



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA
FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR
POSGRADO EN CIENCIAS EN RECURSOS ACUÁTICOS**

**Efecto de las surgencias, turbulencia y temperatura superficial del mar sobre
el reclutamiento de la sardina crinuda *Opisthonema libertate* en el sur del
golfo de California**

TESIS

Que para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS EN RECURSOS ACUÁTICOS

En el área de aprovechamiento sustentable de recursos pesqueros

PRESENTA

L. B. P. Efrain Delgado Robles

DIRECTORES DE TESIS

Dr. Jorge Payán Alejo

Dra. Mercedes L. Jacob Cervantes

**Mazatlán Sinaloa
Septiembre de 2024**



Dirección General de Bibliotecas
Ciudad Universitaria
Av. de las Américas y Blvd. Universitarios
C. P. 80010 Culiacán, Sinaloa, México.
Tel. (667) 713 78 32 y 712 50 57
dgbuas@uas.edu.mx

UAS-Dirección General de Bibliotecas

Repositorio Institucional Buelna

Restricciones de uso

Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial
Compartir Igual, 4.0 Internacional



RESUMEN

El efecto de la variabilidad ambiental sobre las poblaciones de pelágicos menores ha sido documentado en México y el mundo. En el sur del golfo de California (SGC) se ha investigado este tema agrupando a las especies de sardina crinuda como un complejo. Sin embargo, no existen investigaciones que relacionen la influencia del ambiente sobre el reclutamiento de la especie más importante del complejo *Opisthonema* en el SGC: *Opisthonema libertate*. El objetivo principal de esta investigación fue analizar la relación entre algunas variables ambientales (VA), tales como la *TSM* (o un *proxy* de esta) el índice de surgencia (*IS*), el índice de turbulencia (*IT*) y el reclutamiento de *O. libertate* en el SGC durante 1988-2021 para determinar la ventana ambiental óptima (VAO) para la especie. Se obtuvieron datos de las componentes del transporte de Ekman de ERD-NOAA y de rapidez del viento de GIOVANNI-NASA para calcular el *IS* y el *IT*, respectivamente. Datos del índice de El Niño Oceánico (ONI) se obtuvieron de la página del CPC de la NOAA. Los datos anuales de reclutas (*R*) y reproductores (*RP*) fueron proporcionados por IMIPAS a partir de la evaluación de stock de *O. libertate* 1988-2021 realizada por el método de captura a la edad estadística. Se describió el desarrollo temporal y espacial de las VA analizando las series de tiempo y se realizaron pruebas de hipótesis estadísticas para comparar estas variables por gradiente latitudinal (zonas de pesca). Se ajustaron modelos aditivos generalizados (GAM) siguiendo un procedimiento paso a paso, siendo *R* la variable de respuesta e *IS*, *IT*, ONI y *RP* las covariables para evaluar el efecto de los predictores sobre la variable de respuesta (VAO). El *IS* presentó una climatología en forma de domo invertido, una disminución en la magnitud en el tiempo, así como diferencias mínimas entre zonas de pesca durante el periodo de estudio. El *IT* tuvo un desarrollo temporal y espacial similar al del *IS* con cambios en su magnitud tanto en el norte como en el sur del área de estudio. Por su parte la *TSM* ha cambiado con respecto al tiempo con un aumento de 0.47 °C en la última década. No se encontraron diferencias estadísticas en el desarrollo del *IS* por zona de pesca ($H=3.6171$, $p>0.05$) contrario al *IT* ($H=400.77$, $p<0.05$) y la *TSM* ($H=41.225$, $p<0.05$) para los cuales la prueba de hipótesis fue significativa. El GAM seleccionado tuvo un desempeño satisfactorio según el diagnóstico residual, la devianza explicada (86.4%), la RMSE (55.1831451 x10⁷ org.) y el coeficiente de Pearson de los datos observados vs. el ajuste (0.9011; IC95%: 0.8114-0.9462). Todos los predictores en el GAM fueron significativos ($p<0.05$) sin mostrar un problema de concurvidad (<0.29) y con relación no lineal respecto a *R* (grados de libertad efectivos > 2) con una VAO del reclutamiento de *O. libertate* de entre 5.29 y 22.72 m³/s/100 m de línea de costa del *IS* y de entre 79.56 y 106.67 m³/s³ para el *IT*.

Palabras clave: Pelágicos menores, Reclutas, Procesos oceanográficos, GAM, Relación no lineal

ABSTRACT

The effect of environmental variability on small pelagic populations has been documented in Mexico and the world. This topic has been studied in the southern Gulf of California around the *Opisthonema* complex. However, there is no research on how the environment affects the recruitment in the most important species of the *Opisthonema* complex in the SGC: *Opisthonema libertate*. The main goal of this research was to analyze the relationship between environmental variables (EV), such as SST (or some proxy), upwelling, and turbulence, and the recruitment of *O. libertate* in the SGC during 1988-2021 and to determine the optimal environmental window (OEW) in this species. Data for Ekman transport and wind speed were obtained from ERD-NOAA and GIOVANNI-NASA to calculate the upwelling and turbulence indexes (*UI* and *TI*, respectively). Data for Oceanic Niño index (*ONI*) were obtained from CPC-NOAA. Recruits (*R*) and spawners (*SP*) data (individuals of age 0 and age 1+ respectively) were provided by IMIPAS from the *O. libertate* 1988-2021 stock assessment. The temporal and spatial pattern of EV were described using time series analysis and hypothesis testing to comparing these EV by a latitudinal gradient (fishing zones). A stepwise procedure was used to fit a generalized additive model (GAM) to *R* data with *UI*, *TI*, *ONI* and *SP* as covariates to evaluate the effect of predictors over the response variable (OEW). The *UI* presented an inverted dome climatology, a decrease in magnitude over time as well as minimal differences between fishing zones during the study period. The *TI* presented a temporal and spatial development similar to that of the *UI* with changes in its magnitude in the north and south of the study area. SST has changed over time with an increase of 0.47 °C in the last decade. No statistical differences were found in the development of *UI* by fishing zone ($H=3.6171$, $p>0.05$) contrary to *TI* ($H=400.77$, $p<0.05$) and SST ($H=41.225$, $p<0.05$) for which the hypothesis test was significant. The selected GAM performed satisfactorily with an explained deviance of 86.4% and residual diagnostic statically valid. The RMSE was 55.1831451×10^7 ind. and the Pearson correlation coefficient between fitted and observed data was 0.9011 (95%CI: 0.8114-0.9462). The predictors of *R* in the GAM were all significant ($p<0.05$) and concavity was low (<0.29). The relationship between the predictors and *R* is non-linear (effective degree of freedom > 2), with an OEW of 5.29 - 22.72 $m^3/s/100$ m of coast line for *UI* and 79.56 - 106.67 m^3/s^3 for *TI*.

Key words: Thread herring, Recruits, Oceanographic processes, GAM, Non-linear relationship.

DEDICATORIA

De nuevo, para el motor de mi vida: mi_familia+2

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi *alma mater*, la Universidad Autónoma de Sinaloa, por darme una vez más la oportunidad de cursar y culminar mis estudios —en esta ocasión de posgrado— con el respaldo de esta honorable institución.

Al Posgrado en Ciencias en Recursos Acuáticos de la Facultad de Ciencias del Mar, por brindarme las instalaciones, el equipo y el material didáctico necesario para mi formación profesional.

A todos los Profesores-Investigadores que me impartieron cátedras, por compartir su vasto conocimiento.

También, quiero agradecer a mis directores de tesis, el Dr. Jorge Payán Alejo y a la Dra. Mercedes L. Jacob Cervantes por aceptarme como su alumno y por confiar en mí para realizar esta investigación.

A mi comité revisor de tesis, el Dr. Emigdio Marín Enríquez, Dr. Luis A. Salcido Guevara y al M. C. J. Roberto F. Vallarta Zarate, por las observaciones que contribuyeron a mejorar esta tesis.

Al Consejo Nacional de Ciencias, Humanidades Ciencias y Tecnologías por la beca de estudios de posgrado.

Al Laboratorio de Pelágicos Menores del Centro Regional de Investigación Acuícola y Pesquera de Mazatlán del Instituto Nacional de Investigación en Pesca y Acuicultura Sustentables (antes INAPESCA) por las facilidades brindadas en cuanto a la información biológica utilizada e informes consultados para realizar esta tesis.

A la industria sardinera Maz Sardina S. A. de C. V. por el apoyo brindado para la realización de mis estudios de posgrado.

Un agradecimiento muy especial a todos aquellos que de manera directa o indirecta han participado en algún aspecto del desarrollo de este trabajo.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	1
LISTA DE TABLAS	5
1. INTRODUCCIÓN	7
2. ANTECEDENTES.....	9
2. 1. Taxonomía y biología de la sardina crinuda	9
2. 2. La pesquería de pelágicos menores en el sur del golfo de California	10
2. 3. Evaluación de la pesquería de sardina crinuda en el sur del golfo de California	11
2. 4. La relación stock-reclutamiento en las pesquerías de pelágicos menores.....	12
2. 5. Variabilidad ambiental y las pesquerías de pelágicos menores	15
2. 5. 1. Temperatura superficial del mar	15
2. 5. 2. Surgencia costera	17
2. 5. 3. Turbulencia	20
2. 6. Teoría de la ventana ambiental óptima.....	23
2. 7. Área de estudio.....	26
2. 7. 1. Oceanografía física del Golfo de California	26
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	29
4. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	30
5. HIPÓTESIS.....	31
6. OBJETIVOS.....	32
6. 1. Objetivo general.....	32
6. 2. Objetivos específicos	32
7. MATERIALES Y MÉTODOS.....	33
7. 1. Índice de surgencia	33

7. 2. Índice de turbulencia	37
7. 3. Temperatura superficial del mar	37
7. 4. Análisis de series de tiempo	38
7. 5. Pruebas de hipótesis estadísticas	38
7. 6. Datos de stock-reclutamiento	39
7. 7. Ventana ambiental óptima	40
7. 8. Modelos aditivos generalizados	42
7. 8. 1. Reclutamiento óptimo y ventana ambiental óptima	46
8. RESULTADOS	54
8. 1. Índice de surgencia	54
8. 1. 1. Patrón estacional.....	54
8. 1. 2. Patrón interanual y tendencia	57
8. 1. 3. Estacionalidad histórica por zona de pesca.....	59
8. 2. Índice de turbulencia	63
8. 2. 1. Patrón estacional.....	63
8. 2. 2. Patrón interanual y tendencia	66
8. 2. 3. Estacionalidad histórica por zona de pesca.....	68
8. 2. 4. Anomalías	71
8. 2. 5. Anomalías por zona de pesca.....	72
8. 3. Temperatura superficial del mar	76
8. 3. 1. Patrón estacional.....	76
8. 3. 2. Patrón interanual y tendencia	79
8. 3. 3. Estacionalidad histórica por zona de pesca.....	81
8. 3. 4. Anomalías	84
8. 3. 5. Anomalías por zona de pesca.....	85

8. 4. Pruebas de hipótesis estadísticas	88
8. 4. 1. Índice de surgencia.....	88
8. 4. 2. Índice de turbulencia.....	93
8. 4. 3. Temperatura superficial del mar	100
8. 5. Datos de stock-reclutamiento	106
8. 6. Marco de datos ambientales.....	108
8. 7. Modelos aditivos generalizados (GAM)	108
8. 7. 1. Distribución observada y teórica del reclutamiento	108
8. 7. 2. GAM por criterios	109
8. 8. GAM seleccionado	113
8. 8. 1. Diagnóstico residual	113
8. 8. 2. Distribución del reclutamiento observado vs modelo	114
8. 8. 3. Correlación del reclutamiento observado vs modelo	115
8. 8. 4. Serie de tiempo de reclutamiento observado vs modelo	116
8. 9. Reclutamiento óptimo y ventana ambiental óptima	118
9. DISCUSIÓN.....	120
9. 1. Índice de surgencia	120
9. 2. Índice de turbulencia.....	124
9. 3. Temperatura superficial del mar	126
9. 4. Pruebas de hipótesis estadísticas	130
9. 4. 1. Índice de surgencia.....	130
9. 4. 2. Índice de turbulencia.....	132
9. 4. 3. Temperatura superficial del mar	134
9. 5. Datos de stock-reclutamiento	137
9. 6. Modelos aditivos generalizados (GAM)	141

9. 7. GAM seleccionado	146
9. 8. Reclutamiento óptimo y ventana ambiental óptima	149
10. CONCLUSIONES	154
10. 1. Patrón temporal y espacial de las variables ambientales en el sur del golfo de California durante 1988-2021	154
10. 2. Pruebas de hipótesis estadísticas	154
10. 3. GAM del reclutamiento de <i>Opisthonema libertate</i> en el sur del golfo de California 1988-2021.	155
10. 4. Ventana ambiental óptima del reclutamiento de <i>Opisthonema libertate</i>	156
11. RECOMENDACIONES.....	157
11. 1. Futuras investigaciones.....	157
11. 2. Manejo de la especie	158
12. REFERENCIAS.....	159
13. ANEXOS	179

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Especies del género <i>Opisthonema</i> del mundo. A) <i>O. oglinum</i> ; B) <i>O. libertate</i> ; C) <i>O. bulleri</i> ; D) <i>O. medirastre</i> y E) <i>O. berlangai</i> . Tomado de FishBase (2022).....	10
Figura 2. Capturas históricas anuales de Pelágicos Menores en el noreste de México Tomado de DOF (2022).	11
Figura 3. Diagrama de un proceso de surgencia costera con vientos en dirección de norte a sur. Tomado de Bakun (1973).....	19
Figura 4. Relación teórica entre el reclutamiento y los factores ambientales en zonas de surgencia costera. Tomado de Cury y Roy (1989).....	24
Figura 5. Área de estudio y zonas administrativas de pesca de la flota sardinera del sur del golfo de California.	28
Figura 6. Localización geográfica de las posiciones utilizadas (puntos verdes) para el cálculo del índice de surgencia (<i>I_S</i>) en el sur del golfo de California.	36
Figura 7. Efecto de la temperatura máxima del mes más cálido (°C) sobre la variable de respuesta “altura (m)” de las plantas en un GAM para modelar la relación global entre el rasgo clave de la planta seleccionada y las condiciones climáticas. Extraído de Madani <i>et al.</i> (2018) y modificado por el autor. La línea vertical roja representa el valor de temperatura máxima del mes más cálido (°C) donde se alcanza la altura máxima de las plantas (m). ..	47
Figura 8. Efecto de la temperatura máxima del mes más cálido (°C) sobre la variable de respuesta “altura (m)” de las plantas en un GAM para modelar la relación global entre el rasgo clave de la planta seleccionada y las condiciones climáticas. Extraído de Madani <i>et al.</i> (2018) y modificado por el autor. La línea vertical roja representa el valor de temperatura máxima del mes más cálido (°C) donde se alcanza la altura máxima de las plantas (m) y las líneas verticales punteadas representan los valores de temperatura máxima del mes más cálido (°C) donde la altura máxima de las plantas (m) se reduce en 50%.	48
Figura 9. Ejemplos de determinación del valor máximo de la variable de respuesta (óptimo, línea vertical roja) y VAO como valores de la variable predictora a los cuales se alcanza el valor máximo de la variable de respuesta al 50% (líneas punteadas verticales). Las figuras corresponden a un estudio donde se utilizó un GAM para modelar la relación global entre el rasgo clave de la planta seleccionada y las condiciones climáticas. Extraído de Madani <i>et al.</i> (2018) y modificado por el autor.	53

Figura 10. Patrón estacional del Índice de surgencia (<i>IS</i>) durante 1988-2021 en el sur del golfo de California. Las barras de error indican ± 1 desviación estándar.	54
Figura 11. Patrón estacional del Índice de surgencia (<i>IS</i>) por zonas de pesca durante 1988-2021 en el sur del golfo de California.	56
Figura 12. Patrón interanual (a) y tendencia (b) del Índice de surgencia (<i>IS</i>) durante 1988-2021 en el sur del golfo de California.	58
Figura 13. Distribución mensual histórica del Índice de surgencia (<i>IS</i>) por zonas de pesca durante 1988-2021 en el sur del golfo de California.	62
Figura 14. Patrón estacional del Índice de turbulencia (<i>IT</i>) durante 1988-2021 en el sur del golfo de California. Las barras de error indican ± 1 desviación estándar.	63
Figura 15. Patrón estacional del Índice de turbulencia (<i>IT</i>) por zonas de pesca durante 1988-2021 en el sur del golfo de California.	65
Figura 16. Patrón interanual (a) y tendencia (b) del Índice de turbulencia (<i>IT</i>) durante 1988-2021 en el sur del golfo de California.	67
Figura 17. Distribución mensual histórica del Índice de turbulencia (<i>IT</i>) por zonas de pesca durante 1988-2021 en el sur del golfo de California.	71
Figura 18. Anomalías mensuales del Índice de turbulencia (<i>IT</i>) durante 1988-2021 en el sur del golfo de California.	72
Figura 19. Anomalías mensuales del Índice de turbulencia (<i>IT</i>) por zonas de pesca durante 1988-2021 en el sur del golfo de California.	75
Figura 20. Patrón estacional de la temperatura superficial del mar (<i>TSM</i>) durante 2002-2021 en el sur del golfo de California. Las barras de error indican ± 1 desviación estándar.	76
Figura 21. Patrón estacional de la temperatura superficial del mar (<i>TSM</i>) por zonas de pesca durante 2002-2021 en el sur del golfo de California.	78
Figura 22. Patrón interanual (a) y tendencia (b) de la temperatura superficial del mar (<i>TSM</i>) durante 2002-2021 en el sur del golfo de California.	80
Figura 23. Distribución mensual histórica de la temperatura superficial del mar (<i>TSM</i>) por zonas de pesca durante 2002-2021 en el sur del golfo de California.	84
Figura 24. Anomalías mensuales de la temperatura superficial del mar (<i>TSM</i>) durante 2002-2021 en el sur del golfo de California.	85
Figura 25. Anomalías mensuales de la temperatura superficial del mar (<i>TSM</i>) por zonas de pesca durante 2002-2021 en el sur del golfo de California.	87

Figura 26. Distribución de frecuencia relativa del índice de surgencia (<i>IS</i>) por zona de pesca durante 1988-2021 en el sur del golfo de California. En rojo la curva de la distribución normal.....	88
Figura 27. Diagrama de cajas con bigote del índice de surgencia (<i>IS</i>) por zona de pesca durante 1988-2021 en el sur del golfo de California. En gris el rango intercuartílico. La línea horizontal en negro representa la mediana. Las barras de error representan el mínimo (límite inferior de 1.5 veces el rango intercuartílico) y el máximo (límite superior de 1.5 veces el rango intercuartílico) y los marcadores son los outliers.....	89
Figura 28. Diagrama de cajas con bigote del índice de surgencia (<i>IS</i>) por zona de pesca por mes durante 1988-2021 en el sur del golfo de California. En gris el rango intercuartílico. La línea horizontal en negro representa la mediana. Las barras de error representan el mínimo (límite inferior de 1.5 veces el rango intercuartílico) y el máximo (límite superior de 1.5 veces el rango intercuartílico) y los marcadores son los outliers.	92
Figura 29. Distribución de frecuencia relativa del índice de turbulencia (<i>IT</i>) por zona de pesca durante 1988-2021 en el sur del golfo de California. En rojo la curva de la distribución normal.	93
Figura 30. Diagrama de cajas con bigote del índice de turbulencia (<i>IT</i>) por zona de pesca durante 1988-2021 en el sur del golfo de California. En gris el rango intercuartílico. La línea horizontal en negro representa la mediana. Las barras de error representan el mínimo (límite inferior de 1.5 veces el rango intercuartílico) y el máximo (límite superior de 1.5 veces el rango intercuartílico) y los marcadores son los outliers.....	95
Figura 31. Diagrama de cajas con bigote del índice de turbulencia (<i>IT</i>) por zona de pesca por mes durante 1988-2021 en el sur del golfo de California. En gris el rango intercuartílico. La línea horizontal en negro representa la mediana. Las barras de error representan el mínimo (límite inferior de 1.5 veces el rango intercuartílico) y el máximo (límite superior de 1.5 veces el rango intercuartílico) y los marcadores son los outliers.	97
Figura 32. Distribución de frecuencia relativa de la temperatura superficial del mar (<i>TSM</i>) por zona de pesca durante 2002-2021 en el sur del golfo de California. En rojo la curva de la distribución normal.	100
Figura 33. Diagrama de cajas con bigote de la temperatura superficial del mar (<i>TSM</i>) por zona de pesca durante 2002-2021 en el sur del golfo de California. En gris el rango intercuartílico. La línea horizontal en negro representa la mediana. Las barras de error	

representan el mínimo (límite inferior de 1.5 veces el rango intercuartílico) y el máximo (límite superior de 1.5 veces el rango intercuartílico).....	102
Figura 34. Diagrama de cajas con bigote de la temperatura superficial del mar (<i>TSM</i>) por zona de pesca por mes durante 2002-2021 en el sur del golfo de California. En gris el rango intercuartílico. La línea horizontal en negro representa la mediana. Las barras de error representan el mínimo (límite inferior de 1.5 veces el rango intercuartílico) y el máximo (límite superior de 1.5 veces el rango intercuartílico) y los marcadores son los outliers.	103
Figura 35. Serie histórica de reclutas y reproductores (no. de org. $\times 10^7$) de la sardina crinuda <i>O. libertate</i> en el stock del sur del golfo de California durante 1988-2021.....	108
Figura 36. Distribución de frecuencia observada del reclutamiento de la sardina crinuda <i>O. libertate</i> en el stock del sur del golfo de California durante 1988-2021.....	109
Figura 37. Diagnóstico residual del GAM seleccionado para modelar el reclutamiento anual de la sardina crinuda <i>O. libertate</i> en el stock del sur del golfo de California durante 1988-2021. Las líneas punteadas negras representan los percentiles 25 y 97.5. Las líneas punteadas negras representan el umbral de significancia para las correlaciones en la función de autocorrelación.	114
Figura 38. Distribución de frecuencia observada (a) y de los valores ajustados (b) provenientes del GAM seleccionado para modelar reclutamiento de la sardina crinuda <i>O. libertate</i> en el stock del sur del golfo de California durante 1988-2021.....	115
Figura 39. Diagrama de dispersión del reclutamiento observado contra los valores ajustados provenientes del GAM seleccionado para modelar reclutamiento de la sardina crinuda <i>O. libertate</i> en el stock del sur del golfo de California durante 1988-2021.....	116
Figura 40. Reclutamiento observado y ajuste del GAM seleccionado (no. de org. $\times 10^7$) de la sardina crinuda <i>O. libertate</i> en el stock del sur del golfo de California durante 1988-2021.	117
Figura 41. Gráficos de efectos parciales de las variables predictoras del GAM seleccionado para evaluar el efecto de estas sobre el reclutamiento de la sardina crinuda <i>O. libertate</i> en el stock del sur del golfo de California durante 1988-2021. Las líneas verticales solidas indican en todos los casos el valor de la variable predictora que maximiza el reclutamiento (óptimo). Las líneas verticales punteadas indican en todos los casos el valor (o valores) de la variable predictora que tiene un efecto de reducción del 50% del reclutamiento óptimo.	119

LISTA DE TABLAS

Tabla I. Límites norte y sur de las áreas de pesca de la sardina crinuda <i>O. libertate</i> en el sur del golfo de California. Tomado de Vallarta-Zárate (2012).	28
Tabla II. Ejemplo del marco de datos construido para probar distintos escenarios del efecto de las variables ambientales sobre el reclutamiento anual de <i>O. libertate</i> en el sur del golfo de California.	42
Tabla III. Valores medios y desviación estándar mensuales del Índice de surgencia (<i>IS</i> en $m^3/s/100$ m de línea de costa) durante 1988-2021 en el sur del golfo de California.....	55
Tabla IV. Valores medios y desviación estándar mensuales por zonas de pesca del Índice de surgencia (<i>IS</i> en $m^3/s/100$ m de línea de costa) durante 1988-2021 en el sur del golfo de California.....	56
Tabla V. Valores medios y desviación estándar mensuales del Índice de turbulencia (<i>IT</i> en m^3/s^3) durante 1988-2021 en el sur del golfo de California.	64
Tabla VI. Valores medios y desviación estándar mensuales por zonas de pesca del Índice de turbulencia (<i>IT</i> en m^3/s^3) durante 1988-2021 en el sur del golfo de California.....	65
Tabla VII. Valores medios y desviación estándar mensuales de la temperatura superficial del mar (<i>TSM</i> en °C) durante 2002-2021 en el sur del golfo de California.	77
Tabla VIII. Valores medios y desviación estándar mensuales por zonas de pesca de la temperatura superficial del mar (<i>TSM</i> en °C) durante 2002-2021 en el sur del golfo de California.....	78
Tabla IX. Resultados de las pruebas de normalidad al índice de surgencia (<i>IS</i>) para cada zona de pesca, mensual, durante 1988-2021 en el sur del golfo de California.	91
Tabla X. Resultados de las pruebas de comparaciones múltiples no paramétrica del índice de surgencia (<i>IS</i>) por zona de pesca por mes durante 1988-2021 en el sur del golfo de California.....	91
Tabla XI. Resultados de las pruebas de normalidad del índice de turbulencia (<i>IT</i>) para cada zona de pesca, mensual, durante 1988-2021 en el sur del golfo de California.	98
Tabla XII. Resultados de las pruebas de homocedasticidad al índice de turbulencia (<i>IT</i>) para todas las zonas de pesca, mensual, durante 1988-2021 en el sur del golfo de California.....	98
Tabla XIII. Resultados de las pruebas de comparaciones múltiples no paramétrica del índice de turbulencia (<i>IT</i>) por zona de pesca por mes durante 1988-2021 en el sur del golfo de California.....	99

Tabla XIV. Resultados de las pruebas de normalidad a la temperatura superficial del mar (<i>TSM</i>) para cada zona de pesca, mensual, durante 2002-2021 en el sur del golfo de California.....	104
Tabla XV. Resultados de las pruebas de homocedasticidad a la temperatura superficial del mar (<i>TSM</i>) para todas las zonas de pesca, mensual, durante 2002-2021 en el sur del golfo de California.	104
Tabla XVI. Resultados de las pruebas de comparaciones múltiples no paramétrica de la temperatura superficial del mar (<i>TSM</i>) por zona de pesca por mes durante 2002-2021 en el sur del golfo de California.	106
Tabla XVII. Resultados de las pruebas de comparaciones múltiples paramétrica de la temperatura superficial del mar (<i>TSM</i>) por zona de pesca por mes durante 2002-2021 en el sur del golfo de California.	106
Tabla XVIII. Métricas de los GAM realizados con cada criterio ambiental para modelar la respuesta del reclutamiento de <i>O. libertate</i> en el sur del golfo de California 1988-2021 ante distintos escenarios.....	111

1. INTRODUCCIÓN

En México la pesquería de pelágicos menores es una actividad muy relevante. Esta se desarrolla en los litorales del noroeste del país (norte, centro y sur del golfo de California y costa occidental de B. C. N y B. C. S) y es la más importante en cuanto a sus volúmenes de capturas. En el sur del golfo de California (Sinaloa y Nayarit) esta pesquería representó el 21.77% de la producción pesquera total de Sinaloa durante el 2020 (AGRICULTURA, 2020).

Esta pesquería es multiespecífica y está basada en el aprovechamiento de 8 especies que por su historia de vida han sido catalogadas como pelágicos menores (DOF, 2012). En Sinaloa, la pesquería se concentra mayormente sobre tres de las especies del complejo sardina crinuda: *Opisthonema libertate* (Günther, 1867), *O. bulleri* (Regan, 1904) y *O. medirastre* (Berry y Barrett, 1963). Históricamente, estas especies han predominado en la captura de la flota de la región, siendo *O. libertate* la especie más abundante (Jacob-Cervantes, 2010). Dada su importancia como recurso pesquero, desde el 2016, en el sur del golfo de California este complejo de especies se encuentra certificado por el Marine Stewardship Council (MSC) como sustentable y bien manejado (SCS, 2016).

El efecto producido por la variabilidad ambiental sobre las poblaciones de pelágicos menores ha sido ampliamente documentado en México (Quiñónez-Velázquez y Elorduy-Galay, 2004). Se ha demostrado que las condiciones ambientales que imperan en el Golfo de California pueden tener repercusiones sobre las capturas y sobre indicadores de abundancia relativa tales como la captura por unidad de esfuerzo (CPUE) (Nevárez-Martínez *et al.*, 2008).

Otro punto importante a considerar durante el análisis de la influencia del ambiente sobre la dinámica de los stocks de pelágicos menores, es su impacto sobre la relación stock-reclutamiento (S-R) (Morales-Bojórquez y Nevárez-Martínez, 2005; De Anda-Montañez *et al.*, 2010; Galindo-Cortes *et al.*, 2010; Montañez, 2010). La relación S-R permite determinar cuánto puede aportar el stock reproductor a la

productividad futura del mismo (reclutas). Esto es particularmente útil en el desarrollo de modelos de evaluación de stock que incorporan tanto datos de captura y edad, así como el efecto de la relación S-R en la biomasa futura (Haddon, 2011). Así, distintos modelos de S-R asumen, entre otras cosas, que el tamaño del stock reproductor está relacionado de forma no lineal con el reclutamiento (Walters y Ludwig, 1981; Hilborn y Walters, 1992) y así como el tamaño de stock puede responder a la variación de algunos parámetros ambientales tales como la temperatura superficial del mar, la surgencia y algunos índices climáticos de gran escala (PDO, ONI etc.) (Galindo-Cortes *et al.*, 2010), también el reclutamiento futuro puede verse afectado. En este sentido, el objetivo medular de la presente investigación es analizar como la variación de algunos parámetros ambientales, tales como la *TSM* (o un *proxy* de esta) el índice de surgencia y el índice de turbulencia pueden repercutir en el reclutamiento de la sardina crinuda *O. libertate* en el sur del golfo de California. Además, producto de dicho análisis se describirá que valor o valores de las variables ambientales maximizan el reclutamiento de la especie, esto acorde con el concepto de ventana ambiental óptima (Cury y Roy, 1989). Este trabajo está en el marco de los objetivos del programa de Pelágicos Menores del Centro Regional de Investigación Acuícola y Pesquera de Mazatlán del Instituto Mexicano de Investigación en Pesca y Acuicultura Sustentables (IMIPAS) (antes Instituto Nacional de Pesca y Acuicultura, INAPESCA).

2. ANTECEDENTES

2. 1. Taxonomía y biología de la sardina crinuda

“Sardina crinuda” es el nombre con el que comúnmente se conoce a las especies del género *Opisthonema* en el sur del golfo de California. Otros nombres comunes se han acuñado en regiones donde también ocurren este tipo de organismos, tales como “Arenque de hebra”, “Machuelo de hebra” o “Sardina gallera” (Allen y Robertson, 1994).

Las sardinias crinudas son peces marinos que se encuentran en aguas tropicales y subtropicales del continente americano. El género se compone de 5 especies: una especie habita en el Atlántico (*O. oglinum*), tres en las costas del Pacífico oriental (*O. libertate*, *O. bulleri* y *O. medirastre*) y una especie en las islas Galápagos (*O. berlangai*) (Berry y Barrett, 1963). El género *Opisthonema* está dentro de la familia Dorosomatidae (Wang *et al.*, 2022). Estos son peces pequeños de entre 10 y 20 cm de longitud y de cuerpo casi fusiforme con varias tonalidades (Fisher *et al.*, 1995). Son organismos forrajeros oportunistas, cuya principal fuente de alimento es el fitoplancton y el zooplancton, estando su alimentación mayormente representada por diatomeas, dinoflagelados y crustáceos (Jacob-Cervantes *et al.*, 1992).

La identificación de estas especies es particular dado que no es posible realizar una identificación certera tan solo con los caracteres externos (**Figura 1**). La diferenciación se basa en el área geográfica de aparición y en el número de branquiespinas del hueso ceratobranquial del primer arco branquial, las cuales aumentan con respecto a la longitud estándar (Berry y Barrett, 1963).

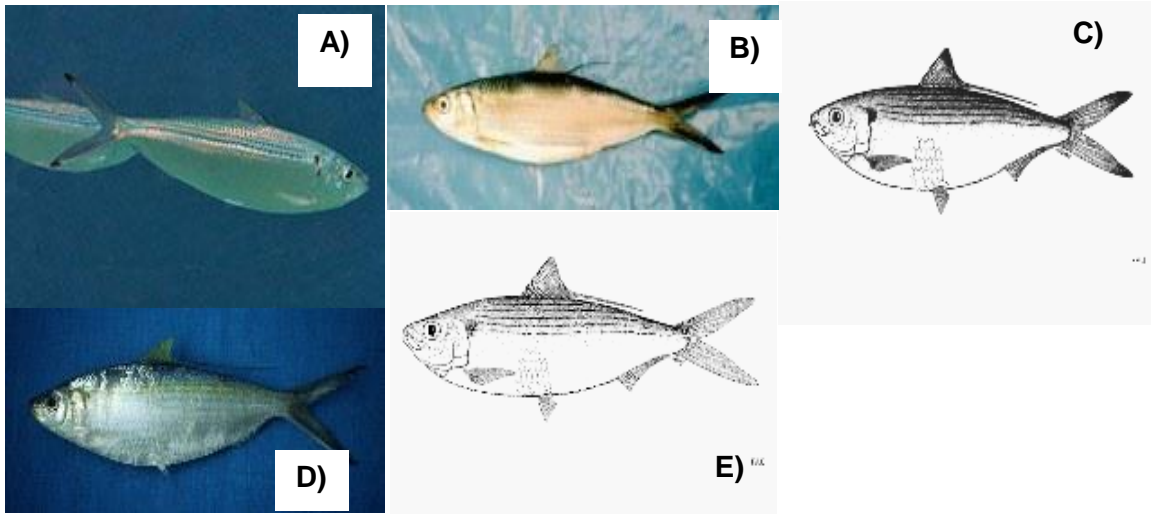


Figura 1. Especies del género *Opisthonema* del mundo. A) *O. oglinum*; B) *O. libertate*; C) *O. bulleri*; D) *O. medirastre* y E) *O. berlangai*. Tomado de FishBase (2022).

2. 2. La pesquería de pelágicos menores en el sur del golfo de California

En México, los pelágicos menores han representado el 21.77% de la producción pesquera total de Sinaloa y el 44.09% de la producción pesquera total del litoral del Pacífico (AGRICULTURA, 2020) (**Figura 2**). Las capturas totales en la región sur del golfo de California han sido muy variables a lo largo del tiempo, presentándose temporadas con valores de capturas menores o iguales a 10 mil t, sobre todo en los primeros años de la pesquería (1973-1981) y temporadas con capturas altas, alrededor de las 60 mil t (1990 y 2000). A partir del 2006 las capturas llegaron a rebasar las 80 mil t, permaneciendo en un ascenso continuo. En 2012 las capturas totales de la pesquería superaron las 100 mil t para después disminuir ligeramente. Durante el 2015 las capturas alcanzaron cerca de 50 mil t y a partir del año 2017 y hasta la fecha, las capturas totales se estabilizaron en un promedio de 70 mil t anuales (DOF, 2022).

