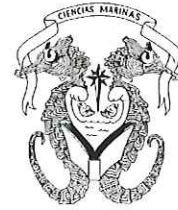


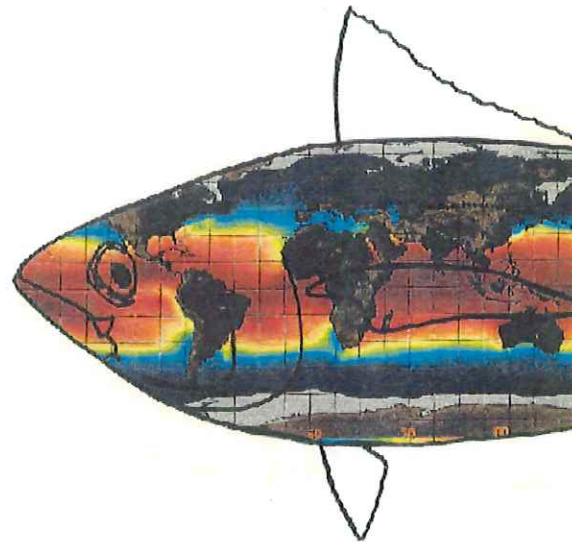


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS



EFFECTOS DEL VIENTO Y TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR SOBRE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE LAS CAPTURAS ATÚN ALETA MARILA (*Thunnus albacares*) EN EL GOLFO DE TEHUANTEPEC, MÉXICO.



**TESIS
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
OCEANOLOGO
PRESENTA**

Ernesto Israel Popoca Arellano

Ensenada Baja California, mayo de 2003

Resumen

La abundancia y distribución del atún aleta amarilla está determinada por factores oceanográficos como giros anticiclónicos, frentes térmicos y surgencias. En el Golfo de Tehuantepec ocurren surgencias costeras de gran importancia, debido a condiciones oceanográficas y orográficas que permiten la acción de fuertes vientos que se generan de noviembre a marzo, que provoca una gran actividad biológica y pesquera en el Pacífico Oriental Tropical. En el presente estudio se analizó la relación entre la captura por lance con la temperatura superficial del mar (TSM) y con la velocidad del viento (VV) en El Golfo de Tehuantepec. La información de las capturas por lance se obtuvo de la Comisión Interamericana del Atún Tropical y del Programa Nacional de Aprovechamiento del Atún y Protección de Delfines, desde enero de 1993 a junio de 1998. Se utilizó la información de sensores remotos con resolución espacial de 0.5° (latitud y longitud) y temporal de un promedio pentado (cada cinco días), para determinar el área de estudio con las variables de la TSM y VV, la cual se ubicó entre los 105° a 90° O y 17° a 10° N. La determinación de la unidad mínima de tiempo para realizar asociaciones fue de dos meses. Los resultados mostraron que la VV tuvo una relación inversamente proporcional a las capturas y la TSM fue directamente proporcional a éstas. La distribución espacial de las capturas por lance se ubicaron en mayor proporción al oeste del Golfo de Tehuantepec asociado a un giro anticiclónico y en menor proporción se ubicaron pocas capturas al este del Golfo. Temporalmente las mayores capturas se obtuvieron de enero a abril, menores de mayo a junio y sin mucha relevancia de julio a diciembre. En estudios futuros sobre la variabilidad temporal del atún aleta amarilla en el Golfo de Tehuantepec, se propone integrar la información cada dos meses.

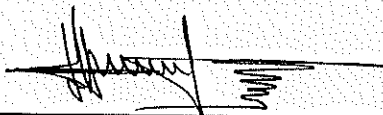
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

EFFECTOS DEL VIENTO Y TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR SOBRE
LA DISTRIBUCIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE LAS CAPTURAS ATÚN ALETA
AMARILLA (*Thunnus albacares*) EN EL GOLFO DE TEHUANTEPEC,
MEXICO.

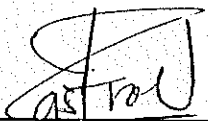
TESIS QUE PRESENTA

ERNESTO ISRAEL POPOCA ARELLANO

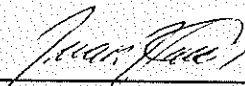
Aprobada por:



Dr. Héctor Guillermo Manzo Monroy
Presidente del Jurado



Dr. Rubén Castro Valdez
Sinodal Propietario



Dr. Juan Guillermo Vaca Rodríguez
Sinodal Propietario

Dedicada a:

Magdalena Arellano Campos

Emilio Popoca Nieto

Victor Hugo Popoca Arellano

“El estudio explota tus pulmones y el trabajo explotará tus estudios”
Isabel Campos Ontiveros (mi abuela Chavela)

Agradecimientos

A toda mi familia por estar siempre conmigo, tanto los que estan lejos como los que estan cerca.

A mis papas por haberme dado vida, salud, educación, valores, alegría y amor.

A mi hermano por haber sido, ser y serás mi mejor amigo.

A todos los compañeros que durante la carrera compartieron parte de su tiempo conmigo y poder aprender de ellos.

A todos mi amigos por ser mi familia adoptiva y estar conmigo en las buenas y en las malas.

A la generación de Sharkologos por todas las experiencias vividas durante nuestra etapa estudiantas.

A quines compartí mis conocimientos de natación, obteniendo grandes amistades y un gran apoyo.

A los miembros del comité de tesis por sus observaciones y aportaciones a este trabajo, y al director de tesis por su gran paciencia durante la realización de la tesis.

A Conacyt por el apoyo de beca en el proyecto "Variabilidad de mesoescala en las capturas de atún: acoplamiento de procesos oceanográficos bio-físicos", bajo el número de registro 35214T.

A todos los profesores e investigadores que me ayudaron a formar mi carrera profesional.

Contenido

Resumen	ii
I.- Introducción.....	1
II.- Antecedentes.....	5
III.- Área de estudio.....	9
IV.- Objetivos.....	14
V.- Hipótesis.....	14
VI.- Materiales y métodos	
VI.I.- Datos de capturas.....	15
VI.II.- Datos de satélite	
VI.II.I.- Datos de viento.....	15
VI.II.I.- Datos de temperatura.....	17
VI.III.- Determinación del área de estudio.....	18
VI.IV.- Análisis exploratorio.....	20
VI.V.- Resolución temporal.....	20
VII.- Resultados	
VII.I.- Determinación del área de estudio.....	22
VII.II.- Análisis exploratorio.....	31
VII.III.- Resolución temporal.....	33
VII.IV.- Análisis temporal.....	36
VII.V.- Análisis de la variación espacio temporal de las capturas de AAA...39	
VIII.- Discusiones	
VIII.I.- Determinación del área de estudio.....	47
VII.II.- Resolución temporal.....	49
VII.III.- Análisis temporal.....	50
VII.IV.- Análisis espacial.....	53
IX.-Conclusiones.....	56
X.- Bibliografía.....	57

Índice de Figuras

- Figura 1.-** Ubicación geográfica del Golfo de Tehuantepec, del Istmo de Tehuantepec y de algunas poblaciones costeras de referencia (Tapia García, 1998).....9
- Figura 2.-** Localización y características orográficas del Golfo de Tehuantepec (Trasviña *et al.*, 1995).....10
- Figura 3.-** Patrón de circulación del Océano Pacífico Oriental (Wirtky, 1967) y los Golfos de: Tehuantepec (GF), Papagayo (GPP) y Panamá (GPA).....11
- Figura 4.-** Corrientes superficiales en el Golfo de Tehuantepec: a) Época de nortes de acuerdo a Roden (1961) b) de junio a agosto, c) de octubre a enero, d) de febrero a abril y e) en mayo y septiembre.....12
- Figura 5.-** Distribuciones de los cuatro primeros modos de la velocidad del viento, a) Primer modo, b) Segundo modo, c) Tercer modo y d) Cuarto modo. Las áreas fueron delimitadas por el árbol de regresión y los colores representan la variabilidad adimensional de los diferentes modos.....24
- Figura 6.-** Distribuciones de los cuatro primeros modos de la temperatura superficial del mar, a) Primer modo, b) Segundo modo, c) Tercer modo y d) Cuarto modo. Las áreas fueron delimitadas por el árbol de regresión y los colores representan la variabilidad adimensional de los diferentes modos.....26
- Figura 7.-** Amplitudes de los cuatro primeros modos de la velocidad del viento, a) 1er modo, b) 2do modo, c) 3er modo y d) 4to modo. Los días julianos son cada cinco días, por lo que 400 es igual a 2000 días julianos que corresponden a todo el periodo de estudio.....28
- Figura 8.-** Amplitudes de los cuatro primeros modos de la temperatura superficial del mar, a) 1er modo, b) 2do modo, c) 3er modo y d) 4to modo. Los días julianos son cada cinco días, por lo que 400 es igual a 2000 días julianos que corresponden a todo el periodo de estudio.....28
- Figura 9.-** Áreas delimitadas por los árboles de regresión para la velocidad del viento: ___ Primer modo, ___ Segundo modo, ___ Tercer modo, ___ Cuarto modo.....30
- Figura 10.-** Áreas delimitadas por los árboles de regresión para la temperatura superficial del mar: ___ Primer modo, ___ Segundo modo, ___ Tercer modo, ___ Cuarto modo..... 30
- Figura 11.-** Area del Golfo de Tehuantepec delimitada por la VV y TSM.....30

- Figura 12.-** Distribución espacial de los lances de la flota atunera de todo el periodo de estudio (1993-1998), sobrepuestos en los arreglos para la media de: a) velocidad del viento y b) temperatura superficial del mar.....32
- Figura 13.-** Funciones de autocorrelación para los doce puntos de la velocidad del viento. En el eje de las abcisas se representan los desfases y en el de las ordenadas, los doce puntos de comparación.33
- Figura 14.-** Funciones de autocorrelación para los doce puntos de la temperatura superficial del mar. En el eje de las abcisas se representan los desfases y en el de las ordenadas, los doce puntos de comparación.....34
- Figura 15.-** Distribución de la media temporal en velocidad del viento (m/s), temperatura superficial del mar ($^{\circ}$ C) y capturas totales (toneladas métricas).....35
- Figura 16.-** Funciones de autocorrelación que compara los doce puntos distribuidos en el Golfo para la obtención de los más representativos: a) velocidad del viento, b) temperatura superficial del mar.....36
- Figura 17.-** Series de tiempo de la velocidad del viento, temperatura superficial del mar y capturas, en tres puntos (noroeste en rojo, boca del golfo en azul y suroeste en verde) del Golfo de Tehuantepec.....38
- Figura 18.-** Distribución espacial de los lances sobre atún en el Golfo de Tehuantepec de 1993.....40
- Figura 19.-** Distribución espacial de los lances sobre atún en el Golfo de Tehuantepec de 1994.....41
- Figura 20.-** Distribución espacial de los lances sobre atún en el Golfo de Tehuantepec de 1995.....42
- Figura 21.-** Distribución espacial de los lances sobre atún en el Golfo de Tehuantepec de 1996.....43
- Figura 22.-** Distribución espacial de los lances sobre atún en el Golfo de Tehuantepec de 1997.....44
- Figura 23.-** Distribución espacial de los lances sobre atún en el Golfo de Tehuantepec de 1998.....45

Índice de tablas

Tabla I.- Porcentaje de variancia acumulada para los cuatro primeros modos de las variables físicas.....	22
Tabla II.- Delimitación en latitud y longitud del Golfo de Tehuantepec para los cuatro modos de las variables y la media de las localizaciones.....	29
Tabla III.- Georeferenciación del Golfo de Tehuantepec acotada por los promedios de los árboles de regresión en los cuatro modos de la VV y TSM.....	29

I.- Introducción

La variación espacio-temporal de los fenómenos oceánicos, es una de las causas principales en la composición de poblaciones marinas. Esto se contrasta con las especies terrestres, donde la competencia entre especies juega un papel importante en la composición de un ecosistema. La variación en el océano está ligada a los eventos que ocurren en escalas diferentes de espacio y tiempo. Ambos eventos de espacio y tiempo afectan diferentes partes del ecosistema marino dependiendo de la magnitud del evento. Por ejemplo, los eventos de pequeña escala, por lo general, son más importantes para la comunidad del plancton, en tanto que los eventos de larga escala son de gran importancia en los peces debido a sus largos ciclos de vida y hábitats migratorios (Harrison, 2000).

La pesquería del atún es una de las más importantes de México que representa una actividad económica sobresaliente. La flota cerquera mexicana captura un 90 % en el Océano Pacífico del atún aleta amarilla (*Thunnus albacares*), el resto pertenece a otras especies de atún como el barrilete (*Katsuwonus pelamis*), patudo (*T. obesus*), bonito (*Sarda chiliensis*), atún aleta azul (*T. thynnus*), melva (*Auxis rochei*), barrilete negro (*Euthynnus lineatus*) y albacora (*T. alalunga*) (SEPESCA, 1994).

La abundancia y distribución del Atún Aleta Amarilla (AAA), al igual que otras especies, está determinada por factores oceanográficos. Las capturas en el Océano Pacífico Oriental (OPO) están correlacionadas con giros anticiclónicos, frentes térmicos y eventos de surgencias (Blackburn, 1965; Harrison, 2000). Los vientos que soplan perpendicular a la costa generan surgencias eólicas que llevan a la superficie aguas frías profundas, ricas en nutrientes propiciando así el desarrollo de una larga cadena alimenticia a organismos pelágicos como el atún (Blackburn, 1965).

El estado del mar y la temperatura superficial del mar (TSM) afectan a las condiciones de pesca, lo que se relaciona directamente al esfuerzo del viento en la superficie del mar. Cuando la TSM es elevada, como en los eventos de El Niño o hay mar borrascoso durante periodos largos, disminuye la captura (Anónimo, 1997).

El Océano Pacífico Oriental Tropical (OPOT) es una de las áreas más productivas de los océanos del mundo y soporta importantes pesquerías como las de clupeidos y atunes; es también una región de variabilidad intra e inter-anual significativa, entre otras la asociada con El Niño Oscilación del Sur (ENOS). El OPOT se encuentra bajo la influencia de grandes e importantes sistemas de corrientes que lo hacen mantener una estructura física compleja y una alta variabilidad estacional, interanual y espacial (Fiedler, *et al.* 1991).

En el OPOT se presentan tanto surgencias costeras como oceánicas. Las primeras a lo largo de la costa occidental de Baja California y Perú, así como particularmente a lo largo de América central (Golfos de Tehuantepec, Papagayo y Panamá), donde la topografía continental tiene un efecto importante en el desarrollo de las surgencias (Fiedler, *et. al* 1991).

Los vientos que generan surgencias costeras en América central, son resultado de una combinación de factores meteorológicos y topográficos. En Alaska y el noroeste de Canadá se generan centros de alta presión atmosférica durante invierno, los cuales se desplazan hacia el sureste del Golfo de México junto con un frente atmosférico frío, que forma una zona baroclínica. En el caso del Golfo de Tehuantepec, esta masa de aire frío es retenida por la Sierra Madre del Sur, la orografía y la meteorología establecen una diferencia de presión atmosférica entre el Golfo de México y el Golfo de Tehuantepec. Esto produce que el viento sea forzado violentamente hacia el Sur a través del Istmo de Tehuantepec, formando vientos que al llegar al océano rompen la estratificación que llevan a la termoclina hasta pocos metros de la superficie (Stumpf y Legeckis, 1977) y así el AAA es más vulnerable a la captura. Cuando decae la fuerza de dichos vientos, lleva consigo una disminución del afloramiento, la TSM se eleva y la termoclina es más profunda, lo que reduce la vulnerabilidad de captura del AAA (Anónimo, 1983).

Para entender la importancia de los nortes en el Golfo de Tehuantepec hay que mencionar que la mayor parte de la zona tropical de los océanos, especialmente lejos de las costas, es de muy baja productividad biológica debido a la estructura física de sus aguas. Desde los primeros 20 hasta 30 metros (capa de

mezcla) bajo la superficie marina se tiene una temperatura que va desde los 23 a los 30° C. Bajo esta capa de mezcla se encuentra la termoclina a 80 m de profundidad que es una verdadera barrera para el flujo de propiedades en los océanos tropicales; por lo tanto, cualquier mecanismo que lleve a la superficie aguas subsuperficiales ricas en nutrientes, propicia el desarrollo de una larga cadena alimenticia.

El caso del Golfo de Tehuantepec, con forzamiento por un “chorro” de viento que sopla perpendicularmente a la línea de costa desde tierra hacia el mar, es una situación poco común y sus efectos en la vulnerabilidad del AAA no ha sido estudiada extensamente. Sin embargo, en mar abierto el efecto de una distribución de vientos que no es homogénea horizontalmente, es producir cambios en la profundidad de la capa superficial mezclada. Como el transporte de Ekman depende de la intensidad del viento, la distribución del viento en forma de chorro tiende a acumular agua en algunas zonas (convergencias) y a emerger en otras (divergencias); esto provoca que la termoclina se aleje o se acerque a la superficie, respectivamente. Si la termoclina aflora lo suficiente para que afecte el mezclado vertical producido por el viento, se tiene una inyección de aguas frías con nutrientes a la zona superficial, donde pueden utilizarla los organismos fotosintetizadores y los niveles tróficos superiores (Lavín *et al.*, 1992).

La producción primaria depende de la presencia de nutrientes, que provienen de aportes de nuevos materiales y el reciclado de la zona eufótica. Existen aportes que provienen de las surgencias, así como por otros procesos de difusión que son favorecidos por la baja profundidad de la termoclina y los frentes oceánicos. La producción secundaria y niveles tróficos superiores tienden a localizarse en zonas de alta productividad primaria. De esta manera, la distribución y abundancia del zooplancton y necton es en forma de parches con patrones temporales y espaciales muy variados, con mayor producción en áreas donde la termoclina es permanente o estacionalmente baja (Lavin *et al.*, 1992). Todo este proceso repercute en la distribución de depredadores pelágicos como delfines, túnidos y otras especies de peces.

Los cardúmenes de AAA son más vulnerables a la captura cuando la termoclina es fuerte y se encuentra cerca de la superficie. Las temperaturas se reducen de unos 23° C en la parte superior de la termoclina y a 15° C en la parte inferior. La isoterma de los 23° C se ubica en el límite superior intermedio del hábitat del AAA y la isoterma de los 15° C se encuentra cerca del límite inferior de tolerancia (Forsbergh, 1989). La profundidad de la termoclina y la estructura vertical de la temperatura son relativamente uniformes durante las temporadas de pesca, desde la costa de México y América central hasta la línea ecuatorial. Sin embargo, a los 95 ° W se encuentran cambios en la profundidad de la termoclina y en la estructura de la temperatura vertical, debido a las variaciones en la superficie causadas por el esfuerzo del viento (Legenkins, 1985).

Por otra parte, el ambiente oceánico está altamente estructurado con la unión de diferentes masas de agua, formando zonas de frentes donde parámetros importantes como la salinidad, temperatura y concentración de nutrientes pueden cambiar rápidamente en cortas distancias horizontales. Como consecuencia el fitoplancton, zooplancton y el necton cambian significativamente su abundancia para propiciar condiciones de alimento que aprovechan los organismos pelágicos como el atún (Power y Nelson, 1991).

