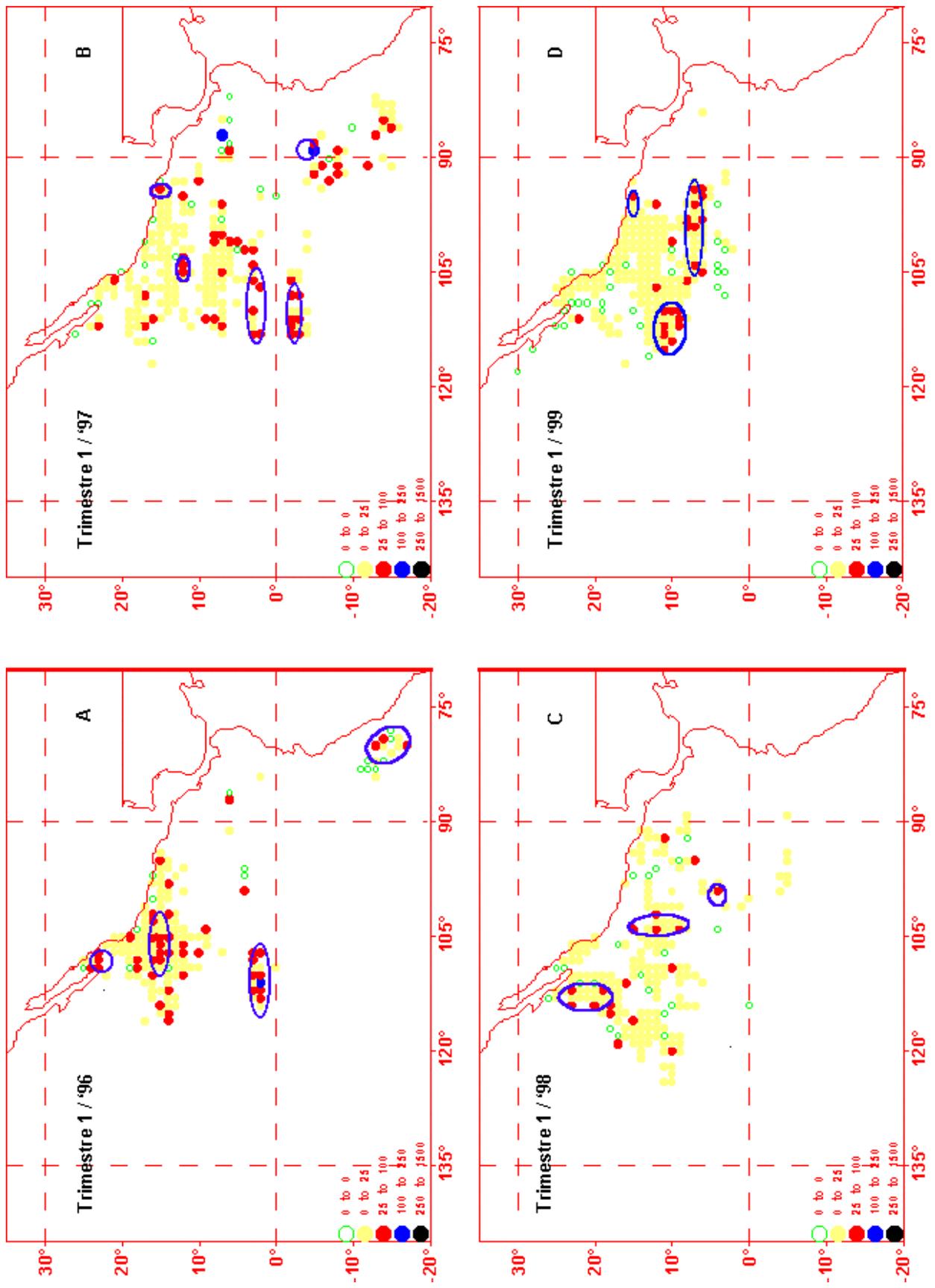


Figura 33 A - D. Centros de agregación propuestos por los Árboles de Regresión (AR) para el primer trimestre.

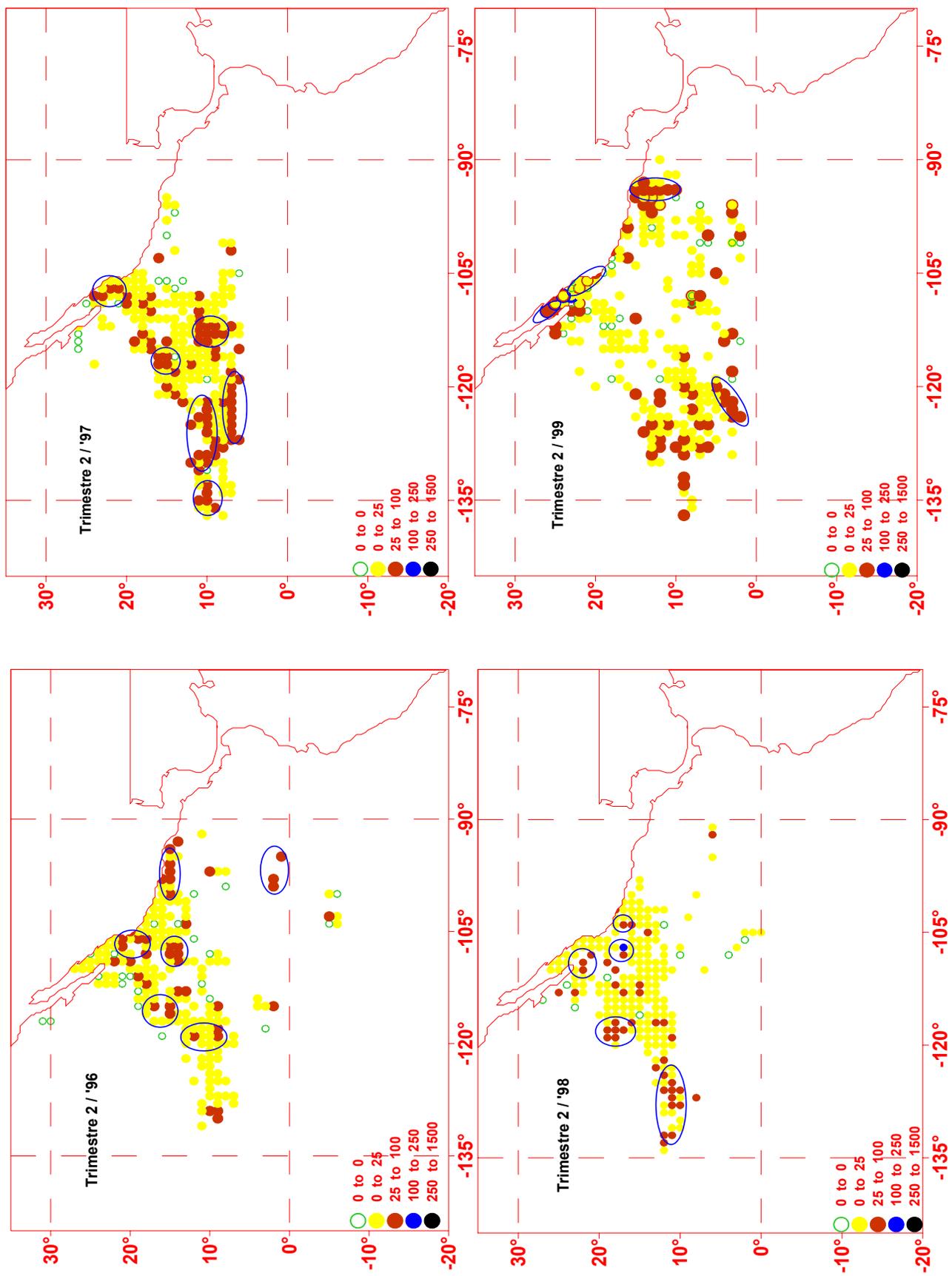


Figura 34 A-D. Centros de agregación propuestos por los Árboles de Regresión (AR) para el segundo trimestre

