



*Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología*

Universidad Nacional Autónoma de México



Unidad Académica Mazatlán

**“Distribución y abundancia de la sardina crinuda  
(*Opisthonema* spp) en el sur del golfo de California  
asociada a la variabilidad ambiental durante el periodo  
1996-2010”**

**T E S I S**

Que para obtener el grado académico de:

**Maestro en Ciencias  
(Biología Marina)**

p r e s e n t a:

**Biól. Juan Roberto F. Vallarta Zárate**

Director de Tesis: Dr. Hugo Aguirre Villaseñor

Comité Tutorial: Dr. Arturo Ruiz Luna

Dr. Xavier Chiappa Carrara

Dr. Enrique Morales Bojórquez

Dr. Miguel Ángel Cisneros Mata

Mazatlán, Sinaloa, Octubre 2012



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

© Queda prohibida la reproducción y uso total o parcial de la información contenida en este trabajo sin previa autorización del autor y del director de tesis.

---

## Dedicatoria

Este trabajo lo quiero dedicar a las personas más maravillosas que he conocido en este mundo y sin las cuales, un servidor no sería lo que hoy es ni hubiera llegado hasta este momento, ellos son mis queridos abuelos:

**Sr. Roberto Zárate Remes y Sra. Trinidad Moreno Hernández**

Gracias Abuelita por ser más que una madre conmigo y enseñarme a creer en mí y a luchar por lo que uno quiere. Gracias Abuelo por acompañarme siempre en mis aventuras y estar cuando más te necesité sonriendo como siempre.

Agradezco ampliamente sus sabios consejos y sobre todo muchas gracias por compartir hasta su último aliento conmigo, ya que nunca me dejaron agachar la cabeza y me regalaron excelentes momentos que jamás olvidaré...

Gracias por todo y donde quiera que estén siempre los llevaré en mi mente y en mi corazón no saben cuanta falta me hacen, Descansen en Paz.

---

## Agradecimientos

### Académicos

A mi H. Comité tutor

Al Dr. Hugo Aguirre por compartir sus amplios conocimientos conmigo y por permitirme aprender cosas muy importantes para mi formación, pero sobre todo por su amistad y sencillez.

A la M.C. Mercedes Jacob por adentrarme al misterioso y maravilloso mundo de los peces pelágicos menores, pero sin duda por compartir una bonita amistad que va mucho más allá de las cuestiones académicas.

Dr. Arturo Ruiz Luna  
Dr. Xavier Chiappa Carrara  
Dr. Enrique Morales Bojórquez  
Dr. Miguel Ángel Cisneros Mata

Agradezco sus acertados comentarios, consejos y atenciones en este proyecto, gracias a ellos aprendí mucho y se ve reflejado en este documento.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por otorgarme la beca de manutención durante el desarrollo de este trabajo.

Al Posgrado del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología por acogerme y por permitir desarrollarme como estudiante y profesionista. Sobre todo a mis maestros de la Unidad Académica Mazatlán que compartieron su conocimiento y contribuyeron ampliamente en mi formación. También al personal de esta sede que facilitó mi estancia.

Al Centro Regional de Investigación Pesquera Mazatlán, por facilitarme tanto las instalaciones como las bases de datos.

Al Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, en especial al Laboratorio de Oceanografía Física por las facilidades prestadas en la asesoría del procesamiento y manejo de las imágenes satelitales.

Al Dr. Manuel Nevárez por su atención y asesoría en la parte de modelación, pero sobre todo por compartir tan amable y desinteresadamente su conocimiento.

A la Biól. María de los Angeles Martínez Zavala por su asesoría y su amistad.

Al observatorio meteorológico de la Comisión Nacional del Agua de Mazatlán, por facilitar los datos meteorológicos y por la atención prestada por parte del C. Hugo Nordhal Valdéz.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por ser mi *alma máter* y permitirme desarrollarme en cuerpo y alma a través de experiencias y momentos inolvidables que me ha dado la oportunidad de vivir.

---

## Personales

A mis padres que me han guiado sabiamente por los complejos caminos de la vida, pero también me han enseñado su belleza y a disfrutar cada día al máximo. A mi mamá por ser mi fortaleza en todo momento y por creer en mí hoy y siempre, gracias madre te adoro y siempre serás mi ejemplo a seguir. A Ray por apoyarme y quererme incondicionalmente desde niño y hasta el día de hoy que concluyo esta etapa de mi vida.

A Yaris por ser parte de mi vida y apoyarme hasta en los momentos más difíciles, te amo demasiado y gracias por estar a mi lado.

A mis hermanos: Poncho por que siempre ha estado conmigo y hemos luchado y compartido buenos y malos momentos que nos han unido cada día más, eres mi mejor amigo y agradezco tus consejos y regaños. Pame por ser una gran persona y ayudarme cuando la necesité pero sobre todo por brindarme su amistad y ternura, te quiero mucho hermanita y adoro a mis sobrinos Sophi e Ian que han traído alegría y esperanza a nuestra familia. Por último a mi hermana Marlene que ha sido siempre mi consejera y me ha enseñado lo que significa contar con tu hermano mayor, te quiero mucho y te agradezco todo lo que me has brindado sin pedir nada a cambio.

A mi amigo Julio con quien he recorrido las alegrías y tristezas de la vida, nos hemos divertido mucho y siempre seremos amigos.

A mis compañeros y amigos de la Unidad Académica Mazatlán con los cuales he compartido alegres momentos, algunos de ellos que me brindaron la oportunidad de conocerlos más a fondo formando grandes amistades.

Y a todas las personas que bien o mal han aportado algo a mi vida, si por algún descuido he olvidado a alguien, ofrezco mis más sinceras disculpas.

Finalmente al pueblo de México por permitirme desarrollar esta maravillosa carrera en la máxima casa de estudios, y que espero algún día retribuir algo a esta gran nación.

---

“Aquel que duda y no investiga, se torna no sólo infeliz, sino también injusto”

*B. Pascal*

“Cada día sabemos más y entendemos menos”

*Albert Einstein*

“Comprender las cosas que nos rodean es la mejor preparación para comprender las cosas que hay más allá”

*Hipatia*

“El estudio profundo de la naturaleza es la fuente más fértil de descubrimientos matemáticos”

*Joseph Fourier*

“El universo está hecho de historias, no de átomos”

*Muriel Rukeyser*

“En este mundo no hay más que una sola cosa constante: la inconstancia”

*Jonathan Swift*

“Es mi trabajo no estar nunca satisfecho”

*Wernher von Braun*

---

---

## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b>	<b>1</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>3</b>
1.1 TAXONOMÍA Y BIOLOGÍA DE LA SARDINA CRINUDA	6
1.2. VARIABILIDAD AMBIENTAL EN LA PESQUERÍA DE PELÁGICOS MENORES	8
1.3. LOS FENÓMENOS DE EL NIÑO Y LA NIÑA	10
1.4. SURGENCIAS COSTERAS INDUCIDAS POR VIENTO	13
<b>2. ANTECEDENTES</b>	<b>15</b>
2.1. PELÁGICOS MENORES	15
2.2. SURGENCIAS COSTERAS Y TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR	17
<b>3. ÁREA DE ESTUDIO</b>	<b>20</b>
<b>4. JUSTIFICACIÓN</b>	<b>22</b>
<b>5. OBJETIVOS</b>	<b>23</b>
5.1. GENERAL	23
5.2. ESPECÍFICOS	23
<b>6. MATERIAL Y MÉTODOS</b>	<b>24</b>
6.1. DISTRIBUCIÓN Y ABUNDANCIA	24
6.2. IMÁGENES SATELITALES DE TSM	24
6.2.1. PROCESAMIENTO DE IMÁGENES	25
6.3. PATRONES DE VIENTO, DETERMINACIÓN DE ZONAS Y PERIODOS DE SURGENCIA	26
<b>7. RELACIÓN DE LA CPUE Y LA VARIABILIDAD AMBIENTAL</b>	<b>29</b>
7.1. ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA ACE Y CONSTRUCCIÓN DEL MODELO PREDICTIVO DE CAPTURA Y CPUE DE SARDINA CRINUDA	29
7.2. CRITERIO DE INFORMACIÓN DE AKAIKE	31
7.3. INTERVALOS DE CONFIANZA	32
<b>8. RESULTADOS</b>	<b>34</b>



---

8.1. CAPTURA POR UNIDAD DE ESFUERZO (CPUE)	34
8.2. TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR (TSM)	42
8.2.1. ANOMALÍAS DE TSM	45
8.3. SURGENCIAS COSTERAS E ÍNDICE DE TURBULENCIA	51
8.4. RELACIÓN ENTRE EL ÍNDICE DE ABUNDANCIA (CPUE) Y LA VARIABILIDAD AMBIENTAL	56
8.5. ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA ACE	64
8.6. MODELOS PREDICTIVOS DE CPUE Y CAPTURA DE SARDINA CRINUDA	76
8.6.1. CAPTURA POR UNIDAD DE ESFUERZO (CPUE)	76
8.6.2. CAPTURA TOTAL	84
<b>9. DISCUSIÓN</b>	<b>92</b>
9.1. ABUNDANCIA (CPUE)	92
9.2. TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR	95
9.3. SURGENCIA Y TURBULENCIA	99
9.4. MODELOS PREDICTIVOS	106
<b>10. CONCLUSIONES</b>	<b>111</b>
<b>11. RECOMENDACIONES</b>	<b>112</b>
<b>12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>113</b>

---

## Relación de figuras

Figura 1. Capturas históricas de la pesquería de pelágicos menores desembarcadas en el puerto de Mazatlán, Sin. ....	5
Figura 2. Especies de sardina crinuda objeto de la pesquería de pelágicos menores en el sur del golfo de California (tomadas de Fisher <i>et al.</i> , 1995). ....	7
Figura 3. Diagrama de la circulación atmosférica tropical y las condiciones medias del océano Pacífico durante a) un año Normal y b) un año El Niño (tomado de Magaña-Rueda, 2004). ....	11
Figura 4. Esquema general de un sistema de surgencias costeras (tomado de Lluch-Cota, 2004). ....	13
Figura 5. Límites orientales de las principales regiones de surgencia costera. Las flechas indican los vientos predominantes (tomado de Cole y McGlade, 1998)....	14
Figura 6. Zona de estudio donde se enmarcan las cinco áreas de pesca de la sardina crinuda que se desembarcan en el puerto de Mazatlán, Sin. ....	20
Figura 7. CPUE mensual de la sardina crinuda (línea continua) en el sur del golfo de California durante 1997-2010. La línea punteada representa la tendencia que presentó la CPUE durante el periodo de estudio. ....	34
Figura 8. CPUE anual (línea continua) de sardina crinuda durante 1997-2010. La línea punteada representa la tendencia general de la CPUE durante el periodo de estudio. ....	35
Figura 9. Diagrama de cajas que muestra la variabilidad intra anual de la CPUE de sardina crinuda durante 1997-2010. Las cajas representan $\pm 1$ desviaciones estándar y la línea horizontal dentro de cada caja representa la mediana. ....	36
Figura 10. Comportamiento intra anual típico de la CPUE de la sardina crinuda calculado del promedio mensual durante 1997-2010. ....	37
Figura 11. Diagrama de cajas que muestra la variabilidad de la CPUE de sardina crinuda por zona de pesca durante 1997-2010. Las cajas representan $\pm 1$ desviaciones estándar y la línea horizontal dentro de cada caja representa la mediana. ....	38
Figura 12. Comportamiento anual de la CPUE de sardina crinuda por zona de pesca. ....	39
Figura 13. Comportamiento típico de la CPUE de sardina crinuda por zona de pesca calculado con el promedio mensual durante 1997-2010. ....	40
Figura 14. Aporte por zona de pesca al total de captura de sardina crinuda para el periodo 1997-2010. ....	41

Figura 15. Comportamiento típico de la TSM en la zona de estudio, resultado de los promedios mensuales calculados durante 1996-2010.....	42
Figura 16. Diagrama de cajas que muestra la variabilidad de la TSM en la zona de estudio durante 1997-2010. Las cajas representan $\pm 1$ desviaciones estándar y la línea horizontal dentro de cada caja representa la mediana. ....	43
Figura 17. TSM mensual típica por zona de pesca. Los promedios mensuales fueron calculados respecto a los datos del periodo 1996-2010.....	44
Figura 18. Tendencia de la TSM en la zona de estudio durante A) Verano y B) Invierno. ....	44
Figura 19. Anomalías históricas de TSM calculadas con respecto al promedio mensual típico de 1996-2010 por zona: A) Zona I; B) Zona II; C) Zona III; D) Zona IV y E) Zona V.....	46
Figura 20. Anomalías de TSM durante El Niño 1997-98 (julio 1997-abril 1998) en las áreas que comprenden la zona de estudio. Las anomalías se calcularon respecto al promedio mensual 1996-2010. ....	47
Figura 21. Anomalía promedio anual de temperatura superficial del mar por zona durante 1996-2010. ....	48
Figura 22. Representación esquemática del comportamiento histórico mensual de la temperatura superficial del mar por zona de pesca en el sur del golfo de California durante 1996-2010.....	49
Figura 23. Comportamiento típico y periodos del índice de surgencia (IS) de la zona norte, centro y sur, producto del promedio mensual del IS de 1996-2010....	52
Figura 24. Índice de turbulencia $V^3$ ( $m^3/s^3$ ) de la zona norte, centro y sur resultado del promedio histórico mensual durante 1996-2010.....	54
Figura 25. Índice histórico mensual de surgencia ( $m^3/s$ ) por zona.....	55
Figura 26. Comportamiento mensual histórico del índice de abundancia y la TSM (A), las anomalías de TSM (B), el índice de turbulencia (C) y el índice de surgencia (D) durante 1997-2010. ....	58
Figura 27. Comportamiento mensual del índice de abundancia (CPUE) con las variables ambientales por zona de pesca durante 2002-2010. ....	62
Figura 28. Distribución mensual histórica de la captura de sardina crinuda (barras) y el índice de turbulencia (línea punteada).....	63
Figura 29. Captura de sardina crinuda y anomalías de temperatura superficial del mar durante el evento de El Niño 1997-98. Las líneas discontinuas indican el intervalo ( $\pm 1^\circ C$ ) mediante el cual se consideran anomalías correspondientes a algún fenómeno climático.....	64

---

Figura 30. Diagramas de dispersión con datos trimestrales del índice de abundancia (CPUE) y cuatro variables predictivas: A) esfuerzo de pesca, B) temperatura superficial del mar, C) índice de surgencia y D) índice de turbulencia. ....	65
Figura 31. Transformaciones empíricas usando ACE. En este caso se relaciona la CPUE con el esfuerzo y las tres variables ambientales .....	68
Figure 32. Transformaciones empíricas usando ACE. En este caso se relaciona la CPUE con el esfuerzo y dos variables ambientales (TSM e Índice de Turbulencia). ....	69
Figura 33. Transformaciones empíricas usando ACE. En este caso se relaciona la CPUE con el esfuerzo y dos variables ambientales (TSM e Índice de Surgencia). ....	71
Figura 34. Transformaciones empíricas usando ACE. En este caso se relaciona la CPUE con el esfuerzo pesquero y la Temperatura Superficial del Mar.....	72
Figura 35. Transformaciones empíricas usando ACE. En este caso se relaciona la CPUE solo con las tres variables ambientales (TSM, Surgencia y Turbulencia)...	73
Figura 36. Transformaciones empíricas usando ACE. En este caso se relaciona la CPUE con la TSM y el Índice de Surgencia. ....	74
Figura 37. Modelo predictivo trimestral de CPUE con el esfuerzo pesquero y las tres variables ambientales (TSM, IS, IT) como predictores. Las líneas punteadas muestran los intervalos superior (U) e inferior (L) con el 95% de confianza. Se muestran los datos observados de CPUE (puntos) y la mediana (línea sólida)....	77
Figura 38. Modelo predictivo trimestral de CPUE con el esfuerzo pesquero y el índice de Turbulencia ( $V^3$ ) como predictores. Las líneas punteadas muestran los intervalos superior (U) e inferior (L) con el 95% de confianza. Se muestran los datos observados de CPUE (puntos) y la mediana (línea sólida). ....	78
Figura 39. Modelo predictivo trimestral de CPUE con las tres variables ambientales (TSM, IS, IT) como predictores. Las líneas punteadas muestran los intervalos superior (U) e inferior (L) con el 95% de confianza. Se muestran los datos observados de CPUE (puntos) y la mediana (línea sólida). ....	79
Figura 40. Modelo predictivo anual de CPUE con el esfuerzo pesquero y las tres variables ambientales (TSM, IS, IT) como predictores. Las líneas punteadas muestran los intervalos superior (U) e inferior (L) con el 95% de confianza. Se muestran los datos observados de CPUE (puntos) y la mediana (línea sólida)....	80
Figura 41. Modelo predictivo anual de CPUE con el esfuerzo pesquero y el índice de Turbulencia ( $V^3$ ) como predictores. Las líneas punteadas muestran los intervalos superior (U) e inferior (L) con el 95% de confianza. Se muestran los datos observados de CPUE (puntos) y la mediana (línea sólida). ....	81

---

Figura 42. Modelo predictivo anual de CPUE con las tres variables ambientales (TSM, IS, IT) como predictores. Las líneas punteadas muestran los intervalos superior (U) e inferior (L) con el 95% de confianza. Se muestran los datos observados de CPUE (puntos) y la mediana (línea sólida). ..... 82

Figura 43. Diagramas de dispersión entre la captura y el esfuerzo pesquero para los datos agrupados trimestralmente (arriba) y anualmente (abajo). ..... 84

Figura 44. Modelo predictivo trimestral de captura, el esfuerzo y las tres variables ambientales como predictores. Las líneas punteadas muestran los intervalos superior (U) e inferior (L) con el 95% de confianza. Se muestran los datos observados de captura (puntos) y la mediana (línea sólida). ..... 85

Figura 45. Modelo predictivo trimestral de captura, el esfuerzo y el índice de turbulencia ( $V^3$ ) como predictores. Las líneas punteadas muestran los intervalos superior (U) e inferior (L) con el 95% de confianza. Se muestran los datos observados de captura (puntos) y la mediana (línea sólida). ..... 86

Figura 46. Modelo predictivo trimestral de captura con las tres variables ambientales (TSM, IS, IT) como predictores. Las líneas punteadas muestran los intervalos superior (U) e inferior (L) con el 95% de confianza. Se muestran los datos observados de captura (puntos) y la mediana (línea sólida). ..... 87

Figura 47. Modelo predictivo de captura anual con el esfuerzo y las tres variables ambientales como predictores. Las líneas punteadas muestran los intervalos superior (U) e inferior (L) con el 95% de confianza. Se muestran los datos observados de captura (puntos) y la mediana (línea sólida). ..... 88

Figura 48. Modelo predictivo de captura anual con el esfuerzo y el índice de turbulencia ( $V^3$ ) como predictores. Las líneas punteadas muestran los intervalos superior (U) e inferior (L) con el 95% de confianza. Se muestran los datos observados de captura (puntos) y la mediana (línea sólida). ..... 89

Figura 49. Modelo predictivo de captura anual con las tres variables ambientales (TSM, IS, IT) como predictores. Las líneas punteadas muestran los intervalos superior (U) e inferior (L) con el 95% de confianza. Se muestran los datos observados de captura (puntos) y la mediana (línea sólida). ..... 90

Figura 50. Índice de turbulencia mensual histórico para la zona de Mazatlán, Sin. 1985-2011. .... 100

---

## Relación de Tablas

Tabla I. Límites norte y sur de las áreas de pesca de la sardina crinuda en el sur del golfo de California.....	21
Tabla II. Número de datos que se generaron en cada matriz mensual de TSM. ..	26
Tabla III. Fenómenos climáticos El Niño/La Niña registrados en la zona de estudio, así como su intensidad y duración aproximada.....	50
Tabla IV. Direcciones mensuales del viento registradas en la zona de estudio durante 1996-2010. ....	53
Tabla V. Modelos construidos mediante la herramienta ACE con diferentes combinaciones del esfuerzo pesquero y las variables ambientales. ....	66
Tabla VI. Funciones definidas empíricamente para los datos de las variables involucradas obtenidas con ACE con la CPUE como variable dependiente. ....	75
Tabla VII. Ventanas medioambientales óptimas definidas para la sardina crinuda durante 1996-2010. ....	75
Tabla VIII. Modelos de regresión múltiple no lineal probados con datos trimestrales y la CPUE como variable dependiente. Se muestran las variables de los modelos, coeficiente de correlación (%), número de parámetros ajustados y valor del Criterio de Información de Akaike (AIC). En negritas se señala el valor menor del AIC y en negritas y subrayado el valor menor de AIC sin tomar en cuenta el esfuerzo pesquero en el modelo. ....	76
Tabla IX. Modelos de regresión múltiple no lineal probados con datos anuales y la CPUE como variable dependiente. Se muestran las variables de los modelos, coeficiente de correlación (%), número de parámetros ajustados y valor del Criterio de Información de Akaike (AIC). En negritas se señala el valor menor del AIC y en negritas y subrayado el valor menor de AIC sin tomar en cuenta el esfuerzo pesquero en el modelo. ....	80
Tabla X. Ecuaciones para los modelos de regresión no lineal ajustados a los datos observados para explicar la Captura por Unidad de Esfuerzo de la sardina crinuda (CPUEsc) en función del esfuerzo pesquero (E), la temperatura superficial del mar (TSM), el índice de turbulencia (IT) y el índice de surgencia costero (IS). La notación <i>Normal</i> se refiere a la función Normal con los valores indicando la media y la desviación estándar respectivamente. La notación Gamma se refiere a la función Gamma con los valores indicando los parámetros $\alpha$ y $\beta$ respectivamente. ....	83
Tabla XI. Modelos de regresión múltiple no lineal probados con datos trimestrales y la Captura como variable dependiente. Se muestran las variables de los modelos, coeficiente de correlación (%), número de parámetros ajustados y valor	

---

del Criterio de Información de Akaike (AIC). El valor más bajo de AIC se señala en negritas. .... 85

Tabla XII. Modelos de regresión múltiple no lineal probados con datos anuales y la captura como variable dependiente. Se muestran las variables de los modelos, coeficiente de correlación (%), número de parámetros ajustados y valor del Criterio de Información de Akaike (AIC). El valor más bajo de AIC se señala en negritas. 88

Tabla XIII. Ecuaciones para los modelos de regresión no lineal ajustados a los datos observados para explicar y predecir la captura de sardina crinuda (Csc) en función del esfuerzo pesquero (E), la temperatura superficial del mar (TSM), el índice de turbulencia (IT) y el índice de surgencia costero (IS). La notación *Normal* se refiere a la función Normal con los valores indicando la media y la desviación estándar respectivamente. La notación Gamma se refiere a la función Gamma con los valores indicando los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  respectivamente. .... 91

---

## Resumen

La pesca de sardina crinuda ha presentado volúmenes de captura muy importantes en la última década. Es por ello que se ha convertido en una de las pesquerías más importantes en México. Con el objetivo de analizar la distribución y abundancia de la sardina crinuda (*Opisthonema* spp) y su relación con el ambiente, se analizó la captura por unidad de esfuerzo (CPUE) junto con tres variables ambientales: temperatura superficial del mar (TSM), el índice de surgencia (IS) y el índice de turbulencia (IT). El área de estudio comprende las cinco zonas administrativas donde pesca la flota sardinera que desembarca el recurso en el puerto de Mazatlán, Sinaloa. Se encontraron diferencias en el aporte de captura nominal de cada una de ellas, registrándose hasta un 80% en las zonas del centro (frente a los litorales del sur de Sinaloa y Nayarit) y los mínimos en las zonas extremas tanto al norte (ubicadas al norte de Sinaloa) como al sur (al norte de Jalisco). Para relacionar la CPUE con las variables ambientales se utilizó el algoritmo conocido como ACE (Alternating Conditional Expectation, por sus siglas en inglés) y encontrar lo que se conoce como “*Ventana ambiental óptima*” para estas especies. La ventana medioambiental encontrada fue entre 25-26°C de TSM; valores entre 70-80 m<sup>3</sup>/s del IS y por último con valores menores a 40 m<sup>3</sup>/s<sup>3</sup> del IT. Se desarrollaron varios modelos de regresión múltiple no lineal con fines de predicción de captura y CPUE, utilizando las funciones de transformación definidas empíricamente con ACE. Posteriormente utilizando el criterio de correlación de Akaike, se eligió el modelo que utilizó al esfuerzo pesquero y al índice de turbulencia. La mayor abundancia se presentó en las zonas del centro, mismas en las que se registraron valores cercanos a la ventana medioambiental. También se observó que la CPUE se ve afectada cuando se presentan fenómenos climáticos como El Niño y La Niña con intensidades altas (anomalías >|2.5| °C). Considerando que la CPUE es proporcional a la abundancia, la sardina crinuda presentó altos niveles de abundancia durante el periodo de estudio, aparentemente el stock se encuentra en crecimiento a partir del 2003, aunque se debe analizar más a fondo la abundancia y la CPUE para descartar relaciones de hiperestabilidad entre estas variables, lo que podría comprometer la sustentabilidad de la población.



### Abstract

The thread herring fishery has presented very important catch volumes in the last decade, becoming in one of the major fisheries in Mexico. We analyze the distribution and abundance of thread herring (*Opisthonema* spp) and their relationship with the environment, specifically, the relationship between the catch per unit effort (CPUE) and three environmental variables: Environmental variables analyzed were sea surface temperature (SST), upwelling index (UI) and the turbulence index (TI). The herring fishery that landing in Mazatlan, Sinaloa, fish in five administrative fishing zones. We found differences in the contribution of nominal catch of each area to the total catch, getting up to 80% of the central regions (southern Sinaloa and Nayarit) and low catch in extreme areas both north (north of Sinaloa) and south (north of Jalisco). To analyze the relationships between CPUE and environmental variables we use ACE algorithm (Alternating Conditional Expectation) and we found "optimal environmental window" for these species. The environmental window values were 25-26°C for SST, 70-80 m<sup>3</sup>/s for UI and finally with values lower than 40 m<sup>3</sup>/s<sup>3</sup> for TI. Several multiple no linear regression models were developed for prediction purposes catches and CPUE using transformation functions empirically defined with ACE. The fishing effort and the turbulence index model was chosen as the best in accord with the Akaike information criteria. The highest abundance occurred in both central areas, their record values were near to the optimal environmental window. We noted that the CPUE is affected when there were climatic events such as El Niño and La Niña with high intensities (anomalies >|2.5|°C). Consider ring that CPUE is proportional to abundance, thread herring showed high levels of abundance during the study period, the stock is apparently growing since 2003, although it should be analyzed further abundance and CPUE to identify hyperstability relationships between these variables, which could compromise the sustainability of the population.

## 1. Introducción

Los peces pelágicos menores representan alrededor del 40% de las capturas de organismos marinos en México, lo que define a esta pesquería como una de las más importantes del país (FAO, 2011).

En el Pacífico mexicano las seis especies de las que se obtiene el 70% de la captura de pelágicos menores son (DOF, 2010):

- *Sardinops sagax* (Jenyns, 1842)
- *Opisthonema libertate* (Günther, 1867)
- *O. bulleri* (Regan, 1904)
- *O. medirastre* (Berry y Barrett, 1963)
- *Scomber japonicus* (Houttuyn, 1782)
- *Engraulis mordax* (Girard, 1854)

Otras especies capturadas en menor cantidad son:

- *Trachurus symmetricus*, (Ayres, 1855)
- *Etrumeus teres*, (DeKay, 1842)
- *Cetengraulis mysticetus*, (Günther, 1867)
- *Oligoplites* spp.

Las descargas del recurso son destinadas a la elaboración de harina y aceite de pescado (85%) para la producción de materia prima de alimentos de animales, el resto (15%) es enlatado y congelado (Nevárez-Martínez *et al.*, 2006). Estos peces, proveen una rica fuente de proteína, es por ello que sus productos se destinan a diferentes usos: como alimento fresco en ranchos atuneros, materia prima para el ganado porcino y la industria avícola, carnada en pesca artesanal y deportiva, etc. (Nevárez-Martínez *et al.*, 2006).

Las distintas especies de peces pelágicos menores constituyen organismos de gran importancia tanto desde el punto de vista ecológico como del económico. Ello es debido a que en el ambiente marino representan el alimento de un gran número de especies de peces, moluscos, aves y mamíferos marinos (Holt, 1975). Son económicamente importantes por los grandes volúmenes de captura que registran

así como por la fuente de empleos que generan, sobre todo en puertos donde es procesado el recurso (Nevárez-Martínez *et al.*, 2006).

La norma oficial mexicana *NOM-003-PESC-1993*, es la que regula el aprovechamiento de las especies de sardina monterrey, piña, crinuda, bocona, japonesa y de las especies anchoveta y macarela, con embarcaciones de cerco, en aguas de jurisdicción federal del océano Pacífico, incluyendo el golfo de California (SEPESCA, 1994). Entre estas regulaciones está la limitación del esfuerzo pesquero y la talla de primera captura para *Opisthonema* spp (160 mm de longitud patrón). Este tipo de pesquerías se caracterizan por ser multiespecíficas, es decir, se obtienen varias especies con un mismo arte de pesca, en uno o en varios lances (Nevárez-Martínez *et al.*, 2006).

El estado de Sinaloa ocupa el segundo lugar en producción pesquera del país en cuanto a volúmenes de captura en peso vivo, estos son aportados principalmente por la pesquería de camarón y sardina que se desarrolla en la entidad. En 2010 este estado aportó cerca del 14% de la pesca total de peces pelágicos menores en peso vivo a nivel nacional (SAGARPA, 2011). La pesquería de peces pelágicos menores en el sur del golfo de California se realiza en aguas cercanas a la costa y está basada en las tres especies de sardina crinuda (*O. libertate*, *O. bulleri* y *O. medirastre*), y en la sardina bocona (*C. mysticetus*), siendo la sardina crinuda la especie objetivo (Jacob-Cervantes, 2010). La sardina crinuda presenta variaciones de abundancia a lo largo del año, afectando la disponibilidad del recurso para la flota pesquera y provocando en algunas ocasiones pérdidas económicas para el sector sardinero. Dicha dinámica se atribuye, entre otros factores, a los efectos ambientales que actúan directamente sobre estas especies.

En el puerto de Mazatlán, Sinaloa se agrupa y descarga la flota pesquera que captura frente a los litorales de los estados de Sinaloa, Nayarit y norte de Jalisco. Esta flota cuenta actualmente con siete barcos que se distribuyen por toda la zona y pertenecen a una sola empresa. Generalmente las embarcaciones están equipadas con red de cerco con jareta y pangón y son operadas por hasta ocho pescadores (DOF, 2010). La capacidad de bodega de los barcos es más

comúnmente de 140 t. Las temporadas de pesca de esta flota sardinera van de noviembre a septiembre, los barcos detienen operaciones en el mes de octubre debido a las bajas capturas. En esta temporada la industria aprovecha para dar mantenimiento a la flota y equipo de pesca (Jacob-Cervantes, 2010). Los barcos más comunes tienen 25 m (o más) de eslora, 120 t de bodega (o más) y máquina principal de 520 HP. La longitud (de 350 a 650 m) y calado de las redes dependen de la eslora del barco, del criterio del patrón de la embarcación y de aspectos económicos de las empresas; la luz de malla de las redes sardineras es de 25mm. Algunos barcos usan redes mixtas, con paño de ambos tamaños de malla (Nevárez-Martínez *et al.*, 2006).

La pesquería de pelágicos menores en el sur del golfo de California, ha adquirido gran importancia a partir de la última década por sus altos volúmenes de captura. Se inició en la década de los 70, cuando se capturaban alrededor de 15,000 t anuales (Figura 1), y ha venido incrementando de forma sostenida el volumen global de captura año con año. Para el año 2000 se alcanzaron 70,000 t, en el 2009 fueron más de 120,000 t y en el 2010 se lograron poco más de 90,000 t (Jacob-Cervantes *et al.*, 2011; SAGARPA, 2011).

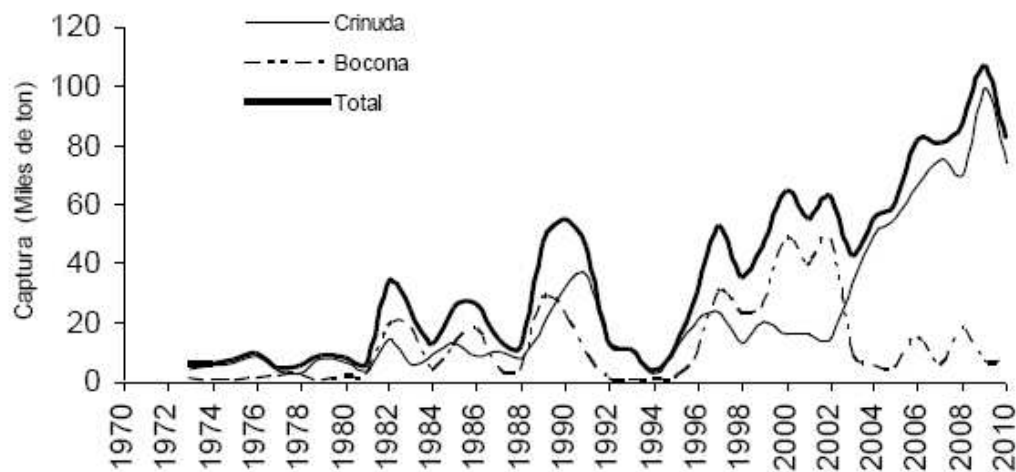


Figura 1. Capturas históricas de la pesquería de pelágicos menores desembarcadas en el puerto de Mazatlán, Sin. (Tomado de Jacob-Cervantes *et al.*, 2011).

En este mismo puerto, la industria sardinera genera una importante fuente de

empleos para la gente de la región, que convierte el recurso en diferentes productos, en su mayoría harina y aceite de buena calidad, de los cuales una buena parte es exportada al extranjero. En Mazatlán no se procesa el recurso para ser enlatado, por lo que su consumo es indirecto al ingerir productos que utilizan algún derivado de estas especies durante su elaboración. En otras regiones la sardina crinuda se convirtió en alimento para el ser humano a partir de la década de los 90, ya que anteriormente sólo se utilizaba a la sardina Monterrey por sus altos índices de capturas en el golfo de California (Cisneros-Mata *et al.*, 1991; Nevárez-Martínez *et al.*, 2004).

### 1.1 Taxonomía y biología de la sardina crinuda

El término “sardina crinuda” es uno de los nombres comunes por el que se conoce a las cinco especies de género *Opisthonema*, orden Clupeiforme, suborden Clupeoidei, superfamilia Clupeidae y a la familia Clupeidae. Son peces marinos que se encuentran sólo en aguas tropicales y subtropicales cerca de ambas costas del continente americano (Berry y Barrett, 1963). El género está compuesto de una especie en el Atlántico y de cuatro en el Pacífico. *Opisthomema oglinum* (Lesueur, 1818), única especie que habita el océano Atlántico occidental, se encuentra de Brasil a Massachusetts, Bermuda y las Indias Occidentales. *Opisthonema libertate*, *O. bulleri* y *O. medirastre* son especies costeras del Pacífico que aparecen desde Perú hasta México. *O. berlangai*, está confinada a los alrededores de las islas Galápagos (Berry y Barrett, 1963).

*Opisthonema libertate*, *O. bulleri*, y *O. medirastre* son las tres especies que se capturan en conjunto en el sur del golfo de California y son reportadas como sardina crinuda (Jacob-Cervantes, 2010).

La familia Clupeidae son peces fusiformes, con forma oval en una sección transversal, con una serie completa de escudetes a lo largo del abdomen (los escudetes pélvicos siempre están presentes); la boca es terminal, tienen dos supra maxilares y los dientes son pequeños. La aleta dorsal es corta y la tienen casi en la mitad del cuerpo. La aletas pélvicas están enfrente, debajo y justo detrás de la base de la aleta dorsal; la aleta anal es corta y está muy detrás del

último radio de la aleta dorsal; las escamas son adherentes y de tamaño moderado, de 40 a 50 en las series laterales (Whitehead, 1985).

El género *Opisthonema* posee como características distintivas de los otros clupeidos del Pacífico oriental (Figura 2): una prolongación filamentosa del último radio de la aleta dorsal, una hilera de escudetes a lo largo de la línea media ventral, hileras de escamas que atraviesan el dorso entre la cabeza y la aleta dorsal y una molleja elíptica de paredes delgadas (Berry y Barrett, 1963).

Sólo pequeñas diferencias morfológicas existen entre las cinco especies. La diferenciación práctica de las especies se basa en la combinación de dos consideraciones: (1) el área geográfica de aparición y (2) la forma en que el número de branquiespinas aumenta en relación con la longitud estándar (Berry y Barrett, 1963).

El número de branquiespinas en el hueso ceratobranquial del primer arco branquial de *O. libertate* va de 63 a 110, para *O. bulleri* se encuentran de 0 a 39 y por último en *O. medirastre* de 40 a 75 (Fisher *et al.*, 1995).

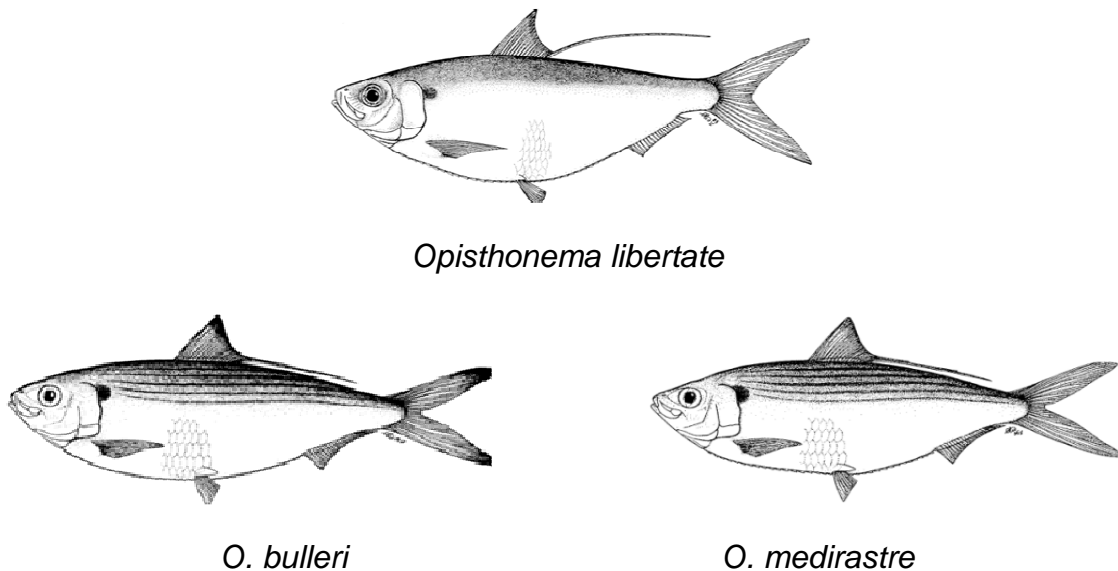


Figura 2. Especies de sardina crinuda objeto de la pesquería de pelágicos menores en el sur del golfo de California (tomadas de Fisher *et al.*, 1995).

En la región de Mazatlán, el desove para la especie *O. libertate* se realiza en los meses de verano-otoño, mientras que para *O. bulleri* ocurre en primavera y verano. La época reproductora de la especie *O. medirastre* no se ha definido completamente en el noroeste mexicano; sin embargo, se ha planteado que el periodo más probable sea invierno (Páez-Barrera, 1976; Rodríguez-Domínguez, 1987).

## **1.2. Variabilidad ambiental en la pesquería de pelágicos menores**

El objetivo de la administración pesquera es la regulación de la explotación de los recursos, obteniendo un rendimiento sostenido de los mismos, es decir, la captura de organismos sin rebasar la tasa de crecimiento de la población, para lograr una actividad económica sustentable (Lluch-Cota, 2004).

El origen de la vulnerabilidad en la actividad pesquera ante fenómenos de variabilidad ambiental depende directamente de los patrones de producción y captura. La influencia de factores ambientales en la pesca, específicamente en la captura de organismos, hace necesario integrar en los esquemas de extracción y manejo, límites en tipos y periodos de captura, que no excedan la capacidad de recuperación o reproducción del recurso, la cual se define por el crecimiento poblacional (Lluch-Cota, 2004). Los organismos son los mejores indicadores que permiten visualizar las modificaciones que sufren los ambientes marinos, por ejemplo en la temperatura del agua. Movimientos migratorios o cambios de hábitat a otros en los cuales nunca se les había registrado, son un ejemplo de las respuestas ante tales fluctuaciones (Morales-Bojórquez, 2009).