II.- Antecedentes

La habilidad de los pescadores para localizar zonas de frentes térmicos y surgencias es limitada, debido al campo de cobertura disponible. El uso de los sensores por satélite pueden ahora detectar color del océano o temperatura en una amplia zona geográfica y ser usados para apoyar las pesquerías de organismos comercialmente importantes (Laurus *et al.*, 1984; Power y Nelson, 1991).

Dentro de los trabajos realizados en el área pesquera donde se mostró el potencial de los datos de imágenes de satélite para el estudio de organismos marinos, las aplicaciones se han venido incrementando. A continuación se describen algunos de éstos estudios.

Maul *et al.* (1984) utilizaron imágenes por satélite para comparar la temperatura superficial del mar con la captura de atún aleta azul en el Atlántico durante 1979 y 1980. Las capturas en 1980 fueron consideradas más altas que las de 1979 y atribuyeron éste incremento a que las actividades pesqueras se desarrollan en las zonas de frentes térmicos.

Laurus *et al.* (1984) usaron imágenes de color del océano del Coastal Zone Color Scanner (CZCS), y de TSM del Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) para relacionar las capturas de albacora con características en el OPO, y concluyó que la albacora tiene una clara asociación con el color del océano y frentes termales.

Herron *et al.* (1989) cuantificó las relaciones entre las capturas de peces y estructuras de temperatura en el Golfo de México. Analizaron veinte imágenes de TSM con capturas del pez demersal butterfish (*Peprilus burti*) del mismo periodo. Calcularon regresiones estadísticamente significativas con la captura de butterfish hacia gradientes de TSM calculados desde imágenes de satélite.

Fiedler y Bernard (1987) analizaron imágenes de satélite y contenido estomacal de la albacora y barrilete, y demostraron que la alimentación de estos peces están asociados a regiones de frentes térmicos fuera de las costas de California.

Reddy (1995) usó TSM procedente de satélite para mostrar la distribución y movimientos del atún aleta azul y albacora al sur de Tasmania. Fueron asociados a giros persistentes de mesoescala, centros cálidos y fuertes fronteras térmicas.

Rojo Díaz (1997) determinó la relación entre las capturas de AAA en lances sobre delfines con la TSM y evaluó la distribución de barcos cerqueros mexicanos en zonas potencialmente productivas afectadas por huracanes. Concluyó que la distribución espacial de los lances de AAA está relacionada con frentes térmicos, en un patrón paralelo y a lo largo del frente. La presencia de huracanes y/o tormentas afecta la distribución de los lances debido a que no pueden operar bajo tales condiciones, aunque existen temperaturas y frentes favorables.

Diversos estudios han demostrado que la densidad relativa del AAA parece seguir la producción primaria, coincidiendo su presencia con áreas de surgencia, frentes oceánicos y otras áreas de convergencia y divergencia.

Blackburn (1963), al relacionar la abundancia del AAA con las condiciones del viento en el Golfo de Tehuantepec encontró un retardo de tres meses entre la acción del viento (invierno) y la cosecha del micronecton (primavera); para esta misma área y con el uso de información sobre pigmentos fotosintéticos derivada de imágenes de satélite. Ortega-García y Lluch-Cota (1996), calcularon un retraso de cuatro meses de la abundancia relativa del AAA respecto a la concentración de pigmentos fotosintéticos.

Dentro de la zona de estudio, las aguas del noroeste del Golfo de Tehuantepec han sido consideradas como de alta intensidad de esfuerzo pesquero y de abundancia de AAA (Allen y Punsly, 1984) y se reconoce el norte de esta zona como la principal área de desove en aguas del Pacífico mexicano durante los meses de invierno (González y Ramírez, 1989)

La pesquería del atún aleta amarilla

Las poblaciones de AAA sostienen una pesquería de gran importancia en el OPO. La pesca se realiza a través de tres artes de pesca: red de cerco, vara y palangre. Los barcos cerqueros, así como los barcos vareros, capturan cardúmenes que nadan o se alimentan en capas superficiales, mientras que los barcos palangreros capturan individuos que nadan en capas subsuperficiales (Méndez-Gómez-Humarán, 1995).

En la actualidad la flota atunera mexicana del OPO esta compuesta con más del 80 % por embarcaciones cerqueras, aunque estas difieren en capacidad de carga, tamaño, antigüedad y poder de pesca (Vaca-Juan, conversación personal). Desde 1987 la flota atunera mas grande en el OPO ha sido la mexicana, con un 36 % de la capacidad total en 1995, capturándose en ese mismo año más del 42 % del total realizado en el OPO por embarcaciones cerqueras (Anónimo, 1997).

Las embarcaciones con redes de cerco pueden capturar tres tipos de cardúmenes de atunes de acuerdo a su tipo de asociación: aquellos asociados con delfines; con objetos flotantes; y a perturbaciones superficiales denominadas "brisas", lo que origina maniobras de captura con redes distintas (Anónimo, 1997).

El tipo de asociación se relaciona con las tallas de AAA capturado, las cuales son mayores a medida que los lances se localizan más alejados a la costa. Méndez-Gómez-Humarán (1995) menciona que debido al tipo de asociación, el número de lances sobre AAA asociado a delfines considerablemente más alto en zonas alejadas a la costa, en comparación a los lances sobre cardúmenes libres y asociados a objetos flotantes.

Se ha demostrado que diferentes factores influyen en los niveles de captura. Las zonas de pesca, las temporadas del año, la velocidad del barco, la ayuda aérea y las dimensiones de la red, influencian los niveles de captura (Allen y Punsly, 1984) y por consiguiente las estimaciones de la abundancia relativa del recurso, basados en datos de captura y esfuerzo. De igual forma, los barcos de menor capacidad de acarreo, realizan lances sobre cardúmenes libres y objetos

flotantes más frecuentemente, en comparación con los de mayor calado, los cuales son más eficientes en la pesca de AAA asociada con delfines (Sosa-López, 1999).

En este estudio se evaluará la posible relación entre los cambios de la TSM del mar a través de la velocidad del viento (VV) y el éxito de la pesca de AAA.

III.- Área de estudio

EL Golfo de Tehuantepec es la frontera oceánica sur de la zona económica exclusiva de México en el Océano Pacífico (Fig. 1). Tiene una gran importancia por sus características oceanográficas y pesqueras. Es una región de aproximadamente 125, 000 km² delimitada al sur por la latitud de 12° N, al norte por la costa mexicana entre Puerto Ángel, Oaxaca y Puerto Madero, Chiapas, al este por el meridiano 92° W y al oeste en 97° W (Tapia-García, 1998).

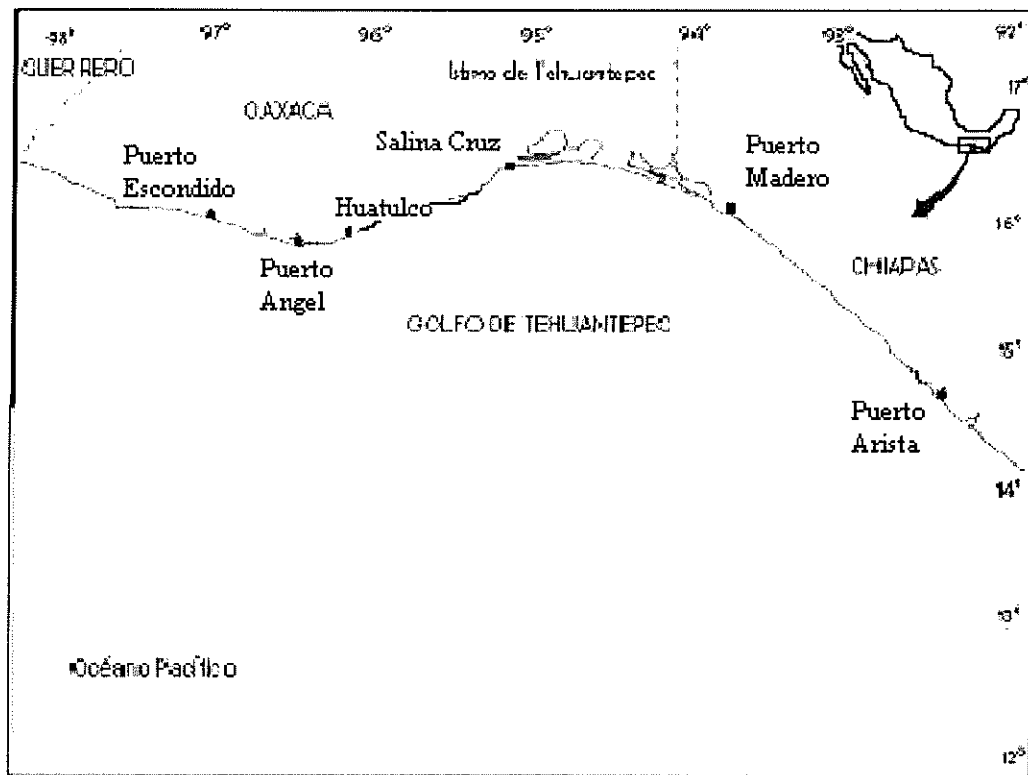


Figura 1.- Ubicación geográfica del Golfo de Tehuantepec, del Istmo de Tehuantepec y de algunas poblaciones costeras de referencia (Tapia-García, 1998) .

En la frontera norte del Golfo de Tehuantepec se encuentra el Istmo de Tehuantepec (Fig. 2). Este es el estrecho continental entre el Golfo de México y el Océano Pacífico que separa la Sierra de Chiapas de la Sierra Madre del Sur, con una altitud media de 2, 000 m sobre el nivel medio del mar. En la parte central del Istmo de Tehuantepec, la cadena montañosa se interrumpe en una franja de aproximadamente 40 km de ancho, donde la altura media de la sierra desciende

abruptamente a 250 m sobre el nivel del mar. Este es el lugar donde los “nortes” (centros de alta presión atmosférica que se desplazan al Golfo de México) producen vientos muy intensos (Lavín *et al.*, 1992).

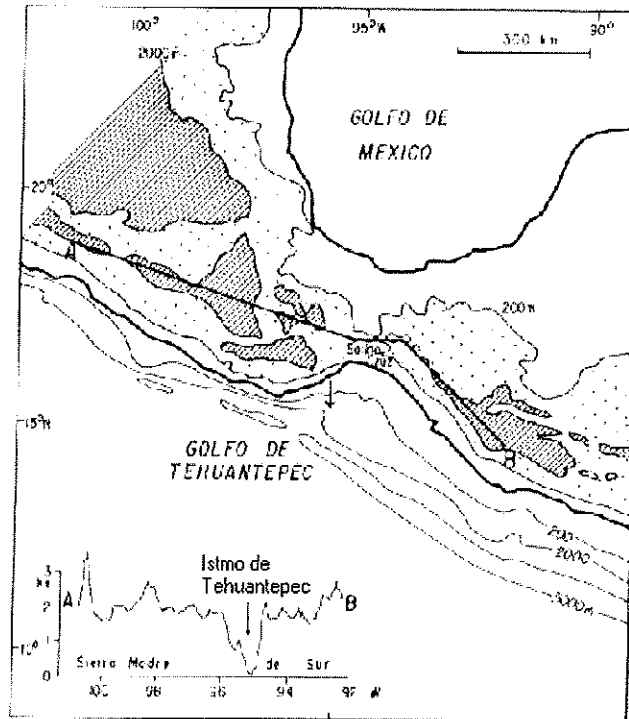


Figura 2.- Localización y características orográficas del Golfo de Tehuantepec. (Trasviña *et al.*, 1995)

La Secretaría de Marina (1988) informa una precipitación media anual de 99 mm en Salina Cruz (cabeza del Golfo de Tehuantepec), con dos épocas climáticas bien marcadas correspondientes a la época de lluvias (mayo a octubre) y la época de secas (noviembre a abril). Durante la época de secas se presentan vientos N-NW de alta velocidad denominados “Tehuano”.

Los vientos afectan un área aproximada de 200 km de ancho y 500 km a lo largo del Golfo de Tehuantepec, provocando corrientes superficiales con una velocidad promedio de 20 cm/s y surgencias de 10 m por día, lo que determina las temperaturas superficiales bajas del año. Durante el verano los vientos son generalmente débiles, estableciéndose corrientes superficiales en dirección oeste y noroeste, con velocidades de 15 cm/s, variando las temperaturas superficiales entre 28 y 30 ° C (Roden, 1961).

Oceanografía del Golfo de Tehuantepec

La circulación oceánica superficial en el OPO (Fig. 3), donde se encuentra el Golfo de Tehuantepec (Wyrtki, 1967), está dominada por la corriente de California (CC), la Contracorriente Norecuatorial (CCNE), la Corriente Surecuatorial (CSE), la Corriente Subsuperficial Ecuatorial (CSE), la Corriente Subsuperficial Ecuatorial (CSSE) y por la Corriente de Perú (CP).

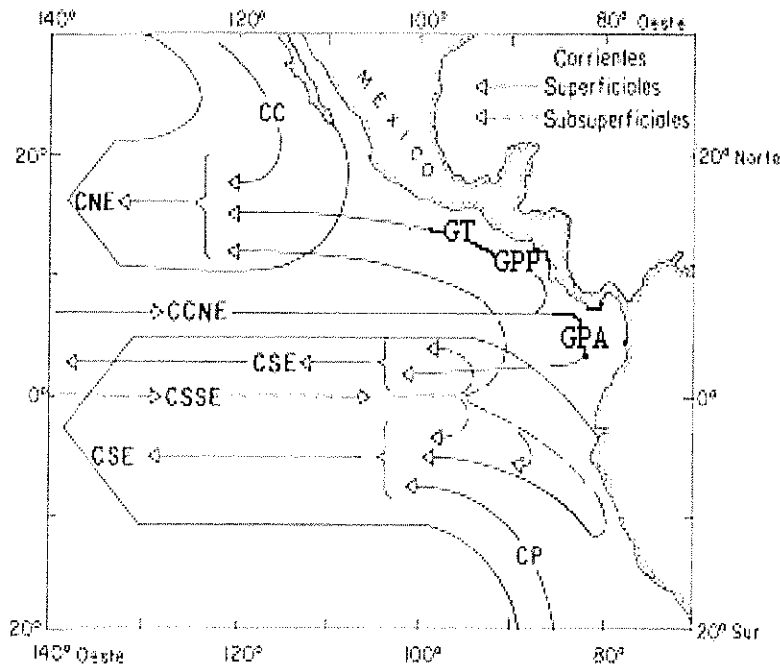


Figura 3.- Patrón de circulación del Océano Pacífico Oriental (Wyrtki, 1967) y los golfos de: Tehuantepec (GT), Papagayo (GPP) y Panamá (GPA).

A escala menor, la circulación superficial en el Golfo de Tehuantepec presenta cuatro patrones característicos a lo largo del año (Blackburn, 1962). Durante la temporada de nortes se tienen dos patrones de circulación muy similares entre sí. En el periodo de octubre a enero, se encuentran dos corrientes paralelas a la costa y en sentido contrario, las cuales se encuentran a la altura de Salina Cruz (Fig. 1) y una vez que dichas corrientes convergen siguen una trayectoria hacia mar adentro con deflecciones hacia el suroeste (Fig. 4a, 4c). A finales de la época de nortes de febrero a abril, se presenta un patrón similar al anterior. La diferencia estriba en que la contribución del noroeste se vuelve más importante

que la contribución del norte y una vez que las corrientes convergen forman dos celdas (Fig. 4d), desarrollándose un dipolo: un giro anticiclónico en la porción oeste y un ciclónico en la parte oriental del golfo.

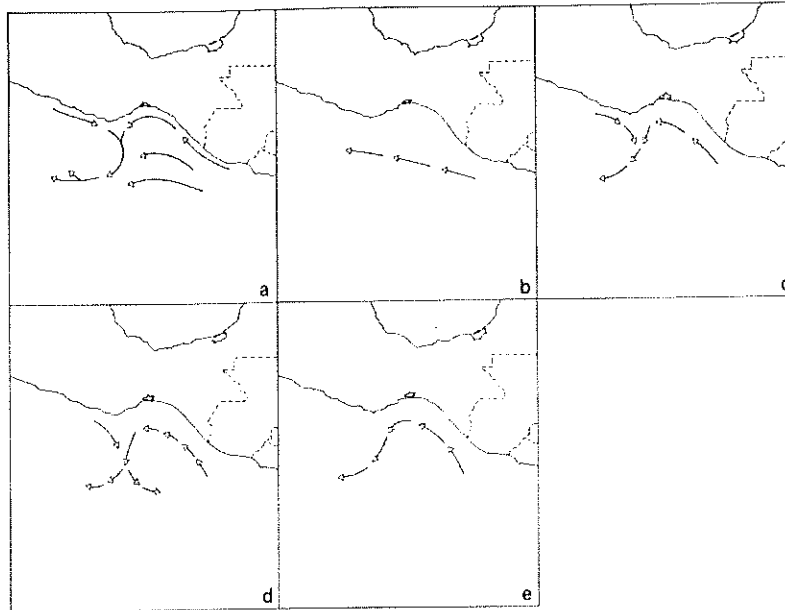


Figura 4.- Corrientes superficiales en el Golfo de Tehuantepec: a) Época de nortes de acuerdo a Roden (1961) y Blackburn (1962) b) de junio a agosto, c) de octubre a enero, d) de febrero a abril y e) en mayo y septiembre.

En el periodo de junio a agosto, en época de lluvias y huracanes, el patrón de circulación es muy sencillo, pues la corriente va hacia el noroeste (Fig. 4b). En los meses de mayo y septiembre, meses de transición de secas a lluvias y de lluvias a secas respectivamente, la corriente presenta una línea sinuosa con flujo de este a oeste (Fig. 4e) y va hacia el norte, con velocidades menores a las correspondientes al periodo de junio a agosto.

Las observaciones en el Golfo de Tehuantepec revelan que el patrón de circulación, por efecto de vientos del norte, consiste de un giro cálido anticiclónico de aproximadamente 200 km de diámetro en el oeste del golfo, con una débil contraparte ciclónica en la parte este del golfo (Trasviña *et al.*, 1995).

Wyrki (1967) estudió las masas de agua del Pacífico Ecuatorial Este. Al analizar la circulación en la zona próxima al golfo y mediante diagramas T-S encuentra que las masas de agua dentro del Golfo de Tehuantepec son: el Agua

Tropical Superficial, que se localiza en la capa superficial y se caracteriza por su baja salinidad, debido a la gran cantidad de agua de lluvia. Esta masa de agua, al igual que el Agua Subtropical Superficial, se introduce en el Golfo de Tehuantepec, principalmente en verano y otoño, a través de la Corriente de Costa Rica.

Durante el invierno y la primavera, el agua de la Corriente de California, con baja salinidad incursiona en la porción occidental del Golfo de Tehuantepec. Cerca de la cabeza del golfo, en la superficie, se encuentran aguas frías y salinas, las cuales han sido acarreadas hacia la superficie por el efecto de la surgencia. En este proceso intervienen el agua Tropical y Subtropical. Cuando el agua de la Corriente de California se encuentra con el agua de las surgencias, se forma un frente oceánico (Wyrski, 1967).