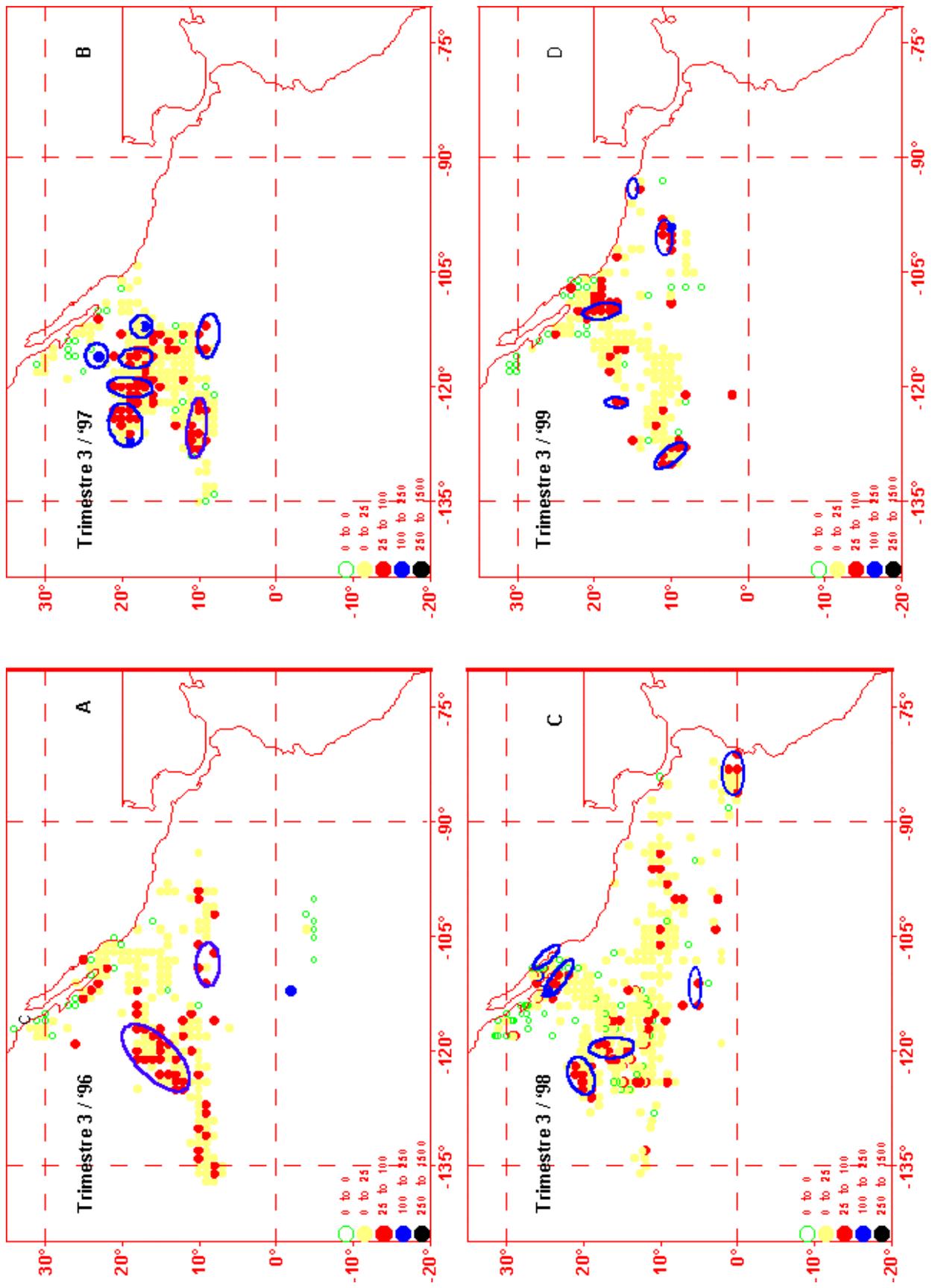


Figura 35 A - D. Centros de agregación propuestos por los Árboles de Regresión (AR) para el tercer trimestre.

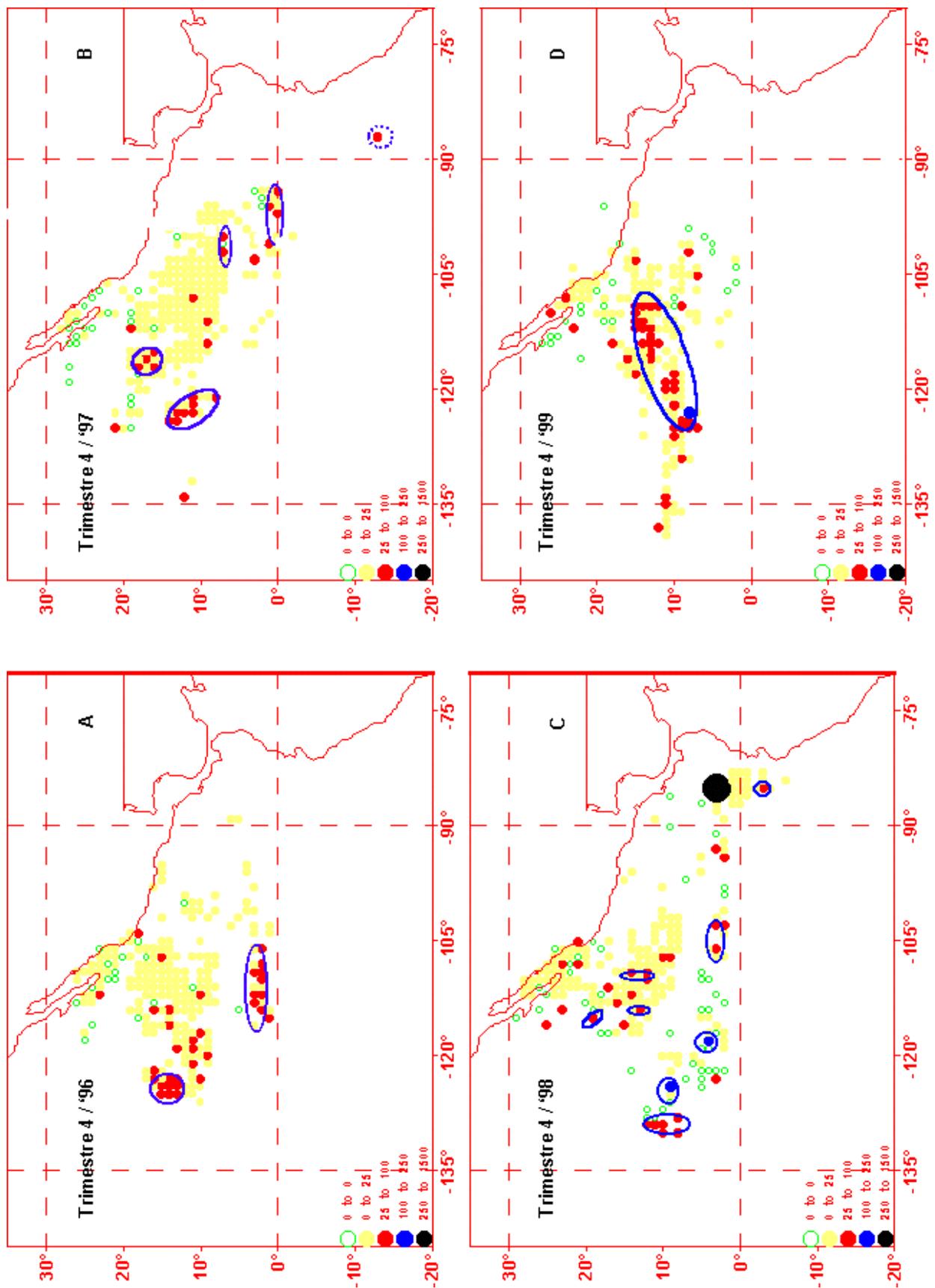


Figura 36 A - D. Centros de agregación propuestos por los Árboles de Regresión (AR) para el cuarto trimestre.