Las relaciones entre las poblaciones de peces pelágicos menores y la variabilidad ambiental han sido ampliamente documentados no solo para las costas de México (Nevárez-Martínez *et al.*, 2001; Nevárez-Martínez *et al.*, 2008) y Norteamérica (Emmett *et al.*, 2005), sino también en los sistemas de corrientes de Humboldt (Bakun y Parrish, 1982; Mendelsshon, 1989; Yañez *et al.*, 1995; Bello *et al.*, 2004) y Benguela (Beckley y van der Lingen, 1999; Daskalov *et al.*, 2003).

Se ha planteado la hipótesis (Bakun, 1996) de los tres aspectos físicos fundamentales que deben presentar las áreas de desove para garantizar el éxito

reproductivo de los peces pelágicos menores: el primero es el enriquecimiento, resultado de la productividad primaria; el segundo es la retención de larvas en áreas favorables para la supervivencia y el crecimiento; por último la concentración de larvas de peces y alimento en ambientes estables gracias a la fuerte estratificación vertical y horizontal de la columna de agua, ya que de esta manera evita la dispersión de las partículas que estos peces utilizan como alimento.

Sin duda se debe integrar información ambiental, biológica y pesquera para lograr administrar adecuada y sustentablemente la pesca de organismos tales como los peces pelágicos menores (Nevárez-Martínez *et al.*, 2001) ya que presentan alta sensibilidad a los cambios en sus ambientes naturales. Un ejemplo, es la pesquería de *Sardinops sagax* que se desarrolla en el sistema de corrientes de Benguela, una corriente fría que circula por la costa oeste de África y que genera una zona altamente productiva por el ascenso de aguas frías del fondo. Esta pesquería fue cerrada en 2002 por los bajos volúmenes en los desembarques, al parecer por el pobre reclutamiento y fenómenos ambientales que no se consideraban para la administración del recurso (Daskalov *et al.*, 2003) provocando grandes problemas para el sector pesquero y económico de esta región africana, así como una importante pérdida de empleos.

En el golfo de California se atribuye a la variabilidad ambiental la distribución y abundancia que presenta la sardina Monterrey en esas costas (Nevárez-Martínez *et al.*, 2001), donde aseguran que la alta abundancia del recurso se encontraron asociadas a surgencias moderadas ( $13-18 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  por 10 m de la línea de costa) y la temperatura superficial del mar entre  $19^\circ$  y  $25^\circ\text{C}$ .



### 1.3. Los fenómenos de El Niño y La Niña

El Niño y La Niña son condiciones anómalas en la temperatura del océano en el Pacífico tropical del este. El Niño y La Niña corresponden al estado climático en el que la temperatura de la superficie del mar está 0.5°C o más por encima o por debajo de la media respectivamente. La ocurrencia de estos eventos no es periódica, es decir, no ocurre un evento de este tipo cada cierto número de años. Por otro lado, a un evento El Niño no sigue necesariamente uno La Niña o viceversa. La intensidad de El Niño o La Niña varía de un evento a otro, pudiendo ser clasificados como intensos, moderados, débiles, o muy débiles, dependiendo de la amplitud de la anomalía en la temperatura superficial del mar (Magaña-Rueda, 2004).

Se sabe que en condiciones normales (Figura 3a) el océano Pacífico tropical es recorrido por vientos dominantes que vienen del este, conocidos como vientos alisios. Tales vientos tienden a acumular el agua tropical más caliente en el lado oeste del océano Pacífico (en la región de Indonesia). El Pacífico tropical del este es en general más frío (<27°C) que el del oeste. El Pacífico oriental posee también la característica de que ahí se mezclan masas de agua caliente y fría, permitiendo la generación de eventos de surgencia que traen a la superficie nutrientes del fondo del océano, razón por la cual algunas de las poblaciones de organismos marinos más abundantes se encuentran frente a las costas de Perú. En México se ha observado que durante la presencia de fenómenos climáticos como El Niño y La Niña se afectan los procesos de productividad primaria (Badan, 2003) y consecuentemente se puede ver impactada la abundancia de larvas de peces (Sánchez-Velasco *et al.*, 2004).

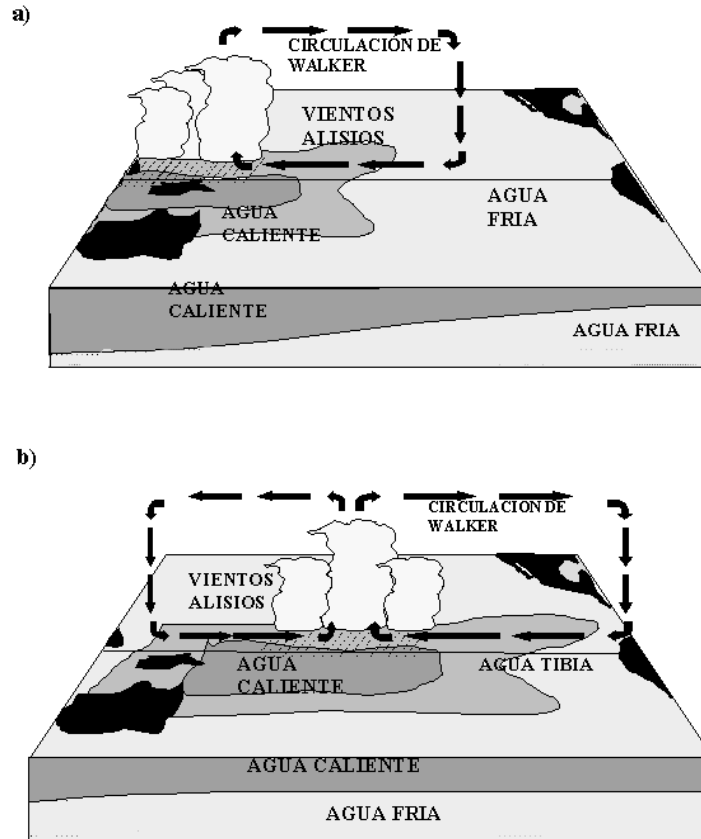


Figura 3. Diagrama de la circulación atmosférica tropical y las condiciones medias del océano Pacífico durante a) un año Normal y b) un año El Niño (tomado de Magaña-Rueda, 2004).

Durante años El Niño, los vientos alisios en el Pacífico se debilitan y las aguas más calientes confinadas a la región del Pacífico occidental, se esparcen a lo largo del Ecuador (Figura 3b), por efecto de una onda oceánica ecuatorial del tipo Kelvin; estas ondas, entre otros efectos, provocan incrementos de hasta 4 o 5 °C en la temperatura superficial del mar y el descenso de varias decenas de metros en la profundidad de la termoclina. Estas ondas viajan desde el Ecuador a los polos a lo largo de la costa por lo que aproximadamente seis meses después de iniciado un evento de este tipo, podemos experimentar sus efectos en las costas mexicanas (López-Sandoval *et al.*, 2009a). El medio de propagación de estas ondas costeras es la capa superficial del mar, cuyas características son determinadas por la acción combinada de la radiación solar, y las interacciones del mar y los vientos. Con la aparición de una zona de agua caliente en el Pacífico

central y del este se producen precipitaciones intensas sobre esta parte de los trópicos. Tal corrimiento en los patrones de lluvia no se debe a mayor evaporación *in situ*, sino a la mayor convergencia de humedad. Con tales cambios, donde antes llovía poco (por ejemplo, en Perú y Ecuador), ahora se producen lluvias intensas e incluso inundaciones; mientras que donde antes llovía mucho, ahora llueve menos produciéndose sequías, como en la región del Pacífico oeste (Indonesia o norte de Australia). Además del fenómeno de El Niño, se habla de su contraparte La Niña, que corresponde a anomalías negativas en la temperatura superficial del Pacífico tropical centro-este. Al parecer, este fenómeno provoca eventos climáticos contrarios a lo experimentado durante El Niño (Magaña-Rueda, 2004).

La pesca es una de las actividades más afectadas por fenómenos climáticos de este tipo; las dinámicas estacionales y espaciales que presentan los recursos pesqueros son causadas por el ambiente (Nevárez-Martínez *et al.*, 2006), de esta manera la variabilidad ambiental puede dar la pauta para el establecimiento y éxito de las pesquerías.

#### 1.4. Surgencias costeras inducidas por viento

La fricción que ejerce la fuerza cortante del viento que se dirige al Ecuador (hemisferio norte) en la superficie del océano, en conjunto con la rotación de la Tierra, ocasiona que la capa superficial de agua se mueva en dirección opuesta a la costas oeste de las masas continentales por la acción del transporte de Ekman (Figura 4). Este movimiento inicia en la superficie oceánica por la acción del viento y debido al movimiento de Coriolis, se desvía 90° hacia la derecha, arrastrando consigo a las capas adyacentes, las cuales sufren el mismo efecto de desvío con respecto a la capa superior, aunque cada vez en menor magnitud. Los vectores de este movimiento forman el espiral de Ekman. El agua desplazada que va costa-afuera es reemplazada por el movimiento vertical de agua proveniente de profundidades desde 50 a 100 m o más. Estas aguas son más frías y poseen mayor salinidad que la capa original y típicamente presentan altas concentraciones de nutrientes tales como nitratos, fosfatos y silicatos, que son pieza clave de la producción primaria. Por esta razón es que las zonas de surgencia son también las zonas pesqueras más productivas del mundo, ya que es donde se generan las bases de las cadenas alimenticias de organismos en varios niveles tróficos, hasta llegar a los pelágicos menores que aprovechan los productos de dichas zonas (Bograd, 2010).

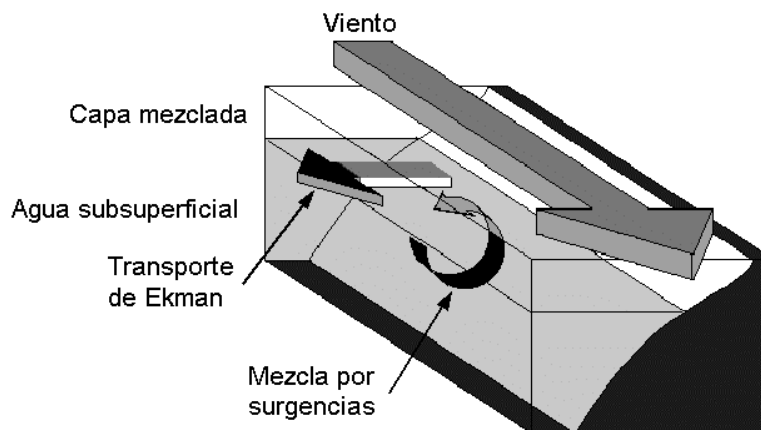


Figura 4. Esquema general de un sistema de surgencias costeras (tomado de Lluch-Cota, 2004).

De esta manera los sistemas de surgencias permiten el desarrollo de productores primarios, que son la base de las cadenas tróficas. Las regiones en las que se desarrollan estos fenómenos sostienen grandes pesquerías alrededor del mundo (Figura 5), por la gran variedad de especies que habitan estos sitios. Por lo que el éxito de estas actividades pesqueras, puede estar en función de la variabilidad ambiental que permite el desarrollo y el crecimiento de las poblaciones marinas. Sin embargo se deben reconocer otras áreas que a pesar de no presentar actividades de surgencia tan intensas como las que ocurren en estas regiones, están permitiendo el desarrollo de poblaciones marinas que sostienen grandes pesquerías. En México, el sur del golfo de California es un buen ejemplo, ya que además de la pesquería de sardina crinuda, también desarrolla la pesca de camarón, que es también muy importante para el país.

Es fundamental conocer las características ambientales que permiten el éxito o eventualmente el fracaso de la población de sardina crinuda que habita el sur del golfo de California, de esta manera se puede llevar a cabo un manejo adecuado de la pesquería que explota estas especies, ya que se podrían presentar condiciones ambientales desfavorables para el stock y en combinación con las actividades pesqueras se podría impactar gravemente este importante recurso.

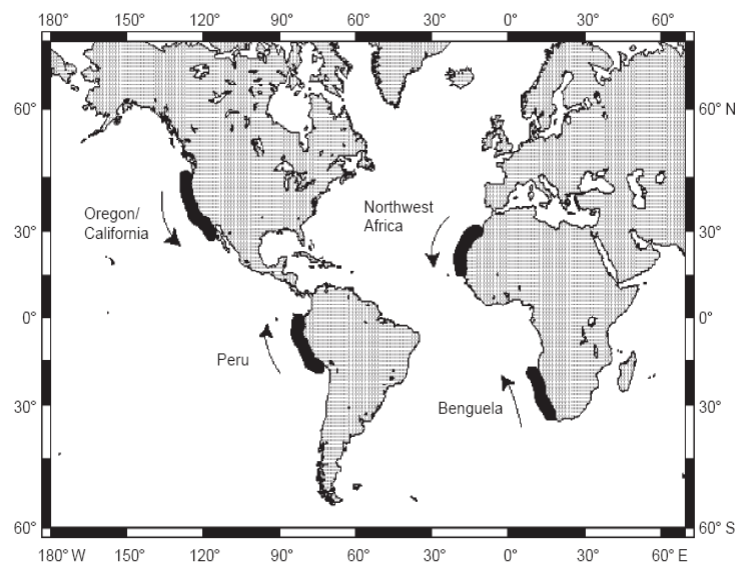


Figura 5. Límites orientales de las principales regiones de surgencia costera. Las flechas indican los vientos predominantes (tomado de Cole y McGlade, 1998).

## 2. Antecedentes

### 2.1. Pelágicos menores

Los estudios sobre las pesquerías de pelágicos menores en el mundo han propuesto, en muchas ocasiones, que la variabilidad ambiental repercute de manera importante en la distribución, abundancia, reclutamiento y productividad de estas especies de peces (Bakun y Parrish, 1982; Bakun, 1996; Cury *et al.*, 1998). La mayor parte de los estudios están dirigidos a la sardina Monterrey (Nevárez-Martínez *et al.*, 2001; Nevárez-Martínez *et al.*, 2008), sólo algunos han sido enfocados a la sardina crinuda (Lyle, 1992; Ruiz-Luna *et al.*, 1997; Jacob-Cervantes, 2010; Vallarta-Zárate, 2010).

Nevárez-Martínez *et al.* (2001) proponen que la distribución y abundancia de la sardina Monterrey (*S. sagax*) es determinada por la temperatura superficial del mar y patrones de viento. Estos inducen la formación de zonas de afloramientos altamente productivos que la sardina busca para realizar parte de su ciclo de vida como alimentación, reproducción y desove. Los autores definieron intervalos de temperatura (19-25°C) y surgencias moderadas (13–18 m<sup>3</sup>s por 10 m de línea de costa) en los cuales se registró la mayor abundancia del recurso.

Nevárez-Martínez *et al.* (2008) analizaron la relación entre el ambiente (temperatura superficial del mar e índice de surgencia), el esfuerzo pesquero y la captura de sardina Monterrey en el golfo de California. Utilizaron la metodología estadística conocida como ACE (Alternating Conditional Expectation por sus siglas en inglés) que busca las mejores transformaciones de las variables independientes para posteriormente probar modelos de regresión múltiple no lineal que permitieran explicar la variabilidad en la captura y en la CPUE. Identificaron condiciones óptimas de temperatura entre 23.5 y 24.5°C y de surgencia entre 60-80 m<sup>3</sup>s. Uno de los modelos propuestos con el índice de surgencia y la temperatura superficial como variables independientes, logró explicar más del 83% de la variabilidad en la captura; otro con las mismas variables explicó el 77% de la variabilidad pero en este caso con la CPUE como variable dependiente.

Lyle (1992) analizó la pesquería de varias especies de sardina en el norte del país hasta 1991. Destaca el análisis que se realizó de la pesquería de sardina crinuda y la asociación de la abundancia con la temperatura superficial del mar. Reporta que la máximas capturas se logran en los meses correspondientes al invierno y las mínimas en el verano durante la reproducción de la especie dominante (*O. libertate*). También identificó que la captura por unidad de esfuerzo de la sardina crinuda de Mazatlán fue mayor que la de Guaymas y propone evidencias que indican que la sardina crinuda capturada en ambos puertos pertenece a una misma población.

Ruiz-Luna *et al.* (1997) analizaron la influencia de la eficiencia de las embarcaciones y el poder de pesca sobre la captura por unidad de esfuerzo (CPUE) en la pesquería de sardina crinuda durante 1972-1993, debido a que el comportamiento de dichas variables no mostró un incremento proporcional. Se utilizó un Modelo Lineal General (MLG) para estandarizar la CPUE, dicho modelo involucró las temporadas de pesca y una categorización propuesta para las embarcaciones sardineras. Se identificó un incremento del poder de pesca a través del tiempo y diferencias poco significativas entre cada una de las embarcaciones; además de que el modelo logró explicar cerca del 75% de la variabilidad en la captura del recurso. Los resultados fueron muy relevantes, ya que fue uno de los primeros estudios que involucraron el uso de MLG en la pesquería de sardina crinuda en México.

Jacob-Cervantes (2010) analizó la estructura de tallas y la madurez gonádica de los peces pelágicos menores que son el objetivo de la pesquería desarrollada en el sur del golfo de California capturados durante 2008. La sardina crinuda (*Opisthonema* spp) fue la que presentó la mayor frecuencia en la captura (80%) y más de la mitad de los organismos muestreados presentaron tallas menores a las mínimas autorizadas. La sardina bocona (*C. mysticetus*) representó cerca del 20% de la captura anual y se reprodujeron durante la segunda mitad del año.

Vallarta-Zárate (2010) analizó esta pesquería de sardina crinuda con respecto a la temperatura superficial del mar y algunos parámetros biológicos durante el periodo

1996-2008. Encontró una relación estrecha entre la captura de sardina y la temperatura superficial del mar. Los mayores volúmenes desembarcados se registraban cuando se presentaban fenómenos correspondientes a La Niña mientras que cuando se presentaba El Niño, la captura llegaba incluso al colapso. También identificó que la sardina crinuda presentó altas frecuencias de organismos en estados biológicamente reproductivos durante la mayor parte del año pero fueron mayores durante el verano.

## **2.2. Surgencias costeras y Temperatura Superficial del Mar**

Los fenómenos tales como las surgencias costeras generadas por la acción del viento sobre las superficie del mar y la temperatura superficial están estrechamente ligados en el desarrollo de sitios favorables para el establecimiento y permanencia de los bancos de sardina, ya que el desplazamiento de las capas superficiales de agua por la acción del viento, genera el afloramiento del agua de fondo rica en nutrientes, los cuales son necesarios para el desarrollo de productores primarios y secundarios de los cuales se alimenta la sardina (Cury y Roy, 1989; Guisande *et al.*, 2001; Guisande *et al.*, 2004).

El estudio de las surgencias costeras y el desarrollo de bases de datos para el posterior estudio de su efecto sobre los procesos que ocurren en las poblaciones de pelágicos menores, son trascendentales, para explicar algunas dinámicas que se observan en su captura. Durante muchos años las pesquerías de sardina y anchoveta se han enfrentado a la variabilidad que se observa en el reclutamiento en cada temporada de pesca y se ha propuesto que el éxito de este proceso está ligado a las condiciones ambientales (Daskalov *et al.*, 2003; Morales-Bojórquez *et al.*, 2003). En las últimas décadas el avance de la tecnología ha permitido la compilación de imágenes (bases de datos) de las regiones en las cuales se desarrollan fenómenos tales como los afloramientos, lo que podría ofrecer una solución para estos problemas y eventualmente utilizar los resultados con fines de manejo (Cole y McGlade, 1998).



Cury *et al.* (1998; 2000) explican algunas interacciones entre la sardina y los patrones de surgencia estacionales en aguas del Pacífico sur y encuentran estrechas relaciones con las zonas de afloramiento, ya que los productos que se generan durante eventos de surgencia son elementales para la alimentación de larvas de estos peces. Lluch-Cota (1999) reporta el comportamiento del índice de surgencia para el periodo 1970-1996 en el golfo de California. Esto fue realizado con el fin de generar *proxies* que expliquen las respuestas biológicas a los cambios climáticos, para que de esta manera se enriquezcan las bases de datos con éstas y otras variables y se llegue a proponer una administración de los recursos marinos del golfo de California. El índice se relacionó con la concentración y distribución de pigmentos fotosintéticos en la zona, la temperatura superficial del mar y también con las dinámicas de las poblaciones de importantes recursos pesqueros. Se reportó también un claro incremento estacional en el índice costero de surgencia y en la temperatura superficial desde mediados de la década de los 70.

En Chile se asocia la captura de sardina y anchoveta con la temperatura superficial del mar. Yáñez *et al.* (1995) proponen que la sardina puede ser capturada a distancias más alejadas de la costa con respecto a la anchoveta ya que ambas especies realizan migraciones norte-sur durante la transición de temperaturas frías a cálidas y ambas especies se vieron afectadas de manera distinta cuando se presentaron anomalías intensas en la temperatura. Se observó que la anchoveta se alimenta de los productores primarios que se establecen durante las primeras etapas en la formación de surgencias y la sardina espera que las surgencias se encuentren más desarrolladas para alimentarse. En este trabajo se hace evidente el movimiento de la población de sardina cuando se presenta el fenómeno de El Niño.

Yáñez *et al.* (2008) reportaron las relaciones entre el ambiente y las pesquerías pelágicas desarrolladas al norte de Chile. Se detectó un cambio de régimen de la temperatura en la década de los 70 (con tendencias cálidas), evento que marcó una gran disminución de la pesquería de anchoveta (*Engraulis ringens*) y un significativo aumento en los desembarques de sardina (*Sardinops sagax*). A

finales de los 80 reportaron un segundo cambio de régimen, que se confirmó con la recuperación de la anchoveta y disminución de la sardina, lo que permitió plantear un marco conceptual que involucró las variables ambientales con los cambios de régimen de los peces.

Otra pesquería de pelágicos menores de gran importancia es la que se desarrolla en el sistema de surgencia de Benguela, en la costa occidental de África. Daskalov *et al.* (2003) encontraron un cambio en la relación del reclutamiento con la temperatura superficial del mar (TSM) y con la velocidad del viento, es decir, en la década de los 80 el reclutamiento de sardina fue positivamente asociado con la TSM y negativamente con los vientos, posteriormente en la década de los 90 esas relaciones mostraron una reversión, ya que ahora el reclutamiento se relacionó negativamente con la TSM y lo contrario con los vientos. Una de las teorías que proponen Daskalov *et al.* (2003), es el cambio de dos regímenes ambientales: el primero se caracterizó por una débil estratificación y un fuerte enriquecimiento y el segundo presentó frecuentes eventos cálidos, fuertes estratificaciones y tasas reducidas de productividad y por ende de enriquecimiento. Los autores utilizaron un modelo aditivo generalizado (MAG) para relacionar las variables ambientales y pesqueras.

Finalmente es importante señalar que este proyecto está inmerso en el Programa Nacional de Pelágicos Menores y forma parte de las investigaciones que sobre estas especies se desarrollan en el CRIP-Mazatlán, INAPESCA-SAGARPA.

### 3. Área de estudio

El área de pesca de la sardina crinuda, que desembarca en Mazatlán, Sinaloa, se encuentra delimitada en el polígono incluido entre la latitud 20 a 27°N, la longitud 105 a 110°W y un máximo 20 millas náuticas frente a los litorales de los estados de Sinaloa, Nayarit y Jalisco en el Pacífico mexicano y el golfo de California (Figura 6).

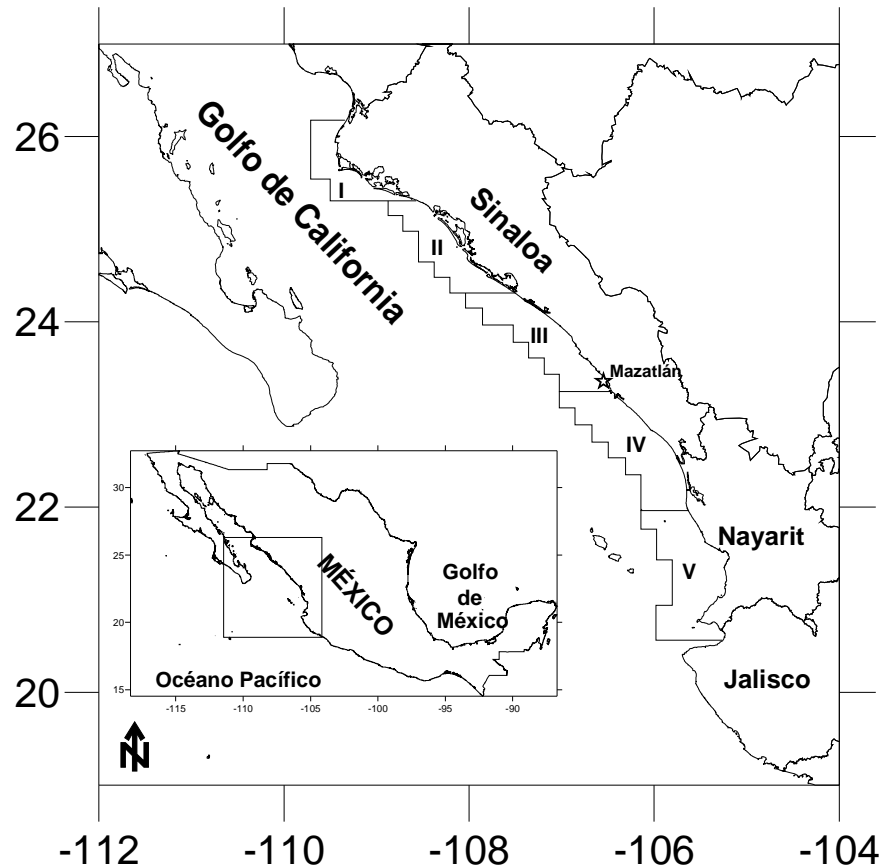


Figura 6. Zona de estudio donde se enmarcan las cinco áreas de pesca de la sardina crinuda que se desembarcan en el puerto de Mazatlán, Sin.

Las cinco áreas en que se divide la zona de pesca son utilizadas en el programa permanente de pelágicos menores del CRIP-Mazatlán INAPESCA-SAGARPA con fines administrativos y de manejo, delimitada de acuerdo al Programa Nacional de Pelágicos Menores. Para la realización de este proyecto se utilizaron estas áreas de pesca y se delimitaron geográficamente (Tabla I), con el fin de obtener los datos de temperatura de cada una de ellas.

Tabla I. Límites norte y sur de las áreas de pesca de la sardina crinuda en el sur del golfo de California.

Área de pesca	Latitud Inicial N	Latitud final N	Longitud Inicial W	Longitud final W
1	26° 14'	25° 09'	108° 20'	109° 40'
2	25° 09'	24° 04'	107° 20'	108° 40'
3	24° 04'	23° 12'	106° 30'	107° 50'
4	23° 12'	21° 58'	105° 38'	106° 50'
5	21° 58'	20° 33'	105° 20'	106° 00'

La zona de estudio se caracteriza por estar incluida dentro de una zona de transición de masas de agua de la corriente Ecuatorial, masas frías de agua de la corriente de California y aguas más cálidas provenientes de la corriente del golfo de California. La localización de esta zona de transición es variable (Gallegos *et al.*, 1988). Durante el periodo invernal, cuando la corriente de California es más intensa, se localiza más hacia el sur, mientras que en el verano cuando la contracorriente Ecuatorial es más intensa, se mueve hacia el norte (Aguirre-Gómez, 2002). La zona de transición es una banda ancha centrada aproximadamente a 200-300 km lejos de la costa y paralela a ella y coincide con el núcleo de flujo de la corriente de California (Aguirre-Gómez, 2002).

Adicionalmente, en la parte localizada frente a las costas del sur de Sinaloa y la boca del golfo de California, se puede establecer un área triangular formada por Cabo San Lucas, Mazatlán y Cabo Corrientes. Es una zona altamente dinámica debido a la confluencia de las corrientes de California, del Pacífico y la proveniente del golfo de California. La región tiene una estructura termohalina de remolinos, frentes e intrusiones originadas por la concurrencia de estas corrientes (Álvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991).

#### 4. Justificación

Los pelágicos menores son uno de los recursos marinos más importantes y abundantes en todo el mundo. Las poblaciones de estos peces han presentado históricamente gran variabilidad en abundancia, los factores que pueden estar asociados a este fenómeno han sido ampliamente estudiados, pero aún se desconocen algunas causas que determinan la dinámica tanto espacial como temporal de los stocks de estas especies en las pesquerías de México y el mundo.

La pesca de sardina crinuda en el sur del golfo de California ha adquirido gran importancia en la última década, lo que ha generado la necesidad de desarrollar estudios que permitan establecer regulaciones con fines administrativos y de manejo para estas especies. La distribución y abundancia de estos peces en la zona de estudio, están restringidas por el ambiente durante las distintas estaciones del año, por lo que en ciertas temporadas la sardina puede o no estar disponible para la flota que captura en el sur del golfo de California. La influencia de la variabilidad ambiental sobre procesos clave en el ciclo de vida de la sardina crinuda, pueden ser determinantes para entender la dinámica que presenta el recurso año con año y así lograr un aprovechamiento sustentable del recurso.

Es necesario entender las interacciones de la sardina crinuda con el medio ambiente, principalmente por el aumento paulatino y significativo de los volúmenes de captura que han sido desembarcados en los últimos años en el puerto de Mazatlán, Sinaloa.

## 5. Objetivos

### 5.1. General

Determinar la distribución y abundancia del stock de sardina crinuda en el sur del golfo de California y analizar la influencia que la variabilidad ambiental ejerce sobre la población (temperatura superficial del mar, surgencias inducidas por viento así como con los efectos producidos por los fenómenos de El Niño y La Niña).

### 5.2. Específicos

- Analizar la captura por unidad de esfuerzo (CPUE) de la sardina crinuda en el sur del golfo de California por área de pesca.
- Analizar las variaciones temporales de la temperatura superficial del mar por área de pesca.
- Analizar la presencia de los periodos correspondientes a los fenómenos oceanográficos de El Niño y La Niña en la zona de estudio así como su intensidad y duración.
- Identificar las principales zonas y los periodos de surgencia obtenidos por los patrones de viento de 1996 a 2010.
- Obtener y analizar el índice de turbulencia (velocidad del viento al cubo).
- Analizar la relación de la distribución y abundancia de la sardina crinuda con las variables ambientales obtenidas.

## 6. Material y métodos

### 6.1. Distribución y abundancia

Se utilizaron los datos biológico-pesqueros del programa de pelágicos menores del CRIP Mazatlán INAPESCA – SAGARPA correspondientes al periodo 1996-2010. Los registros pesqueros utilizados incluyeron las series históricas de datos diarios de captura (t) y esfuerzo (viajes), agrupando ambas variables en composiciones mensuales.

Los datos se ordenaron por zona de pesca y por barco para estandarizar el esfuerzo pesquero con base en el concepto de *potencia de pesca relativa* (Sparre y Venema, 1997). La potencia de pesca utilizada fue el tonelaje de la embarcación estándar, misma que se determinó como aquél barco con la actividad pesquera más frecuente, su capacidad de bodega o tonelaje fue de 160 t.

Se obtuvo el esfuerzo pesquero como número de viajes por mes de cada barco y posteriormente se obtuvo el cociente de la captura por unidad de esfuerzo (CPUE) como indicador de abundancia (Gulland, 1964), donde el dividendo es la captura (t) y el divisor el esfuerzo pesquero estandarizado (número de viajes). Finalmente se analizaron gráficamente los datos de CPUE para identificar y definir las tendencias que presentó durante el periodo de estudio.

### 6.2. Imágenes satelitales de TSM

Esta información fue facilitada por el Laboratorio de Oceanografía Física del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM.

Se utilizaron 4,500 imágenes aproximadamente del periodo 1996-2010 descargadas del radiómetro montado en el satélite NOAA-14 para los años de 1996 a 2000, para los años de 2001 a 2003 los del radiómetro montado en el satélite NOAA-16, y por último para los años de 2005 a 2010 se utilizaron los datos de los radiómetros montados en los satélites NOAA-17 y NOAA-18.

Las imágenes utilizadas para efecto de este proyecto de tesis presentaron una resolución espacial mínima o píxel de 1.1 km<sup>2</sup>, es decir, las imágenes

proporcionan un valor de TSM cada 1.1 km<sup>2</sup> aproximadamente. Asimismo se utilizaron las imágenes registradas por el satélite en su paso nocturno (0400 GMT horas aproximadamente), para evitar que la radiación solar influya en los valores de temperatura.

### **6.2.1. Procesamiento de imágenes**

Las imágenes diarias se procesan para generar cada una de las composiciones del promedio semanal, considerando cuatro semanas por mes, siendo la primera semana del día primero al día 7, la segunda del 8 al 15, la tercera del 16 al 22, y la cuarta semana del 23 al último día del mes.

Una imagen AVHRR cubre grandes áreas (5400 x 2800 km, para el caso de la antena receptora de la UNAM), por lo que se hace necesario recortar las imágenes en las regiones geográficas de interés, para este caso la correspondiente al sur del golfo de California. Esto se hace creando un “master”, el cual genera un mapa con sus coordenadas geográficas en una proyección cartográfica definida por el usuario. En este caso se ingresarán las coordenadas correspondientes a la malla de pesca utilizada por la flota sardinera de Mazatlán para obtener matrices de datos de TSM de esta zona.

Cuando se utilizan sistemas expertos para el procesamiento de imágenes, éstos generan sus propios formatos para el despliegue de datos, y el sistema TeraScan no es la excepción. Cuando se procesa una imagen, lo que se hace es trabajar sobre una matriz de valores que se despliega de modo gráfico, al asignar valores a cada valor de la matriz, para obtener lo que se denomina una imagen en falso color. Una vez obtenidas las imágenes se exportaron los datos de la matriz en formato ASCII, formato reconocido por el programa Excel versión 2007 (Márquez-García, 2003).

Las imágenes de satélite en falso color, van acompañadas siempre de una escala de colores que representan a las temperaturas, de forma tal que las más cálidas corresponden al color rojo, seguido del naranja, del verde y así sucesivamente hasta llegar al color azul que representa las temperaturas bajas.



Una vez que se obtuvieron las matrices de datos de cada área de pesca se realizó el método estadístico conocido como *Medias móviles* (Zar, 1995). Este es un método utilizado para analizar un conjunto de datos en modo de puntos para crear series de promedios. Así las medias móviles son una lista de números en la cual cada uno es el promedio de un subconjunto de los datos originales (Zar, 1995). Este proceso se realiza en el análisis de series de datos ambientales con el fin de minimizar el efecto de datos extremos, producto de errores en algunos pixeles de las imágenes que pudieran estar arrojando datos incorrectos.

Una vez calculadas las medias móviles en cada matriz mensual, se calcularon las anomalías respecto al promedio mensual de la TSM de 1996-2008. Para este fin se promedió cada mes por separado del total del periodo de estudio, es decir, se promediaron todos los enero, febrero, etc. y así sucesivamente para los 12 meses, para obtener cada “mes típico”. Posteriormente se resta cada mes a su mes típico respectivo para observar qué tanto varió la temperatura en cada mes respecto a la media del periodo de estudio.

Este proceso se realizó para las cinco zonas de pesca y el número de datos que se generaron con su respectiva posición geográfica (latitud y longitud) en las matrices mensuales se enlista en la Tabla II.

Tabla II. Número de datos que se generaron en cada matriz mensual de TSM.

Zona	Número de datos de TSM
1	5641
2	4772
3	5153
4	6231
5	5634

### 6.3. Patrones de viento, determinación de zonas y periodos de surgencia

Los periodos y zonas de surgencia fueron obtenidos a partir de datos de viento (dirección y velocidad) proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en observatorios ubicados en Mazatlán y Bahía de Topolobampo, Sin., y la Bahía de San Blas, Nayarit, durante el periodo 1996-2010.

Se dividió la zona de estudio en tres partes: la zona Norte (Bahía de Topolobampo), Centro (Mazatlán) y Sur (Bahía de San Blas). El índice de surgencia (IS) de Bakun (1973) es utilizado como un indicador de estos fenómenos a gran escala, un valor del IS es representativo de la masa de agua transportada en promedio sobre aproximadamente 200 millas náuticas. La zona de estudio se regionalizó de esta manera con el fin de tener el índice de surgencia de tres zonas para analizarlo por separado, considerando las características altamente dinámicas de la zona de transición.

Con estos datos se aplicó el índice de Bakun (1973) para determinar dichas zonas y periodos de afloramientos el cual consiste en calcular el transporte neto de Ekman, como un indicador de la cantidad de agua que desplazándose verticalmente desde el fondo, reemplaza el agua superficial transportada mar afuera por la acción del viento. Este índice es definido como la velocidad del viento dividido entre el parámetro de Coriolis como una función de la rotación de la Tierra y la latitud (Bograd, 2010).

Se obtuvo el promedio del índice de surgencia de cada mes del periodo de estudio con el fin de obtener su comportamiento típico con respecto a los datos observados durante este tiempo.

Los cálculos del esfuerzo del viento sobre la superficie del mar fueron estimados utilizando la expresión (Bakun, 1973; Lluch-Cota, 1999):

$$\bar{\tau} = \rho_a Cd |\bar{v}| \bar{v}$$

Donde  $\tau$  es el vector de la fuerza del viento,  $\rho_a$  es la densidad el aire (considerada constante en  $1.22 \text{ kg/m}^3$ ),  $Cd$  es un coeficiente empírico de arrastre (considerado constante 0.0013),  $v$  es la velocidad escalar del viento y  $|v|$  es el vector de la velocidad del viento.

Los vectores mensuales promedio fueron calculados de los valores diarios de la fuerza del viento y el transporte neto fue estimado de la capa superficial de algunas decenas de metros, basado en la metodología simplificada conocida como transporte de Ekman:

$$M = (1/f)\tau * \kappa$$

Donde  $k$  es un vector dirigido verticalmente hacia arriba que denota el esfuerzo del viento,  $f$  es el parámetro de Coriolis (calculado respecto a la latitud de cada sitio). Ya que el volumen de agua transportado costa afuera perpendicular a la costa ( $Mx$ , donde  $x$  es normal a la línea de costa) es proporcional al volumen de agua aflorada, se realiza una reversión de signo en los valores obtenidos de  $Mx$ . Este índice es expresado en unidades de metros cúbicos por segundo por cada 100 metros de línea de costa (Bakun, 1973).

Se realizó el conteo de las direcciones del viento reportadas para cada mes por el SMN durante 1996-2010 para identificar las direcciones más frecuentes que presentó el viento en la zona.

Por último se obtuvo el índice de turbulencia (velocidad del viento al cubo) para determinar la estabilidad de la columna de agua y relacionarlo con las variables pesqueras. Se obtuvo el promedio del índice de turbulencia de los meses comprendidos dentro del periodo de estudio para analizar su comportamiento por zona a lo largo del año (Peterman y Bradford, 1987; Nevárez-Martínez *et al.*, 2008).

## 7. Relación de la CPUE y la variabilidad ambiental

### 7.1. Análisis exploratorio de datos mediante la implementación del algoritmo ACE y construcción del modelo predictivo de captura y CPUE de sardina crinuda

Para encontrar las transformaciones óptimas las variables se relacionaron mediante un modelo aditivo generalizado (Hastie y Tibshirani, 1990), similar al modelo lineal generalizado, excepto en que la variable de respuesta (CPUE o captura) puede modelarse como una función no lineal de las variables dependientes (esfuerzo y variables ambientales). Este método ha sido de gran ayuda para explorar las relaciones entre cambios ambientales y las respuestas de las poblaciones explotadas en las pesquerías (Cury *et al.*, 1995). Se utilizó el algoritmo conocido como ACE (Alternating Conditional Expectation, por sus siglas en inglés) (Breiman y Friedman, 1985) para estimar las transformaciones óptimas de la variable dependiente (a predecir) y las variables independientes (predictoras), las cuales extienden el análisis de regresión lineal múltiple a modelos aditivos generalizados (Hastie y Tibshirani, 1990; Cury *et al.*, 1995; Nevárez-Martínez *et al.*, 2008). El modelo es aditivo en las transformaciones de los datos transformados empíricamente (Cury *et al.*, 1995).