IV.- Objetivos

- Establecer una asociación entre las capturas de atún aleta amarilla con la velocidad del viento y la temperatura superficial del mar en el Golfo de Tehuantepec .
- Determinar la distribución espacio-temporal para las capturas de atún y analizar sus variaciones.

V.- Hipótesis

Las capturas de atún aleta amarilla están asociadas indirectamente a la velocidad del viento y directamente a la temperatura. Indirectamente a la velocidad del viento porque es la causa principal de las surgencias costeras en el Golfo de Tehuantepec, provocando mezcla vertical y tiene que pasar un periodo de tiempo en meses para que haya productividad primaria y se den las condiciones apropiadas para el desarrollo de cardúmenes de atún. Directamente a la temperatura por que es una variable asociada a la surgencia real e influye en la distribución de los atunes y por lo tanto, de las capturas. Existen otros factores que son limitantes pero no se analizan en este estudio.

VI.- Materiales y métodos

VI.I.- Datos de capturas.

La información de capturas de atún fue generada por el Programa Nacional de Aprovechamiento del Atún y Protección de Delfines (PNAAPD) y por la Comisión Interamericana del Atún Tropical (CIAT). Los datos están tomados a bordo de la flota atunera mexicana de cerco por personal especializado por la CIAT y el PNAAPD que registran información de: tipo de lance, fecha, tipo de barco, número de lances, captura por lance, latitud, longitud, si recibieron ayuda aérea o no, etc. De esta base de datos se extrajo la información de la fecha, capturas por lance, latitud y longitud de la flota atunera que operó en el Golfo de Tehuantepec de enero de 1993 a junio de 1998, periodo en el que se contaba con información de la VV y TSM al iniciar el planteamiento de esta investigación.

VI.II.- Datos de satélite.

VI.II.I.- Datos de viento

El sensor especial de microondas (Special Sensor Microwave Imager, SSM/I) determina los campos de viento. Se encuentra a bordo del satélite DMSPF-10 a cargo de "Defense Meteorological Satellite Program" (DMSP). La órbita del satélite es circular, sincrónico al sol, polar con pases ascendentes, con una inclinación de 98.8° , está a una altitud de 860 ± 25 km, el periodo orbital es de 102 minutos y repite su trayectoria sobre la superficie terrestre en dos días. El sensor SSM/I determina a través de cuatro bandas (19.35, 37.0, 85.5 y 22.235 GHz.) las radiaciones de microondas emitidas por la superficie oceánica (Robinson, 1997).

Los datos de viento fueron proporcionados por el Centro de Archivos Activos en Oceanografía Física (PO.DAAC), del Jet Propulsión Laboratory (JPL). El conjunto de datos contiene las componentes U y V del viento a 10 metros de la

superficie marina y se calculó la magnitud con el teorema de Pitágoras. Tienen cobertura global con resolución temporal pentada (promedio de cinco días) con resolución espacial de 1° de latitud por 1° de longitud.

El procesado de los datos de VV se realizó en las siguientes etapas. En la primera se adquirieron los datos con formato *.HDF de las componentes de la VV en la siguiente dirección:

ftp://podaaac.jpl.nasa.gov/pub/ocean_wind/ssmi/atlas_ssmi_ver10/data/level3.5_5_dat/

Se desplegaron con la hoja electrónica NOESYS y fueron importados al paquete de computo S-Plus 2000, donde se calculó la velocidad del viento. En la tercera etapa se seleccionó el área geográfica correspondiente a 150°-75°O y 30°N-20°S, se ajustaron los datos a una rejilla de 0.5°x0.5° (latitud, longitud) por el modelo de regresión local (loess). Este modelo genera una superficie de regresión de variables dependientes a partir de la combinación lineal de variables independientes y sus interacciones (Chambers y Hastie, 1993). La forma algebraica de la función loess es la siguiente:

$$y_i = g(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip}) + \varepsilon_i$$

en donde: y_i es la predicción realizada para la variable dependiente (TSM o VV) en un punto de la rejilla; g , es la superficie de la regresión; x_{ip} es cada una de las variables independientes (longitud y latitud) y sus interacciones y ε_i , es el error por ajuste.

Los valores de predicción generados por la función loess se convirtieron en un vector columna para agregarles latitud, longitud y como último paso se ajustaron a una malla perteneciente al filtro de Tierra con resolución de 0.5° x 0.5° en la que se descartaron todos aquellos puntos que estuvieran en tierra, y se agruparon en una matriz con latitud, longitud, v5 (primer dato pentado correspondiente 05/01/93), v10, v15....,v400 (correspondiente a 27/06/98).

VI.II.II.- Datos de temperatura

Las desviaciones de TSM fueron tomados por el Radiómetro Avanzado de Muy Alta Resolución (AVHRR, siglas en inglés), a bordo de los satélites polares NOAA-11 y NOAA-14. El sensor que se encuentra a bordo de los satélites estima la radiancia por banda de la siguiente forma: 0.58-0.68 μm , 0.725-1.1 μm , 3.55-3.93 μm , 10.5-11.5 μm y 11.5-12.5 μm . Los primeros dos canales corresponden a la región visible del espectro de luz y pueden proveer información de cobertura de nubes y radiación solar durante el día. Los últimos tres canales son del infrarrojo que proveen información de la cobertura de nubes durante la noche. Los satélites tienen órbita polar sincrónica al sol, el periodo es de 102 min. con inclinación de 98.8 °, en dos días repite su trayectoria sobre la superficie terrestre y se encuentran a una altitud de 833 km (Robinson, 1997).

Los datos de TSM son distribuidos por PO.DAAC (Physical Oceanography Distributed Archive Active Center) del Jet Propulsión Laboratory (JPL) y fueron procesados por el programa WOCE (World Ocean Circulation Experiment). WOCE tomó los mejores datos diarios de los pases ascendentes (día) y descendentes (noche) del algoritmo de Pathfinder para obtener los datos que se utilizaron en el presente estudio. Los datos están accesibles en la dirección: http://podaac.jpl.nasa.gov/pub/data_collection/woce_cd1/avhrr/data/

Los valores están en un rango de -3 a 36 °C con una precisión de 0.01 °C. Son un promedio de cinco días con una resolución espacial de 0.5 grados de latitud y longitud entre enero de 1993 y junio de 1998.

El procesamiento de datos de la TSM se realizó en tres pasos. En el primer paso se utilizó el lenguaje de programación Fortran para extraer los datos en formato *.dat y fueron importados al paquete de computo S-Plus 2000. En el segundo paso se seleccionó el área geográfica correspondiente a 150°-75°O y 30°N-20°S En las localizaciones donde no había información por efecto de las nubes se interpoló con el modelo loess. Con el resultado de las predicciones se generaron datos con latitud , longitud y el promedio pentado. Como último paso se ajustaron a una malla perteneciente al filtro de Tierra con resolución de 0.5° x 0.5°

en la que se descartaron todos aquellos puntos que estuvieran en tierra, y se agruparon los datos en una sola matriz conformada por latitud, longitud, primer dato del promedio pentado (05/01/93) hasta el último dato (27/06/98).

VI.III.- Determinación del área de estudio

Se realizó un análisis exploratorio en todo el OPO, con la finalidad de delimitar el Golfo de Tehuantepec en base al comportamiento de los datos de TSM y VV. Para ello se utilizaron dos métodos estadísticos: las Funciones Empíricas Ortogonales (FEO's) y modelos de "árboles de regresión".

El análisis de la variabilidad espacial se realizó por medio de las FEO's. El cual es un eficiente método para extraer los componentes dominantes en espacio y tiempo a series de funciones ortogonales o modos estadísticos, que son una combinación lineal de las observaciones originales y que contabilizan un gran porcentaje de la variancia total (Emery y Thompson, 1997). La representación algebraica es de la siguiente forma:

$$F(x_m, t) = \sum [a_i(t) \phi_i(x)]$$

donde F representa una matriz de dimensiones NxM, en donde N equivale a los puntos geográficos y M son las mediciones que se tienen para cada estación. m equivale a los N puntos dentro de la misma matriz de muestreo y t representa los M tiempos muestreados. $a_i(t)$ son las M amplitudes temporales que modulan a cada una de las funciones espaciales $\phi_i(x)$.

Los componentes temporales y espaciales son calculados por los eigenvectores y eigenfunciones de la matriz de covariancia N X M del conjunto de datos. Las FEO's son una técnica puramente estadística y muestran el comportamiento concentrado de la variabilidad de los datos y no están directamente relacionadas a ningún fenómeno real (son adimensionales).

El método de Descomposición de Valores Singulares (DVS) permitió obtener las FEO's de una forma rápida y eficiente (Emery y Thompson, 1997). Este método extrae las componentes temporales (A), las funciones espaciales (U) y el porcentaje de la variabilidad (S) sin calcular la matriz de covariancia. Se

construyó una matriz (D) para cada variable física y poder utilizar la DVS, constituida por longitud y latitud del OPO (150°-75°O y 30°N-20°S) en los renglones y por valores de VV y TSM en las columnas. La dimensión de la matriz para cada variable física fue de 12542x400 y así se obtuvieron los mismos puntos geográficos para el OPO.

La representación en DVS es de la siguiente forma:

$$\mathbf{D} = \mathbf{USV}^T$$

donde:

D = matriz de datos original

U = funciones o modos espaciales

S = eigenvalores o valores característicos

V^T = matriz transpuesta de las funciones o modos espaciales

El producto de los elementos de **V** por una matriz que contenga en su diagonal principal los elementos de **S** generan la matriz **A** que proporciona las amplitudes temporales que modula a cada una de las funciones espaciales.

$$\mathbf{A} = \mathbf{VS}$$

Antes de la aplicación de la DVS a la matriz de datos originales se realizó una normalización para disminuir las variaciones que había en los datos, quedando la matriz adimensional. En esta normalización se quitó la media y se dividió por la desviación estándar para poder realizar comparaciones entre los diferentes modos.

A los resultados espaciales de la DVS se les aplicó el modelo “árbol de regresión” para delimitar áreas en el OPO. Los árboles de regresión son un modelo de ajuste que utiliza el procedimiento conocido como “partición binaria recursiva”, en el cual, los datos homogéneos son divididos entre sí a lo largo de ejes de coordenadas (longitud, latitud), que utiliza como parámetro la heterogeneidad de la desviación. Las divisiones son continuas hasta que los nodos son puros o los datos son demasiado escasos; los nodos terminales son denominados “hojas” (valor de predicción de TSM o VV) y el nodo inicial es llamado “raíz” o partición inicial (Ripley, 1994).

VI.IV.- Análisis exploratorio

Se realizó un análisis exploratorio de las variables en estudio para obtener características y tendencias espaciales en el Golfo de Tehuantepec. Consistió en promediar las columnas (espacio) de la matriz original en cada una de las variables físicas (VV y TSM) y describirlas geográficamente .

En los dos gráficos resultantes se sobrepusieron las localizaciones de los lances (capturas exitosas y no exitosas) y así poder visualizar las tendencias de la flota atunera en todo el periodo de estudio. Dadas las características espaciales fue necesario identificar puntos donde hubo características sobresalientes de las variables físicas y donde se concentró la flota atunera. Por último se extrajo la información de los puntos de TSM, VV, captura y localizaciones de operación de la flota atunera en puntos donde hubo una correlación significativa y diferente.

VI.V.- Resolución temporal

La resolución temporal de los datos de satélite es pentada, por lo que se aplicó la función de autocorrelación (FAC) para determinar la unidad mínima de tiempo con los puntos identificados en el análisis exploratorio. La función de autocorrelación es una importante herramienta para describir la dependencia serial (o temporal) de una serie de tiempo univariada (Ripley, 1994)

Se analizó la variación del promedio pentado de los datos de FAC en tiempo $p(k)$ con la VV y la TSM (x_t). La función de autocovariancia de x_t , en desfase k está definida como:

$$\gamma(k) = E(x_t - \mu)(x_{t+k} - \mu), K = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

la cual nos permite describir la dependencia serial de la autocorrelación definida como:

$$\rho(k) = \gamma(k) / \gamma(0) = \gamma(k) / \sigma_x^2$$

y es simplemente la estandarización de la función de autocovariancia.

Con el tiempo determinado por las FAC se analizaron las variaciones espacio-temporales de la captura y temporales de las variables físicas. Para

analizar estas variaciones gráficamente se realizaron los siguientes arreglos a las matrices originales: promedio de VV, promedio de TSM y sumatoria de las capturas.

VII.- Resultados

VII.I.- Determinación del área de estudio

El porcentaje de la varianza explicada por cada uno de los modos y la acumulada de las FEO's son presentados en la tabla I. No se obtuvieron porcentajes acumulativos altos, por lo cual se decidió explicar los cuatro primeros modos, que describen el mayor porcentaje de la varianza total.

Tabla I.- Porcentaje de varianza y varianza acumulada para los cuatro primeros modos de las variables físicas

Modo	Velocidad del Viento		Temperatura Superficial del Mar	
	% de varianza	Varianza acumulada	% de varianza	Varianza acumulada
1	20.35	20.35	57.20	57.20
2	13.34	33.69	18.47	75.67
3	9.92	43.61	4.05	79.72
4	8.04	51.65	3.12	82.84

A continuación se describen las componentes espaciales de los cuatro primeros modos para la VV y TSM, haciendo énfasis en las áreas delimitadas por los árboles de regresión y en la variabilidad de cada modo. Se observó de manera general, que las variables tienen comportamientos inversos en cuanto a su variabilidad. En los que se refiere a las áreas acotadas por los árboles de regresión, se obtuvo similitud entre las dos variables, abarcando en algunas ocasiones los golfos de Panamá, Papagayo y Tehuantepec.

El primer modo de la VV explicó el 20.35% de la variabilidad total y el área delimitada en el Golfo de Tehuantepec por el árbol de regresión, quedó limitada por una amplia región (Fig. 5a). Los valores de la variabilidad en esta zona fueron cercanos a cero. Esta región quedó limitada al norte por 20° latitud (costa de Jalisco) y al sur por los 8° latitud abarcando los Golfos de Papagayo y Panamá, áreas que también son influenciadas por los vientos del norte. En lo que se refiere a longitud, también fue amplia la delimitación, llegando hasta los -106° W.

En las variaciones de la VV del primer modo se distinguen dos regiones de diferente variabilidad separadas por el ecuador (Fig. 5a). Sobresale un centro de valores altos en latitudes menores al ecuador y bajos en la parte norte del OPO aumentando gradualmente. La región costera del Golfo de Tehuantepec no muestra una alta variabilidad.

El segundo modo representa el 13.34 % de la variabilidad de los datos de la VV (Fig. 5b). El acotamiento realizado por el árbol de regresión fue similar al primer modo, a diferencia que es menor en cuanto a longitud se refiere que va desde -102° . En esta área también se encuentran las zonas que son influenciadas por los vientos del norte en invierno, como lo son: el Golfo de Tehuantepec, Papagayo y Panamá. Con respecto a la variabilidad, se observó que fue ligeramente positiva en las costas del área en estudio y negativa en el área restante.

En el patrón espacial de la VV del segundo modo en la región oceánica, valores positivos son observados en el ecuador, en los alrededores y sobre el domo de Costa Rica, dando una forma similar a la corriente Surecuatorial. La variabilidad es positiva en toda la franja del ecuador y disminuye hacia latitudes mayores y menores (Fig. 5b).

El tercer modo representa el 9.92 % de la variabilidad total de la VV. Se obtuvo una demarcación angosta en el Golfo de Tehuantepec realizada por el árbol de regresión (Fig. 5c). En latitud quedó delimitada al sur por los 14° N y al igual que el primer modo en longitud, llegó hasta los -105° (costa de Jalisco), pero sin abarcar los golfos de Panamá y Papagayo. Los valores adimensionales de la variabilidad nuevamente fueron cercanos a cero.

La variabilidad del tercer modo mostró similitud con el primero en regiones oceánicas (Fig. 5c). Un centro de valores positivos se observaron en la región costera de Perú hasta la parte oceánica con límite en longitud de 100° O. En latitudes cercanas al ecuador se observó una banda de valores negativos del OPO y disminuye conforme se acerca a la costa. En el norte del OPO mostró una similitud con la corriente Norecuatorial con valores cercanos a cero. Las

características de la variabilidad de este modo se asemejan a las condiciones cuando se presenta el fenómeno de El Niño.

El cuarto modo representó el 8.04 % de la variabilidad total de la VV (Fig. 5d). En el Golfo de Tehuantepec se obtuvieron valores cercanos a cero al igual que los modos anteriores. El área delimitada por el árbol de regresión fue estrecha en latitud (de 12° a 16° N), y extendida en cuanto a longitud se refiere (130° O), está delimitación fue semejante en latitud al tercer modo.

En la región oceánica del cuarto modo se observa un máximo en el norte del OPO, valores cercanos a cero en latitudes de 0° a 10° N y bajos en latitudes menores al ecuador (Fig. 5d).

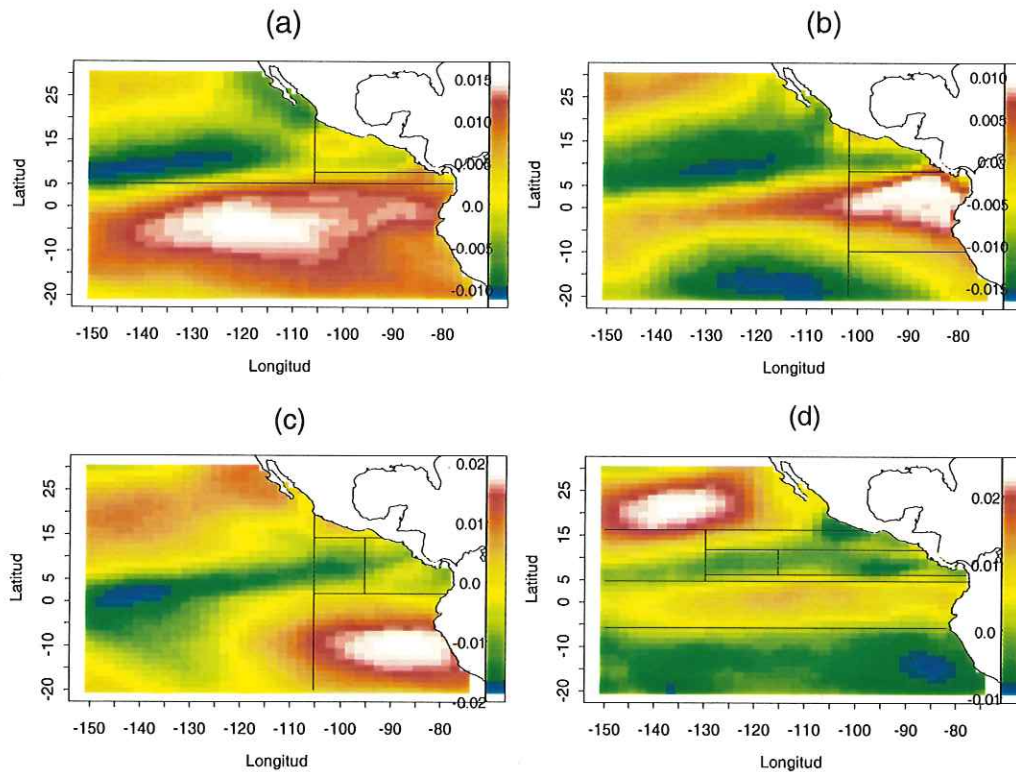


Figura 5.- Distribuciones espaciales de los cuatro primeros modos de la velocidad del viento, a) Primer modo, b) Segundo modo, c) Tercer modo y d) Cuarto modo. Las áreas fueron delimitadas por el árbol de regresión y los colores representan la variabilidad adimensional de los diferentes modos.