## VII. DISCUSIÓN:

### **a) Variación estacional de la distribución y la abundancia relativa del atún aleta amarilla en condiciones normales, durante El Niño y durante La Niña en el Océano Pacífico Oriental Tropical**

El periodo de estudio comprendió 4 años en los que se presentaron 3 condiciones climáticas distintas en el POT. Aunque en 1996 se presentaron ligeras anomalías negativas de la TSM que lo hicieron un año moderadamente frío (última etapa de La Niña 1995-1996), éstas fueron tan leves que se le consideró como un año normal. Zhang y Busalacchi (1999) encontraron que el evento cálido fue iniciado en las aguas subsuperficiales del Pacífico Occidental (8° N, 140° E) desde mediados de 1996, donde fueron detectadas aguas anómalamente cálidas que se propagaron hacia el este conducidas por la CCNE a los 6° N a una velocidad de 30 cm/s. Para diciembre de 1996 alcanzaron los 160° E donde favorecieron el desarrollo de vientos de occidente, lo que ha sido considerado como la etapa “antecedente” descrita por Rasmusson y Carpenter (1982) o la “precursora” de Nicholls (1987) de un evento de calentamiento El Niño.

Con respecto a la distribución del atún, los resultados obtenidos muestran que durante 1996 el patrón de distribución del recurso presentó las variaciones estacionales que típicamente se observan en un año normal, las cuales coinciden con las encontradas para el periodo de 1984 a 1990 por Ortega-García (1998) y Ortega-García et al. (2003).

Desde el segundo trimestre de 1997 hasta el primero de 1998 se detectaron desplazamientos inusuales del recurso con relación al patrón estacional, al parecer relacionados con el aumento de la TSM del Pacífico Oriental Tropical provocados por El Niño y que a continuación se discutirán a profundidad a lo largo de esta sección.

El evento contrario La Niña, se manifestó rápidamente a partir del tercer trimestre de 1998. Sin embargo, la disminución de la TSM fue lenta por lo que es posible que los cambios ocasionados en el patrón de desplazamientos estacionales del recurso no fueran tan notables. A continuación se discuten las posibles razones por las que se cree que se

presentaron los cambios más evidentes, lo que se hará comparando el primer trimestre de 1996 con el primer trimestre de 1997, 1998 y 1999 y así sucesivamente.

### **a.1) Variación trimestral**

#### **a.1.1) Primer trimestre**

Durante 1996, 1997 y 1999, la Alberca Cálida Mexicana (Figura 18 y 19 A, B y D) presentó una gran estabilidad predominando una TSM de 26 y 27 °C, aunque a los 16° N durante todo el año se presentaron temperaturas  $\geq 28$  °C, coincidiendo con lo reportado por Trasviña-Castro (2001). En éstos años la mayor parte del atún se ubicó en las zonas tradicionales que ocupan durante ésta temporada, según lo registrado por Ortega-García (1998) para 1984-1990, Rojo-Díaz (1997) para 1992-1994 y por Manzo-Monroy (2003) para 1993-1998. En condiciones normales, la presencia del recurso desde la boca del GC hasta el GT se explica porque desde mediados del cuarto trimestre de cada año comienzan a soplar los vientos del noroeste paralelos a la costa, generando surgencias que al enriquecer las aguas propician el desarrollo de la cadena alimenticia, con beneficios para el atún que se pueden observar unos meses después, principalmente durante el primer trimestre del año.

Los cambios más notables se observaron durante 1998 cuando fue notoria la ausencia del recurso frente a las aguas costeras desde Jalisco hasta el GT, donde normalmente se les encuentra. Durante los trimestres previos (1997/2 y 3) la temperatura superficial a lo largo de la costa del Pacífico mexicano fue extraordinariamente alta ( $>29$  °C), disminuyó en 1997/4 y volvió a elevarse durante 1998/1, coincidiendo con un segundo pico en la TSM, reportado por Lynn et al. (1998). Así, las altas temperaturas ya llevaban varios meses impactando la zona, lo que afectó negativamente al recurso ya que los valores de CPUE más bajos se registraron en éste trimestre.

De acuerdo con Fiedler et al. (1991), Barber y Chavez (1991) y Fiedler et al. (1992) la concentración de  $\text{NO}_3$  decrece conforme se incrementa la temperatura del agua, por lo que temperaturas por arriba de los 25.4 °C limitan el crecimiento del fitoplancton. Muy probablemente ésta situación fue la responsable de la ausencia del recurso tanto de las

aguas costeras del Pacífico mexicano como de la franja ubicada a los 3° N, entre los 105° y 115° W durante el primer trimestre de 1998, ya que en ésta zona fue muy abundante durante el primer trimestre de 1996 y 1997 (Figura 19C). Si bien el atún se alimenta de micronecton (Blackburn, 1969), el fitoplancton es el primer eslabón en la cadena alimenticia, por lo que depende indirectamente de su desarrollo.

En ésta área la CSE estuvo completamente ausente o disminuida por el evento de calentamiento que venía desarrollándose en el POT desde el segundo trimestre de 1997. De acuerdo con McPhaden et al. (2003), la penetración de aguas muy cálidas (>28 °C) del Pacífico Occidental cubrió gran parte del POT por arriba de la línea ecuatorial y en el primer trimestre de 1998 se expandieron al sur cubriendo hasta los 10° S, promoviendo procesos de subducción o hundimiento en esas aguas. Así, las aguas al norte del ecuador ya tenían aproximadamente 9 meses en condiciones muy cálidas, que las convirtieron en aguas con una productividad muy baja, algo muy semejante a lo que reportó para el POT Barber y Kogelschatz (1989) durante El Niño de 1982 - 1983.

Esto no ocurrió en los otros tres años, pues en 1996 y 1997 se detectaron concentraciones importantes de atún a los 3° N y en éste último año también a los 3° S. El hecho de que ambos años estuvieran antecedidos por dos o tres trimestres en los que la CSE estuvo bien desarrollada pudo haber sido la causa del enriquecimiento de ésta área propiciando la concentración de alimento.

Es importante hacer notar que durante el primer trimestre de 1999 se hizo un esfuerzo importante de pesca sin captura a los 3° N (Figura 19D), lo que podría indicar una termoclina profunda por ausencia de surgencias ecuatoriales, debido a que la CSE era todavía muy débil. Lo anterior se pudo confirmar con la TSM de 27 °C, la cual normalmente es menor (23 a 26 °C) entre la línea ecuatorial y los 3° N. Además, fue notoria la intromisión de aguas cálidas del Pacífico Occidental que viajan al sur del Ecuador (5° S) las que casi llegaron a las costas sudamericanas (Figura 19D).

Mientras esto sucedió en el hemisferio sur, entre los 6° y 8° N se registraron capturas altas. Al parecer, el establecimiento de condiciones La Niña desde 1998/3 propiciaron el incremento de micronecton, favorecido por el aporte de nutrientes y partículas alimenticias provenientes de la lengüeta de agua fría del Golfo de Papagayo, la cual en éstas condiciones fue más intensa. Trasviña-Castro, (2001) y Manzo -Monroy (2003) describen que en ésta zona se desarrollan giros de mesoescala los cuales son un mecanismo efectivo que favorece la productividad primaria, transportando mar adentro propiedades de las aguas costeras.