La forma usual del modelo de regresión lineal múltiple para predecir una variable dependiente  $Y$  a partir de  $p$  variables independientes  $X_i$ ,  $i=1, \dots, p$  y  $n$  observaciones,  $j=1, \dots, n$ , está dada por:

$$Y(j) = \sum_{i=1}^p b_i * X_i(j) + e(j)$$

Donde las  $e(j)$  son independientes. En el modelo aditivo generalizado o modelo de regresión lineal múltiple no lineal la variable  $Y$  y los predictores  $X_1, \dots, X_p$  son reemplazados por funciones  $T_1(Y)$  y  $T_2(X_1), \dots, T_{p-1}(X_p)$ :

$$S[Y(j)] = \sum b * T[X(j)] + w(j)$$

En esta ecuación las funciones no lineales  $S(Y)$  y  $T_i(X)$  se desconocen y deben ser estimados de manera no paramétrica a partir de los datos. Las  $w(j)$  son variables aleatorias (Cury *et al.*, 1995).

Utilizando ACE, el cual es un algoritmo iterativo, se estimó la última ecuación. En cada iteración, dado los estimados actuales de  $S()$  y  $T()$ , para  $i$  diferente de  $k$ , los residuos parciales fueron calculados y la transformación de  $T_k()$  es calculada como la expectación condicional de los residuos parciales dado  $X_k$ .

$$S[Y(j)] - \sum_{i \neq k}^p b_i * T_i[X_i(j)]$$

La estimación se realiza a partir de los datos usando un suavizador (Breiman y Friedman, 1985). El algoritmo converge a soluciones óptimas para un criterio dado. En este caso, en ACE el criterio es la correlación máxima entre la variable dependiente transformada y las variables predictoras o independientes también transformadas (Cury *et al.*, 1995).

Es importante señalar que esta herramienta se implementó con datos trimestrales, en los cuales los datos ambientales se presentaron con un trimestre de retraso ya que durante el análisis exploratorio, se graficó la CPUE contra cada una de las variables ambientales con retraso de 1, 3, 6 y 12 meses; el análisis visual de los diagramas de dispersión con los datos retrasados 3 y 12 meses permitió identificar tendencias de las variables relacionadas. Aunado al análisis gráfico se utilizaron los datos retrasados en función del papel que juega la variabilidad ambiental sobre cuestiones de reclutamiento, que eventualmente se traducirá en alta o baja abundancia del recurso.

Se utilizó el programa *R* versión 2.14.0 con la librería llamada *acepack* para implementar la metodología ACE, los gráficos resultantes de esta herramienta también se obtuvieron con el mismo programa.

Una vez definidas las transformaciones de cada conjunto de datos, se probaron modelos de regresión múltiple no lineal con las variables originales (no

transformadas) con el fin de encontrar un modelo predictivo para la captura y la CPUE de la sardina crinuda. Tal como propone Nevárez-Martínez *et al.* (2008), se probaron diferentes modelos que incluyeron el esfuerzo pesquero y una o más variables ambientales. De esta manera tenemos que:

$$IP = f(E, x_1, \dots, x_m)$$

donde  $IP$  es el índice de productividad (CPUE o captura),  $E$  es el esfuerzo pesquero y las  $x$  son factores ambientales.

Una vez contruidos, los modelos se ajustaron a los datos observados con el  $-\ln$  de la máxima verosimilitud.

## 7.2. Criterio de Información de Akaike

Posteriormente se utilizó el Criterio de Información de Akaike (AIC por sus siglas en inglés) para seleccionar el mejor modelo. Dado un conjunto de modelos candidatos para explicar la variabilidad de los datos, el modelo seleccionado será aquél con el mínimo valor de AIC. Por lo tanto esta técnica no solo recompensa un mejor ajuste, sino también incluye una penalización que se incrementa en función del número de parámetros estimados (Haddon, 2001).

Dicho criterio se calcula como sigue:

$$AIC = nLn(\sigma^2) + 2K$$

donde  $n$  es el número de observaciones,  $K$  es el número de parámetros y  $\sigma^2$  es la suma de los residuales elevada al cuadrado y dividida entre  $n$  ( $\Sigma \varepsilon^2 / n$ ).

### 7.3. Intervalos de confianza

Los intervalos de confianza para cada uno de los modelos se calcularon por el método de *bootstrapping* introducido por Efron (1979). El *bootstrapping* es un método no paramétrico de remuestreo que permite hacer inferencias acerca de las características de una población. Se considera un parámetro de la distribución de probabilidad de una población,  $\gamma$ , estimada por medio de un estimador,  $\Gamma$ , utilizando una muestra tomada de esa población. Se puede decir que la distribución de la muestra de  $\Gamma$ , como la frecuencia relativa de todos los posibles valores de  $\Gamma$  calculados de un número infinito de muestras aleatorias de tamaño  $n$  tomadas de la población. Es muy importante la apreciación de los factores que pueden influir en la forma de la distribución de la muestras  $\Gamma$  por que ésta es nuestra estimación de la distribución de la muestra que nos permitirá hacer inferencias en  $\gamma$  desde  $\Gamma$ .

En este caso se utilizaron las estimaciones de la distribución de la muestra para desarrollar los intervalos en los cuáles el valor observado de  $\gamma$  pudiera estar incluido con un alto nivel de confianza (95%). Se generaron 2000 remuestreos para cada modelo mediante un *Macro* implementado en el programa Excel versión 2007.

Frecuentemente la estimación de los parámetros de interés por el método de *bootstrap* difiere de alguna manera de los parámetros estimados de los datos observados, lo que puede ser evidencia de la presencia de cierto sesgo (Haddon, 2001). Se corrigieron los intervalos de confianza calculados para los modelos ajustados con el fin de mejorar su validez (Haddon, 2001), utilizando el programa Excel versión 2007, tomando en cuenta la presencia del sesgo.

Luego de generar la muestra estimada por *bootstrap*, se debe determinar  $F$ , que significa la fracción de la replicaciones de *bootstrap* que son más pequeños que el parámetro original estimado. De esta fracción una constante ( $z_0$ ) es calculada para ser la transformación *probit* de  $F$  (Haddon, 2001).

$$z_0 = \phi^{-1}(F)$$

Donde  $\phi^{-1}$  es la inversa de la distribución normal estándar acumulada. De esta ecuación, los percentiles apropiados para los intervalos con el 95% de confianza fueron calculados de la siguiente manera:

$$P_{lower} = \phi(2z_0 - 1.96)$$

$$P_{upper} = \phi(2z_0 + 1.96)$$

donde  $\phi$  es la función de distribución normal acumulada. El valor de 1.96 es el valor crítico del inverso de la curva normal para intervalos de confianza al 95% (Haddon, 2001).



## 8. Resultados

### 8.1. Captura por unidad de esfuerzo (CPUE)

Durante el periodo de estudio (1997-2010) ha sido evidente el aumento de la CPUE (t/viaje) de la sardina crinuda en el sur del golfo de California. La línea punteada representa la tendencia general que presentó la CPUE registrada mensualmente durante el periodo de estudio, en la cual se ve claramente un patrón de aumento año tras año (Figura 7). También se observa la variabilidad en abundancia del recurso, tanto para valores por encima de la media, como por debajo de ella, lo que indica la gran variabilidad que presenta el recurso dentro de cada temporada. En 2009 se registró la máxima abundancia de sardina crinuda del periodo, desembarcando casi 160 t/viaje. Durante el 2010 se registraron valores de CPUE por debajo de la media por lo que este año no siguió la misma tendencia que los anteriores, es decir, a partir de 2003 se venían superando las CPUE del año posterior, pero en 2010 no sucedió lo mismo con respecto al 2009. De cualquier manera, los últimos ocho años del periodo han sido los más importantes de la pesquería de sardina crinuda en la región.

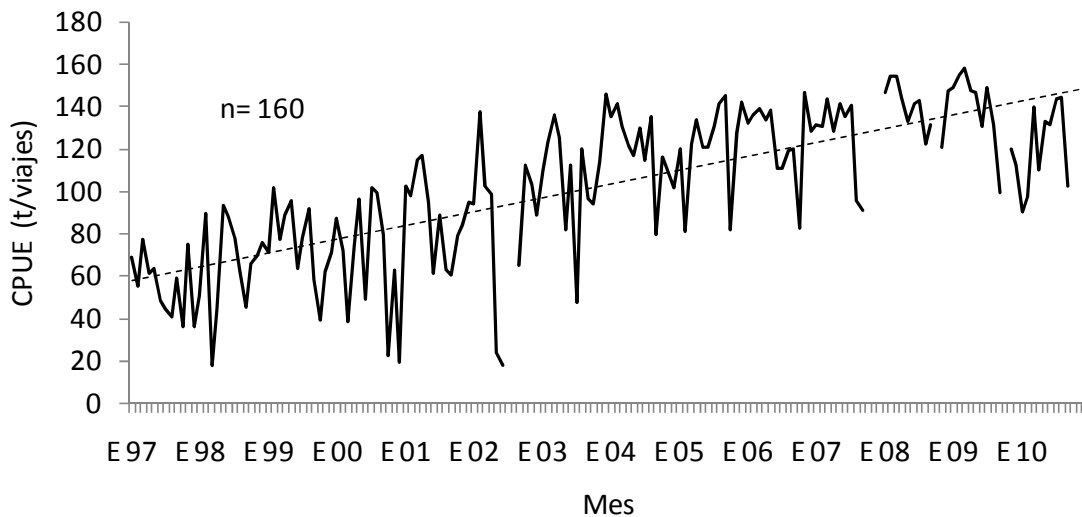


Figura 7. CPUE mensual de la sardina crinuda (línea continua) en el sur del golfo de California durante 1997-2010. La línea punteada representa la tendencia que presentó la CPUE durante el periodo de estudio.

La tendencia mencionada en el párrafo anterior se observa más claramente en la Figura 8 de CPUE total anual y aunque los datos parecen ajustarse a una línea recta vale la pena hacer hincapié en la variabilidad intra anual que presenta la pesquería. Durante los primeros cinco años del periodo de estudio la CPUE fue menor a 100 t/viaje, el aumento significativo se nota a partir de 2003 y aunque en 2009 y 2010 se observa una caída, la tendencia se mantuvo durante la última década. La máxima abundancia registrada durante el periodo fue en 2008 (144.5 t/viaje) casi tres veces más que la registrada en 1997 (58 t/viaje). Desde el año 2003 la CPUE registrada se mantuvo por encima de la media hasta el año 2006.

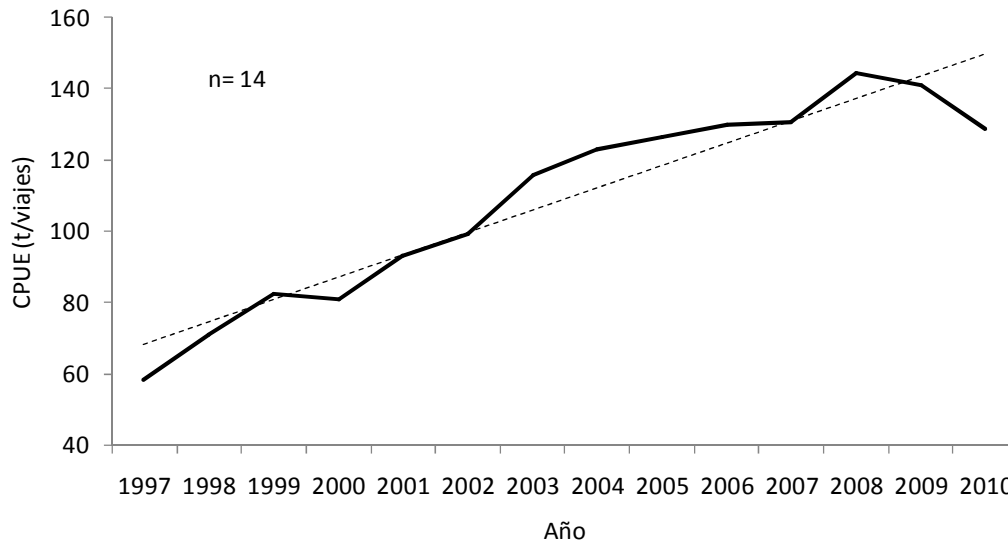


Figura 8. CPUE anual (línea continua) de sardina crinuda durante 1997-2010. La línea punteada representa la tendencia general de la CPUE durante el periodo de estudio.

La CPUE de sardina crinuda presenta amplia variabilidad no solo año tras año como se ha revisado previamente, sino también dentro de cada uno de los años analizados. Como se observa en la Figura 9, las cajas representan  $\pm 1$  desviaciones estándar (DE) y a pesar de que los últimos años han sido los más importantes en cuanto a volúmenes de recurso desembarcado se refiere, también han sido los menos variables, pues se ha registrado una abundancia similar en los meses que comprenden cada temporada de pesca de este periodo. Nuevamente se destaca el 2008, ya que la abundancia registrada en cada uno de los meses de este año fue muy alta (mín. 120.9 t/viaje – máx. 154.5 t/viaje) y su DE baja (12).

Podemos también mencionar al año 2002 el cual presentó la mayor DE (45) y la mayor variabilidad de la CPUE (mín. 20 t/viaje – máx. 140 t/viaje).

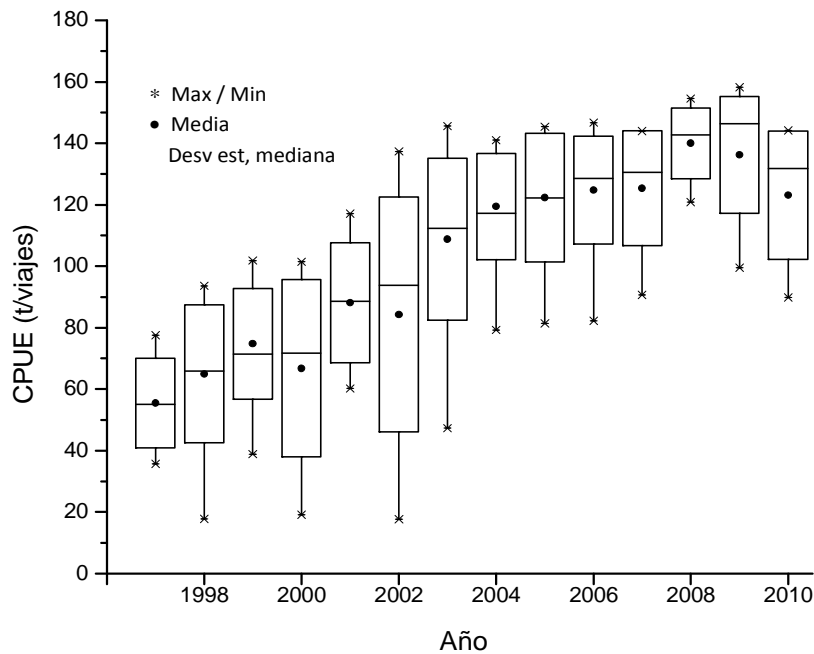


Figura 9. Diagrama de cajas que muestra la variabilidad intra anual de la CPUE de sardina crinuda durante 1997-2010. Las cajas representan  $\pm 1$  desviaciones estándar y la línea horizontal dentro de cada caja representa la mediana.

En la Figura 10 se puede observar la distribución mensual de la CPUE (t/viaje) del recurso a lo largo de un año de pesca típico (resultado del promedio mensual durante 1997-2010). Generalmente las temporadas de pesca inician en octubre y la mayoría de la captura anual se logra durante los meses desde diciembre hasta abril; en marzo se registra la máxima abundancia del año (140 t/viaje). Durante el fin de la temporada, en los últimos cuatro meses la abundancia cae paulatinamente hasta septiembre que es el último mes de la temporada. La CPUE presentó otros dos picos de alta abundancia en diciembre y mayo; aunque no son tan elevados como el de marzo, generalmente de diciembre a agosto se presenta alta abundancia (en promedio 110 t/viaje).

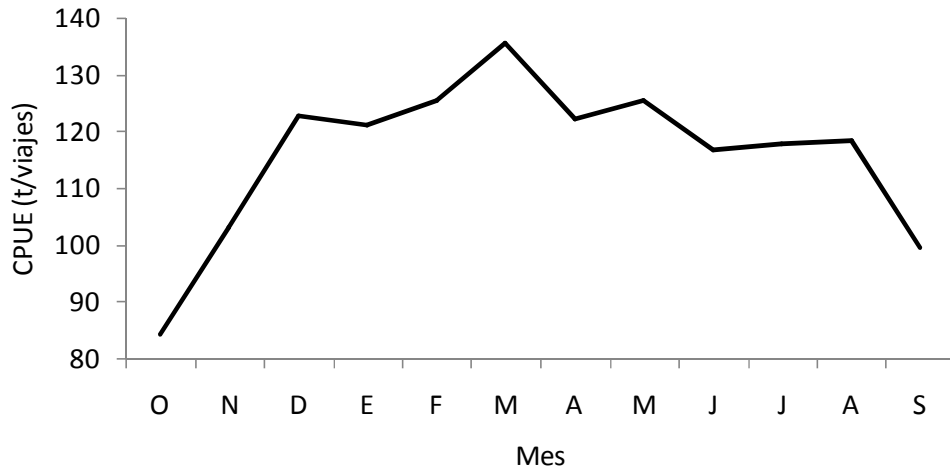


Figura 10. Comportamiento intra anual típico de la CPUE de la sardina crinuda calculado del promedio mensual durante 1997-2010.

Una vez separados los datos por zona de pesca se analizaron para observar su comportamiento por separado (Figura 11). En la Figura 11 se observa la gran variabilidad que presentaron los datos en cada una de las zonas. En general las cinco zonas presentan medias similares, pero cabe destacar que las diferencias radican en la variabilidad observada en cada una de ellas. La zona I, donde la abundancia osciló entre 30 y 170 t/viaje fue en la cual se presentó la mayor DE (45), se observa un patrón de menor variabilidad en sentido Norte-Sur, es decir, la DE parece disminuir conforme la zona de pesca se ubica más al Sur. Por ejemplo en la zona IV la abundancia osciló entre 60 y 140 t/viaje (DE= 25). En la zona V se registró la máxima CPUE (170 t/viaje) que en las otras zonas.

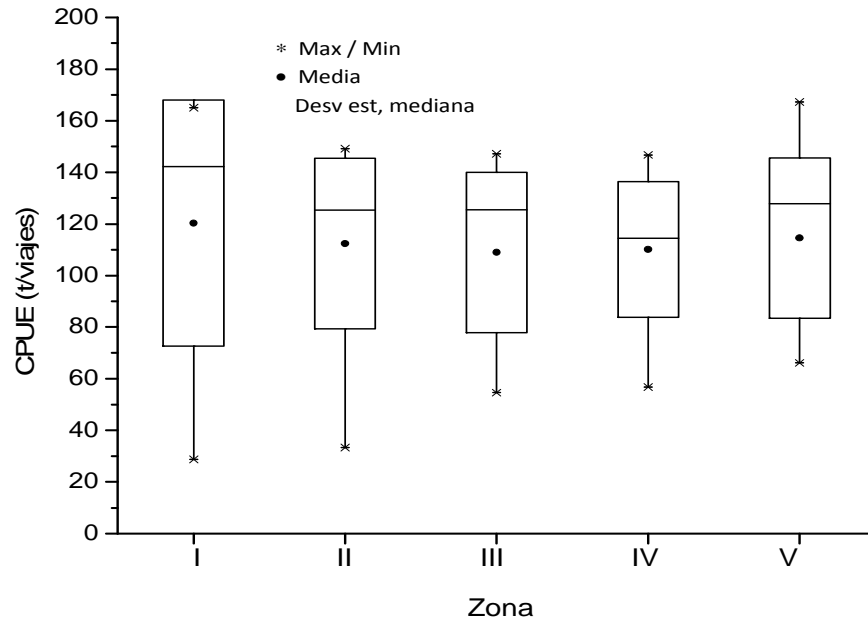


Figura 11. Diagrama de cajas que muestra la variabilidad de la CPUE de sardina crinuda por zona de pesca durante 1997-2010. Las cajas representan  $\pm 1$  desviaciones estándar y la línea horizontal dentro de cada caja representa la mediana.

Se han presentado diferencias entre el comportamiento histórico de la CPUE en cada una de las zonas de pesca (Figura 12). En la zona I parece no tener un patrón definido, probablemente esto se debe a los pocos datos con los que se contaron pertenecientes a esta zona; en esta misma área de pesca se registró la mayor abundancia en 2007. En la zona II se observa el incremento paulatino de la abundancia a partir de 1998 y la máxima CPUE registrada en esta zona fue de 150 t/viaje en el año de 2001; a partir de 2003 la abundancia ha fluctuado entre 120 t/viaje y 150 t/viaje. La zona III y IV presentaron un comportamiento similar, manteniendo una tendencia de aumento desde el inicio del periodo de estudio y alcanzando sus mayores valores en los últimos años. Por último la zona V presentó un periodo de alta abundancia de 1997 al 2000, a partir de 2001 se va incrementando la abundancia del recurso en la zona, hasta el 2008 donde se presentó el máximo (160 t/viaje), las últimas dos temporadas mostraron un decremento de la CPUE, cayendo hasta 80 t/viaje.

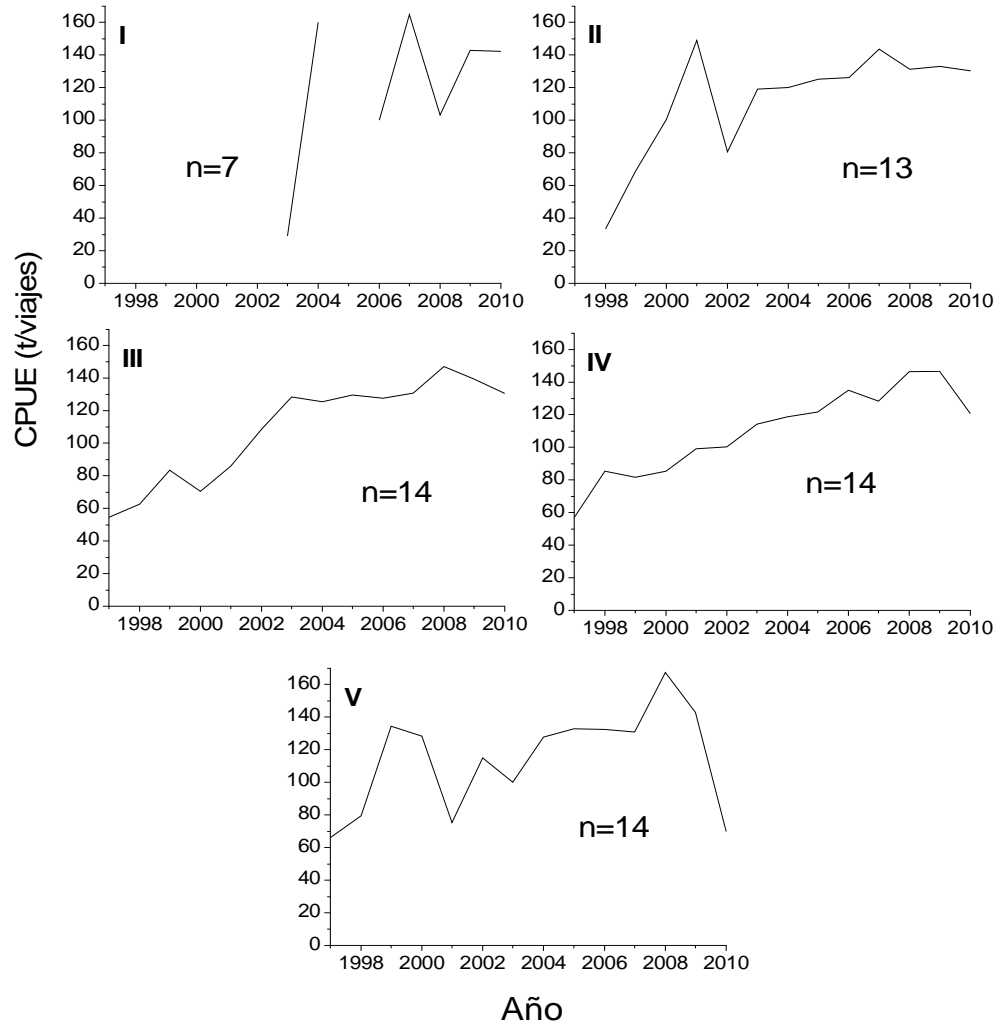


Figura 12. Comportamiento anual de la CPUE de sardina crinuda por zona de pesca.

El comportamiento típico de la CPUE en cada zona (Figura 13) al igual que en el caso anterior es diferente entre cada una de ellas. En la zona I durante el mes de diciembre se registró una abundancia importante (150 t/viaje), en enero cayó hasta 45 t/viaje y se recuperó nuevamente a partir de febrero; desde junio y hasta el final de la temporada también se registra alta abundancia. En cuanto a la zona II se observa que la abundancia osciló durante toda la temporada entre 100 y 150 t/viaje, alcanzando el mínimo-máximo en abril- julio respectivamente, lo que indica alta abundancia en la zona durante toda la temporada de pesca (> 110 t/viaje). En la zona III la mínima abundancia se registra al inicio de la temporada (70 t/viaje) y se alcanza el máximo en marzo, posteriormente comienza a disminuir la CPUE.

Se observa una recuperación en la abundancia en mayo y agosto. La zona IV tiene un comportamiento similar a un domo, en el cual la abundancia fue en aumento desde el inicio de la temporada de pesca hasta alcanzar el máximo anual en marzo y a partir de aquí disminuyó gradualmente hasta el fin de la temporada. Por último la zona V presentó la mayor abundancia durante los meses de febrero y marzo (155 y 160 t/viaje respectivamente) y el mínimo se registró en enero (80 t/viaje).

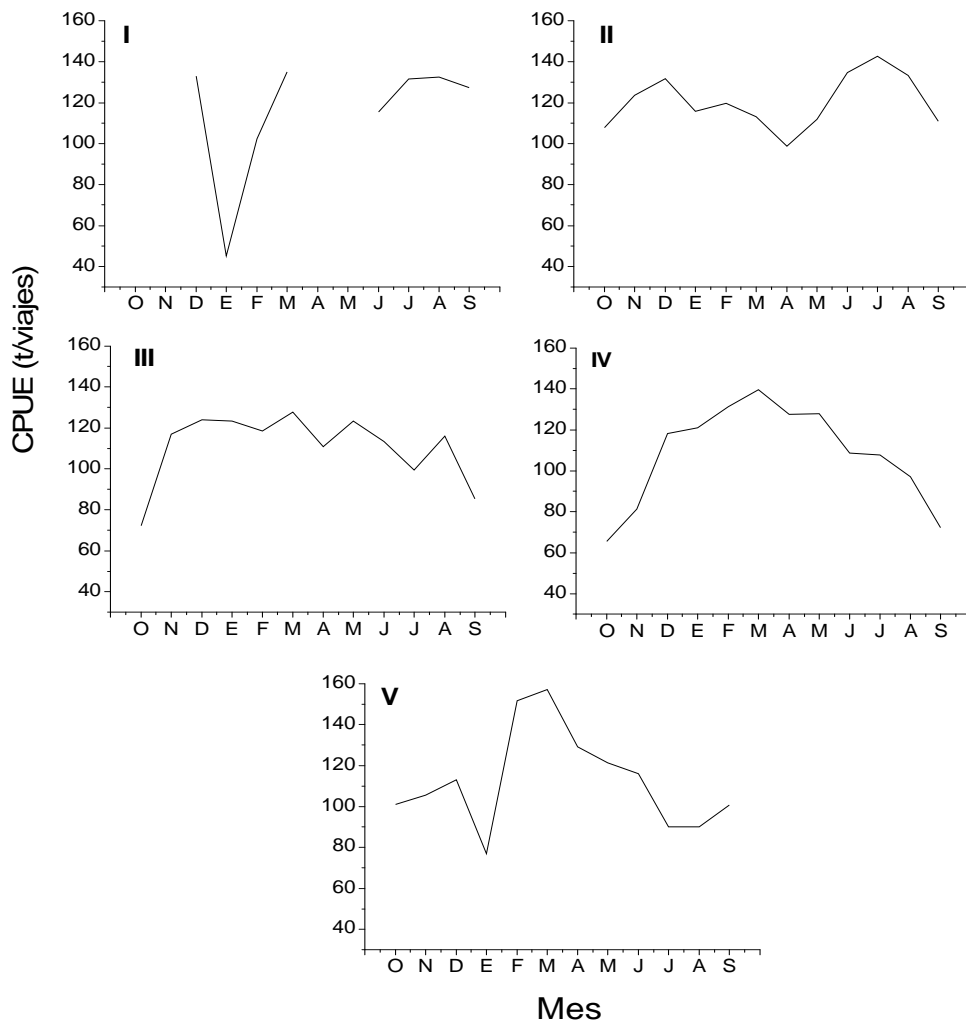


Figura 13. Comportamiento típico de la CPUE de sardina crinuda por zona de pesca calculado con el promedio mensual durante 1997-2010.

Como se ha revisado anteriormente la mayor abundancia se reportó para las zonas pesqueras III y IV (Figura 14), aportando el 31 y 42% respectivamente de la captura total de 1997 a 2010. En tercer lugar tenemos a la zona II en cuanto a volúmenes desembarcados con el 18%, posteriormente la zona V con un 7% y por último tenemos a la zona 1 de donde se obtuvieron las menores capturas con tan solo el 2%.

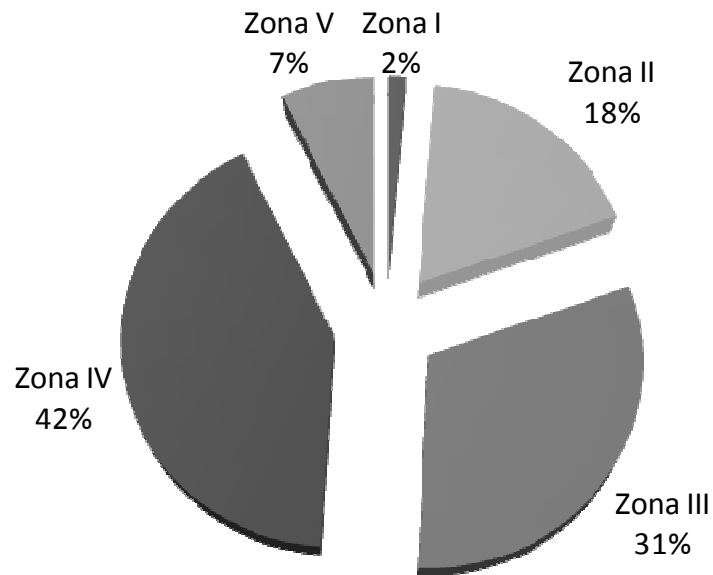


Figura 14. Aporte por zona de pesca al total de captura de sardina crinuda para el periodo 1997-2010.



## 8.2. Temperatura superficial del mar (TSM)

La temperatura superficial del mar promedio para el periodo de estudio presenta un máximo durante el año en el mes de agosto (29.5 °C) (Figura 15). Las mínimas temperaturas se registran de enero a marzo (< 22°C). En abril-mayo la temperatura pasa de ser fría a ser cálida (>22, <26°C) y en noviembre-diciembre de ser cálida a fría (<23°C) (meses de transición). Podemos definir los meses desde noviembre hasta abril como la mitad fría y de mayo a octubre como la mitad cálida del año.

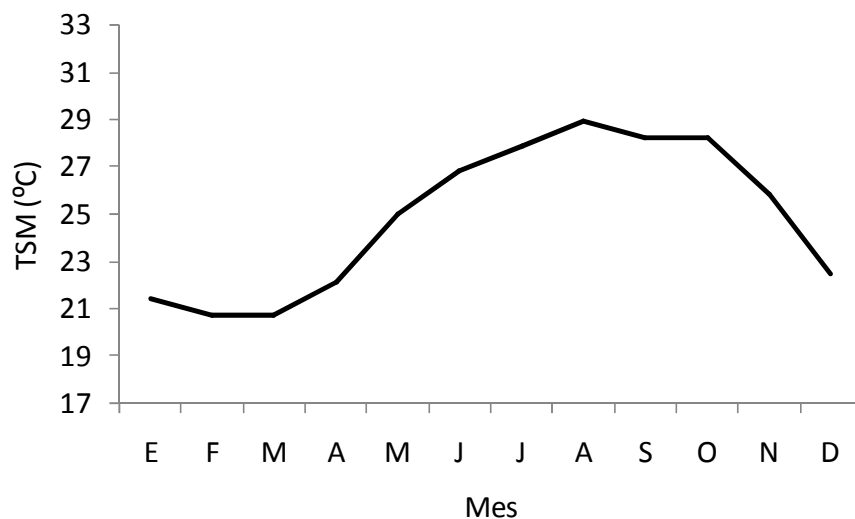


Figura 15. Comportamiento típico de la TSM en la zona de estudio, resultado de los promedios mensuales calculados durante 1996-2010.

Como se observa en la Figura 16, el intervalo de la TSM es mayor en la zona I (18.4 a 29.9 °C), el ancho del intervalo va disminuyendo a lo largo de un gradiente latitudinal Norte-Sur, registrándose el intervalo más estrecho en la zona V (23 a 28.2 °C). El intervalo de TSM en las zonas extremas norte y sur presentó cambios importantes de más de 4 °C, sin embargo la fluctuación entre las medias es menor a 1.5 °C, el valor de la media va de 24.6 °C en la zona I hasta 26 °C en la zona V. Se puede observar que los cambios de temperatura de una zona respecto a la zona más próxima son poco significativos, pero con respecto a las áreas más alejadas entre sí, son de mayor magnitud.

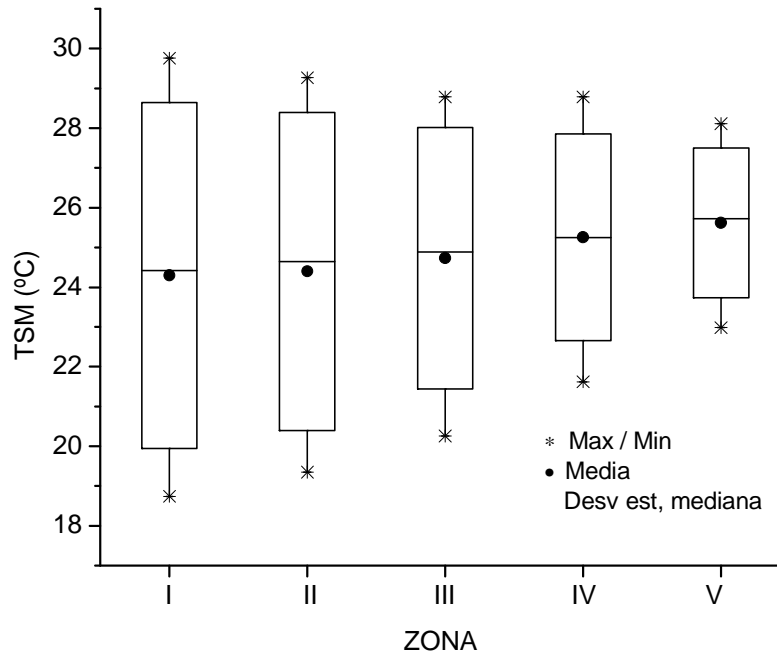


Figura 16. Diagrama de cajas que muestra la variabilidad de la TSM en la zona de estudio durante 1997-2010. Las cajas representan  $\pm 1$  desviaciones estándar y la línea horizontal dentro de cada caja representa la mediana.

Durante el invierno la TSM promedio es aproximadamente 4 °C más fría en la zona I (19 °C) que en la zona V (23 °C). Durante el verano es la zona I la que presenta el valor más alto (29.5 °C) y la zona V es aproximadamente 2 °C más fría (27 °C) (Figura 17). Durante el verano la TSM tiende a disminuir 0.3 °C en el gradiente Norte-Sur de una zona a otra y durante el invierno la tendencia es a incrementarse en una tasa de 0.9 °C en la misma dirección (Figura 18).

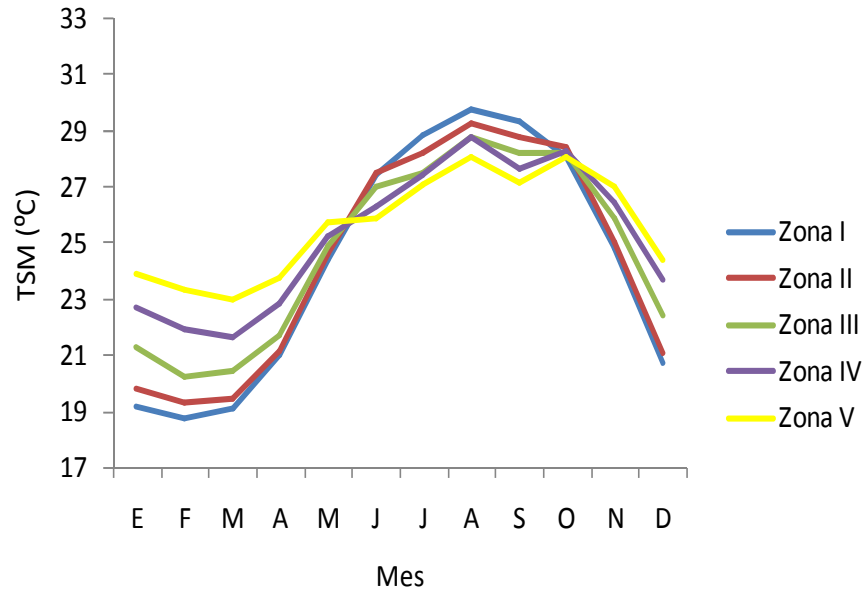


Figura 17. TSM mensual típica por zona de pesca. Los promedios mensuales fueron calculados respecto a los datos del periodo 1996-2010.

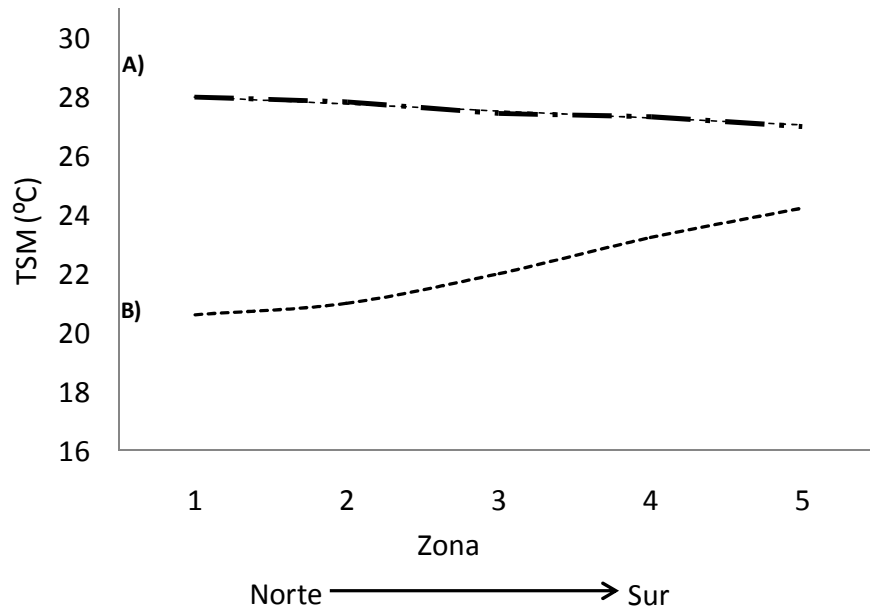
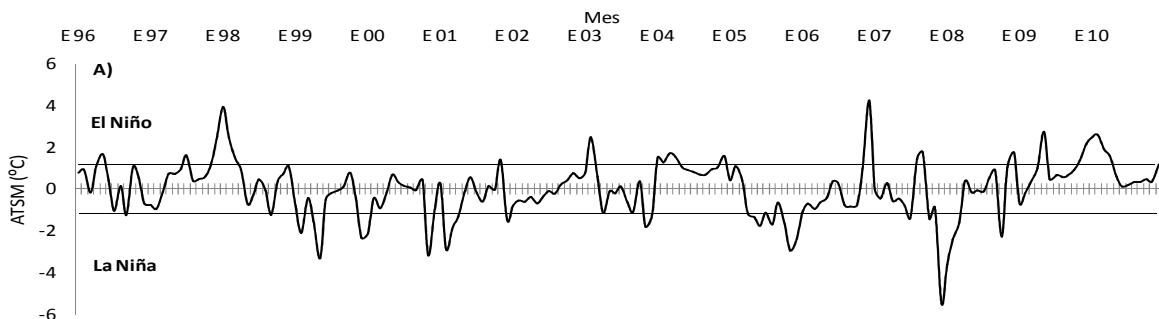


Figura 18. Tendencia de la TSM en la zona de estudio durante A) Verano y B) Invierno.