El primer modo de la TSM tuvo el 57.20 % de la varianza. El área delimitada en el Golfo de Tehuantepec por el árbol de regresión fue los 20° N (costa de Jalisco), al sur por los 14° N y en longitud alcanzó los -106° O. Los valores de la variación en esta región son cercanos a cero sin resaltar valores negativos o positivos.

Las variaciones de la TSM en el primer modo en la zona oceánica se distinguen dos regiones de diferente variabilidad separadas por el ecuador (Fig. 6a). Se distingue una franja de valores cercanos a cero que separa el OPO norte del sur, localizada en el ecuador. Valores muy altos fueron observados en latitudes menores al ecuador y bajos en la parte norte del OPO, disminuyendo paulativamente.

El segundo modo de la TSM representa el 18.47 % de la varianza. Valores positivos se observaron en el Golfo de Tehuantepec (Fig. 6b) y el acotamiento realizado por el árbol de regresión abarcó los golfos de Tehuantepec, Papagayo y Panamá, con límite en longitud de 98° O y latitud de 15° N.

En la región oceánica valores positivos fueron observados en casi todo el OPO, con excepción de las latitudes más bajas (Fig. 6b). Se observó un centro amplio de valores muy altos (desde 5° S) que va desde los 150° O hasta 120° O.

El tercer modo representa el 4.05 % de la variabilidad total de la TSM (Fig. 6c). La demarcación realizada por el árbol de regresión en el Golfo de Tehuantepec fue la más angosta de todos los modos, tanto para la TSM como para la VV. En latitud quedó delimitada por latitudes de 15° a 18° N. Los valores adimensionales de la variabilidad fueron positivos y mucho mayores que los modos anteriores.

La variabilidad del tercer modo mostró dos núcleos localizados entre los 115° O y 100° O sobre el mismo rango de latitud, aunado a ello se observan valores positivos a esta misma franja hasta los 150° O (Fig. 6c). Estos núcleos pueden ser giros que se desplazan hacia el oeste del OPO, resultado de los vientos intensos que se generan en invierno. Enfrente de las costas de Perú los valores son negativos, estos dan forma parecida a la corriente del Perú. En todo el OPO restante no existió tanta variabilidad, los valores fueron cercanos a cero.

En el cuarto modo del a TSM se obtuvo el 3.12 % de la variabilidad total (Fig. 6d). Los valores mas altos se presentaron en el área delimitada por el árbol de regresión, en los que se abarcan los golfos de Tehuantepec, Papagayo y Panamá. El limite en longitud es de 102° O y un ancho de latitud de 17° a 8° N.

En la región oceánica, se obtuvo una gran variabilidad en toda la región del OPO (Fig. 6d). Centros de valores negativos se marcaron en la corriente del Perú, al sureste y al noreste del OPO. Los valores positivos fueron en la región del norte y en latitudes medias.

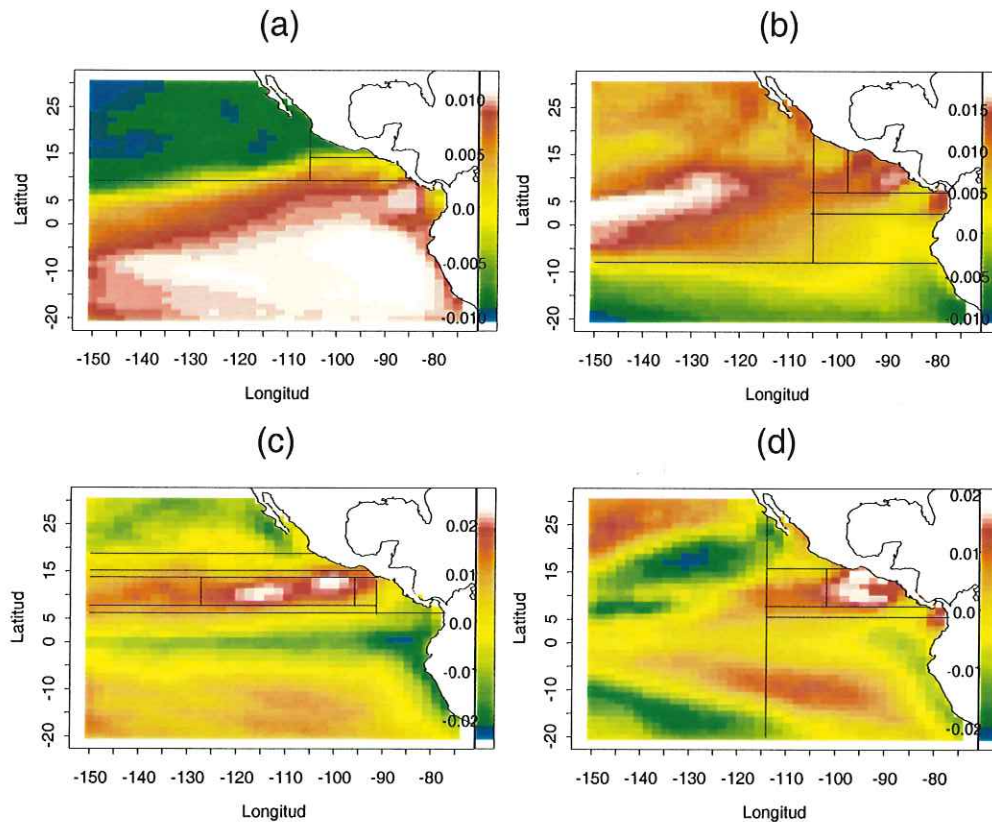


Figura 6.- Distribuciones espaciales de los cuatro primeros modos de la temperatura superficial del mar, a) Primer modo, b) Segundo modo, c) Tercer modo y d) Cuarto modo. Las áreas fueron delimitadas por el árbol de regresión y los colores representan la variabilidad adimensional de los diferentes modos.

A continuación se da una descripción de las componentes temporales de los cuatro primeros modos de la VV y TSM. Al realizar comparaciones entre las variables para cada modo, se observó una tendencia a ser inversas (alto en VV y bajo en TSM y viceversa) para todo el periodo de estudio.

En el primer modo las variaciones de VV y TSM presentan en tiempo un comportamiento inverso (Fig. 7a y 8a). La amplitud de la TSM es positiva de enero a junio (calentamiento), negativa de julio a diciembre (enfriamiento). El viento tiene variaciones inversamente proporcionales a la temperatura. En 1998 se observa un incremento de la TSM y para este mismo periodo la VV presenta un decremento comparado con los demás años para cada variable.

En el segundo modo de VV y TSM tuvo una variación temporal de valores positivos en invierno-otoño y negativos en primavera-verano (Fig. 7b y 8b). Las dos variables no muestran variaciones inversamente proporcionales en las amplitudes en comparación con el primer modo. Se observa un incremento de la TSM a partir de mayo de 1997 (320 días julianos) hasta febrero de 1998 (380 días julianos), teniendo un pico máximo en noviembre de 1997. Destaca el mismo pico de noviembre para viento, un decremento máximo entre diciembre de 1997 y enero de 1998. Posiblemente el calentamiento de la TSM y la VV con baja intensidad, están relacionadas con condiciones de El Niño.

En el tercer modo las amplitudes de la VV y la TSM son similares a excepción de 1998, en el cual los comportamientos son inversamente proporcionales (Fig. 7c y 8c). En la VV destacan picos positivos en los años de 1993, 1995 y finales de 1998, posiblemente indicadores de años Niño. En la TSM los picos de valores positivos se dieron en 1994 y 1995, negativos para finales de 1997 y 1998.

En el cuarto modo de las amplitudes se observó bastante variabilidad durante todos los años para las dos variables (Fig. 7d y 8d). En la VV solo se distinguen amplitudes positivas que sobresalen a finales de cada año. Con respecto a la TSM su comportamiento fue parecido al primer modo con la diferencia de que a mediados de 1996, sobresalen valores más altos en comparación de todos los años.

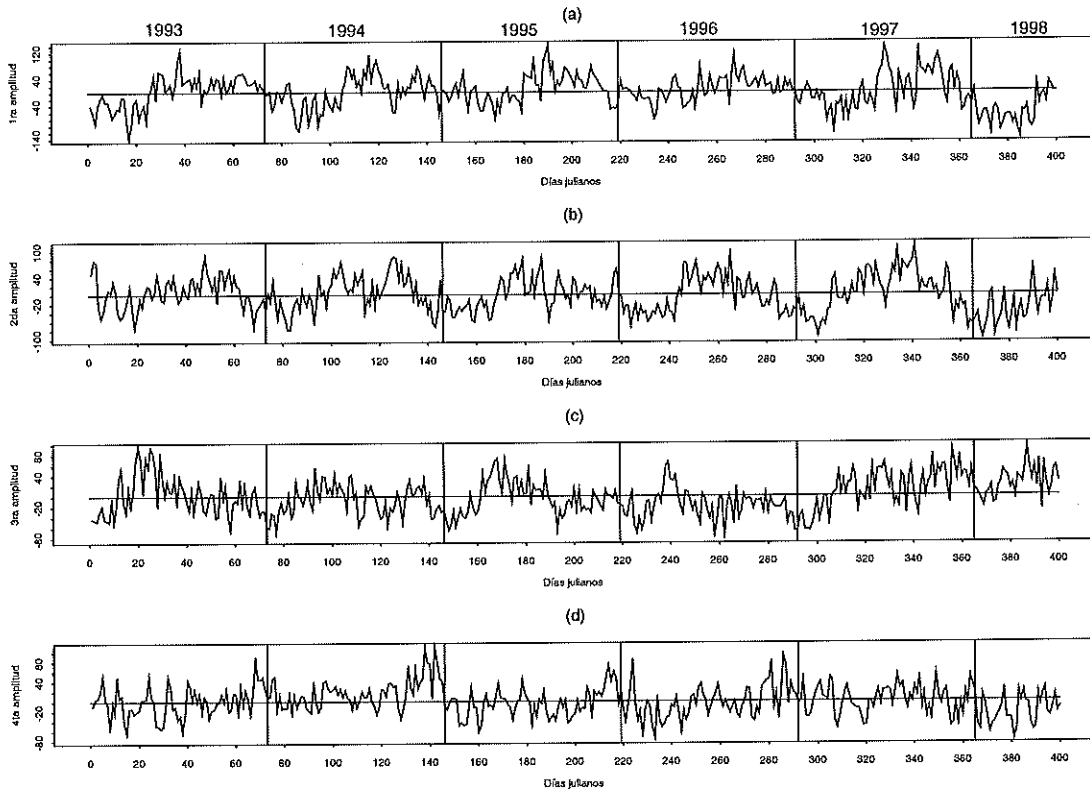


Figura 7.- Amplitudes de los cuatro primeros modos de la velocidad del viento, a) 1er modo, b) 2do modo, c) 3er modo y d) 4to modo. Los días julianos son cada cinco días, por lo que 400 es igual a 2000 días julianos que corresponden a todo el periodo de estudio.

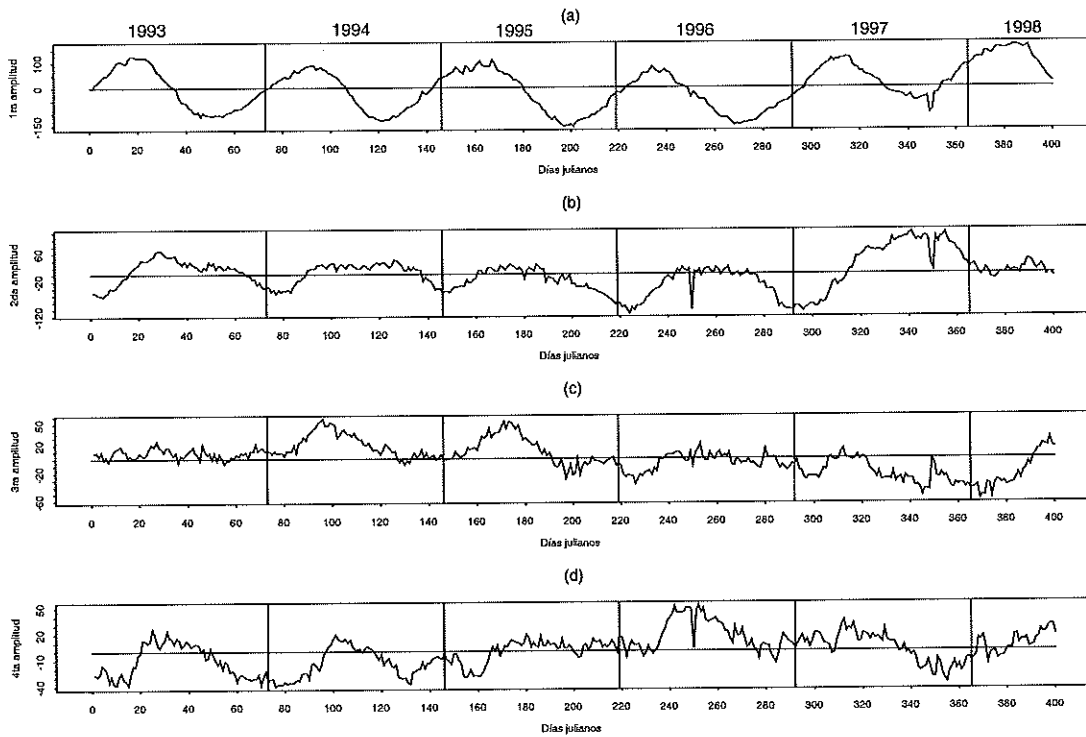


Figura 8.- Amplitudes de los cuatro primeros modos de la temperatura superficial del mar, a) 1er modo, b) 2do modo, c) 3er modo y d) 4to modo. Los días julianos son cada cinco días, por lo que 400 es igual a 2000 días julianos que corresponden a todo el periodo de estudio.

A partir de las FEO's la delimitación del área se realizó a través de la aplicación de los árboles de regresión. Solo se graficaron (en forma de líneas) las ramificaciones costeras en el OPOT. En los cuatro modos espaciales se obtuvo variabilidad negativa en la VV y para la TSM. Se observa un patrón similar en las líneas divisorias de latitud y longitud en el Golfo de Tehuantepec. En la tabla II se muestran los valores de la media obtenidos de latitud y longitud para los cuatro modos.

Tabla II.- Delimitación en latitud y longitud del Golfo de Tehuantepec para los cuatro modos de las variables y la media de las localizaciones.

Modo	Velocidad del Viento				Temperatura Superficial del Mar			
	Lat. N	Lat. S	Lon. W	Long. E	Lat. N	Lat. S	Lon. W	Long. E
1	20°	8°	106°	82°	20°	14°	106°	92°
2	18°	8°	102°	84°	15°	7°	98°	81°
3	20°	14°	105°	92°	18°	15°	*	93°
4	16°	12°	*	86°	17°	8°	102°	82°
Promedio	18.5°	10.5°	104°	86°	17.5°	11°	102°	87°

* No hubo partición en estos puntos espaciales

En las figuras 9 y 10 se muestran las áreas delimitadas por los árboles de regresión de cada uno de los modos para una mejor visualización. De las regiones acotadas se realizó un promedio para obtener el área de estudio, la cual fue de 18° a 11° N latitud por 103° a 86° O longitud (Fig.11).

Tabla III.- Georeferenciación del Golfo de Tehuantepec acotada por los promedios de los árboles de regresión en los cuatro modos de la VV y TSM.

	Latitud al N	Latitud al S	Longitud al W	Longitud al E
VV	18.5°	10.5°	104°	86°
TSM	17.5°	11°	102°	87°
Area de estudio	18°	11°	103°	86°

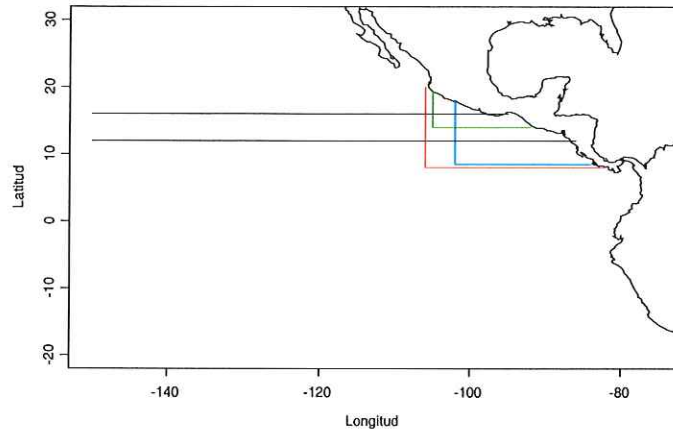


Figura 9.- Áreas delimitadas por los árboles de regresión para la velocidad del viento: Primer modo, Segundo modo, Tercer modo, Cuarto modo.

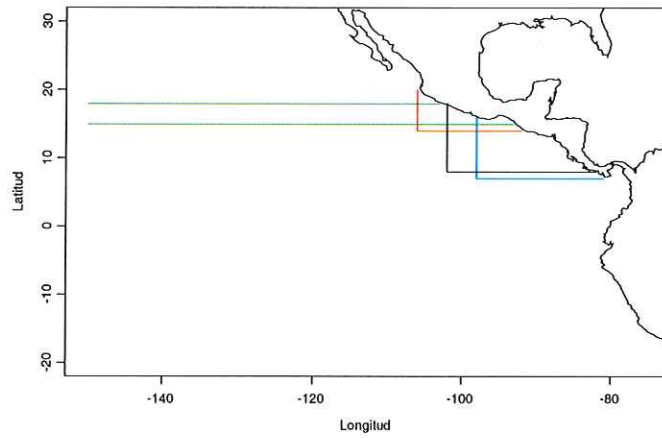


Figura 10.- Áreas delimitadas por los árboles de regresión para la temperatura superficial del mar: Primer modo, Segundo modo, Tercer modo, Cuarto modo.

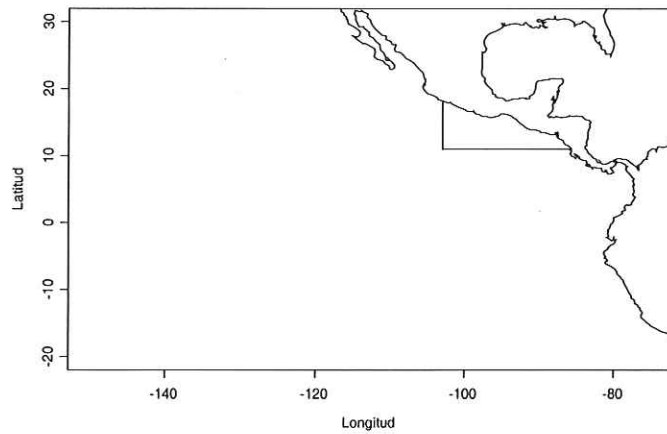


Figura 11.- Area del Golfo de Tehuantepec delimitada por la VV y TSM.