### **a.1. 2) Segundo trimestre**

De acuerdo con Lynn et al. (1987) y De la Lanza (1991) en ésta época del año el flujo de la CC alcanza su mayor desarrollo, enfriando considerablemente las aguas frente a la península de Baja California por lo que el recurso estuvo presente principalmente en aguas costeras de Baja California Sur, lo que concuerda con lo reportado con Blackburn (1969). De acuerdo con De La Lanza (1991) las aguas frías de la Corriente de California suelen llegar a tener influencia hasta los 17° N, aunque los datos de TSM de Reynolds (1996-1999) permiten observar que aguas relativamente frías de menos de 20 °C cercanas a la costa sólo llegaron hasta los 23° - 24° N.

Durante los 4 años analizados, en la región vestibular del GC y al suroeste de ella se pudo observar la presencia del frente térmico que separa las aguas cálidas de la ACM de las frías de origen subártico de la CC, el cual cambia su ubicación al norte o al sur dependiendo de la fuerza de la CC (Trasviña-Castro et al., 1999) (Figura 22 A - D). A lo largo de éste frente, desde la zona costera hasta los 130° W, siempre se encontraron concentraciones altas de atún, teniendo como barrera la isoterma de los 23 °C. Su expansión hasta los 130° W coincide con la temporada en la que la CC tiene mayor influencia en la formación de la CNE arrastrando el zooplancton y el micronecton hasta esas zonas (Rojo-Díaz, 1997). La presencia de atún a lo largo de los frentes ha sido ampliamente reconocida en otros estudios (Power y Nelson, 1991; Ortega-García, 1998)

Durante 1996 (Figura 22A) el recurso también se registró en las aguas costeras del Pacífico mexicano, desde la boca del GC hasta el GT, coincidiendo con lo reportado en otros

estudios, referida como una zona de desove muy importante, particularmente durante el segundo trimestre del año (Ueyanagi, 1969, 1978; González y Ramírez, 1989; Ortega-García, 1998). Sin embargo, se ausentó de esta zona costera mientras perduro el evento cálido (Figura 22B y C).

De acuerdo con Trasviña-Castro (2001) durante invierno aumenta la fuerza con la que soplan los vientos del noroeste, los cuales además de intensificar la CC generan dentro del GC una corriente que fluye al sur y genera surgencias importantes. Al parecer ésta situación continuó durante el segundo trimestre del año y se pudo confirmar al observar la TSM, que osciló entre los 19 y 25 °C (Figura 22A-D). El atún estuvo presente en altas concentraciones dentro y en la región vestibular del GC. La presencia de alimento y de temperatura adecuada bien podrían explicar los numerosos centros de agregación cuyos valores de captura fueron muy altos, confirmando el regreso de condiciones normales en esa zona, en la cual se registran tradicionalmente capturas altas (Ortega-García, 1998).

El incremento en la extensión de la ACM, así como el aumento de la temperatura durante el segundo trimestre de 1997, fue muy evidente, señalando el inicio de El Niño en el POT. Un año después, en el segundo trimestre de 1998 continuó siendo notoria la presencia de aguas cálidas (>28 °C) en el POT, aunque el evento ya se encontraba en la etapa de transición hacia condiciones La Niña. En éstos dos trimestres predominantemente cálidos, se observaron cambios muy notorios en la distribución del atún, siendo más drásticos los ocurridos en 1997, cuando fue muy clara la ausencia del recurso de las aguas costeras al sur de los 18° N hasta el Ecuador. No obstante, el recurso estuvo presente en aguas oceánicas al oeste de los 105° W entre los 7° y 12° N extendiéndose hasta los 137° W.

Las zonas donde el recurso estuvo ausente coinciden casi exactamente con las aguas más cálidas de la ACM (29 y 30 °C) (Figura 22B y C). De acuerdo con Mysak (1986) y Wyrski (1975), las ondas Kelvin que viajan desde el Ecuador hacia el norte atrapadas a lo largo de la costa hundren la termoclina, lo que propicia condiciones oligotróficas en toda esa zona (Fiedler et al., 1991; Barber y Chavez, 1991) y dificulta la localización del recurso, ya que le permite situarse en aguas más profundas o en caso de ser avistado evadir fácilmente el arte

de pesca pues se puede sumergir al no encontrar la barrera térmica que se lo impida (Fiedler, 1992; Wild, 1994; CIAT, 1999).

Durante el segundo trimestre de 1998 se pudo observar que la extensión de la ACM continuó siendo amplia (Figura 22C). En ese tiempo las condiciones que propiciaron un ambiente oligotrófico en la zona llevaban aproximadamente un año, lo que tuvo como consecuencia la ausencia de capturas en las costas al sur de los 16° N, mientras que en alta mar al sur de los 10° N estuvieron completamente ausentes. Esto al parecer tuvo como consecuencia un desplazamiento del recurso al norte de los 10° N ya que se registraron capturas altas al noroeste de ésta zona.

A pesar de que para el segundo trimestre de 1999 el evento de La Niña ya llevaba dos trimestres desarrollándose (1998/3 y 4), las condiciones en el núcleo de la ACM se mantuvieron bastante cálidas (29 °C), normal para el segundo trimestre de cada año. Sin embargo, la presencia del recurso indica que las surgencias por mezcla vertical tradicionales en el GT desde fines de noviembre de 1998 y durante el primer trimestre de 1999 (Trasviña-Castro et al., 1999; Trasviña-Castro, 2001), aunque moderados, fueron lo suficientemente fuertes como para lograr el desarrollo de la cadena alimenticia que meses después (en el 1999/2) se reflejó en una alta concentración del recurso, a pesar de la alta temperatura de la zona. Esto apoyaría la idea de que la presencia de alimento contribuye de manera importante a la aparición del recurso, a pesar de las altas temperaturas de la ACM, pero dentro de los límites de temperatura que soporta (Blackburn, 1969; Sharp, 1978; Wild, 1994).

### **a.1. 3) Tercer trimestre**

De acuerdo con Wyrcki (1965) durante los meses de agosto a diciembre disminuye considerablemente la influencia de la CC pues se separa de la costa a los 25° N, empezando así a calentarse las aguas frente a la península de BC. Por ésta razón la distribución del recurso se extiende a lo largo de la costa occidental hasta los 30° N, donde la TSM mínima registrada fue de 19 °C (Figura 25A-D). De acuerdo con Blackburn (1969) persisten surgencias costeras (principalmente al sur de Punta Eugenia y hasta Cabo San Lucas) que sostienen concentraciones moderadas de fitoplancton del que se alimenta la langostilla

(*Pleuroncodes planipes*), el principal alimento del atún en esa zona (Galván-Magaña, 1988; Aurióles-Gamboa, 1995).

Durante 1996, el recurso se concentró en aguas de alta mar al oeste de los 110° W hasta los 140° W, principalmente a lo largo de los 10° N (Figura 25A), lo que concuerda con la aparición de la CCNE que fluye intensamente entre los 4° y 9° N (Trasviña-Castro, 2001) y con lo reportado por Ortega-García (1998), Rojo-Díaz (1997) y Manzo-Monroy (2003).

Al igual que lo reportado por otros estudios que emplean datos de la flota atunera mexicana (Pérez, 2002), abundancias altas fueron registradas a los 15° N y los alrededores de los 120° W (28 °C) durante 1997. Su presencia en ésta región es difícil de explicar pues no se les puede asociar a procesos de surgencias ya que son aguas que se caracterizan por ser pobres en nutrientes ( $\text{NO}_3$ ) y clorofilas (Barber y Chavez, 1991). Su ubicación sobre la dirección que sigue la CNE y cerca del frente térmico probablemente se deba a lo descrito por Rojo-Díaz (1997) en el sentido de que ésta corriente arrastra una gran cantidad de nutrientes y partículas alimenticias desde la costa occidental de la península de Baja California, convirtiendo a la zona en un área rica en alimento para el atún, cuyos efectos continúan impactando aún en ésta época del año.