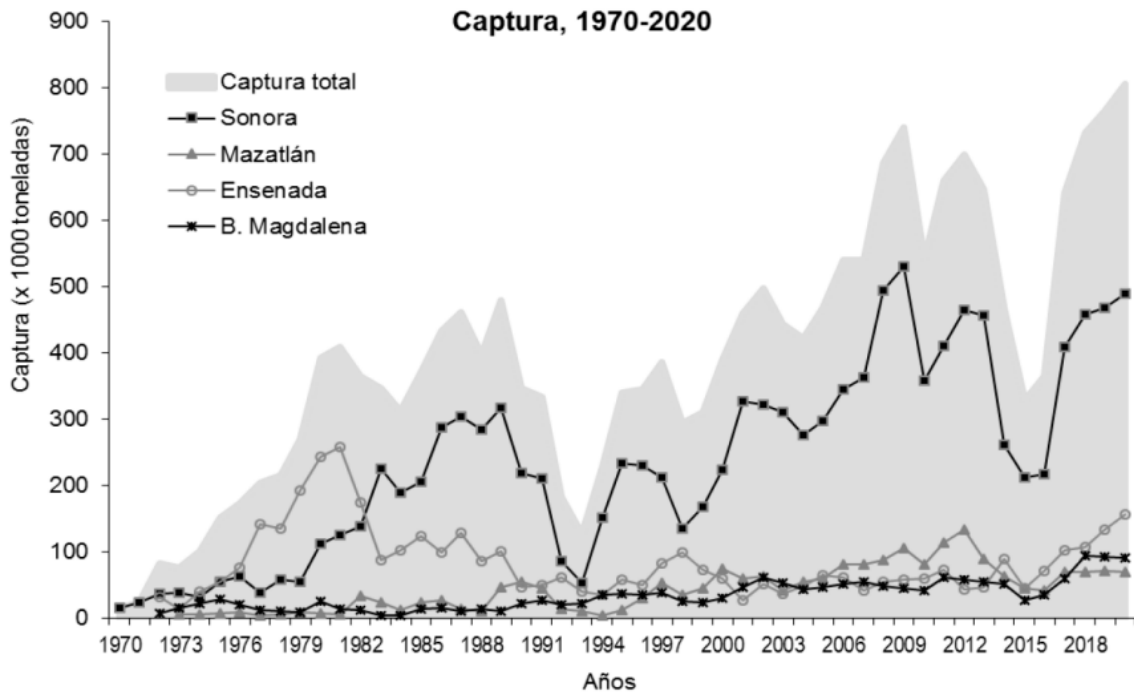


Figura 2. Capturas históricas anuales de Pelágicos Menores en el noreste de México Tomado de DOF (2022).

2. 3. Evaluación de la pesquería de sardina crinuda en el sur del golfo de California

Las investigaciones de esta pesquería iniciaron desde la década de los años 70, Pedrín *et al.* (1973), Pedrín y Ancheita (1976) y Páez-Barrera (1976) iniciaron un sistema de recopilación de información en las costas de Sonora y Sinaloa, desarrollando cruceros de investigación, recolecta de muestras en los puertos de descarga y recabando estadísticas de captura y esfuerzo. Asimismo, Pedrín *et al.* (1973) estudiaron las poblaciones de sardina en el Golfo de California, lo que ha permitido tener un registro continuo a partir de esas fechas.

Entre la década de los años 80 y 90, se empezaron a realizar estudios para estimar la biomasa de la sardina crinuda en la región. Así, Acal (1990), aplicando un método

de censos larvarios, estimó una biomasa de 76,242 t en la parte centro-sur del área de estudio. También estimó un rendimiento potencial de 19,060 t.

Jacob-Cervantes (2012) aplicó un modelo bioeconómico para evaluar la biomasa y el máximo rendimiento económico (MRE) en el sur del golfo de California durante 1972-2009. A partir de un análisis de población virtual (APV) el cual incluye, edades, tallas y capturas, la autora reportó en un escenario de manejo óptimo una biomasa en el MRE de 507,263 t y una captura de 97,768 t.

En estudios más recientes, Payán-Alejo (2019), a partir de la determinación de la edad de las especies de sardina crinuda de la región aplicó un modelo estructurado por edad para evaluar el stock durante el periodo de 1988-2016. El autor reportó para la sardina *O. libertate* cambios en el régimen de biomasa estimada de la especie, asociados a los años 1988-2001 (entre 28,180 t en 1999 y 94,606 t en 2001) y 2002-2016 (entre 135,298 t en 2002 y 613,527 t en 2008).

En contraste, también se ha estudiado la dinámica de este stock de sardina crinuda desde la perspectiva de modelos que son aplicables a pesquerías con datos limitados. Ruíz-Domínguez *et al.* (2021) aplicaron el modelo Catch-MSY (Martell y Froese 2012) para determinar la biomasa explotable y la biomasa al Máximo Rendimiento Sostenible (MRS) en la pesquería de sardina crinuda del sur del golfo de California. Ellos encontraron que la biomasa explotable de acuerdo con el ajuste del modelo era de 320,000 t y una biomasa en el MRS de 120,000 t.

2. 4. La relación stock-reclutamiento en las pesquerías de pelágicos menores

Tal y como sucedió con el estudio del crecimiento en peces, múltiples investigaciones han enfocado sus esfuerzos en vislumbrar patrones en la dependencia entre la progenie (número de reclutas) y el tamaño del stock reproductor (biomasa desovante, numero de organismos) (Cardinale y Arrhenius, 2000). Debe entenderse como stock reproductor a la fracción del stock total que

está compuesta por organismos fisiológicamente aptos para reproducirse, cuya edad/talla corresponde a la edad/talla de madurez sexual. Por otra parte, para definir a los reclutas habrá que entender que estos pasan por todo un proceso para incorporarse a la población y después a la pesquería. Este proceso puede abarcar distintas etapas del ciclo de vida temprano de los organismos dependiendo de su edad/talla (Camp *et al.*, 2020). La historia de vida temprana inicia desde el desove de los gametos sexuales al medio marino, luego la fertilización del huevo, pasando por los distintos estadios larvarios y extendiéndose hasta la etapa de juvenil temprano (Trippel y Chamber, 1997). Durante este periodo de tiempo, los peces experimentan cambios morfológicos rápidos y también están expuestos a las tasas de mortalidad más altas (hasta el 99% de los peces mueren) (Trippel y Chamber, 1997). Los peces que sobreviven a esta etapa de vida temprana ya se han reclutado a la población, pero quizás aún no a la pesquería. Posteriormente, estos peces continúan creciendo hasta alcanzar la edad/talla a la cual se incorporan al evento reproductivo del stock. Típicamente las artes de pesca están diseñadas para seleccionar peces por encima de dicha edad/talla. De esta manera, estos peces ya no solo experimentan mortalidad natural, sino que ahora también experimentan mortalidad por pesca. En este punto, los peces finalmente se han reclutado a la pesquería y forman parte de la nueva clase anual (Camp *et al.*, 2020).

Dado que los datos para la evaluación de un stock provienen en su mayoría de información dependiente de la pesquería, se hace difícil tener datos de peces reclutados a la población, es decir el reclutamiento poblacional. Esto hace necesario inferir los tamaños del stock reproductor y stock de reclutas que debe de haber en la población a partir de información proveniente de las capturas (Sharma *et al.*, 2019).

Los estudios pioneros en explicar la relación del stock reproductor y los reclutas dieron lugar a modelos matemáticos con diferentes supuestos de acuerdo con la idea en su concepción. Ricker (1954) planteó un modelo que intenta explicar la relación S-R asumiendo que aspectos tales como el canibalismo pueden afectar la

supervivencia de los reclutas cuando el tamaño total del stock es muy grande, siendo esta una interpretación del fenómeno de “denso dependencia”.

Otro modelo propuesto por Beverton y Holt (1957) cuya derivación es el balance de una ecuación diferencial que explica como la razón de cambio del número de sobrevivientes respecto al tiempo es igual a la mortalidad sobre los juveniles o reclutas multiplicada por el número de sobrevivientes (Haddon, 2011). Este es un modelo que también muestra la mortalidad “denso dependiente” e implica competencia por algún factor limitante, por ejemplo, el alimento. Si el alimento es limitado, la cantidad de muertes por esta razón dependerá del número de organismos que compiten por el mismo (Sparre y Venema, 1997).

Posteriormente, Shepherd (1982) propuso un modelo generalizado que ha dado versatilidad al ajuste de curvas de S-R, al permitir representar el modelo de Beverton y Holt (1957) o el de Ricker (1954) según se fije el valor de ciertos parámetros.

Por su importancia, muchos de los ejemplos que se han de encontrar en la literatura sobre la relación S-R en poblaciones de peces, tanto en México como en otras partes del mundo, provienen de estudios realizados entorno a especies de pelágicos menores. Por ejemplo, Hill *et al.* (2019), utilizando la plataforma *Stock Synthesis 3* (Methot y Wetzel, 2013) aplicaron el modelo de S-R propuesto por Beverton y Holt (1957) para evaluar el stock de *Sardinops sagax* en la costa noroeste de EU. Encontraron que la biomasa del stock desovante ha declinado en los últimos años lo que ha repercutido directamente en el reclutamiento.

En el noroeste de México, Nevárez-Martínez *et al.* (2023) evaluaron la variabilidad de la biomasa de la sardina del Pacífico *S. sagax* en el Golfo de California a partir de un modelo estructurado por edad y ajustado con diferentes índices de abundancia independientes de la pesquería. Un resultado particular es la aseveración por parte de los autores de que los organismos de edad cero (reclutas) son parte fundamental para entender la variabilidad en el stock de la especie.

Para el caso de la región sur del golfo de California, en la aplicación de un modelo estructurado por edad, Payán-Alejo (2019) ajustó la función S-R propuesta por Beverton y Holt (1957) a los datos de reproductores (edad 1+) y reclutas (edad 0) de sardina crinuda *O. libertate*. Sus resultados indican una condición saludable del stock reproductor y de reclutas, alcanzando un estimado de 420,000 t y 270,000 t en 2009 y 2007 respectivamente.

2. 5. Variabilidad ambiental y las pesquerías de pelágicos menores

La mayoría de las poblaciones de organismos marinos tienden a responder de distinta manera ante la variación de una o más variables oceanográficas o atmosféricas. De acuerdo con Bakun (1996), el éxito reproductivo de estos organismos está en función de tres aspectos fundamentales de las condiciones oceanográficas: el enriquecimiento con nutrientes de la columna de agua (surgencia), el transporte y la retención de larvas en áreas favorables para su supervivencia y crecimiento (Triada de Bakun).

En el caso de las poblaciones de pelágicos menores, múltiples estudios han identificado la influencia que tiene el cambio de una o más variables y el grado de relación que han tenido en el desarrollo de aspectos de las pesquerías de pelágicos menores, tales como las capturas (Ruiz-Luna y Lyle, 1992; Nevárez-Martínez *et al.*, 2008), la abundancia (Lluch-Belda *et al.*, 1992; Nevárez-Martínez *et al.*, 2001; Anderson *et al.*, 2008) o el reclutamiento (Cury y Roy, 1989; Guisande *et al.*, 2001; Morales-Bojórquez *et al.*, 2003; Morales-Bojórquez y Nevárez-Martínez, 2005; Galindo-Cortes *et al.*, 2010; Montañez, 2010).

2. 5. 1. Temperatura superficial del mar

La temperatura superficial del mar (*TSM*) tiene un papel clave como regulador del ambiente y está influida por parámetros climáticos, meteorológicos, hidrodinámicos y topográficos (Iglesias *et al.*, 2010). Es la propiedad física más importante del agua del océano al medir el contenido de calor que esta guarda (Marín-Hernández, 2021).

La *TSM* en puntos específicos del Océano Pacífico responde al desarrollo de eventos de gran escala como el fenómeno de El Niño, o su inverso, La Niña (Magaña-Rueda, 2004). Sus efectos no solo son perceptibles por las poblaciones humanas si no que a nivel de ecosistema influye en la fisiología y el comportamiento de los organismos de las poblaciones naturales (Lanz *et al.*, 2009).

El comportamiento de la *TSM* varía interanualmente, así como estacionalmente dependiendo de la latitud geográfica. En el Golfo de California existen estudios como el de Robles-Tamayo *et al.* (2018) en el cual se analizó la *TSM* en el Golfo de California, tanto en la región centro como en la región sur. La principal conclusión es que existe un marcado gradiente latitudinal de sur a norte en cuanto al desarrollo de la *TSM* a lo largo de todo el Golfo de California. El patrón estacional para todos los puntos de muestreo fue de tipo oscilatorio con máximos en verano y mínimos en invierno.

En el Golfo de California y particularmente en stocks de pelágicos menores, diversas investigaciones han analizado la relación entre las fluctuaciones de *TSM* y las capturas. Durante 2002-2007 Lanz *et al.* (2009) determinaron que, tanto la *TSM* como la Clorofila-a, tenían cierto grado de correlación lineal con las capturas de las especies *S. sagax*, *O. libertate*, *Engraulis mordax* y *Scomber japonicus*. Sin embargo, la mayor correlación respecto a la *TSM* la presentó *E. mordax* ($r=0.70$) sugiriendo que las capturas de esta especie se influyen de manera positiva con el aumento de la *TSM*.

Vallarta-Zárate y Jacob-Cervantes (2014) analizaron las capturas de sardina crinuda en la región sur del golfo de California con respecto a datos de *TSM* proveniente de imágenes satelitales durante el periodo de 1996 a 2012. Ellos encontraron una relación inversa entre las capturas históricas de la especie y las anomalías de *TSM*. Además, los autores reportaron una tendencia positiva en el comportamiento de la *TSM* a través del tiempo.

Otros estudios como el llevado a cabo recientemente por Zamora-Sarabia *et al.* (2022) han evidenciado la relación que la *TSM* tiene con respecto a cuestiones fisiológicas en los pelágicos menores. Los autores encontraron que la *TSM* tiene una relación estadísticamente significativa con el índice de desempeño del crecimiento (φ') de la sardina crinuda *O. libertate* del sur del golfo de California.

Con respecto a la relación S-R y la manera en cómo se ve afectada con la *TSM*, estudios como el realizado por Morales-Bojórquez *et al.* (2003) concluyeron que la mortalidad denso independiente de *S. sagax* en la costa suroeste de la península de Baja California se ve influenciada por la estación del año. Las estaciones de mayor influencia fueron otoño, invierno y primavera observándose variaciones en el reclutamiento cuando la *TSM* fue mayor a 19.3 °C.

2. 5. 2. Surgencia costera

En el océano, existen diversos procesos por los cuales se puede dar el enriquecimiento de nutrientes de la columna de agua (Bakun, 1996). Algunos de estos procesos son producidos por la acción del viento sobre la superficie del mismo, tales como la surgencia costera en corrientes de límite (Kämpf y Chapman, 2016) surgencia costera estacional (Lluch-Cota, 2000; Lluch-Cota *et al.*, 2010), surgencia ecuatorial (Helber y Weisberg, 2001) y el rotacional del esfuerzo del viento (Bakun y Nelson, 1991). Sin embargo, también existen procesos como la surgencia inducida por vórtice (Casella *et al.*, 2011), mezcla provocada por marea (Zhabin *et al.*, 2019), surgencia por ruptura de plataforma (Jacobs *et al.*, 2020), la mezcla de termoclina superficial (Sastry y D'souza, 1972) y el aporte de nutrientes de ríos (Gray *et al.*, 2002) que, si bien no involucran la acción del viento, también se sabe que propician el enriquecimiento de las capas superficiales del océano.

De acuerdo con Kämpf y Chapman (2016), los grandes sistemas de surgencia costera de corriente de límite (Corriente de California, Chile-Perú, Canaria-Iberia y Benguela) son el proceso de enriquecimiento más relevante y estudiado. Estos sistemas de corriente tienen la característica de que fluyen paralelos a un borde

continental, transportando agua fría y rica en nutrientes. Además, en estos 4 sistemas, la surgencia inducida por el viento ocurre durante gran parte o todo el año. No obstante, también existen sistemas de surgencia costera estacional inducida por el viento que son el soporte de nutrientes de importantes regiones pesqueras del mundo (Mar de China, Mar de Indonesia, la plataforma australiana, Nueva Zelanda, India, Golfo de México y Mar Caribe). En estos sistemas, el estrés del viento sobre la superficie del océano es relevante solo durante alguna época del año, dando lugar a surgencia estacional.

Independientemente de si se trata de un sistema de surgencia de corriente de límite o estacional, la teoría y los procesos físicos por los cuales se desarrollan son básicamente los mismos. Así, Kämpf y Chapman (2016) definen la surgencia como el movimiento ascendente de parcelas de agua en la columna de agua que se mantienen por un periodo considerable de tiempo. Este ascenso de parcelas de agua (fría y rica en nutrientes) es posible debido a la acción que ejerce el viento superficial (proveniente del norte) sobre la superficie del océano sumado al efecto de Coriolis. En el hemisferio norte, estos factores provocan el desvío hacia la derecha (mar afuera) de las parcelas superficiales del océano en un ángulo de 90° (Transporte de Ekman) las cuales, debido a la propiedad de incomprensibilidad del agua, son reemplazadas por parcelas de agua provenientes de mayor profundidad (**Figura 3**).

El hecho de que se intuyera que la surgencia costeras es pieza clave en el afloramiento de nutrientes a las capas oceánicas más superficiales, dio pie a que se investigaran los mecanismos por los cuales esto repercute en las poblaciones marinas. Bakun (1973), a partir de la aplicación de los conceptos desarrollados por Ekman (1905), presentó un índice de surgencia (*IS*) en la costa oeste de Estados Unidos durante el periodo de 1946-1971. Este trabajo se convirtió en la base de muchas investigaciones que posteriormente empezaron a relacionar el *IS* con aspectos de la dinámica de poblaciones de peces tales como la abundancia, el desove o la relación S-R.

Lluch-Belda *et al.* (1991) relacionaron el desove de la sardina *S. sagax* y la anchoveta *E. mordax* con el *IS* en la corriente de California. Sus hallazgos les permitieron concluir que, en esa zona, *S. sagax* es una especie que desova durante un nivel de surgencia intermedio, mientras que *E. mordax* lo hace en niveles de surgencia tanto alta como baja.

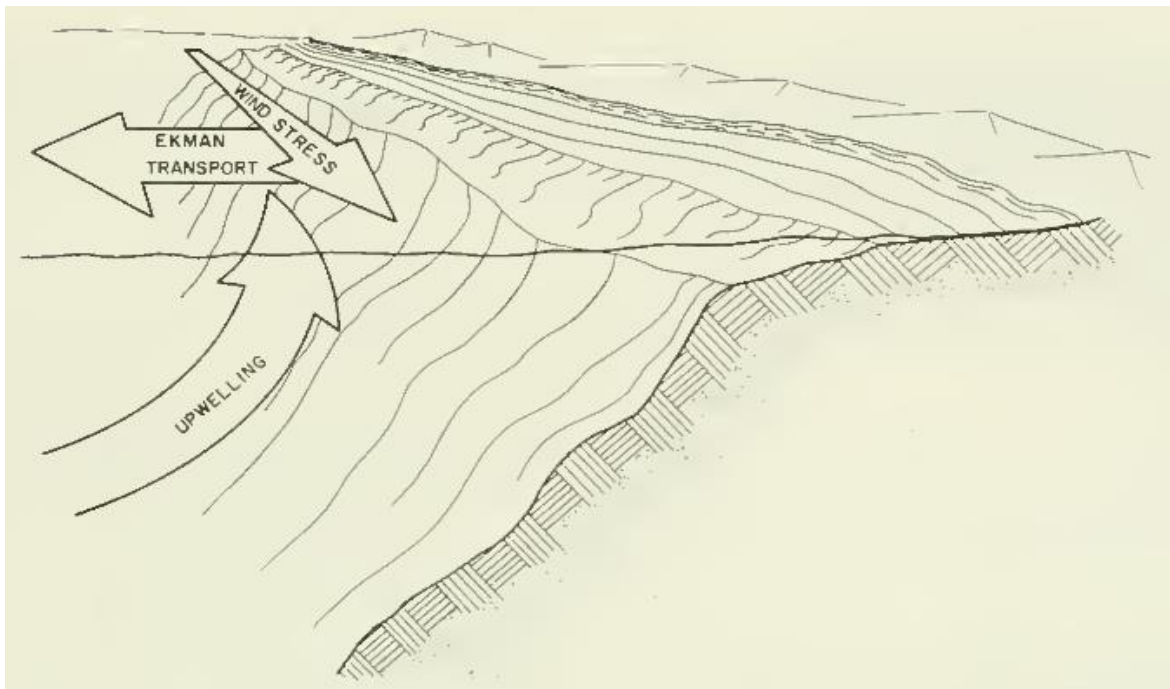


Figura 3. Diagrama de un proceso de surgencia costera con vientos en dirección de norte a sur. Tomado de Bakun (1973).

Nevárez-Martínez *et al.* (2008) analizaron la relación entre el ambiente (*TSM* e *IS*) y la captura de *S. sagax* en el Golfo de California. Identificaron condiciones óptimas de surgencia entre 60 y 80 m^3/s para las cuales la captura de esta especie se maximizaba.

En stocks de pelágicos menores, algunos estudios se han enfocado en analizar cómo se puede ver afectada la relación S-R de acuerdo con desarrollo de los patrones de viento y el *IS* en el Golfo de California y en otras regiones del mundo.

Galindo-Cortes *et al.* (2010) analizaron, entre otras cosas, el *IS* y su repercusión sobre la relación S-R de la sardina monterrey *S. sagax* en el noroeste del Océano Pacífico. Los autores encontraron fluctuaciones cíclicas anuales en cuanto al *IS*, reportando valores de anomalías desde -34 hasta 38 m³/s por cada 1000 m de línea de costa, los cuales correspondieron a valores de reclutamiento de 5,100x10⁶ org. y 836,000 t de biomasa reproductora, así como 2,435x10⁶ org. y 223,000 t de biomasa reproductora respectivamente.

2. 5. 3. Turbulencia

La estructura vertical del océano se caracteriza por presentar distintas capas en función de la profundidad máxima, la localización geográfica o la época el año. Hasta los primeros 25 metros de profundidad, la temperatura y la salinidad suelen ser homogéneas, lo cual es típico en la denominada “capa de mezcla” (Palacios-Hernández y Carrillo B, 2016). Esta capa de mezcla está en constante interacción con la atmosfera a través del límite o interfaz aire-agua, lo que provoca que sea la capa del océano con la mayor actividad de turbulencia y densidad energética principalmente debido al viento y a la incidencia de radiación solar (Fox-Kemper *et al.*, 2022).

El concepto de turbulencia no es algo trivial en oceanografía pesquera. De acuerdo con Mackenzie (2000), el estudio de los procesos por los cuales la turbulencia se genera en el ambiente marino y que repercuten en la supervivencia, alimentación y crecimiento de larvas de peces, ha tomado relevancia en los últimos años. El autor define la turbulencia como el movimiento por medio del cual se transfiere de energía cinética a la columna de agua. Dicha transferencia puede influenciar verticalmente a gran escala (decenas de metros) y a pequeña escala (centímetros o milímetros) dependiendo de la naturaleza del fenómeno que originó la perturbación. Así, el autor menciona que procesos tales como las tormentas, las mareas, la surgencia e incluso las plumas de los ríos pueden generar turbulencia en el océano.

Para determinar como la acción del viento sobre la superficie del océano contribuye a generar turbulencia por medio de la transferencia de energía en la capa de mezcla del océano fue necesario que se realizaran mediciones *in situ*. Así, en un estudio llevado a cabo por Oakey y Elliott (1982) ellos demostraron que la tasa de disipación de la energía cinética en la capa de mezcla estaba relacionada con la energía que entraba de la atmosfera, concretamente, con la rapidez del viento (U_{10} *sensu* Oakey y Elliott, 1982) tratado como $|\vec{V}|$ viento sin dirección en m/s en adelante). Los autores realizaron mediciones de perfiles verticales con un perfilador de microestructura, el cual es un instrumento que está diseñado para medir turbulencia a escala de disipación (Paka *et al.*, 2013). Uno de sus principales resultados fue la correlación entre el forzante atmosférico $|\vec{V}|$ y la tasa de disipación integrada (ε_I) en la capa de mezcla, tal que ε_I es una fracción constante (~1%) del flujo de energía de la atmosfera E_{10} , el cual es la principal fuente de disipación en la capa de mezcla. A partir de $|\vec{V}|$ a una altura de 10 metros ($|\vec{V}|_{10}$), E_{10} se estima como sigue (Oakey y Elliott, 1982):

$$E_{10} = \rho_a C_{10} |\vec{V}|_{10}^3$$

donde ρ_a es la densidad del aire y C_{10} es un coeficiente de arrastre (0.0013) ambos constantes y E_{10} tiene unidades de Watt/m² para expresar la disipación de energía por unida de área. De forma resumida, despreciando las constantes se puede intuir que el flujo de energía de la atmosfera al océano E_{10} (y del cual a su vez depende ε_I) es proporcional a $|\vec{V}|^3$, siendo entonces $|\vec{V}|^3$ (en adelante, Índice de turbulencia IT) un indicador razonable de la turbulencia en la capa de mezcla (Oakey y Elliott, 1982).

Los estudios sobre la influencia de la turbulencia sobre algún atributo en stocks de pelágicos menores en el Golfo de California son limitados. Sin embargo, en otros lugares del mundo se han realizado numerosas investigaciones de la variabilidad

biológica en stocks de peces con el viento como variable independiente significativa (Mackenzie, 2000).

El primer estudio que mostró el efecto del viento sobre la disponibilidad de alimento para las larvas de *E. mordax* en la costa oeste de EU fue realizado por Lasker (1978). El autor documentó que los dinoflagelados necesarios para la primera alimentación de *E. mordax* fueron disipados por la acción de la surgencia (medio turbulento) y en su lugar fueron reemplazados por diatomeas, las cuales no son idóneas para este fin. La principal conclusión del autor fue que la duración prolongada del estrés del viento sobre la superficie del océano es un factor crucial para la supervivencia de las larvas de esta especie.

Husby y Nelson (1982) estudiaron el *IT* y la estabilidad vertical en la corriente de California de 1850 a 1972 en la costa oeste de los EUA en relación con la época de desove de la anchoveta norteña *E. mordax*. Se encontraron diferencias en cuanto a la variabilidad estacional del índice respecto de la localidad, con un *IT* medio de 300 m^3/s^3 en la costa occidental de Baja California. Así mismo, el pico de la época de desove de la especie en tres puntos de la costa occidental de EUA y México se relacionó con bajos valores de turbulencia.

En un estudio realizado por Borja *et al.* (2002) en 10 localidades de la costa noreste del Océano Atlántico en Europa, se estudió la relación del reclutamiento de la macarela *Scomber scombrus* con algunas variables ambientales, entre ellas el *IT*. Los valores del índice oscilaron de 100 a 400 m^3/s^3 en los meses del periodo reproductivo de la especie y los autores concluyeron que la turbulencia era la variable más explicativa, con una alta correlación negativa con el reclutamiento de la especie.

Daskalov (1999) publicó un estudio multiespecífico para el Mar Negro donde analizó la relación entre el reclutamiento y múltiples variables físicas (incluida el *IT*) por medio de modelos aditivos generalizados. Las especies estudiadas fueron *Sprattus sprattus*, *Merlangius merlangus*, *Engraulis encrasicolus* y *Trachurus mediterraneus*

donde la relación entre el reclutamiento y el *IT* fue significativa en dos modelos para *T. mediterraneus* ($r^2= 0.44$ $p<0.01$ y $r^2= 0.64$ $p<0.05$), ambos modelos con *TSM* e *IT* como variables independientes.

2. 6. Teoría de la ventana ambiental óptima

Distintas hipótesis han sido propuestas para tratar de explicar cómo es que la variabilidad ambiental repercute en el éxito de la progenie (reclutamiento) de algunas especies de pelágicos menores. Dichas hipótesis son conocidas como hipótesis del reclutamiento. Cole y McGlade (1998) separaron en dos grandes categorías estas hipótesis: mecanicistas y de síntesis. Las hipótesis mecanicistas intentan explicar el éxito del reclutamiento en función de factores que tienen una relación directa con procesos oceanográficos específicos y que dan lugar a la mortalidad de huevos y larvas. Por su parte, las hipótesis de síntesis intentan englobar más de una hipótesis mecanicista en un mismo razonamiento para explicar mejor el éxito en el reclutamiento.

La teoría de la ventana ambiental óptima (VAO) (Cury y Roy, 1989) es considerada por Cole y McGlade (1998) como una teoría de síntesis. Esta explica cómo es la relación entre el reclutamiento (o algún indicador del mismo) y las variables ambientales tales como la surgencia y la turbulencia: esta ha de ser típicamente no lineal (en forma de domo) y cuyos valores máximos en las variables predictoras, se interpretan como los valores a los cuales el reclutamiento se ve favorecido (maximizado).

De este modo, Cury y Roy (1989) analizaron el efecto de la variabilidad ambiental (*IS* e *IT*) sobre el reclutamiento en varias pesquerías de pelágicos menores que se desarrollaban en zonas importantes de surgencia costera (noroeste de California EU, Perú y oeste de África). Bajo la premisa de que existen relaciones no lineales entre el reclutamiento, el *IS* y el *IT*, probaron que el reclutamiento puede ser maximizado cuando dichas variables ambientales son de intensidad intermedia

(asociado a una rapidez del viento de 5-6 m/s); en una curva, éste lugar es la VAO (Figura 4).

Desde entonces, un gran número de investigaciones han tenido como objetivo analizar la relación entre algún atributo del stock que indique la magnitud del reclutamiento para distintas especies de peces en relación con la variabilidad ambiental, buscando probar la existencia de una VAO. Algunos estudios son respecto a especies de pelágicos menores, pero los hay también sobre otras especies de peces. También existen trabajos que investigan un par de variables oceanográficas y otros que relacionan la mayor cantidad posible.

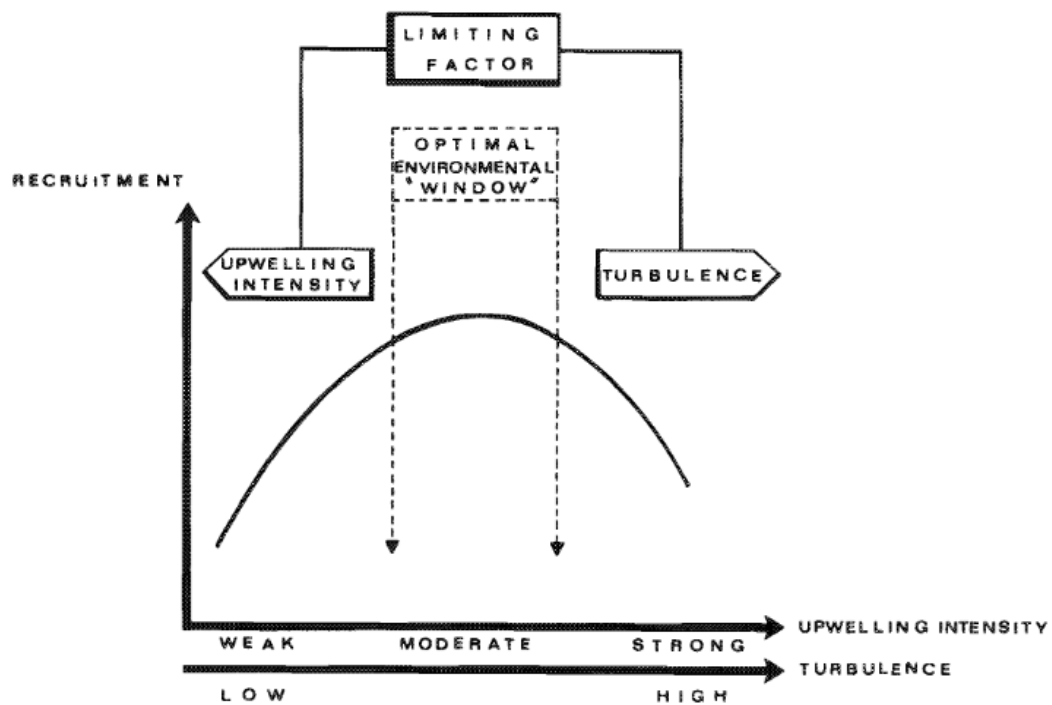


Figura 4. Relación teórica entre el reclutamiento y los factores ambientales en zonas de surgencia costera. Tomado de Cury y Roy (1989).

Acuñaando este concepto, Roy *et al.* (1992) estudiaron el reclutamiento de *Sardina pilchardus* y *E. mordax* y su relación con la intensidad del viento en una zona de surgencia importante (Morocco y California). Por medio de métodos estadísticos no paramétricos los autores determinaron que el reclutamiento aumentaba con respecto al aumento de la surgencia, hasta alcanzar un máximo de 0.4 ton/s/m para *S. pilchardus* y de 1.5 ton/s/m para *E. mordax*. Para ambas especies, la relación entre la variable ambiental y el reclutamiento fue en forma de domo.

En el Mar Cantábrico Sánchez *et al.* (2003) estudiaron el reclutamiento anual de la especie demersal *M. merluccius* y su respuesta ante las condiciones variables de surgencia (a partir de un índice de *TSM*) y salinidad. La principal conclusión del estudio fue la existencia de una VAO del reclutamiento. En condiciones de surgencia del 80% del índice y en condiciones de salinidad moderada el reclutamiento se maximizaba.

En otro tipo de estudios como el llevado a cabo por Diankha *et al.* (2018) se estudió el reclutamiento de *Sardinella aurita* y *Sardinella maderensis* relacionado con múltiples variables oceanográficas (*TSM*, productividad primaria, *IT*, *IS* e índices climáticos) por medio de modelos de regresión semiparamétricos para determinar la VAO de las especies. De las variables anteriores, los autores mencionan que la *TSM* y el *IS* fueron claves para explicar el reclutamiento en ambas especies. Valores de entre 22 y 28.5 °C de *TSM* y 1.4 m³/s³/m de *IS* para *S. aurita*, así como 25 °C de *TSM* y 0.7 m³/s³/m de *IS* para *S. maderensis* maximizaban el reclutamiento de las especies.

En México, Nevárez-Martínez *et al.* (2008) Investigaron la distribución y abundancia de la sardina monterrey *S. sagax* en el Golfo de California en relación a variables ambientales tales como la *TSM* y el *IS*. Utilizando métodos no lineales, encontraron que la abundancia de esta especie se maximiza a valores de surgencia moderada (13-18 m³/s por 10 m de la línea de costa) y la *TSM* entre 19 y 25 °C.

Por su parte, en un estudio similar llevado a cabo por Vallarta-Zárate (2012) se analizó la distribución y abundancia de la sardina crinuda *Opisthonema* spp. del sur del golfo de California respecto a las mismas variables ambientales (*TSM*, *IS* e *IT*) por medio de un modelo estadístico multivariado no paramétrico. Este autor reportó que la VAO a la cual se maximiza la abundancia para estas especies es de 25-26 °C de *TSM*; valores entre 70-80 m³/s del *IS* y valores menores a 40 m³/s³ del *IT*.

2. 7. Área de estudio

La región donde se realiza la pesca de pelágicos menores por parte de la flota sardinera que desembarca en Mazatlán, Sinaloa, y que es el área de estudio del presente trabajo (**Figura 5**), comprende los litorales de los estados de Sinaloa, Nayarit y la parte norte de Jalisco, en aguas del Golfo de California. Esta se ha subdivido en cinco áreas las cuales fueron delimitadas con fines administrativos por IMIPAS antes INAPESCA (zonas de pesca I, II, III, IV y V); aunque por cuestiones de eficiencia en tiempo y economía, la mayoría de sus capturas se realizan en la costa de Sinaloa. Para este proyecto, se delimitaron geográficamente las áreas de pesca administrativas, con el fin de obtener los datos de las diferentes variables ambientales de cada una de ellas (**Tabla I**).