VII.II.- Análisis exploratorio

Se realizó un análisis exploratorio para visualizar las características sobresalientes de las variables (VV, TSM y capturas) en forma general. Se obtuvo promedio de variables físicas en tiempo (todo el periodo de estudio) para cada posición y se graficaron junto con los lances de todos los años.

Los rasgos sobresalientes para la VV fueron dos núcleos, al noroeste y al sureste del Golfo de Tehuantepec (Fig. 12a). El primer núcleo localizado al noroeste del área en estudio, tiene un mínimo de 1 m/s, en donde las capturas tuvieron una alta agregación alrededor de éste con mayor concentración en los 3 m/s. El segundo núcleo ubicado al sureste del golfo tuvo un centro de 2 m/s, con capturas al oeste del mismo, siendo menores en comparación con el primer núcleo.

La TSM tuvo un comportamiento inverso a la VV (Fig. 12b). El centro del primer núcleo se localizó al noroeste a los -100° O y 15.5° N con un ancho aproximado de $3 \times 3^{\circ}$, con temperatura máxima de 29.5° C. El segundo núcleo sobresaliente, pero con menos área, se localizó al este del golfo a los -92° O y 14° N con temperaturas máximas en el centro del mismo de 29.5° C. Alrededor de este último hubo menos lances comparado con el primer núcleo.

La visualización del análisis exploratorio permitió identificar doce puntos para determinar la resolución mínima de tiempo (Fig 12). La elección de estos doce puntos se basó en las características oceano-atmosféricas que fueron sobresalientes, y en donde hubo una alta agregación de capturas de la flota atunera. Se utilizaron los datos de las variables físicas para determinar la resolución mínima de tiempo con el análisis estadístico de autocorrelación.

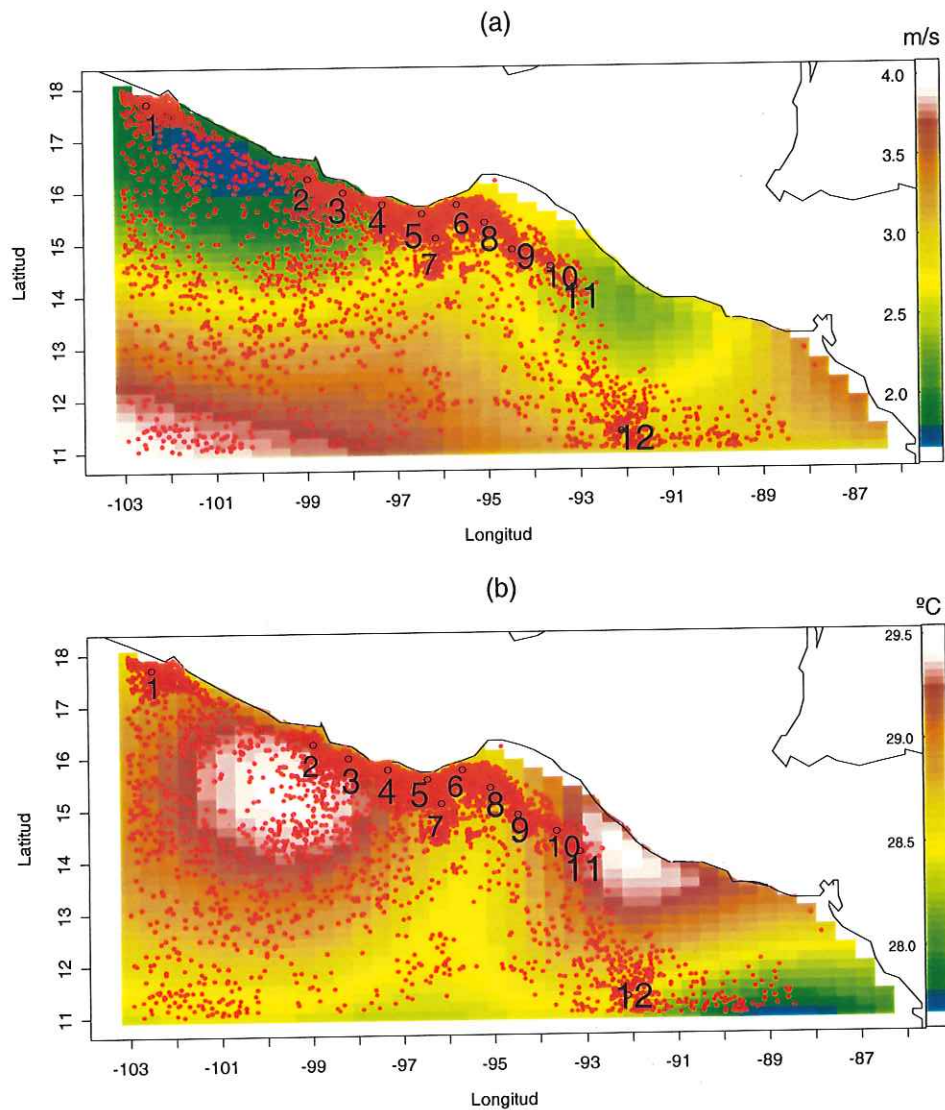


Figura 12.- Distribución espacial de los lanzes de la flota atunera de todo el periodo de estudio (1993-1998), sobrepuestos en los arreglos para la media de: a) velocidad del viento y b) temperatura superficial del mar

VII.III.- Resolución temporal

La unidad de resolución temporal se determinó con las variables físicas y fue el aspecto básico para hacer comparaciones intra e interanuales. Para ello se realizó un análisis de autocorrelación con los datos de VV y TSM, los resultados de la aplicación de esta técnica se presentan en las figuras 13 y 14. En el eje de

las abscisas (horizontal) se encuentran representadas las unidades de desfaseamiento (lags) y en las ordenadas (vertical) los doce puntos.

Se observó una tendencia a los doce desfaseamientos para las dos variables. En el caso de la velocidad del viento no se encontró una periodicidad en las cuatro primeros puntos, en los ocho puntos siguientes se observó una tendencia a los doce desfases (60 días o dos meses), con una correlación serial significativa de 0.1 y 0.2. En lo que se refiere a la TSM se observó también la misma periodicidad, en la cual solo se tomaron las correlaciones mayores a 0.4

En base al análisis de autocorrelación en tiempo, se decidió agrupar la información cada dos meses (60 días), obteniéndose 33 matrices de datos para cada una de las variables de la VV, TSM y capturas, correspondientes a los cinco años seis meses de 1993 a 1998.

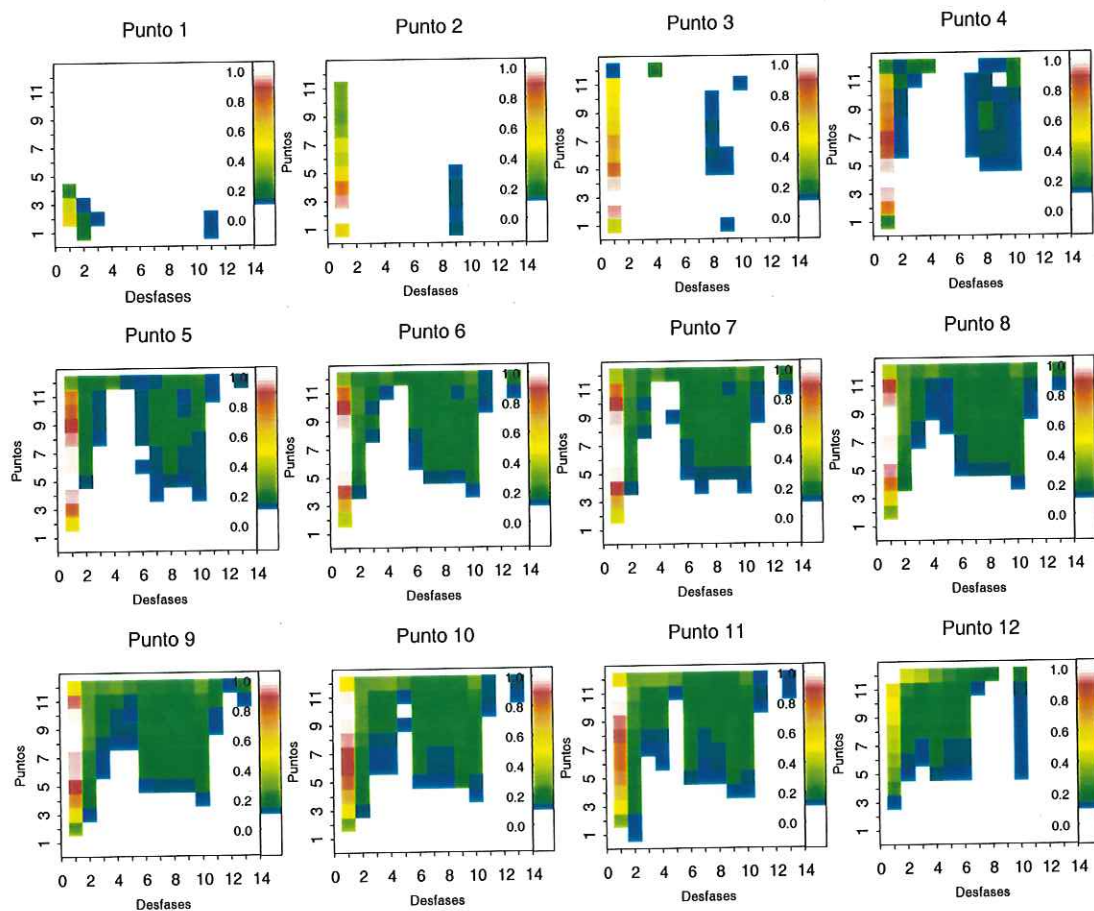


Figura 13.- Funciones de autocorrelación para los doce puntos de la velocidad del viento. En el eje de las abscisas se representan los desfaseamientos y en el de las ordenadas, los doce puntos de comparación.

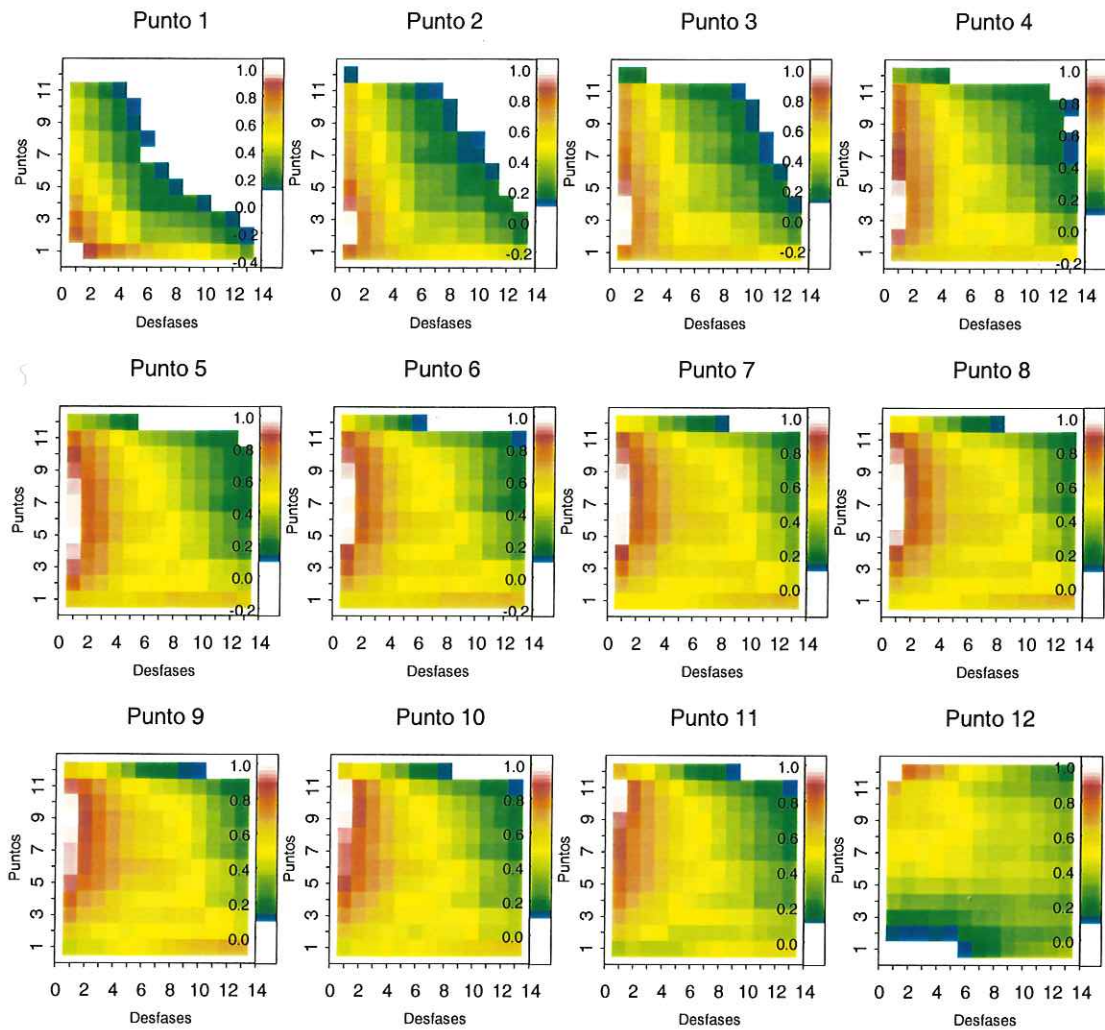


Figura 14.- Funciones de autocorrelación para los doce puntos de la temperatura superficial del mar. En el eje de las abscisas se representan los desfases y en el de las ordenadas, los doce puntos de comparación.

VII.IV.- Análisis temporal

Se realizaron arreglos con el promedio temporal de los renglones (tiempo) en las 33 matrices generadas para la VV y TSM, y la sumatoria de las 33 matrices de capturas de AAA, se graficaron en series de tiempo para su análisis (Fig. 15). La tendencia bimestral para el viento, muestra altas velocidades (entre 3 y 4 m/s) en los meses de noviembre a febrero, los mínimos se encontraron en los meses de mayo y junio (entre 2 y 2.5 m/s) con excepción de 1996, donde el límite inferior se encontró de mayo a octubre y con bajas ocurrencias en la velocidad menores a 3m/s. La distribución de la TSM fue inversa a la del viento, mínimos (27 °C) en los meses de noviembre a febrero y máximos (30 °C) en los meses de mayo a junio, también resaltaron bajas temperaturas en 1996, llegando hasta los 26 °C y con poca variabilidad interanual. En los lances se alcanzaron las mayores capturas totales en los primeros dos bimestres, salvo en 1995 donde se realizaron las máximas (4000) en el tercer bimestre y para 1998 las capturas fueron muy bajas.

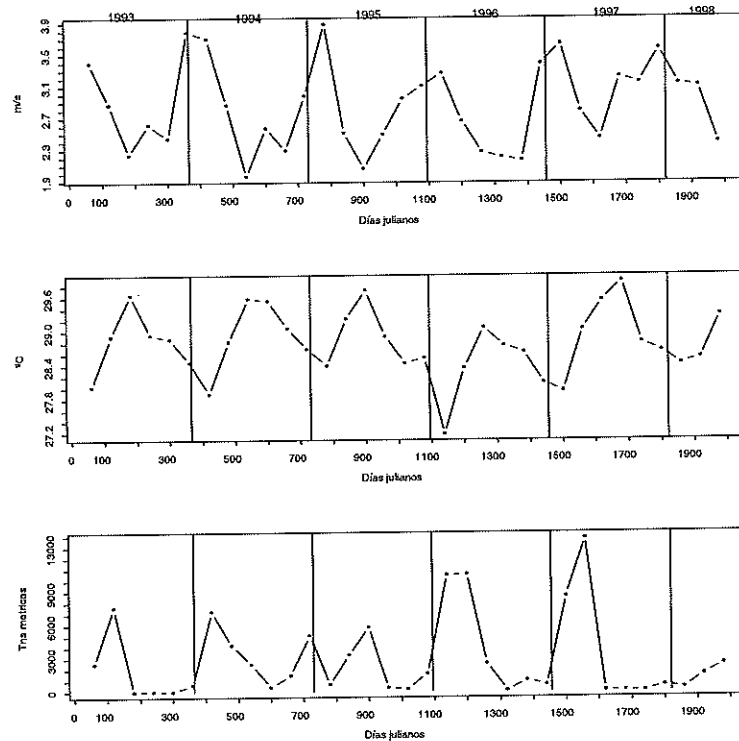


Figura 15.- Distribución de la media temporal en velocidad del viento (m/s), temperatura superficial del mar (°C) y capturas totales (toneladas métricas).

Con los doce puntos que se escogieron para la determinación de la unidad de resolución espacial, se tomaron en cuenta tres de ellos (1,6 y 12) que fueron determinados a partir de las funciones de autocorrelación (Fig. 16). El primer y último punto se seleccionaron por ser estadísticamente diferentes al resto de la serie, además que son los extremos del Golfo; el punto seis se eligió para el análisis ya que fue análogo con los puntos intermedios del Golfo.

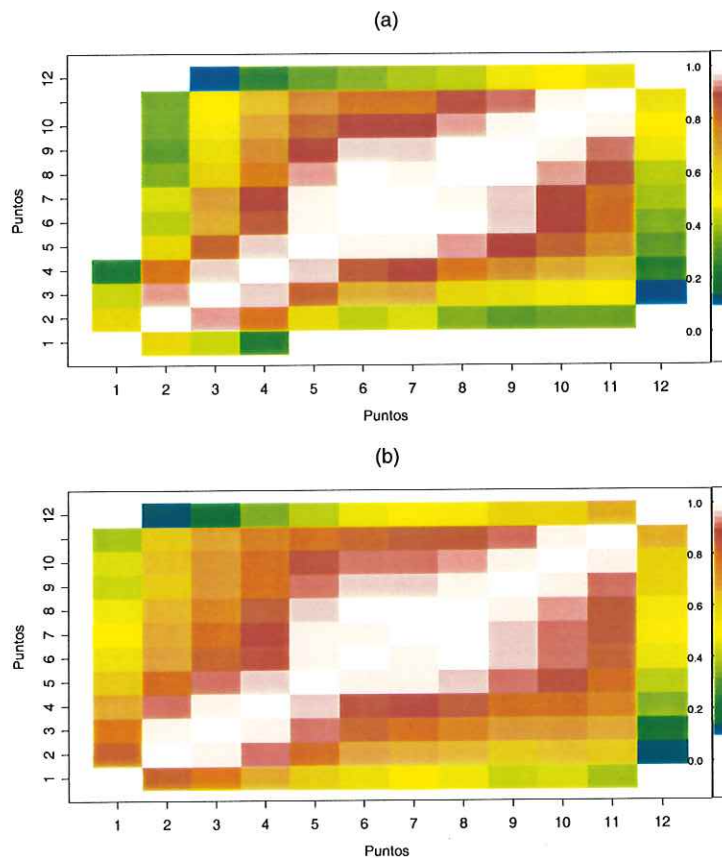


Figura 16.- Funciones de autocorrelación que compara los doce puntos distribuidos en el Golfo para la obtención de los más representativos: a) velocidad del viento, b) temperatura superficial del mar

Para visualizar la tendencia temporal de los tres puntos representativos, se realizaron series de tiempo a periodos de dos meses para la VV, TSM y capturas (Fig. 17). El comportamiento general de la velocidad del viento osciló con altos valores de noviembre a febrero y bajos de mayo a junio (Fig 17). En el primer punto (noroeste) las velocidades del viento tuvieron mínimos de noviembre a

diciembre (1 m/s), salvo en el año de 1997 en las que fueron máximas (2.3 m/s) y las magnitudes mayores se alcanzaron de mayo a agosto (2 m/s). En el punto seis (parte central), la variación fue mayor que en el noroeste del Golfo, con máximos de noviembre a diciembre (3.5 m/s) y mínimos en verano (de mayo a agosto). El punto doce (sureste) tuvo la mayor variabilidad con la misma tendencia que la parte central, con los máximos valores (4 m/s) en el primer bimestre (enero-febrero) y mínimos (1.3 m/s) en los meses de mayo y junio.