Según Lynn et al. (1998), El Niño 1997-98 presentó dos máximos de intensidad: el primero fue en julio de 1997 y el segundo en febrero de 1998, lo cual coincide con los resultados obtenidos en éste trabajo ya que se detectaron también dos máximos (uno durante el tercer trimestre de 1997 y el otro en el primero de 1998). Las temperaturas más altas (30 °C) se registraron a lo largo de las costas del Pacífico desde el GC hasta Costa Rica en el tercer trimestre de 1997 (Figura 25B), en una franja aproximada de 200 Km. de ancho. Aguas de 29 °C se extendieron mar adentro hasta los 110° W. En éstas zonas extremadamente cálidas el recurso estuvo completamente ausente. Seguramente ésta fue la razón por la que el recurso se desplazó al oeste de los 112° W, donde la TSM fue  $\leq 28$  °C.

En alta mar se detectaron centros de agregación importantes a lo largo de los 10° N, al oeste de los 112° W, explicados por la presencia de la CCNE. Los otros centros de

agregación, que generalmente se ubican a los 15° N, se desplazaron al norte entre los 18° N y los 21° N, al oeste de las Islas Revillagigedo, entre los 112° y 127° W (Figura 35B). De acuerdo con Fiedler et al. (1991) ésta zona se caracteriza por ser muy pobre en nutrientes; sin embargo, Dondonneau (1986) analizó la concentración de clorofila superficial en el Océano Pacífico durante El Niño 1982-1983 y encontró que en el cuarto trimestre de 1982 apareció un repentino aumento en la concentración de clorofila en la zona comprendida entre los 120° y los 150° W al norte de los 10° N y al sur de los 30° N, donde generalmente no ocurre esto y las aguas se caracterizan por ser muy pobres en nutrientes. Al parecer esto es consecuencia de un aumento en la fuerza con la que soplan los vientos del oeste a los 30° W que intensifican los procesos de mezcla vertical y que sólo se presenta en la zona en esas condiciones. Seguramente condiciones semejantes se volvieron a presentar durante El Niño 1997-1998, lo que explicaría la presencia del recurso en esta área.

Un año después, en el tercer trimestre de 1998 continuaron las condiciones cálidas (29 °C) en aguas cercanas a las costas de México, que aunque son propias de ésta temporada del año normalmente no llegan a ser tan calientes. En éste trimestre se presentó una transición rápida a condiciones La Niña (CIAT, 2000). No obstante que la distribución anómala del recurso al noroeste de los 20° N continuó y las áreas de concentración del recurso tradicionales en el OPO empezaron a reestablecerse (Figura 25C y 35C).

Al parecer las condiciones de La Niña durante el tercer trimestre de 1999 favorecieron la concentración del recurso a lo largo de los 10° N al oeste de los 95° W, lo que seguramente se relaciona con la intensificación de la CCNE propia del verano, a pesar de la presencia del evento frío (Figura 25D y 35D).

#### **a.1. 4) Cuarto trimestre**

En éste trimestre el recurso se acerca gradualmente a las aguas costeras, lo que coincide con lo reportado por Rojo-Díaz (1997), Ortega-García (1998) y Manzo-Monroy (2003). Este proceso sucede junto con una significativa reducción del tamaño de la ACM, lo que se pudo apreciar durante 1996 y 1998 siendo aún más notoria ésta disminución en 1999,

cuando fue más evidente la lengüeta de agua fría del GT (Figura 28A-D). Esto indirectamente señala que están volviendo a soplar con fuerza los vientos del norte, lo que concuerda con lo señalado con Blackburn (1963) y Trasviña-Castro (2001). Lluch et al. (1999) mencionan que en ésta temporada del año se presentan las concentraciones más altas de pigmentos fotosintéticos. Esto significa el inicio de las surgencias y por lo tanto el comienzo de la cadena alimenticia.

Así, dado que está iniciando la producción primaria, éstas condiciones pueden traducirse como pobres en cuanto a las presas para el atún, principalmente en la costa sur del Pacífico mexicano, donde la cadena alimenticia es más larga, pues ha sido reportado que se alimentan principalmente de micronecton y peces pequeños (Blackburn, 1963), lo que explica su ausencia de éstas aguas.

En cambio, estuvieron presentes en aguas frente a la costa occidental de la península de BC y en la región sur del GC durante 1996, 1998 y 1999, donde se alimentan principalmente de langostilla, por lo que la cadena alimenticia es mucho más corta explicando su presencia en esas aguas (Figura 28A-D). Fue notoria su ausencia durante 1997, lo que de acuerdo a Lluch et al. (1999) se puede explicar por la marcada disminución de pigmentos fotosintéticos totales dentro del GC y en la costa occidental de la península de BC, atribuido al debilitamiento de los sistemas de surgencias y al hundimiento de la termoclina, lo cual provoca una reducción en el aporte de nutrientes a la zona eufótica y una disminución en la productividad biológica del océano desde el segundo trimestre de 1997.

Además, Donguy y Henin (1980) señalan que en la franja comprendida entre los 5° N y los 5° S se intensifica la fuerza con la que soplan los vientos del sureste durante la segunda mitad del año con velocidades que oscilan entre los 10 y 15 nudos, siendo los principales causantes de las surgencias ecuatoriales. Esto explica la presencia del recurso entre los 2° y 3° N durante 1996 y 1998 (Figura 28 A y C), años en los que se detectó bien desarrollada la CSE a través de la TSM (21 - 22 °C). Además, también se registraron capturas entre los 0° y los 4° N desde los 95° hasta los 115° W durante el cuarto trimestre de 1997, lo que difícilmente se puede explicar, pues en esas aguas se había venido desarrollando El Niño,

por lo que se esperaría una reducción importante de los centros de agregación cercanos a la franja ecuatorial (Figura 28B y 36B). Su ausencia en 1999 llama la atención, pues La Niña propicia el desarrollo de surgencias que al final favorecen al atún. Sin embargo, esta situación se podría explicar por la decisión de la CIAT de implantar una veda precautoria desde el 1 de octubre hasta el 31 de diciembre de 1999 dentro del ARCAA (CIAT, 2001). También los datos de 1998 deben de estar influenciados por la veda, aunque en menor grado puesto que en ese año entró en vigor a partir del 26 de noviembre y duró hasta fin de año, es decir, tuvo una duración mucho menor (CIAT, 2000).

Cabe aclarar que en ambos casos no se le hizo ningún tratamiento a los datos y solo se tomó en cuenta esta situación considerando que dicha disminución responde a una situación artificial que no es atribuida a factores ambientales, sino meramente relacionados con la administración del recurso.

Durante el cuarto trimestre de 1997 se desarrolló la etapa madura de El Niño según la CIAT (1999), aunque según Lynn et al. (1998) y lo que se observó en éste trabajo (base Reynolds) hubo una leve disminución del calentamiento. El recurso se encontró entre los 7° N y los 20° N, al este de los 120° W, alejados de la costa (Figura 28B). Se pudo apreciar el desplazamiento del recurso hacia el este, típico de la temporada. Se detectaron dos centros de agregación muy importantes al suroeste de las Islas Revillagigedo (Figura 36B). Uno ubicado a los 117° W, posición que esta ligeramente desplazada al norte de su ubicación normal para esta época del año, muy cerca del frente térmico. El otro, ubicado a los 123° W, entre los 10° y 14° N cerca de la CCNE, se presenta normalmente en esta región, estando presente durante los otros años analizados. Llama la atención la presencia de un centro de agregación ubicado al oeste de las Islas Galápagos (100° – 105° W; 0°) en aguas anómalamente cálidas, que llevaban al menos dos trimestres presentando condiciones muy adversas, ya que en esta zona viajan las ondas Kelvin que vienen desde el Pacífico Occidental hundiendo la termoclina y por lo tanto generando condiciones oligotróficas (Myzak, 1986).