### 8.2.1. Anomalías de TSM

Analizando las anomalías de la TSM por zona de pesca (Figura 19) podemos observar la presencia de fenómenos cálidos (El Niño) y fríos (La Niña) a lo largo del área de estudio. Se puede observar en la Figura 19 (A), la zona I también recibe el efecto de estos eventos climáticos con intensidades considerables. Revisando las anomalías históricas de la zona IV y V (Figura 19 D y E respectivamente) se observan los impactos de estos fenómenos en menor intensidad que en las zonas I, II y III (Figura 19 A, B, y C respectivamente). En otras palabras, los fenómenos climáticos que se presentaron en el área de estudio fueron menos intensos en las zonas del sur ubicadas frente a las costas de Nayarit y Jalisco. La intensidad y duración de los fenómenos tanto cálidos como fríos fue aumentando gradualmente de sur a norte, presentándose las mayores anomalías en las zonas ubicadas frente a los litorales de Sinaloa (casi 4°C por encima de la media). Durante El Niño 1997-98 las anomalías de TSM registradas en la zona I fueron de más de 4°C por encima de la media, mientras que en la zona V fueron de 2°C en promedio. Durante La Niña 2007-08 las anomalías de TSM para la zona I fueron de más de 5°C por debajo de la media, mientras que en la zona V la anomalía promedio estuvo alrededor de 2°C.



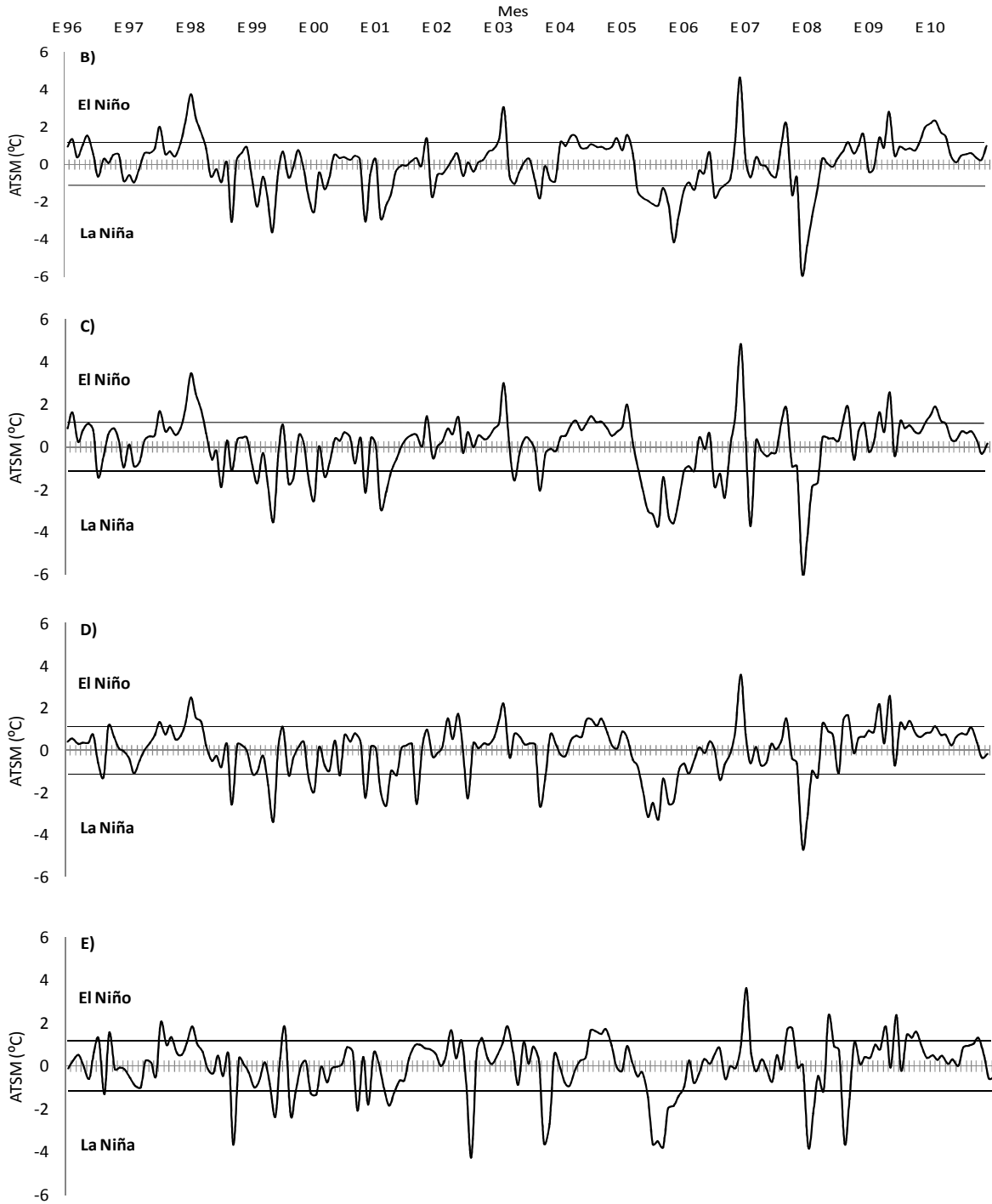


Figura 19. Anomalías históricas de TSM calculadas con respecto al promedio mensual típico de 1996-2010 por zona: A) Zona I; B) Zona II; C) Zona III; D) Zona IV y E) Zona V.

Se analizó el fenómeno conocido como El Niño, que se presentó a mediados de 1997 y se mantuvo durante el primer semestre de 1998. Dicho evento se caracterizó por ser uno de los más intensos del siglo pasado (Figura 20). En la zona V se registraron anomalías positivas de alrededor de 1.5 °C que paulatinamente fueron aumentando de sur a norte hasta la zona I, en la cual la temperatura estuvo más de 4°C por encima de la media. El evento de El Niño 1997-98 fue un fenómeno especialmente cálido que impactó de manera importante las aguas del Pacífico mexicano y del golfo de California, ya que además de intenso tuvo una duración de más de seis meses.

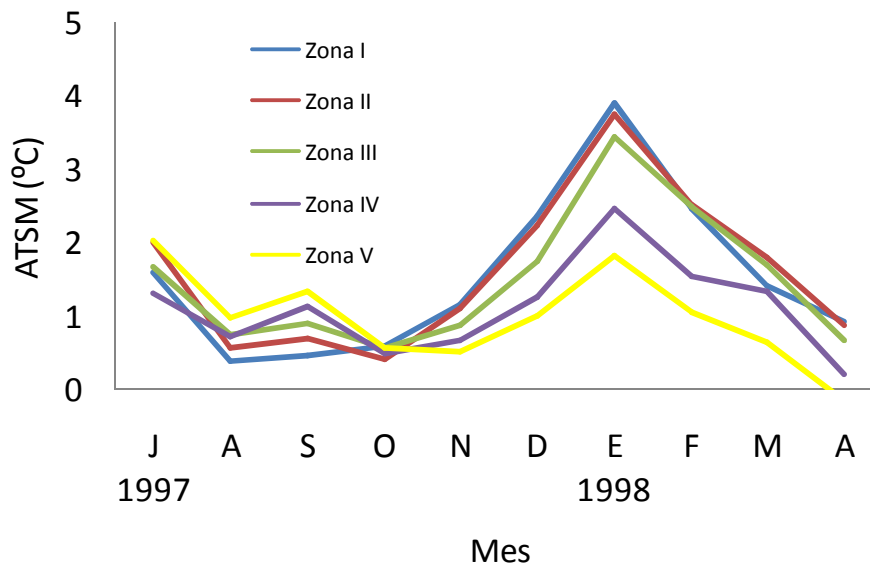


Figura 20. Anomalías de TSM durante El Niño 1997-98 (julio 1997-abril 1998) en las áreas que comprenden la zona de estudio. Las anomalías se calcularon respecto al promedio mensual 1996-2010.

En la Figura 21 se aprecia la variabilidad de las anomalías promedio anuales de TSM que se han presentado en la zona de estudio durante 1996-2010. Es evidente que la zona IV y V han presentado un comportamiento general con características cálidas. Las zonas I y II por el contrario presentaron características frías. Se observa que de manera general las zonas del norte (I y II) han presentado tendencias hacia temperaturas más frías durante el periodo de estudio con respecto a las zonas del sur (IV y V) que presentaron características

principalmente cálidas. Las anomalías de TSM correspondientes a la zona central (III) fue la que se mantuvo con valores más cercanos a cero, y con respecto al resto del área de estudio, fue la que presentó las condiciones de TSM más estables durante el periodo analizado.

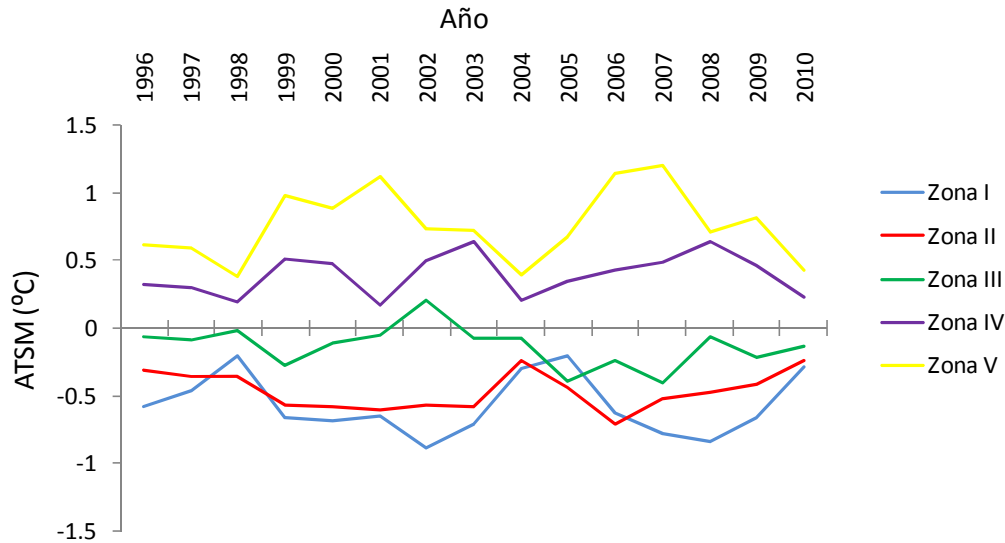


Figura 21. Anomalia promedio anual de temperatura superficial del mar por zona durante 1996-2010.

En la Figura 22 se aprecia la climatología de la temperatura superficial del mar en las áreas que componen la zona de estudio. Es evidente la ausencia de temperaturas frías (<21°C) en las áreas de pesca del sur (frente a las costas de Nayarit y Jalisco). En estas zonas son muy frecuentes las temperaturas entre 22°C y 25°C. Las áreas del norte que se encuentran frente a las costas de Sinaloa (I y II) presentaron cierta estacionalidad, en las cuales se separan las temperaturas propias de verano (27-30°C) e invierno (18-20°C) y están representadas en la Figura 22 con colores naranjas y azules respectivamente. En estas áreas las temperaturas entre 22°C y 24°C (color verde) representan lo que se conoce como meses de “transición”, en los cuales cambian las condiciones de cálidas a frías y viceversa. La zona III se caracterizó por presentar condiciones de temperatura intermedias con respecto a las áreas del norte y sur.

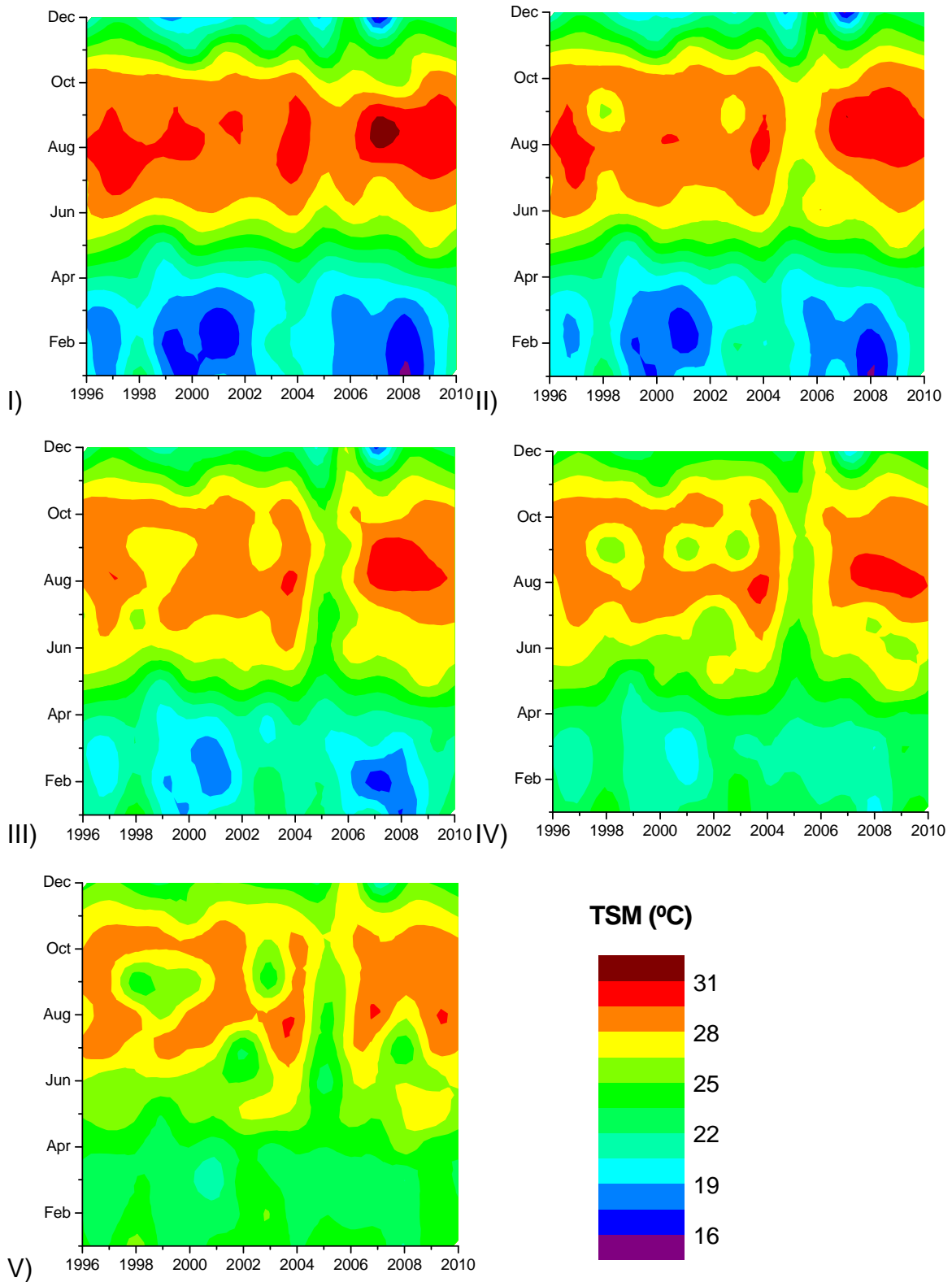


Figura 22. Representación esquemática del comportamiento histórico mensual de la temperatura superficial del mar por zona de pesca en el sur del golfo de California durante 1996-2010.



En la Tabla III se enlistan los fenómenos de El Niño, La Niña y años neutrales ocurridos en el área de estudio, su intensidad y duración. El fenómeno de El Niño 1997-98 se caracterizó por su larga duración e intensidad. El Niño que se presentó entre 2009 y 2010 fue también de intensidad alta pero de mediana duración. A partir del año 2000 se observan varios eventos correspondientes al fenómeno de La Niña y aunque fueron de intensidad media y baja en su mayoría, es importante destacar la presencia de anomalías negativas o frías de temperatura incluso por varios años consecutivos (2000-2002, 2003-2008). Este periodo de anomalías con tendencias frías culminó con el evento más frío del periodo de estudio (hasta 5 °C por debajo de la media) durante 2007 y 2008, ya que en 2009 se pudo presentar nuevamente un cambio de régimen de temperatura con la llegada de un evento de El Niño de gran intensidad.

Tabla III. Fenómenos climáticos El Niño/La Niña registrados en la zona de estudio, así como su intensidad y duración aproximada.

Fenómeno	Temporada	Intensidad <sup>1</sup>	Duración <sup>2</sup>
El Niño	1997-1998	Alta	Larga
	2002-2003	Media	Corta
	2004-2005	Media	Corta
	2006-2007	Alta	Corta
	2009-2010	Alta	Mediana
La Niña	1998-1999	Media	Larga
	2000-2001	Media	Larga
	2003-2004	Media	Corta
	2004-2005	Media	Larga
	2005-2006	Alta	Larga
	2006-2007	Alta	Corta
	2008-2009	Alta	Larga

<sup>1</sup> La intensidad se considera baja si el fenómeno presentó anomalías de TSM positivas o negativas de 1°C y hasta 1.5°C, mediana de 1.6°C a 2.5°C y alta cuando la anomalía fue mayor a 2.5°C (Philander, 1990).

<sup>2</sup> La duración se considera corta si los fenómenos climáticos permanecen menos de un mes, mediana de 2 a 6 meses y de larga duración si se registran en periodos mayores a 6 meses (Philander, 1990).

### 8.3. Surgencias costeras e índice de turbulencia

Se analizaron la zona norte, centro y sur y se observó que existen diferencias entre cada una de ellas, a pesar de que las zonas norte y sur presentaron un buen número de datos faltantes. La Figura 23 muestra el comportamiento típico del índice de surgencia (IS), los periodos aproximados y su duración se obtuvieron a partir del patrón de vientos de cada una de las tres zonas. El periodo de máximas surgencias en la zona norte es corto ya que alcanza sus mayores valores en junio y julio ( $300 \text{ m}^3/\text{s}$ ), a partir de aquí comienza a descender paulatinamente hasta los mínimos valores en diciembre ( $45 \text{ m}^3/\text{s}$ ). En la zona centro la mayor actividad de este tipo de fenómenos se lleva a cabo durante la primavera y verano, en el periodo comprendido en los meses de abril a julio, un periodo más amplio que en el caso anterior (4 meses); el máximo se alcanza a mediados de junio ( $260 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y a partir de julio comienza a descender la actividad del viento sobre la superficie del mar hasta sus mínimos valores en diciembre y enero ( $<40 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Se puede decir que las surgencias que se presentan en esta zona son moderadas con respecto a las otras dos zonas y con actividad importante durante casi 6 meses (abril-septiembre). Por último la actividad principal de los vientos en la zona sur se realiza de marzo a mayo, cuando se presentan fuertes surgencias ( $350 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y aunque en meses como julio y octubre se observan surgencias de intensidad moderada ( $>200 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $<250 \text{ m}^3/\text{s}$ ), el índice continúa decreciendo de cara a los últimos meses del año ( $<50 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

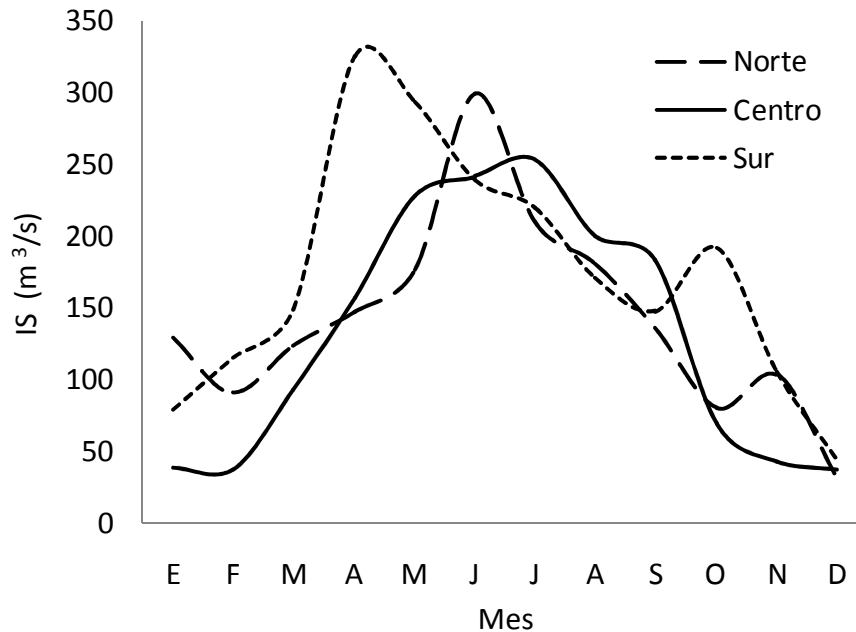


Figura 23. Comportamiento típico y periodos del índice de surgencia (IS) de la zona norte, centro y sur, producto del promedio mensual del IS de 1996-2010.

En la Tabla IV se enlistan las direcciones dominantes del viento más comunes por mes, registrados en la zona de Mazatlán, Sinaloa durante 1996-2010. En Topolobampo la dirección del viento es en su mayoría de componente Suroeste (SW) durante la mayor parte del año; en invierno el viento es predominantemente del Oeste (W) y Noroeste (NW). En Mazatlán durante el primer trimestre los vientos provienen en su mayoría del NW, en los siguientes 6 meses este régimen se ve modificado, por lo que los vientos presentan un componente Oeste-Suroeste (WSW) hasta el mes de octubre donde la dirección es Nor-Noroeste (NNW). En la bahía de San Blas los vientos provienen en su mayoría del NW durante invierno y primavera, mientras que la otra mitad del año son de componente W y Oeste-Noroeste (WNW).

Tabla IV. Direcciones mensuales del viento registradas en la zona de estudio durante 1996-2010.

<b>Mes</b>	<b>Norte</b>	<b>Centro</b>	<b>Sur</b>
Enero	NW	NNW	NW
Febrero	SW	NW - NNW	NW - WNW
Marzo	SW	WNW - NW	WNW
Abril	WSW	WNW	NW
Mayo	SW	WSW - W	W - NW
Junio	SW	WSW	W - WNW
Julio	SW	WSW	W
Agosto	SW	WSW - W	W - WNW
Septiembre	SW	WSW - W - WNW	W - WNW
Octubre	NW	WNW - NW - NNW	W - WNW
Noviembre	WNW	NNW	NW - WNW
Diciembre	W	NNW	NW - WNW

En la Figura 24 se observa el índice de turbulencia que explica la estabilidad de la columna de agua gracias al esfuerzo que el viento realiza sobre ella, es decir, entre mayor es la velocidad del viento, mayor es la fuerza mezcladora que ejerce sobre la columna de agua. La turbulencia generada en la zona sur es más intensa durante el periodo de abril a mayo ( $90 \text{ m}^3/\text{s}^3$ ) y suele debilitarse ( $50 \text{ m}^3/\text{s}^3$ ) a mediados de junio (Figura 24). En la zona centro, la turbulencia es más estable ya que se presenta durante prácticamente todo el año, pero dicha turbulencia no es muy intensa ( $<40 \text{ m}^3/\text{s}^3$ ), ya que la velocidad del viento es de menor magnitud que en la zona sur. La zona norte para efectos de este estudio puede ser catalogada como la más estable o menos turbulenta, pero a pesar de esta característica presenta un bajo potencial en cuanto a la generación de afloramientos inducidos por viento y por lo tanto al enriquecimiento de nutrientes provenientes de aguas de fondo. Durante casi todo el año la turbulencia es más baja en la zona norte ( $<20 \text{ m}^3/\text{s}^3$ ), a excepción de junio cuando se presenta una mayor actividad del viento sobre la superficie del agua ( $35 \text{ m}^3/\text{s}^3$ ), pero genera poca turbulencia en la región.

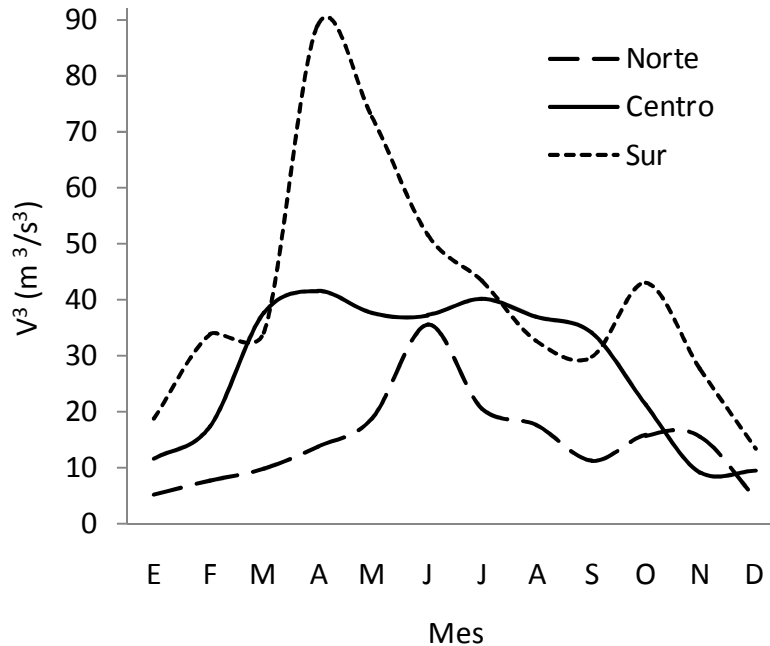


Figura 24. Índice de turbulencia  $V^3$  ( $m^3/s^3$ ) de la zona norte, centro y sur resultado del promedio histórico mensual durante 1996-2010.

La Figura 25 muestra el índice histórico de surgencias inducidas por viento. Se aprecia que estos fenómenos se generan con más intensidad en la zona sur con valores de hasta  $700 m^3/s$ , sobre todo en la última década. Aunque en la zona norte no se contó con la información completa, con los datos disponibles se observa que se presenta un patrón de vientos más débil con respecto a la zona sur. Por ejemplo en julio de 1997 el IS registrado en la zona Norte fue de  $234 m^3/s$  por 100 m de línea de costa, mientras que en el centro el valor fue de  $334 m^3/s$  por 100 m de línea de costa. En la zona centro se observa que la variabilidad de los fenómenos de surgencia durante cada año es más constante, ya que en general se observan prácticamente el mismo patrón durante los 15 años analizados, con surgencias menores a  $300 m^3/s^3$ . Aunque en la zona sur hay huecos en la información obtenida, destaca el patrón de vientos generadores de surgencia que se presentó durante 1996-1998 ( $100 m^3/s$  por 100 m de línea de costa), ya que a partir de 2003 el índice de surgencia aumentó gradualmente a  $450 m^3/s$ , hasta el año 2004 cuando se presentó el máximo del periodo de estudio ( $660 m^3/s$ ) y durante los años siguientes se mantuvieron valores semejantes.

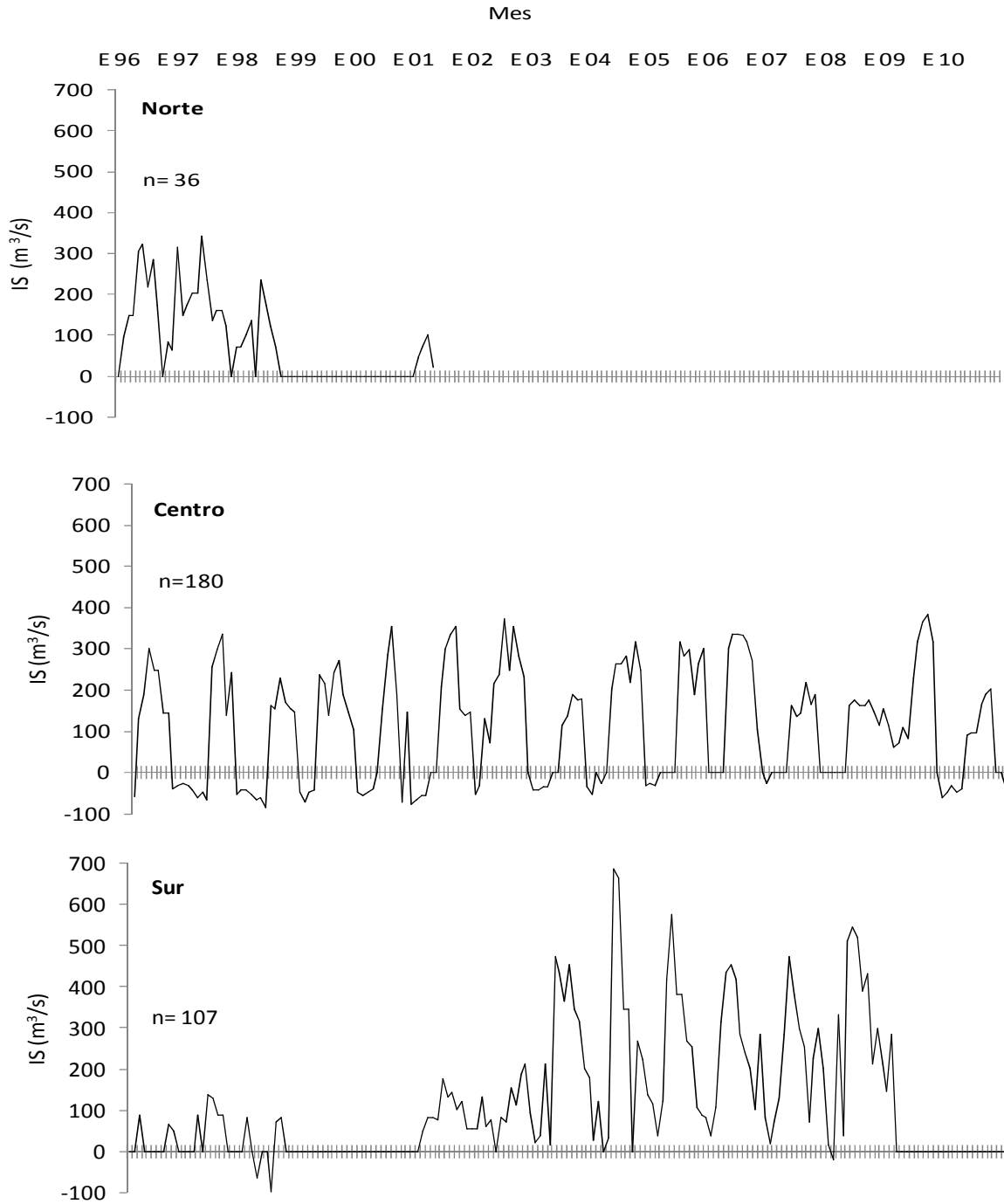
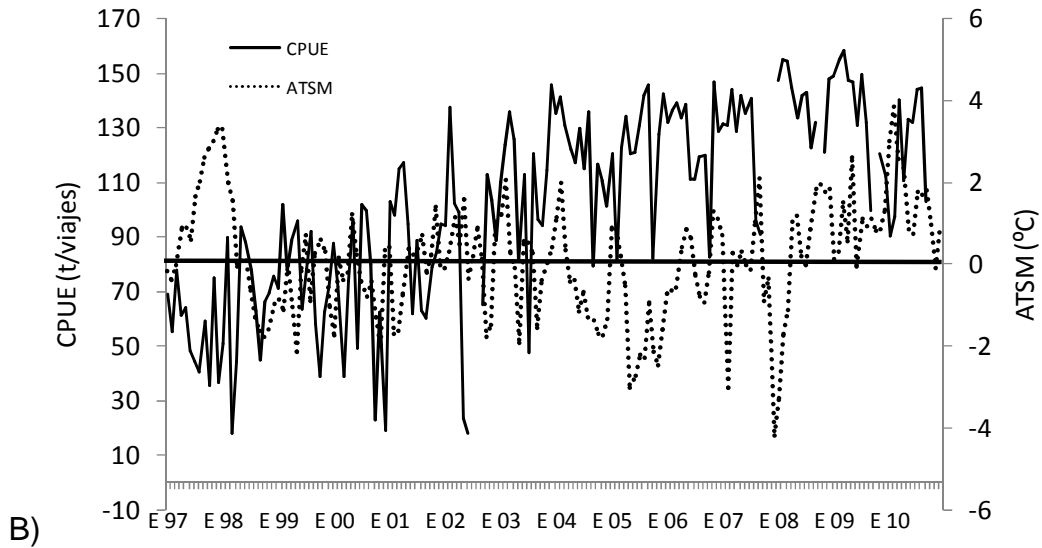
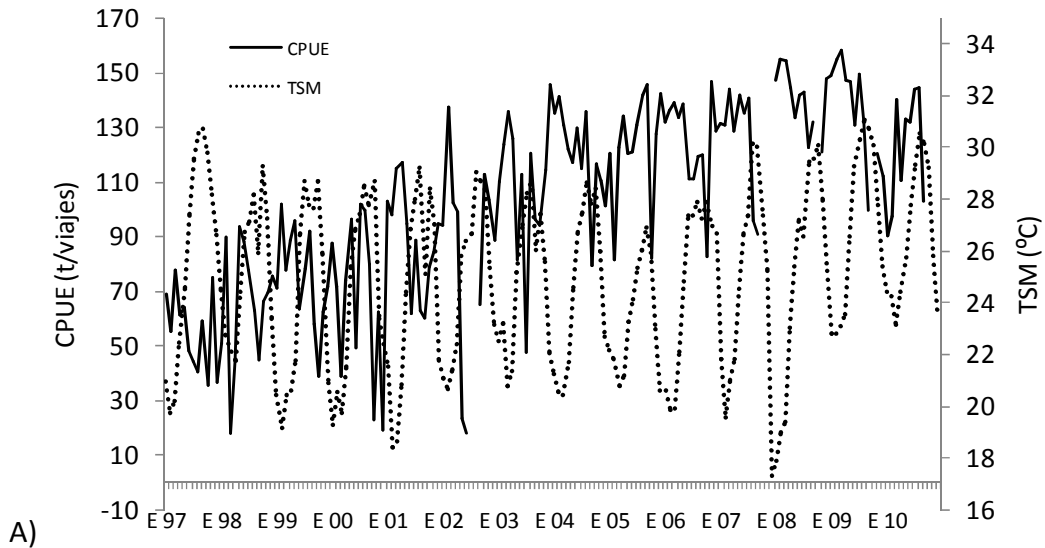


Figura 25. Índice histórico mensual de surgencia (m<sup>3</sup>/s) por zona.

#### **8.4. Relación entre el índice de abundancia (CPUE) y la variabilidad ambiental**

Al relacionar las variables ambientales con la CPUE se utilizaron los datos de surgencia y turbulencia de la zona centro debido a la alta cantidad de datos faltantes en las áreas del norte y sur. En la Figura 26 se observa el comportamiento del índice de productividad con cada una de las variables ambientales. Analizando la relación de la CPUE con la temperatura del agua (Figura 26 A) se aprecia una relación inversa, es decir, cuando el índice de productividad aumenta y alcanza sus máximos valores anuales, se registran los valores mínimos de temperatura ocurridos durante los meses más fríos del invierno (enero y febrero). En 2008 y 2009 se presentaron las anomalías negativas de temperatura más significativas (hasta 4 °C por debajo de la media) del periodo de estudio (Figura 26 B) año en el cual se registró la mayor abundancia (140 -160 t/viaje). Durante el fenómeno de El Niño en 1997-98, la abundancia osciló en valores bajos (20-80 t/viaje) mientras que la temperatura registró más de 4 °C por encima de la media durante más de seis meses aproximadamente. Respecto al índice de turbulencia ( $V^3$ ) se observa (Figura 26 C) que en los últimos años la máxima abundancia está asociada a columnas de agua poco turbulentas (5-30  $m^3/s^3$ ). A finales de 2009 se presentó una actividad intensa del viento sobre la columna de agua, por lo tanto la turbulencia en la zona fue alta (90  $m^3/s^3$ ); en 2010 el índice de abundancia mostró cierto decremento (130 t/viaje) con respecto al 2009 (160 t/viaje). Respecto a las surgencias (Figura 26 D), de la misma manera que en el caso anterior, se observa cierta relación en los últimos cinco años. La mayor abundancia en 2007-2009 se registró cuando el índice de surgencia oscilaba en valores intermedios (70-150  $m^3/s$ ). Al parecer cuando hay una mayor actividad del viento sobre la columna de agua y por lo tanto genera surgencias de mayor intensidad, no es beneficioso para el stock de sardina crinuda que ocupa esta área ya que con surgencias de entre 200-300  $m^3/s$  el índice de abundancia cae a valores más bajos. Esto se observa (Figura 26 D) en la primera parte del periodo de estudio (1997-2002) ya que en este periodo eran muy comunes los fenómenos de surgencia con intensidades de este tipo. La alta abundancia

observada en los últimos años (2003-2010) pueden estar asociadas a un periodo de surgencias de intensidad media-baja (<90 m<sup>3</sup>/s).





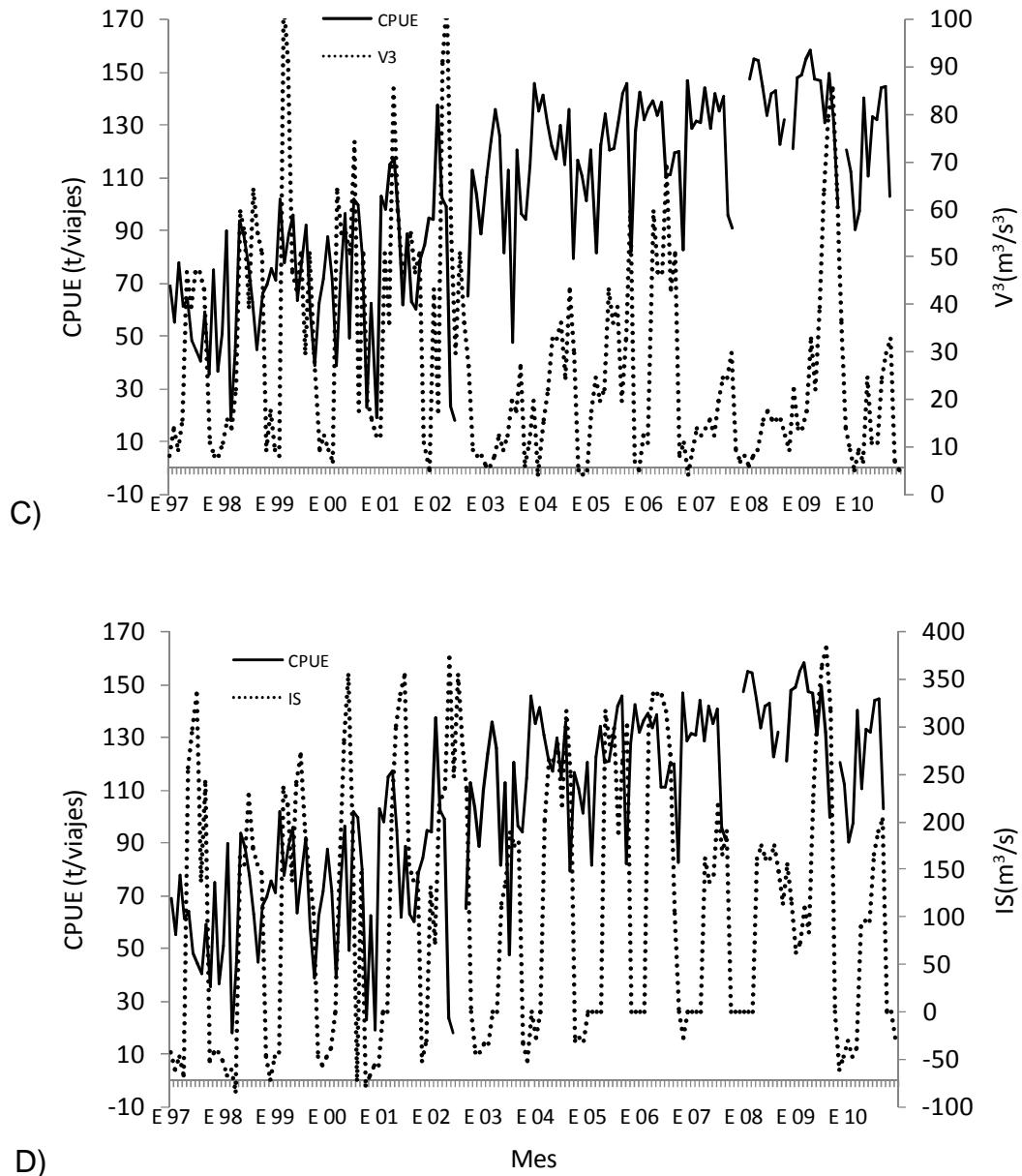


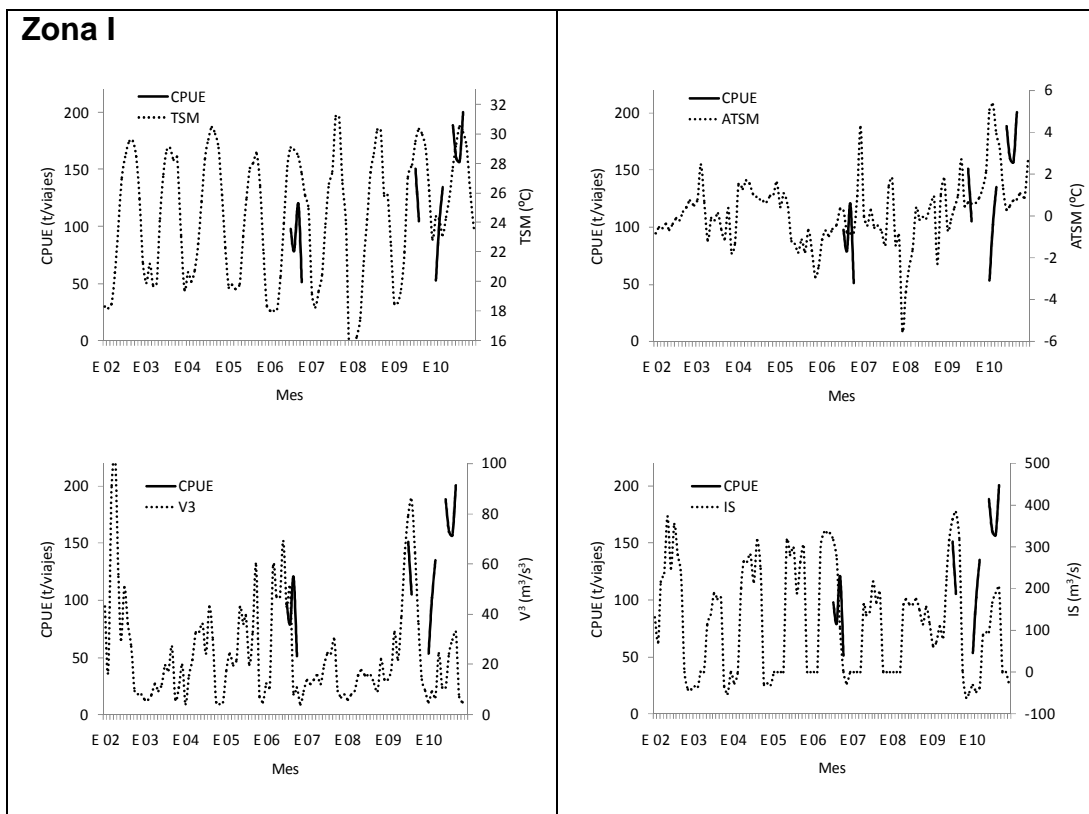
Figura 26. Comportamiento mensual histórico del índice de abundancia y la TSM (A), las anomalías de TSM (B), el índice de turbulencia (C) y el índice de surgencia (D) durante 1997-2010.