En general se observó para la TSM el patrón inverso a la VV, con bajos (27 °C) en los primeros bimestres y altos (30 °C) a la mitad de los años (Fig 17). El comportamiento de la TSM del punto 12 (sureste), tuvo menor variabilidad que la parte central y el noroeste del Golfo, con mínimos de febrero a marzo, alcanzando los máximos de mayo a junio, con pocas intensidades en su variabilidad (de 27 °C a 28 °C). La oscilación al noroeste y la parte central del Golfo (puntos uno y seis) presenta la misma variabilidad, con enfriamiento en invierno y calentamiento en verano. El valor mínimo (26 °C) para toda la serie fue en el primer bimestre de 1996 en la parte central, y máximo (31 °C) en el cuarto semestre (julio y agosto) de 1997 en el noroeste.

En lo que se refiere a las capturas, solamente se tomo en cuenta el total de las capturas en una región de 1° x 1° alrededor del punto (Fig 17). Al igual que la VV las capturas con mayores toneladas se realizaron en los meses de noviembre a febrero, con excepción de 1995, en donde hubo capturas más altas para los meses de mayo a junio. En la parte central para los años de 1993 y 1996 hubo capturas más altas que en las otras dos regiones. En los años restantes la captura se presentó con mayores toneladas capturadas en la región del noroeste. No se obtuvieron capturas en las tres regiones de julio a agosto.

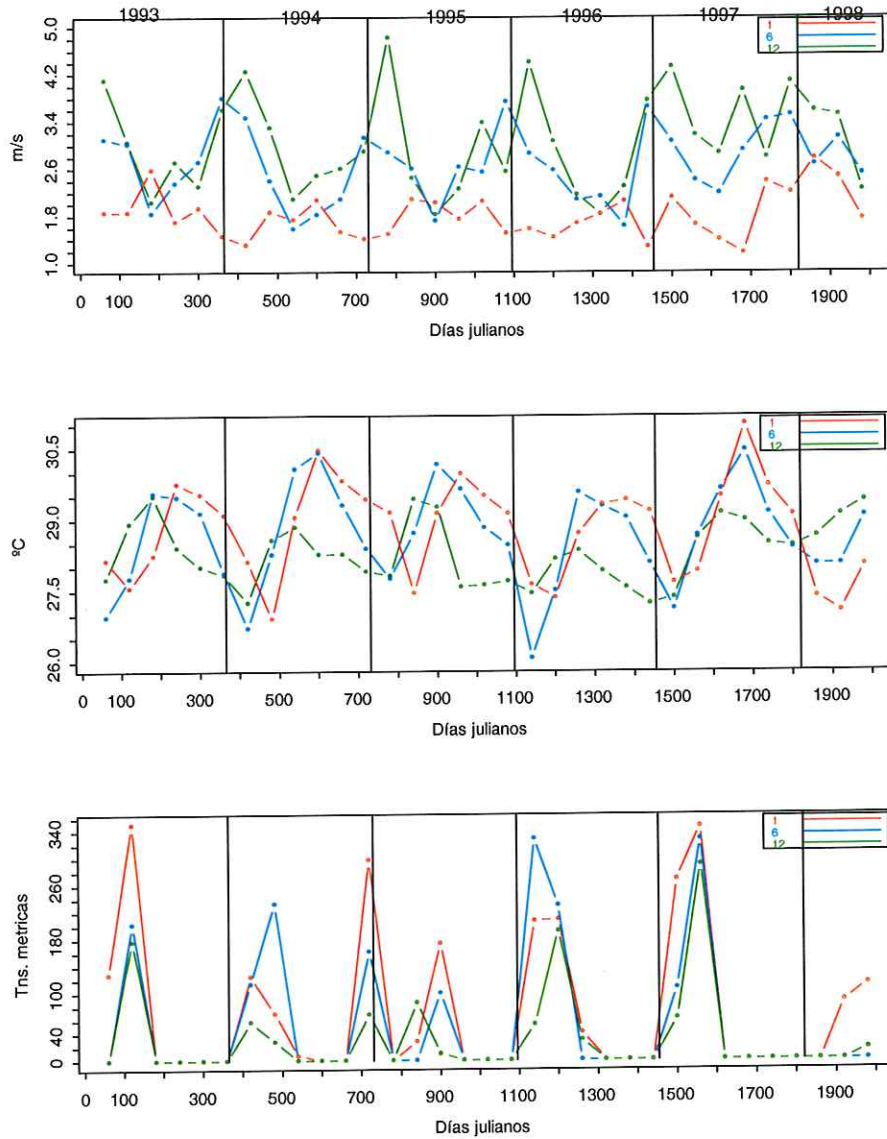


Figura 17.- Series de tiempo de la velocidad del viento, temperatura superficial del mar y capturas, en tres puntos (noroeste en rojo, boca del golfo en azul y suroeste en verde) del Golfo de Tehuantepec

VII.V.- Análisis de la variación espacio temporal de los lances de AAA

El análisis espacio-temporal consistió en encontrar gráficamente los patrones espaciales de los lances, basados en las asociaciones temporales definidas por la autocorrelación y con ello poder observar alguna estacionalidad por año.

En 1993 de enero a abril se observó una alta concentración de lances al oeste del Golfo de Tehuantepec, para los meses restantes de dicho año hubo menos de treinta lances por lo que no se identificó algún patrón espacial (Fig. 18).

En los tres primeros bimestres de 1994 los lances se realizaron al oeste del golfo, en el cuarto y quinto bimestre (de julio a octubre) los lances fueron principalmente menores y mas alejados a la costa, el último bimestre (noviembre y diciembre) tuvo mayor variabilidad espacial con lances en la costa oeste y otras cercanas al Golfo de Papayo (Fig. 19).

En el primer bimestre de 1995 no se observó una alta concentración como en los años anteriores, pero si en el segundo y tercer bimestre, siendo mayor el número de lances en la región costera al centro y oeste del golfo. En el cuarto y quinto bimestre no se realizaron mayor número de lances que en los bimestres anteriores. En el último bimestre la congregación de los lances fue más oceánica, hacia el suroeste del golfo (Fig. 20).

En 1996 el comportamiento espacio-temporal de lances fue similar a los dos años anteriores. Los tres primeros bimestres se observaron lances al oeste del golfo en la región costera. Los siguientes dos bimestres no hubo un gran número de lances y el último bimestre los lances tuvieron mayor variabilidad espacial (Fig. 21).

En 1997 los lances de la flota atunera se dieron en los dos primeros bimestres (de enero a abril), con la misma variación espacial que los años anteriores. Los siguientes cuatro bimestres (de mayo a diciembre), no se efectuaron numerosos lances en comparación de los primeros bimestres (Fig. 22).

En el primer bimestre de 1998, la flota atunera tuvo una gran variabilidad espacial con relación a los comportamientos de los años anteriores. El siguiente bimestre (marzo abril) tuvo dos agregaciones, una al oeste y otra en el centro del golfo. El tercer bimestre se caracterizó por tener una alta asociación al oeste del golfo en la región costera (Fig. 23).

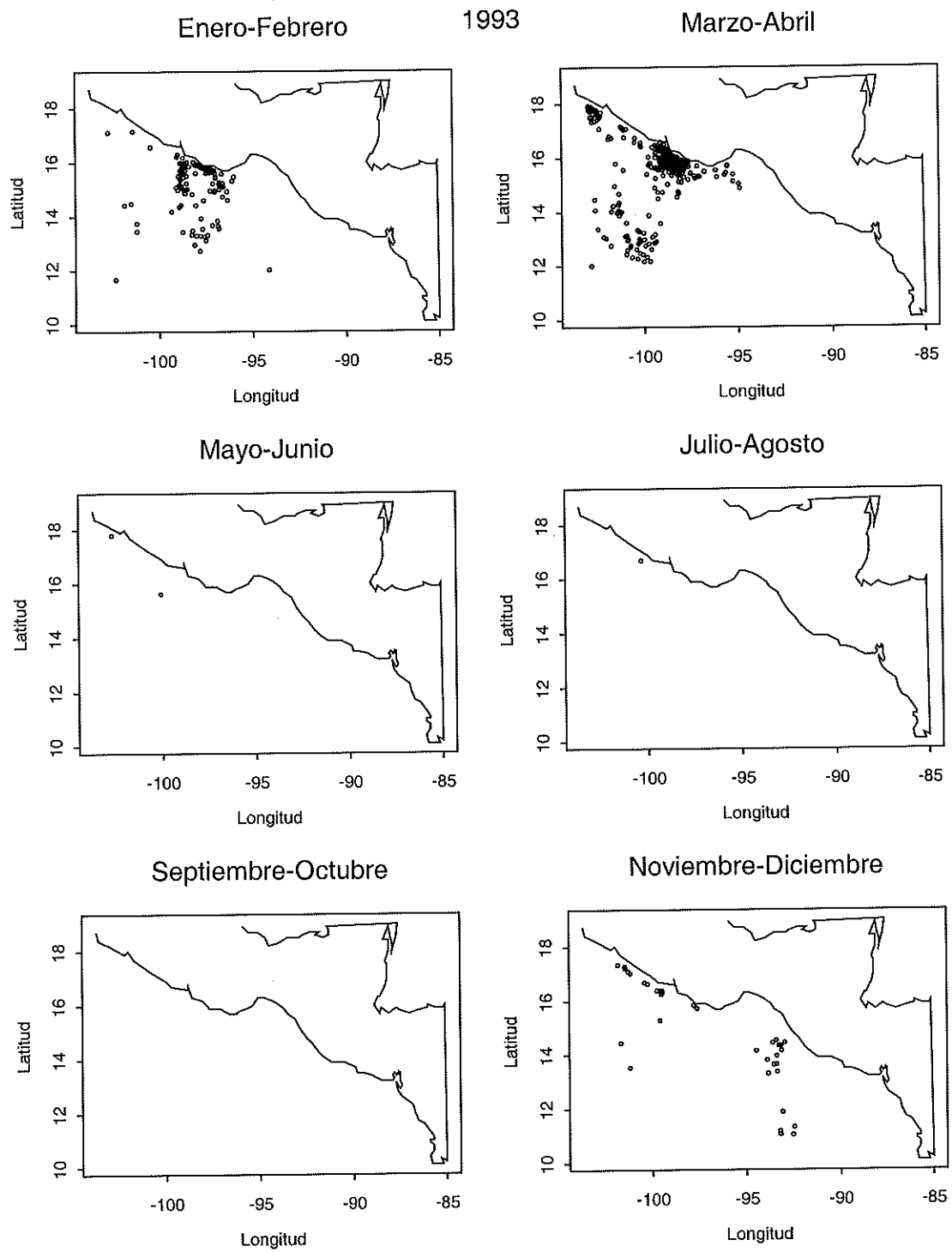


Figura 18.- Distribución espacial de los lances sobre atún en el Golfo de Tehuantepec de 1993.

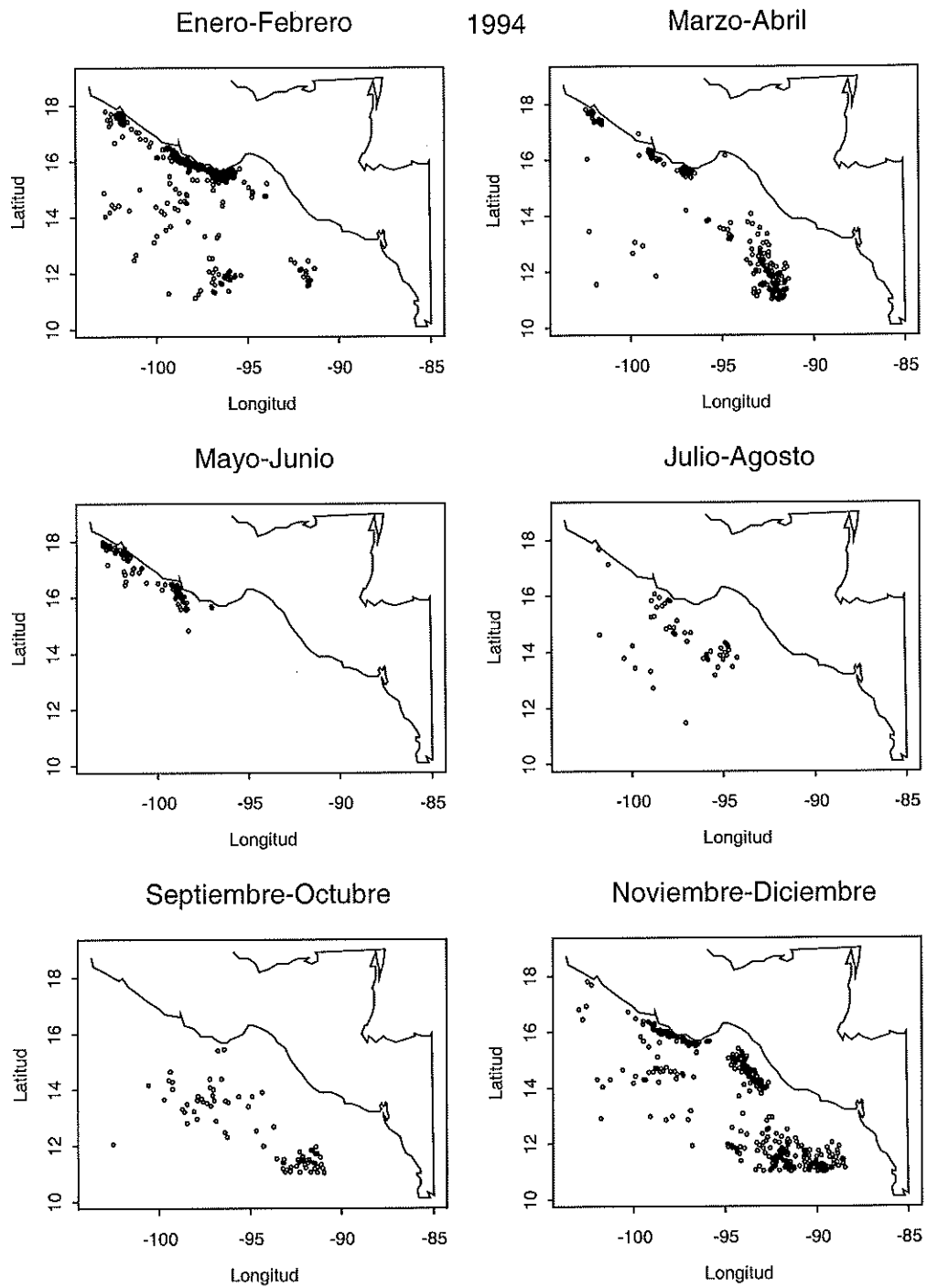


Figura 19.- Distribución espacial de los lances sobre atún en el Golfo de Tehuantepec de 1994.

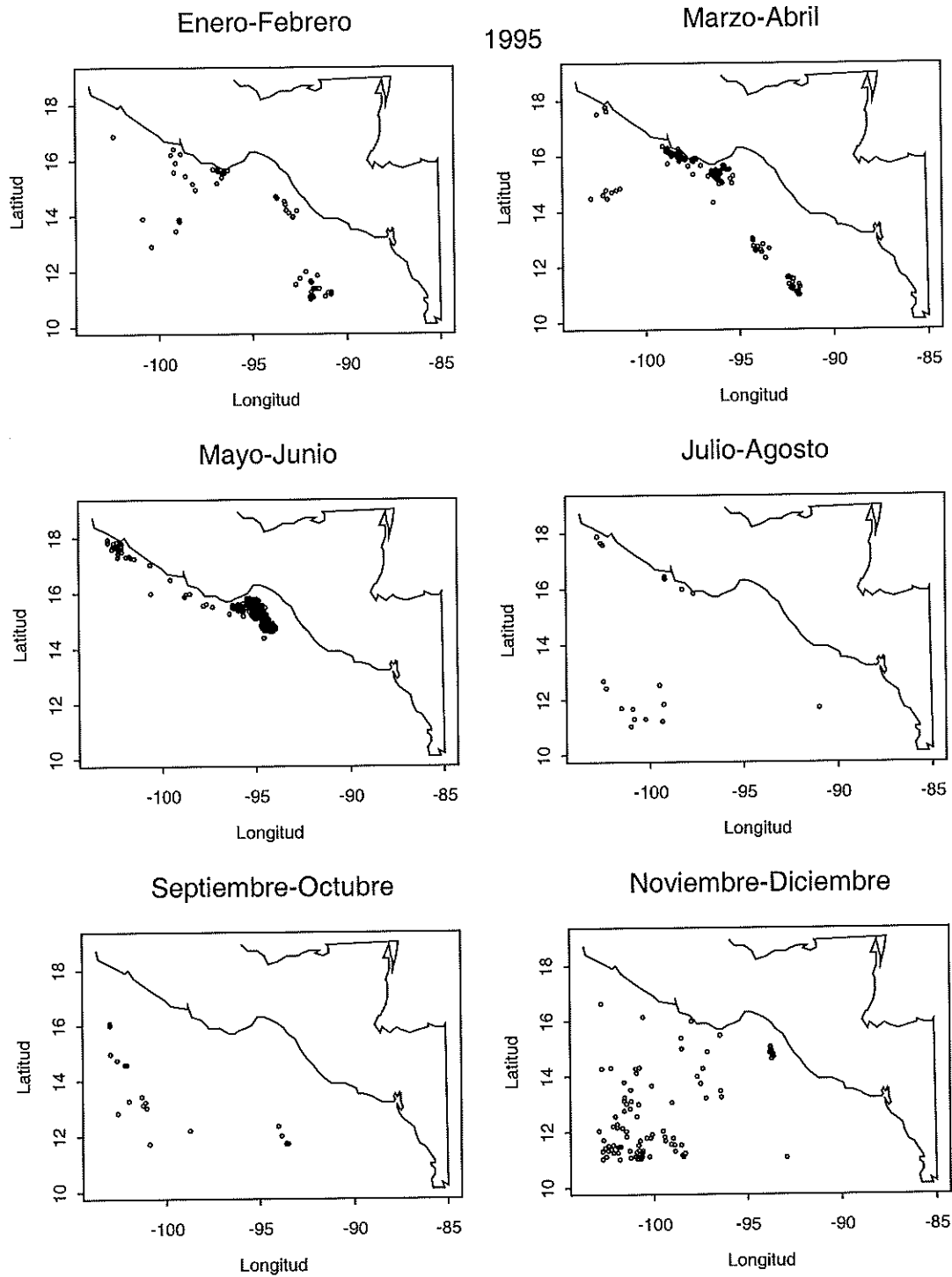


Figura 20.- Distribución espacial de los lances sobre atún en el Golfo de Tehuantepec de 1995.