Durante el cuarto trimestre de 1999 se pudo apreciar el regreso a las condiciones normales. La ACM se redujo notablemente (Figura 28D) y es evidente la disminución de la TSM en las aguas del GT, indicando que ya están soplando fuerte los tehuantepecanos (vientos del norte que vienen desde el Golfo de México y atraviesan las montañas de Istmo de Tehuantepec), enfriando sus aguas, por lo que el atún no está presente o es muy escaso en la zona, al igual que en otros años considerados como normales. A diferencia de los otros años, en este se puede apreciar una extensión de la presencia del recurso a lo largo de los 10° N desde los 133° hasta los 139° W, cuando normalmente se localiza al este de los 125° W. Se incrementa notablemente el tamaño de los centros de agregación ubicados a los 110° W; 12° N y a los 120° W; 10° N (Figura 36D). La ausencia de esfuerzo al oeste de las islas Galápagos a lo largo del Ecuador probablemente se deba a que el esfuerzo se concentró en los dos centros arriba mencionados, evitando desplazarse tan al sur.

## VIII. CONCLUSIONES:

1. El Niño 1997-1998 ocasionó bajas importantes en los volúmenes de captura de atún aleta amarilla, siendo éstas más evidente durante el cuarto trimestre de 1997 y primero de 1998.

2. Se detectó un cambio notable en el patrón normal de distribución estacional del atún aleta amarilla (*Thunnus albacares*) durante el evento cálido El Niño 1997-98, en particular el ocurrido en el tercer trimestre de 1997, el cual consistió en el desplazamiento del recurso lejos de la costa del Pacífico mexicano, concentrándose las mayores abundancias al oeste y noroeste de las Islas Revillagigedo ( $120^{\circ}$ - $125^{\circ}$  W y  $20^{\circ}$  N). Al parecer, las condiciones cálidas de 1997, que se prolongaron hasta mediados de 1998, fueron las que propiciaron condiciones oligotróficas desfavorables para el desarrollo normal de la cadena alimenticia del atún, que lo obligó a desplazarse a otras zonas de alimentación.

3. Con los Árboles de Regresión se pudo confirmar que, en condiciones normales, los centros de agregación del atún se mueven estacionalmente de zonas cercanas a la costa en invierno, a regiones de alta mar que alcanzan los  $145^{\circ}$  W en el verano. La distribución durante primavera y el otoño pueden ser consideradas como periodos de transición entre este desplazamiento.

4. Los principales centros de agregación determinados a través de los árboles de regresión en condiciones normales coinciden con las zonas de divergencias oceánicas más importantes, como las que se generan entre la corriente Norecuatorial y la contracorriente Norecuatorial, a lo largo de los  $12^{\circ}$  N entre los  $115^{\circ}$  -  $125^{\circ}$  W principalmente en invierno, así como la de la corriente Surecuatorial, a lo largo de los  $3^{\circ}$  N entre los  $115^{\circ}$  -  $100^{\circ}$  W.

5. Las condiciones que prevalecieron durante el evento de La Niña favorecieron el reestablecimiento del patrón normal de distribución y abundancia. Por un lado, el recurso regreso a sus áreas de distribución normal y por otro, se incrementaron los volúmenes de

captura durante 1999, con un menor esfuerzo, lo que sugiere el retorno a condiciones normales.

6. Se confirma el hecho de que el atún aleta amarilla tiene preferencia por aguas con temperatura entre 27 y 28 °C, donde se realizó el mayor esfuerzo de pesca y se obtuvieron las mayores capturas.

## IX. BIBLIOGRAFIA:

- Au, D. W. K., W. L. Perryman y W. F. Perrin, 1979. Dolphin distribution and the relationships to environmental features in the Eastern Tropical Pacific. *NOAA-Tech. Rep. Mem., NMFS-SWFC Admon. Rep.* LJ-79-43, 59p.
- Aurioles-Gamboa, D., 1995. Migración batimétrica de la langostilla bentónica en la plataforma continental del Pacífico de Baja California Sur. *En : La Langostilla: Biología, Ecología y aprovechamiento.* Aurioles-Gamboa, D. y E. F. Balart (Eds.) 1995. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.
- Barber, R. T. y F. P. Chavez. 1983. Biological consequences of El Niño. *Science* Vol. 222: 1203-1210p.
- Barber, R. T. y F. P. Chavez. 1986. Ocean variability in relation to living resources during the 1982 – 83 El Niño. *Nature.* Vol. 319 (23 Enero):279-285p.
- Barber, R. T. y J. E. Kogelschatz. 1989. Nutrients and productivity during 1982/1983 El Niño. *En: Global Ecological consequences of the 1982-83 El Niño-Southern Oscillation,* P. W. Glynn (ed.), Elsevier, Amsterdam, 21-53p.
- Barber, R. T. y F. P. Chavez. 1991. Regulation of primary productivity rate in the equatorial Pacific. *Limnol. Oceanogr.*, Vol. 36(8):1803-1815p.
- Bjerknes, J., 1961. El Niño study based on analysis of ocean surface temperatures, 1935 to 1957. *Inter-American Tuna Commission Bulletin,* Vol. 5: 219-303p.
- Bjerknes, J., 1966. A possible response of the atmosphere Hadley circulation to equatorial anomalies of ocean temperature. *Tellus,* Vol. 8: 820-829p.

- Blackburn, M., 1963. Distribution and abundance of tuna related to wind and ocean conditions in the Gulf of Tehuantepec, México. *FAO Fisheries Reports* No. 6 Vol. 3, (Rome) Experience Paper No. 33.
- Blackburn, M., 1965. Oceanography and the ecology of tunas. *Oceanogr. Mar. Biol Ann. Rev.*, Vol. 3: 299-322p.
- Blackburn, M., 1969. Conditions related to upwelling which determine distribution of tropical tunas off western Baja California. *Fish. Bull.* Vol. 68, No. 1
- Breiman, L., J. H. Friedman, R. A. Olshen and C. G. Stone., 1984. Classification and regression trees. Wadsworth international group. Belmont, California, USA.
- Brill, R. W., B. A. Block, C. H. Boggs, K. A. Bigelow, E. V. Freund, D. J. Marcinek. 1999. Horizontal movements and depth distribution of large adult yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) near the Hawaiian Islands, recorded using ultrasonic telemetry: implications for the physiological ecology of pelagic fishes. *Marine Biology*. Vol. 133: 395-408p.
- Brill, R. W. y M. E. Lutcavage. 2001. Understanding environmental influences on movements and depth distributions of tunas and billfishes can significantly improve population assessments. *American Fisheries Society Symposium* Vol. 25: 179-198p.
- Cane, M. A., 1983. Oceanographic events during El Niño. *Science*, Vol. 222 (4629): 1189-1194.
- Chavez, F. P. y R. T. Barber. 1983. Biological consequences of El Niño. *Science* Vol. 222(4629): 1203-1210p.
- Chavez, F. P. y R. T. Barber. 1986. Ocean variability in relation to living resources during the 1982-1983 El Niño. *Nature*. Vol. 319:279-285p.