En la Figura 27 se encuentra el comportamiento de la CPUE con cada una de las variables ambientales (TSM, ATSM, índice de surgencia e índice de turbulencia) por zona de pesca. Se graficaron los datos a partir de 2003, ya que es el periodo que además de poseer una mayor cantidad de datos, se observa mejor la relación con las variables ambientales. De manera general las relaciones que guarda la variable dependiente (CPUE) con las independientes (ambientales) son muy

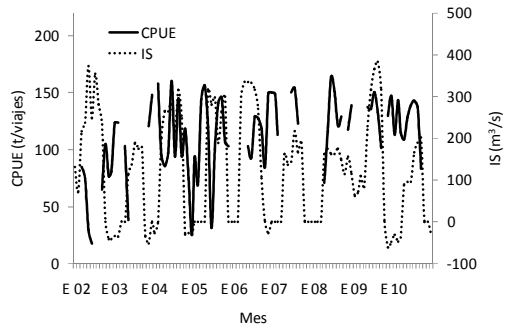
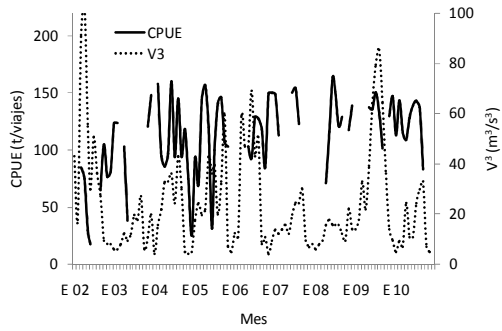
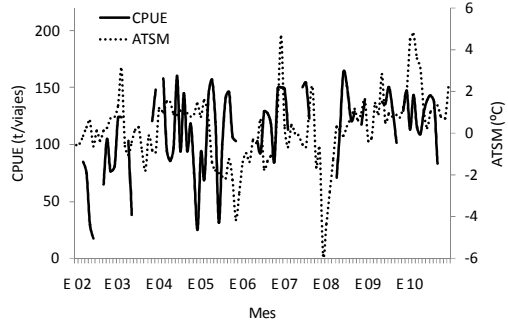
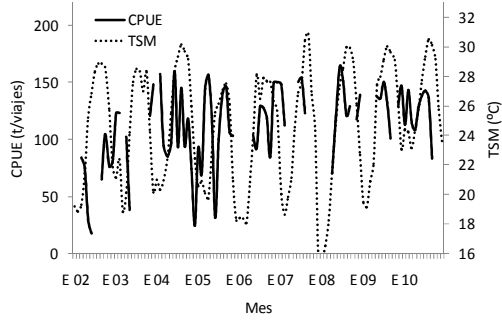
similares a lo que se explicó anteriormente. La temperatura del agua guarda una relación inversa con la abundancia de cada zona; aunque fueron muy pocos datos en la Zona I, se logra apreciar cierta preferencia por temperaturas entre 24 y 26 °C. En la Zona II, no se observa muy claramente la relación inversa que se mencionaba anteriormente, ya que la mayor abundancia se registró cuando la temperatura iba en aumento hasta llegar a los 28 °C, una vez que la temperatura aumentó por encima de este valor, el índice de abundancia fue en decremento de la misma manera. La Zona III presentó la mayor abundancia dentro de un intervalo de temperatura entre 26-28 °C. En la Zona IV la mayor abundancia se presentó en un intervalo de entre 23-26 °C y en la Zona V el intervalo de TSM fue de 24-26 °C. Las anomalías intensas afectaron las cinco zonas por igual, durante el primer semestre de 2010 se presentó un fenómeno de El Niño intenso con hasta 4 °C por encima de la media, lo que generó una caída en abundancia regionalmente. Cabe señalar que en las cinco zonas se lograron la mayor abundancia cuando las anomalías iban de 3 °C por debajo de la media y hasta 2 °C por encima de la misma. En otras palabras la sardina crinuda ha presentado las principales abundancias con fenómenos climáticos (La Niña) en los cuales la temperatura superficial disminuye hasta 3 °C, abundancia que se logra mantener incluso si se presentasen contrastes climáticos (El Niño) en los cuales, las temperaturas no superen hasta 2 °C por encima del promedio mensual. Cuando se presentaron anomalías de temperatura fuera de este intervalo, la abundancia de la sardina decreció considerablemente en las cinco zonas. Cabe mencionar que la mayor abundancia se registró en las zonas del centro (III y IV), donde los valores de las anomalías de TSM fueron más bajos.

A partir de 2006 y hasta mediados de 2009 se registró baja actividad del viento, el índice de turbulencia ( $V^3$ ) no superó los 30  $m^3/s^3$  (Figura 27). Este mismo periodo se caracterizó por que fue en el que se registró la mayor abundancia en las cinco zonas. Este periodo largo (3 años) permitió explicar dicha abundancia junto con un intervalo más amplio de temperatura superficial del mar (anomalías que fueron de -3° hasta 4 °C) respecto a los años previos, por ejemplo la mínima en enero de 2008 fue de 18.5 °C, mientras que en enero de 2005 se registraron 21 °C. Lo

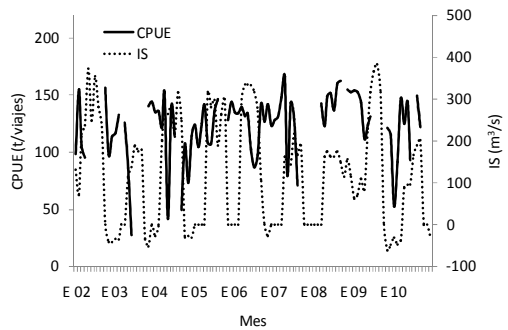
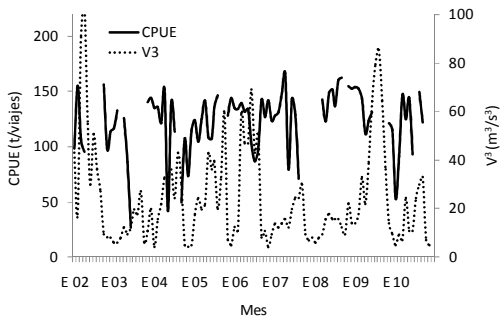
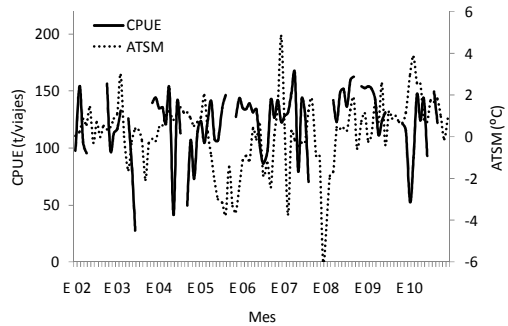
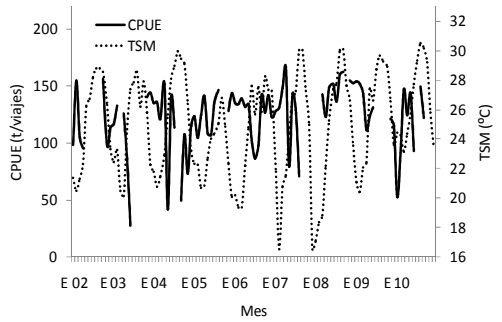
mismo sucedió para temperaturas cálidas pues en julio de 2007 se registraron hasta 31 °C, mientras que en julio de 2006 la TSM fue de 29 °C. También destaca para el mismo periodo de tiempo (2006-2009) la generación de fenómenos de surgencia débiles y moderados que también pueden servir para explicar esta abundancia y que está relacionado con el índice de turbulencia. En la Zona III por ejemplo, en el año 2006 se presentaron afloramientos de baja intensidad ( $5 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y al mismo tiempo altos índices de abundancia, para finales de este mismo año se presentó un fenómeno de intensidad alta ( $150 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y es justo en este mes cuando el índice de abundancia decrece. Es importante señalar que la mayoría de los vientos para la zona provienen del noroeste (NW). Los datos de surgencia y turbulencia son los que corresponden a la zona centro debido a que es la única base de datos completa y las zonas del centro son las que aportaron la mayor abundancia.



**Zona II**



**Zona III**



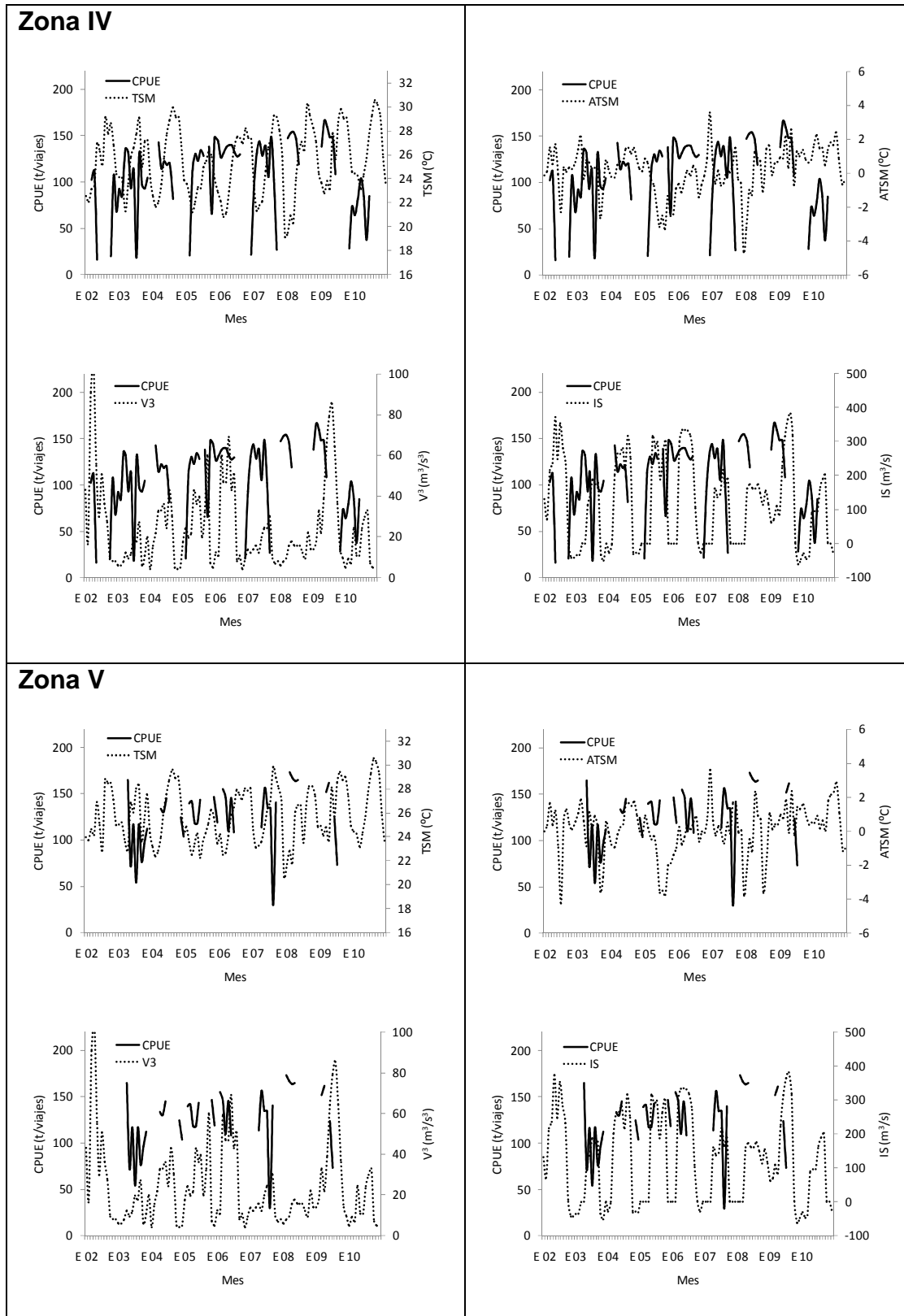


Figura 27. Comportamiento mensual del índice de abundancia (CPUE) con las variables ambientales por zona de pesca durante 2002-2010.

En la Figura 28 se aprecia la relación entre las capturas de sardina crinuda en toda la zona de estudio y el índice de turbulencia. Dicho índice fue más intenso en la primera mitad del periodo de estudio (hasta 110  $m^3/s^3$ ), mismo que se caracterizó por presentar bajas capturas (<4000 t). A partir de 2003 el régimen de vientos cambió (<80  $m^3/s^3$ ) y es precisamente cuando se comenzaron a registrar capturas récord de sardina crinuda año tras año, pues hasta 2002 no se registraron más de 4 000 t en un mes y en mayo de 2009 por ejemplo, se desembarcaron más de 16 000 t.

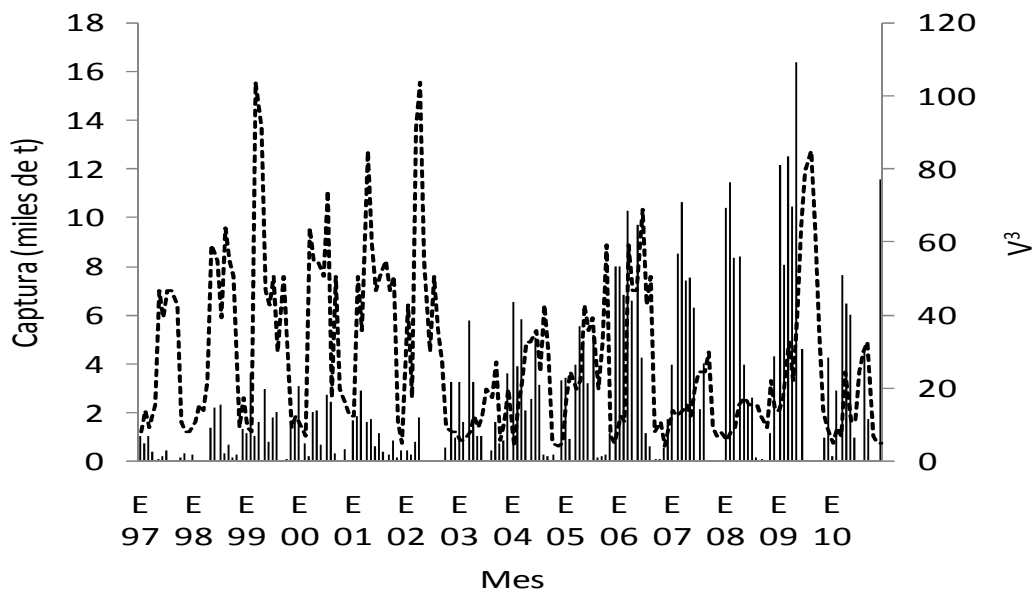


Figura 28. Distribución mensual histórica de la captura de sardina crinuda (barras) y el índice de turbulencia (línea punteada).

En la Figura 29 se aprecia la influencia que tuvo el evento de El Niño 1997-98 sobre la pesquería de sardina crinuda en el sur del golfo de California. La zona sombreada de la figura indica la duración del fenómeno. Se observa que de enero a mayo de 1997, previo a la entrada de masas de agua con características más cálidas de lo normal, la captura del recurso se encontraba en las oscilaciones normales que se registran en cada temporada. A partir de junio del mismo año se registra un descenso continuo en la captura del recurso, lo que coincidió con un régimen sostenido de anomalías positivas (cálidas) de temperatura superficial del mar que alcanzaron el máximo en enero de 1998 (más de 3 °C por encima de la media). Durante los meses posteriores a este evento climático las anomalías de

temperatura regresaron a los intervalos normales ( $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Al mismo tiempo el recurso se fue recuperando, ya que de las 23 t desembarcadas en marzo de 1998, para julio del mismo año se lograron más de 2,600 t. Cabe destacar que en septiembre de 1998 se registró un evento con características completamente contrarias a las que se describieron anteriormente, ya que se trató del fenómeno de La Niña con intensidad alta ( $2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  por debajo de la media), la captura del recurso sufrió una caída en este mismo mes; dado que este fenómeno presentó una duración baja (menor a un mes) el impacto en la pesquería fue también de baja magnitud. Este puede ser un ejemplo acerca del impacto que genera también la transición de eventos climáticos con diferentes características térmicas sobre el stock de sardina crinuda.

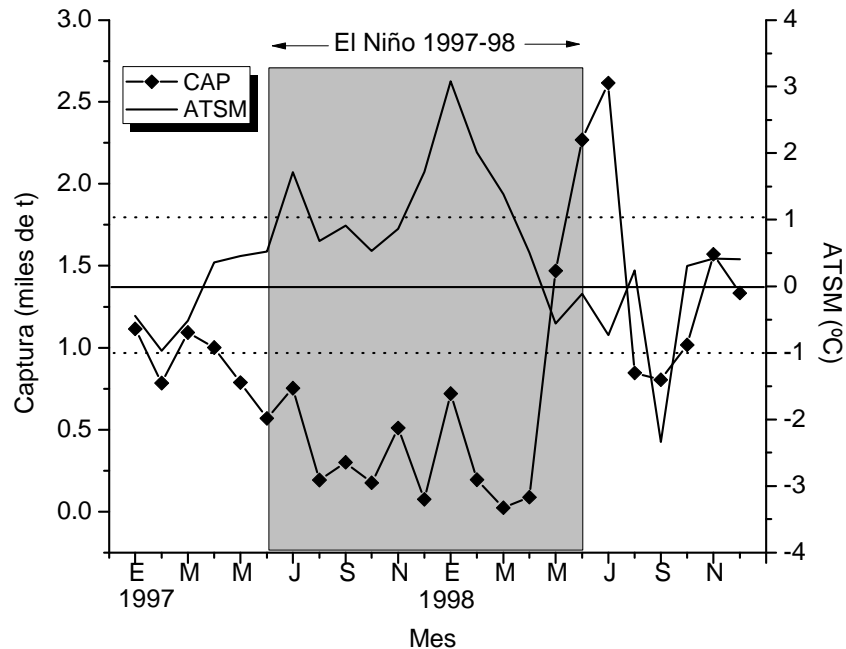


Figura 29. Captura de sardina crinuda y anomalías de temperatura superficial del mar durante el evento de El Niño 1997-98. Las líneas discontinuas indican el intervalo ( $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ) mediante el cual se consideran anomalías correspondientes a algún fenómeno climático.

### 8.5. Análisis exploratorio de datos mediante la implementación de la metodología ACE

Debido a la dificultad que se encontró al analizar la relación de las variables de manera gráfica, se implementó la metodología ACE para encontrar la relación existente entre los datos, es decir, la relación de la sardina crinuda con el

ambiente (ventanas ambientales óptimas), además de identificar la función de transformación (empíricamente) de cada variable para utilizarla después durante la construcción de los modelos. Esta técnica se implementó con los datos totales mensuales sin tomar en cuenta la zonificación descrita anteriormente, es decir, en adelante los datos se trabajaron en conjunto. Los datos de CPUE provienen de los calculados con la captura y el esfuerzo pesquero total de sardina crinuda en el sur del golfo de California y están agrupados trimestralmente. Los datos de temperatura superficial del mar son el promedio trimestral de las cinco zonas de pesca y los de surgencia y turbulencia son también promedios trimestrales. Las Figura 30 (A-D) muestran la dispersión de los datos de la variable dependiente (CPUE) contra cada una de las variables independientes (esfuerzo, TSM, surgencia y turbulencia) y en las cuales se observa que las relaciones son de tipo no lineal entre la variable dependiente con las independientes.

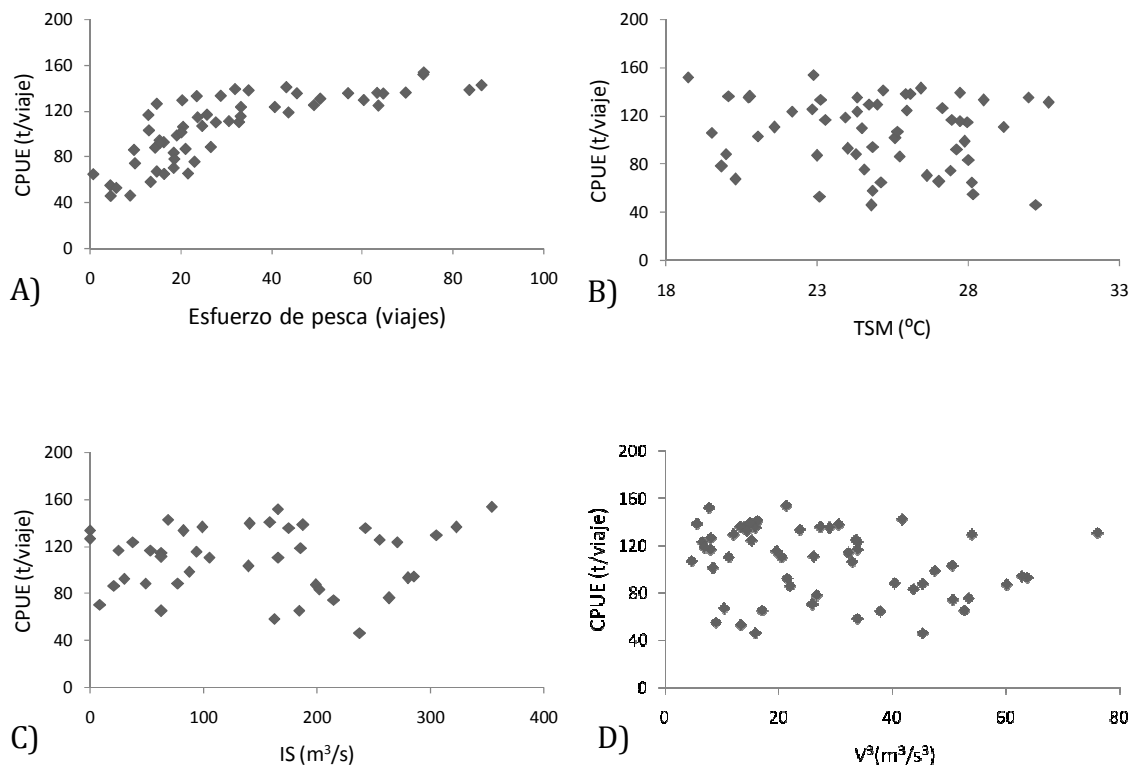


Figura 30. Diagramas de dispersión con datos trimestrales del índice de abundancia (CPUE) y cuatro variables predictivas: A) esfuerzo de pesca, B) temperatura superficial del mar, C) índice de surgencia y D) índice de turbulencia.



Los más altos valores del índice de abundancia se registraron cuando se presentaron valores de bajos a intermedios del esfuerzo pesquero (>0 y <30 viajes estándar); la surgencia y la turbulencia no parecen mostrar alguna relación (Figura 30 A, C y D). En el caso de la temperatura superficial del mar se observa que la mayor cantidad de datos se agrupan en el intervalo >24 °C y <28 °C (Figura 30 B). Debido a las relaciones poco claras mostradas en el análisis visual de las relaciones entre la variable dependiente y las independientes (Figura 30), se procedió con el análisis exploratorio ACE. Con esta técnica la forma de la transformación empírica óptima se obtuvo al graficar el valor transformado de  $Y$  o  $X_i$  contra el valor original observado. Se realizaron los modelos con diferentes combinaciones de variables ambientales y esfuerzo de pesca que explicaron la varianza entre menos del 40% y hasta casi el 80% (Tabla V). Los modelos con combinaciones de variables ambientales y esfuerzo pesquero que tuvieron un mayor porcentaje de varianza explicada se enlistan en la Tabla V. El modelo que explicó la mayor variabilidad de la CPUE fue el que involucró el esfuerzo y las tres variables ambientales. Los que explicaron menos fueron en los que se utilizaron solo variables ambientales.

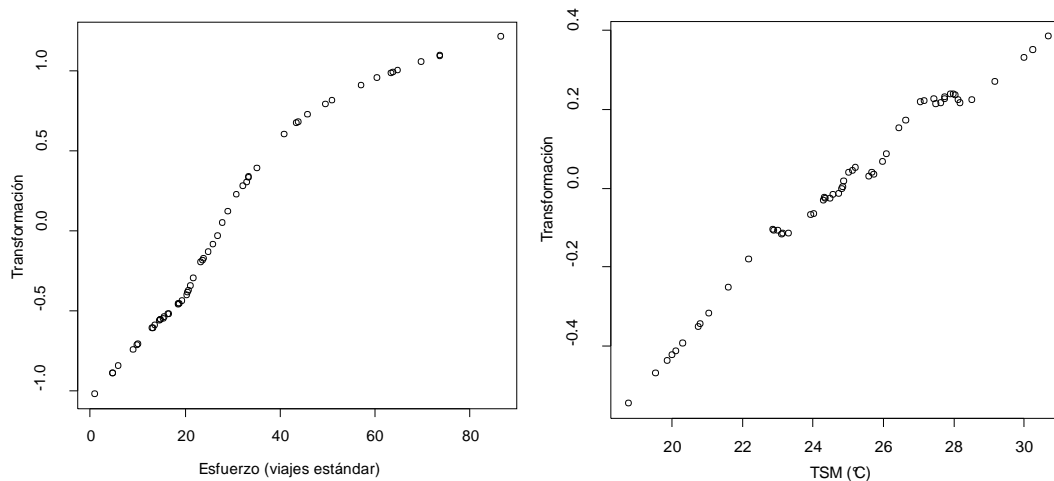
Tabla V. Modelos construidos mediante la herramienta ACE con diferentes combinaciones del esfuerzo pesquero y las variables ambientales.

<b>Variables</b>	<b>Varianza explicada (%)</b>
Esfuerzo-TSM-Surgencia-Turbulencia	72.4
Esfuerzo-TSM-Turbulencia	68.3
Esfuerzo-TSM-Surgencia	65.5
Esfuerzo-TSM	52.7
TSM-Surgencia-Turbulencia	38.4
TSM-Surgencia	15.4

A continuación se muestran algunos de los modelos contenidos en la Tabla V con sus respectivos gráficos de datos transformados contra datos observados (no transformados) mediante los cuales se determinó la ventana ambiental óptima de la sardina crinuda y la función de transformación (empíricamente) de las variables para los modelos predictivos.

### Esfuerzo-TSM-Surgencia-Turbulencia

En este modelo (Figura 31) se encontró que la transformación estimada para el índice de abundancia (CPUE) se ajusta a una sigmoide. El esfuerzo al parecer se comporta como una logarítmica y la temperatura presenta sus mayores valores en el intervalo 24°C-28°C. La distribución de los datos del índice de surgencia presentó parecido a un domo en forma, ligeramente sesgada a la izquierda, por lo que el comportamiento de estos datos es similar al de la distribución gamma. La mayor abundancia se presentó cuando las surgencias fueron de mediana intensidad de entre 70 y 80 m<sup>3</sup>/s. Por último el índice de turbulencia al parecer tomó forma también de una función gamma. Los máximos valores de abundancia se presentaron cuando la turbulencia fue de intensidad baja (0-30 m<sup>3</sup>/s<sup>3</sup>) y viene en decremento para los valores máximos de turbulencia (>40 m<sup>3</sup>/s<sup>3</sup>). La variabilidad explicada para este modelo fue del 72.4%.



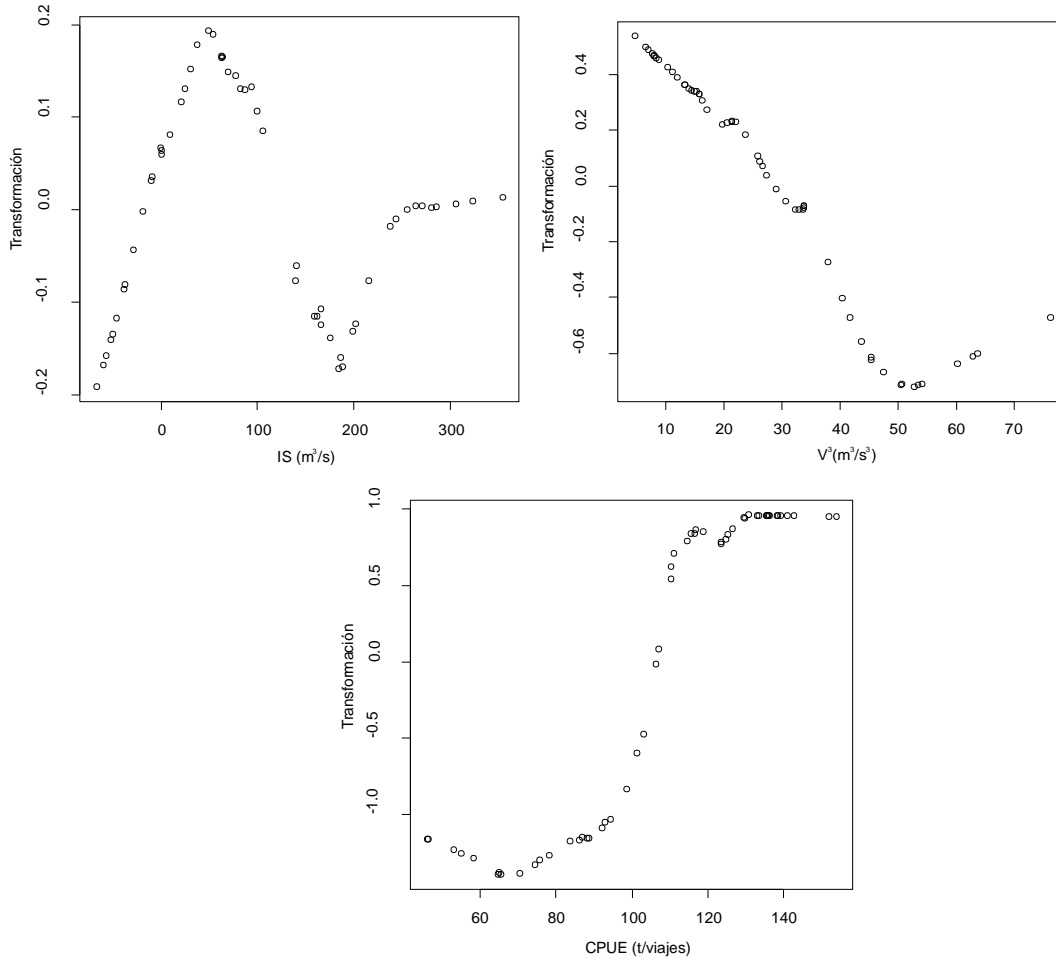


Figura 31. Transformaciones empíricas usando ACE. En este caso se relaciona la CPUE con el esfuerzo y las tres variables ambientales (TSM, Surgencia y Turbulencia).

### Esfuerzo-TSM-Turbulencia

Este modelo que relacionó la CPUE con dos variables ambientales (TSM e Índice de Turbulencia) mostró cierto parecido al anterior (Figure 32). La CPUE se ajustó a una sigmoide, el esfuerzo a una logarítmica y la TSM aunque parece presentar un comportamiento tipo lineal, se exploró más adelante en otros modelos para definir de mejor manera su función de distribución; aunque de manera general parecen agruparse varios datos en el intervalo de temperatura antes señalado (24-28°C). El índice de turbulencia ( $V^3$ ), presentó un comportamiento de tipo gamma; de igual manera la máxima abundancia se registró cuando el índice de turbulencia presentó valores entre 0 y 30  $m^3/s^3$ . Este modelo explicó el 68.3% de la variabilidad observada.

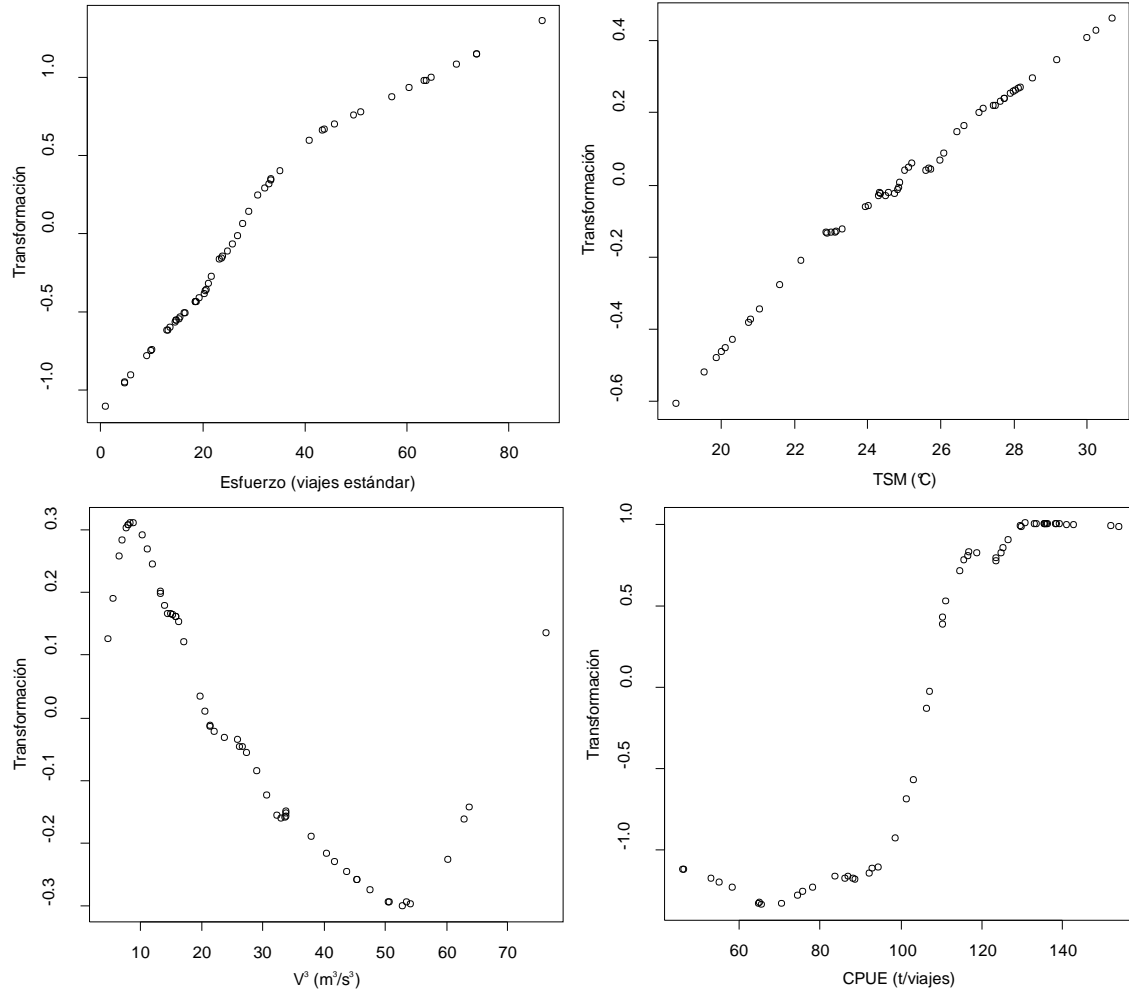
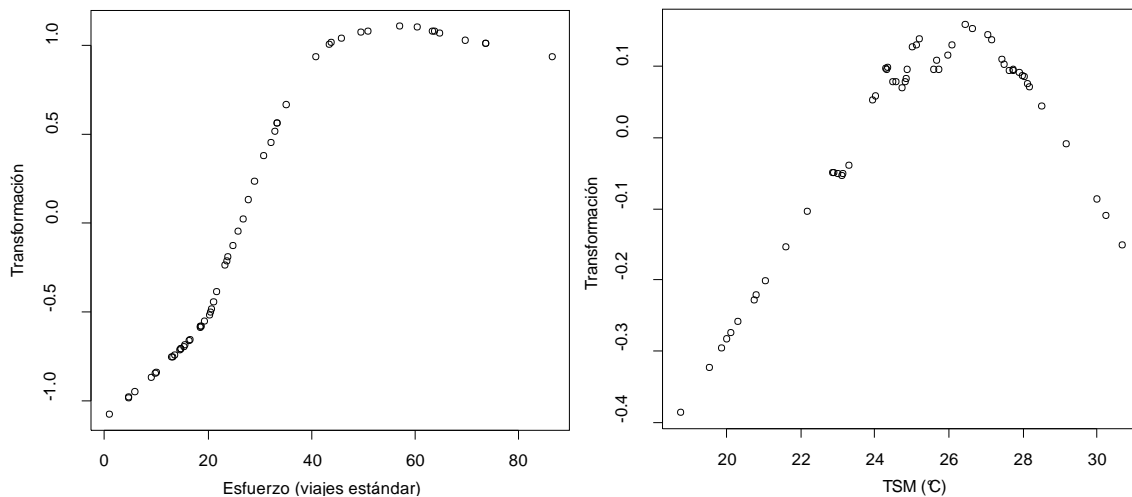


Figure 32. Transformaciones empíricas usando ACE. En este caso se relaciona la CPUE con el esfuerzo y dos variables ambientales (TSM e Índice de Turbulencia).

### Esfuerzo-TSM-Surgencia

El modelo presentado en la Figura 33 que relacionó el índice de abundancia con el esfuerzo pesquero y dos variables ambientales (TSM e índice de surgencia) explicó el 65.5% de la variabilidad observada. La CPUE sigue presentando un comportamiento tipo sigmoide. El esfuerzo pesquero presentó un máximo en 58 viajes estándar y en adelante la abundancia parece estabilizarse conforme se aplica mayor esfuerzo en la pesca sin presentar ya algún incremento. La TSM en este modelo muestra una distribución en forma de domo con un intervalo de máxima abundancia más definido entre 25 y 26°C, por lo que la CPUE disminuye considerablemente con temperaturas extremas tanto bajas como altas. En este modelo podemos definir que el comportamiento de los datos observados de TSM es de tipo normal. El comportamiento de los datos del índice de surgencia sugiere que es de tipo gamma, ya que el domo se encuentra nuevamente sesgado hacia valores de surgencia bajos.