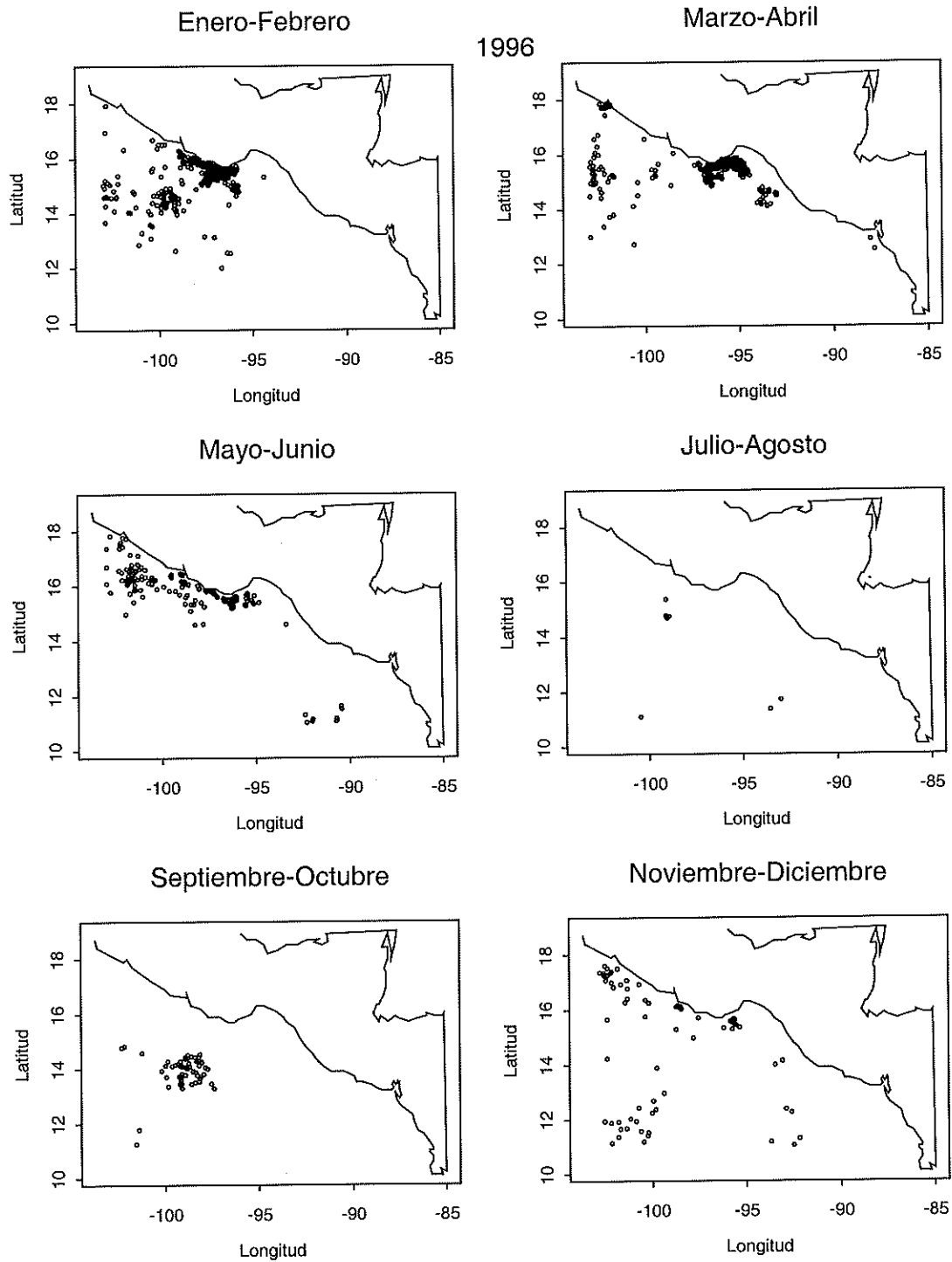


Figura 21.- Distribución espacial de los lances sobre atún en el Golfo de Tehuantepec de 1996.

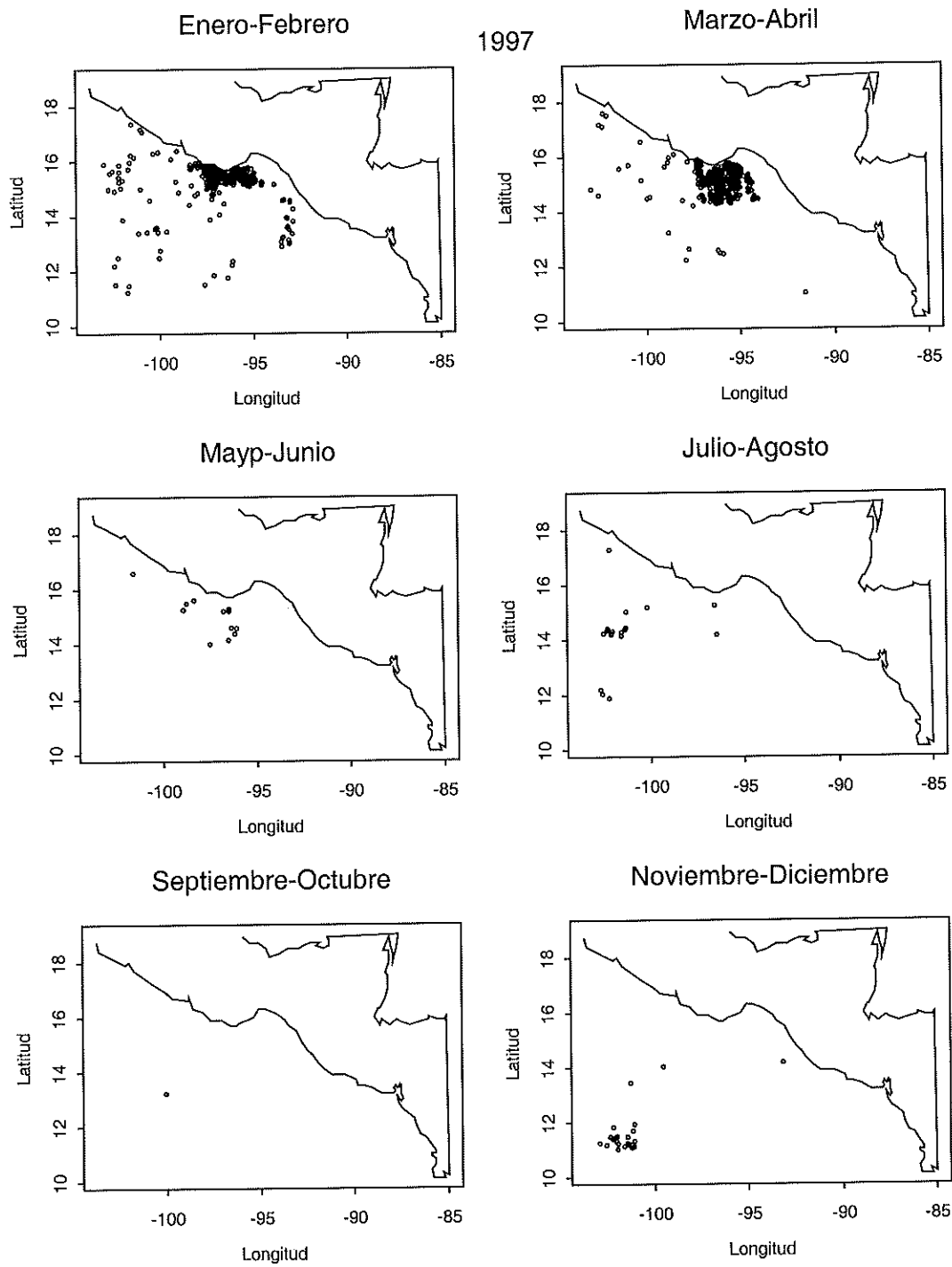


Figura 22.- Distribución espacial de los lances sobre atún en el Golfo de Tehuantepec de 1997.

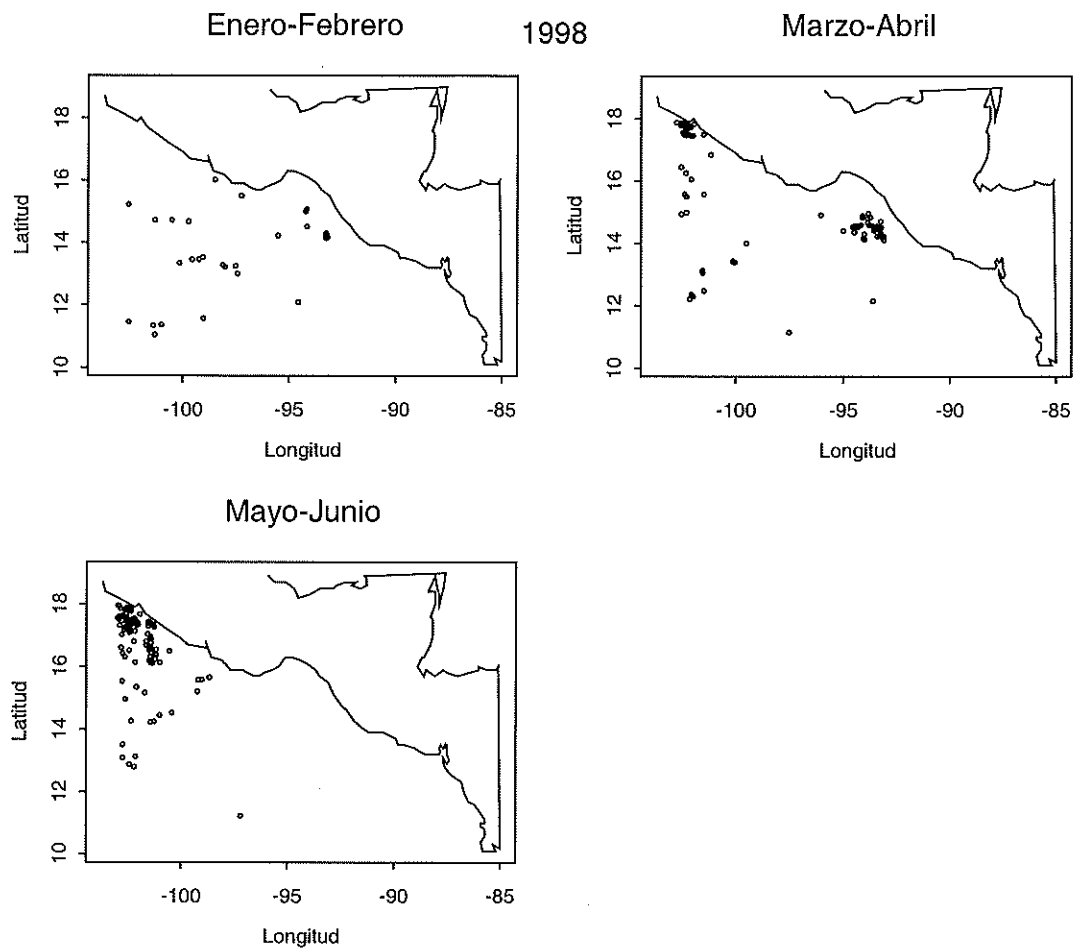


Figura 23.- Distribución espacial de los lances sobre atún en el Golfo de Tehuantepec de 1998.

VIII.- Discusiones

VIII.I.- Determinación del área de estudio.

El análisis de los primeros cuatro modos espaciales de FEO's y delimitada por los árboles de regresión contribuyó a la determinación del área del Golfo de Tehuantepec, analizando las variables de la VV y TSM. Cabe mencionar que las amplitudes temporales no influyeron en la toma de decisión para acotar el área de estudio. La región delimitada por los primeros cuatro modos de la VV fue de 104° - 86° O y 18.5° - 10.5° N.

El primer y segundo modo espacial de la VV marcaron la región del OPOT (Fig. 5a y 5b), desde 105° O hasta la costa entre 19° y 8° N. Los vientos en esta región son el resultado de los gradientes de presión que se generan en invierno entre el OPOT y el Golfo de México, que cruzan a través las cadenas montañosas del sur de México y Centroamérica hasta los Golfos de Tehuantepec, Papagayo y Panamá, alcanzando una extensión de 200 km de ancho y 500 km hacia mar adentro en el Golfo de Tehuantepec (McCreary *et al.*, 1989); la disminución de la velocidad del viento fuera de la costa, se debe a que los vientos se expanden en la horizontal y ceden energía al océano.

El tercer modo delimita una región menor a los anteriores (Fig. 5c) . Esto se puede atribuir a que durante el verano los vientos que soplan de dirección este son generalmente débiles. Trasviña & Barton (1995) observaron que durante la época de mayo a octubre, cuando ocurren lluvias, se presentan vientos intensos durante el paso de huracanes y tormentas tropicales los cuales generan pulsos de viento que se propagan a lo largo de la costa.

En el cuarto modo la región apartada es muy angosta con respecto a la latitud (Fig. 5d). En esta área el OPOT es influenciado por los desplazamientos latitudinales del sistema de vientos Alisos y de la Convergencia Intertropical, afectando a la dinámica del Golfo de Tehuantepec. Esta zona se ve principalmente afectada por la proximidad de la Zona de Convergencia Intertropical, ya que en

verano y otoño, la velocidad máxima de los vientos Alisos del noreste se encuentran a los 17° (Blackburn, 1961).

El primer modo espacial de la TSM marca un región muy angosta en el Golfo de Tehuantepec (Fig. 6a). Esta delimitación es muy similar a la que se observó en el tercer modo espacial de VV, en donde se atribuyó la corta delimitación por la debilidad de los vientos en verano. La TSM es una característica de las diferentes corrientes que existen en el OPO (Wyrki, 1967), por lo que en verano el Golfo de Tehuantepec está mayormente influenciado por la Contracorriente Ecuatorial.

Las áreas limitadas por el segundo y cuarto modo espacial de la TSM son similares (Fig. 6b y 6d). El margen latitudinal (8°) de estos dos modos es análogo con los marcados por el primer y segundo modo de la VV, pero no con la longitud. Estas áreas marcan el límite del OPOT que es influenciado por el forzamiento del viento (Tehuano) en el los Golfos de Panamá, Papagayo y Tehuantepec. En longitud el margen es menor que los dos primeros modos espaciales de VV porque la TSM tiene menor propagación en la horizontal.

En el tercer modo de la TSM la longitud no se consideró por no seguir el mismo patrón que los anteriores modos antes descritos (Fig. 6c) En esta demarcación la variabilidad positiva posiblemente tienen origen en el Golfo de Tehuantepec y Centroamérica, en donde se generan giros anticiclónicos que se propagan hacia el oeste. McCreary *et. al.* (1989) mencionan que durante los nortes se desarrollan giros ciclónico y anticiclónicos, éstos últimos ocurren con mayor frecuencia y son intensificados por advección con una rapidez hacia el oeste similar a la de la ondas no dispersivas de Rossby.

El área delimitada demarcada por los árboles en las FEO's fue de 103°- 87° O y 18°- 11° N. Lo anterior también es establecido por Secretaría de Marina (1988), Ortega-García y Lluch-Cota (1996) y Ortega-García (1998), éste último autor llevó una zonificación para todo el OPO, aunque de manera arbitraria, consideró corrientes superficiales, distribución espacial del recurso, áreas de mayor productividad biológica, etc., que dando el Golfo limitado por 105°-90° O, 17°-10° N.

VIII.II.- Resolución temporal

En estudios pesqueros sobre AAA donde se utilizan escalas de tiempo y espacio, se emplea por convención el analizar trimestralmente los datos como escala temporal comparativa para cada año, de igual forma la información obtenida es agrupada en cuadrantes de 5° en el OPO (Punsly, 1987). Esto supone que bajo esta escala de comparación, las variables se encuentran espacio-temporalmente relacionadas.

En trabajos donde emplean datos de satélite para el estudio del atún, se analizan imágenes instantáneas (Laurus *et. al*, 1984; Fiedler y Bernard, 1987; Power y Nelson, 1991) o una composición de promedios mensuales (Ortega-García y Lluch, 1996; Rojo-Díaz, 1997; Ortega-García, 1998), pero en los últimos estudios no se argumenta algún análisis estadístico el cual defienda estadísticamente la resolución temporal.

El grado de resolución temporal es un aspecto fundamental en este estudio, debido a que se considera como el criterio base para observar la tendencia general de las capturas y minimizar las altas observaciones en los datos generados por satélite. Esto permitió integrar la información al tiempo mínimo dentro de los cuales los valores de TSM y VV se encontraban autocorrelacionados. Para definir la escala de resolución óptima en tiempo y realizar comparaciones intra e interanuales subsecuentes, se emplearon los datos derivados de sensores remotos de la VV y TSM, ya que se observó en el análisis exploratorio que estas dos variables pueden influenciar en la variabilidad de las capturas en el Golfo de Tehuantepec.

La variación pentada de la VV y TSM en el periodo de estudio fue el criterio para definir el periodo mínimo de tiempo, en el cual estas variables se encuentran correlacionadas. Se observó, para los doce puntos identificados en el análisis exploratorio, la existencia de una correlación significativa de 10 a 12 desfases (50 a 60 días) para la VV desde el punto 5 al 12. Sin embargo no se observó alguna tendencia para los primeros cuatro puntos, esto debido tal vez a que en estos puntos la VV no es tan dominante como en el resto del Golfo de

Tehuantepec. En la TSM se observó la misma tendencia, a diferencia que existió una mayor correlación entre los puntos y desfases. Se atribuye esta observación a que la TSM es menos variable en tiempo y espacio que la VV.

En la correlación espacial se analizaron los doce puntos para identificar los que son diferentes y similares para realizar comparaciones entre ellos. Se observó que los puntos uno y doce, tanto para la TSM como para la VV, tienen una baja correlación con los puntos localizados en la parte central del Golfo, por lo que estos dos puntos se consideraron para realizar comparaciones temporales. El punto seis se encuentra localizado en la parte central del Golfo, en él se obtuvo la mayor correlación con los demás puntos para las dos variables. Blackburn (1962) y Trasviña *et. al* (1995) estudiaron el Golfo de Tehuantepec con datos de cruceros oceanográficos realizando comparaciones de temperatura y viento en la parte oeste, central y este, lo que concuerda con los tres puntos identificados en este estudio.

VIII.III.-Análisis temporal

El Golfo de Tehuantepec presenta un contraste en las capturas de AAA que varía de acuerdo a la época de secas y de lluvias.