2. 7. 1. Oceanografía física del Golfo de California

De acuerdo con Lavín y Marinone (2003), el Golfo de California puede ser dividido en cuatro zonas: alto golfo de California (del Delta del Rio Colorado hasta San Felipe en Baja California), norte del golfo de California (de San Felipe a Isla tiburón), sureste del golfo de California (de Isla tiburón a el Dorado en Sinaloa) y una zona de entrada, la cual se limita de Cabo San Lucas Baja California sur hasta Cabo Corrientes Jalisco. Mide 1400 km de largo y 200 km de ancho (en la región centro), con una profundidad de hasta 4500 m en la zona de entrada y en él se ha reportado la prevalencia de seis masas de agua: Agua del Pacifico Profundo (min 34.5 ups y 0-4 °C), Agua del Pacifico Intermedio (min 3.4 ups y 5-8 °C), Agua Superficial Subtropical (34.5-35 ups y 9-18 °C), Agua de la Corriente de California (<34.5 ups y

12-18 °C), Agua Superficial Tropical (<35 ups y >18 °C) y la propia Agua del Golfo de California (>35 ups y >12 °C) (Lavín y Marinone, 2003).

Mucho de lo que sucede respecto a la circulación termohalina en Golfo de California está influenciado por procesos externos (corrientes superficiales, flujo de viento) que actúan como fuerzas forzantes, principalmente en la zona de entrada, la cual es una zona de transición entre el Océano Pacífico y el Golfo de California. En la parte localizada frente a las costas del sur de Sinaloa existe una zona altamente dinámica debido a la interacción de la Corriente de California, las aguas del Océano Pacífico y la corriente proveniente del Golfo de California. Estas interacciones provocan, entre otros, remolinos, frentes e intrusiones (Álvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991). Además, el comportamiento estacional de la zona de convergencia intertropical (ZCIT) provoca el desplazamiento de la corriente de Costa Rica al norte (Lavín y Marinone, 2003). Así, durante marzo y abril, el límite de la Corriente de California se extiende al sur influenciando la región de la boca del Golfo de California mientras que en verano se contrae al norte. Por otra parte, el viento como factor forzante de cambios en el Golfo de California tiene un patrón estacional marcado como resultado de los centros de presión que se generan, con una velocidad de 8-12 m/s (en dirección noroeste) en invierno (Badan, 2003).

Aun no existe consenso acerca del patrón de circulación superficial en el Golfo de California. Algunos estudios sugieren que la circulación es dominada por la influencia del Océano Pacífico, lo que se antepone a la idea de que el viento es el mayor agente de circulación superficial (Lavín y Marinone, 2003). Algunos modelos de circulación superficial indican circulación ciclónica en verano y anticiclónica en invierno (Beier, 1997) lo cual ha sido corroborado en estudios observacionales (Bray, 1988).

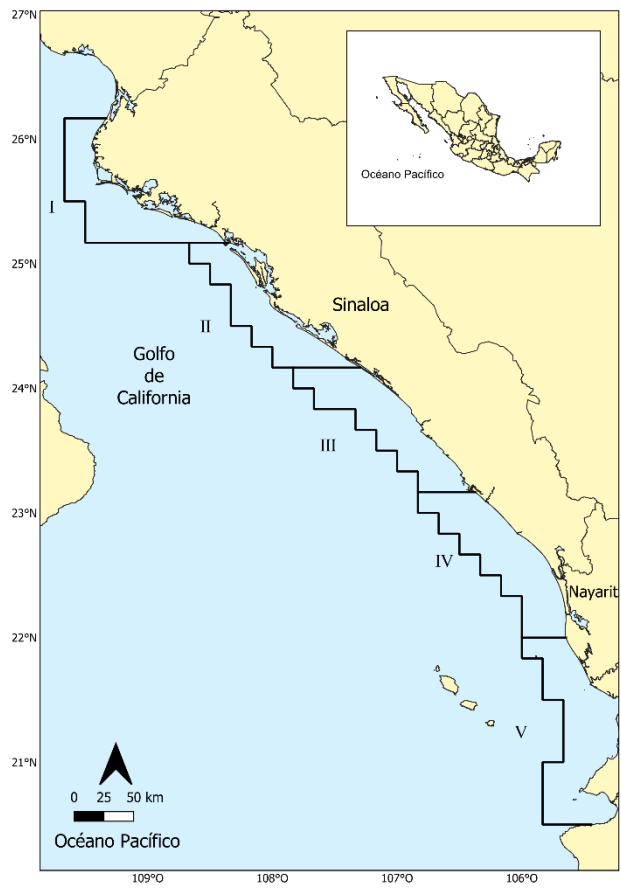


Figura 5. Área de estudio y zonas administrativas de pesca de la flota sardinera del sur del golfo de California.

Tabla I. Límites norte y sur de las áreas de pesca de la sardina crinuda *O. libertate* en el sur del golfo de California. Tomado de Vallarta-Zárate (2012).

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'

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La dinámica de los stocks de peces, no solo responde a factores inherentes a la pesca, sino que guarda estrecha relación con la variabilidad ambiental. Como se ha dicho, en el Golfo de California se han realizado estudios que evidencian como el cambio de los patrones y la intensidad del viento, así como la temperatura superficial del mar influyen en la distribución o la abundancia de ciertas especies de pelágicos menores. Para el sur del golfo de California, algunos trabajos han abordado este tema, pero agrupando a las distintas especies de sardina crinuda como un complejo (*Opisthonema* spp.). Sin embargo, no existen investigaciones que relacionen la influencia del ambiente sobre la relación S-R de la especie más representativa de dicho complejo en las capturas de pelágicos menores en el sur del golfo de California: *O. libertate*. Así, un estudio de este tipo permitiría conocer cuál es la VAO a la cual el reclutamiento de esta especie de sardina crinuda se puede ver favorecido, o en su caso, afectado. Esto sería particularmente importante en el manejo de la pesquería de la región porque se podrían predecir cambios futuros en el nivel de reclutamiento de la especie en función de las condiciones ambientales que imperen en la región durante un tiempo determinado.

4. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Cuál es el efecto que tienen los eventos de surgencia, turbulencia y la temperatura superficial del mar sobre el reclutamiento de *Opisthonema libertate* en el sur del golfo de California?

5. HIPÓTESIS

Surgencia menor a $80 \text{ m}^3/\text{s}/100 \text{ m}$ de línea de costa, turbulencia menor a $40\text{m}^3/\text{s}^3$ y una temperatura superficial del mar de entre 25 y $26 \text{ }^\circ\text{C}$ maximizan el reclutamiento de *Opisthonema libertate* en el sur del golfo de California.

6. OBJETIVOS

6. 1. Objetivo general

Evaluar el efecto de la surgencia, turbulencia y la temperatura superficial del mar (o un *proxy* de esta) sobre el reclutamiento de *Opisthonema libertate* en el sur del golfo de California.

6. 2. Objetivos específicos

1. Describir el patrón espacial y temporal de los eventos de surgencia, turbulencia y temperatura superficial del mar en el sur del golfo de California.
2. Realizar una comparación estadística de los eventos de surgencia, turbulencia y temperatura superficial del mar en el sur del golfo de California por gradiente latitudinal.
3. Determinar la ventana ambiental óptima del reclutamiento de *Opisthonema libertate*.

7. MATERIALES Y MÉTODOS

7. 1. Índice de surgencia

El índice de surgencia (*IS*) desarrollado por Bakun (1973) es un indicador a gran escala de la cantidad de agua aflora en una región en función del estrés del viento sobre la superficie del océano. De acuerdo con diversos autores (Lluch-Belda *et al.*, 1991; Schwing *et al.*, 1996; NOAA (2010); Vallarta-Zárate, 2012; Kämpf y Chapman, 2016), para calcular el *IS* propuesto por Bakun (1973) es necesario contar con datos de dirección y velocidad del viento (\vec{V}) en alguna resolución temporal y espacial. Posteriormente, el esfuerzo del viento ($\vec{\tau}$) para cada dato de \vec{V} se estima con la siguiente ecuación:

$$\vec{\tau} = \rho C_D \vec{V}$$

donde ρ es la densidad del aire ($\approx 1.28 \text{ Kg/m}^3$), C_D es el coeficiente de arrastre (≈ 0.0013) y \vec{V} es la velocidad del viento. Por definición, la dirección de $\vec{\tau}$ es la misma que \vec{V} . Posteriormente, se estima el Transporte de Ekman (M) para el vector resultante de $\vec{\tau}$ por medio de la ecuación:

$$M = \frac{\vec{\tau}}{\rho f}$$

donde f es el parámetro de Coriolis tal que $f = 4\pi/T \sin \varphi$, con $T = 86,400$ segundos y φ es la latitud geográfica del punto en que se realizan las mediciones. De esta manera, dado que para determinar M solo son necesarios conocer $\vec{\tau}$ y φ (Kämpf y Chapman, 2016) y que el volumen transportado mar adentro (*offshore*) es perpendicular y proporcional al volumen aflorado, el *IS* puede calcularse como el valor negativo de M (Lluch-Cota, 2000) tal que:

$$IS = -M$$

El cálculo de IS a partir de M da como resultado que las dimensiones de IS sean de m^2/s , lo cual debe de interpretarse como el total de volumen transportado (m^3/s) (Kämpf y Chapman, 2016).

Para calcular el IS , en este trabajo se utilizó la información proporcionada por la *Environmental Research Division* (ERDDAP) del *Southwest Fisheries Sciences Center* (SFSC) de la *National Oceanography and Atmospheric Administration* (NOAA) (Simons y John, 2022). ERDDAP proporciona datos sobre las componentes del transporte Ekman (M_x, M_y) con una resolución espacial de 1° y temporal de cada 6 horas o mensual para el periodo de 1967-2022 los cuales están disponibles en la página HTML <https://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/griddap/erdlasFnWPr.html>. Esto permite calcular series temporales del IS para cualquier punto, dada la orientación de la costa respecto al norte geográfico (ángulo negativo). De acuerdo con esto, para calcular el IS a partir de los datos proporcionados por ERDDAP, se debe de tener en cuenta lo siguiente:

- Los datos de M_x, M_y están en una resolución de 1° y si bien se puede calcular el IS en cualquier lugar, los cálculos a escala más fina son interpolaciones que no brindan información nueva.
- M_x, M_y se calculan a partir de la presión proporcionada por *Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center* (FNMOC) y utiliza una aproximación geostrofica por lo tanto no es válido dentro de unos 10-15 grados del ecuador.
- *El IS* debe calcularse en ubicaciones al menos a 1° de la costa, sobre todo en áreas con topografía costera alta.
- *El IS* es una estimación de las variaciones a gran escala del fenómeno de afloramiento más que un valor absoluto de la cantidad de agua aflorada.

Los datos más recientes proporcionados por ERDDAP (1997-2022) difieren de los calculados en los periodos de 1946-1971 (Bakun, 1973), 1967-1973 (Bakun, 1975) tanto en la resolución espacial (3°) como en el cálculo de los vientos geostrofos los cuales provenían de campos de presión promediados mensuales. Además, la

parametrización de C_D utilizada en el cálculo de $\vec{\tau}$ se tomaba como un valor constante de 0.0013 para calcular el IS para campos de presión cada 6 horas y se aumentó a 0.0026 para calcular el IS de un campo de presión mensual. A partir de 1996, los datos de M_x, M_y derivan directamente de los datos de presión con resolución espacial de 1° . Así mismo, el cálculo de los vientos geostróficos proviene de campos de presión promediados cada 6 horas. Además, la parametrización de C_D utilizada en el cálculo de $\vec{\tau}$ se toma en función de \vec{V} y no como una constante dando como resultado un valor de C_D no lineal (Jacox *et al.*, 2018). Sin embargo, estos cambios en la metodología de estimación de las componentes M_x, M_y no parecen influir significativamente en los nuevos resultados. La magnitud de las diferencias que se han encontrado parecen responder a factores tales como la ubicación, el gradiente de presión, la velocidad del viento y posiblemente la proximidad a la costa.

Para obtener el IS en distintos puntos de la zona de estudio, esta se dividió en las 5 zonas de pesca administrativas (**Figura 5**). La temporalidad de los datos fue del periodo 1988-2021 obteniendo los promedios mensuales de M_x, M_y de cada 1° de la cuadrícula generada por las coordenadas 20° N- 105° O y 26° N- 110° O de 0.5° en 0.5° . Atendiendo las recomendaciones del ERDDAP, se tomaron los datos de M_x, M_y de las posiciones que estén aproximadamente a 1° de la línea de costa (lo más cercano posible y dentro de las zonas de pesca). Como se puede observar, debido a la amplitud de cada una de las zonas de pesca administrativas y al hecho de que es una pesquería muy costera, se tomó solo un dato de M_x, M_y dentro o próximo a cada una de ellas (**Figura 6**).

Una vez teniendo los datos de M_x, M_y por zona, mes y año, se calculó el IS para cada uno de los puntos marcados en el mapa de acuerdo con la metodología descrita en el sitio web de la ERDDAP y la cual aparece simplificada en Kämpf y Chapman (2016): Las plataformas continentales son suficientemente profundas para el desarrollo sin pérdidas de una capa superficial de Ekman a cierta distancia

de la costa. Debido a que la costa actúa como una especie de barrera, el transporte de Ekman en alta mar sigue de la componente paralela (IS) a la costa del vector de esfuerzo del viento. En el caso de cualquier orientación de la costa, el IS en alta mar se puede calcular a partir del ángulo que se forma por la línea de costa en relación con el norte geográfico (α) aplicando la fórmula siguiente:

$$IS = (\cos \alpha' M_x) + (\sin \alpha' M_y) / 10$$

donde $\alpha' = (360 - \alpha)(\pi/180)$ y se divide sobre 10 para obtener las unidades tradicionales de IS ($m^3/s/100$ m de línea de costa). De lo anterior se puede deducir fácilmente que para una línea de costa perfectamente alineada al norte geográfico ($\alpha = 0^\circ$) el IS es mayormente de componente zonal. En este caso, para el cálculo del IS de todas las zonas de pesca, se utilizó un valor de $\alpha = -135^\circ$.

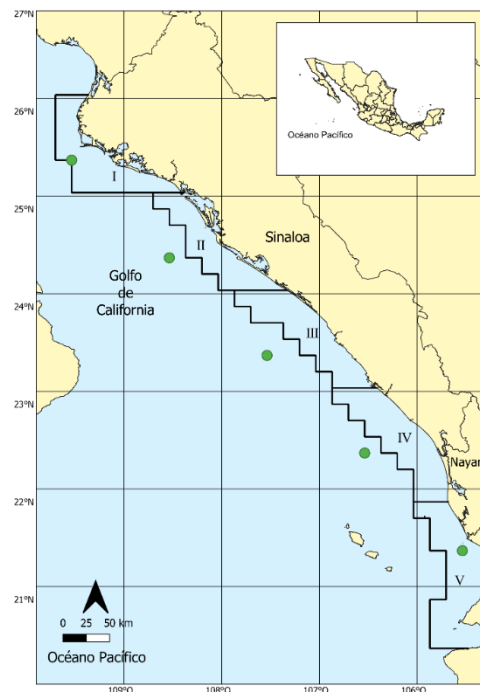


Figura 6. Localización geográfica de las posiciones utilizadas (puntos verdes) para el cálculo del índice de surgencia (IS) en el sur del golfo de California.

7. 2. Índice de turbulencia

La turbulencia en el océano (energía cinética transferida del viento al océano) es proporcional al cubo de la rapidez del viento sin dirección ($|\vec{V}|$ en adelante rapidez del viento en m/s). El cubo de la rapidez del viento puede servir como índice de la energía cinética transferida de la atmosfera y posteriormente disipada en el océano (Oakey y Elliott, 1982). Así, se calculó el *IT* para cada zona de pesca (**Figura 5**) en el periodo de 1988-2021 a partir de datos mensuales de $|\vec{V}|$ (en superficie para una capa solo de datos oceánicos) proporcionados por el sistema de datos en línea GIOVANNI (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>), desarrollado y mantenido por el *Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center* (GES DISC) de la *National Aeronautic and Space Administration* (NASA). Los datos tienen una resolución espacial de $0.5 \times 0.625^\circ$ y provienen del modelo MERRA-2 del *Global Modeling and Assimilation Office* (GMAO, 2015) los cuales están disponibles en la página HTML https://cmr.earthdata.nasa.gov/search/concepts/C1276812840-GES_DISC.html. En consenso con lo mencionado por Oakey y Elliott (1982), algunos autores como Bakun y Parrish (1982) y en la revisión de Mackenzie (2000), el *IT* se calcula de la forma siguiente:

$$IT = |\vec{V}|^3$$

donde $|\vec{V}|^3$ es el cubo de la rapidez del viento superficial (viento sin dirección) en m^3/s^3 .

7. 3. Temperatura superficial del mar

Los datos de *TSM* ($^{\circ}C$) en cada zona de pesca (**Figura 5**) también fueron proporcionados por el sistema de datos en línea GIOVANNI, desarrollado y mantenido por el GES DISC de la NASA. Estos provienen de lecturas nocturnas a 4 micrones realizadas por el espectroradiómetro MODIS el cual está montado en el satélite AQUA de la NASA. Los datos son proporcionados a un nivel de procesamiento 4 (L4), mensuales, abarcan el periodo 2002-2021, tienen una

resolución espacial de 4 km y están disponibles en la página https://cmr.earthdata.nasa.gov/search/concepts/C1615929578-OB_DAAC.

7 4. Análisis de series de tiempo

Para el reconocimiento de patrones en las series de tiempo de las tres variables ambientales, estas fueron representadas gráficamente. Aplicando técnicas de análisis de series de tiempo (Cowpewart y Metcalfe, 2009) se obtuvo el patrón estacional (año tipo), interanual (mes-año) y la tendencia de los datos por medio de la descomposición multiplicativa de la serie del *IS* e *IT* y la descomposición aditiva de la serie de *TSM*. También, para regionalizar el área de estudio, se calcularon las anomalías mensuales de las series de *IT* y *TSM* de toda el área y por zona de pesca (Cervantes-Hernandez y Manzano-Sarabia, 2017) y posteriormente estas se suavizaron aplicando el procedimiento de medias móviles (con un periodo igual a 3) para atenuar la señal estacional. Estos análisis se llevaron a cabo en el lenguaje de programación estadística R utilizando la función `decompose()` del paquete `stats` (R Core Team, 2023).

7. 5. Pruebas de hipótesis estadísticas

Se realizaron pruebas de hipótesis estadísticas para determinar la existencia de diferencias en el comportamiento espacial (por zonas de pesca) de las tres variables ambientales durante el periodo de 1988-2021 (*IT* e *IS*) y 2002-2021 (*TSM*). Para esto, los datos de cada variable ambiental por zona de pesca se sometieron a pruebas de normalidad (prueba de Kolgomorov Smirnov con corrección de Lilliefors) y homocedasticidad de datos (prueba de Bartlett) para evaluar los supuestos estadísticos básicos. Posteriormente, en función del resultado se aplicó un análisis paramétrico para más de dos muestras (ANOVA de 1 vía) o no paramétrico (prueba de Kruskal Wallis) con sus correspondientes pruebas *post hoc* (prueba de Tukey y prueba de Dunn, respectivamente) en caso de resultar significativa la prueba previa (Zar, 1995). Todos los análisis se realizaron con un nivel de significancia de 0.05 y se llevaron a cabo en el lenguaje de programación estadística R utilizando alguna

de las funciones siguientes: `lillie.test()` del paquete `normtest`: `bartlett.test()`, `aov()`, `kruskal.test()` y `TukeyHSD()` del paquete `stats` y `dunnTest()` del paquete `FSA`.

7. 6. Datos de stock-reclutamiento

Los datos de reclutamiento y reproductores (no. de org.) de la sardina crinuda *O. libertate* se obtuvieron a partir de la evaluación de stock de sardina crinuda llevada a cabo por el IMIPAS durante el 2021. El IMIPAS, a través del Laboratorio de Pelágicos Menores del Centro Regional de Investigación Acuícola y Pesquera (CRIAP) ubicado en Mazatlán Sinaloa, ha realizado evaluaciones anuales para determinar los puntos de referencia biológicos que permitan estimar la regla de control anual para los pelágicos menores de la región. Jacob-Cervantes y Payán-Alejo (2021) realizaron la estimación del tamaño de stock de la sardina crinuda del sur del golfo de California para el periodo 1988-2021 aplicando el método de captura a la edad (Haddon, 2011). En ella han incorporado datos biológicos (talla, peso, edad etc.), mortalidad (natural, por pesca), selectividad, capturas e información independiente de la pesquería (biomasa acústica) para estimar la biomasa del complejo *Opisthonema* spp. así como de cada una de las especies *O. libertate*, *O. medirastre* y *O. bulleri*. Para esto, el análisis de la relación S-R fue constituido por el reclutamiento (org. de edad 0) y reproductores (org. de 1 año y mayores). A los datos observados por especie se ajustó el modelo de S-R tradicional propuesto por Beverton y Holt (1957) citado en Haddon (2011):

$$R = \frac{aS}{b + S}$$

donde R es el reclutamiento estimado (no. de org.), S es el tamaño del stock reproductor (no. de org.) y a y b son parámetros.

Los datos de reclutamiento y reproductores observados (No del modelo) de *O. libertate* se obtuvieron por año y comprenden el periodo de 1988-2021. Estos fueron utilizados como variable a predecir (únicamente el reclutamiento) en función de las

distintas variables ambientales y del número de reproductores para establecer los valores que maximizan el reclutamiento de *O. libertate*.

7. 7. Ventana ambiental óptima

Uno de los objetivos primordiales del presente trabajo es establecer si existe relación estadísticamente significativa entre el reclutamiento de la sardina crinuda *O. libertate* y las variables ambientales a analizar. Esto es particularmente útil porque dicho conocimiento puede dar lugar a que se obtenga la VAO para la especie (Cury y Roy, 1989).

Para establecer la VAO para *O. libertate* en el sur del golfo de California, primero se compilaron en un marco de datos la información anual de reclutamiento (R), así como de reproductores (BR). Para dos de las tres variables predictoras (IS e IT) se exploraron distintos criterios para determinar el valor de cada variable ambiental que representará la climatología mediana anual que se supuso afecta al reclutamiento (sabiendo que en efecto los datos ambientales no tienen una distribución simétrica). En el caso de TSM , se realizaron pruebas (no mostradas aquí) para explorar si al ajustar los modelos tomando como base la longitud de esta serie de datos (2002-2021) se tenían resultados satisfactorios. Sin embargo, los resultados no fueron concluyentes y se optó por no utilizar la información de TSM como variable predictora del reclutamiento. Para solucionar esto, se utilizó información del índice de El Niño oceánico (ONI por sus siglas en inglés) como un *proxy* de la TSM en la región pues se sabe que tiene una asociación fuerte con la TSM del Golfo de California (dado por una correlación de $r > 0.45$) casi en tiempo real (López-Martínez *et al.*, 2023). El ONI es un índice que está disponible en la página del *Climate Prediction Center* de la NOAA (https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php) y consisten en datos de anomalías mensuales de TSM las cuales se calculan como la media móvil de 3 meses de anomalías de TSM (ERSST.v5) en la región de El Niño 3.4 (5° N-5° S, 120° E-170° E) a partir de períodos base de 30 años que se

actualizan cada 5 años. Siguiendo con la explicación de los criterios y de acuerdo con lo que menciona Smith (1985), quien sugiere que los estadios larvarios de algunas especies de pelágicos menores toman 8-19 días después de la eclosión (DDE) (larva temprana), 20-96 DDE (larva tardía a los 3.09 meses), 97-146 DDE (juvenil temprano a los 4.7 meses) y 147-217 DDE (juvenil tardío a los 7 meses), el valor anual para cada variable ambiental a tabular (solo *IS* e *IT*) con los datos de reclutamiento anuales se calculó de la manera siguiente: la mediana del mes de mayo (escenario 1) pues se sabe que es el mes donde ocurre el pico de reproducción de la especie en el sur del golfo de California (Jacob-Cervantes *et al.*, 2021) y que por sentido común conduce a hipotetizar que las condiciones ambientales durante ese mes tienen efecto sobre la etapa de larva temprana y por lo tanto sobre la fuerza de la clase anual. Algunos otros escenarios se hicieron partiendo también de la hipótesis de que, si el pico de reproducción para la especie es en el mes de mayo, entonces los efectos ambientales sobre los reclutas se pueden “acumular” a través del tiempo hasta el momento en que dejan de ser juveniles (reclutas) y se convierten en adultos (reproductores). Lo anterior resulta importante pues las condiciones ambientales pueden afectar más al reclutamiento dependiendo del estadio larvario en que se encuentren los organismos (Fuiman y Werner, 2002). De esta forma, los efectos ambientales se acumularon a través del tiempo, desde el mes del pico de reproducción hasta los 8 meses siguientes. Así, para cada variable ambiental (solo *IS* e *IT*), el escenario 2 fue la mediana del mes de mayo a junio; el escenario 3 fue la mediana del mes de mayo a julio; el escenario 4 fue la mediana del mes de mayo a agosto; el escenario 5 fue la mediana del mes de mayo a septiembre; el escenario 6 fue la mediana del mes de mayo a octubre; el escenario 7 fue la mediana del mes de mayo a noviembre; el escenario 8 fue la mediana del mes de mayo a diciembre y un escenario 9 donde para cada variable ambiental se calculó la mediana anual (enfoque clásico) (**Tabla II**). En el caso del *ONI* no se siguió este enfoque pues el índice ya está calculado aplicando media móvil de 3 meses, por lo cual solo se tomó el dato del índice del mes de mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre, y un último escenario con la mediana

anual (enfoque clásico). Con todo esto, lo que se intentó probar es si el reclutamiento de *O. libertate* se ve más afectado (o favorecido) por la condición ambiental del mes en que se da el pico reproductivo o por los efectos acumulados de la condición ambiental meses después del pico reproductivo o por lo que sucede de mediana en el año. Al mismo tiempo este enfoque disminuye en cierta medida el sesgo que puede traer consigo el que no se tengan datos de reclutamiento en resolución mensual, pues se toma en cuenta el efecto de las condiciones intraanuales de las variables ambientales sobre el reclutamiento anual.

Tabla II. Ejemplo del marco de datos construido para probar distintos escenarios del efecto de las variables ambientales sobre el reclutamiento anual de *O. libertate* en el sur del golfo de California.

Año	R	BR	IS					IT				ONI					
			M	MJ	...	MD	A	M	MJ	...	MD	a	M _o	J _o	...	D _o	a _o
1988	d	d	d	d	...	D	D	d	D	...	d	d	d	d	...	d	d
1989	d	d	d	d	...	D	D	d	D	...	d	d	d	d	...	d	d
1990	d	d	d	d	...	D	D	d	D	...	d	d	d	d	...	d	d
...
2021	d	d	d	d	...	D	D	d	D	...	d	d	d	d	...	d	d

R: reclutamiento; BR: reproductores, IS: índice de surgencia; IT: índice de turbulencia; ONI: índice de El Niño oceánico; M: mediana de mayo; MJ: mediana de mayo a junio; MD: mediana de mayo a diciembre; a: mediana anual; M_o: índice del mes de mayo; J_o: índice del mes de junio; D_o: índice del mes de diciembre; a_o: mediana anual del índice; d: dato.

Posteriormente, la información en el marco de datos sirvió para implementar múltiples modelos aditivos generalizados (GAM, por sus siglas en inglés) y poder evaluar el efecto de una o más variables ambientales (en cada escenario) sobre el reclutamiento de *O. libertate*. Este procedimiento, así como las herramientas y métodos estadísticos utilizados se explican a detalle en la siguiente sección. También, ahí se explica el método para la determinación de la VAO del reclutamiento de *O. libertate* a partir del análisis de los datos de los efectos parciales de cada variable predictora.

7. 8. Modelos aditivos generalizados

Dado que se infirió que la relación entre el reclutamiento y las variables ambientales es de tipo no lineal y que el reclutamiento responde a más de un efecto, se

implementaron una serie de GAM para explorar esta cuestión. Esta clase de modelos fue propuesta por Hastie y Tibshirani (1986) y desglosada con mayor detalle en Hastie y Tibshirani (1990), como una solución para predecir relaciones no lineales aplicando métodos semi paramétricos. Los GAM son una extensión del modelo lineal general (GLM por sus siglas en inglés) pues también son versátiles en cuanto a la distribución de la variable respuesta (no precisamente normal) pero con un predictor lineal que depende de la suma de funciones de suavizado de las covariables (Wood, 2017).

El modelo de regresión lineal múltiple tiene la forma:

$$E(Y|X_1, X_2 \dots X_p) = \beta_0 + \beta_1 X_1 \dots \beta_p X_p$$

donde Y es la variable respuesta, X_p son las p -ésimas covariables, β_p son los p -ésimos parámetros (estimados usualmente por mínimos cuadrados). El GAM generaliza la regresión, de manera que, en lugar de la expresión anterior, la relación funcional entre la variable de respuesta y las variables predictoras se modela como sigue:

$$E(Y|X_1, X_2 \dots X_p) = s_0 + \sum_{j=1}^p s_j X_j$$

donde $s_j(\cdot)$ son funciones de suavizado las cuales se estiman una a la vez de forma no paramétrica y s_0 es una constante.

De esta manera, a diferencia del GLM, donde aún se precisa que haya relación lineal entre covariables, en el GAM no es del todo necesario conocer *a priori* la relación funcional entre Y e X_p ni que esta sea lineal. Esta relación se modela a partir de la naturaleza de los datos y se reemplaza como una función de suavizado continua $s_j(\cdot)$.

Para este proceso, se utilizó el paquete `mgcv` (Wood, 2022) del lenguaje de programación estadística R (R Core Team, 2023). Este paquete permite ajustar

GAM, algunas de sus extensiones y regresiones generalizadas con suavizado múltiple. Es posible la estimación de parámetros por probabilidad marginal, por validación cruzada generalizada (GCV por sus siglas en inglés), o usando otros métodos (Wood, 2022).

Los modelos del presente estudio se construyeron a partir de datos de reclutamiento de *O. libertate* durante el periodo de 1988-2021 y su correspondiente observación de *BR*, *IS*, *IT* y *ONI* durante este mismo periodo (y de acuerdo a los criterios anteriormente ejemplificados en la **Tabla II**). De esta manera, a partir de la construcción del marco de datos, se implementó la función `gam()` del paquete `mgcv` para desarrollar los GAM. Algunos de los argumentos admitidos por la función `gam()` son los siguiente (Wood, 2022):

```
gam(formula, family=gaussian(), data=list(), weights=NULL, subset=NULL,
     na.action,offset=NULL, method="GCV.Cp",
     optimizer=c("outer","newton"), control=list(), scale=0, select=FALSE,
     knots=NULL, sp=NULL, min.sp=NULL, H=NULL, gamma=1,
     fit=TRUE, paraPen=NULL, G=NULL,
     in.out,drop.unused.levels=TRUE, drop.intercept=NULL,
     discrete=FALSE,...)
```

En principio, se realizó un diagnóstico de la variable respuesta por medio de un histograma de frecuencia para visualizar su distribución y `boxplot` para determinar la existencia de datos atípicos. Conocer la distribución de la variable respuesta es importante pues es necesario agregarla como argumento en la función `gam()`. En este caso, esta puede ser de tipo Gamma pues los datos de reclutamiento son continuos y cuya característica principal es que son siempre mayor a 0 y no existen valores negativos.

Los GAM correspondientes a cada escenario (9 modelos en total) fueron construidos aplicando un procedimiento paso a paso (del inglés *Stepwise procedure*). Esto consistió en partir desde el primer modelo con el número de

reproductores (*BR*) como variable predictora e ir adicionando variables ambientales. En cada adición se evaluaron aspectos tales como los grados de libertad efectivos (EDF por sus siglas en inglés) así como la devianza explicada (%). Además, para decidir si mantener o no una variable predictora en el GAM se utilizó el criterio de información de Akaike (AIC por sus siglas en inglés) verificando que la nueva variable contribuyera a una disminución de por lo menos dos unidades en el AIC (Burnham y Anderson, 2002). También, en cada paso del procedimiento se evaluó el grado de multicolinealidad en versión no lineal (concurvidad) entre las variables predictivas por medio de la función `concurvity()` del paquete `mgcv` pues se sabe que cuando dos o más variables se encuentran correlacionadas ocurre una inflación de la varianza de los coeficientes de la regresión (Amodio *et al.*, 2014). Aun no hay consenso acerca de cuál es un nivel aceptable de concurvidad, pues esta va de 0 a 1 siendo 1 la máxima concurvidad. Independientemente de esto, en el presente trabajo se tuvo cuidado con esta cuestión sobre todo cuando en cada escenario se adicionaron los efectos de las dos variables predictoras que son una función del viento (*IT* e *IS*). Adicional a todo lo anterior, se realizó un diagnóstico de los residuales de Pearson en cada adición, esto por medio de histogramas de frecuencias (supuesto de normalidad). También se exploró el comportamiento de los residuos con respecto a cada variable predictora y contra los valores ajustados del modelo para evaluar que la varianza fuera aproximadamente constante en cada caso (supuesto de heterocedasticidad). Así mismo se utilizó la función de autorcorrelación `acf()` para evaluar el supuesto de independencia de los residuos. Al ser múltiples escenarios, solo se mostró el diagnóstico de residuales del modelo con el mejor desempeño (menor AIC).

Aunque la cantidad de datos ($n=34$) hizo imposible extraer datos solo para el entrenamiento de los modelos, se evaluó el sobreajuste y la capacidad predictiva del GAM seleccionado calculando la raíz del error cuadrático medio (RMSE por sus siglas en inglés) así como el coeficiente de correlación de Pearson y de Spearman de los valores ajustados por el GAM seleccionado vs. los datos observados (Marín-

Hernández, 2021; Ali Abd AlHameed, 2022). También se probó la hipótesis nula de que tanto los datos de reclutamiento observado como los ajustados por el GAM seleccionado provienen de la misma distribución de probabilidad como otra forma de evaluar la congruencia de los datos ajustados con respecto a los datos observados. Esto último se hizo por medio de una prueba de Kolmogorov Smirnov para dos muestras con la función `ks.test()` del paquete `stats` también de R (R Core Team, 2023). Así mismo, se graficó la serie histórica de reclutamiento con los datos ajustados por el GAM seleccionado y los intervalos de confianza para tener una interpretación visual del ajuste a los datos.

7. 8. 1. Reclutamiento óptimo y ventana ambiental óptima

Acorde con la hipótesis de Cury y Roy (1989), en una curva de reclutamiento contra el *IS* y/o *IT* existe una región donde los efectos de las condiciones extremas de las variables ambientales sobre el reclutamiento se minimizan. Esta región fue denominada por estos autores como la VAO y fue propuesta a partir de la observación del efecto de la surgencia y la turbulencia sobre el reclutamiento y la abundancia relativa en 5 stocks de pelágicos menores alrededor del mundo. Sin embargo, Cury y Roy (1989) no mencionan un procedimiento claro sobre como delimitar la VAO ni cómo hacer interpretaciones cuando se relaciona el reclutamiento con una variable distinta al viento (por ejemplo, *TSM*). En su lugar solo hipotetizan que dicha VAO se encuentra a una velocidad del viento de entre 5 y 6 m/s en zonas de surgencia de tipo Ekman dando una justificación física y biológica al respecto.