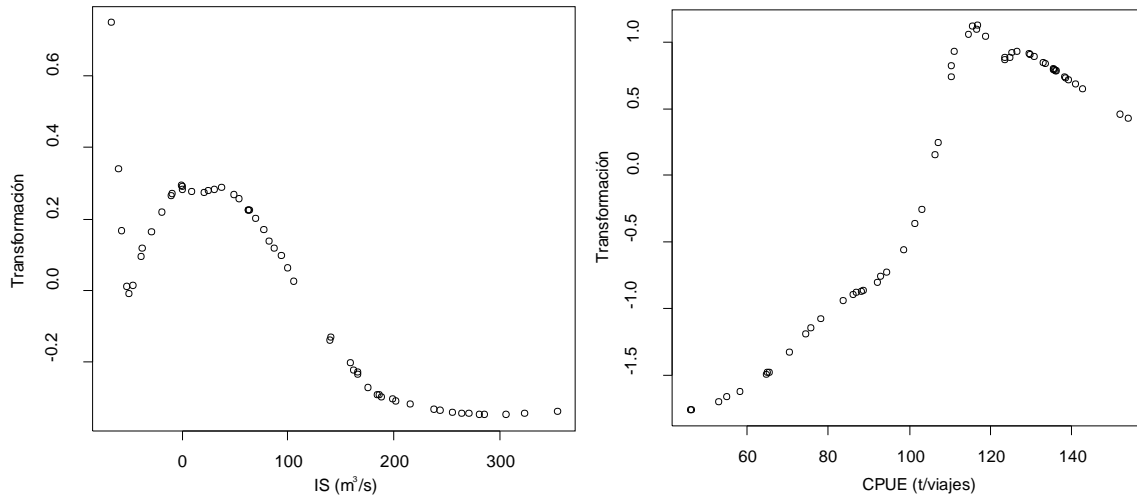


Figura 33. Transformaciones empíricas usando ACE. En este caso se relaciona la CPUE con el esfuerzo y dos variables ambientales (TSM e Índice de Surgencia).

### Esfuerzo-TSM

En el modelo que relaciona la CPUE con el esfuerzo pesquero y la temperatura del agua (Figura 34) explicó casi la mitad de la variabilidad (52.7%). El índice de abundancia mantiene un comportamiento de forma sigmoide, mientras que la dispersión de los datos de temperatura superficial del mar mostró cierto desorden con respecto al modelo anterior. Destacan dos valores de TSM con una abundancia importante: el primero en 22.5°C y el segundo en 27°C. Al igual que el caso anterior el esfuerzo presenta un comportamiento de tipo sigmoide con el máximo en 60 viajes estándar.

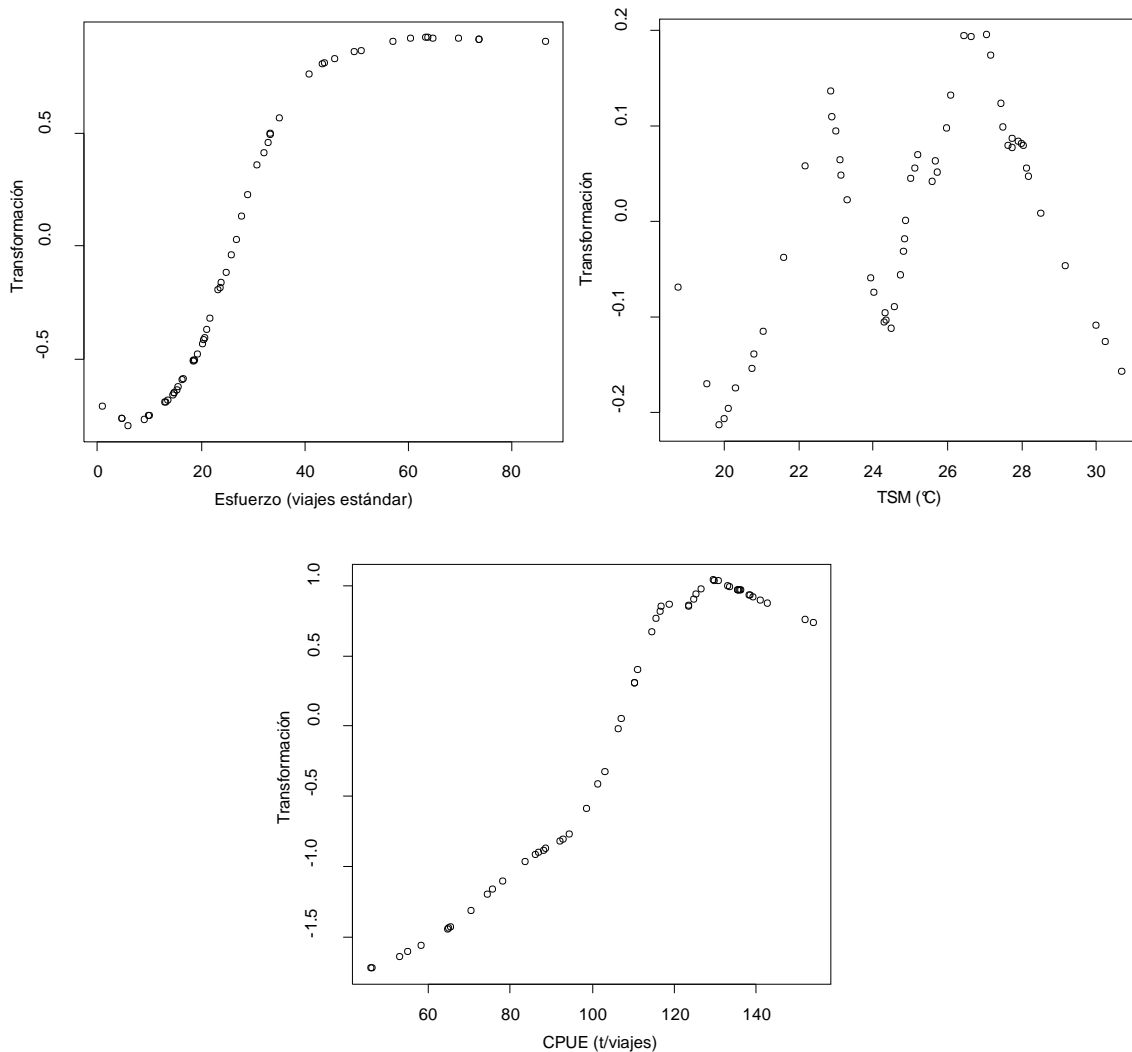


Figura 34. Transformaciones empíricas usando ACE. En este caso se relaciona la CPUE con el esfuerzo pesquero y la Temperatura Superficial del Mar.

### TSM-Surgencia-Turbulencia

El modelo que relacionó al índice de abundancia con las tres variables ambientales explicó solo el 38.4% de la variabilidad observada. La CPUE presentó el mismo comportamiento de tipo sigmoide como ha ocurrido en todos los modelos anteriores. Como se puede apreciar, las tres variables ambientales no muestran un patrón que permita definir un comportamiento para asignar una función de transformación. Las variables ambientales por sí solas explican menos la

variabilidad y mediante ACE no se logró definir una transformación adecuada de los datos en este caso (Figura 35).

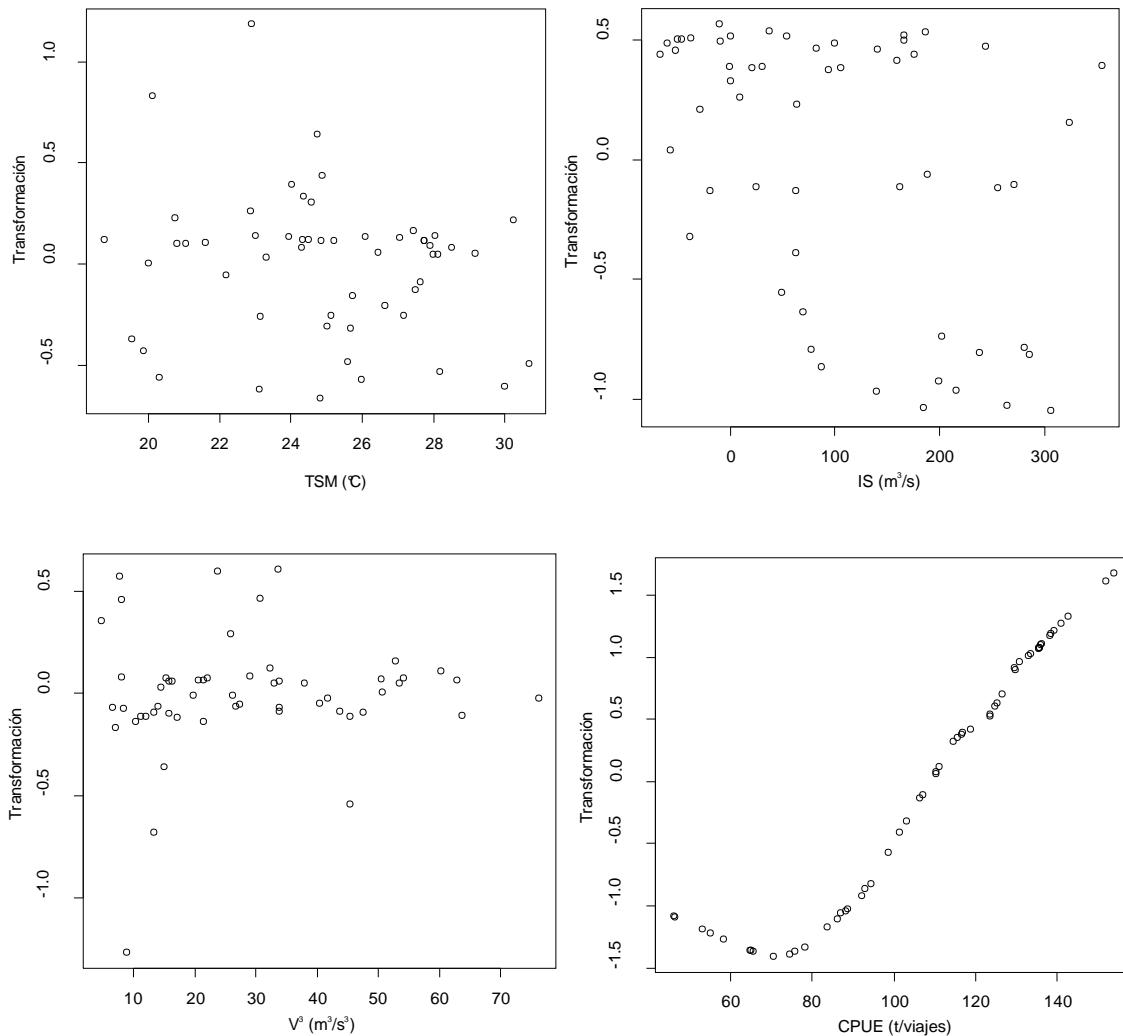


Figura 35. Transformaciones empíricas usando ACE. En este caso se relaciona la CPUE solo con las tres variables ambientales (TSM, Surgencia y Turbulencia).

### TSM-Surgencia

El modelo que relacionó al índice de abundancia con dos variables ambientales (Figura 36) y que explicó solo el 15% de la variabilidad, muestra al igual que en el caso anterior, que al modelar variables ambientales no se encuentran patrones de distribución para definir la mejor transformación e implementar el modelo predictivo. Es por ello que las funciones para cada conjunto de datos y la ventana ambiental se definieron con base en los modelos anteriores (Figuras 32-34).



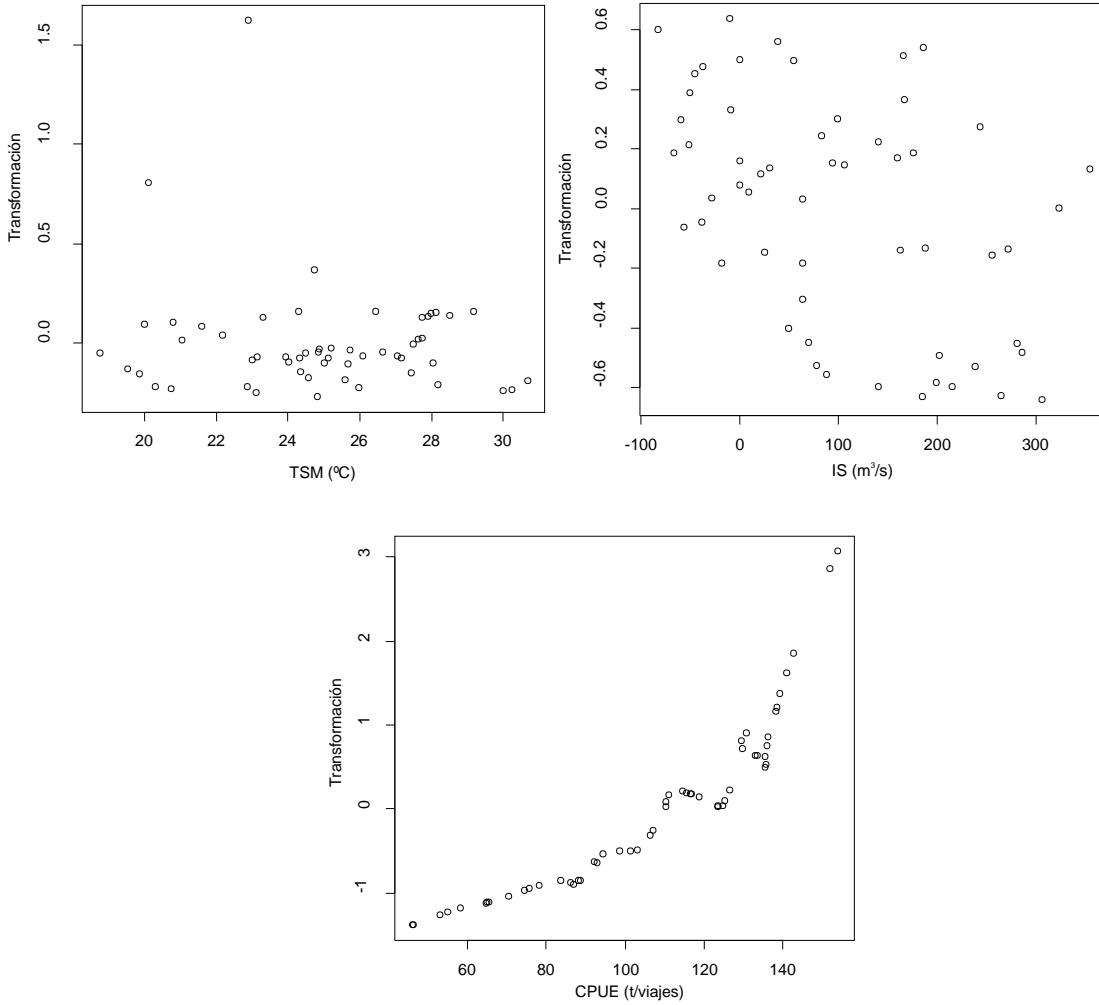


Figura 36. Transformaciones empíricas usando ACE. En este caso se relaciona la CPUE con la TSM y el Índice de Surgencia.

Las funciones de transformación asignadas empíricamente a los conjuntos de datos de cada variable obtenidas con ACE, se enlistan en la Tabla VI. Las ventanas ambientales óptimas por variable en intervalos en los cuales se registraron las principales abundancias de sardina crinuda durante el periodo de estudio se muestran en la Tabla VII.

Tabla VI. Funciones definidas empíricamente para los datos de las variables involucradas obtenidas con ACE con la CPUE como variable dependiente.

<b>Variable</b>	<b>Función</b>
CPUE (dependiente)	Normal Acumulada
Esfuerzo pesquero	Gamma
TSM	Normal
Índice de Surgencia	Gamma
Índice de turbulencia	Gamma

Tabla VII. Ventanas medioambientales óptimas definidas para la sardina crinuda durante 1996-2010.

<b>Variable ambiental</b>	<b>Intervalo en que se registró la máxima abundancia</b>
Temperatura superficial del mar (TSM)	25-26°C
Índice de Surgencia	70-90 m <sup>3</sup> /s
Índice de Turbulencia	0-30 m <sup>3</sup> /s <sup>3</sup>

## 8.6. Modelos predictivos de CPUE y captura de sardina crinuda

### 8.6.1. Captura por unidad de esfuerzo (CPUE)

Los modelos de regresión múltiple no lineal que se probaron con los datos ordenados trimestralmente con la CPUE como variable dependiente se enlistan en la Tabla VIII, posteriormente se muestran algunos de ellos. El mejor modelo según el criterio de información de Akaike (AIC) fue el que relacionó el esfuerzo pesquero (E) y el índice de turbulencia (IT), la variabilidad explicada por el modelo fue de 82% (AIC=321). El modelo que relacionó el esfuerzo pesquero y las tres variables ambientales explicó mayor variabilidad ( $R^2=85\%$ ), pero por la cantidad de parámetros que se necesitaron ajustar (12) el AIC fue mayor (330). El modelo que no incluyó al esfuerzo de pesca y que presentó el menor valor de AIC fue el que se implementó con el índice de turbulencia (IT), mismo que explicó el 42.2% de la variabilidad observada.

Tabla VIII. Modelos de regresión múltiple no lineal probados con datos trimestrales y la CPUE como variable dependiente. Se muestran las variables de los modelos, coeficiente de correlación (%), número de parámetros ajustados y valor del Criterio de Información de Akaike (AIC). En negritas se señala el valor menor del AIC y en negritas y subrayado el valor menor de AIC sin tomar en cuenta el esfuerzo pesquero en el modelo.

Modelo	R <sup>2</sup> (%)	Parámetros	AIC
Esfuerzo Pesquero (E)	55	3	330
TSM	11	3	378
I. Turbulencia (IT)	42.2	3	<b><u>366</u></b>
I. Surgencia (IS)	31	3	377
E – IT	82	6	<b>321</b>
E – TSM - IT	80	9	326
E – TSM - IS	70	9	333
TSM – IS - IT	47.8	9	377
E – TSM – IT - IS	85	12	330

El modelo que se implementó con el esfuerzo pesquero y las tres variables ambientales logró explicar el 85% de la variabilidad observada (Figura 37). Los intervalos de confianza (IC) al 95%, incluyeron a la mayoría de los datos observados (DO) a partir de la temporada 2000-01. En total el modelo con sus IC no logró incluir once DO, nueve de los cuales se registraron en la primera parte del periodo de estudio y todos ellos estuvieron por debajo del IC inferior. Los IC superiores fueron más amplios que los inferiores.

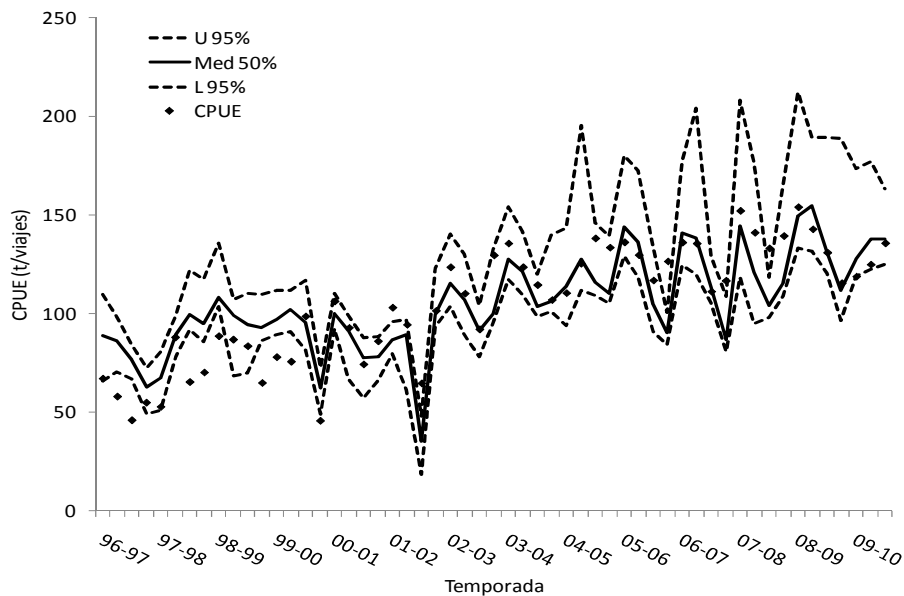


Figura 37. Modelo predictivo trimestral de CPUE con el esfuerzo pesquero y las tres variables ambientales (TSM, IS, IT) como predictores. Las líneas punteadas muestran los intervalos superior (U) e inferior (L) con el 95% de confianza. Se muestran los datos observados de CPUE (puntos) y la mediana (línea sólida).

El modelo en el que se incluyó al esfuerzo pesquero y el índice de turbulencia como variables predictivas, explicó el 82% de la variabilidad observada (Figura 38). En este caso tampoco se logró incluir dentro de los IC, diez DO registrados antes de la temporada 1999-2000. Este modelo presentó en mínimo valor de AIC (321). Los IC superiores fueron ligeramente más amplios que los inferiores, pero fueron más simétricos que en el caso anterior.

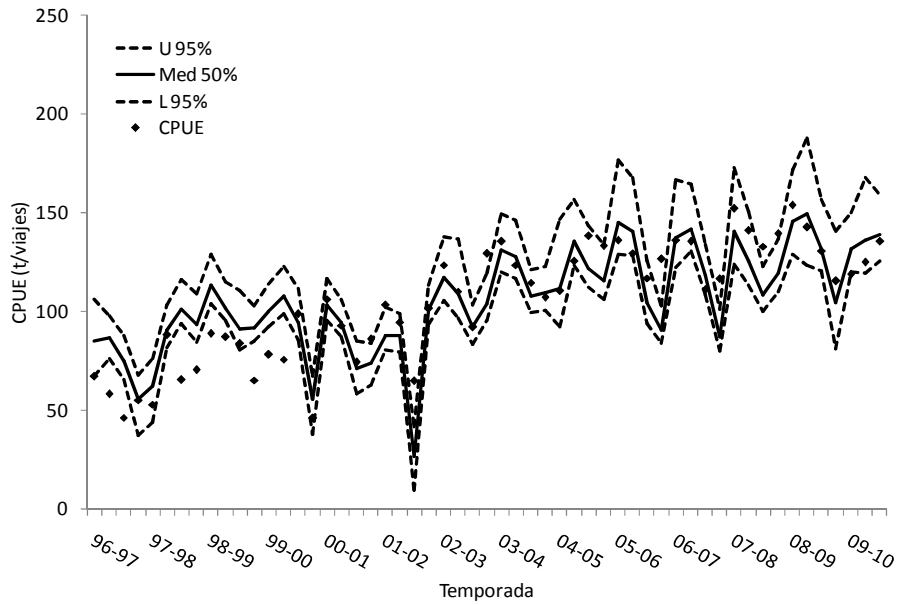


Figura 38. Modelo predictivo trimestral de CPUE con el esfuerzo pesquero y el índice de Turbulencia ( $V^3$ ) como predictores. Las líneas punteadas muestran los intervalos superior (U) e inferior (L) con el 95% de confianza. Se muestran los datos observados de CPUE (puntos) y la mediana (línea sólida).

El modelo implementado con las tres variables ambientales explicó casi el 42% de la variabilidad observada (Figura 39). Aunque los IC mostraron cierta simetría con respecto a los casos anteriores, este modelo no incluyó 28 DO de un total de 55. A simple vista se puede observar que este modelo explica los DO de la primera parte del periodo de estudio en un intervalo cíclico y sin tomar en cuenta datos extremos.

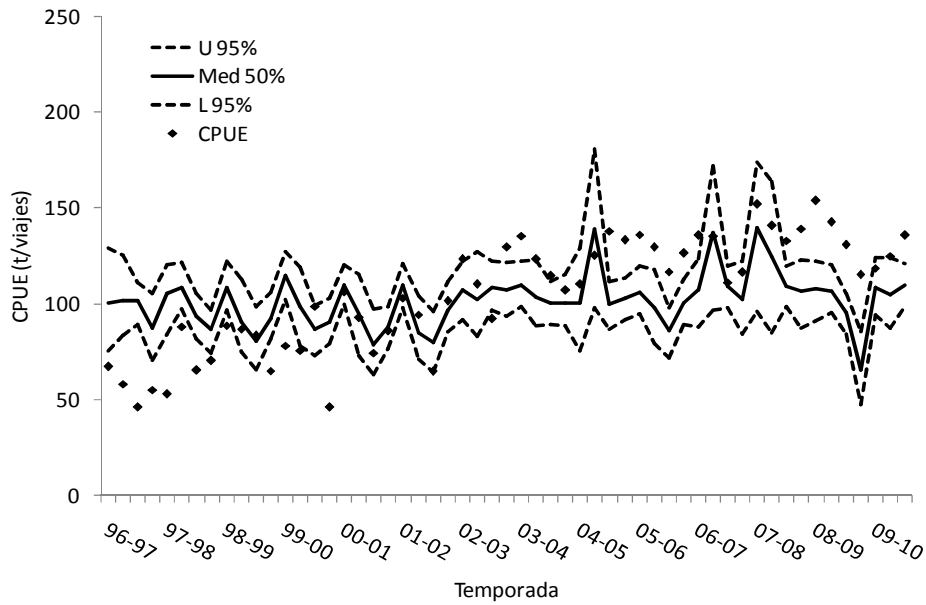


Figura 39. Modelo predictivo trimestral de CPUE con las tres variables ambientales (TSM, IS, IT) como predictores. Las líneas punteadas muestran los intervalos superior (U) e inferior (L) con el 95% de confianza. Se muestran los datos observados de CPUE (puntos) y la mediana (línea sólida).

Los modelos de regresión múltiple no lineal que se probaron con los datos ordenados anualmente con la CPUE como variable dependiente se enlistan en la Tabla IX. El modelo que presentó el menor valor de AIC (76) fue aquél que se implementó con el esfuerzo pesquero y el índice de turbulencia. El que explicó mayor variabilidad ( $R^2=0.893$ ) fue el que se implementó con el esfuerzo pesquero y las tres variables ambientales, pero fue el que registró uno de los mayores valores de AIC (85). El modelo que explicó la mayor variabilidad y el menor valor de AIC con datos independientes a la pesca, fue el que se montó con el índice de turbulencia (AIC=83,  $R^2=0.62$ ).

Tabla IX. Modelos de regresión múltiple no lineal probados con datos anuales y la CPUE como variable dependiente. Se muestran las variables de los modelos, coeficiente de correlación (%), número de parámetros ajustados y valor del Criterio de Información de Akaike (AIC). En negritas se señala el valor menor del AIC y en negritas y subrayado el valor menor de AIC sin tomar en cuenta el esfuerzo pesquero en el modelo.

Modelo	R <sup>2</sup> (%)	Parámetros	AIC
Esfuerzo Pesquero (E)	70	3	77
TSM	5	3	89
I. Turbulencia (IT)	62	3	<b>83</b>
I. Surgencia (IS)	20	3	92
E – IT	89	6	<b>76</b>
E – TSM - IS	75	9	87
E – TSM - IT	87.2	9	82
TSM – IS - IT	80	9	86
E – TSM – IT - IS	89.3	12	85

El modelo que se ajustó con el esfuerzo pesquero y las tres variables ambientales no logró explicar la variabilidad de todos los datos, ya que quedaron dos de ellos fuera de los intervalos de confianza en las primeras temporadas del periodo de estudio (Figura 40). De manera general se aprecia cierta simetría entre los IC y la mediana y se incluyeron la mayoría de los DO.

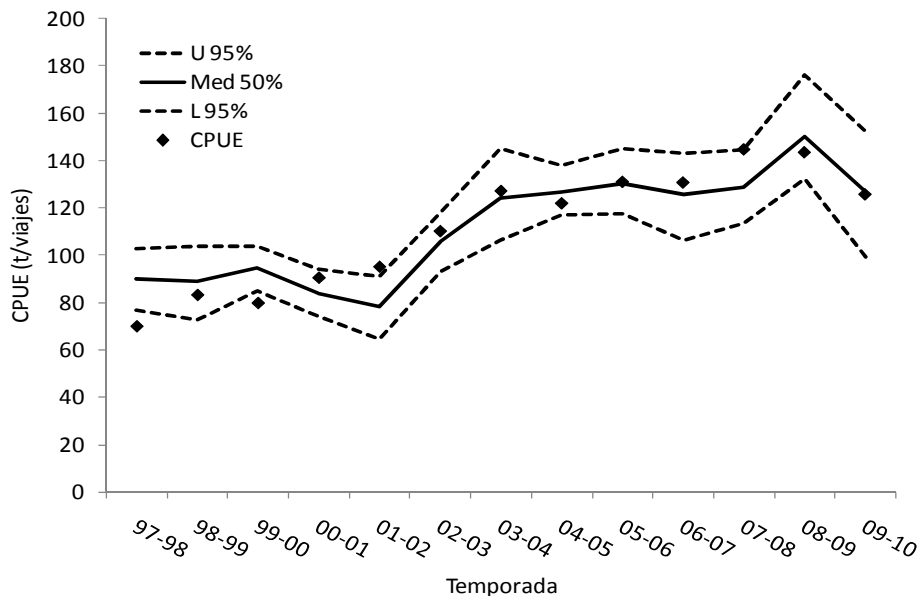


Figura 40. Modelo predictivo anual de CPUE con el esfuerzo pesquero y las tres variables ambientales (TSM, IS, IT) como predictores. Las líneas punteadas muestran los intervalos superior (U) e inferior (L) con el 95% de confianza. Se muestran los datos observados de CPUE (puntos) y la mediana (línea sólida).

El modelo en cual se utilizaron el esfuerzo pesquero y el Índice de turbulencia (Figura 41) se ajustó de buena manera, pero los intervalos de confianza calculados fueron más estrechos y no lograron incluir cuatro DO, aunque cabe destacar que este modelo es el que menos parámetros requirió ajustar (AIC=76). Tres de los DO no incluidos dentro de los IC se presentaron nuevamente en la primera parte del periodo de estudio, los otros fueron en la temporada 2001-02 y 2007-08.

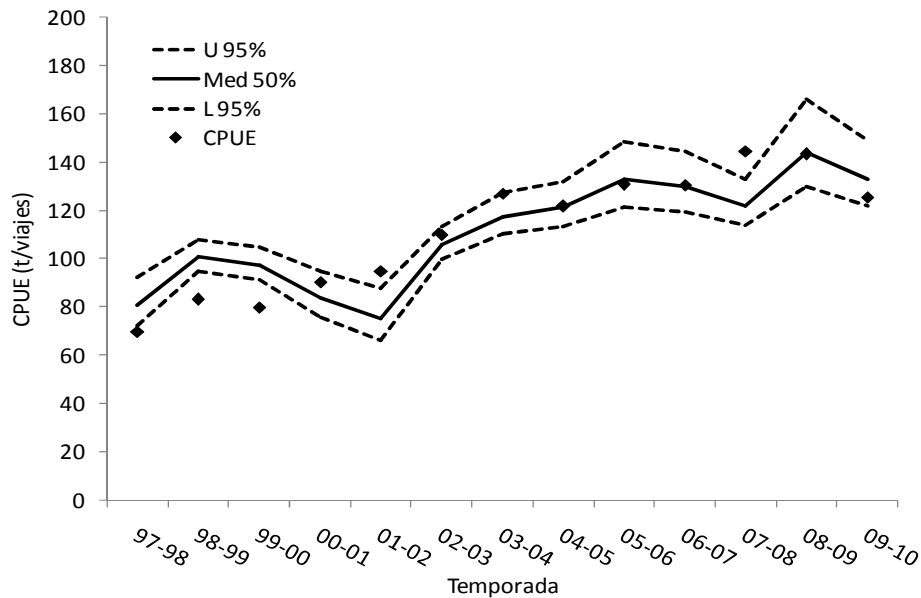


Figura 41. Modelo predictivo anual de CPUE con el esfuerzo pesquero y el índice de Turbulencia ( $V^3$ ) como predictores. Las líneas punteadas muestran los intervalos superior (U) e inferior (L) con el 95% de confianza. Se muestran los datos observados de CPUE (puntos) y la mediana (línea sólida).



El modelo aplicado con las tres variables ambientales (Figura 42) puede ser una buena opción para prospectar la abundancia del recurso sin depender de datos de pesca ya que explicó gran parte de la variabilidad observada ( $AIC= 86$ ;  $R^2=80$ ). Los IC fueron asimétricos y no lograron incluir solo uno de los DO, correspondiente a la temporada 1997-98.

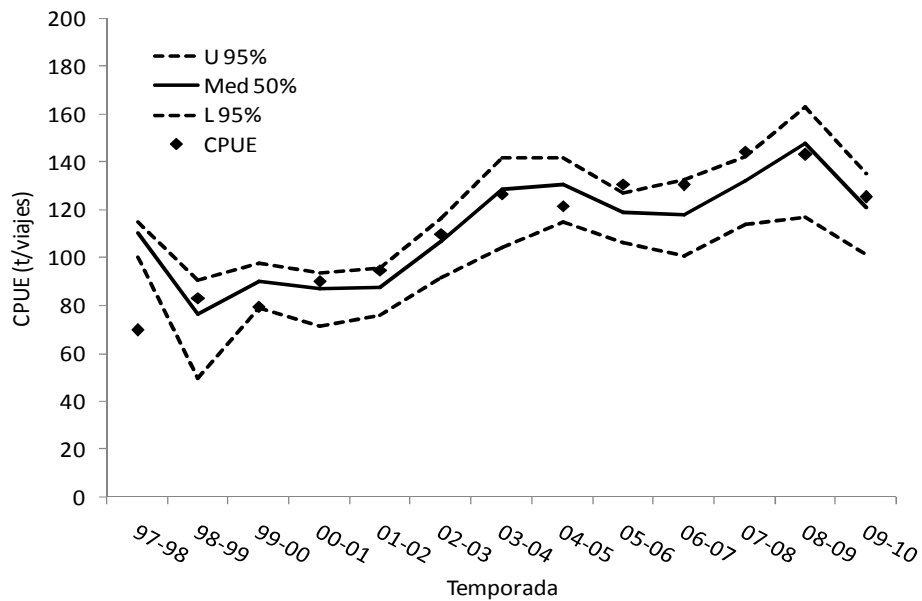


Figura 42. Modelo predictivo anual de CPUE con las tres variables ambientales (TSM, IS, IT) como predictores. Las líneas punteadas muestran los intervalos superior (U) e inferior (L) con el 95% de confianza. Se muestran los datos observados de CPUE (puntos) y la mediana (línea sólida).

Los modelos ajustados mostrados anteriormente para explicar la variabilidad trimestral y anual de CPUE de sardina crinuda se enlistan en la Tabla X. Los modelos implementados con el esfuerzo pesquero e índice de turbulencia tanto anual como trimestral fueron los que mejor se ajustaron a los DO.

Tabla X. Ecuaciones para los modelos de regresión no lineal ajustados a los datos observados para explicar la Captura por Unidad de Esfuerzo de la sardina crinuda (CPUEsc) en función del esfuerzo pesquero (E), la temperatura superficial del mar (TSM), el índice de turbulencia (IT) y el índice de surgencia costero (IS). La notación *Normal* se refiere a la función Normal con los valores indicando la media y la desviación estándar respectivamente. La notación Gamma se refiere a la función Gamma con los valores indicando los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  respectivamente.

Datos	Modelos ajustados
Trimest	$\text{CPUEsc} = (7079.5 * \text{Gamma}(E, 1.3, 13985)) * (5309.68 * \text{Normal}(TSM, 25.1, 3.7)) * (61946 * \text{Gamma}(IS, 0.99, 63558)) * (26548.45 * \text{Gamma}(IT, 1.01, 3337))$
Trimest	$\text{CPUEsc} = (4759.04 * \text{Gamma}(E, 1.39, 313.16)) * (6373.83 * \text{Gamma}(IT, 1.05, 284.71))$
Trimest	$\text{CPUEsc} = (2943.6 * \text{Normal}(TSM, 24.8, 6)) * (2220.7 * \text{Gamma}(IS, 0.99, 8771.9)) * (453.98 * \text{Gamma}(IT, 1.17, 95.4))$
Anuales	$\text{CPUEsc} = (4832 * \text{Gamma}(E, 1.24, 34445.9)) * (47919.8 * \text{Normal}(TSM, 25.4, 3.2)) * (1509.7 * \text{Gamma}(IS, 1.15, 96086.95)) * (77360 * \text{Gamma}(IT, 0.76, 1952.17))$
Anuales	$\text{CPUEsc} = (4780.25 * \text{Gamma}(E, 1.46, 4302.5)) * (33988 * \text{Gamma}(IT, 1.07, 29.39))$
Anuales	$\text{CPUEsc} = (4450 * \text{Normal}(TSM, 26.2, 3.7)) * (5219.27 * \text{Gamma}(IS, 1.3, 16961.9)) * (2634.02 * \text{Gamma}(IT, 0.57, 874.85))$

### 8.6.2. Captura total

También se probaron modelos de regresión múltiple no lineal con los datos agrupados trimestral y anualmente, con la captura como variable dependiente. En este caso es evidente la linealidad entre el esfuerzo pesquero y la captura (Figura 43) por lo que no fue necesaria la técnica ACE para definir la función de transformación del esfuerzo pesquero. La captura se relacionó de la misma manera (no lineal) con las variables ambientales que la CPUE.

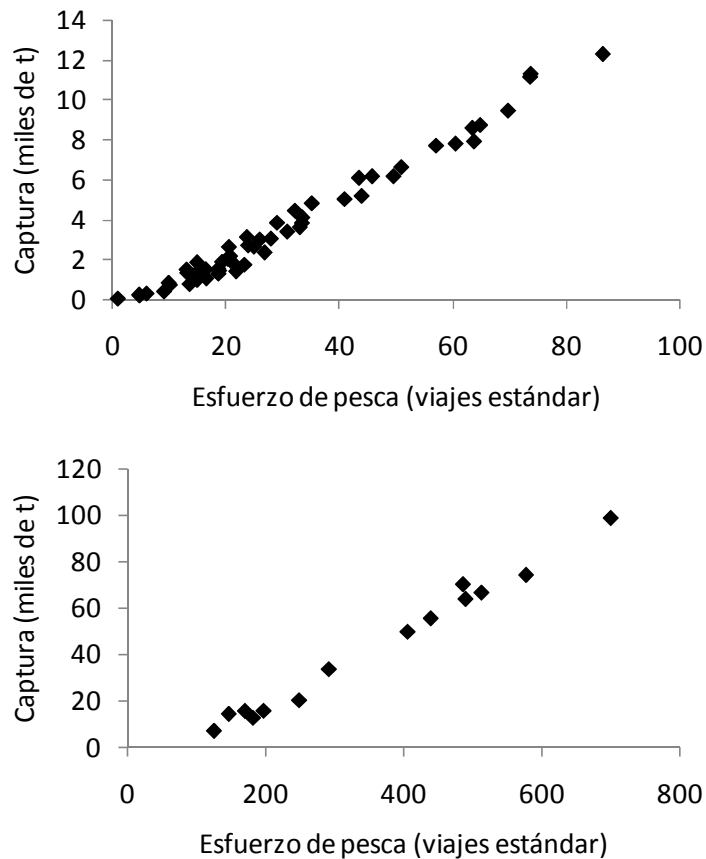


Figura 43. Diagramas de dispersión entre la captura y el esfuerzo pesquero para los datos agrupados trimestralmente (arriba) y anualmente (abajo).

En la Tabla XI se enlistan los modelos implementados con datos trimestrales de captura, esfuerzo y ambientales. El modelo que mostró el menor valor de AIC fue el que se montó con el esfuerzo pesquero y el índice de turbulencia (776). En el que se utilizaron las variables ambientales y el esfuerzo registró el AIC más alto (901) al igual que el que se ajustó solo con las variables ambientales (889).

Tabla XI. Modelos de regresión múltiple no lineal probados con datos trimestrales y la Captura como variable dependiente. Se muestran las variables de los modelos, coeficiente de correlación (%), número de parámetros ajustados y valor del Criterio de Información de Akaike (AIC). El valor más bajo de AIC se señala en negritas.

Modelo	R <sup>2</sup> (%)	Parámetros	AIC
Esfuerzo Pesquero (E)	65	2	791
TSM	19	3	897
I. Turbulencia (IT)	45	3	887
I. Surgencia (IS)	35	3	888
E-IT	95	5	<b>776</b>
E-TSM-IS	90	8	793
E-TSM-IT	98	8	782
TSM – IS - IT	55	9	889
E-TSM-IT-IS	97	11	901

El modelo ajustado con los el esfuerzo pesquero y las tres variables ambientales explicó la mayoría de la variabilidad observada ( $R^2=0.97$ ) pero mostró el mayor valor de AIC (901). Los IC no lograron incluir ocho DO correspondientes a la primera parte del periodo de estudio (Figura 44).