El comportamiento interanual de la VV es inversa a la TSM. La actividad frontal en el Golfo de México y en el Golfo de Tehuantepec alcanza un máximo de noviembre a febrero, que es la época donde ocurren los "tehuanos", con disminución de la TSM por el efecto de surgencias. El mínimo de la VV ocurre de mayo a agosto, donde las ráfagas de viento no son tan intensas, la TSM es predominantemente alta ($>29^{\circ}$ C) por efecto de la radiación solar. El segundo bimestre (marzo-abril) y el último (septiembre-octubre), son periodos de transición de mínimo a máximo y viceversa respectivamente.

El comportamiento de las capturas tiene una variación anual con máximos de marzo a junio y mínimos de julio a octubre. La VV presenta la misma tendencia que las capturas, a diferencia que los máximos se presentan de noviembre a febrero. Los resultados mostraron que existe un retraso de dos a cuatro meses

entre las mayores intensidades de viento y las máximas capturas, este tiempo puede explicarse como el necesario para que se lleve a cabo la cadena alimenticia y el fitoplancton pase a ser alimento del atún (micronecton). Estos resultados son similares a los reportados por Blackburn (1962, 1963) para esta área mediante resultados obtenidos por cruceros oceanográficos. El encuentra un retraso de 3 meses entre la acción del viento y la abundancia del micronecton, así como lo reportado por Ortega-García y Lluch Cota (1996) en un análisis para el periodo 1984-1985, en el que mencionan un retraso de 3 a 5 meses entre las mayores concentraciones de pigmentos fotosintéticos a partir de productos derivados de satélite y la abundancia relativa del AAA. Durante los meses de julio a octubre, las capturas disminuyen drásticamente debido principalmente a la presencia de huracanes y tormentas tropicales que impiden el desarrollo de las operaciones de pesca en ésta época del año.

Las comparaciones entre las regiones se realizaron con los tres puntos (noroeste, centro y sureste del Golfo) identificados en el análisis exploratorio (Fig. 8). El comportamiento general en las tres regiones de la VV, TSM y Capturas fue similar a la sección antes discutida. Las capturas fueron máximas después de los eventos de surgencia en los primeros bimestres. Cury y Roy (1989) plantean una hipótesis conocida como "ventana ambiental óptima". Estos autores establecen que en este tipo de surgencias la relación entre la variabilidad del reclutamiento y la magnitud de las surgencias son de tipo parabólico, es decir, del lado izquierdo de la curva la mezcla es débil y el factor limitante es la producción de alimento debido a la baja intensidad de las surgencias; del lado derecho de la curva las surgencias son fuertes y la turbulencia es el factor limitante. Esta hipótesis es conocida.

En los dos primeros bimestres se presentaron las mayores capturas en el noroeste del Golfo, sin tener efecto de la VV pero sí de la TSM. En esta zona no se observó una alta variabilidad de la VV ni altas magnitudes en el periodo de estudio. Esto es debido a que en invierno-primavera, los Tehuanos ceden su energía hacia mar abierto en forma de "chorro" en la parte central, perdiendo su intensidad en el noroeste del Golfo. El efecto que pudiera tener la baja VV sobre

las capturas en los primeros bimestres del año, es el de no afectar las maniobras de pesca, resultando más fácil para los pescadores realizar lances sobre los cardúmenes de AAA. Por otra parte, la TSM si tuvo una alta variabilidad, en la que se reflejó su efecto sobre las altas capturas en todos los años en la época de nortes. En los meses de julio y agosto de 1997, las temperaturas fueron las más altas de todo el periodo de estudio en la zona. En ésta época la TSM del OPOT tuvo una anomalía mayor a consecuencia de El Niño, que parecía estar alcanzando su intensidad máxima en estos meses (Anónimo, 1998), sin obtener capturas en todo el resto del año, lo que coincide con Pérez (2002) al no observar altas capturas en este mismo periodo en el OPOT.

La VV y la TSM tuvieron una alta variabilidad en la parte central del Golfo de Tehuantepec, favoreciendo las altas capturas a principios de año. Los eventos de surgencias en el golfo, se ven reflejados con máximos valores de VV en noviembre y diciembre principalmente, aunado a ello la TSM disminuye sin llegar a los mínimos ($< 27^{\circ} \text{C}$) en estos meses. Las capturas no tienen máximos en este bimestre debido a que hay una intensa mezcla vertical turbulenta, considerada por Blackburn (1963), como un suceso dispersivo que tiende a actuar en contra de los procesos de concentración y de la supervivencia larval. Las máximas capturas se obtuvieron de marzo a abril, coincidiendo con las mínimas temperaturas producidas por las surgencias, que llevan a la termoclina a una profundidad de 20 metros (Ortega-García, 1998), ya que los atunes tienden a estar arriba de ésta. Forsberg (1989) menciona que la vulnerabilidad del AAA a la captura por barcos cerqueros es óptima cuando la termoclina es menor a 40 metros. En 1996 se dió el mayor número de lances de enero a febrero, coincidiendo con la mínima TSM para todo el periodo. Anónimo (1998) reportan altas velocidades de los vientos en el OPOT que dieron surgencias fuertes y TSM anormalmente bajas, lo que coincide con nuestros datos y con el efecto en las capturas, pero no con la VV. En 1998 no se presentaron capturas por efecto de El Niño que alcanzó su mayor intensidad a mediados de 1997 y principios de 1998 (Anónimo, 1998)

Los mayores lances en la región del suroeste del Golfo de Tehuantepec se dieron en los meses de marzo y abril, coincidiendo con las bajas temperaturas y

con un retraso en la VV de dos meses. La TSM y la VV también son influenciados por las ráfagas de viento que se generan en el Golfo de Papagayo, por lo que tuvo mayor variabilidad e intensidad la VV que en las otras dos regiones, alcanzando máximos para las dos variables en los meses de enero a febrero, teniendo su efecto en el mayor número de lances después de dos meses (de marzo a abril), lo que concuerda con el estudio de Blackburn (1962) y discutido anteriormente. En 1998 tampoco se presentaron capturas por las condiciones del Niño que se dieron en este periodo. En la época de lluvias (de mayo a octubre) no se realizaron muchos lances por la alta estratificación.

VIII.IV.- Análisis espacial

En esta sección se utilizan los lances para estimar de manera empírica, la dinámica espacial de las capturas y así tener una idea de la abundancia del recurso. Allen y Punsly (1984), emplearon básicamente datos de captura y esfuerzo para estimar la abundancia relativa de este recurso al utilizar modelos de producción. Las concentraciones en número de lances se dan en zonas de alta densidad de AAA y la variabilidad en los niveles de captura por lance están fundamentalmente en función de la temporada del año, las zonas de pesca y el tipo de embarcación (Hilborn y Walters, 1992). En este trabajo no se consideró el tipo de asociación de lances, ayuda aérea, tipo de embarcación u otros, ya que se considera el número de lances como un indicador donde se encuentran altas densidades de AAA a un tiempo y espacio.

Las capturas se encuentran influenciadas por factores socioeconómicos, como es el caso del embargo atunero aplicado a la flota atunera mexicana a partir de 1993 (Joseph, 1994), lo cual repercutió en los niveles de captura a partir de 1993. De igual forma se ha mencionado que la ubicación de los puertos es un factor que influencia los patrones de distribución espacial (Méndez-Gómez-Humarán, 1995).

El hecho de que los datos se encontraban georeferenciados permitió analizar en forma más precisa la dinámica espacial de la pesquería del AAA en el

Golfo de Tehuantepec. Además, los eventos de surgencia contribuyeron a identificar como la pesquería va cambiando espacio-temporalmente.

En el análisis exploratorio se observaron tres regímenes característicos del Golfo de Tehuantepec, en los que las capturas estuvieron asociadas. El primero corresponde al giro anticiclónico en el oeste del golfo, el segundo régimen central está afectado directamente por los nortes y es donde ocurren las surgencias, y el tercer régimen del este es afectado por el giro ciclónico y por los nortes del Golfo de Papagayo (Fig 12).

En el régimen del oeste se observó el mayor número de lances asociados al giro anticiclónico y a frentes térmicos. Los lances pudiesen estar relacionados a frentes térmicos (diferencia de temperatura por unidad de distancia) que son generados por las surgencias el norte del Golfo. Lavin *et al.*, (1992) observaron frentes térmicos cuando las surgencias llegaban a su máxima intensidad en enero y febrero, mientras que Rojo-Díaz (1997) relacionó los frentes térmicos con un patrón paralelo y a lo largo de la costa de la distribución espacial de AAA en el OPOT. El giro anticiclónico formado por procesos advectivos con la invasión de aguas cálidas desde el oeste (Trasviña *et al.*, 1995), puede producir mezcla lateral inducida por la VV en la frontera oriental del Golfo, lo que permitió condiciones favorables para el micronecton (larvas y alimento de atún). Por otra parte, los factores que determinan que ésta área sea una zona importante de reproducción durante los meses de invierno primavera (González y Ramírez, 1989) pudieran ser las temperaturas adecuadas, combinadas con procesos de surgencia y mezcla vertical turbulenta que mantienen altos niveles de producción primaria. En los meses de verano otoño casi no se presentaron lances, debido a la presencia de huracanes y/o tormentas que afectan a la distribución de los lances sin poder operar bajo tales condiciones (Rojo-Díaz, 1997).

En la región central no se observó un gran número de lances en ninguna época del año como el oeste del Golfo por mezcla vertical turbulenta. Trasviña *et al.*, (1995) considera que la disminución de la TSM en esta región en la época de secas (surgencias) se debe principalmente a la gran cantidad de mezcla vertical turbulenta inducida por el viento. De acuerdo con Cury y Rory (1989), la

estabilidad de las capas superiores del océano es esencial para la agregación de las larvas y alimento de atún, un primer requisito para su supervivencia larval. Aunado a ello existe mezcla vertical turbulenta con velocidades mayores de 10 m^{-1} , y un índice de calma que abarca cuatro días consecutivos (Cushing, 1995), lo que afecta al número de lances por la hipótesis de “ventana ambiental óptima” antes mencionada.

En la región este no tuvo importancia en la realización de los lances por la alta estratificación. La alta estratificación se debe a la presencia de una capa superficial de aguas cálidas, poco salinas y de bajo contenido de clorofila que se acercan a esta región desde el sur, provenientes de la corriente costera de Costa Rica (Trasviña *et al.*, 1995). La termoclina aumenta su profundidad, dando oportunidad al atún de no permanecer en la superficie y disminuyendo la cantidad de lances. Por otra parte, en esta zona los frentes térmicos tienden hacer menos intensos que el lado oeste (Lavin *et al.*, 1992) por lo que los lances no se efectuaron con tanta importancia como en la región occidental.

IX.- Conclusiones

1. El área del Golfo de Tehuantepec determinada por la temperatura superficial del mar y la velocidad del viento se ubicó entre los 105° a 90° O y 17° a 10° N.
2. De acuerdo a la velocidad del viento y a la temperatura superficial del mar, se agrupó la información bimestralmente como unidad mínima de tiempo en el Golfo de Tehuantepec.
3. La importancia de la región oeste fue evidente, ya que se presentaron las capturas por lance más altas en todo el Golfo de Tehuantepec asociada a la baja velocidad del viento y alta variabilidad en la temperatura superficial del mar.
4. Las capturas de atún aleta amarilla tienen una asociación inversamente proporcional a la velocidad del viento y directamente proporcional a la temperatura superficial del mar.

X.- Referencias

Allen, R., y R. Punsly. 1984. Proporciones de captura como índices de abundancia del atún aleta amarilla *Thunnus albacares*, en el Océano Pacífico Oriental. Boletín CIAT. 18 (4): 303-379 .

Anónimo. 1997. Annual Report of the Inter-American Tropical Tuna Comisión, 1996. La Jolla Ca. USA. 296

Anónimo. 1998. Annual Report of the Inter-American Tropical Tuna Comisión, 1997. La Jolla Ca. USA. 272

Blackburn, M. 1962. An oceanographic study of the Gulf of Tehuantepec. Special Scientific. Report-Fisheries, 404: 28.

Blackburn, M. 1963. Distribution and abundance of tuna related to wind and ocean conditions in the Gulf of Tehuantepec, Mexico. Experience paper. Scripps Intitution of Oceanography. La Jolla Ca. USA.

Blackburn, M. 1965. Oceanography and the ecology of tunas. Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev. 3:299-322 .

Chambers, J. M. Y T. J. Hastie. (eds.) 1993. Statistical models in S. Computer science series. Champman & Hall. U. S. A. 309-373.

Cury, P. y C. Roy. 1989. Optimal environmental window and pelagic fish recluitment succes in upwelling areas. Can. J. Aqua. Sci. 46:670-680.

Cuching, D. H. 1995. Population production and regulation inthe sea:a fisheries perspective. Cambridge University Press, Cambridge. En: Ortega-García, S. 1998. Análisis de las fluctuaciones espacio temporal en la abundancia de atún en el Océano Pacífico Oriental. Tesis doctoral. UNAM, México.

Dreyfus, M. Y H. Manzo. 1990. Aplicación de un modelo bioeconómico a la pesquería de atún aleta amarilla *Thunnus albacares* en el Océano Pacífico Oriental. Ciencias Marinas 16(3): 63-76.

Emery, W. J., and R. E. Thompson. 1997. Data Analysis Methods in Physical Oceanograhy. Pregamon, New York. 108 pp

Fiedler P. C. y H. J. Bernard. 1987. Tuna aggregation and feeding near fronts observed in satellite imagery. Cont. Shelf Res. 7:871-881.

Fiedler, P. C., V. Philbrick., F. P. Chavez. 1991. Oceanic upwelling and productivity in the eastern tropical Pacific. Limnol. Oceanogr., 36, 1834-1850.

Forsberg E. D. 1989. La influencia de algunas variables ambientales sobre la abundancia aparente del atún barrilete, *Katsuwonus pelamis*, en el océano Pacífico Oriental. CIAT. Boletín. Vol. VII, No. 8.

González, P. G. y M. Ramírez, 1989. Zonas y épocas de reproducción del atún aleta amarilla *Thunnus albacares* en el Pacífico Mexicano. Investigaciones Marinas. CICIMAR, 4(2):201-209.

Herron R. C., T. D. Leming y J. Li. 1989. Satellite-detected fronts and butterflyfish aggregations in the northeastern Gulf of Mexico. Cont. Shelf Res. 9:569-588.

Lavín M. F., J. M. Robles, M. L. Argote, E. D. Barton, R. Smith y A. Trasviña. 1992. Física del Golfo de Tehuantepec. CONACYT. 19 (103):92-108.

Laurus R. M., P. C. Fiedler, y D. R. Montgomery, 1984. Albacore tuna catch distributions relative to environmental features observed from satellites. Deep-Sea Research. 31(9):1085-1099.

McCreary, J. P., H. S. y D. B. Enfield, 1989. The response of the coastal ocean to strong offshore winds: with application to circulations in the Gulfs of Tehuantepec and Papagayo.. J. Mar. Res., 47(1): 81-109.

Méndez-Gómez-Humarán, G. I. 1995. Análisis exploratorio de la pesquería del atún aleta amarilla (*Thunnus albacares*) en el Océano Pacífico oriental (1992). Tesis de Maestría. UABC. México. 74 pp.

Maul, G. A., F. Williams, R. Mitchell y F. M. Sousa. 1984. Remotely sensed oceanography patterns and variability of bluefin tuna catch in the Gulf of México. Oceanol. Acta. 7, 469-479 p.

Ortega-García, S., S. Lluch-Cota. 1996. Distribución de la abundancia de atún aleta amarilla (*Thunnus albacares*) y su relación con la concentración de pigmentos fotosintéticos medidos por satélite en aguas al sur de México. Investigaciones Geográficas. Boletín. Num., esp., 4:(85-93) pp.

Ortega-García, S. 1998. Análisis de las fluctuaciones espacio temporal en la abundancia de atún en el Océano Pacífico Oriental. Tesis doctoral. UNAM, México 67 pp.

Harrison, P. J., Parsons T. R. 2000. Fisheries Oceanography: An Integrative Approach to Fisheries. Blackwell Science. Canada. 347 pp.

Pérez, H. El esfuerzo pesquero en la pesca del atún por barcos cerqueros mexicanos en el Océano Pacífico Oriental (1992-2000). Tesis de maestría en ciencias. UABC. México. pp. 106.

- Power, J. H. y M. Nelson. 1991. Satellite observed Sea-surface Temperatures and yellowfin tuna catch and effort in the Gulf of Mexico. *Fishery Bulletin*. U. S. 89: 429-439.
- Punsly, R. 1987. Estimación de la abundancia anual relativa del atún aleta amarilla *Thunnus albacares*, en el Océano Pacífico Oriental durante 1970-1985. *Boletín CIAT*. 19(3): 265-306.
- Reddy R. L. 1995. An application of satellite data. *Sci. Mar. (Barcelona)*. 59:445-454.
- Ripley, B. D. 1994. *Spatial statistics*. John Wiley & Sons, New York. U.S.A. 252 pp.
- Robinson, I. S. 1997. *Satellite Oceanography: An Introduction for Oceanographers and Remote-sensing Scientists*. John Wiley & Sons. USA. 455 pp.
- Roden, G. I. 1961. Sobre la circulación producida por el viento en el Golfo de Tehuantepec y sus efectos sobre las temperaturas superficiales. *Geofísica Internacional*. 2: 55-76
- Rojo-Díaz, P. 1997. La asociación atún-delfín y su relación con la temperatura superficial del mar en el Océano Pacífico Oriental durante 1992-1994. Tesis maestría en ciencias. CICESE. 97 pp.
- Secretaría de Marina. 1988. Estudio oceanográfico del Golfo de Tehuantepec. *Biología Marina. Bentos*. Secretaría de Marina. Sec. Mar. Dir. Gral. Ocean. *Inv. Ocean*. Tehua-03-78: 1-71.
- SEPESCA. 1994. Diagnóstico de los Recursos Pesqueros. Sría. de Pesca (eds.). En: Tapia G. M. 1998. *El Golfo de Tehuantepec: el ecosistema y sus recursos*. UAM. México. pp. 239
- Sosa-López, A., 1999. Patrones de estratificación espacio-temporal de la pesquería de atún aleta amarilla (*Thunnus albacares*) en el Océano Pacífico Oriental durante 1992-1996: efectos en la relación CPUE-abundancia. Tesis de maestría. UABC. México. 90 pp.
- Stumpf, H. G. y R. V. Legeckins 1977. Satellite observations of mesoscale eddy dynamics in the eastern tropical Pacific Ocean. *Journal of Physical Oceanography*. 7: 648-658.
- Tapia, G. M. 1998. *El Golfo de Tehuantepec: el ecosistema y sus recursos*. UAM. México. pp. 239
- Trasviña, A., E. D. Barton, J. Brown, H. S. Vélez, P. M. Kosro y R. L. Smith. 1995. Offshore wind forcing in the Gulf of Tehuantepec, México: The asymmetric circulation. *Journal of Geophysical Research*, 100 (C10): 20649-20663.

Wirtki, K. 1967. Circulation and water masses in the Eastern Equatorial Pacific Ocean. *Int. J. Oceanol. And Limnol.* 1(2): 117-147.

fin