Haciendo uso de las herramientas modernas para el análisis de datos, en el presente trabajo se propone una serie de pasos para delimitar la VAO del reclutamiento en peces no solo para el *IS* e *IT* sino para cualquier variable ambiental. Para esto, es importante entender que cuando se ajusta un GAM, la manera de ver el efecto de una variable predictora sobre la variable respuesta es analizando los gráficos de efectos parciales. En dichos gráficos es posible identificar visualmente (y analíticamente manipulando los objetos del entorno R) que valor (o

valores) de la variable predictora da como resultado un valor máximo en la variable de respuesta. A continuación, un ejemplo de un gráfico de efectos parciales en escala de la variable respuesta posterior al ajuste de un GAM (**Figura 7**). Si bien este ejemplo no está relacionado con el fenómeno de reclutamiento en peces, se usó para ejemplificar el método pues los gráficos de efectos parciales están en la escala de la variable de respuesta facilitando la explicación. Este proviene del trabajo de Madani *et al.* (2018) donde se puede apreciar claramente el efecto que tiene la variable predictora “temperatura máxima del mes más cálido (°C)” sobre la variable de respuesta “altura (m)” de las plantas. A una temperatura de 22 °C la altura de las plantas es máxima (40 m), mientras que, si la temperatura aumenta o disminuye de ese valor, entonces la altura de las plantas disminuye considerablemente.

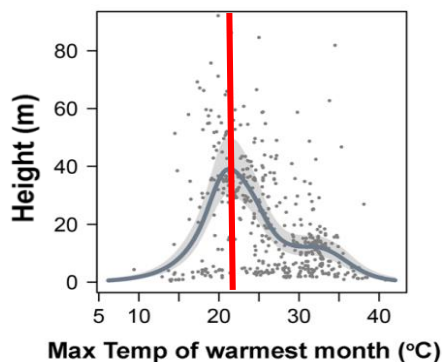


Figura 7. Efecto de la temperatura máxima del mes más cálido (°C) sobre la variable de respuesta “altura (m)” de las plantas en un GAM para modelar la relación global entre el rasgo clave de la planta seleccionada y las condiciones climáticas. Extraído de Madani *et al.* (2018) y modificado por el autor. La línea vertical roja representa el valor de temperatura máxima del mes más cálido (°C) donde se alcanza la altura máxima de las plantas (m).

En este punto es fácil establecer que 22 °C es el valor de la variable predictora que da el máximo en la variable de respuesta. Sin embargo, para determinar la VAO de la altura de las plantas habría que decidirse entre determinarla de manera arbitraria (por ejemplo, el máximo de la variable respuesta está entre 20 y 23 °C de la variable

predictora) o usar algún otro criterio. Aquí se propone que la VAO sea determinada al dividir a la mitad el valor máximo de la variable respuesta y posteriormente buscar cuales son los valores de la variable predictora que corresponden a este 50% del valor máximo de la variable de respuesta (**Figura 8**).

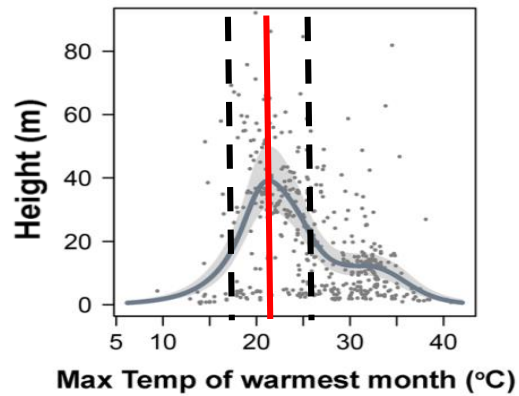


Figura 8. Efecto de la temperatura máxima del mes más cálido (°C) sobre la variable de respuesta “altura (m)” de las plantas en un GAM para modelar la relación global entre el rasgo clave de la planta seleccionada y las condiciones climáticas. Extraído de Madani et al. (2018) y modificado por el autor. La línea vertical roja representa el valor de temperatura máxima del mes más cálido (°C) donde se alcanza la altura máxima de las plantas (m) y las líneas verticales punteadas representan los valores de temperatura máxima del mes más cálido (°C) donde la altura máxima de las plantas (m) se reduce en 50%.

Así, para el ejemplo de Madani *et al.* (2018) la VAO de la altura de las plantas (m) estaría entre 17.5 – 26 °C de temperatura máxima del mes más cálido con una altura máxima (óptima) en 22 °C, es decir, por debajo o por encima de los límites de la VAO se esperaría que la altura de las plantas sea 50% (20 m) menor que la altura máxima (óptima). De esta manera, volviendo al fenómeno de reclutamiento en peces, ahora la interpretación de la VAO ya no solo es la de una región donde se minimizan los efectos de las condiciones extremas de las variables predictoras (Cury y Roy, 1989) si no que esta se puede concebir de manera no arbitraria como

los valores umbrales para cualquier variable ambiental fuera de los cuales se esperaría una reducción del 50% en el reclutamiento máximo (óptimo).

Habiendo definido lo anterior, a continuación, se describe de manera técnica el procedimiento para determinar la VAO del reclutamiento de *O. libertate* haciendo uso del lenguaje de programación estadística R:

1. Una vez obtenido el modelo con el mejor desempeño (menor AIC) y cuyo proceso ha sido descrito en la sección anterior, se analizaron los gráficos de efectos parciales de cada variable ambiental utilizando la función `visreg()` del paquete con el mismo nombre (R Core Team, 2023). Estos se hicieron en la escala de la variable de respuesta de tal manera que las unidades fueran fácilmente interpretables.

```
visreg(fit = mejor_modelo, xvar = "variable_ambiental", scale = "response")
```

2. Después, el objeto `visreg` se asignó con un nombre (cualquiera). Esto creó un nuevo objeto tipo `list()` el cual es una lista de tres elementos: “fit”, “res” y “meta”.

```
nuevo_objeto <- visreg(fit = mejor_modelo, xvar = "variable_ambiental", scale = "response")
```

“fit” es un marco de datos que contiene tantas columnas como variables predictoras mas una columna con la variable de respuesta. Además, contiene tres columnas adicionales con el ajuste de la variable de respuesta, y el límite superior e inferior del ajuste. “res” también es un marco de datos que contienen columnas con información similar solo que agregando una columna con los residuales parciales. “meta” es una lista con los metadatos necesarios para realizar los gráficos.

3. El siguiente paso fue utilizar la función `which.max()` para buscar donde está ubicado el valor máximo de la variable de respuesta ajustada, esto dentro del objeto `nuevo_objeto`, en el marco de datos "fit" en la columna `visregFit`.

```
ubicacion <- which.max(nuevo_objeto$fit$visregFit)
```

La salida de la función es numérica y es la ubicación (fila) donde está el valor máximo de la variable de respuesta ajustada.

4. Después, el marco de datos "fit" del objeto `nuevo_objeto` fue convertido a matriz de datos con la función `data.matrix()` para acceder a su información conociendo el número de fila y columna.

```
nuevo_objeto_matrix <- data.matrix(nuevo_objeto$fit)
```

5. Posteriormente, se procedió a buscar el valor numérico de tres cantidades importantes. Primero se buscó el valor de la variable predictora que da el valor máximo en la variable de respuesta (óptimo). Esto se hizo indexando el objeto `nuevo_objeto_matrix` utilizando el objeto `ubicacion` como número de fila y especificando como columna el número de columna donde está la información de la variable predictora.

```
predict_max <- nuevo_objeto_matrix[ubicacion,columna]
```

La segunda cantidad que se buscó fue el valor máximo en la variable de respuesta (óptimo). También se indexó el objeto `nuevo_objeto_matrix` utilizando el objeto `ubicacion` como número de fila y especificando como columna el número de columna donde está la información de la variable respuesta.

```
resp_max <- nuevo_objeto_matrix[ubicacion,columna]
```

La tercera cantidad se calculó a partir del objeto `resp_max` pues se dividió dicho objeto por la mitad.

```
50%_resp_max <- resp_max/2
```

6. Una vez obtenido el valor máximo de la variable de respuesta al 50% y para aplicar la nueva propuesta de determinación de la VAO, de nuevo con la función `which()` se buscaron los valores de la variable predictora que correspondieran al valor máximo de la variable de respuesta al 50%, esto indexando con una condicional la columna `visregFit`, del objeto "fit" del objeto `nuevo_objeto` de la manera siguiente:

```
up_50%_resp_max <- which(nuevo_objeto$fit$visregFit>50%_resp_max)
```

Esta instrucción básicamente lo que hace es buscar en los datos de la variable de respuesta ajustada (`visregFit`) la posición (fila) de aquel o aquellos valores que sean mayores que el valor máximo de la variable de respuesta al 50%. Así, del vector `up_50%_resp_max` habrá que identificarse en qué posición se interrumpe la secuencia de números. Si por ejemplo, el vector `up_50%_resp_max` está compuesto por la secuencia de números:

```
c(25,26,27,28,29,30)
```

y la longitud original de `visregFit` es de 30 datos, entonces el dato de la posición 25 representa el último dato cuyo valor no cae por debajo del valor del objeto `50%_resp_max`, es decir, sería el último dato en estar dentro de los límites de la VAO. Ahora, para asociar la posición de este dato con el correspondiente valor o límite de la VAO se indexó el objeto `nuevo_objeto_matrix` utilizando la posición donde se interrumpió el vector `up_50%_resp_max` como número de fila (posición 25 para el ejemplo

anterior) y especificando como columna el número de columna donde está la información de la variable predictora:

```
VAO <- nuevo_objeto_matrix[filas,columnas]
```

Es de aclarar que la cantidad de valores que se encuentren en el objeto VAO dependerá en gran parte de la forma de la curva del gráfico de efectos parciales, así como de los límites de la variable de respuesta ajustada en visreg. En una curva en forma de domo se podrían llegar a encontrar el límite inferior y superior de la VAO (**Figura 9a**). En una curva en forma de media campana se podrían llegar a encontrar cualquiera de los límites VAO (**Figura 9b**). En una curva con múltiples oscilaciones pueden existir más de dos valores de la variable de respuesta ajustada que satisfacen el criterio de ser el último dato cuyo valor no cae por debajo del valor del objeto `50%_resp_max` dentro de un determinado intervalo (**Figura 9c**). También puede existir el caso de que no se pueda representar la VAO pues los valores de la variable de respuesta ajustada no son lo suficientemente amplios para que algún dato interrumpa la secuencia de números que se genera en el objeto `up_50%_resp_max`. Esto ha de suceder en curvas donde las oscilaciones son mínimas y parecen tener una pendiente nula o casi nula (**Figura 9d**).

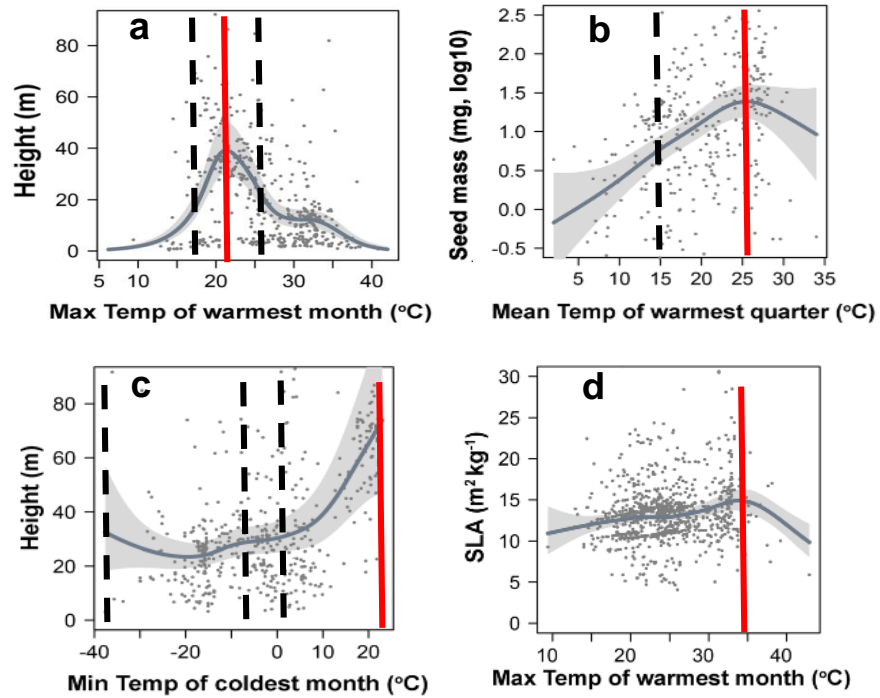


Figura 9. Ejemplos de determinación del valor máximo de la variable de respuesta (óptimo, línea vertical roja) y VAO como valores de la variable predictora a los cuales se alcanza el valor máximo de la variable de respuesta al 50% (líneas punteadas verticales). Las figuras corresponden a un estudio donde se utilizó un GAM para modelar la relación global entre el rasgo clave de la planta seleccionada y las condiciones climáticas. Extraído de Madani *et al.* (2018) y modificado por el autor.

8. RESULTADOS

8 1. Índice de surgencia

8. 1. 1. Patrón estacional

La estacionalidad típica del *IS* en la región sur del golfo de California durante 1988-2021 muestra un patrón cóncavo el cual alcanza un valor máximo en el mes de diciembre ($43.95 \pm 22.95 \text{ m}^3/\text{s}/100 \text{ m}$ de línea de costa) mientras que el valor mínimo se obtuvo en el mes de junio ($-14.13 \pm 22.07 \text{ m}^3/\text{s}/100 \text{ m}$ de línea de costa). La mayor variabilidad respecto a los valores medios del *IS* por mes se observó en el mes de septiembre mientras que la menor dispersión de los datos respecto a la media mensual se obtuvo durante el mes de julio (**Figura 10; Tabla III**).

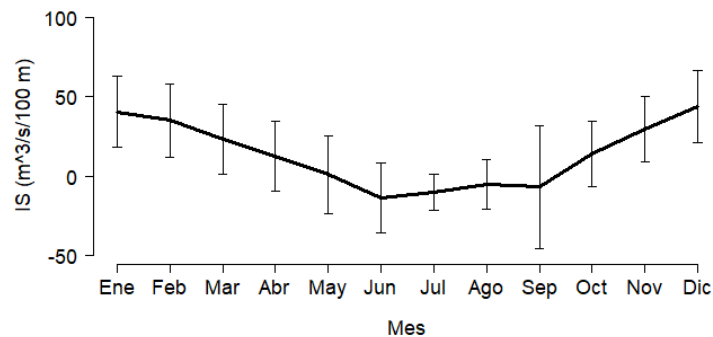


Figura 10. Patrón estacional del Índice de surgencia (*IS*) durante 1988-2021 en el sur del golfo de California. Las barras de error indican ± 1 desviación estándar.

Tabla III. Valores medios y desviación estándar mensuales del Índice de surgencia (*IS* en m³/s/100 m de línea de costa) durante 1988-2021 en el sur del golfo de California.

Mes	Media	Desviación estándar
Enero	40.58	22.28
Febrero	35.02	22.95
Marzo	23.28	21.90
Abril	12.28	22.19
Mayo	0.93	24.64
Junio	-14.13	22.07
Julio	-10.39	11.58
Agosto	-5.61	15.67
Septiembre	-6.94	38.93
Octubre	13.86	20.94
Noviembre	29.45	20.67
Diciembre	43.96	22.95

Por otro lado, la estacionalidad típica del *IS* en la región sur del golfo de California durante 1988-2021 por zonas de pesca también muestra un patrón cóncavo con poca variación entre zonas de pesca a través del tiempo. En las zonas de pesca 1 y 2 los valores más altos del *IS* se obtuvieron en el mes de diciembre (41.86 ± 22.22 y 48.45 ± 25.94 m³/s/100 m de línea de costa respectivamente). De manera similar, en las zonas de pesca 3 y 4 los valores máximos se presentaron en el mes de diciembre (44.99 ± 24.12 y 40.55 ± 19.18 m³/s/100 m de línea de costa respectivamente). Respecto a los valores más bajos del *IS*, en las zonas de pesca 1 a la 3, estos se obtuvieron en el mes de junio (-12.45 ± 9.62 , -16.12 ± 12.46 y -22.90 ± 29.07 m³/s/100 m de línea de costa respectivamente) y en el mes de noviembre para la zona de pesca 4 (-14.77 ± 55.29 m³/s/100 m de línea de costa) (**Figura 11; Tabla IV**). Con respecto a los datos de la zona de pesca 5, estos fueron excluidos del análisis debido a que el punto de muestreo de dicha zona (**Figura 6**) se encuentra muy cerca de la costa y no es posible realizar una aproximación geográfica de los vientos de la zona.

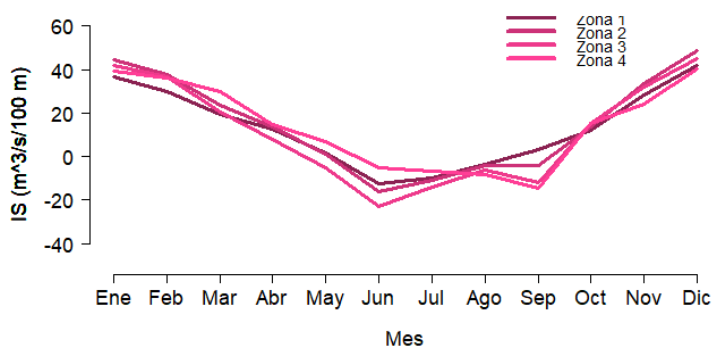


Figura 11. Patrón estacional del Índice de surgencia (*IS*) por zonas de pesca durante 1988-2021 en el sur del golfo de California.

Tabla IV. Valores medios y desviación estándar mensuales por zonas de pesca del Índice de surgencia (*IS* en $m^3/s/100$ m de línea de costa) durante 1988-2021 en el sur del golfo de California.

Mes	Zona de pesca							
	1		2		3		4	
	Media	DE	Media	DE	Media	DE	Media	DE
Ene	36.66	15.79	44.54	21.71	41.94	23.90	39.19	26.52
Feb	29.70	16.53	37.48	22.99	36.70	26.35	36.21	24.86
Mar	19.59	16.99	23.41	17.94	20.32	18.01	29.80	30.98
Abr	12.59	19.06	13.71	19.02	7.93	18.95	14.89	30.01
May	1.46	14.48	0.96	14.40	-5.36	24.19	6.68	37.50
Jun	-12.45	9.62	-16.12	12.46	-22.90	29.07	-5.04	26.98
Jul	-9.65	5.62	-11.10	7.12	-14.10	16.91	-6.72	12.30
Ago	-3.58	8.61	-4.23	13.32	-6.15	20.73	-8.48	17.56
Sep	3.06	21.14	-4.19	27.63	-11.84	41.67	-14.77	55.29
Oct	12.03	11.56	13.37	20.80	14.95	20.30	15.07	28.43
Nov	28.40	16.04	33.25	19.30	31.90	23.94	24.25	22.25
Dic	41.86	22.22	48.45	25.94	44.99	24.12	40.55	19.18

DE: Desviación estándar.

8. 1. 2. Patrón interanual y tendencia

El patrón interanual del *IS* en el sur del golfo de california durante 1988-2021 sugiere una tendencia negativa del mismo a partir del año 1991, con un periodo de estabilización que abarcó de 2011 a 2021. De esta forma, la serie histórica del *IS* se puede dividir en tres periodos: El primer periodo abarcó de 1988 a 1996 en el cual se obtuvo un valor máximo del *IS* de $90 \text{ m}^3/\text{s}/100 \text{ m}$ de línea de costa durante diciembre de 1990 y un mínimo de $-2 \text{ m}^3/\text{s}/100 \text{ m}$ de línea de costa en noviembre de 1995 (**Figura 12a**). El valor medio del *IS* para el primer periodo fue de $20.15 \pm 10.63 \text{ m}^3/\text{s}/100 \text{ m}$ de línea de costa (**Figura 12b**). El segundo periodo identificado (1997 a 2009) se caracterizó por presentar un *IS* con tendencia negativa y parece haber sido un periodo de transición hacia una estabilización en las condiciones de surgencia hacia 2011. Durante el segundo periodo, el valor máximo del *IS* fue $75.01 \text{ m}^3/\text{s}/100 \text{ m}$ de línea de costa en el mes de marzo de 2009 y un mínimo de $-45 \text{ m}^3/\text{s}/100 \text{ m}$ de línea de costa en el mes de octubre de 2008 (**Figura 12a**), con una media de $9.11 \pm 6.97 \text{ m}^3/\text{s}/100 \text{ m}$ de línea de costa (**Figura 12b**). En el tercer periodo (2010 a 2021) el valor máximo del *IS* se obtuvo en el mes de mayo de 2013 ($50 \text{ m}^3/\text{s}/100 \text{ m}$ de línea de costa) y el mínimo en abril de 2017 ($-20 \text{ m}^3/\text{s}/100 \text{ m}$ de línea de costa) (**Figura 12a**) con una media de $12.73 \pm 3.10 \text{ m}^3/\text{s}/100 \text{ m}$ de línea de costa (**Figura 12b**).

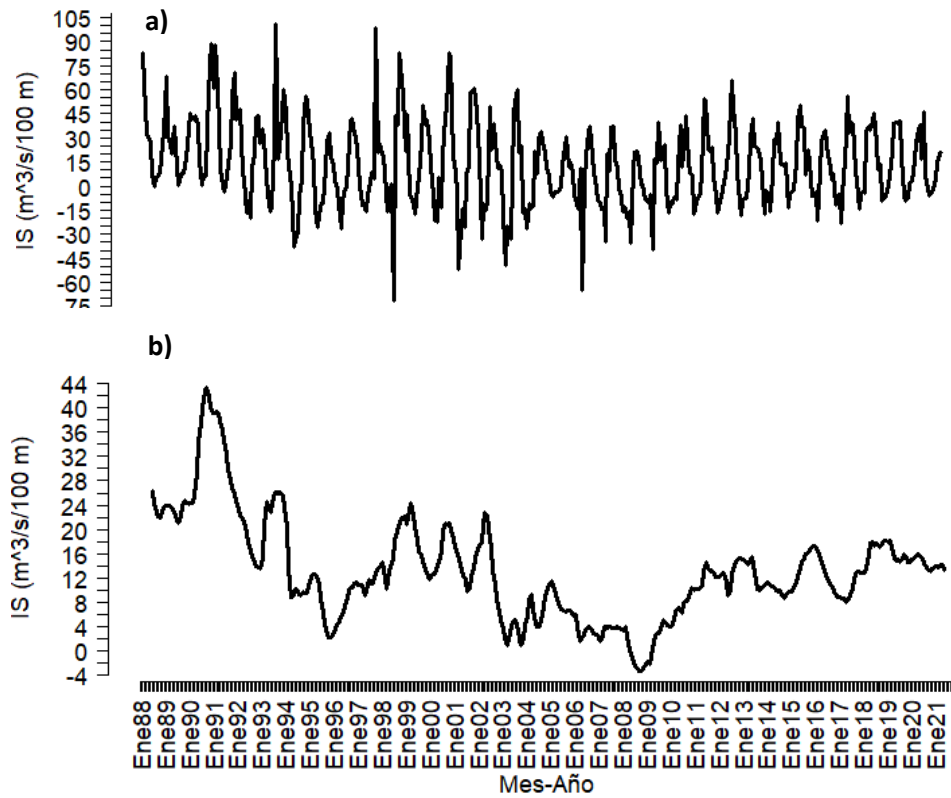


Figura 12. Patrón interanual (a) y tendencia (b) del Índice de surgencia (*IS*) durante 1988-2021 en el sur del golfo de California.

8. 1. 3. Estacionalidad histórica por zona de pesca

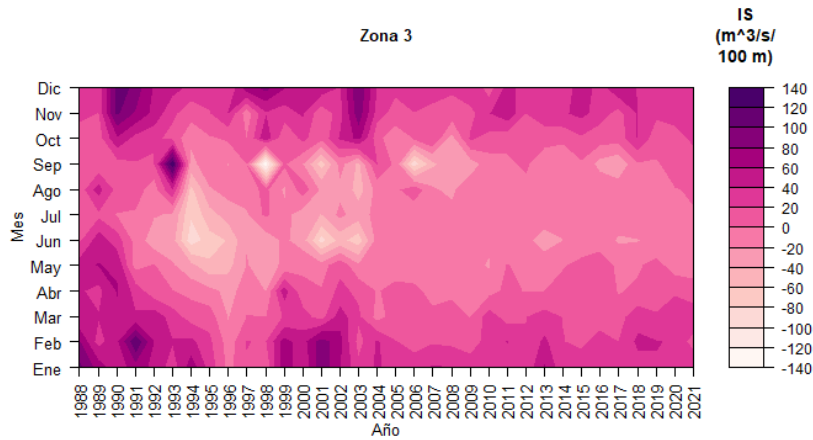
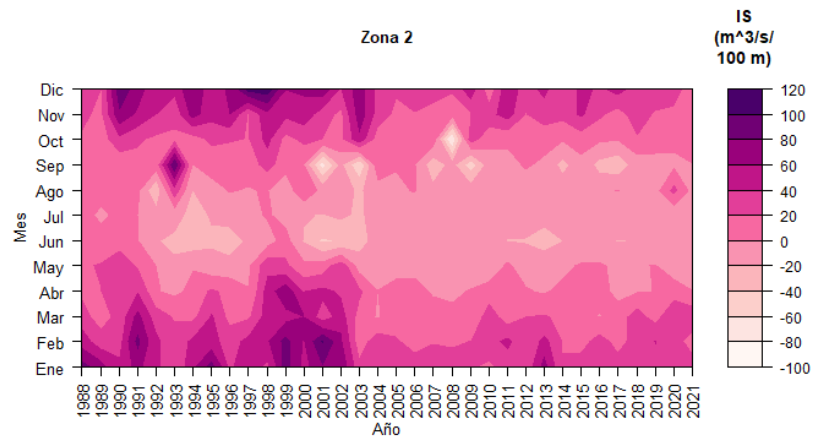
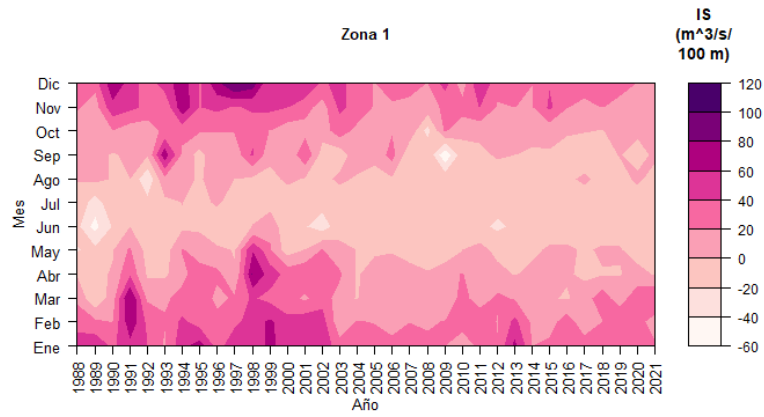
Históricamente, el comportamiento del *IS* ha sido variable en función de la zona de pesca. Sin embargo, la tendencia es similar a la de la serie de datos en conjunto indicando que un cambio del *IS* el cual es homogéneo en toda la zona de estudio. Así, en la zona de pesca 1, durante el periodo comprendido de 1988 a 2002 los valores del *IS* fueron mayores durante los meses de fin de año y durante enero a mayo para casi todos los años, (20 a 120 m³/s/100 m de línea de costa). Durante este mismo periodo, pero en los meses cálidos (junio a septiembre), el *IS* presentó valores en un rango de 20 a -60 m³/s/100 m de línea de costa. De 2003 a 2021 durante los meses enero a mayo el *IS* presentó valores de 0 a 60 m³/s/100 m de línea de costa y lo mismo para junio a septiembre fue similar para la zona con respecto a 1988-2002, ya que se han presentado típicamente valores del *IS* que indican surgencia nula y/o hundimiento (0 a -60 m³/s/100 m de línea de costa). Para 2003 a 2021 es posible notar una ampliación de la influencia temporal de valores del *IS* con tendencia negativa y una disminución en la magnitud del *IS* durante los meses fríos (**Figura 13**).

En la zona de pesca 2 el patrón es similar al de la zona de pesca 1, incrementando solamente la magnitud del *IS* durante los meses de enero a mayo de 1988 a 2002 (50 a 120 m³/s/100 m de línea de costa) mas no así para los meses cálidos (40 a -20 m³/s/100 m de línea de costa). De 2003 a 2021 los datos indican que durante la mayoría de los meses la zona de pesca 2 se caracterizó por presentar mayormente hundimientos en los meses de abril a septiembre (< 0 m³/s/100 m de línea de costa) incrementando estos en magnitud en los meses de invierno (hasta 120 m³/s/100 m de línea de costa). En este último periodo dominaron condiciones de surgencia nula y hundimiento de magnitud baja durante la mayor parte del año (0 a -20 m³/s/100 m de línea de costa de abril a septiembre para todos los años) (**Figura 13**).

En la zona de pesca 3 históricamente el rango del *IS* (120 a -120 m³/s/100 m de línea de costa) fue ligeramente mayor que para la zona 2. De 1988 a 2002 se observa mayor variabilidad interanual del *IS*. De enero a mayo típicamente se

presentaron valores del *IS* positivos de entre 20 a 140 m³/s/100 m de línea de costa mientras que para los meses cálidos el *IS* fue de 0 a -140 m³/s/100 m de línea de costa). En 2003 a 2021 fue más evidente que para esta zona de pesca, contrario a zonas de pesca de latitud mayor, dominaron valores del *IS* positivos la mayoría de los meses (20 a -140 m³/s/100 m de línea de costa) encontrándose valores del *IS* negativos solo durante algunos años y solo para el mes de septiembre (**Figura 13**).

En la zona de pesca 4 el comportamiento del *IS* es particularmente singular al aumentar el valor del índice (fase positiva) para los últimos años de la serie histórica durante casi todo el año calendario. Así, durante casi la mayoría de los meses de 1988 a 2002 se obtuvieron valores del *IS* de entre 0 a 140 m³/s/100 m de línea de costa mientras que en los meses cálidos el *IS* fue negativo para algunos años (> 0 m³/s/100 m de línea de costa). Durante 2003 a 2021 el *IS* continuó desarrollándose mayormente en fase positiva con valores de hasta 140 m³/s/100 m de línea de costa en los meses de otoño-invierno. En los últimos años (2018-2021) es posible observar que el *IS* ha sido positivo y que, durante casi todos los meses del año, este se ha encontrado por encima de los 20 m³/s/100 m de línea de costa (**Figura 13**).



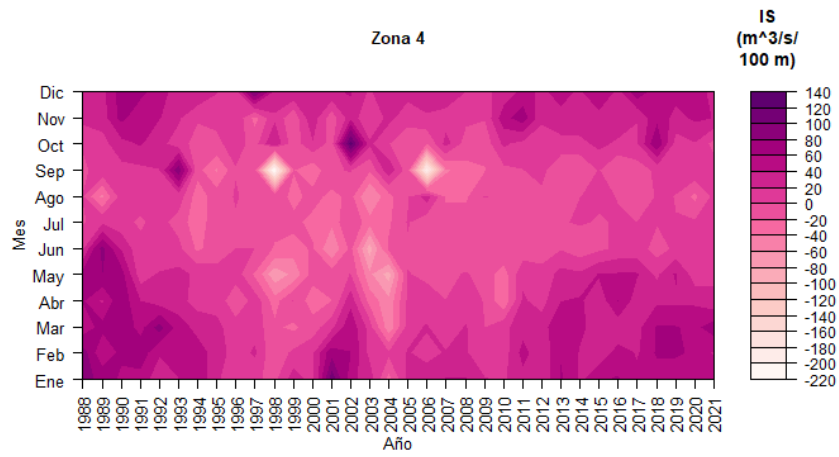


Figura 13. Distribución mensual histórica del Índice de surgencia (*IS*) por zonas de pesca durante 1988-2021 en el sur del golfo de California.

8. 2. Índice de turbulencia

8. 2. 1. Patrón estacional

En la región sur del golfo de California durante 1988-2021 la estacionalidad del IT tiene un patrón de domo invertido. Este tiene un valor máximo en el mes de enero ($133.85 \pm 56.70 \text{ m}^3/\text{s}^3$) y mínimo en el mes de agosto ($47.20 \pm 14.66 \text{ m}^3/\text{s}^3$). La mayor variabilidad respecto a los valores medios de IT mensuales se obtuvo en los extremos (enero y diciembre) mientras que la menor dispersión de los datos respecto a la media mensual se obtuvo en julio, agosto (**Figura 14; Tabla V**).

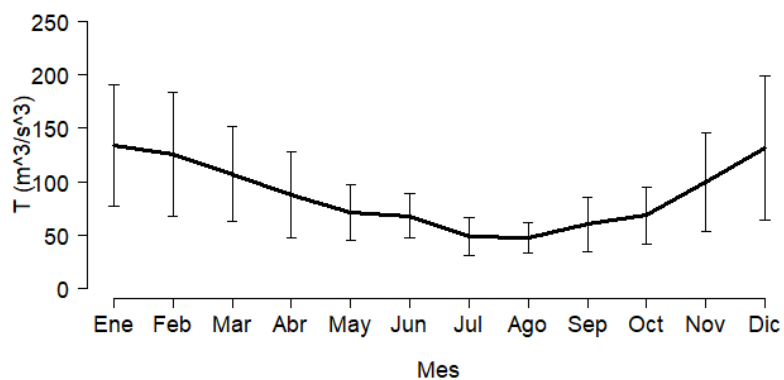


Figura 14. Patrón estacional del Índice de turbulencia (IT) durante 1988-2021 en el sur del golfo de California. Las barras de error indican ± 1 desviación estándar.

Tabla V. Valores medios y desviación estándar mensuales del Índice de turbulencia (*IT* en m^3/s^3) durante 1988-2021 en el sur del golfo de California.

Mes	Media	Desviación estándar
Enero	133.85	56.70
Febrero	125.20	58.20
Marzo	107.01	44.81
Abril	88.13	40.39
Mayo	71.16	25.83
Junio	67.67	20.78
Julio	48.17	17.56
Agosto	47.20	14.66
Septiembre	59.69	25.16
Octubre	68.14	26.92
Noviembre	99.22	46.02
Diciembre	131.38	67.77

La estacionalidad típica del *IT* en la región sur del golfo de California durante 1988-2021 por zonas de pesca presenta el mismo patrón de domo invertido. En las zonas de pesca 1 y 2 los mayores valores del *IT* se obtuvieron en el mes de diciembre (198.83 ± 65.70 y $165.62 \pm 57.81 \text{ m}^3/\text{s}^3$ respectivamente). En cambio, en las zonas de pesca 3, 4 y 5 los máximos del *IT* se presentaron en el mes de enero (149.67 ± 48.53 , 90.02 ± 26.06 y $81.66 \pm 6.55 \text{ m}^3/\text{s}^3$ respectivamente). Los valores mínimos del *IT*, en las zonas de pesca 1 y 2 se obtuvieron en el mes de agosto (49.23 ± 14.65 , $51.80 \pm 15.70 \text{ m}^3/\text{s}^3$ respectivamente) y en el mes de julio para las zonas de pesca 3, 4 y 5 (43.10 ± 10.69 , 35.75 ± 8.99 y $37.57 \pm 10.57 \text{ m}^3/\text{s}^3$ respectivamente) (**Figura 15; Tabla VI**).