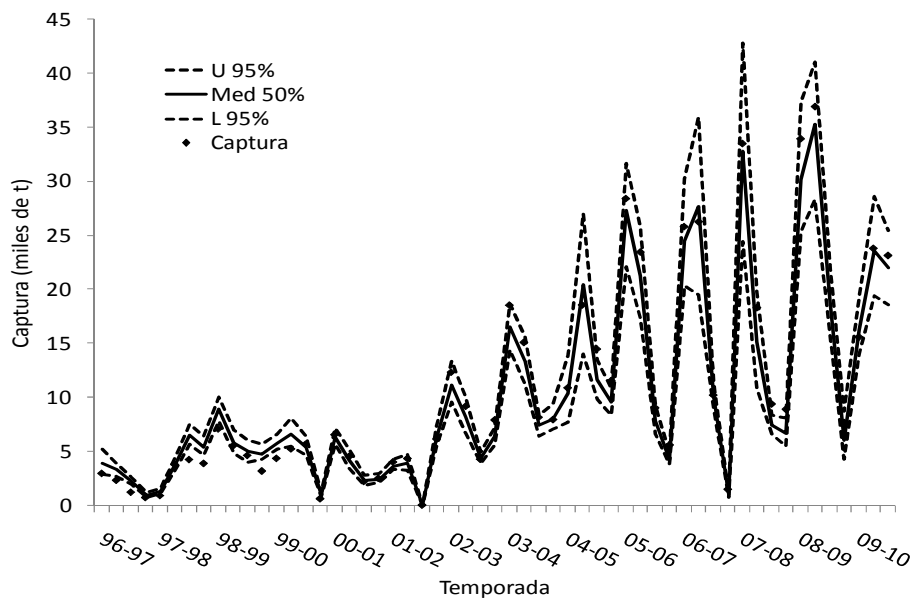


Figura 44. Modelo predictivo trimestral de captura, el esfuerzo y las tres variables ambientales como predictores. Las líneas punteadas muestran los intervalos superior (U) e inferior (L) con el 95% de confianza. Se muestran los datos observados de captura (puntos) y la mediana (línea sólida).

El modelo en el que se utilizó al esfuerzo pesquero e índice de turbulencia como variables predictivas (Figura 45) explicó una buena parte de la variabilidad observada ( $R^2=0.95$ ) y mostró el menor valor de AIC (776). En este caso no se lograron incluir dentro de los IC los mismos ocho datos que se revisaban en el caso anterior.

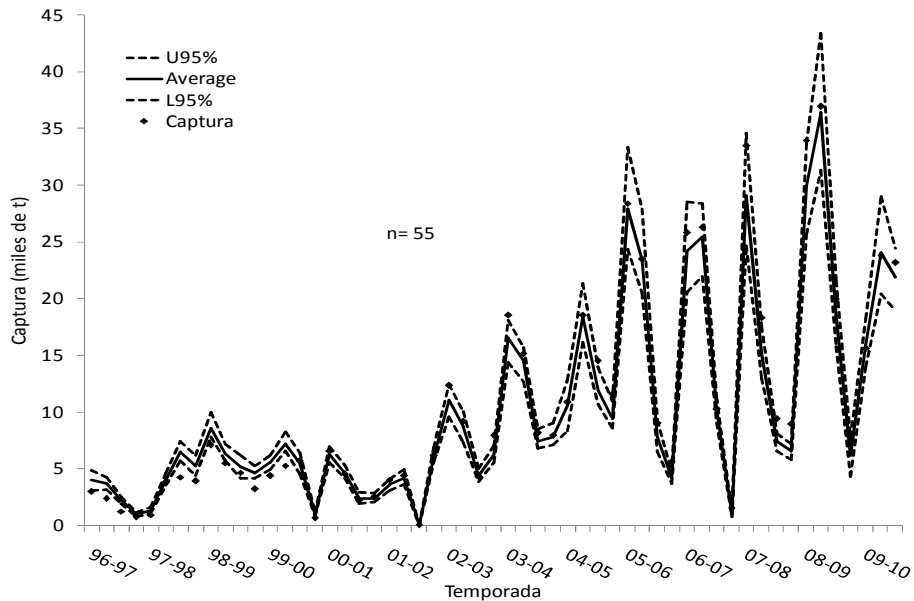


Figura 45. Modelo predictivo trimestral de captura, el esfuerzo y el índice de turbulencia ( $V^3$ ) como predictores. Las líneas punteadas muestran los intervalos superior (U) e inferior (L) con el 95% de confianza. Se muestran los datos observados de captura (puntos) y la mediana (línea sólida).

El modelo que se implementó únicamente con los datos de las variables ambientales explicó cerca de la mitad de la variabilidad observada ( $R^2=0.55$ ) y mostró un alto valor de AIC (889). Los IC fueron demasiado asimétricos y no incluyeron un número importante de DO (16) tanto en la primera, como en la parte final del periodo de estudio (Figura 46).

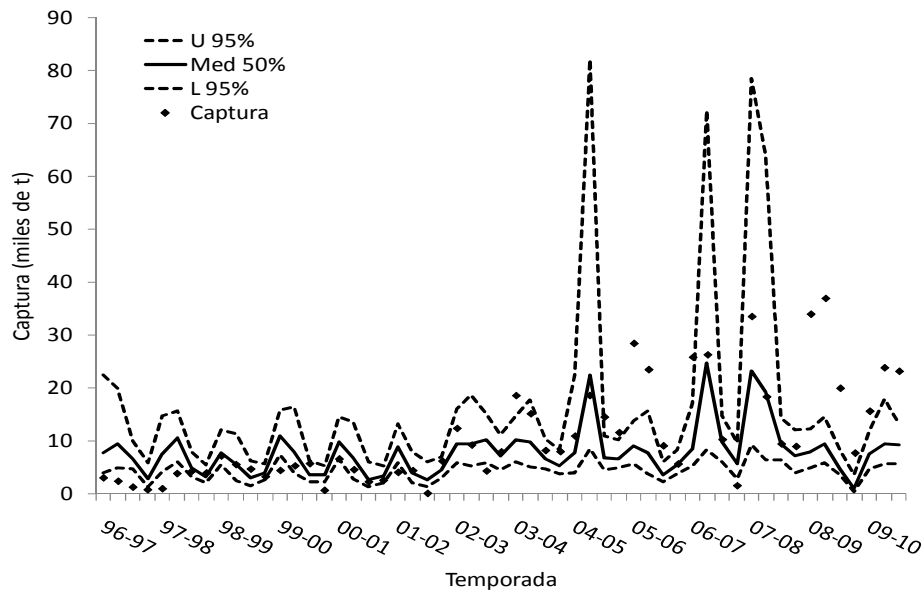


Figura 46. Modelo predictivo trimestral de captura con las tres variables ambientales (TSM, IS, IT) como predictores. Las líneas punteadas muestran los intervalos superior (U) e inferior (L) con el 95% de confianza. Se muestran los datos observados de captura (puntos) y la mediana (línea sólida).

La Tabla XII muestra los modelos que se ajustaron con datos anuales de captura de sardina crinuda. En este caso también se presentó que el mejor modelo fue el que se implementó con los datos del esfuerzo pesquero y el índice de turbulencia (AIC=227). Los modelos que presentaron los más altos valores de AIC fueron en los que se utilizó a la TSM y al índice de surgencia (AIC=288 y 289 respectivamente). El modelo que incluyó a las variables ambientales y pesqueras explicó la mayoría de la variabilidad observada ( $R^2=0.98$ ) y el AIC fue menor con respecto a los anteriores (234).

Tabla XII. Modelos de regresión múltiple no lineal probados con datos anuales y la captura como variable dependiente. Se muestran las variables de los modelos, coeficiente de correlación (%), número de parámetros ajustados y valor del Criterio de Información de Akaike (AIC). El valor más bajo de AIC se señala en negritas.

Modelo	R <sup>2</sup> (%)	Parámetros	AIC
Esfuerzo Pesquero (E)	75	2	230
TSM	15	3	288
I. Turbulencia (IT)	60	3	267
I. Surgencia (IS)	25	3	289
E-IT	95	5	<b>227</b>
E-TSM-IS	90	8	239
E-TSM-IT	97	8	258
TSM - IS - IT	83	9	285
E-TSM-IT-IS	98	11	234

El modelo anual implementado con el esfuerzo pesquero y las tres variables ambientales como predictores explicó la mayoría de la variabilidad observada ( $R^2=0.98$ ) y mostró el tercer valor más bajo de AIC (234) (Figura 47). Los IC para este modelo incluyeron todos los DO y se comportaron simétricamente.

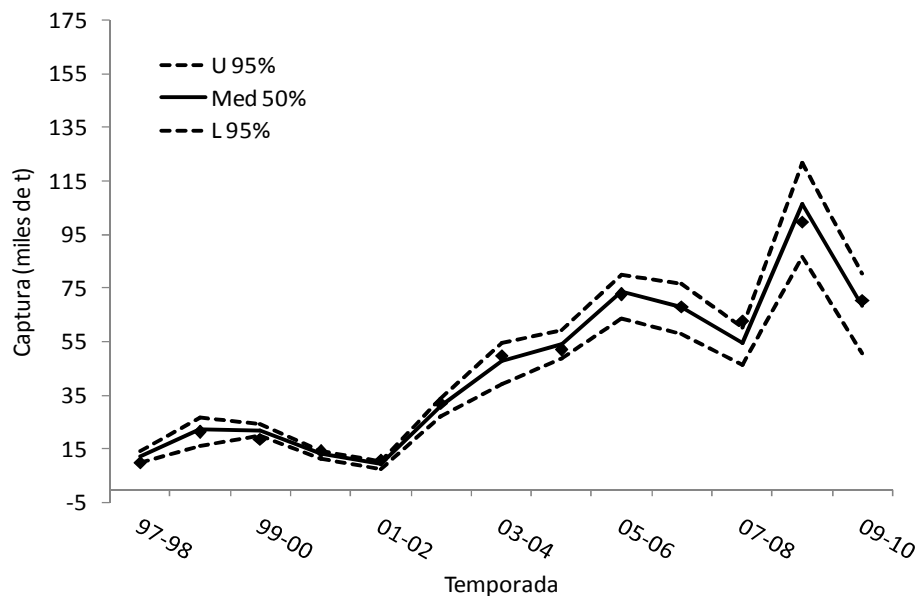


Figura 47. Modelo predictivo de captura anual con el esfuerzo y las tres variables ambientales como predictores. Las líneas punteadas muestran los intervalos superior (U) e inferior (L) con el 95% de confianza. Se muestran los datos observados de captura (puntos) y la mediana (línea sólida).

El modelo ajustado con el esfuerzo pesquero y el índice de turbulencia logró incluir todos y cada uno de los datos dentro de los IC, mismos que no se comportaron simétricamente ya que el IC superior fue más amplio, sobre todo en las últimas cinco temporadas (Figura 48). Este modelo explicó también gran parte de la variabilidad observada ( $R^2=0.95$ ) y mostró el valor más bajo de AIC (227).

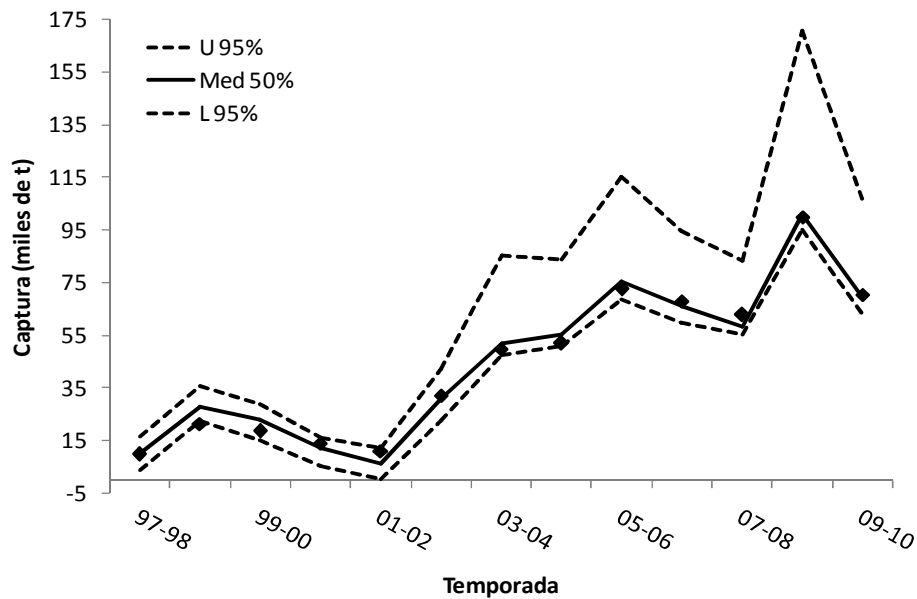


Figura 48. Modelo predictivo de captura anual con el esfuerzo y el índice de turbulencia ( $V^3$ ) como predictores. Las líneas punteadas muestran los intervalos superior (U) e inferior (L) con el 95% de confianza. Se muestran los datos observados de captura (puntos) y la mediana (línea sólida).



El modelo ajustado solo con las variables ambientales explicó más del 85% de la variabilidad observada, aunque el valor de AIC fue alto (285). Los IC del modelo no incluyeron tres datos y no se comportaron simétricamente, ya que el superior fue más amplio en algunos casos (Figura 49).

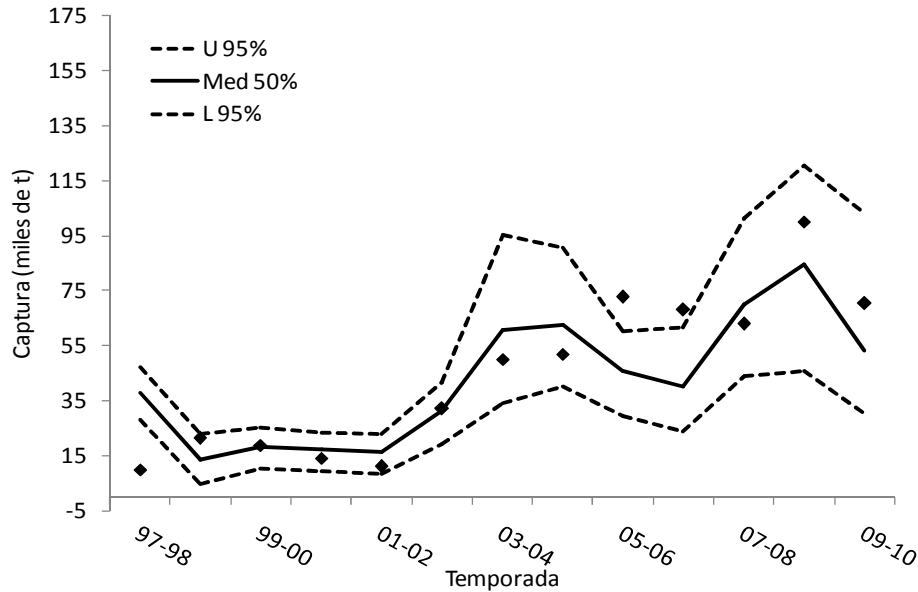


Figura 49. Modelo predictivo de captura anual con las tres variables ambientales (TSM, IS, IT) como predictores. Las líneas punteadas muestran los intervalos superior (U) e inferior (L) con el 95% de confianza. Se muestran los datos observados de captura (puntos) y la mediana (línea sólida).

Los modelos anuales y trimestrales ajustados para explicar la captura de sardina crinuda se enlistan en la Tabla XIII. Los valores de los parámetros en los modelos trimestrales fueron más elevados que los que se ajustaron en los modelos anuales.

Tabla XIII. Ecuaciones para los modelos de regresión no lineal ajustados a los datos observados para explicar y predecir la captura de sardina crinuda (Csc) en función del esfuerzo pesquero (E), la temperatura superficial del mar (TSM), el índice de turbulencia (IT) y el índice de surgencia costero (IS). La notación *Normal* se refiere a la función Normal con los valores indicando la media y la desviación estándar respectivamente. La notación Gamma se refiere a la función Gamma con los valores indicando los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  respectivamente.

Datos	Modelos ajustados
Trimest	$Csc = (203.27 * E + 0.059) * (57.83 * Normal (TSM, 23.84, 3.33)) * (385.58 * Gamma (IS, 0.98, 7406.3)) * (578.37 * Gamma (IT, 1.62, 100.34))$
Trimest	$Csc = (208 * E + 0.06) * (62.38 * Gamma (IT, 1.17, 78.86))$
Trimest	$Csc = (3140.89 * Normal (TSM, 23.21, 3.78)) * (3705.2 * Gamma (IS, 0.98, 9430.85)) * (2715.25 * Gamma (IT, 1.56, 23.69))$
Anuales	$Csc = (0.14 * E - 7.47) * (7873.2 * Normal (TSM, 24.72, 4)) * (10497.6 * Gamma (IS, 1.22, 31715)) * (14987 * Gamma (IT, 0.75, 3249.6))$
Anuales	$Csc = (2525.9 * E - 116935) * (147.61 * Gamma (IT, 0.84, 5676.1))$
Anuales	$Csc = (221512.3 * Normal (TSM, 25, 3.15)) * (1828619.95 * Gamma (IS, 2.84, 13859.1)) * (1828621 * Gamma (IT, 0.004, 39))$

## 9. Discusión

### 9.1. Abundancia (CPUE)

Los resultados del análisis de la CPUE (como índice de abundancia relativa) permitieron identificar un aumento muy importante en la abundancia de los organismos capturados en la zona de estudio durante la primera y segunda mitad del periodo, ya que en 2007 se capturaron casi doce veces más con respecto a lo ocurrido diez años atrás. El incremento observado de la CPUE permite suponer un incremento proporcional de la abundancia de la sardina crinuda en el sur del golfo de California. Durante el periodo de estudio se identificó un comportamiento totalmente diferente del índice de abundancia, por lo que se podría dividir antes y después del 2003. A partir de este año la abundancia del recurso aumentó drásticamente y antes de él, oscilaban en un intervalo significativamente menor. Esta tendencia de la CPUE es muy general, ya que aunque se podría pensar que se superarán las capturas respecto al año previo, lo cierto es que es imposible saber lo que sucederá en el futuro debido a que son organismos altamente sensibles a las modificaciones ambientales (Bakun y Parrish, 1982; Cury *et al.*, 1995; Lehodey *et al.*, 2006; Bakun, 2010; Overland *et al.*, 2010) e históricamente esta pesquería ha presentado fluctuaciones importantes (Jacob-Cervantes, 2010), por lo que las tendencias podrían modificarse en cualquier momento. En términos de captura, en 2003 se capturó casi el doble de lo que se logró en 2002 y así sucesivamente hasta alcanzar más de 100,000 t en 2008, la tendencia fue de aumentar casi 10,000 t por año. En el periodo de estudio, la relación de la captura respecto al esfuerzo presentó una relación lineal, no se ve que al aumentar el esfuerzo decaiga la captura, al parecer no se ha alcanzado un máximo. Los modelos de producción excedente tienen como objetivo, determinar el nivel óptimo del esfuerzo pesquero, sin afectar la productividad a largo plazo del stock, lo que se conoce como rendimiento máximo sostenible (RMS) (Sparre y Venema, 1997). Teóricamente el comportamiento de las pesquerías que describen modelos como el de Schaefer (1954) y Fox (1970), establecen que si se superaran capturas por encima del RMS, el recurso entraría en una etapa de baja abundancia e incluso podría llegar a un colapso debido a la imposibilidad de renovación del recurso ante

tal impacto. Schaefer y Fox encuentran que pesquerías que presentan un crecimiento lineal de la captura respecto al esfuerzo, son pesquerías que se encuentran en fases de crecimiento y/o desarrollo y no han alcanzado el RMS, como lo que se observa en la tendencia analizada en la pesquería de sardina crinuda durante el periodo de estudio. La pesquería de sardina Monterrey en el golfo de California es un ejemplo de evaluar la condición de un stock (Cota-Villavicencio *et al.*, 2010), ya que mediante simulación de rendimiento y biomasa media anual se estableció en 2007 y 2008 el RMS de la pesquería, mismo que fue mayor a la sardina que se capturó en esos años, lo que indicó el buen estado del stock de esta especie en esa época. Aunque en la pesquería de sardina crinuda se han determinado valores del RMS, lo cierto es que con las capturas de los últimos años han sido ampliamente superados.

Explicando la alta abundancia registrada durante la segunda parte del periodo de estudio, se plantean dos teorías: la primera está enfocada en que el aumento en los desembarques de sardina crinuda puede estar relacionado a la alta demanda que ha presentado el recurso en la última década, por lo que el esfuerzo pesquero (viajes) fue aumentando de la misma manera que la captura, y aunque durante el periodo de estudio el número de barcos activos se mantuvo constante (7), los viajes aumentaron proporcionalmente con la captura en los años de alta abundancia. En otras palabras se propone que a pesar de que el recurso era abundante en la década de los 90, no había necesidad de extraer cantidades como las que se obtienen actualmente. En segundo lugar se plantea que la alta abundancia se relacionó en función de la presencia-ausencia del stock, ya que sugerimos que el recurso no era tan abundante en la zona anteriormente, por lo que pudieron ocurrir ciertos eventos en el ambiente que permitieron el éxito reproductivo y/o la permanencia del stock en el área. La FAO (2011), ha reportado un crecimiento a escala mundial en la captura de estas especies a partir del 2005, similar a lo reportado en el presente trabajo. En contraste por ejemplo, en Ecuador la pesca del complejo de especies del género *Opisthonema* (conocida como Pinchagua en aquél país) fue la más importante durante la década de los 80 (p. ej. en 1987 se lograron más de 240,000 t), pero a partir de 1990 la pesquería ha

venido en decremento y no se ha podido recuperar. En 1994 se lograron poco menos de 70,000 t y en 2009 solo se llegaron casi a 22,000 t. Esto puede ser evidencia que podría apoyar la segunda teoría propuesta, ya que el stock puede estar realizando migraciones latitudinales y verticales debidas a múltiples factores, entre los que se encuentran los ambientales.

El análisis por zona de la CPUE permitió identificar la importancia de las zonas III y IV para esta pesquería. Los datos de la zona II fueron suficientes para identificar una tendencia de la CPUE, con alta abundancia a partir de 2001. Las zona I y V presentaron un número más pequeño de datos, lo que pudo ser la causa del comportamiento diferente de la CPUE para estas zonas, en el cual no se observa una tendencia definida. De cualquier manera la CPUE mostró altos valores para las cinco zonas, pero los sitios utilizados en las fases del ciclo de vida de la sardina crinuda (p. ej. sitios de desove y crianza) en la zona de estudio son aún desconocidos, por lo que es importante realizar estudios enfocados a este tema. Se debe mencionar que una fuente de sesgo importante es la dependencia de datos de la pesca comercial, debido a que el puerto de desembarque del recurso y la planta procesadora del mismo, se encuentran en la ciudad de Mazatlán Sinaloa, lo que puede sugerir que la pesca en áreas cercanas al puerto de desembarque (III y IV) puede ayudar a economizar y hacer más eficientes los recursos. Es por esta razón que se debe de contar con datos que representen, dentro de lo posible, homogéneamente las zonas en que se subdivide el área de pesca de la flota sardinera de Mazatlán (p. ej. datos de cruceros prospectivos de investigación).

## 9.2. Temperatura Superficial del Mar

El estudio y permanente monitoreo de la variabilidad ambiental en la zona es una buena opción para recabar la información que permita identificar los eventos climáticos que pueden generar vulnerabilidad o permitir el éxito de la población de la sardina crinuda. Ha sido ampliamente estudiada la influencia de la variabilidad ambiental sobre la dinámica de las poblaciones marinas (Bakun y Parrish, 1982; Cury *et al.*, 1995; Bakun, 1996; Nevárez-Martínez *et al.*, 2001; Morales-Bojórquez *et al.*, 2003; Lehodey *et al.*, 2006; Bakun, 2010; Overland *et al.*, 2010).

El análisis de la TSM por zona de pesca permitió identificar una mayor variabilidad en las áreas del norte de la zona de estudio. Las zonas extremas del norte y del sur (I y V respectivamente) pueden estar amortiguando los impactos de fenómenos oceanográficos para las zonas del centro (II, III y IV), recibiendo sus efectos en menor grado que las anteriores. Las zonas del sur (IV y V) oscilaron en un intervalo más estrecho de temperatura y presentaron una mayor influencia de la contracorriente norecuatorial, dicha corriente ejerce una gran influencia en estas áreas durante la mayor parte del año ya que generalmente se presentaron temperaturas arriba de 22°C. Las zonas del norte (I y II) reciben los efectos principalmente de la corriente de California y presentaron mayor estacionalidad (estación cálida y fría). Por último la zona III presentó temperaturas promedio, ya que presentó mayor influencia de la corriente de California en invierno y de la contracorriente norecuatorial en verano. Estos resultados coinciden con los reportados por Färber-Lorda *et al.* (2010) quienes analizaron la distribución de eufásidos en la entrada del golfo de California y encontraron una distribución muy similar de la TSM en el gradiente Sur-Norte durante el verano. La distribución de la temperatura superficial del mar y el gradiente latitudinal en noviembre y diciembre son también consistentes con lo reportado desde la década de los 70 (Roden, 1972) para las costas frente a los litorales desde el sur de Sinaloa hasta Nayarit.

Como se revisaba anteriormente la zona de estudio está incluida en lo que se conoce como zona de transición de corrientes de masas de agua con distintas características termohalinas. La pesca de sardina crinuda se realiza en aguas muy

cercanas a la costa y de acuerdo a lo mencionado por Färber-Lorda *et al.* (2010), esta zona presenta una menor influencia de fenómenos físicos generados por las corrientes marinas, a diferencia de los eventos que se generan en aguas cercanas a Cabo Corrientes, Jal. y los Cabos, B.C.S. Färber-Lorda *et al.* (2004) reportaron alta abundancia de zooplancton y materia orgánica particulada (MOP) en aguas cercanas a Mazatlán. La MOP sirve como alimento para zooplancton y junto con el fitoplancton forman parte de la dieta de la sardina crinuda (Jacob-Cervantes *et al.*, 1992; López-Martínez *et al.*, 1999). Por lo tanto la alta abundancia de MOP y consecuentemente de zooplancton coincide con la alta abundancia de sardina crinuda en la zona III y IV registradas frente a las costas del sur de Sinaloa.

El fenómeno climático conocido como El Niño provoca, entre otros efectos, la disminución de la productividad primaria (Badan, 2003). La población de sardina crinuda además de presenciar un aumento de la temperatura en las aguas que habita, se enfrenta a una gran escasez de alimento, lo que podría aumentar las tasas de mortalidad y aumentar las tasas de migración. En la pesquería de anchoveta en las costas de Sudamérica, ha sido documentado (Ñiquen y Bouchon, 2004) el colapso de la pesquería debido al aumento desmedido del esfuerzo pesquero a inicios de la década de los 80. Aunado a esto, se registró uno de los eventos El Niño más intensos, por lo que tanto la mortalidad natural como la que se generó por la actividad pesquera en esa época, impactaron gravemente las poblaciones de anchoveta en la zona, colapsando la pesquería y consecuentemente la economía de los países que la explotaban como Perú. Por tal motivo se deben identificar las cuotas óptimas de captura para la sardina crinuda para evitar sucesos de este tipo, tratando de reducir la presión de la pesca sobre la población según las características climáticas.

Durante la presencia del fenómeno de El Niño 1997-98 se registró un aumento significativo de la TSM en las áreas que componen la zona de estudio. Las cinco áreas presentaron anomalías más intensas en un gradiente Sur-Norte, en otras palabras, se registraron anomalías más intensas en las zonas del norte (>5 °C) que en las del sur (>2.5 °C). Ya se ha reportado el incremento de la TSM en

magnitudes similares, así como la inhibición de eventos de surgencia frente a las costas de Cabo Corrientes, Jal. (Aguirre-Gómez *et al.*, 2003). Las zonas centrales presentaron variabilidad intermedia de la TSM respecto a las zonas del norte y sur. Cuando los eventos de El Niño y La Niña se presentaron con intensidad mayor a 2.5 °C (por encima o por debajo de la media respectivamente) impactaron negativamente la abundancia del recurso.

El fenómeno de El Niño 1997-98 se caracterizó por ser uno de los más intensos y duraderos que han ocurrido en los últimos 50 años (Ñiquen y Bouchon, 2004). Durante la presencia de dicho evento se vieron afectadas las aguas del Pacífico mexicano en general (Badan, 2003) por lo que la sardina crinuda pudo alejarse de las costas y de las zonas donde habitualmente se encuentra, hacia latitudes más altas o más alejadas de la costa, compitiendo en ambientes nuevos y a su vez se hace menos disponible para la flota sardinera. En la temporada 1997-98 se lograron altas capturas de sardina crinuda en las costas de Sonora (62,000 t) (Cisneros-Mata *et al.*, 2000); para el puerto de Mazatlán se reportaron en la misma temporada solamente 5,619 t. Esta captura fue significativamente menor con respecto a la que se logró anteriormente (>12,000 t), por lo tanto la baja abundancia de sardina crinuda reportada en la zona pueden ser explicadas por un movimiento migratorio que pudieron haber realizado hacia el norte. Este comportamiento ha sido sugerido en pesquerías similares desarrolladas en otras partes del mundo (Ñiquen y Bouchon, 2004), ya que cuando se presentan características térmicas fuera de lo normal, los peces pueden realizar movimientos hacia otras latitudes, o incluso migraciones verticales hacia el fondo, lo que los hace menos vulnerables a la pesca. Aunado a esto en otros sitios se han reportado incrementos en la captura de sardina crinuda y bocona cuando se presentan eventos climáticos cálidos (El Niño 1997-98 y 2004-05), como es el caso de la pesquería de pelágicos menores en Bahía Magdalena, ya que proponen un desplazamiento latitudinal de estas especies a las costas de Baja California Sur procedentes del sur de Sinaloa (Félix-Uraga *et al.*, 2012).



Adicionalmente se ha propuesto una transición cupleidos-engráulidos durante fenómenos El Niño (Sánchez-Velasco *et al.*, 2004), es decir, que al quedar sitios vacíos abandonados temporalmente, en este caso por la sardina crinuda (cupleido), se puede dar una proliferación de especies oportunistas, un engráulido conocido como “sardina bocona” (*C. mistycetus*) debido a sus altos índices de abundancia en estas temporadas (Jacob-Cervantes, 2010) ya que al parecer las distintas especies de anchoveta son mucho menos sensibles a cambios de temperatura que las de sardina (Sánchez-Velasco *et al.*, 2004). También se ha planteado que en el golfo de California central, los fenómenos climáticos con características térmicas negativas (La Niña) pueden favorecer la proliferación de organismos con afinidades de temperatura templadas; cuando se presenta El Niño ocurre lo contrario, ya que se registran más frecuentemente especies con tendencias a temperaturas tropicales (Sánchez-Velasco *et al.*, 2004). En el sur del golfo de California no se presentan estas tendencias, ya que la sardina crinuda es una especie tropical, pero se retira de esta región durante la presencia de eventos cálidos de gran intensidad, probablemente por la atenuación de fenómenos de surgencia y sucesivamente el impacto que ejerce sobre la productividad primaria (Aguirre-Gómez *et al.*, 2003; Manzano-Sarabia *et al.*, 2008).

En los últimos años han sido más frecuentes los eventos climáticos con temperaturas correspondientes al fenómeno de La Niña, los que se han presentado en la zona de estudio a partir del año 2000. Es probable que durante la presencia de este tipo de fenómenos la sardina crinuda se desplace hacia latitudes más bajas y cálidas o más cercanas a la costa, lo que las hace más vulnerables a la pesca y se ve reflejado en altas capturas (Ñiquen y Bouchon, 2004). Esto podría explicar los más altos valores de CPUE registrados durante el periodo de estudio en la temporada 2007-08, y aunque en esta época el fenómeno de La Niña fue de gran intensidad, la duración fue menor a un mes, por lo que la sardina crinuda no se alejó demasiado de la zona donde habitualmente la encuentra la flota sardinera de Mazatlán.

Las especies del género *Opisthonema* aquí estudiadas presentan una distribución tropical, desde el golfo de California hasta las costas de Perú (Fisher *et al.*, 1995). En el presente estudio la máxima abundancia del recurso se encontró asociada a temperaturas invernales (<21°C) que son distintas a las que se registran en latitudes ecuatoriales en la misma estación del año (>24). El hecho de tener alta abundancia dentro de este intervalo de temperatura permite suponer que la modificación de algunos factores climáticos o ambientales, han permitido la permanencia y proliferación del stock en la zona, probablemente a través de un proceso adaptativo hacia un cambio de régimen ambiental, así como también un cambio de régimen de especies, ya que hasta el 2002 la sardina bocona (*C. mistycetus*) dominaba el ecosistema y se reflejaba en capturas importantes, pero a partir del 2003 disminuyó casi en un 90% la presencia de esta especie de anchoveta y de manera sincronizada las de sardina crinuda aumentaron paulatinamente hasta lograr una abundancia récord en la historia de esta pesquería (Jacob-Cervantes, 2010). Este proceso en el cual se presenta una reversión de especies ya se ha descrito anteriormente (Lluch-Belda *et al.*, 1989).

### **9.3. Surgencia y Turbulencia**

Los resultados encontrados con el análisis del índice de turbulencia sugieren que durante los últimos 20 años se han registrado cambios en el ambiente que han permitido el éxito del stock de la sardina crinuda en la zona, *i.e.* un cambio de régimen en el patrón de los vientos (Figura 50, abajo). Es evidente el cambio en la actividad del viento que provoca la mezcla de las capas superficiales del mar. A partir de la década de los 90 el régimen de vientos disminuyó drásticamente, durante el periodo de estudio se registró un segundo debilitamiento de la velocidad del viento (enmarcado en la Figura 50) y aunque fue de menor magnitud que el anterior, es justo en esta época (desde 2003) cuando se registró la abundancia más importante en la historia de la pesquería y el cambio de régimen de especies. Según los datos meteorológicos obtenidos del observatorio de Mazatlán, durante el periodo de estudio no se ha registrado, de manera general, que la acción del viento o la temperatura generen condiciones no propicias para el establecimiento

del stock en la zona, sino todo lo contrario. Se debe continuar monitoreando este tipo de variables, dada la imposibilidad de predecir los fenómenos naturales, así como el hecho de desconocer las causas que provocan los llamados cambios de régimen en las especies de pelágicos menores, por lo que la composición de especies que son objeto de esta pesquería puede modificarse inesperadamente de una temporada a otra y obtenerse especies que habían estado ausentes en la zona incluso por varios años.

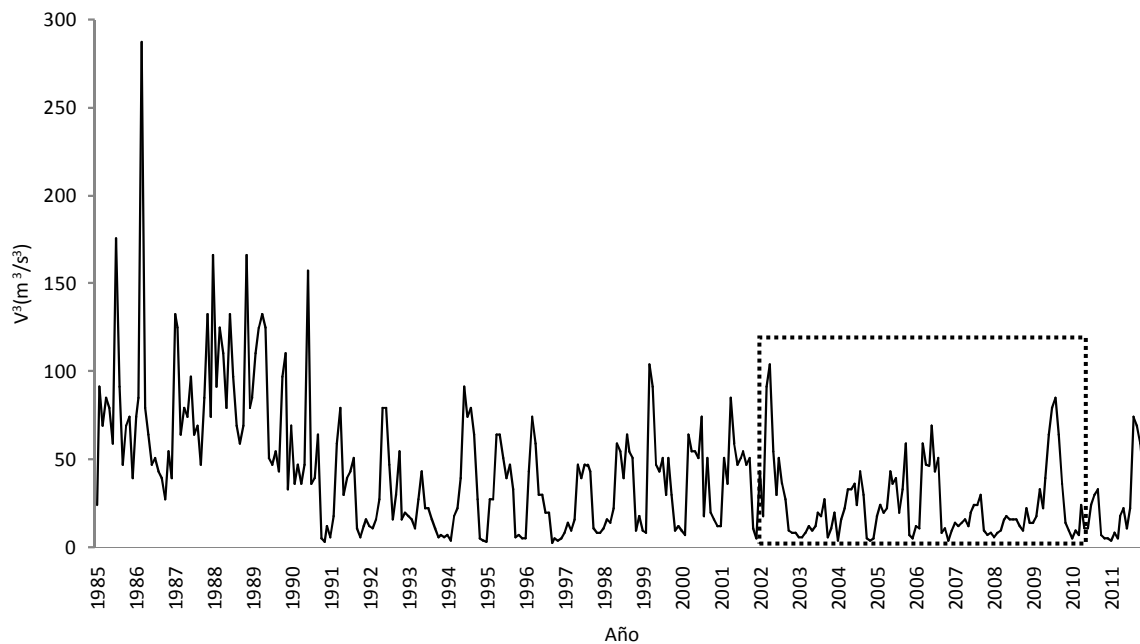


Figura 50. Índice de turbulencia mensual histórico para la zona de Mazatlán, Sin. 1985-2011.

Vallarta-Zárate (2010) reportó para la sardina crinuda, altas frecuencias de organismos en Fase IV de reproducción (pre-desove) durante prácticamente todo el año, destacando dos picos con las máximas frecuencias de la temporada durante mayo-junio el primero y agosto-septiembre el segundo. La región de Mazatlán se ha caracterizado, sobre todo en la última década, por su régimen de vientos de mediana y baja intensidad durante la mayor parte del año. Los picos de reproducción mencionados anteriormente se registraron cuando en Mazatlán se alcanza una “estabilidad” en cuanto al índice de turbulencia y que en promedio no fue mayor a 5 m/s. El periodo del año donde se registran los mayores afloramientos de agua de fondo rica en nutrientes es a partir de mayo, por lo tanto

el desove de estas especies puede estar sincronizado con la actividad del viento, de la misma manera que lo hacen otras especies de pelágicos menores en sistemas de surgencia mucho más dinámicos y activos (Alheit y Niquen, 2004). Anteriormente se ha reportado que los periodos de mayor actividad de fenómenos de surgencia en la zona sur del golfo es en mayo, luego viene un periodo de relajamiento en junio y prácticamente surgencias nulas en noviembre (López-Sandoval *et al.*, 2009b) lo que coincide con baja abundancia de sardina crinuda en octubre y noviembre. También se ha documentado la circulación del viento paralelo a la costa en el sur del golfo de California y se encontró una zona de afloramientos a más de 80 km frente a las costas del sur de Sinaloa (Kessler, 2006); este estudio coincide con los resultados obtenidos de los periodos de los fenómenos de surgencia en la región del sur del golfo de California y que se relacionaron con alta abundancia del recurso sardina crinuda en las áreas donde se generan. El hecho de tener altos niveles de abundancia con índices de turbulencia bajos puede ser explicada basándose en teorías propuestas por varios autores (May, 1974; Lasker, 1978; Peterman y Bradford, 1987; Cury y Roy, 1989) en la cual se sugiere que la turbulencia en la capa eufótica incrementa la mortalidad larval durante lo que han llamado “periodos críticos” (Hjort, 1913; May, 1974) en el desarrollo de estos peces, por lo que adaptativamente se pueden estar sincronizando los eventos relacionados a la reproducción con actividades del viento moderadas en la zona. Otra posibilidad es que esta zona puede ser el sitio de crianza de alevines y juveniles o se trate de una zona desove, por lo que son necesarios otros estudios que permitan sustentar esta teoría para garantizar la protección de sitios *clave* en el desarrollo y dinámica de la población. Las condiciones identificadas mediante el análisis del índice de turbulencia, permiten sugerir que las condiciones que se presentaron en el sur de Sinaloa y Nayarit dieron la pauta para el éxito reproductivo de la sardina crinuda.