- Chavez, F. P. y R. T. Barber. 1987. An estimate of new production in the equatorial Pacific. *Deep-Sea Research*. Vol. 34: 1229-1243.
- Chavez, F. P. y R. T. Barber, 1991. Regulation of primary productivity rate in the equatorial Pacific. *Limnol. Oceanogr.* Vol. 36(8): 1803-1815p.
- Clark, L. A., and D. Pregibon. 1992. Tree - based models. Pages 377-420 *En: J. M. Chambers and T. J. Hastie, editors. Statistical models in S.* Wadsworth and Brooks, Pacific Grove, California, USA.
- Cole, J. S. 1980. Sinopsis sobre los datos biológicos del atún aleta amarilla, *Thunnus albacares*, en el Océano Pacífico. *Rev. Com. Perm. Pacífico Sur*, Vol. 11: 41-96p.
- Comisión Interamericana del Atún Tropical, 1960. Informe Anual 1959. CIAT, La Jolla, CA (En ingles y español). 156p.
- Comisión Interamericana del Atún Tropical, 1974. Informe Anual 1973. CIAT, La Jolla, CA (En ingles y español). 150p.
- Comisión Interamericana del Atún Tropical, 1984. Informe Anual 1983. CIAT, La Jolla, CA (En ingles y español). 272p.
- Comisión Interamericana del Atún Tropical, 1985 Informe Anual 1984 CIAT, La Jolla, CA (En ingles y español). 270p.
- Comisión Interamericana del Atún Tropical, 1998. Informe Anual 1996. CIAT, La Jolla, CA (En ingles y español). 306p.
- Comisión Interamericana del Atún Tropical, 1999. Informe Anual 1997. CIAT, La Jolla, CA (En ingles y español). 310p.

- Comisión Interamericana del Atún Tropical, 2000. Informe Anual 1998. CIAT, La Jolla, CA  
(En ingles y español). p.
- Comisión Interamericana del Atún Tropical, 2001. Informe Anual 1999. CIAT, La Jolla, CA  
(En ingles y español).
- Comisión Interamericana del Atún Tropical, 2002a. Informe Anual 2000. CIAT, La Jolla, CA  
(En ingles y español
- Comisión Interamericana del Atún Tropical, 2002b. Informe Anual 2001. CIAT, La Jolla, CA  
(En ingles y español).
- Connolly, S. R. y J. Roughgarden, 1999. Increased recruitment of northeast pacific barnacles during the 1997 El Niño. *Limnol. Oceanogr.*, Vol. 44(2): 466-469p.
- Cromwell, T., 1958. Thermocline topography, horizontal currents and ridging in the Eastern Tropical Pacific. *Inter-American Tropical Tuna Commission Bulletin*, Vol. 3, III: 135-164p.
- De'ath, G. and K. E. Fabricius. 2000. Classification and regression trees: A powerful yet simple technique for ecological data analysis. *Ecology*. Vol. 81 (11): 3178-3192p.
- De la Lanza, G. E. 1991. Oceanografía de mares mexicanos. AGT editor, S. A. 569p.
- Dondonneau, Y., 1986. Monitoring the sea surface chlorophyll concentration in the Tropical Pacific: Consequences of the 1982-1983 El Niño. *Fish. Bull.* Vol. 84 (3): 687-695p.
- Donguy, J. R. y C. Henin. 1980. Surface conditions in the eastern equatorial Pacific related to the intertropical convergence zone of the winds. *Deep-Sea Research*, Vol. 27A: 693-714p.

- Donguy, J. R. y G. Meyers. 1987. Observed and modeled topography of the 20 °C isotherm in the tropical Pacific. *Oceanologica Acta*, Vol. 10: 41-48p.
- Ehrhardt, N. M. 1981. Curso sobre métodos de evaluación de recursos y dinámica de poblaciones. Tercera parte. Parámetros poblacionales. FAO-CICIMAR. México. 134p.
- Fiedler, P. C., 1992. Seasonal climatologies and variability of eastern tropical Pacific surface waters. *NOAA Tech. Rep. NMFS* 109, 65p.
- Fiedler, P. C., 2002. Environmental change in the eastern tropical Pacific Ocean: review of ENSO and decadal variability. *Marine Ecology Progress Series*. Vol. 244: 265-283p.
- Fiedler, P. C., V. Philbrick y F. P. Chavez. 1991. Oceanic upwelling and productivity in the eastern tropical Pacific. *Limnol. Oceanogr.*, Vol. 36(8): 1834-1850p.
- Fiedler, P. C., F. P. Chávez, D. W. Behringer y S. B. Reilly. 1992. Physical and biological effects of Los Niños in the eastern tropical Pacific, 1986-1989. *Deep-Sea Research*, Vol. 39, No. 2: 199-219p.
- Forsbergh, E. D., 1989. The influence of some environmental variables on the apparent abundance of skipjack tuna, *Katsuwonus pelamis*, in the eastern Pacific Ocean. *Bull. IATTC*, 19(6): 433-569.
- Galván-Magaña, F. 1988. Composición y análisis de la dieta del atún aleta amarilla *Thunnus albacares* en el Océano Pacífico mexicano durante el periodo 1984-1985. Tesis de maestría. CICIMAR-IPN. 86p.
- Glantz, M. H. 2001. Currents of Change. Impacts of El Niño and La Niña on Climate and Society. Cambridge, University Press. 251p.

- Golden Software, Inc., 2000. SURFER (Surface Mapping System), versión 7.02. Golden Software, Inc., Colorado
- González, P. G. y M. Ramírez R. 1989. Zonas y épocas de reproducción del atún aleta amarilla *Thunnus albacares* en el Pacífico mexicano. *Investigaciones Marinas CICIMAR*, Vol. 4(2): 203-210p.
- Green, R. E., 1967. Relationship of the thermocline to success of tropical tuna vessels based in California. *Fish. Ind. Res* 3(1):29-45.
- Hall, M. A., M. García, C. Lennert, P. Arenas & M. Forrest. 1999. The association of tunas with floating objects and dolphins in the eastern Pacific Ocean: A review of the current purse-seine fishery. 87-194. *In*: Scott, M. D., W. H. Bayliff, C. E. Lennert-Cody & K. M. Schaefer (eds). Proceedings of the workshop on the ecology and fisheries for tunas associated with floating objects. Inter-American Tropical Tuna Commission. Special Report 11. La Jolla, California. 479 pp.
- Hammann, M. G., J. S. Palleiro-Nayar y O. Sosa-Nishizaki. 1992. The effects of the El Niño on the fisheries of Baja California, México. *CalCOFI Rep.*, Vol. 36: 127-133p.
- Lehodey, P. 2001. The pelagic ecosystem of the tropical Pacific Ocean: dynamic spatial modeling and biological consequences of ENSO. *Progress in Oceanography*. Vol. 49: 439-468p.
- Lehodey, P., M. Bertignac, J. Hampton, A. Lewis y J. Picaut. 1997. El Niño southern oscillation and tuna in the western Pacific. *Nature*. Vol. 389 (16 October): 715-718p.
- Lluch-Cota, D., D. Lluch-Belda, S. Lluch-Belda, J. López-Martínez, M. Nevárez-Martínez, G. Ponce-Díaz, G. Salinas-Zavala, A. Vega-Velazquez, J. R. Lara Lara, G. Hammann y J. Morales. 1999. Las Pesquerías y El Niño *En*: Los impactos de El Niño en México.

Victor O. Magaña (Ed.) 1999. Secretaría de Gobernación, UNAM, IAI, SEP-CONACyT. 228p.

Lynn, R. J., J. J. Simpson, 1987. The California Current System: The seasonal variability of its physical characteristics. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 92 (12): 12947-12966p.

Lynn, R. J., T. Baumgarten, J. Garcia, C. A. Collins, T. L. Hayward, K. D. Hyrenbach, A. W. Mantyla, T. Murphree, A. Shankle, F. B. Schwing, K. M. Sakuma, M. J. Tegner. 1998. The state of the California Current, 1997-1998: Transition to El Niño conditions. *CalCOFI Rep*. Vol. 39: 25-49p.