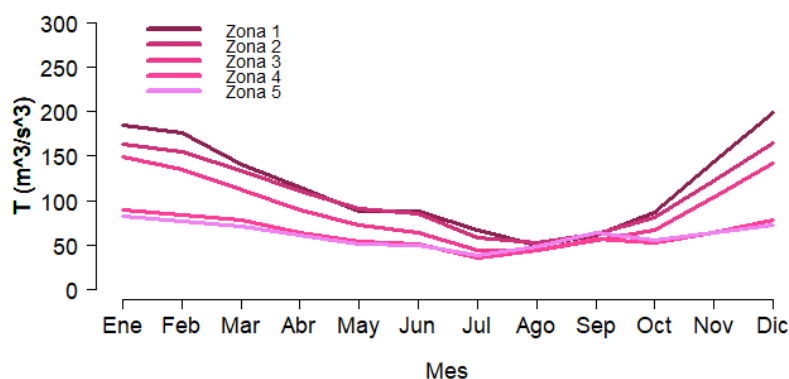


Figura 15. Patrón estacional del Índice de turbulencia (*IT*) por zonas de pesca durante 1988-2021 en el sur del golfo de California.

Tabla VI. Valores medios y desviación estándar mensuales por zonas de pesca del Índice de turbulencia (*IT* en m^3/s^3) durante 1988-2021 en el sur del golfo de California.

Mes	Zona de pesca									
	1		2		3		4		5	
	Media	DE	Media	DE	Media	DE	Media	DE	Media	DE
Ene	184.57	45.69	163.32	49.79	149.67	48.53	90.02	26.06	81.66	16.55
Feb	176.54	54.87	154.48	52.12	134.65	50.58	84.02	28.01	76.33	19.38
Mar	140.95	46.58	133.15	44.20	111.98	37.14	77.42	21.01	71.55	15.01
Abr	114.76	40.24	111.02	44.13	89.49	37.95	64.09	22.39	61.31	15.38
May	87.46	26.58	91.02	26.98	72.01	18.50	54.15	12.02	51.15	10.22
Jun	88.05	15.30	85.57	14.04	64.04	10.50	50.94	12.03	49.77	11.57
Jul	66.31	17.94	58.13	14.40	43.10	10.69	35.75	8.99	37.57	10.57
Ago	49.23	14.65	51.80	15.70	44.07	13.16	43.29	13.57	47.60	15.15
Sep	60.86	18.89	62.24	24.94	55.40	24.05	56.33	25.50	63.65	31.30
Oct	86.78	27.10	80.25	27.90	66.10	24.41	51.69	17.82	55.86	18.34
Nov	142.98	50.74	122.64	38.85	103.31	31.87	63.63	16.39	63.55	17.49
Dic	198.83	65.70	165.62	57.81	142.02	49.55	77.50	22.79	72.91	18.96

DE: Desviación estándar.

8. 2. 2. Patrón interanual y tendencia

El patrón interanual del *IT* en el sur del golfo de California durante 1988-2021 también indica un cambio en el régimen de la velocidad del viento a partir del año 1998. En este caso, también la serie histórica del *IT* se puede dividir en tres periodos: El primero abarcó de 1988 a 1998 en el cual se obtuvo un valor máximo del *IT* de 227.10 m³/s³ durante diciembre de 1998 y un mínimo de 28.70 m³/s³ en diciembre de 1990 (**Figura 16a**). El valor medio del *IT* para el primer periodo fue de 85.43 ± 40.49 m³/s³ (**Figura 16b**). El segundo periodo (1999 a 2009) se caracterizó por presentar valores del *IT* altos. Durante el segundo periodo, el valor máximo del *IT* fue 221.26 m³/s³ en el mes de febrero de 2001 y un mínimo de 29.08 m³/s³ en el mes de agosto de 2009 (**Figura 16a**), con una media de 96.38 ± 41.90 m³/s³ (**Figura 16b**). En el tercer periodo (2010 a 2021) el valor máximo del *IT* se obtuvo en el mes de enero de 2013 (211.57 m³/s³) y el mínimo en agosto de 2015 (26.89 m³/s³) (**Figura 16a**) con una media de 80.50 ± 34.87 m³/s³ (**Figura 16b**).

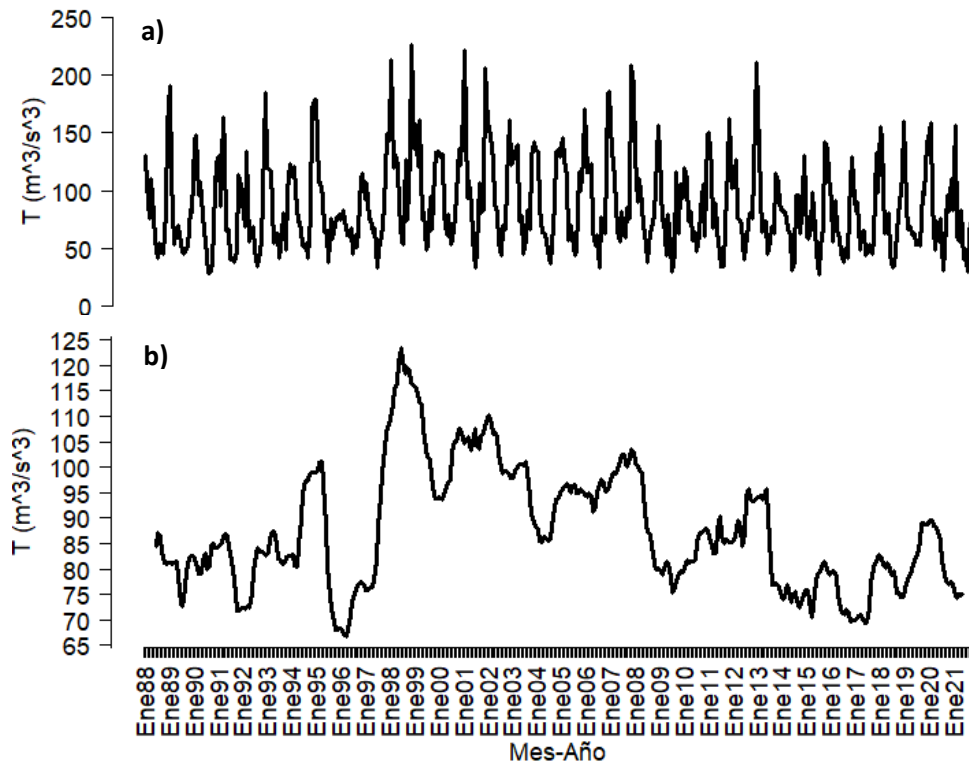


Figura 16. Patrón interanual (a) y tendencia (b) del Índice de turbulencia (*IT*) durante 1988-2021 en el sur del golfo de California.

8. 2. 3. Estacionalidad histórica por zona de pesca

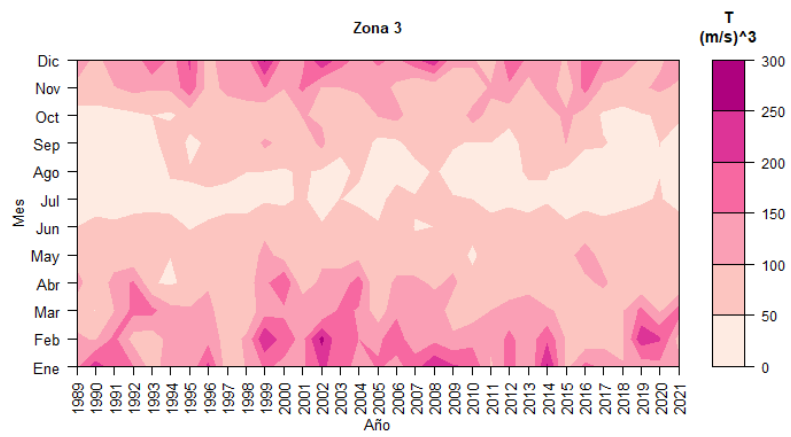
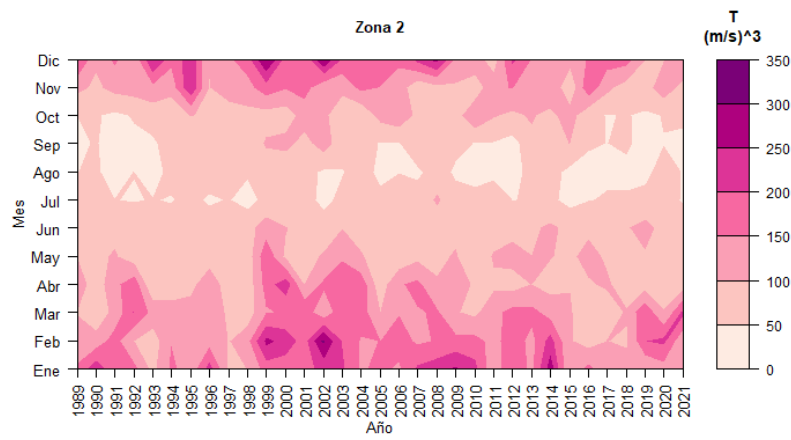
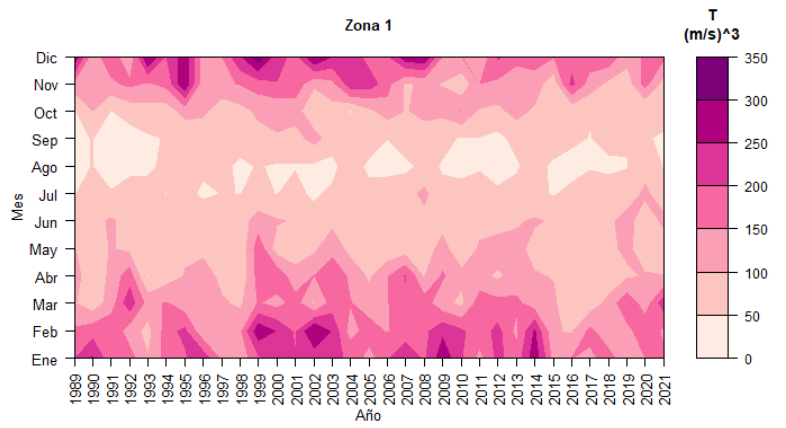
También el *IT* ha sido variable dependiendo de la zona de pesca. Sin embargo, los datos indican que el cambio de tendencia de los vientos fue perceptible en tres de las 5 zonas de pesca con marcados valores del *IT* tanto altos como bajos a través del tiempo. En la zona de pesca 1, durante el periodo comprendido de 1988 a 1998 los valores del *IT* fueron mayores durante los meses de marzo y abril de 1992, (150 a 250 m³/s³). Así mismo, en los meses cálidos (julio a septiembre), el *IT* presentó valores en un rango de 0 a 10 m³/s³. De 1999 a 2009 en los meses de enero a junio el *IT* presentó en mayor frecuencia valores de 100 a 250 m³/s³ y durante julio a septiembre la zona estuvo dominada por valores del *IT* de 0 a 100 m³/s³, volviendo a incrementar en octubre (>100 m³/s³) (**Figura 17**).

La zona de pesca 2 presentó un patrón parecido al de la zona de pesca 1, manteniendo la misma amplitud en cuanto a la distribución histórica del *IT*. Durante enero a junio de 1988-1998 se obtuvieron valores de entre 50 a 200 m³/s³. En los meses cálidos de este mismo periodo el *IT* osciló entre 0 y 100 m³/s³. De 1999 a 2009 la zona de pesca 2 también presentó un aumento en la frecuencia de valores del *IT* sostenidamente altos durante los meses de enero a junio (100 a 350 m³/s³) disminuyendo en magnitud en el mes de septiembre (50 a 150 m³/s³). De 2010 a 2021 durante los meses templados el *IT* continuó con valores similares al periodo anterior (100 a 350 m³/s³) pero en menor frecuencia. De julio a septiembre de ese mismo periodo se obtuvieron valores típicos para los meses cálidos (0 a 100 m³/s³) (**Figura 17**).

Para la zona de pesca 3 el rango del *IT* (0 a 300 m³/s³) fue ligeramente menor que para la zona 2 presentando un aumento en la distribución mensual de valores del *IT* bajos en los meses cálidos. De enero a abril de 1988 a 1998 el *IT* presentó valores de entre 50 a 200 m³/s³ y en los meses cálidos el *IT* fue de 0 a 100 m³/s³. En 1999 a 2009 de enero a abril para esta zona se obtuvieron valores del *IT* más altos (50 a 300 m³/s³). De 2010 a 2021 el *IT* presentó valores de 100 a 250 m³/s³ en enero a

abril y durante los meses cálidos el *IT* presentó los valores típicos de 0 a 100 m³/s³ (**Figura 17**).

Tal y como se reportó para el *IS*, en las zonas de pesca 4 y 5 se observó una distribución de valores mensuales del *IT* que difieren en magnitud con respecto de las zonas de pesca anteriores. Ambas zonas de pesca presentaron un rango de *IT* de 0 a 200 m³/s³. Durante los periodos que corresponden a los descritos para las zonas de pesca anteriores (1988-1998: 1999-2009 y 2010 y 2021) se obtuvo una marcada disminución en la magnitud del índice en los meses templados y fríos en ambas zonas de pesca (*IT* < 150 m³/s³). Por otra parte, los valores del *IT* que típicamente corresponden a los meses cálidos aumentaron su distribución mensual, obteniéndose valores del *IT* de 0 a 50 m³/s³ desde los meses de abril y hasta noviembre sobre todo en los últimos años (2011-2021) (**Figura 17**).



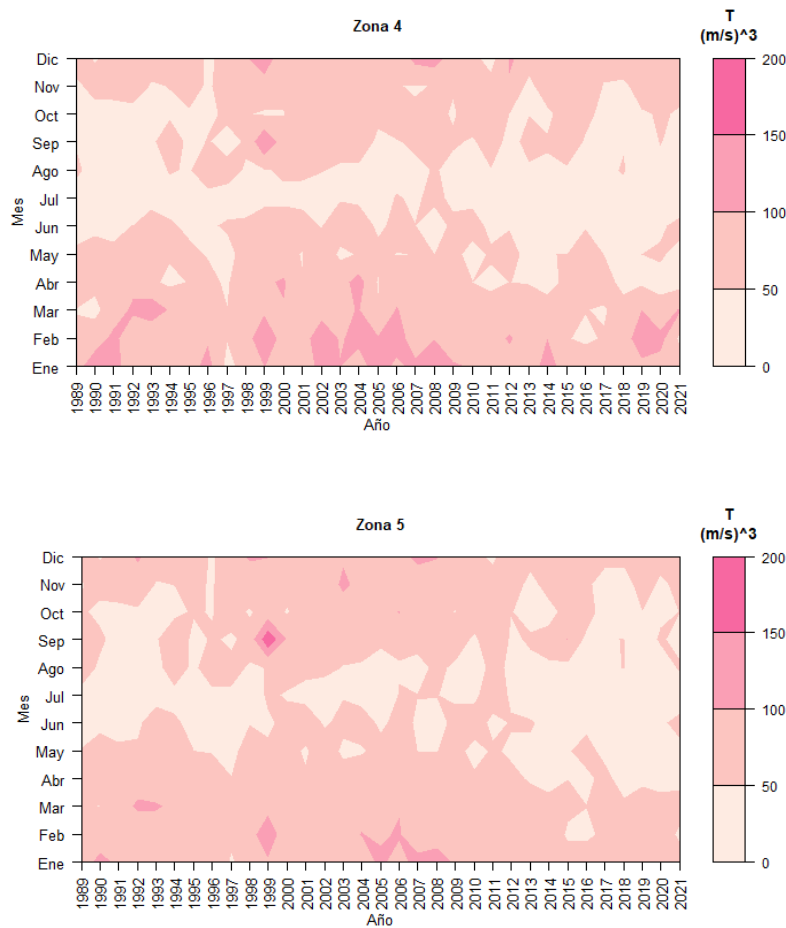


Figura 17. Distribución mensual histórica del Índice de turbulencia (*IT*) por zonas de pesca durante 1988-2021 en el sur del golfo de California.

8. 2. 4. Anomalías

Las anomalías mensuales del *IT* en el sur del golfo de California durante 1988-2021 corroboran que históricamente el *IT* ha pasado por tres periodos en cuanto a intensidad. De 1988 a 1998, el *IT* presentó mayormente anomalías negativas indicando una disminución en el valor del índice respecto a la media mensual histórica (hasta $-51.43 \text{ m}^3/\text{s}^3$). El segundo periodo identificado abarcó de 1999 a 2009 con valores de anomalías mayormente positivas (hasta $43.43 \text{ m}^3/\text{s}^3$). Durante el tercer periodo (2010-2021) las anomalías se invirtieron nuevamente para ser

frecuentemente negativas (hasta $-34.94 \text{ m}^3/\text{s}^3$) obteniéndose algunos meses de anomalías positivas intensas ($35.83 \text{ m}^3/\text{s}^3$ en enero de 2013) (**Figura 18**).

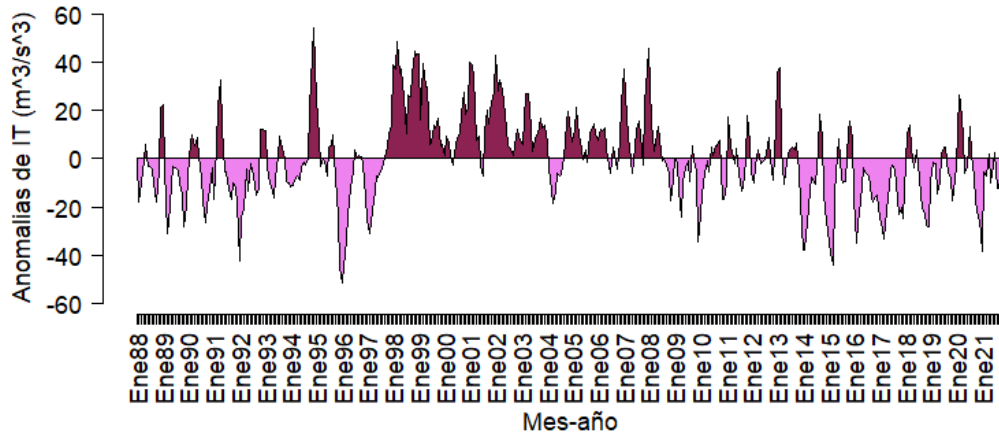


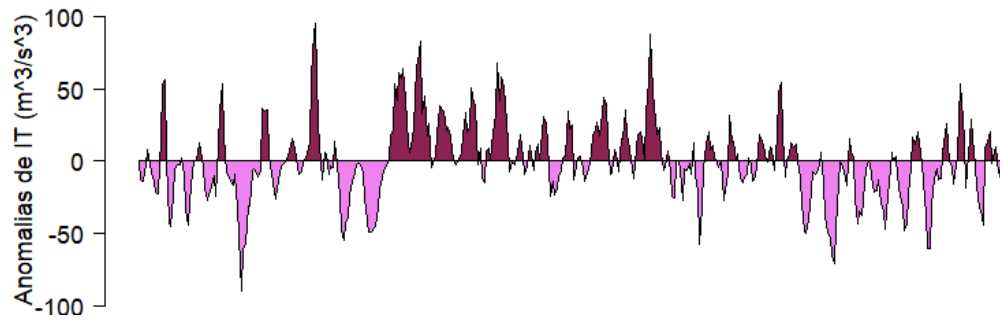
Figura 18. Anomalías mensuales del Índice de turbulencia (*IT*) durante 1988-2021 en el sur del golfo de California.

8. 2. 5. Anomalías por zona de pesca

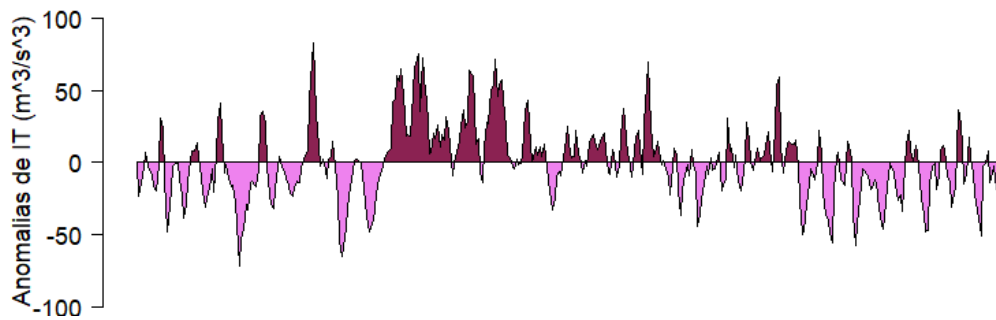
Las anomalías mensuales del *IT* por zona de pesca presentaron un patrón similar al de los datos agrupados de toda el área de estudio solo con algunas diferencias en cuanto a la magnitud del *IT*. En las cinco zonas de pesca se presentó evidencia del cambio de tendencia en la velocidad del viento a través de los tres periodos identificados lo que indica un cambio homogéneo en toda el área de estudio. Así, en la zona de pesca 1 se obtuvieron el valor más alto ($95.38 \text{ m}^3/\text{s}^3$ en diciembre de 1995) y también el valor más bajo ($-89.85 \text{ m}^3/\text{s}^3$) de anomalías mensuales negativas de *IT* de las cinco zonas de pesca. Las zonas de pesca 2 y 3 presentaron un patrón similar al de la zona de pesca 1 en cuanto a las anomalías mensuales (magnitud y distribución mensual). En las zonas de pesca 4 y 5 se obtuvieron los valores más bajos de anomalías mensuales del *IT* (tanto positivas como negativas) las cuales no fueron mayores o menores a $\pm 50 \text{ m}^3/\text{s}^3$. En la zona de pesca 5 se observó un

predominio de anomalías negativas y de magnitud media (hasta $-50 \text{ m}^3/\text{s}^3$) indicando que la velocidad del viento que da lugar al *IT* ha disminuido respecto a la media mensual histórica en dicha zona de pesca (**Figura 19**).

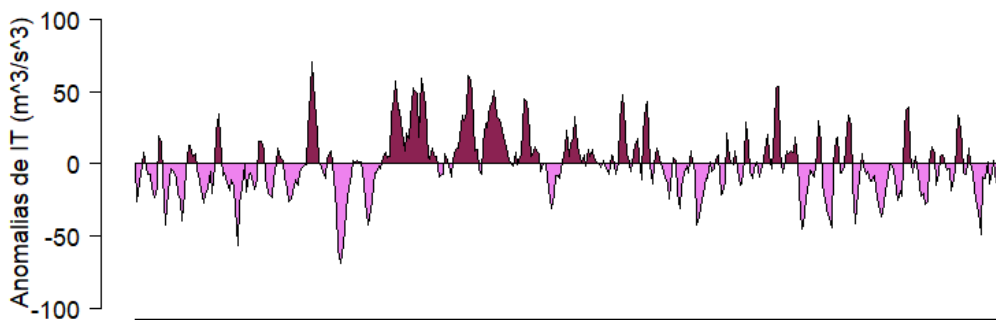
Zona 1



Zona 2



Zona 3



Ene88 Ene89 Ene90 Ene91 Ene92 Ene93 Ene94 Ene95 Ene96 Ene97 Ene98 Ene99 Ene00 Ene01 Ene02 Ene03 Ene04 Ene05 Ene06 Ene07 Ene08 Ene09 Ene10 Ene11 Ene12 Ene13 Ene14 Ene15 Ene16 Ene17 Ene18 Ene19 Ene20 Ene21

Mes-año

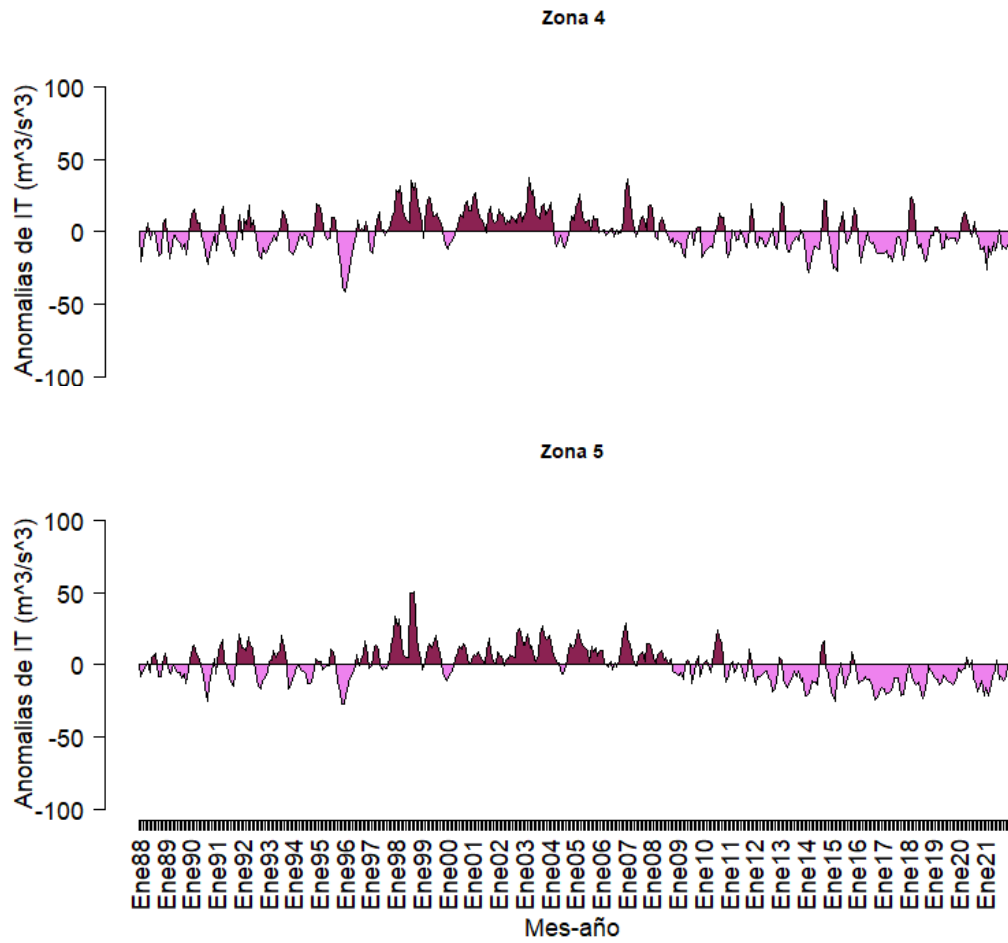


Figura 19. Anomalías mensuales del Índice de turbulencia (*IT*) por zonas de pesca durante 1988-2021 en el sur del golfo de California.

8. 3. Temperatura superficial del mar

8. 3. 1. Patrón estacional

La *TSM* mostró un patrón estacional sinusoidal en la región sur del golfo de California durante 2002-2021. El valor máximo de *TSM* se registró en el mes de agosto (30.07 ± 0.47 °C) y el mínimo en el mes de febrero (21.65 ± 2.28 °C). La estacionalidad de la *TSM* en la región presentó la mayor variabilidad respecto a los valores medios mensuales en los extremos (principio y fin de año) mientras que la menor dispersión de los datos respecto a la media mensual se obtuvo en agosto y septiembre (**Figura 20; Tabla VII**).

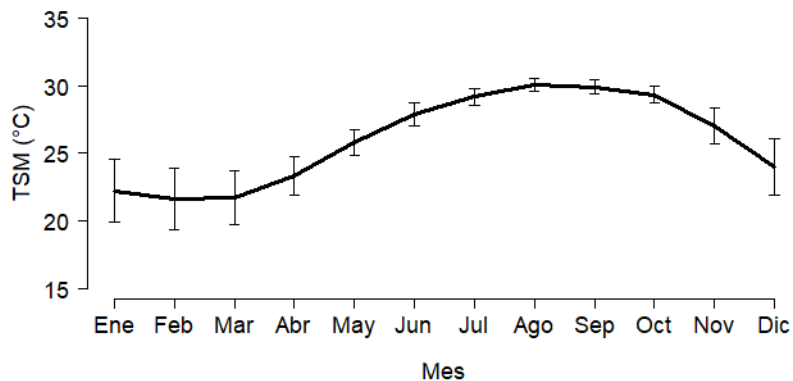


Figura 20. Patrón estacional de la temperatura superficial del mar (*TSM*) durante 2002-2021 en el sur del golfo de California. Las barras de error indican ± 1 desviación estándar.

Tabla VII. Valores medios y desviación estándar mensuales de la temperatura superficial del mar (*TSM* en °C) durante 2002-2021 en el sur del golfo de California.

Mes	Media	Desviación estándar
Enero	22.21	2.31
Febrero	21.65	2.28
Marzo	21.73	1.97
Abril	23.32	1.42
Mayo	25.80	0.93
Junio	27.90	0.86
Julio	29.19	0.61
Agosto	30.07	0.47
Septiembre	29.92	0.54
Octubre	29.36	0.58
Noviembre	27.04	1.34
Diciembre	23.98	2.11

Las 5 zonas de pesca en la región sur del golfo de California durante 1988-2021 presentan el patrón sinusoidal de los datos en conjunto. En la zona de pesca 1 el valor máximo de *TSM* se obtuvo en el mes de septiembre (30.24 ± 0.61 °C). Por el contrario, en las zonas de pesca 2, 3, 4 y 5 los máximos de *TSM* se presentaron en el mes de agosto (30.21 ± 0.43 , 29.96 ± 0.49 , 29.98 ± 0.46 y 29.97 ± 0.39 °C respectivamente). La mínima de *TSM* en las zonas de pesca 1 y 2 se obtuvieron en el mes de febrero (19.37 ± 1.57 y 20.37 ± 1.69 °C respectivamente) y en el mes de marzo para las zonas de pesca 3, 4 y 5 (21.44 ± 1.40 , 22.65 ± 1.20 y 24.07 ± 0.94 °C respectivamente) (**Figura 21; Tabla VIII**).

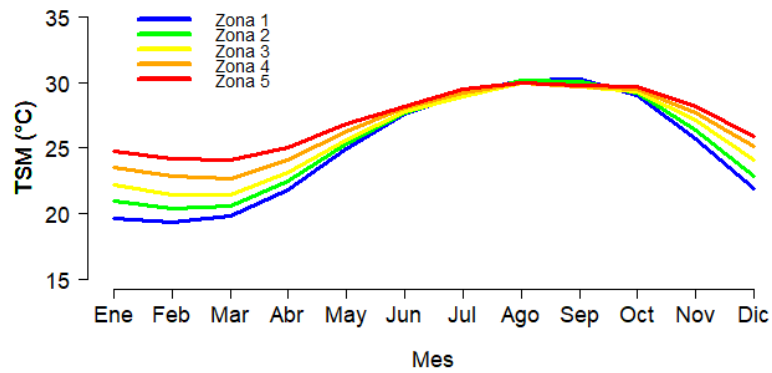


Figura 21. Patrón estacional de la temperatura superficial del mar (*TSM*) por zonas de pesca durante 2002-2021 en el sur del golfo de California.

Tabla VIII. Valores medios y desviación estándar mensuales por zonas de pesca de la temperatura superficial del mar (*TSM* en °C) durante 2002-2021 en el sur del golfo de California.

Mes	Zona de pesca									
	1		2		3		4		5	
	Media	DE	Media	DE	Media	DE	Media	DE	Media	DE
Ene	19.67	1.43	20.92	1.58	22.17	1.46	23.53	1.41	24.77	1.39
Feb	19.37	1.57	20.37	1.69	21.47	1.61	22.87	1.46	24.15	1.26
Mar	19.87	1.43	20.60	1.47	21.44	1.40	22.65	1.20	24.07	0.94
Abr	21.85	1.00	22.47	0.92	23.14	0.93	24.10	0.69	25.07	0.60
May	24.92	0.61	25.34	0.62	25.65	0.69	26.27	0.72	26.81	0.60
Jun	27.64	0.87	27.75	0.90	27.79	0.86	28.08	0.82	28.23	0.77
Jul	29.12	0.64	29.09	0.62	28.99	0.56	29.25	0.54	29.49	0.60
Ago	30.23	0.54	30.21	0.43	29.96	0.49	29.98	0.46	29.97	0.39
Sep	30.24	0.61	30.10	0.45	29.71	0.54	29.72	0.53	29.83	0.40
Oct	29.03	0.64	29.23	0.56	29.33	0.56	29.51	0.54	29.70	0.41
Nov	25.76	1.02	26.38	1.16	27.11	0.98	27.74	1.01	28.20	0.94
Dic	21.89	1.65	22.84	1.74	24.10	1.50	25.13	1.41	25.93	1.35

DE: Desviación estándar.

8. 3. 2. Patrón interanual y tendencia

El comportamiento interanual de la *TSM* durante 2002-2021 en el sur del golfo de california ha sido cíclico a través del tiempo, con cambios que no son perceptibles fácilmente de manera visual en la serie interanual (**Figura 22a**) pero si en la serie de tendencia (**Figura 22b**). Los datos indican que por lo menos a partir de 2002, la *TSM* en la región ha presentado dos periodos diferenciables (cada 10 años). El primero abarcó de 2002 a 2011 y se caracterizó por presentar alternancia entre episodios de valores de *TSM* máximas y mínimas los cuales se dieron con una diferencia de aproximadamente cada 3 años. En este periodo se obtuvo un valor máximo de *TSM* de 30.64 °C durante agosto de 2002 y un mínimo de 18.97 °C en enero de 2008 (**Figura 22a**). El valor medio de *TSM* para el primer periodo fue de 25.78 ± 3.59 °C. En el segundo periodo (2012-2021) se observó una tendencia alcista de la *TSM* la cual alcanzó el máximo histórico de 30.98 °C en agosto de 2015 y el mínimo de 18.48 °C en el mes de febrero de 2011 (**Figura 22a**), con una media de 26.25 ± 3.38 °C. La diferencia de *TSM* entre los dos periodos fue de 0.47 °C.

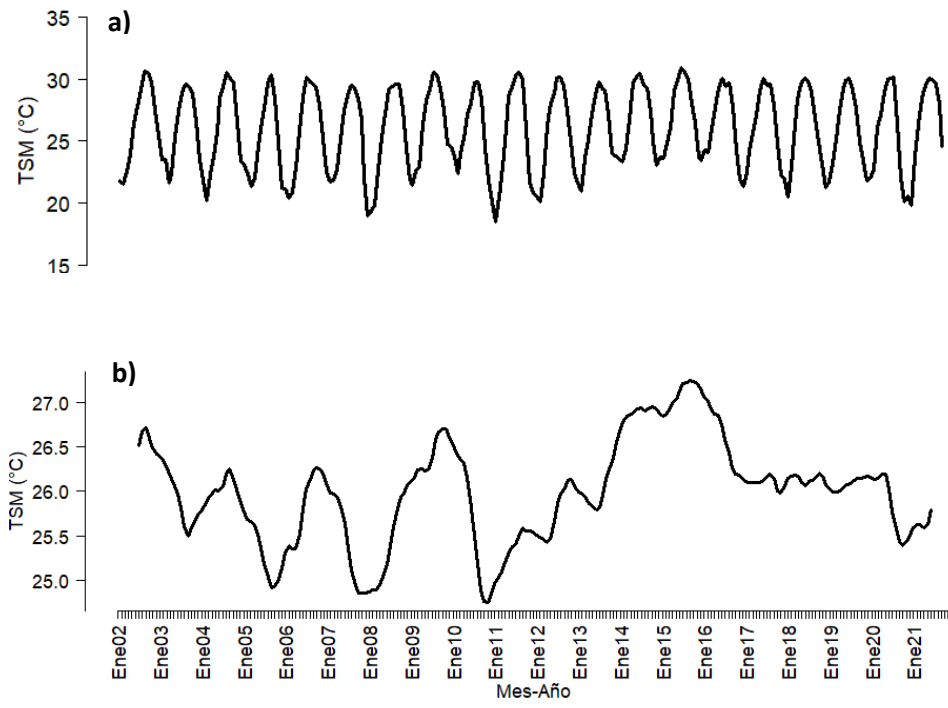


Figura 22. Patrón interanual (a) y tendencia (b) de la temperatura superficial del mar (*TSM*) durante 2002-2021 en el sur del golfo de California.