El análisis del índice de surgencia permitió identificar las máximas actividades de surgencia durante el invierno y la primavera, coincidiendo con los resultados obtenidos por García-Reyes (2005) quién reportó la circulación de los vientos en la zona. Durante la temporada de pesca de sardina crinuda, se obtienen los más

altos valores de abundancia precisamente en estas estaciones del año. López-Sandoval *et al.* (2009) identificaron para el sur de Sinaloa, Nayarit y Jalisco dos franjas paralelas a la costa con diferentes características del movimiento del agua en verano, mediante el análisis de imágenes satelitales y la obtención de datos *in situ* a través de cruceros oceanográficos. Una de las franjas presenta un transporte neto de agua *costa-adentro*, donde no se generan condiciones propicias de alimentación, ya que los nutrientes se mueven hacia capas más profundas. La otra presenta un componente *costa-afuera*, que sirve como un índice de la cantidad de agua que se desplaza verticalmente desde el fondo y que es rica en nutrientes. La primera fue ubicada desde la costa y hasta 40 mn mar adentro y la segunda a más de 40 mn y hasta un máximo de 80 mn aproximadamente. Con los resultados obtenidos en ese estudio (López-Sandoval *et al.*, 2009b) se puede suponer que en el verano la sardina crinuda está utilizando como zona de desove las 40 mn más próximas a la costa, lo que coincide con la baja actividad del viento registrada en frente a las costas de Mazatlán. Aunque el alimento en ésta zona puede ser menos abundante, se puede garantizar el desarrollo de huevos y larvas por la baja actividad del viento, reduciendo la mortalidad larval y la dispersión de huevos y partículas alimenticias (Bakun, 1996). Una vez que los adultos han desovado en esta área se alejan de la costa donde se presentan fenómenos de surgencia (>40 mn mar adentro), lo que coincide con los bajos niveles de abundancia de sardina crinuda registradas a partir de mayo y hasta octubre-noviembre que inicia la siguiente temporada de pesca, ya que generalmente la flota sardinera no busca el recurso en aguas tan alejadas a la costa (com. pers. M. Jacob-Cervantes).

Como se ha revisado anteriormente, durante el periodo de estudio se han generado afloramientos y turbulencias de mediana y baja intensidad, adecuadas para el establecimiento de la sardina crinuda en la zona. Mediante el análisis realizado con ACE, se determinó un intervalo óptimo del índice de surgencia (70-90 m<sup>3</sup>/s), turbulencia (0-30 m<sup>3</sup>/s<sup>3</sup>) y de temperatura superficial (25-26 °C) para estas especies. Lo anterior puede ser interpretado en función de lo que se ha definido como una “ventana ambiental óptima” (Cury y Roy, 1989). Originalmente

este concepto se propuso únicamente para encontrar valores óptimos del índice de surgencia, pero se ha utilizado también con bases de datos de temperatura superficial del mar y del índice de turbulencia (Nevárez-Martínez *et al.*, 2008). Nevárez-Martínez *et al.* (2008) reportaron para la sardina Monterrey (*S. sagax*) intervalos óptimos de surgencia entre 60-80 m<sup>3</sup>/s y de temperatura 24 °C aprox. en el golfo de California; Cury y Roy (1989) reportaron que el índice de surgencia óptimo para esta misma especie osciló entre 100-120 m<sup>3</sup>/s en California. Los afloramientos para sardina crinuda en los cuales se registró la mayor abundancia fueron de entre 70-90 m<sup>3</sup>/s por cada 100 m de línea de costa, lo que hace suponer que requieren zonas de menor turbulencia que otras especies de sardina con respecto a lo que reportan Cury y Roy (1989), pero es consistente con lo reportado por Nevárez-Martínez *et al.* (2008) en el golfo de California. La región del Pacífico mexicano no es reconocida por ser una zona de alta productividad primaria (Stevenson, 1970). Con el análisis de las variables ambientales, CPUE y captura de sardina crinuda en el sur del golfo de California, se propone que durante los últimos años en esta zona se pueden estar desarrollando las condiciones óptimas que están permitiendo el crecimiento del stock de estas especies. Durante la presencia de La Niña de intensidad media y baja (p. ej. durante las temporadas entre 2000-2003) el viento generó turbulencias de mediana intensidad, lo que pudo proveer las condiciones que permitieron el establecimiento del stock en la zona y el posterior incremento en la CPUE, ya que durante este fenómeno se ha visto que la intensidad de los vientos se incrementa, aumentando la productividad en zonas costeras donde se generan afloramientos de agua de fondo (Philander, 1990). En otras palabras se plantea que durante los últimos años aparentemente la abundancia de sardina crinuda se encuentra en crecimiento, debido a que las condiciones ambientales han presentado valores cercanos a los que se proponen dentro de la ventana ambiental óptima para estas especies, en las cuáles estos organismos han encontrado las condiciones idóneas para el desarrollo y/o crecimiento de su población. Durante el segundo semestre de 2009 el viento generó una inestabilidad importante sobre la columna de agua (>120m<sup>3</sup>/s<sup>3</sup>), lo que pudo afectar la presencia del recurso en los meses posteriores y se reflejó en la

baja abundancia registrada en 2010. En ésta época los altos valores del índice de turbulencia pudieron afectar la reproducción del recurso, dispersando huevos y larvas y consecuentemente se pudo presentar un reducido reclutamiento. Esto se tradujo en bajos niveles de productividad del recurso en la siguiente temporada de pesca, que en este caso fue en la de 2010, es por esta razón que los modelos predictivos (analizados más adelante) se implementaron con datos ambientales con hasta una temporada de retraso. Es importante mencionar que el origen de las surgencias que se generan en la zona puede ser distinto a la acción del viento. Fiedler (1984) encontró que en aguas cercanas a Cabo Corrientes se generan fenómenos de surgencia por la interacción entre las corrientes costeras y la fisiografía del área. La relación de la abundancia de sardina crinuda con zonas que presentan condiciones de surgencia puede ser aún más estrecha si se consideraran otros factores que permiten el desarrollo de estos eventos.

Es importante resaltar que la sardina crinuda incluye a las tres especies del género *Opisthonema* y por lo tanto cada especie debería tener sus propios intervalos ambientales óptimos y por supuesto las actividades y zonas reproductivas pueden variar según la especie de la que se trate. Para lograr un manejo mucho más adecuado del recurso, se deben reconocer los parámetros e intervalos óptimos para cada una de ellas. A nivel mundial la pesquería del complejo de especies del género *Opisthonema* es reportada como sardina crinuda, debido a que se capturan en conjunto y solo se distingue entre especies mediante el conteo de branquiespinas, proceso que se realiza en laboratorio. Dado que los datos utilizados en este estudio proceden de la pesca comercial, también sería muy complicado separar el esfuerzo que se ejerce a cada especie, es por ello que en el caso de esta pesquería se trabaja con los datos agrupados para las tres especies, aunque no se debe descartar un estudio mucho más fino para estos organismos.

Se deben tener muy presente y reconocer las escalas de tiempo y espacio que manejan las distintas variables utilizadas en este estudio. La turbulencia es un factor importante de mortalidad en larvas y puede estar actuando en cuestión de



días. Probablemente el cambio de régimen en los vientos que se ha mencionado anteriormente ha dado la pauta para permitir un mayor número de desoves exitosos en la zona de estudio. La variabilidad del reclutamiento puede ocurrir en escalas más amplias y eventualmente se reflejará en bajos índices de abundancia de una temporada de pesca a otra. Las variaciones en el índice de surgencia pueden ser más variables en una escala intra anual y en su defecto en cada temporada de pesca, estos fenómenos generados por la acción del viento pueden ser beneficiosos en una escala mayor de espacio y de tiempo (Bakun y Parrish, 1982) y por lo tanto garantizar la disponibilidad de alimento en temporadas posteriores, siempre y cuando no se presenten en el momento en el que los organismos se encuentren desovando o durante la alimentación de las larvas. Lo mismo sucede con los fenómenos de El Niño y La Niña que pueden estar impactando la zona de estudio hasta seis meses a partir de que se registraron en el Ecuador (López-Sandoval *et al.*, 2009b) y que generarán las condiciones idóneas o poco benéficas (según el fenómeno y su intensidad) para el desarrollo de los huevos, larvas, juveniles, etc. y que determinarán la abundancia disponible para la pesca en temporadas posteriores. La temperatura superficial del mar registrada con satélites, puede ser una fotografía de la superficie del mar en un momento dado y si tenemos que la eclosión y otros procesos que se realizan durante el desarrollo pueden estar afectados por la temperatura (Lasker, 1978) la escala de tiempo se reduce a solo algunos días o incluso algunas horas.

El comportamiento de la pesquería de sardina crinuda no puede ser catalogado como un hecho aislado, ya que en los últimos años las pesquerías de otros organismos acuáticos en México y el mundo han mostrado incrementos importantes (FAO, 2011). En 2008 y 2009 la pesca de pelágicos menores se incrementó en todo el país alrededor de un 25% (SAGARPA, 2011), al igual que la sardina crinuda del sur del golfo de California, lo que puede ser explicado por la influencia de factores abióticos sobre la abundancia de organismos que componen los ecosistemas de México y el mundo. Es importante monitorear permanentemente la variabilidad ambiental que se registra en cada región del país, debido a la modificación del sistema climático global que se ha presentado



en últimas décadas, ya que entender el impacto que se ejercerá sobre las poblaciones no solo de organismos acuáticos sino también terrestres, puede ser pieza clave para proteger y aprovechar sustentablemente los recursos naturales.

#### **9.4. Modelos predictivos de CPUE y captura**

En los modelos presentados en este trabajo se implementaron diferentes combinaciones de las variables utilizadas para explicar y tratar de predecir la captura y la CPUE. Aunque los modelos ajustados solo con las variables ambientales lograron explicar la mitad de la variabilidad observada, o en algunos casos tal vez menos, es importante considerar este tipo de modelos con datos independientes a la pesquería, para tratar de identificar el papel que juega la variabilidad ambiental sobre la abundancia de sardina crinuda y tener una gama de información que ayude en la toma de decisiones sobre el manejo de su pesca.

Los modelos predictivos anuales y trimestrales se implementaron con datos ambientales retrasados (un año y un trimestre), es decir, se entiende que la variabilidad ambiental que se registró en cierto año puede ser capaz de diagnosticar la abundancia o la captura del año posterior, explicado en términos de que las condiciones ambientales y marinas registradas se relacionan directamente con la producción del ecosistema y por lo tanto con la variabilidad del reclutamiento y otras cuestiones biológicas y pesqueras (Cury y Roy, 1989; Roy *et al.*, 1992; Morales-Bojórquez *et al.*, 2003; Guisande *et al.*, 2004; Lehodey *et al.*, 2006; Bakun, 2010). Se ha propuesto para estas especies que el reclutamiento puede estar influenciado por las condiciones ambientales registradas probablemente en la temporada de pesca o en el trimestre anterior (com. pers. M. Jacob-Cervantes). La implementación de los modelos que pronosticaron la CPUE y la captura trimestral resultaron ser más complicados de ajustar debido a la gran variabilidad que se presenta dentro de cada temporada de pesca. Los modelos anuales que se proponen, cumplen con un número mínimo de observaciones, por lo tanto se debería seguir actualizando para lograr hacer más robustos los resultados que arrojen.

En principio la mayoría de las técnicas utilizadas en este estudio estaban enfocadas al entendimiento de los patrones de comportamiento del reclutamiento (Cury y Roy, 1989), pero resultaron ser una buena opción para entender otras variables como la captura y la CPUE. En la pesquería de sardina Monterrey (*S. sagax*) en el golfo de California (Nevárez-Martínez *et al.*, 2008), se desarrollaron varios modelos de regresión múltiple no lineal para explicar la CPUE y la captura con respecto a variables ambientales y al esfuerzo pesquero. El modelo que mostró mejores resultados para esta especie, respecto a los datos observados fue el que se ajustó con el índice de surgencia y la temperatura de la superficie del mar ( $R^2 = 0.834$ ) para la captura de este recurso. Cury y Roy (1989) implementaron un modelo para explicar el comportamiento de la CPUE de sardinelas (*Sardinella aurita* y *S. maderensis*) capturada en las costas de Senegal y Ghana, obteniendo un alto porcentaje de la variabilidad observada (97% y 94% respectivamente). Evidentemente estos modelos se implementaron para entender el comportamiento de una sola especie. En este estudio se intentaron montar los modelos para la captura y la CPUE de las tres especies de sardina crinuda, claramente resultó ser mucho más complicado, pero a pesar de que algunos modelos no mostraron resultados claros (como los que se ajustaron solamente con variables ambientales), es un primer esfuerzo para entender la pesca de este recurso que ha ganado importancia en los últimos años. Al estudiar las especies por separado se podría identificar el momento y los valores de aquellas variables que en algún momento provocan la caída de la abundancia de una especie y benefician la de otra.

Los modelos implementados para sardina crinuda del sur del golfo de California, exhibieron excelentes resultados ya que explicaron gran parte del comportamiento de las capturas (hasta 98%) y la CPUE (hasta el 85%). Aunque es un primer acercamiento al conocimiento de este recurso con este tipo de técnicas matemáticas y estadísticas, es importante considerar la gran variabilidad que presentan no solo las capturas, sino la naturaleza de un momento a otro, por lo tanto los resultados deben ser utilizados en conjunto con otros análisis que permitan contrastar y eventualmente sustentar la información obtenida. Los

modelos predictivos aquí propuestos a pesar de que son herramientas poderosas que permiten tener estimaciones acerca del éxito o fracaso de futuras temporadas de pesca, deben ser interpretados con cautela ya que debido a la cantidad de variables que manejan, resultó muy complicado lograr un ajuste adecuado para los parámetros que requerían las funciones de distribución de cada una de las variables y por lo tanto la complejidad y la incertidumbre aumentan de la misma manera. Una parte importante en la construcción de modelos es la validación con alguna metodología para evaluar su funcionamiento (Hastie y Tibshirani, 1990; Zar, 1995) y los contrastes entre los datos calculados que mostraron los modelos con los datos observados de la pesquería. En el presente estudio no se efectuó este importante proceso para lograr lo que se conoce propiamente como un *modelo predictivo*, es por ello que se deben validar antes de utilizarlos para los fines que fueron creados. También es recomendable continuar actualizándolos con los datos ambientales y de la pesquería para robustecer sus resultados.

Los modelos con el esfuerzo pesquero y el índice de turbulencia como variables predictivas de captura y CPUE, fueron los más recomendables para realizar las predicciones de abundancia del recurso (según el criterio de información de Akaike). La CPUE y como su nombre lo indica, dentro de su cálculo tiene implícito el valor del esfuerzo pesquero ( $t/viajes$ ), por lo tanto puede resultar contradictorio la implementación de modelos con fines de predicción de CPUE que incluyan el esfuerzo como variable predictiva. Lo anterior se traduce en lo que se conoce como sobre-definición del modelo (Hastie y Tibshirani, 1990; Zar, 1995). En el presente trabajo se implementó el algoritmo ACE y se ajustaron modelos de CPUE utilizando el esfuerzo para explicar su variabilidad con el fin de contrastar los resultados obtenidos, con los que se han obtenido en otros estudios similares (Cury y Roy, 1989; Nevárez-Martínez *et al.*, 2008). Cury y Roy (1989) encontraron relaciones negativas entre la CPUE y el esfuerzo pesquero, es decir, al aumentar el esfuerzo sobre el recurso la CPUE disminuyó paulatinamente. Nevárez-Martínez *et al.* (2008) encontraron una relación tipo domo entre ambas variables, de la misma manera el índice de abundancia (CPUE) se desploma al aumentar el esfuerzo pesquero.

Como se mencionaba anteriormente, en este trabajo encontramos un efecto directo entre el esfuerzo pesquero y la captura. Hasta este momento, los modelos predictivos mostraron siempre una tendencia de aumento de la captura si se aumenta el esfuerzo de pesca en la misma magnitud, lo cual es prácticamente imposible en la naturaleza. Es fundamental entender que las estimaciones que arrojan los análisis realizados con la CPUE pueden presentar cierto grado de incertidumbre, sobre todo en pesquerías de organismos altamente migratorios y con hábitos gregarios (Harley *et al.*, 2001). En la pesca de pelágicos menores la gran mayoría de los lances son exitosos, ya que generalmente las flotas sardineras realizan la maniobra pesquera una vez localizado el recurso (ya sea por métodos hidroacústicos o de manera visual al observar la brisa que levantan los mismos peces).

La *capturabilidad* juega un papel fundamental por ser un concepto que mide la interacción entre la abundancia del recurso y el esfuerzo pesquero (Arreguín-Sánchez, 1996). Entonces, como la eficiencia con que se captura en esta pesquería es muy alta, se puede alterar la relación entre la CPUE y la abundancia. Se ha visto que en clupeidos puede aumentar la capturabilidad cuando la abundancia decrece (Arreguín-Sánchez, 1996), por lo que este caso el concepto es dependiente de la densidad de población. También es muy común encontrar relaciones CPUE-abundancia de *hiperestabilidad*, donde se presentan altos valores de CPUE mientras que la abundancia verdadera declina, esto puede generar graves problemas para la población al sobre-estimar la biomasa y sub-estimar la mortalidad por pesca (Harley *et al.*, 2001). Es por ello que para tener un mejor manejo de la pesquería se debe contar con otras fuentes de información biológica y pesquera de la sardina crinuda (e.g. cruceros de investigación) ya que considerar en sentido estricto que las altas capturas equivalen a altas abundancias, puede conducir a una mayor explotación y consecuentemente se puede presentar una sobre-pesca, afectando tanto al stock de sardina como al sector industrial que extrae el recurso.

A pesar de las desventajas que se presentaron al analizar el comportamiento de la CPUE y de que no es recomendable utilizar datos con señales de relaciones de hiperestabilidad entre la captura y la abundancia verdadera (Harley *et al.*, 2001), es importante destacar que se trabajó con la información disponible para este estudio. Se debe hacer hincapié para incorporar a mediano plazo estimaciones de abundancia obtenidas con otro tipo de datos y así poder contrastar los resultados obtenidos con los de capturas comerciales.

Es muy complicado establecer modelos predictivos de captura y CPUE, sobre todo en organismos tan dinámicos en una escala espacio-temporal. Aunado a esto trabajar con datos de tres especies complica más el análisis. De cualquier modo los resultados obtenidos en el presente trabajo arrojaron los resultados esperados y son una valiosa contribución al conocimiento de la sardina crinuda y su relación con la variabilidad ambiental.

## 10. Conclusiones

Considerando que la CPUE es proporcional a la abundancia, la sardina crinuda presentó altos niveles de abundancia durante el periodo de estudio. Esta pesquería no ha experimentado una caída en la captura con el aumento del esfuerzo pesquero, aparentemente el stock se encuentra en crecimiento con la tendencia observada a partir de 2003. Aunque se deben implementar análisis con datos independientes a las capturas comerciales, para analizar la abundancia y la CPUE de la pesquería y descartar relaciones de hiperestabilidad, lo que podría comprometer la sustentabilidad de la población.

En los últimos años han ocurrido cambios ambientales en el sur del golfo de California que han permitido el establecimiento y la permanencia de la población en la zona. La ventana medioambiental encontrada fue: temperatura superficial del mar entre 25-26 °C, índice de surgencia entre 70-90 m<sup>3</sup>/s, e índice de turbulencia entre 0-30 m<sup>3</sup>/s<sup>3</sup>. Estos resultados pueden ayudar a entender los movimientos espacio-temporales que puede realizar la sardina crinuda durante los escenarios ambientales que se presentan cada año.

La abundancia de sardina crinuda es afectada cuando se presentan en la zona fenómenos El Niño y La Niña de altas intensidades y duraciones. Las zonas centrales (III y IV) fueron las que presentaron condiciones ambientales más estables durante el periodo de estudio y cercanas a los valores propuestos dentro de la ventana medioambiental óptima, lo que pudo permitir el incremento de la abundancia del recurso en estas áreas. Las zonas correspondientes a los litorales del estado de Sinaloa (I, II y III) presentaron mayor estacionalidad de temperatura superficial del mar. Para las zonas del sur (IV y V) se registraron temperaturas principalmente cálidas durante la mayor parte del año (>22°C).

El régimen de vientos se ha modificado en la última década, disminuyendo considerablemente la acción del viento sobre la columna de agua. El índice de turbulencia está estrechamente relacionado con la abundancia del recurso, por lo

que los modelos predictivos implementados con esta variable pueden ser una buena opción para posibles pronósticos de captura y CPUE.

### **11. Recomendaciones**

La gran dinámica que ha presentado el recurso históricamente y las altas tasas de abundancia que se han registrado en los últimos años, hacen evidente la necesidad de continuar con estudios a nivel regional que brinden el conocimiento suficiente para entender estos procesos.

Aunque con el presente estudio se encontraron altos niveles de abundancia de sardina crinuda en el sur del golfo de California, los peces pelágicos menores se caracterizan por ser organismos gregarios, por lo que esta conducta puede generar que la CPUE presente cierta incertidumbre y no corresponda con la abundancia real del recurso en ciertas áreas.

Se recomienda continuar el monitoreo de las variables ambientales aquí analizadas y de ser posible algunas otras como clorofila, PDO (Oscilación Decadal del Pacífico, por sus siglas en inglés), SOI (Índice de Oscilación del Sur, por sus siglas en inglés) para mejorar y continuar el análisis de la pesquería de sardina crinuda con respecto a la variabilidad ambiental.

Generación de bases de datos independientes a la pesquería como cruceros prospectivos y de investigación.

Estudiar las relaciones entre la variabilidad ambiental y cada una de las especies que componen el recurso sardina crinuda por separado, para identificar ventanas medioambientales para cada una de ellas y así lograr un mejor manejo de la pesquería.

Los modelos presentados en este trabajo se encuentran en etapas de prueba y validación, por lo que se recomienda analizar y de ser posible contrastar los resultados que arroje con los de otros modelos. Se deben realizar estudios que permitan identificar la biomasa total y explotable para limitar el esfuerzo pesquero en los modelos predictivos aquí propuestos.

## 12. Referencias bibliográficas

- Aguirre-Gómez R. 2002. Los mares mexicanos a través de la percepción remota. México: Instituto de Geografía, UNAM.
- Aguirre-Gómez R, Salmerón O y Álvarez R. 2003. Effects of ENSO off the southwest coast of Mexico, 1996-1999. *Geofísica Internacional*. 42(3):377-388.
- Alheit J y Niquen M. 2004. Regime shifts in the Humboldt Current ecosystem. *Progress in Oceanography*. 60:201-222.
- Álvarez-Borrego S y Lara-Lara R. 1991. The physical environment and primary productivity of the Gulf of California. *En: The Gulf of California and peninsular province of the Californias* (Dauphin JP y Simoneit BR, eds). E.U.A.: American Association of Petroleum Geologist; 555-567.
- Arreguín-Sánchez F. 1996. Catchability: a key parameter for fish stock assessment. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*. 6:221-242.
- Badan A. 2003. The effects of El Niño in Mexico: A survey. *Geofísica Internacional*. 42(3):567-571.
- Bakun A. 1973. Coastal Upwelling Indices, West coast of North America 1946-71. *En: NOAA Technical Report NMFS SSRF 103*.
- Bakun A. 1996. Patterns in the ocean: Ocean processes and marine population dynamics. México: University of California Sea Grant, San Diego, California, USA, in cooperation with Centro de Investigaciones Biológicas de Noroeste, La Paz, Baja California Sur.
- Bakun A. 2010. Linking climate to population variability in marine ecosystems characterized by non-simple dynamics : Conceptual templates and schematic constructs. *Journal of Marine Systems*. 79(3-4):361-373.
- Bakun A y Parrish RH. 1982. Turbulence, transport, and pelagic fish in the California and Peru current systems. *CalCOFI*. 23:99-112.
- Beckley LE y van der Lingen CD. 1999. Biology, fishery and management of sardines (*Sardinops sagax*) in southern African waters. *Marine & Freshwater Research* 50:955-978.
- Bello M, Barbieri MA, Salinas S y Soto L. 2004. Surgencia costera en la zona central de Chile, durante el ciclo El Niño-La Niña 1997-1999. *En: El Niño-La Niña 1997-2000 Sus Efectos en Chile* (Avaria S, Carrasco J, Rutllant J y Yañez E, eds). Valparaíso, Chile: CONA; 77-94.
- Berry H y Barrett I. 1963. Gillraker analysis and speciation in the thread herring genus *Opisthonema*. *En: Inter-American Tropical Tuna Commission*; 1-153.
- Bograd S. 2010. Upwelling index. Pacific Fisheries Environmental Laboratory. *En: National Oceanic and Atmospheric Administration* (en línea). E.U.A. (29/sep/2010). <http://www.pfel.noaa.gov>



- Breiman L y Friedman JH. 1985. Estimating optimal transformations for multiple regression and correlation. *Journal of the American Statistical Association*. 80(391):580-598.
- Cisneros-Mata MA, Nevárez-Martínez MO, Montemayor-López G, Santos-Molina JP y Morales-Azpeitia R. 1991. Pesquería de sardina en el Golfo de California 1988/89-1989/90. Guaymas, Son. México. SEPESCA, Instituto Nacional de la Pesca. CRIP Guaymas,
- Cisneros-Mata MA, Páez-Barrera F, Martínez-Zavala MA y Nevárez-Martínez MO. 2000. Pelágicos. *En: Sustentabilidad y Pesca Responsable: Evaluación y Manejo* (A. CMM, Beléndez L, Zárate E, Gaspar MT, López L, Saucedo C y Tovar J, eds). México; 73-96.
- Cole J y McGlade J. 1998. Clupeoid population variability, the environment and satellite imagery in coastal upwelling systems. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*. 8:445-471.
- Cota-Villavicencio A, Troncoso-Gaytán R, Romero-Martínez M y Nevárez-Martínez MO. 2010. Situación de la pesquería de pelágicos menores en la costa noroccidental de Baja California durante las temporadas de pesca 2007 y 2008. *Ciencia Pesquera*. 18(2):19-32.
- Cury P, Bakun A, Crawford R, Jarre A, Quiñones RA, Shannon LJ y Verheye HM. 2000. Small pelagics in upwelling systems: Patterns of interaction and structural changes in wasp-waist ecosystems. *ICES Journal of Marine Sciences* 57:603-618.
- Cury P y Roy C. 1989. Optimal Environmental Window and Pelagic Fish Recruitment Success in Upwelling Areas. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 46:670-680.
- Cury P, Roy C y Faure V. 1998. Environmental constraints and pelagic fisheries in upwelling areas: The Peruvian puzzle. *South African Journal of Marine Science*. 19:159-167.
- Cury P, Roy C, Mendelsshon A, Bakun A, Husby DM y Parrish RH. 1995. Moderate is better: nonlinear climatic affects on Californian Anchovy. *En: Climate change and the Northern fish populations* (Beamish RJ, ed): Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences; 417-424.
- Daskalov G, Boyer DC y Roux JP. 2003. Relating sardine *Sardinops sagax* abundance to environmental indices in northern Benguela. *Progress in Oceanography*. 59(2-3):257-274.
- DOF. 2010. Acuerdo mediante el cual se da a conocer la actualización de la Carta Nacional Pesquera. México: Diario Oficial de la Federación.
- Efron B. 1979. Bootstrap methods: another look at the jackknife. *The Annals of Statistics*. 7:1-26.

- Emmett RL, Brodeur RD, Miller TW, Pool SS, Bentley PJ, Krutzikowsky GK y McCrae J. 2005. Pacific sardine (*Sardinops sagax*) abundance, distribution and ecological relationships in the Pacific Northwest. *CalCOFI*. 46.
- FAO. 2011. Fisheries Topics: Statistics. *En: FAO Fisheries and Aquaculture Department* (en línea). Roma. (23/oct/2011). <http://www.fao.org/fishery/topic/2017/es>
- Färber-Lorda J, Trasviña A y Cortés-Verdín P. 2004. Trophic conditions and zooplankton distribution in the entrance of the Sea of Cortés during summer. *Deep-Sea Research II*. 51:615-627.
- Färber-Lorda J, Trasviña A y Cortés-Verdín P. 2010. Summer distribution of euphausiids in the entrance of the Sea of Cortés in relation to hydrography. *Deep-Sea Research II*. 57:631-641.
- Félix-Uraga R, Quiñonez-Velázquez C, Melo-Barrera F, Hernández-Rivas M y Álvarez-Trasviña E. 2012. Variación interanual y estacional en la captura de pelágicos menores en Bahía Magdalena. *Resúmenes del XX Taller de Pelágicos Menores*. Guaymas, Sonora. Centro Regional de Investigación Pesquera (CRIP), Guaymas, 3-5 de julio de 2012.
- Fiedler PC. 1984. Satellite observations off the 1982–1983 El Niño along the US Pacific coast. *Science*. 224:1251–1254.
- Fisher W, Krup F, Schneider W, Sommer C, Carpenter KE y Niem VH. 1995. Guía FAO para la identificación de las especies para los fines de la pesca. Pacífico centrooriental. Roma.
- Fox WWJ. 1970. An exponential surplus-yield model for optimizing exploited fish populations. *Transactions of the American Fisheries Society*. 99:80-88.
- Gallegos A, Barberán J y Fernández A. 1988. Condiciones oceánicas alrededor de isla Socorro, archipiélago de Revillagigedo, en julio de 1981. *Revista Geofísica*. 28:41-58.
- García-Reyes M. 2005. Procesos físicos que controlan la variabilidad estacional de la temperatura superficial del mar y de la concentración de clorofila en la entrada al Golfo de California (Tesis Profesional). México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Guisande C, Cabanas JM, Vergara AR y Riveiro I. 2001. Effect of climate on recruitment success of Atlantic Iberian sardine *Sardina pilchardus*. *Marine Ecology Progress Series*. 223:243-250.
- Guisande C, Vergara AR, Riveiro I y Cabanas JM. 2004. Climate change and abundance of the Atlantic-Iberian sardine (*Sardina pilchardus*). *Fisheries Oceanography*. 13(2):91-101.
- Gulland JA. 1964. Catch per unit effort as a measure of abundance. *En: Rapports et Proces-verbaux des Réunions Conseil International pour l'Exploration de la Mer*; 8-14.

- Haddon M. 2001. *Modelling and Quantitative Methods in Fisheries*. E.U.A.: Chapman & Hall.
- Harley SJ, Myers RA y Dunn A. 2001. Is catch-per-unit-effort proportional to abundance? *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 58:1760-1772.
- Hastie TJ y Tibshirani RJ. 1990. *Generalized Additive Models*. Londres: Chapman & Hall.
- Hjort J. 1913. Fluctuations in the great fisheries of northern Europe *Rapports et Proces-verbaux des Réunions Conseil International pour l'Exploration de la Mer*. 19:1-228.
- Holt SJ. 1975. Los recursos alimenticios del océano. *En: Oceanografía*. Madrid: Selecciones del Scientific American; 400-414.
- Jacob-Cervantes M. 2010. La pesquería de peces pelágicos menores en el sur del golfo de California. Análisis de la temporada de pesca 2008. *Ciencia Pesquera*. 18(2):47-58.
- Jacob-Cervantes M, Gallardo-Cabello M, Chiappa Carrara X y Ruiz-Luna A. 1992. Análisis del régimen alimentario de la sardina crinuda *Opisthonema libertate*, Günther, 1866 (Pisces: Clupeidae) en el Golfo de California. *Revista de Biología Tropical*. 40(2):233-238.
- Jacob-Cervantes ML, Nevárez-Martínez MO, Márquez-García E, Valdéz-Ornelas MA, Gastelum-Villareal R y Vallarta-Zárate JR. 2011. La pesquería de pelágicos menores en el sur del Golfo de California durante el 2010. *Resúmenes del XIX Taller de Pelágicos Menores*. La Paz, Baja California Sur. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas (CICIMAR), 8 al 10 de junio de 2011.
- Kessler WS. 2006. The circulation of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*. 69:181-217.
- Lasker R. 1978. The relation between oceanographic conditions and larval anchovy food in the California Current: identification of the factors leading to recruitment failure. *Rapp P -V Réun Cons Int Explor Mer*. 173:212-230.
- Lehodey P, Alheit J, Barange M, Baumgartner T, Beaugrand G, Drinkwater K, Fromentin JM, Hare SR, Ottersen G, Perry RI, Roy C, Van der Lingen CD y Werner F. 2006. Climate Variability, Fish, and Fisheries. *Journal of Climate*. 19:5009-5030.
- Lluch-Belda D, Crawford R, Kawasaki T, MacCall AD, Parrish RH, Schwartzlose R y Smith PE. 1989. World wide fluctuations of sardine and anchovy stocks: The regimen problem. *South African Journal of Marine Science*. 8:195-205.
- Lluch-Cota D. 2004. El sector pesquero. *En: Cambio Climático: una visión desde México* (Martínez J y Fernández A, eds). México, D.F.: SEMARNAT-INE; 327-335.

- Lluch-Cota SE. 1999. Coastal upwelling in the eastern Gulf of California. *Oceanologica Acta*. 23(6):731-740.
- López-Martínez J, Nevárez-Martínez MO, Molina-Ocampo R y Manrique-Colchado FA. 1999. Traslado en el tipo y tamaño de las presas que forman la dieta de la sardina Monterrey *Sardinops caeruleus* (Girard, 1856), la sardina crinuda *Opisthonema libertate* (Gunther, 1867) y la anchoveta norteña *Engraulis mordax* (Girard, 1856) en el Golfo de California. *Ciencias Marinas*. 25(4):541-556.
- López-Sandoval DC, Lara-Lara JR y Álvarez-Borrego S. 2009a. Phytoplankton production by remote sensing in the region off Cabo Corrientes, Mexico. *Hidrobiológica*. 19:185-192.
- López-Sandoval DC, Lara-Lara R y Álvarez-Borrego S. 2009b. Producción fitoplanctónica por sensores remotos en la región frente a Cabo Corrientes, México. *Hidrobiológica*. 19(3):185-192.
- Lyle L. 1992. Fluctuaciones de la sardina crinuda (*Opisthonema* spp) desembarcada en tres puertos del Pacífico Mexicano, 1973-1991 (Tesis de Maestría). Ensenada, Baja California, México: CICESE.
- Magaña-Rueda V. 2004. Los impactos de El Niño en México. México: Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, Secretaría de Gobernación; 229.
- Manzano-Sarabia M, Salinas-Zavala CA, Kahru M, Lluch-Cota SE y González-Becerril A. 2008. The impact of the 1997-1999 warm-SST and low-productivity episode on fisheries in the southwestern Gulf of Mexico. *Hidrobiología*. 610:257-267.
- Márquez-García E. 2003. Cartografía y análisis climatológico de la temperatura de la superficie del mar en el Golfo de California (Tesis Profesional). México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- May RC. 1974. Larval mortality in marine fishes and the critical period concept *En*: The early life history of fish (Blaxter JHS, ed). Berlín: Springer-Verlag; 3-19.
- Mendelsshon R. 1989. Reanalysis of recruitment estimates of the Peruvian anchoveta in relationship to other population parameters and the surrounding environment. *En*: The Peruvian Upwelling Ecosystem: Dynamics and Interactions (Pauly D, Muco P, Mendo J y Tsukayama I, eds): ICLARM Conference Proceedings; 364-385.
- Morales-Bojórquez E. 2009. Indicadores biológicos de cambios globales; el océano Pacífico. *Ciencia y Desarrollo*. 48:60-64.
- Morales-Bojórquez E, Gómez-Muñoz VM, Félix Uruga R y Alvarado-Castillo RM. 2003. Relation between recruitment, sea surface temperature, and density-independent mortality of the Pacific sardine (*Sardinops caeruleus*) off the southwest coast of the Baja California Peninsula, Mexico. *Scientia Marina*. 67(1):25-32.

- Nevárez-Martínez MO, Cisneros-Mata MA y Lluch-Belda D. 2008. Las capturas de sardina Monterrey *Sardinops sagax* (Jenyns, 1842) y su relación con el medio ambiente y el esfuerzo pesquero. *En: Variabilidad ambiental y Pesquerías de México* (López-Martínez J, ed). México: Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca; 183-200.
- Nevárez-Martínez MO, Lluch-Belda D, Cisneros-Mata MA, Santos Molina JP, Martínez-Zavala MA y Lluch-Cota SE. 2001. Distribution and abundance of the Pacific sardine (*Sardinops sagax*) in the Gulf of California and their relation with the environment. *Progress in Oceanography*. 49(1-4):565-580.
- Nevárez-Martínez MO, Martínez-Zavala MA, Cotero-Altamirano CE, Jacob-Cervantes M, Green-Ruiz YA, Gluyas-Millán G, Cota-Villavicencio A y Santos Molina JP. 2004. La pesquería de pelágicos menores (sardinias, anchovetas, macarela y afines): recomendaciones para su manejo. *Dictamen Técnico del Instituto Nacional de la Pesca (inédito)*.
- Nevárez-Martínez MO, Martínez-Zavala MA, Cotero-Altamirano CE, Jacob-Cervantes M, Green-Ruiz YA, Gluyas-Millán G, Cota-Villavicencio A y Santos Molina JP. 2006. Pelágicos. *En: Sustentabilidad y Pesca Responsable: Evaluación y Manejo* (Cuellar J, ed). México; 263-295.
- Nevárez Martínez MO, Cisneros Mata MA y Lluch-Belda D. 2008. Las capturas de sardina Monterrey *Sardinops sagax* (Jenyns, 1842) y su relación con el medio ambiente y el esfuerzo pesquero. *En: Variabilidad ambiental y Pesquerías de México* (López-Martínez J, ed). México: Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca; 183-200.
- Ñiquen M y Bouchon M. 2004. Impact of El Niño events on the pelagic fisheries in Peruvian waters. *Deep-Sea Research II*. 51:563-574.
- Overland JE, Alheit J, Bakun A, Hurrell JW, Mackas DL y Miller AJ. 2010. Climate controls on marine ecosystems and fish populations. *Journal of Marine Systems*. 79(3-4):305-315.
- Páez-Barrera F. 1976. Desarrollo gonadal, desove y fecundidad de sardina crinuda (Günther) de la zona de Mazatlán basados en el análisis histológico de la gónada. *Memorias del Simposium nacional de recursos pesqueros masivos de México*. Ensenada, Baja California. México. SEP,
- Peterman RM y Bradford MJ. 1987. Wind speed and mortality rate of a marine fish, the northern anchovy (*Engraulis mordax*). *Science*. 235:354-356.
- Philander G. 1990. El Niño, La Niña and the Southern Oscillation. San Diego, California: Academic Press, Inc.
- Roden G. 1972. Termohaline structure and baroclinic flow across the Gulf of California entrance and in the Revillagigedo Islands region. *Journal of Physical Oceanography*. 2:177-183.
- Rodríguez-Domínguez G. 1987. Caracterización bioecológica de las tres especies de sardina crinuda (*Opisthonema libertate*, *O. bulleri* y *O. medirastre*) del



- Pacífico mexicano (Tesis de Maestría). Ensenada, Baja California. México: CICESE.
- Roy C, Cury P y Kifani S. 1992. Pelagic fish recruitment success and reproductive strategy. *South African Journal of Marine Science*. 12:135-146.
- Ruiz-Luna A, Jacob-Cervantes M y Esparza-Haro A. 1997. Trends in fishing indices for the thread herring fishery in northwest Mexico. *Fisheries Management and Ecology*. 4:55-61.
- SAGARPA. 2011. Anuario estadístico de acuacultura y pesca 2010. México: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.
- Sánchez-Velasco L, Ávalos-García C, Rentería-Cano M y Shirasago B. 2004. Fish larvae abundance and distribution in the central Gulf of California during strong environmental changes (1997-1998 El Niño and 1998-1999 La Niña). *Deep-Sea Research II*. 51:711-722.
- Schaefer M. 1954. Some aspects of the dynamics of populations important to the management of the commercial marine fisheries. *Bull IATTC / Bol CIAT*. 1(2):27-56.
- SEPESCA. 1994. Normas Oficiales Mexicanas del sector pesca. SEPESCA.
- Sparre P y Venema SC. 1997. Introducción a la evaluación de recursos pesqueros tropicales. Parte 1. Manual: FAO
- Stevenson MR. 1970. On the physical and biological oceanography near the entrance to the Gulf of California, October 1966–August 1967. *Inter-American Tropical Tuna Commission Bulletin*. 4:389-504.
- Vallarta-Zárate JR. 2010. Efectos climatológicos de la temperatura superficial del mar, en la pesquería de sardina crinuda (*Opisthonema* spp) en el sur del Golfo de California, 1996-2008 (Tesis Profesional). México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Whitehead PJ. 1985. Clupeoid fishes of the world an annotated and illustrated catalogue of the herrings, sardines, pilchards, sprats, anchovies and woltherrings. Part 1 *chirocentridae* and *pristigasterida*. Roma: FAO.
- Yañez E, González A y Barbieri MA. 1995. Estructura térmica superficial del mar asociada a la distribución espacio-temporal de sardina y anchoveta en la zona norte de Chile entre 1987 y 1992. *Investigaciones marinas*. 23:123-147.
- Yañez E, Hormazábal S, Silva C, Montecinos A, Barbieri MA, Valdenegro A, Órdenes A y Gómez F. 2008. Coupling between the environment and the pelagic resources exploited off northern Chile: ecosystem indicators and a conceptual model. *Lat Am J Aquat Res* 36(2):159-181.
- Zar JH. 1995. Biostatistical Analysis. New Jersey, EUA: Prentice Hall.