Mann, K. H., y J. R. N. Lazier, 1996. Dynamics of marine ecosystems. Biological-physical interactions in the oceans. 2aEd. Blackwell Scientific Publications. 394p.

Manzo-Monroy, H. G. 2003. Sobre la influencia de giros de mesoescala en las capturas de atún aleta amarilla (*Thunnus albacares*) en el Océano Pacífico Oriental Este. Tesis Doctoral, UABC, 173p.

McPhaden M. J. y B. A. Taft. 1988. Dynamics of seasonal and interseasonal variability in the eastern equatorial Pacific. *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 18: 1713-1732p.

McPhaden, M. J., T. Delcroix, K. Hanawa, Y. Kuroda, G. Meyers, J. Picaut y M. Swenson. 2003. The El Niño-Southern Oscillation (ENSO) observing system. *En: Observing the Oceans in the 21st Century*, C. J. Koblinsky and N. R. Smith (Eds), GODAE Project Office and Bureau of Meteorology, Melbourne.

Miller, F. R. y R. M. Laurs, 1974. The El Niño of 1972-1973 in the Eastern Tropical Pacific Ocean. *Inter-American Tropical Tuna Commission Bulletin*. Vol. 16 (5): 431-448p.

Mysak, L. A. 1986. El Niño, interannual variability and fisheries in the northeast Pacific Ocean. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* Vol. 43: 464-497p.

- Nicholls, N., 1987. The El Niño /Southern Oscillation phenomenon. *En: Climate Crisis*, ed. M. H. Glantz, R. W. Katz and M. E. Krenznz, pp. 2-10. New York: United Nations Publications.
- Ortega-García, S., 1998. Análisis de las fluctuaciones espacio temporal en la abundancia de atún en el Océano Pacífico Oriental. Tesis Doctoral, UNAM, México, 184p.
- Ortega-García, S., D. Lluch-Belda y P. Arenas-Fuentes. 2003. Spatial, seasonal and annual fluctuations in relative abundance of yellowfin tuna in the eastern Pacific Ocean during 1984-1990 based on fishery CPUE analysis. *Bulletin of Marine Science*. Vol. 72 (3): 613-628p.
- Pérez, 2002. El esfuerzo pesquero de la flota atunera mexicana en el OPO (2001). V Foro Nacional del atún, Mazatlán, Sin., diciembre del 2002.
- Philander, S. G., 1990. El Niño, La Niña, and the Southern oscillation. Academic Press. International Geophysics Series. Ed. Renata Dmowska and James R. Holton. Vol 46:288p.
- Power, H. J. y M. L. Nelson Jr. 1991. Satellite observed sea-surface temperatures and yellowfin tuna catch and effort in the Gulf of Mexico. *Fish. Bull.* Vol. 89: 429-439p.
- Rasmusson, E. M. y T. H. Carpenter. 1982. Variations in tropical sea surface temperature and surface wind field associated with the Southern Oscillation/El Niño. *Monthly Weather Review*, Vol. 110: 354-384p.
- Reynolds, R. W. y T. M. Smith. 1994. Improved global sea surface temperature analysis. *Journal of Climate*. Vol. 7: 929-948p.

- Rojo-Díaz, P. A. 1997. La asociación atún-delfín y su relación con la temperatura superficial del mar en el Océano Pacífico Oriental durante 1992-1994. Tesis de maestría. CICESE, BCS. 98p.
- Schaefer, M. B. G. C. Broadhead y C. J. Orange. 1962. Synopsis on the biology of yellowfin tuna *Thunnus (Neothunnus) albacares* (Bonnaterre) 1788 (Pacific Ocean). *FAO, Species Synopsis No.16*.
- SEMARNAP (Secretaria del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, Instituto Nacional de la Pesca). 2000. Sustentabilidad y pesca responsable en México, evaluación y manejo. 691p.
- Sharp, G. D., 1978. Behavioral and physiological properties of tuna and their effects on vulnerability to fishing gear. *In: The physiological Ecology of tunas*, edited by G.S. Sharp and A. E. Dizon. New York, Academic Press, 397-449p.
- Sinclair, M. y M. J. Tremblay. 1985. El Niño events and variability in a Pacific Mackarel (*Scomber japonicus*) survival index: support for Hjort's second hypothesis. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, Vol. 42(3): 602-608p.
- Statistical Science, 1994. S-PLUS for windows, version 3.2. Seattle: StatSci., a division of MathSoft, Inc.
- StatSoft, Inc. (2003). STATISTICA (data analysis software system), version 6. [www.statsoft.com](http://www.statsoft.com).
- Sund, P. N., M. Blackburn y F. Williams. 1981. Tunas and their environment in the Pacific Ocean: A review. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.* 19, 443-512p.
- Trasviña-Castro, A. 2001. La Circulación Costera y la Alberca Cálida Mexicana. Reunión anual de la UGM. Pto. Vallarta México. Noviembre del 2001.

- Trasviña-Castro, A., D. Lluch-Cota, A. E. Filonov y A. Gallegos. 1999. Oceanografía y El Niño. *En: Los impactos de El Niño en México*. Víctor O. Magaña (Ed.) 1999. Secretaría de Gobernación, UNAM, IAI, SEP-CONACyT. 228p.
- Ueyanagi, S. 1969. Observations on the distribution of tuna larvae in the Indo-Pacific Ocean with emphasis on the delineation of the spawning areas of albacore, *Thunnus alalunga*. *Bull. Far. Seas Fish. Res. Lab.*, Vol. 2: 177-256p.
- Ueyanagi, S. 1978. Recent tuna culture research in Japan. Paper presented at the International Ocean Development Conference. Vol. 5(C1): 23-39p.
- Walker, G. T., 1924. Correlation in seasonal variations of weather, IX: A further study of world weather. *Memoirs of the Indian Meteorological Department*. XIV (Part IX), 275-332p.
- Wild, A., 1994. A review of the biology and fisheries for yellowfin tuna, *Thunnus albacares*, in the eastern Pacific Ocean. *FAO Fish. Tech. Rep.* 336 (2): 52-107p.
- Wyrтки, K., 1964. The thermal structure of the eastern Pacific Ocean. *Deut. Hydrogr. Zeit. Ergänzungsheft*. A, 8 (6): 84p.
- Wyrтки, K., 1965. Surface currents of the eastern tropical Pacific. *Inter-American Tropical Tuna Commission Bulletin*. Vol. IX (5): 63-97p.
- Wyrтки, K., 1966. Oceanography of the eastern Tropical Pacific Ocean. *Oceanography and Marine Biology Annual Review*. Vol. 4: 33-68p.
- Wyrтки, K., 1975. El Niño - The dynamic response of the equatorial Pacific Ocean to atmospheric forcing. *Journal of Physical Oceanography*. Vol. 5: 572-584p.

- Wyrtki, K., 1975. Fluctuations of the dynamics topography in the Pacific Ocean. *Journal of Physical Oceanography*. Vol. 5: 450-459p
- Wyrtki, K., 1977. Sea level during the 1972 El Niño. *Journal of Physical Oceanography*. Vol. 7: 779-787p.
- Wyrtki, K., 1979. The response of sea surface topography to the 1976 El Niño. *Journal of Physical Oceanography*. Vol. 9:1223-1231p
- Wyrtki, K., 1981. An estimate of Equatorial Upwelling in the Pacific. *Journal of Physical Oceanography*. Vol. 11:1205-1214p.
- Zhang, R. H. y A. J. Busalacchi. 1999. A possible link between Off-equatorial warm anomalies propagating along the NECC path and the onset of the 1997-1998 El Niño. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 26, No. 18, 2873-2876p.