8. 3. 3. Estacionalidad histórica por zona de pesca

Los datos históricos de *TSM* indican la existencia de un gradiente mensual en todas las zonas de pesca de pelágicos menores en el sur del golfo de California, el cual es predecible: en los meses de invierno en el hemisferio norte (diciembre a marzo) predominaron los valores de *TSM* más bajos (16 a 21 °C dependiendo de la zona de pesca) y los más altos en verano (30 a 32 °C). En la zona de pesca 1 se obtuvo el rango más amplio de valores de *TSM* (16 a 32 °C). Los valores más bajos se obtuvieron durante los meses de diciembre a abril (16 a 23 °C) y los más altos de julio a octubre (29 a 32 °C). Durante agosto y septiembre de 2009 a 2016 en esta zona de pesca se obtuvieron valores de *TSM* sostenidamente cálidos (30 a 31 °C) y valores sostenidamente fríos de diciembre a abril de 2006 a 2009 (16 a 19 °C) (**Figura 23**).

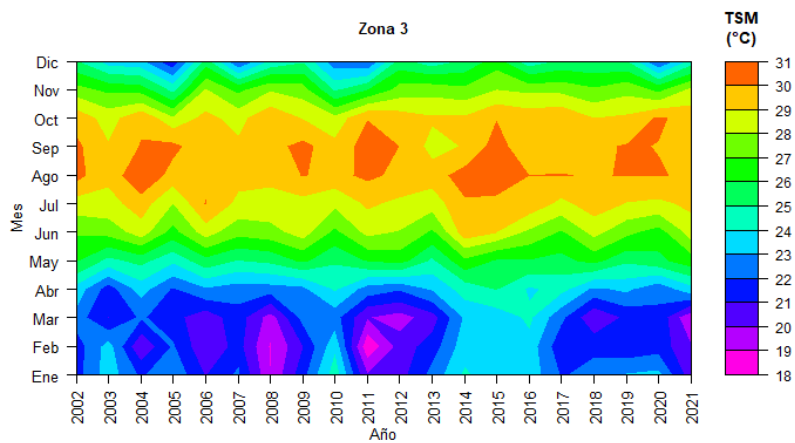
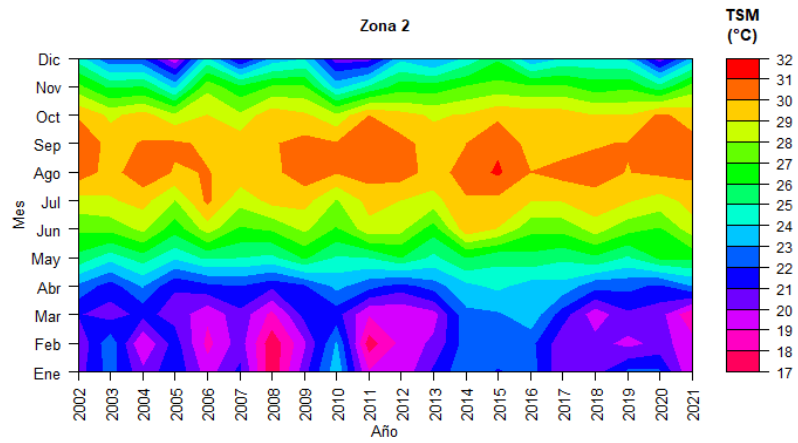
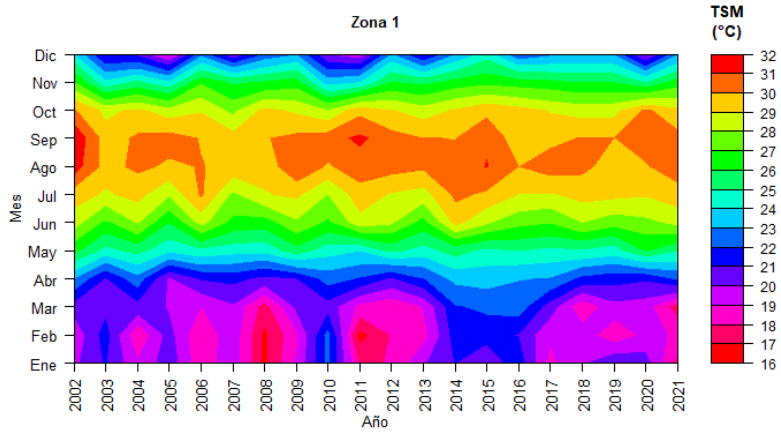
En la zona de pesca 2 se presentó un patrón similar al de la zona de pesca 1, disminuyendo en 1 °C el rango de *TSM* (17 a 32 °C). Los valores más altos de *TSM* se presentaron también en los meses de julio a octubre (29 a 32 °C) mientras que los más bajos también se obtuvieron en los meses de invierno (17 a 22 °C) con excepción de los años 2014 a 2016 donde la *TSM* fue 22 a 24 °C (**Figura 23**).

En la zona de pesca 3, el rango de *TSM* (18 a 31 °C) fue ligeramente menor que para la zona de pesca 2. Durante los meses cálidos de verano se observó una retracción del periodo donde se dan los máximos valores de *TSM*, siendo este de agosto a octubre (29 a 31 °C). Durante los meses que típicamente se dan los valores de *TSM* más bajos, se obtuvieron periodos de la serie histórica con temperaturas más altas de lo normal (23 a 25 °C) en 2014-2016. Históricamente en los meses cálidos predominaron valores de *TSM* de 29 a 30 °C, con algunos periodos cortos en los cuales la *TSM* fue de 30 a 31 °C (2014-2016) (**Figura 23**).

En la zona de pesca 4 el patrón de la *TSM* fue similar al de la zona de pesca 3 pero el rango para esta zona de pesca disminuyó en 1 °C (19 a 31 °C). Se obtuvieron temperaturas de entre 29 y 31 °C de julio a octubre de toda la serie histórica con un

marcado periodo cálido de 2012 a 2015. La *TSM* más baja para esta zona de pesca se obtuvo en el invierno de 2007 y 2010 (19 a 20 °C). En el invierno de 2013 a 2015, la *TSM* fue atípicamente alta (24 a 25 °C) (**Figura 23**).

Para la zona de pesca 5, la cual es la zona más al sur del área de estudio, el rango de *TSM* histórico fue el más reducido de las 5 zonas de pesca (20 a 31 °C). Se obtuvieron las temperaturas más cálidas registradas en invierno en comparación con las demás zonas de pesca (de 20 a 25 °C) con el mismo periodo de 2013 a 2016 con una *TSM* de 26 °C. Condiciones templadas se observaron desde abril y hasta junio en todos los años (25 a 28 °C) mientras que en verano la *TSM* obtenida se comportó similar que en resto de las zonas de pesca (29 a 31 °C) (**Figura 23**).



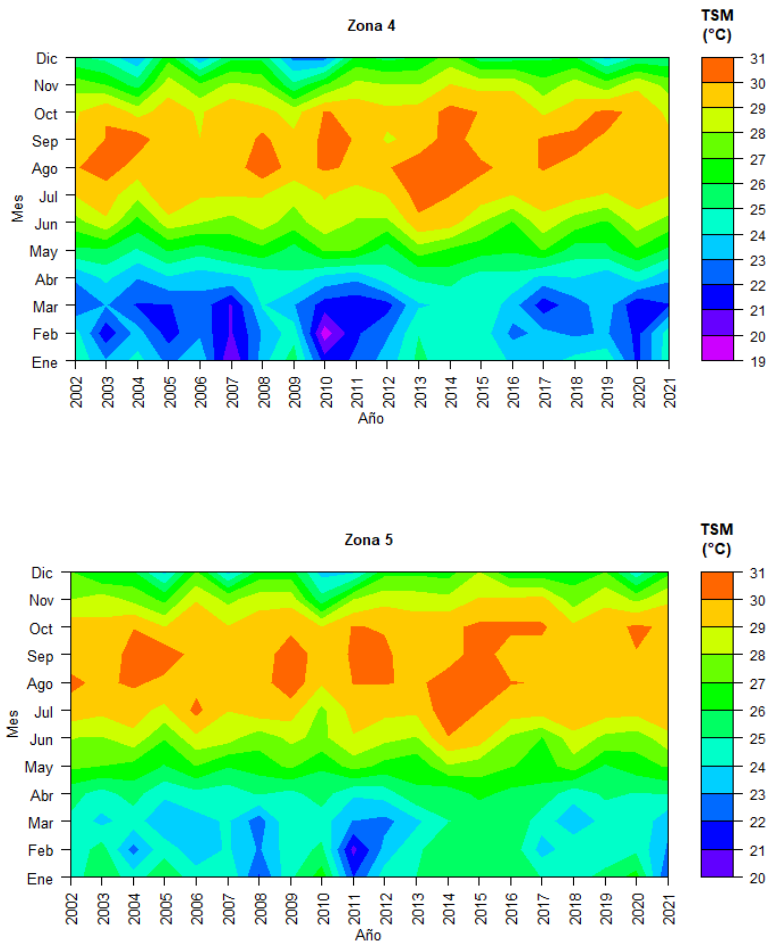


Figura 23. Distribución mensual histórica de la temperatura superficial del mar (*TSM*) por zonas de pesca durante 2002-2021 en el sur del golfo de California.

8. 3. 4. Anomalías

Las anomalías mensuales de la *TSM* en el área de estudio durante 2002-2021 exhiben alternancia entre periodos cálidos (anomalías positivas) y periodos fríos (anomalías negativas). La amplitud máxima de los eventos cálidos fue de 1.93 °C con respecto a la media mensual y para los periodos fríos fue de -2.51 °C. De 2002 a 2014 se obtuvieron el mismo número de periodos cálidos y fríos (6), con los periodos con anomalías negativas de mayor amplitud (hasta -2.51 °C) y mayor duración (hasta 3 años consecutivos). En un segundo periodo, el cual abarcó de

2014 a 2021, se obtuvieron anomalías mayormente positivas (hasta 1.93 °C) las cuales se extendieron por 3 años consecutivos (2014-2016). De 2014 a 2021, anomalías negativas de *TSM* fueron de menor intensidad que en 2002 a 2013 (-1.67 °C en 2021) (**Figura 24**).

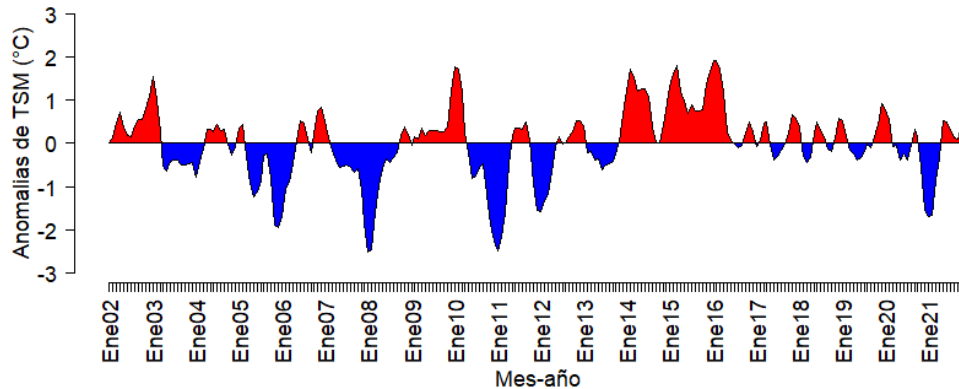
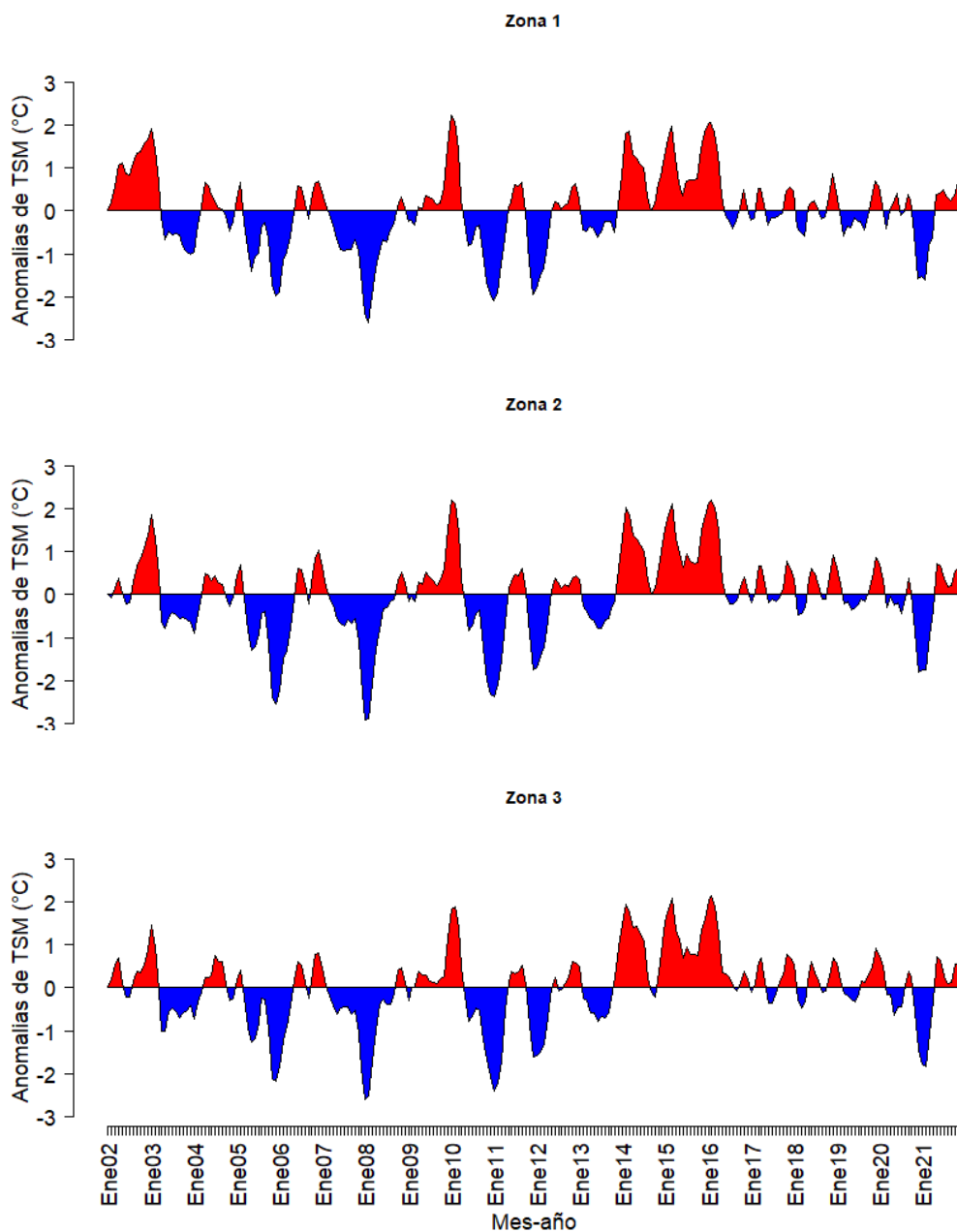


Figura 24. Anomalías mensuales de la temperatura superficial del mar (*TSM*) durante 2002-2021 en el sur del golfo de California.

8. 3. 5. Anomalías por zona de pesca

Las anomalías mensuales de la *TSM* por zona de pesca también presentaron un patrón similar al de los datos agrupados de toda el área de estudio excediendo en algunos casos la magnitud de las anomalías de los datos en conjunto (de 1.93 a -2.51 °C para anomalías positivas y negativas respectivamente). En cuanto a diferencias importantes en el comportamiento de las anomalías mensuales de *TSM* por zona de pesca destaca la intensidad de un evento cálido en la zona de pesca 1 en 2002-2003, con anomalías positivas de hasta 1.92 °C el cual se extendió por varios meses consecutivos (agosto de 2002 a marzo de 2003). También, las anomalías negativas mensuales de *TSM* en los años 2005-2006 y 2007-2009 fueron de mayor amplitud en las zonas de pesca 1 (-1.97 y -2.52 °C respectivamente) y 2 (-2.55 y -2.59 °C respectivamente) que en el resto de las zonas de pesca. Por otro lado, en las zonas de pesca 4 y 5 fue notorio que anomalías negativas en 2011

fueron de mayor amplitud que en el resto de las zonas de pesca (-2.67 y -2.86 °C respectivamente) y que las anomalías positivas en 2014-2016 fueron de menor amplitud que en otras zonas de pesca, pero sostenidas en el tiempo (**Figura 25**).



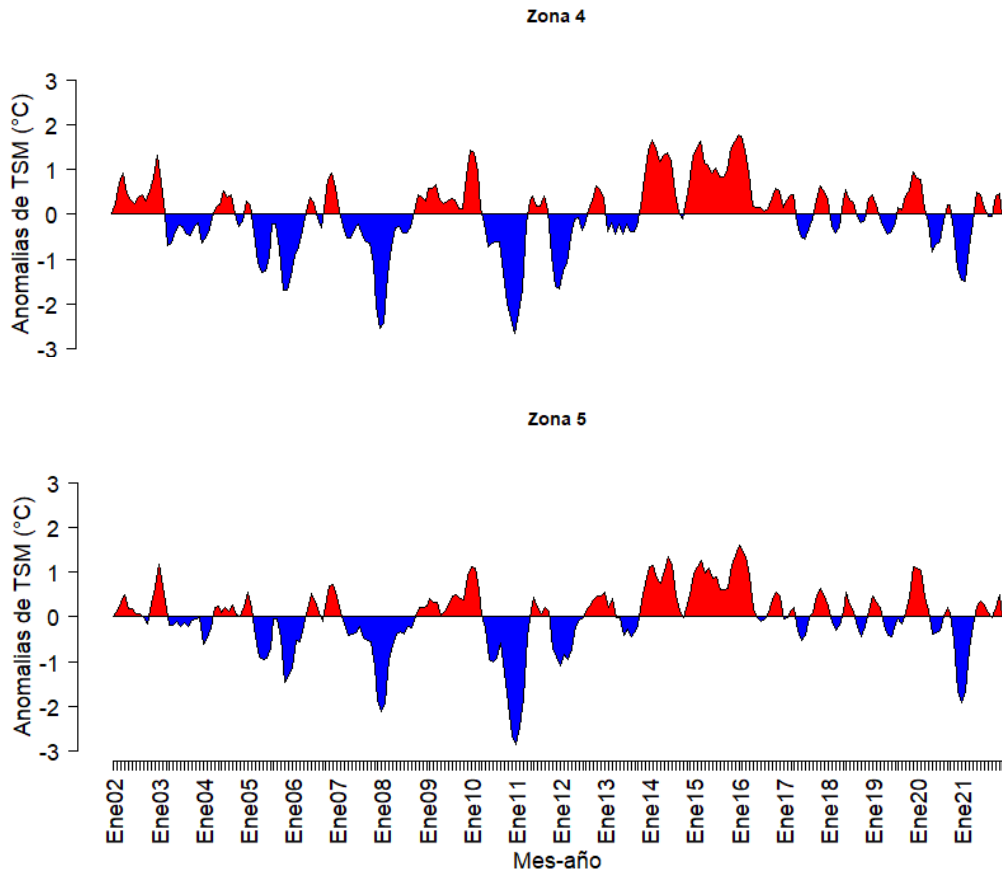


Figura 25. Anomalías mensuales de la temperatura superficial del mar (TSM) por zonas de pesca durante 2002-2021 en el sur del golfo de California.

8. 4. Pruebas de hipótesis estadísticas

8. 4. 1. Índice de surgencia

Los datos del *IS* por zonas de pesca no presentaron distribución normal (zona 1: $D=0.088157$, $p<0.05$; zona 2: $D=0.061438$, $p<0.05$; zona 3: $D=0.056861$, $p<0.05$ y zona 4: $D=0.091069$, $p<0.05$). En su lugar, estos presentaron un ligero sesgo hacia los valores negativos del índice en las zonas de pesca 1 a 3, mientras que en la zona de pesca 4 estos estuvieron sesgados ligeramente hacia los valores positivos del índice (**Figura 26**).

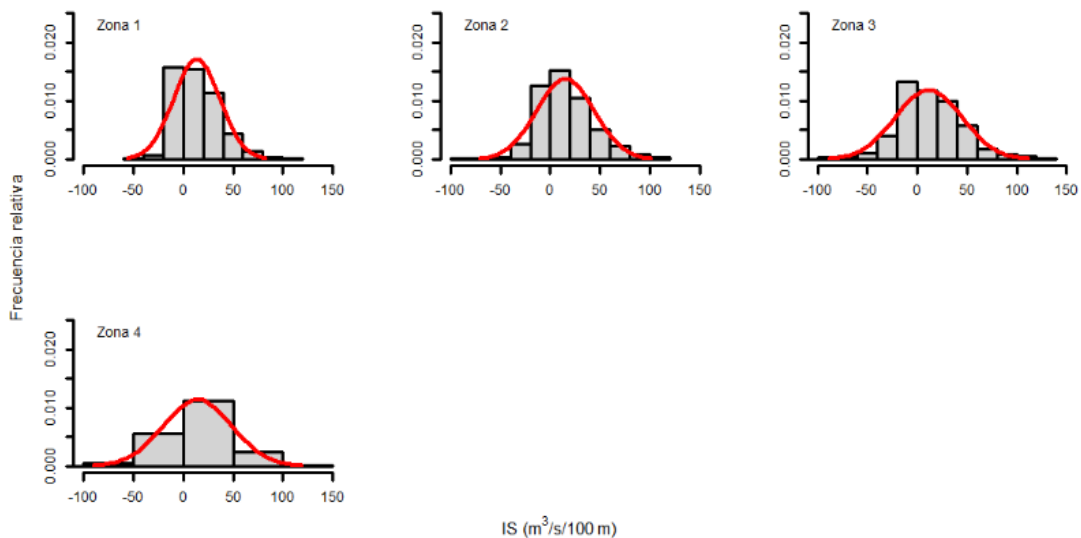


Figura 26. Distribución de frecuencia relativa del índice de surgencia (*IS*) por zona de pesca durante 1988-2021 en el sur del golfo de California. En rojo la curva de la distribución normal.

Debido a que no se cumplió el supuesto de normalidad, para realizar una comparación no paramétrica de los datos del *IS* por zona de pesca se aplicó una prueba de rangos de Kruskal Wallis a un nivel de significancia de 0.05. El resultado de la prueba indicó que no existen diferencias estadísticamente significativas entre

los datos del *IS* por zona de pesca en el periodo de 1988-2021 en el sur del golfo de California ($H=3.6171$, $p>0.05$). Todas las zonas de pesca presentaron una variabilidad similar y se diferenciaron por los máximos y mínimos, siendo la zona de pesca 3 la que presentó el valor máximo y mínimo del *IS* de los cuatro conjuntos de datos (136.386 y -136.85 $\text{m}^3/\text{s}/100 \text{ m}$ respectivamente), los cuales se presentan como outliers. Los outliers, cuya traducción del inglés es *datos atípicos*, son datos que se encuentran 1.5 veces por encima o por debajo de los límites del rango intercuartílico (RIQ) (**Figura 27**).

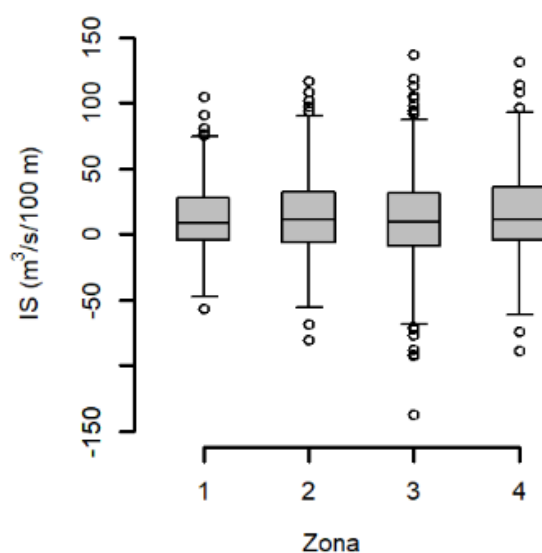


Figura 27. Diagrama de cajas con bigote del índice de surgencia (*IS*) por zona de pesca durante 1988-2021 en el sur del golfo de California. En gris el rango intercuartílico. La línea horizontal en negro representa la mediana. Las barras de error representan el mínimo (límite inferior de 1.5 veces el rango intercuartílico) y el máximo (límite superior de 1.5 veces el rango intercuartílico) y los marcadores son los outliers.

Con respecto al comportamiento del *IS* por zonas de pesca por cada mes del año, se encontró que estos mostraron una oscilación con datos del *IS* positivos en los meses de invierno-primavera, nulos en verano y negativos en meses de otoño (**Figura 28**). Además, estos tampoco presentaron distribución normal durante

ningún mes (**Tabla IX**). En respuesta a lo anterior, para establecer si el *IS* es diferente entre zonas de pesca en cada mes, se aplicó una prueba de Kruskal Wallis a un nivel de significancia de 0.05 la cual resultó estadísticamente significativa únicamente en los meses de mayo ($H=11.467$, $p<0.05$) y junio ($H=23.733$, $p<0.05$). La prueba a *post hoc* de Dunn indicó diferencias estadísticamente significativas entre las zonas de pesca 3 y 4 en mayo. Sin embargo, dado que el *p*-valor de algunas comparaciones (zonas de pesca 1-3 y 2-4) estuvo muy cercano al nivel de significancia, se optó por ajustar el *p*-valor de cada comparación utilizando el método de Benjamini Hochberg (BH). Este método es más potente que el método de Bonferroni (el cual es más utilizado) y se diferencian porque BH minimiza la tasa de error tipo I (falso positivo) controlando la tasa de falso negativo (Jafari y Ansari-Pour, 2019). Por otra parte, durante el mes de junio las zonas de pesca 1-3, 2-4 y 3-4 fueron estadísticamente diferentes y también se aplicó la corrección de *p*-valor de BH (**Tabla X**).

Tabla IX. Resultados de las pruebas de normalidad al índice de surgencia (*IS*) para cada zona de pesca, mensual, durante 1988-2021 en el sur del golfo de California.

		Zonas de pesca			
		1	2	3	4
Ene	<i>D</i>	0.14301	0.2028	0.17739	0.093831
	<i>p</i>	0.0756	0.0011	0.0082	0.6285
Feb	<i>D</i>	0.12129	0.15903	0.14521	0.11489
	<i>p</i>	0.2317	0.0290	0.0668	0.306
Mar	<i>D</i>	0.13437	0.15007	0.12405	0.082762
	<i>p</i>	0.1238	0.0490	0.2041	0.8029
Abr	<i>D</i>	0.23492	0.21641	0.18182	0.10342
	<i>p</i>	0.0005	0.0003	0.0059	0.4711
May	<i>D</i>	0.19999	0.18734	0.18811	0.14225
	<i>p</i>	0.0013	0.0003	0.0036	0.0788
Jun	<i>D</i>	0.16505	0.14146	0.20487	0.22073
	<i>p</i>	0.0195	0.0823	0.0009	0.0002
Jul	<i>D</i>	0.12622	0.10855	0.17515	0.16613
	<i>p</i>	0.1843	0.3929	0.0097	0.0182
Ago	<i>D</i>	0.15837	0.15498	0.14642	0.18519
	<i>p</i>	0.0302	0.03744	0.0623	0.0045
Sep	<i>D</i>	0.19006	0.19175	0.1833	0.27723
	<i>p</i>	0.0031	0.0027	0.0052	0.0000
Oct	<i>D</i>	0.12891	0.26694	0.18674	0.19231
	<i>p</i>	0.1620	0.0000	0.0040	0.0026
Nov	<i>D</i>	0.13522	0.15104	0.14993	0.076864
	<i>p</i>	0.1187	0.0475	0.0508	0.8779
Dic	<i>D</i>	0.15032	0.1151	0.18782	0.17198
	<i>p</i>	0.0496	0.3033	0.0037	0.0121

D: estadístico; *p*: *p*-valor; En negritas la probabilidad que indica datos no normales.

Tabla X. Resultados de las pruebas de comparaciones múltiples no paramétrica del índice de surgencia (*IS*) por zona de pesca por mes durante 1988-2021 en el sur del golfo de California.

		Comparaciones (zonas de pesca)					
		1-2	1-3	2-3	1-4	2-4	3-4
May	<i>z</i>	0.5140	2.0897	1.5757	-1.2495	-1.7634	-3.3392
	<i>p</i> ¹	0.6073	0.0366	0.1151	0.2115	0.0778	0.0008
	<i>p</i> ²	0.6073	0.1099	0.1726	0.2538	0.1557	0.0050
Jun	<i>z</i>	1.7327	2.3174	0.5847	-1.9081	-3.6408	-4.2255
	<i>p</i> ¹	0.0832	0.0205	0.5587	0.0564	0.0003	0.0000
	<i>p</i> ²	0.0998	0.0410	0.5587	0.0846	0.0008	0.0001

z: estadístico; *p*¹: *p*-valor sin ajustar; *p*²: *p*-valor ajustado. En negritas la probabilidad de las comparaciones estadísticamente significativas

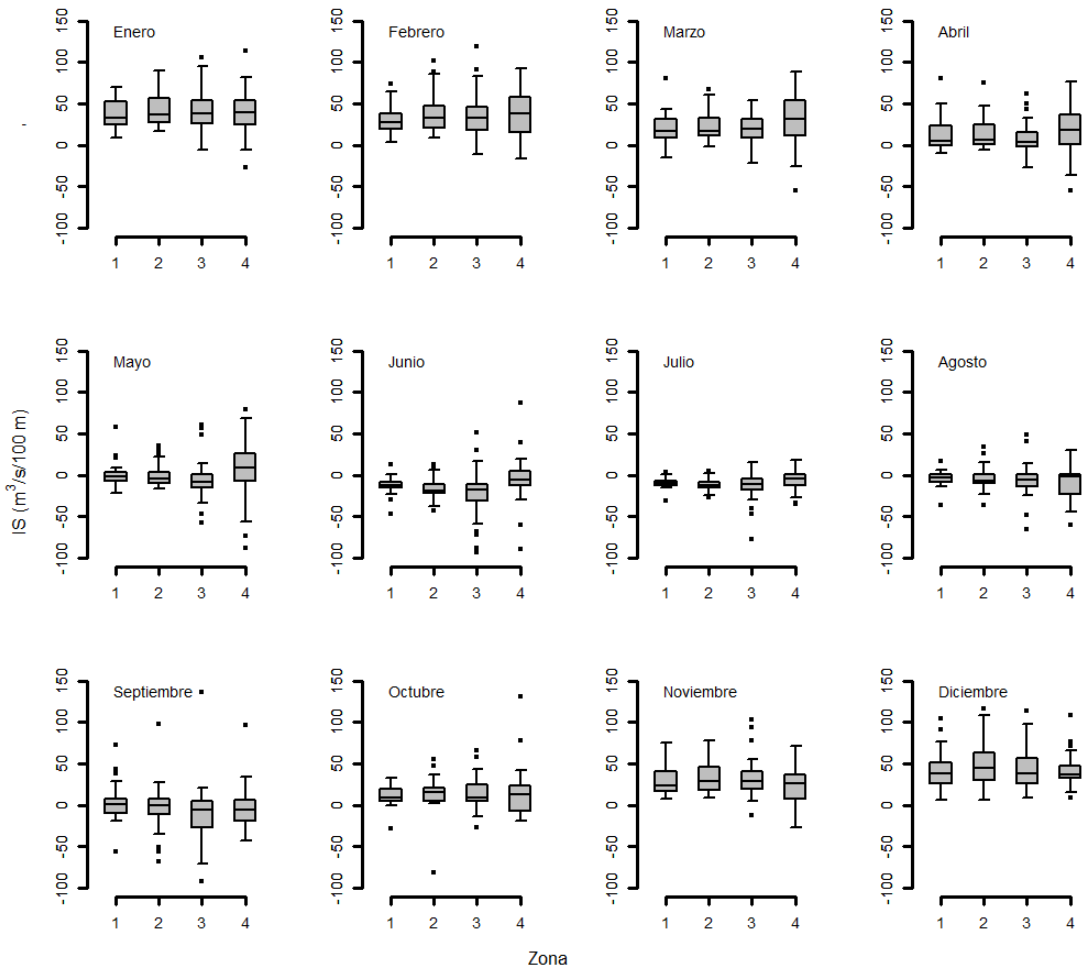


Figura 28. Diagrama de cajas con bigote del índice de surgencia (*IS*) por zona de pesca por mes durante 1988-2021 en el sur del golfo de California. En gris el rango intercuartílico. La línea horizontal en negro representa la mediana. Las barras de error representan el mínimo (límite inferior de 1.5 veces el rango intercuartílico) y el máximo (límite superior de 1.5 veces el rango intercuartílico) y los marcadores son los outliers.

8. 4. 2. Índice de turbulencia

Al igual que los datos del *IS*, el *IT* por zona de pesca tampoco presentó distribución normal (zona 1: $D=0.10956$, $p<0.05$; zona 2: $D=0.10832$, $p<0.05$; zona 3: $D=0.12617$, $p<0.05$; zona 4: $D=0.095879$, $p<0.05$ y zona 5: $D=0.054219$, $p<0.05$). La distribución de frecuencia relativa de estos datos también presentó un sesgo hacia los valores cercanos a 0 del índice en las zonas de pesca 1 a 4, mientras que en la zona de pesca 5 visualmente se percibe que la distribución normal se ajusta a los datos (**Figura 29**). Sin embargo, el valor de probabilidad de la prueba de normalidad a los datos del *IT* de la zona de pesca 5 ($p=0.0059$) es significativo, razón por la cual se rechazó la hipótesis nula de que estos datos tienen distribución normal con la certeza de que no se está cometiendo error tipo I.

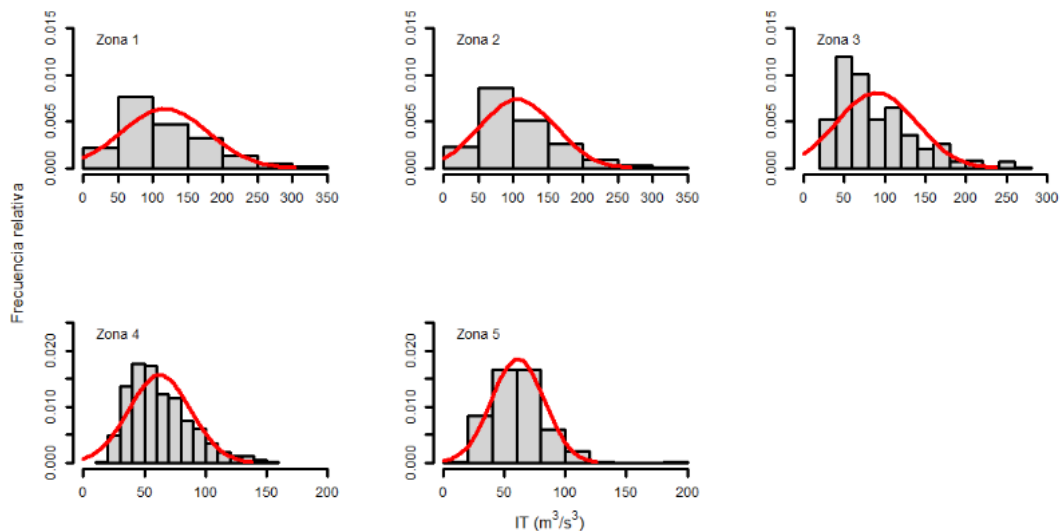


Figura 29. Distribución de frecuencia relativa del índice de turbulencia (*IT*) por zona de pesca durante 1988-2021 en el sur del golfo de California. En rojo la curva de la distribución normal.

La prueba de hipótesis no paramétrica aplicada a los datos del *IT* por zona de pesca fue significativa ($H=400.77$, $p<0.05$) indicando la existencia de diferencias

estadísticamente significativas en el *IT* de por lo menos un par de zonas de pesca durante 1988-2021. Así, la prueba *post hoc* de Dunn arrojó como resultado que las zonas de pesca 1 y 2 así como las zonas de pesca 4 y 5 son estadísticamente iguales (1-2: $z=1.406956$, $p>0.05$ y 4-5: $z=0.229342$, $p>0.05$). La comparación de las zonas de pesca 1-3, 2-3, 1-4, 2-4, 3-4, 1-5, 2-5, 3-5 fue significativa en todos los casos ($p<0.05$) lo que sugiere un comportamiento histórico diferente en el *IT* de dichas zonas de pesca. No se utilizó ningún método de ajuste del p -valor en las comparaciones múltiples dado que los valores del mismo sin ajustar resultaron muy por encima de nivel de significancia en las comparaciones no significativas ($p>0.1$) y muy por debajo del nivel de significancia en las comparaciones significativas ($p<0.001$).

Las zonas de pesca presentaron distintos grados de variabilidad la cual mostró una tendencia a disminuir en un gradiente de norte a sur (zona de pesca 1 a zona de pesca 5). La zona de pesca 1 presentó el mayor RIQ ($84.9 \text{ m}^3/\text{s}^3$) mientras que la zona de pesca 5 fue la que tuvo la menor variabilidad del *IT* ($27.93 \text{ m}^3/\text{s}^3$). Todas las zonas de pesca presentaron valores mínimos similares ($\sim 23 \text{ m}^3/\text{s}^3$) y se diferenciaron en los valores máximos (zona 1; $339.60 \text{ m}^3/\text{s}^3$, zona 2; $310.20 \text{ m}^3/\text{s}^3$, zona 3; $265.52 \text{ m}^3/\text{s}^3$, zona 4; $150.48 \text{ m}^3/\text{s}^3$ y zona 5; 191.51) los cuales disminuyen en forma escalonada de norte a sur y fueron todos considerados como outliers (**Figura 30**).

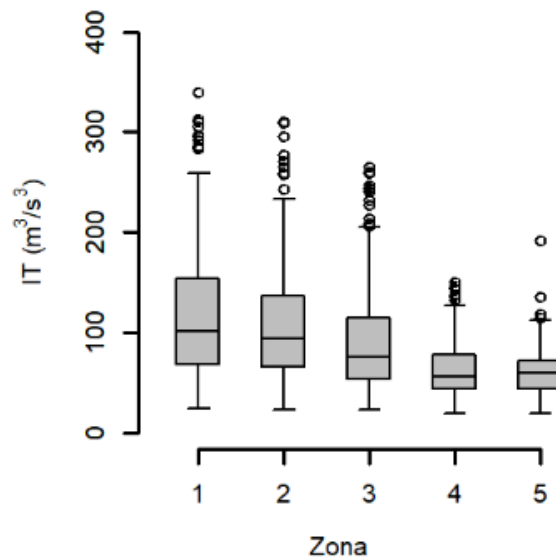


Figura 30. Diagrama de cajas con bigote del índice de turbulencia (IT) por zona de pesca durante 1988-2021 en el sur del golfo de California. En gris el rango intercuartílico. La línea horizontal en negro representa la mediana. Las barras de error representan el mínimo (límite inferior de 1.5 veces el rango intercuartílico) y el máximo (límite superior de 1.5 veces el rango intercuartílico) y los marcadores son los outliers.

Los datos del IT por zonas de pesca mostraron un patrón similar al de los datos agrupados, diferenciándose en los meses cálidos donde se observa similitud en la variabilidad, la cual es homogénea (**Figura 31**). Durante los meses de febrero, abril, mayo, junio agosto, septiembre y diciembre los datos del IT por zonas de pesca tampoco presentaron distribución normal, mientras que los datos de los meses de enero, marzo, julio, octubre y noviembre si cumplieron con el supuesto de normalidad (**Tabla XI**). Sin embargo, de acuerdo con los resultados de la prueba de Bartlett, los datos del IT por zona de pesca en estos meses no fueron homocedásticos (**Tabla XII**). Así, se aplicaron pruebas no paramétricas para comparar el IT de cada zona de pesca durante todos los meses. Las pruebas resultaron estadísticamente significativas en la mayoría de los meses (enero: $H=99.356$, $p<0.05$; febrero: $H=90.819$, $p<0.05$; marzo: $H=72.359$, $p<0.05$; abril: $H=59.774$, $p<0.05$; mayo: $H=88.013$, $p<0.05$; junio: $H=113.55$, $p<0.05$; julio: $H=86.418$, $p<0.05$; octubre: $H=43.038$, $p<0.05$; noviembre: $H=93.814$, $p<0.05$ y

diciembre: $H=109$, $p<0.05$ respectivamente), con excepción de agosto y septiembre donde no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre zonas de pesca (agosto: $H=6.9045$, $p>0.05$ y septiembre: $H=3.76$, $p>0.05$ respectivamente). Los resultados de las pruebas a *post hoc* de Dunn con corrección de p -valor de BH de cada mes muestran un patrón claro. Durante todo el año, el *IT* es estadísticamente igual en las zonas de pesca 1-2 y 4-5. Por otro lado, las comparaciones de las zonas de pesca 1-3, 1-4, 2-4, 3-4, 1-5, 2-5, 3-5 y 4-5 fueron estadísticamente diferentes de enero a marzo. De abril a julio se suma a las comparaciones estadísticamente diferentes la correspondiente a las zonas de pesca 2-3 y cambia para las zonas de pesca 3-5 que no presentaron diferencias estadísticamente significativas durante dicho mes. De octubre a diciembre el patrón de inicios de año se repite con la excepción de la comparación de las zonas de pesca 3-5 en el mes de octubre cuyo p -valor no es sugestivo de diferencias estadísticamente significativas (**Tabla XIII**).

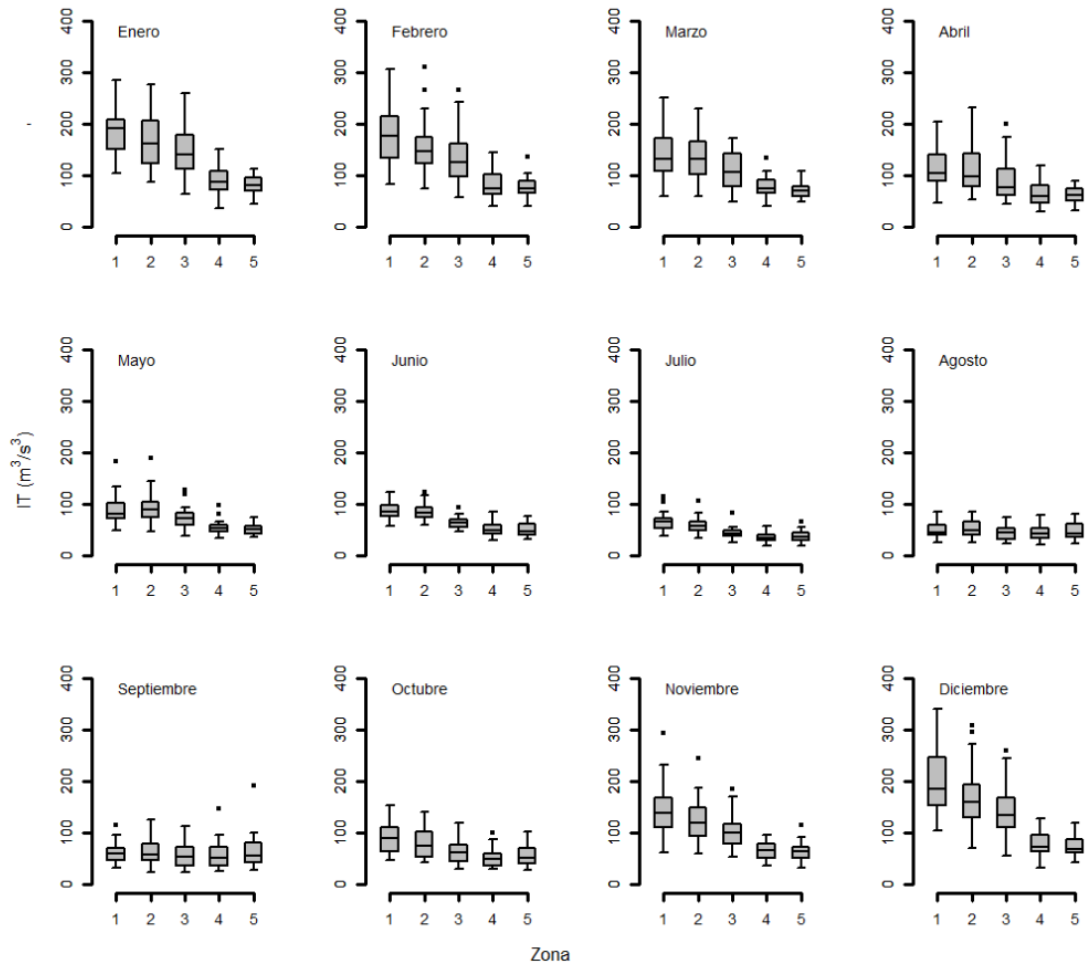


Figura 31. Diagrama de cajas con bigote del índice de turbulencia (IT) por zona de pesca por mes durante 1988-2021 en el sur del golfo de California. En gris el rango intercuartílico. La línea horizontal en negro representa la mediana. Las barras de error representan el mínimo (límite inferior de 1.5 veces el rango intercuartílico) y el máximo (límite superior de 1.5 veces el rango intercuartílico) y los marcadores son los outliers.

Tabla XI. Resultados de las pruebas de normalidad del índice de turbulencia (*IT*) para cada zona de pesca, mensual, durante 1988-2021 en el sur del golfo de California.

		Zonas de pesca				
		1	2	3	4	5
Ene	<i>D</i>	0.085686	0.097967	0.1028	0.10276	0.084757
	<i>p</i>	0.7605	0.5597	0.4810	0.4816	0.7747
Feb	<i>D</i>	0.090541	0.11874	0.12895	0.16131	0.11888
	<i>p</i>	0.683	0.2596	0.1616	0.02507	0.2579
Mar	<i>D</i>	0.11241	0.088453	0.094197	0.069219	0.13623
	<i>p</i>	0.3385	0.7169	0.6224	0.9479	0.1128
Abr	<i>D</i>	0.13439	0.16807	0.17206	0.12886	0.071416
	<i>p</i>	0.1237	0.01596	0.01209	0.1623	0.9311
May	<i>D</i>	0.18076	0.14922	0.1237	0.13179	0.11053
	<i>p</i>	0.0064	0.0530	0.2075	0.1407	0.3644
Jun	<i>D</i>	0.12782	0.093769	0.10285	0.13432	0.14708
	<i>p</i>	0.1707	0.6295	0.4802	0.1241	0.0060
Jul	<i>D</i>	0.13045	0.11603	0.13801	0.079766	0.089959
	<i>p</i>	0.1503	0.2917	0.0992	0.8431	0.6925
Ago	<i>D</i>	0.19352	0.11287	0.095554	0.10142	0.1718
	<i>p</i>	0.0024	0.3323	0.5998	0.5031	0.0123
Sep	<i>D</i>	0.092726	0.13348	0.18685	0.16414	0.17292
	<i>p</i>	0.6469	0.1294	0.0040	0.0208	0.01137
Oct	<i>D</i>	0.10904	0.11747	0.11235	0.12078	0.12983
	<i>p</i>	0.3858	0.2743	0.3393	0.2371	0.1548
Nov	<i>D</i>	0.12606	0.098695	0.11359	0.14841	0.093776
	<i>p</i>	0.1857	0.5476	0.3228	0.0555	0.6294
Dic	<i>D</i>	0.14121	0.14857	0.1447	0.15034	0.16083
	<i>p</i>	0.0835	0.0550	0.0687	0.0496	0.0258

D: estadístico; *p*: *p*-valor; En negritas la probabilidad que indica datos no normales.

Tabla XII. Resultados de las pruebas de homocedasticidad al índice de turbulencia (*IT*) para todas las zonas de pesca, mensual, durante 1988-2021 en el sur del golfo de California.

Mes	<i>B</i>	<i>p</i> -valor
Enero	47.372	0.0000
Febrero	44.403	0.0000
Marzo	51.934	0.0000
Abril	42.802	0.0000
Mayo	46.072	0.0000
Junio	6.0428	0.1960
Julio	20.895	0.0003
Agosto	1.4226	0.8403
Septiembre	8.2291	0.0835
Octubre	11.326	0.0231
Noviembre	57.33	0.0000
Diciembre	66.828	0.0000

B: estadístico de prueba. En negritas la probabilidad que indica datos no homocedásticos.

Tabla XIII. Resultados de las pruebas de comparaciones múltiples no paramétrica del índice de turbulencia (*IT*) por zona de pesca por mes durante 1988-2021 en el sur del golfo de California.

		Comparación (zonas de pesca)									
		1-2	1-3	2-3	1-4	2-4	3-4	1-5	2-5	3-5	4-5
Ene	<i>z</i>	1.3206	2.2470	0.9264	6.9973	5.6767	4.7503	7.8646	6.5440	5.6176	0.8673
	<i>p</i> ¹	0.1866	0.0246	0.3542	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.3858
	<i>p</i> ²	0.2333	0.0352	0.3936	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.3858
Feb	<i>z</i>	1.2295	2.6043	1.3748	6.7953	5.5658	4.1910	7.5542	6.3247	4.9499	0.7589
	<i>p</i> ¹	0.2189	0.0092	0.1692	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.4479
	<i>p</i> ²	0.2432	0.0132	0.2115	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.4479
Mar	<i>z</i>	0.5223	2.2051	1.6828	5.7703	5.2480	3.5652	6.5686	6.0463	4.3635	0.7983
	<i>p</i> ¹	0.6014	0.0274	0.0924	0.0000	0.0000	0.0004	0.0000	0.0000	0.0000	0.4247
	<i>p</i> ²	0.6014	0.0392	0.1155	0.0000	0.0000	0.0006	0.0000	0.0000	0.0000	0.4719
Abr	<i>z</i>	0.6184	2.6881	2.0696	5.5683	4.9499	2.8802	5.9206	5.3022	3.2326	0.3523
	<i>p</i> ¹	0.5363	0.0072	0.0385	0.0000	0.0000	0.0040	0.0000	0.0000	0.0012	0.7246
	<i>p</i> ²	0.5959	0.0103	0.0481	0.0000	0.0000	0.0066	0.0000	0.0000	0.0025	0.7246
May	<i>z</i>	-0.5297	2.1633	2.6930	5.9674	6.4972	3.8042	6.6277	7.1575	4.4645	0.6603
	<i>p</i> ¹	0.5963	0.0305	0.0071	0.0000	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.5091
	<i>p</i> ²	0.5963	0.0382	0.0101	0.0000	0.0000	0.0002	0.0000	0.0000	0.0000	0.5656
Jun	<i>z</i>	0.3277	4.6468	4.3191	7.5147	7.1870	2.8679	7.8129	7.4852	3.1660	0.2981
	<i>p</i> ¹	0.7431	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0041	0.0000	0.0000	0.0015	0.7656
	<i>p</i> ²	0.8257	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0052	0.0000	0.0000	0.0022	0.7656
Jul	<i>z</i>	1.2911	5.0854	3.7943	7.3176	6.0266	2.2322	6.7805	5.4895	1.6951	-0.5371
	<i>p</i> ¹	0.1967	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000	0.0256	0.0000	0.0000	0.0901	0.5912
	<i>p</i> ²	0.2185	0.0000	0.0002	0.0000	0.0000	0.0366	0.0000	0.0000	0.1126	0.5912
Oct	<i>z</i>	0.9535	2.9665	2.0130	5.4377	4.4842	2.4712	4.6123	3.6588	1.6458	-0.8254
	<i>p</i> ¹	0.3403	0.0030	0.0441	0.0000	0.0000	0.0135	0.0000	0.0003	0.0998	0.4092
	<i>p</i> ²	0.3781	0.0060	0.0630	0.0000	0.0000	0.0224	0.0000	0.0006	0.1247	0.4092
Nov	<i>z</i>	1.0619	2.6314	1.5695	7.2092	6.1473	4.5778	7.2807	6.2187	4.6493	0.0715
	<i>p</i> ¹	0.2883	0.0085	0.1165	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.9430
	<i>p</i> ²	0.3203	0.0121	0.1457	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.9430
Dic	<i>z</i>	1.3798	2.6585	1.2787	7.6010	6.2212	4.9425	8.1085	6.7288	5.4500	0.5076
	<i>p</i> ¹	0.1677	0.0078	0.2010	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.6118
	<i>p</i> ²	0.2096	0.0112	0.2233	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.6118

z: estadístico; *p*¹: *p*-valor sin ajustar; *p*²: *p*-valor ajustado. En negritas la probabilidad de las comparaciones estadísticamente significativas.

8. 4. 3. Temperatura superficial del mar

La *TSM* no mostró distribución normal en ninguna de las zonas de pesca (zona 1: $D=0.12475$, $p<0.05$; zona 2: $D=0.12647$, $p<0.05$; zona 3: $D=0.12243$, $p<0.05$; zona 4: $D=0.12736$, $p<0.05$ y zona 5: $D=0.12036$, $p<0.05$). Estos datos presentaron una distribución de frecuencia relativa particular la cual fue bimodal en todas las zonas de pesca, pero estuvo más marcada en las zonas de pesca 1 a 3. Por su parte, en las zonas de pesca 4 y 5 la distribución de frecuencia relativa estuvo ligeramente sesgada hacia valores más altos de *TSM*. Además, en todas las zonas de pesca, la clase de *TSM* con mayor frecuencia relativa fue la clase de 29-30 °C (**Figura 32**).

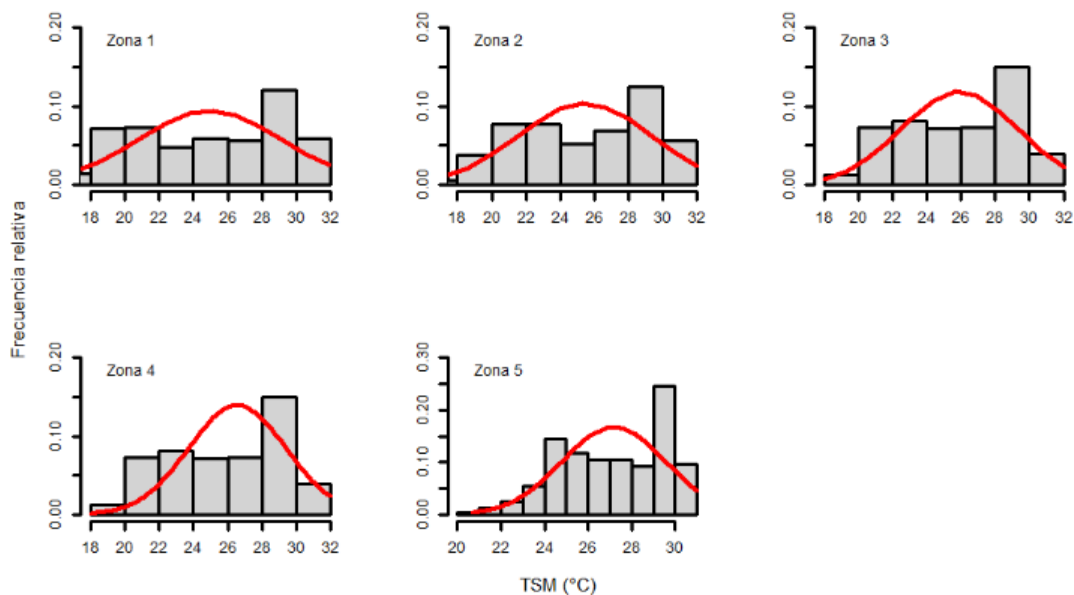


Figura 32. Distribución de frecuencia relativa de la temperatura superficial del mar (*TSM*) por zona de pesca durante 2002-2021 en el sur del golfo de California. En rojo la curva de la distribución normal.

Al igual que con las variables anteriores, como los datos de *TSM* por zonas de pesca no cumplieron los supuestos básicos se procedió a realizar una prueba de hipótesis de rangos de Kruskal Wallis a un nivel de significancia de 0.05 la cual fue

significativa ($H=41.225$, $p<0.05$). Esto sugirió diferencias estadísticas en la *TSM* de por lo menos un par de zonas de pesca durante 2002-2021. Aplicando la prueba de comparaciones múltiples de Dunn se encontró que 5 de las 10 comparaciones no fueron significativas ($p>0.05$ sin ajustar). Sin embargo, dado que el p -valor de algunas comparaciones (zonas de pesca 1-3, 3-4 y 4-5) estuvo muy cerca del nivel de significancia, se optó por ajustar el p -valor de cada comparación utilizando el método de BH. Así, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre la *TSM* de las zonas de pesca si la mediana de cada zona se compara con la de la zona contigua: 1-2 ($z=1.047727$, $p>0.05$), 2-3 ($z=-0.846479$, $p>0.05$), 3-4 ($z=-1.869050$, $p>0.05$) y 4-5 ($z=-1.944913$, $p>0.05$). Un caso especial a esta conclusión es la comparación de la *TSM* mediana de las zonas de pesca 1-3 ($z=-1.894206$), en donde el p -valor sin ajustar (0.0581) y ajustado (0.0831) lleva a no rechazar la hipótesis nula, lo cual debe hacerse con cautela. Lo mismo que en las comparaciones de la *TSM* mediana de las zonas de pesca 3-4 y 4-5, cuyos p -valor sin ajustar (0.0616 y 0.0517 respectivamente) y ajustado (0.0770 y 0.0836 respectivamente) siguen siendo cercanos al nivel de significancia fijado en la prueba ($\alpha=0.05$). Por otro lado, la comparación de las medianas de *TSM* de las zonas de pesca no contiguas indica que la *TSM* es estadísticamente diferente en las zonas de pesca 1-4 ($z=-3.763256$, $p<0.05$), 2-4 ($z=-2.715529$, $p<0.05$), 1-5 ($z=-5.708168$, $p<0.05$), 2-5 ($z=-4.660442$, $p<0.05$) y 3-5 ($z=-3.813963$, $p<0.05$) sin haber indicios de falsos positivos.

Con respecto a la variabilidad presentada en la *TSM* de las diferentes zonas de pesca, se encontró un marcado gradiente de sur a norte, es decir, la variabilidad en la *TSM* es mayor conforme se avanza en latitud. La zona de pesca 5 tuvo el menor RIQ (4.43 °C) mientras que la mayor variabilidad respecto a la mediana se encontró en la zona de pesca 1 (8.13° C). Todas las zonas de pesca presentaron valores máximos similares (>30 °C) diferenciándose en los valores mínimos (zona 1; 16.66 °C, zona 2; 17.24 °C, zona 3; 18.21 °C, zona 4; 19.40 °C, zona 5; 20.68 °C) los

cuales disminuyen en forma escalonada de sur a norte. Esta variable no presentó outliers (**Figura 33**).

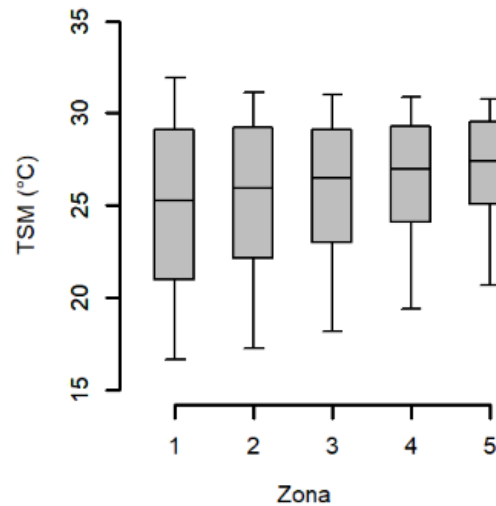


Figura 33. Diagrama de cajas con bigote de la temperatura superficial del mar (*TSM*) por zona de pesca durante 2002-2021 en el sur del golfo de California. En gris el rango intercuartílico. La línea horizontal en negro representa la mediana. Las barras de error representan el mínimo (límite inferior de 1.5 veces el rango intercuartílico) y el máximo (límite superior de 1.5 veces el rango intercuartílico).

La *TSM* por zonas de pesca por mes muestra un patrón de disminución y ascenso en las distintas zonas de pesca a través del tiempo (**Figura 34**). Esta presentó un comportamiento variable en cuanto al ajuste de la distribución normal a los datos, tal que durante los meses febrero, marzo, abril, mayo, julio, agosto, septiembre y octubre esta presentó distribución normal en todas las zonas de pesca. Solo en los meses de enero, junio, noviembre y diciembre no todos los datos de *TSM* por zona de pesca fueron normales (**Tabla XIV**). De esta manera, para comparar la *TSM* por zonas de pesca en cada mes, de los datos que no tuvieron distribución normal, se aplicó la alternativa no paramétrica (Kruskal Wallis a un nivel de significancia de 0.05). A los datos que fueron normales se les realizó la prueba de homocedasticidad de datos de Bartlett, la cual resultó no significativa para todos los meses. Esto sugiere que las varianzas de la *TSM* de todas las zonas de pesca, en cada uno de

los diferentes meses del año, son estadísticamente iguales (**Tabla XV**). La comparación de los datos de *TSM* por zonas de pesca en los meses en los cuales se cumplió con normalidad y homocedasticidad de datos se hizo con un ANOVA de una vía.

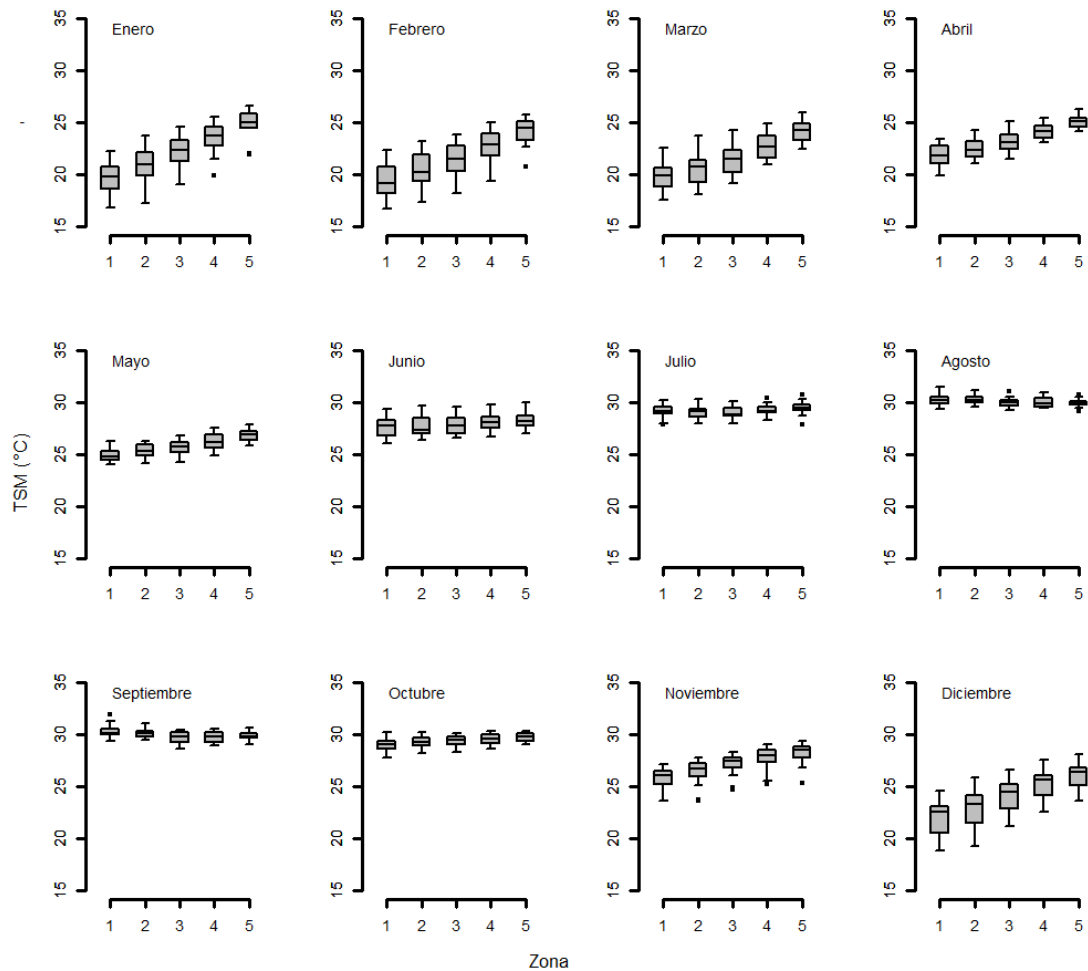


Figura 34. Diagrama de cajas con bigote de la temperatura superficial del mar (*TSM*) por zona de pesca por mes durante 2002-2021 en el sur del golfo de California. En gris el rango intercuartílico. La línea horizontal en negro representa la mediana. Las barras de error representan el mínimo (límite inferior de 1.5 veces el rango intercuartílico) y el máximo (límite superior de 1.5 veces el rango intercuartílico) y los marcadores son los outliers.

Tabla XIV. Resultados de las pruebas de normalidad a la temperatura superficial del mar (*TSM*) para cada zona de pesca, mensual, durante 2002-2021 en el sur del golfo de California.

		Zonas de pesca				
		1	2	3	4	5
Ene	<i>D</i>	0.11823	0.10983	0.09503	0.1350	0.25351
	<i>p</i>	0.6558	0.7613	0.9070	0.4424	0.0015
Feb	<i>D</i>	0.12742	0.16733	0.13811	0.16231	0.14523
	<i>p</i>	0.5369	0.1501	0.4056	0.1814	0.3275
Mar	<i>D</i>	0.13574	0.11829	0.094278	0.17446	0.085497
	<i>p</i>	0.4335	0.6551	0.9126	0.1140	0.9640
Abr	<i>D</i>	0.12762	0.099811	0.10151	0.11441	0.11060
	<i>p</i>	0.5343	0.8669	0.8509	0.7048	0.7521
May	<i>D</i>	0.12329	0.11159	0.11807	0.15553	0.11925
	<i>p</i>	0.5903	0.7399	0.6580	0.2319	0.6427
Jun	<i>D</i>	0.12873	0.22192	0.14417	0.10386	0.95573
	<i>p</i>	0.5202	0.01095	0.3385	0.8273	0.9028
Jul	<i>D</i>	0.13713	0.11073	0.19081	0.14173	0.1477
	<i>p</i>	0.4171	0.7505	0.05458	0.3647	0.3026
Ago	<i>D</i>	0.08851	0.08382	0.15729	0.17056	0.14466
	<i>p</i>	0.9475	0.9709	0.2179	0.1326	0.3334
Sep	<i>D</i>	0.13639	0.10982	0.13442	0.17065	0.18745
	<i>p</i>	0.4258	0.7615	0.4494	0.1322	0.0637
Oct	<i>D</i>	0.09744	0.10327	0.16298	0.13479	0.15124
	<i>p</i>	0.8877	0.8334	0.1769	0.4449	0.2690
Nov	<i>D</i>	0.19557	0.17628	0.17924	0.13002	0.1882
	<i>p</i>	0.0436	0.1061	0.0917	0.5038	0.2108
Dic	<i>D</i>	0.20315	0.15115	0.18174	0.20641	0.25159
	<i>p</i>	0.02995	0.2699	0.08224	0.02535	0.001774

D: estadístico; *p*: p-valor; En negritas la probabilidad que indica datos no normales.

Tabla XV. Resultados de las pruebas de homocedasticidad a la temperatura superficial del mar (*TSM*) para todas las zonas de pesca, mensual, durante 2002-2021 en el sur del golfo de California.

Mes	<i>B</i>	<i>p</i> -valor
Enero	0.40808	0.9618
Febrero	1.7747	0.7771
Marzo	4.6302	0.3274
Abril	6.8286	0.1453
Mayo	1.0765	0.8980
Junio	0.52715	0.9708
Julio	0.77525	0.9417
Agosto	2.3328	0.6748
Septiembre	4.0916	0.3938
Octubre	3.6474	0.4558
Noviembre	0.9352	0.9195
Diciembre	1.6750	0.7953

B: estadístico de prueba.

La prueba de hipótesis no paramétrica fue estadísticamente significativa en enero ($H=62.827$, $p<0.05$), noviembre ($H=51.248$, $p<0.05$) y diciembre ($H=50.268$, $p<0.05$) mientras que en junio esta no presentó significancia estadística ($H=6.4539$, $p>0.05$). Durante estos tres meses, los pares de zonas de pesca estadísticamente diferentes fueron zonas de pesca no contiguas, mientras que zonas de pesca contiguas fueron estadísticamente iguales en *TSM* (**Tabla XVI**).

Con respecto a las pruebas paramétricas, estas resultaron estadísticamente significativas en febrero ($F=31.45$, $p<0.05$), marzo ($F=32.84$, $p<0.05$), abril ($F=46.25$, $p<0.05$), mayo ($F=26.5$, $p<0.05$), septiembre ($F=4.324$, $p<0.05$) y octubre ($F=4.489$, $p<0.05$) mientras que en julio ($F=2.119$, $p>0.05$) y agosto ($F=1.733$, $p>0.05$) no hubo diferencias estadísticamente significativas en la *TSM* entre zonas de pesca. Los resultados de las pruebas de comparaciones múltiples paramétrica sugieren que durante febrero y marzo la *TSM* es estadísticamente igual en las zonas de pesca 1-2, 2-3 y 4-5 siendo el resto de comparaciones estadísticamente significativas. Durante abril es el mismo patrón, solo agregando a las comparaciones significativas la de las zonas de pesca 4-5. Los resultados de los meses de septiembres son interesantes pues indican que la zona de estudio pasa por un periodo de homogeneidad parcial en la *TSM* pues en septiembre la mayoría de las zonas de pesca son estadísticamente iguales, con excepción de la zona 1-3 y 1-4. En octubre sucede algo similar, solo que las únicas zonas de pesca que presentan *TSM* estadísticamente diferente son las zonas de pesca 1-4 y 1-5 (**Tabla XVII**).

Tabla XVI. Resultados de las pruebas de comparaciones múltiples no paramétrica de la temperatura superficial del mar (*TSM*) por zona de pesca por mes durante 2002-2021 en el sur del golfo de California.

		Comparación (zonas de pesca)									
		1-2	1-3	2-3	1-4	2-4	3-4	1-5	2-5	3-5	4-5
Ene	<i>z</i>	-1.6187	-3.2864	-1.6677	-5.2702	-3.6515	-1.9838	-6.9924	-5.3737	-3.7060	-1.7222
	<i>p</i> ¹	0.1055	0.0010	0.0954	0.0000	0.0003	0.0473	0.0000	0.0000	0.0002	0.0850
	<i>p</i> ²	0.1055	0.0017	0.1060	0.0000	0.0005	0.0675	0.0000	0.0000	0.0005	0.1063
Nov	<i>z</i>	-1.4443	-3.2700	-1.8258	-4.9759	-3.5316	-1.7059	-6.2239	-4.7797	-2.9539	-1.2481
	<i>p</i> ¹	0.1487	0.0011	0.0679	0.0000	0.0004	0.0880	0.0000	0.0000	0.0031	0.2120
	<i>p</i> ²	0.1652	0.0022	0.0970	0.0000	0.0010	0.1100	0.0000	0.0000	0.0052	0.2120
Dic	<i>z</i>	-1.3843	-3.0902	-1.7059	-4.7797	-3.3954	-1.6895	-6.2239	-4.8396	-3.1338	-1.4443
	<i>p</i> ¹	0.1663	0.0020	0.0880	0.0000	0.0007	0.0911	0.0000	0.0000	0.0017	0.1487
	<i>p</i> ²	0.1663	0.0033	0.1258	0.0000	0.0017	0.1139	0.0000	0.0000	0.0035	0.1652

z: estadístico; *p*¹: *p*-valor sin ajustar; *p*²: *p*-valor ajustado. En negritas la probabilidad de las comparaciones estadísticamente significativas.

Tabla XVII. Resultados de las pruebas de comparaciones múltiples paramétrica de la temperatura superficial del mar (*TSM*) por zona de pesca por mes durante 2002-2021 en el sur del golfo de California.

		Comparación (zonas de pesca)									
		1-2	1-3	1-4	1-5	2-3	2-4	2-5	3-4	3-5	4-5
Feb	<i>DM</i>	1.0055	2.1039	3.5026	4.7871	1.0985	2.4972	3.7816	1.3987	2.6832	1.2844
	<i>p</i>	0.2354	0.0003	0.0000	0.0000	0.1614	0.0000	0.0000	0.0366	0.0000	0.0673
Mar	<i>DM</i>	0.7370	1.5714	2.7859	4.2046	0.8344	2.0489	3.4676	1.2145	2.6332	1.4187
	<i>p</i>	0.3866	0.0022	0.0000	0.0000	0.2624	0.0000	0.0000	0.0322	0.0000	0.0075
Abr	<i>DM</i>	0.6252	1.2859	2.2465	3.2156	0.6607	1.6212	2.5904	0.9605	1.9297	0.9691
	<i>p</i>	0.1391	0.0001	0.0000	0.0000	0.1036	0.0000	0.0000	0.0044	0.0000	0.0040
May	<i>DM</i>	0.4246	0.7314	1.3469	1.8928	0.3068	0.9223	1.4682	0.6155	1.1614	0.5459
	<i>p</i>	0.2454	0.0053	0.0000	0.0000	0.5715	0.0002	0.0000	0.0287	0.0000	0.0694
Sep	<i>DM</i>	-0.1425	-0.5254	-0.5218	-0.4077	-0.3829	-0.3793	-0.2652	0.0036	0.1177	0.1141
	<i>p</i>	0.9019	0.0131	0.0140	0.0925	0.1309	0.1374	0.4723	1.0000	0.9489	0.9542
Oct	<i>DM</i>	0.2042	0.3013	0.4861	0.6750	0.0971	0.2819	0.4707	0.1848	0.3737	0.1889
	<i>p</i>	0.7626	0.4141	0.0465	0.0016	0.9803	0.4830	0.0584	0.8225	0.2044	0.8106

DM: diferencia de medias; *p*: *p*-valor. En negritas la probabilidad de las comparaciones estadísticamente significativas.

8. 5. Datos de stock-reclutamiento

Como se mencionó en los métodos, la información sobre el stock reproductor (no. de org.) y reclutas (no. de org.) de la sardina crinuda *O. libertate* en el stock del sur del golfo de California fue proporcionada por el IMIPAS producto de la evaluación de stock realizada hasta 2021. Dicha evaluación se realizó con el método de captura

a la edad descrito en Haddon (2011) definiendo a los reclutas como organismos de edad 0 y reproductores como organismos de edad 1 y mayores. Esta información es anual y abarcó del periodo de 1988 a 2021.

La serie histórica de datos de reclutas y reproductores de *O. libertate* sugiere que de 1988 a 1999 estos mantenían niveles de abundancia muy por debajo de los máximos alcanzados a partir de 2005, con una abundancia mediana de reclutas de 31.09×10^7 org. (RIQ 10.71×10^7 org.) y 34.09×10^7 or.g (RIQ 7.71×10^7 org.) para reproductores, ambos durante el periodo de 1988 a 1999 (**Figura 35**). A partir del año 2000 se observó un aumento tanto en la abundancia de reclutas como de reproductores, siendo esta máxima para los reclutas durante el 2016 (426.29×10^7 org.) con un stock reproductor asociado de 281.57×10^7 org. El máximo en el número de reproductores históricamente se obtuvo durante 2019 (423.86×10^7 org.) con un reclutamiento asociado de 150.31×10^7 org. En cuanto a la tendencia de la serie tanto de reclutas como reproductores esta es oscilatoria a partir del año 2000 con una repetición en los máximos de la abundancia de reclutas con una separación de 10 años (2006 a 2016), mientras que los mínimos se repitieron con una temporalidad de 9 años (2011 a 2019). Para los reproductores los picos de máxima abundancia también se han registrado con una separación de 10 años, aunque ligeramente desfasado con respecto a los máximos en el número de reclutas (2009 a 2019). En cuanto a la mínima abundancia de los reproductores, es posible que, de seguir la serie con la misma tendencia, esta se repita también con una diferencia de 10 años (**Figura 35**).

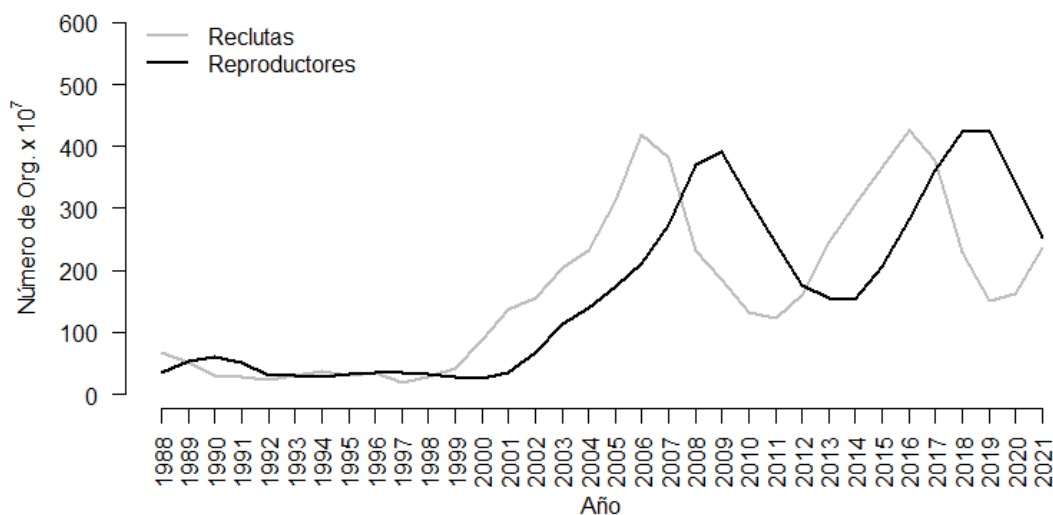


Figura 35. Serie histórica de reclutas y reproductores (no. de org. x 10⁷) de la sardina crinuda *O. libertate* en el stock del sur del golfo de California durante 1988-2021.

8. 6. Marco de datos ambientales

Para poder modelar la respuesta del reclutamiento de *O. libertate* bajo los criterios planteados en la sección 7. 7 de este trabajo, se compilaron 9 marcos de datos, 1 por cada criterio a utilizar en cada GAM (**Anexos 1 a 9**). Como se mencionó, los marcos de datos incluyen la información de las variables ambientales de *IS*, *IT* y *ONI*.

8. 7. Modelos aditivos generalizados (GAM)

8. 7. 1. Distribución observada y teórica del reclutamiento

El análisis exploratorio sobre la variable de respuesta (reclutamiento) previo a los GAM indicó que esta no tuvo problemas de datos atípicos que pudieran dificultar el ajuste de los modelos de regresión. Los datos se encuentran distribuidos entre 18.38 y 426.29 x 10⁷ org. con una mediana de 152.96 x 10⁷ org. (RIQ 214.47 x 10⁷ org.). Con respecto a la distribución de frecuencia de los datos de reclutamiento anual de *O. libertate*, estos presentaron una distribución asimétrica, sesgada hacia valores cercanos a 0 lo cual fue sugestivo de que podría ser aproximada por una

distribución Gamma (**Figura 36**). No fue necesario realizar pruebas de bondad de ajuste pues la asunción de una distribución Gamma encaja bien con las características de la variable de respuesta: es una distribución continua, con dominio de 0 a infinito (aunque no hay datos de reclutamiento 0) y no existen valores negativos.

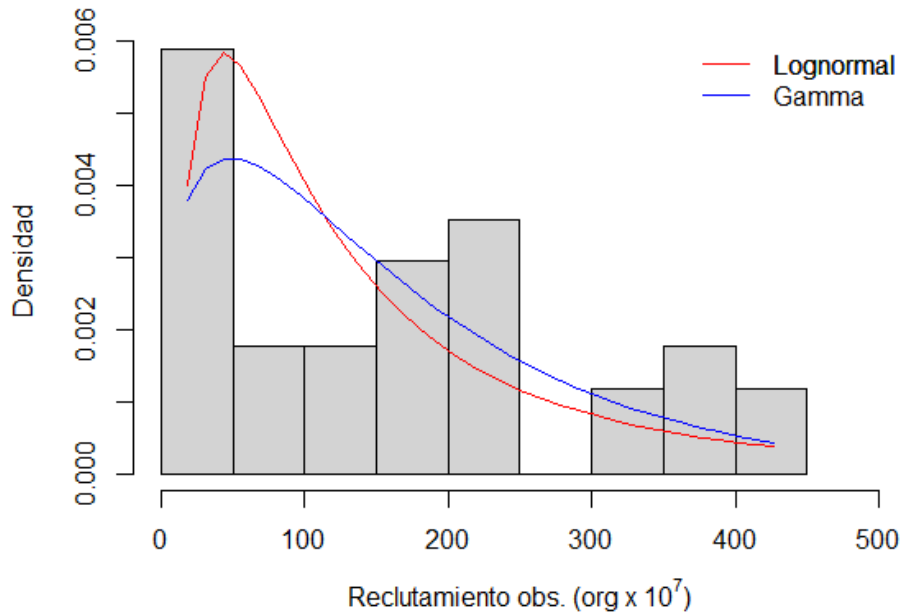


Figura 36. Distribución de frecuencia observada del reclutamiento de la sardina crinuda *O. libertate* en el stock del sur del golfo de California durante 1988-2021.

8. 7. 2. GAM por criterios

Se construyeron 9 GAM, uno por cada uno de los criterios definidos y que cuyas variables predictoras se encuentran compiladas en cada uno de los anexos de este trabajo (**Anexos 1 a 9**). Todos los modelos estuvieron estandarizados en cuanto al supuesto de la distribución de la variable de respuesta al usar la distribución Gamma con función de enlace logarítmico. También, en todos los GAM, en cada término de suavizado se utilizó un tamaño de la base (nodos) de $k=5$ para evitar sobreajuste. Para verificar que el tamaño de la base fuera suficiente este se contrastó por medio del *k-index*. Lo anterior para poder facilitar la comparación de todos los modelos por

medio de AIC. A continuación, se presenta una descripción del desarrollo de cada modelo (cada criterio). Se omite todo el proceso de adición de predictores, centrándose en el modelo seleccionado según cada criterio. El diagnóstico residual y demás aspectos del mejor modelo (GAM seleccionado) se describen a detalle en la siguiente sección.

El proceso de adición de predictores en el GAM correspondiente al criterio con las variables ambientales como la mediana del mes de mayo no llegó más allá del predictor *BR* pues al agregar más predictores el valor del AIC aumentaba. Sin embargo, este modelo explicó el 68.9% de la variabilidad en los datos de reclutamiento, con una relación no lineal entre *R* y *BR* (EDF=2.48) y un valor de $p < 0.001$ en el término de suavizado (**Tabla XVIII**). Por otra parte, el modelo del criterio de datos de mayo a junio mostró una mejora en el desempeño con un aumento sustancial en la devianza explicada (81.9%) con la correspondiente disminución en el AIC (375.0284). Para este modelo fueron tres los predictores del reclutamiento: *BR*, *IT* y *ONI*. Todos los términos suaves fueron significativos con excepción del *ONI* y todos con algún grado de relación no lineal con el reclutamiento (EDF>2). No hubo evidencia estadística de un problema de concurvidad (<0.34) y el tamaño de la base fue suficiente (k-index >1) (**Tabla XVIII**). Los modelos correspondientes a los escenarios de datos ambientales como la mediana de los meses de mayo a julio y mayo a agosto presentaron una disminución en su desempeño pues únicamente fue posible añadir un predictor (*BR*). Esto condujo a que sus métricas fueran las mismas que las del modelo con el criterio de datos como la mediana del mes de mayo pues se trata del mismo modelo ($R \sim \alpha + s(BR) + \varepsilon$) (**Tabla XVIII**). Los modelos de reclutamiento con los criterios de datos como la mediana de los meses de mayo a septiembre, mayo a octubre, mayo a noviembre y mayo a diciembre estuvieron todos compuestos por los mismos predictores (*BR* e *IT*) y que cuyas métricas fueron similares (**Tabla XVIII**). Finalmente, el modelo de reclutamiento con el criterio de datos como la mediana anual fue el que mostró tener el mejor desempeño pues en principio tuvo un aumento sustancial en la devianza

explicada (86.4%) con una disminución en el AIC (367.9887). Para este modelo fueron tres los predictores del reclutamiento: *BR*, *IT* e *IS*. Los términos suaves fueron todos significativos con evidencia de relación no lineal ($EDF > 2$). La concurvidad fue baja (< 0.29), la RMSE fue de 55.1831451×10^7 org. y el coeficiente de correlación de Pearson entre los datos observados y ajustados indica una capacidad predictiva del 90% (Intervalo de confianza al 95%: 0.8114-9462). Así mismo, el tamaño de la base fue suficiente de acuerdo con el k-index (> 1).

Tabla XVIII. Métricas de los GAM realizados con cada criterio ambiental para modelar la respuesta del reclutamiento de *O. libertate* en el sur del golfo de California 1988-2021 ante distintos escenarios.

Criterio	Modelo	EDF	p -valor	Devianza expl. (%)	Concurvidad	k -index.	AIC
M	$R \sim \alpha + s(BR) + \varepsilon$	2.48	<0.001	68.9	-	0.9	380.9303
M-J	$R \sim \alpha + s(BR)$	2.38	<0.001	81.9	0.19	1.14	375.0284
-	+ $s(IT)$	3.07	<0.05	-	0.24	1.48	-
-	+ $s(ONI) + \varepsilon$	3.07	0.23	-	0.33	1.17	-
M-JL	$R \sim \alpha + s(BR) + \varepsilon$	2.48	<0.001	68.9	-	0.9	380.9303
M-A	$R \sim \alpha + s(BR) + \varepsilon$	2.48	<0.001	68.9	-	0.9	380.9303
M-S	$R \sim \alpha + s(BR)$	2.55	<0.001	72.7	0.10	1.02	378.7789
-	+ $s(IT) + \varepsilon$	1.00	0.057	-	0.09	1.05	-
M-O	$R \sim \alpha + s(BR)$	2.571	<0.001	78	0.16	1.17	372.2039
-	+ $s(IT) + \varepsilon$	1.6	<0.01	-	0.11	1.12	-
M-N	$R \sim \alpha + s(BR)$	2.571	<0.001	75.1	0.20	1.07	375.702
-	+ $s(IT) + \varepsilon$	1.28	<0.05	-	0.12	0.88	-
M-D	$R \sim \alpha + s(BR)$	2.72	<0.001	80.2	0.11	1.20	372.0744
-	+ $s(IT) + \varepsilon$	3.26	<0.05	-	0.12	1.03	-
Anual	$R \sim \alpha + s(BR)$	2.61	<0.001	86.4	0.20	1.14	367.9887
-	+ $s(IT)$	3.37	<0.05	-	0.18	1.25	-
-	+ $s(IS) + \varepsilon$	3.8	<0.05	-	0.28	1.06	-

M: mayo; M-J: mayo a junio; M-JL: mayo a julio; M-A: mayo a agosto; M-S: mayo a septiembre; M-O: mayo a octubre; M-N: mayo a noviembre; M-D: mayo a diciembre; EDF: grados de libertad efectivos; AIC: criterio de información de Akaike; R : reclutamiento; BR : reproductores; IS : índice de surgencia; IT : índice de turbulencia; ONI : índice de El Niño oceánico; ε : término de error asociado a un modelo de regresión; α : coeficiente paramétrico. En negritas la devianza explicada y el AIC del modelo con el mejor desempeño (GAM seleccionado).

8. 8. GAM seleccionado

El GAM de reclutamiento anual de la sardina crinuda *O. libertate* para el criterio de datos como la mediana anual fue el que presentó mejor desempeño con respecto al resto de modelos. El GAM seleccionado quedó de la manera siguiente:

$$R \sim \alpha + s(BR, k=5) + s(IT, k=5) + s(IS, k=5) + \varepsilon$$

donde R y BR son el reclutamiento y stock reproductor anual de *O. libertate* (no. de org.) respectivamente, ambos del sur del golfo de California. IT es la mediana anual del índice de turbulencia (m^3/s^3) e IS es la mediana anual del índice de surgencia ($m^3/s/100$ m de línea de costa), ambos para toda la región sur del golfo de California (zonas de pesca en conjunto). Así mismo, k es el tamaño de la base (nodos), α es el coeficiente paramétrico del modelo y ε es un término de error asociado al modelo.

8. 8. 1. Diagnóstico residual

La distribución de los residuales estandarizados (Pearson) del GAM seleccionado es simétrica y aproximadamente centrada en 0 lo que indica que los residuales del modelo son robustos al supuesto de normalidad (**Figura 37a**). Por otro lado, para probar el supuesto de homogeneidad de residuos, estos se graficaron con respecto a los predictores y a los valores ajustados. Los diagramas de dispersión sugieren que la varianza de los residuos es aproximadamente constante (sin un problema aparente de heterocedasticidad residual) (**Figura 37b-e**). La función de autocorrelación sobre los residuales del GAM seleccionado se utilizó para probar el supuesto de independencia. Los resultados indican que los residuales del modelo son independientes pues ninguno de los valores de la función de autocorrelación alcanza el umbral de significancia estadística (**Figura 37f**). En resumen, los residuales del GAM seleccionado cumplen con los tres supuestos estadísticos básicos (son normales, homocedásticos e independientes). Sumado a las métricas del mismo, esto da certeza de qué modelo de reclutamiento seleccionado es razonablemente bueno y estadísticamente válido.

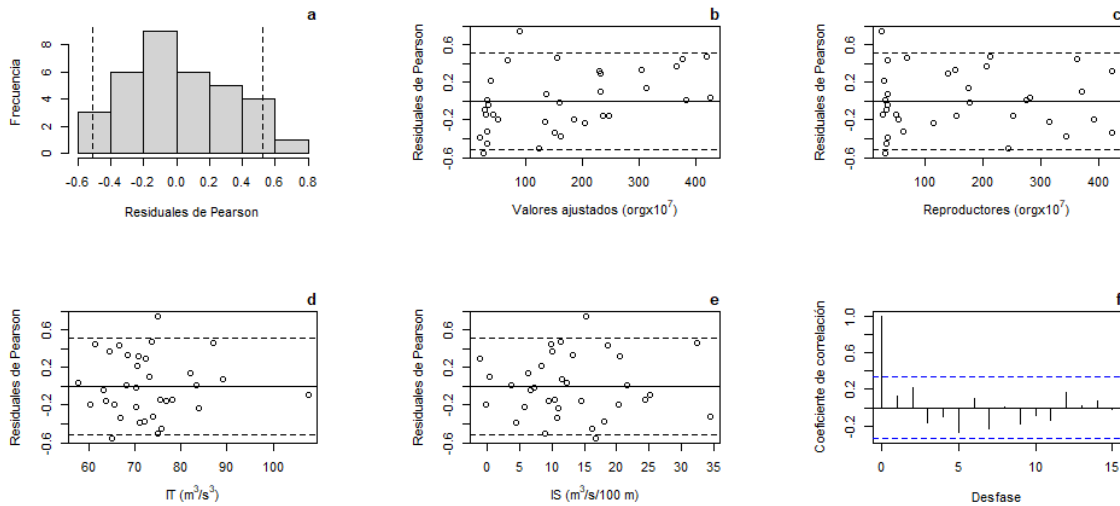


Figura 37. Diagnóstico residual del GAM seleccionado para modelar el reclutamiento anual de la sardina crinuda *O. libertate* en el stock del sur del golfo de California durante 1988-2021. Las líneas punteadas negras representan los percentiles 25 y 97.5. Las líneas punteadas negras representan el umbral de significancia para las correlaciones en la función de autocorrelación.

8. 8. 2. Distribución del reclutamiento observado vs modelo

Como se mencionó, el reclutamiento de *O. libertate* es una variable aleatoria continua estrictamente positiva, con un dominio de 0 a infinito, pero nunca es 0 (**Figura 36**). Esto llevó a que en los modelos aditivos de reclutamiento ajustados se utilizara la distribución Gamma para tratar de predecir el reclutamiento en función de las distintas variables predictoras. De esta manera, se probó si la distribución de los valores del reclutamiento ajustados del GAM seleccionado provenía de la misma distribución teórica asumida para los datos. Así, la prueba de Kolmogorov Smirnov para dos muestras no fue estadísticamente significativa ($D=0.14706$, $p>0.05$) lo que indicó que ambas distribuciones fueron estadísticamente iguales (**Figura 38**).

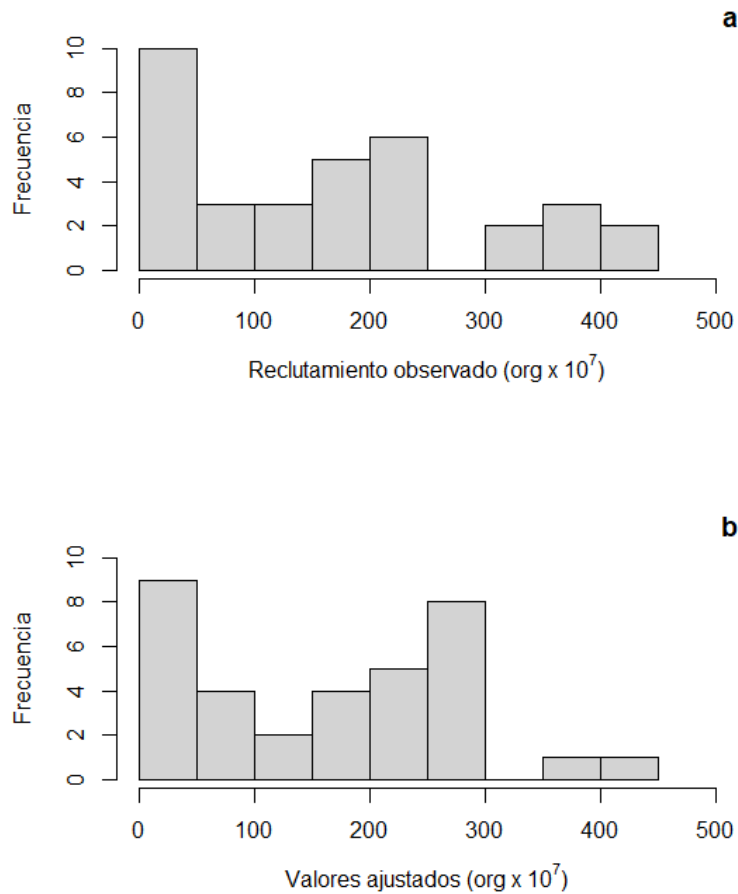


Figura 38. Distribución de frecuencia observada (a) y de los valores ajustados (b) provenientes del GAM seleccionado para modelar reclutamiento de la sardina crinuda *O. libertate* en el stock del sur del golfo de California durante 1988-2021.

8. 8. 3. Correlación del reclutamiento observado vs modelo

Por otro lado, la aplicación de la prueba de correlación lineal de Spearman sobre los datos de reclutamiento observados y ajustados indicó alta correlación lineal positiva entre las dos variables ($\rho=0.9104$, $p<0.05$). El diagrama de dispersión muestra como el reclutamiento observado y su correspondiente valor de reclutamiento ajustado, se alinean razonablemente bien presentando una dispersión mínima (**Figura 39**).

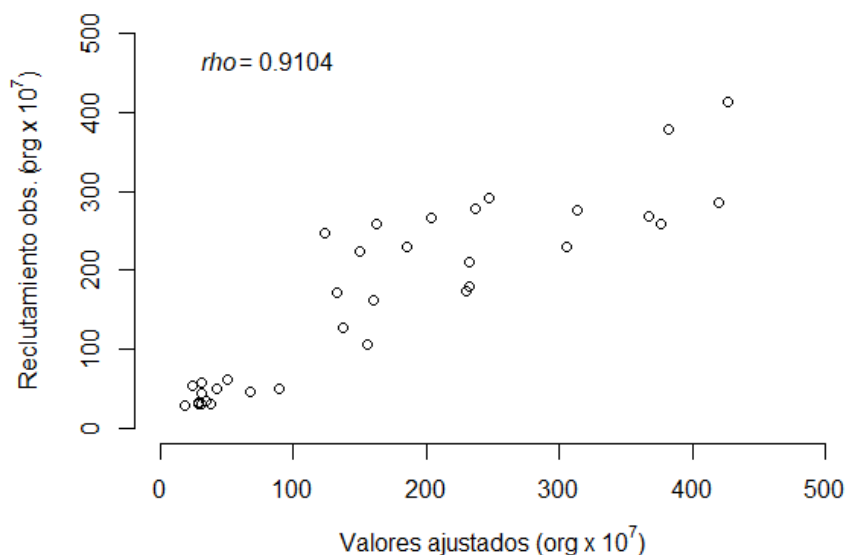


Figura 39. Diagrama de dispersión del reclutamiento observado contra los valores ajustados provenientes del GAM seleccionado para modelar reclutamiento de la sardina crinuda *O. libertate* en el stock del sur del golfo de California durante 1988-2021.

8. 8. 4. Serie de tiempo de reclutamiento observado vs modelo

Los valores ajustados por el GAM seleccionado para describir el reclutamiento de la sardina crinuda *O. libertate* en el sur del golfo de California mostraron una tendencia similar respecto a los valores observados (**Figura 40**). Para los años 1988 a 2001 el ajuste del GAM seleccionado fue muy cercano a los datos observados de reclutamiento. Durante este periodo de la serie, el reclutamiento observado era bajo al igual que el ajuste del modelo lo que indica que el modelo no subestima el reclutamiento de la especie. Además, en este periodo la incertidumbre asociada al modelo (intervalo de confianza al 95%) fue menor que para el resto de la serie histórica. A partir de 2002 y hasta 2018 el ajuste del GAM seleccionado pareció ser más errática, aunque siempre conservando la tendencia general de los datos observados. El ajuste para los años de la serie en que se registraron los dos picos de reclutamiento observado (2006 y 2016) fue siempre menor y muy cercana a estos (285.34576 y 412.32070 org. x 10⁷ respectivamente) indicando que el modelo no

tiende a sobreestimar el reclutamiento de *O. libertate*. Así mismo, durante este periodo de tiempo la incertidumbre fue notablemente mayor, pero englobando la mayoría de veces a los datos observados y al modelo. Finalmente, para los últimos tres años de la serie (2019, 2020 y 2021), el GAM seleccionado representa correctamente la tendencia de incremento posterior a la última disminución en el reclutamiento observado durante 2019 (150.31 org. x 10⁷).

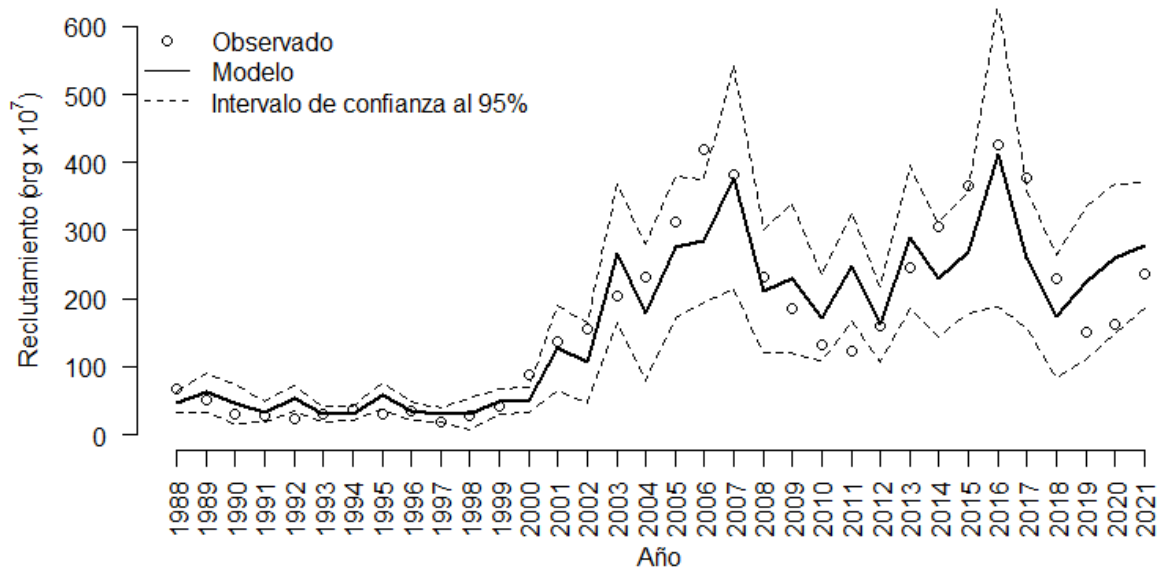


Figura 40. Reclutamiento observado y ajuste del GAM seleccionado (no. de org. x 10⁷) de la sardina crinuda *O. libertate* en el stock del sur del golfo de California durante 1988-2021.

8. 9. Reclutamiento óptimo y ventana ambiental óptima

A partir de los resultados del GAM seleccionado y del análisis de los efectos parciales de los predictores sobre el reclutamiento de *O. libertate* fue posible determinar la VAO del mismo aplicando el enfoque propuesto en la sección 7. 8. 1 de este trabajo. Se observaron efectos de tipo no lineales para las tres variables predictoras (*BR*, *IS* e *IT*). La respuesta del reclutamiento de *O. libertate* frente a los cambios en el tamaño del stock reproductor es representada por la típica forma de domo, la cual es truncada para valores suficientemente grandes de *BR* (**Figura 41a**). En este caso, los resultados sugieren que el reclutamiento es máximo (óptimo) cuando *BR* toma un valor de 248.263 org. x 10⁷. Respecto a la respuesta del reclutamiento considerando el efecto de *BR*, aplicando el enfoque que aquí se propone, solo fue posible determinar el límite inferior del efecto. Se encontró que a un stock reproductor de 120.5551 org. x 10⁷ el reclutamiento óptimo puede disminuir al 50%. Respecto al límite superior, en este caso la recomendación es considerar el valor máximo de *BR* (423.86143 org. x 10⁷). De esta manera, el reclutamiento óptimo de *O. libertate* considerando el efecto de *BR* se da entre 120.5551 y 423.86143 org. x 10⁷ (**Figura 41a**).

La segunda variable predictora en el GAM seleccionado y que cuyo efecto sobre el reclutamiento de la especie fue significativo y no lineal (con dos valles y una cresta) fue el *IS* (**Figura 41b**). En este caso, el reclutamiento óptimo se dió a una intensidad de surgencia de 14.891 m³/s/100 m de línea de costa. Respecto a los límites inferior y superior de la VAO del reclutamiento considerando el efecto de *IS* se encontró que el reclutamiento óptimo puede caer al 50% si la intensidad en el *IS* llega a 22.716 y 33.388 m³/s/100 m de línea de costa. Este es uno de los casos especiales explicados en la sección 7. 8. 1. donde el reclutamiento óptimo puede disminuir al 50% para más de un valor del predictor en cualquiera de los límites de la VAO. Por otro lado, con el algoritmo aquí propuesto no fue posible determinar analíticamente el límite inferior de la VAO. En este caso, se definió este límite como el valor del *IS* que da el reclutamiento en el primer valle del gráfico de efectos parciales (5.286

$\text{m}^3/\text{s}/100 \text{ m}$ de línea de costa). Así, la VAO del reclutamiento de *O. libertate* considerando el efecto de *IS* es de entre 5.286 y 22.716 $\text{m}^3/\text{s}/100 \text{ m}$ de línea de costa (**Figura 41b**).

El *IT* como variable predictora en el GAM seleccionado también tuvo un efecto no lineal sobre el reclutamiento de *O. libertate* (**Figura 41c**). El valor del *IT* que dió como resultado el reclutamiento óptimo fue de 92.11 m^3/s^3 . Por otra parte, los valores de *IT* para los cuales el reclutamiento óptimo puede disminuir al 50% fueron 79.561 y 106.673 m^3/s^3 , siendo esta la VAO del reclutamiento de *O. libertate* considerando el efecto del *IT*.

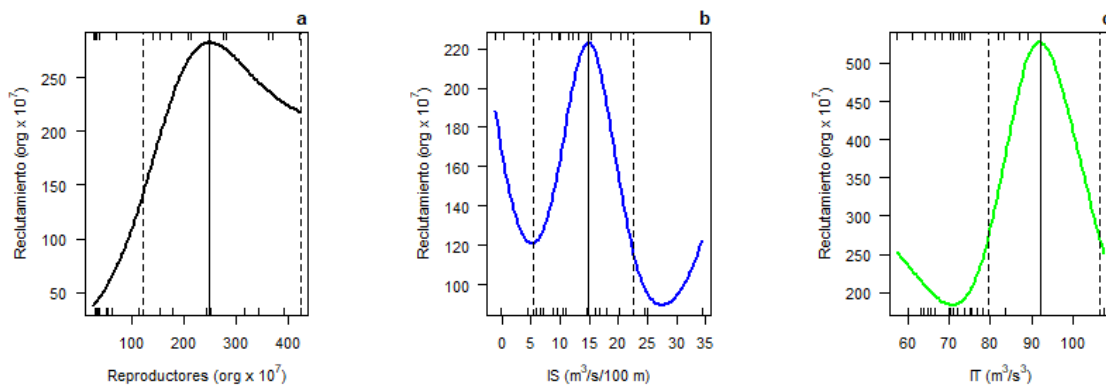


Figura 41. Gráficos de efectos parciales de las variables predictoras del GAM seleccionado para evaluar el efecto de estas sobre el reclutamiento de la sardina crinuda *O. libertate* en el stock del sur del golfo de California durante 1988-2021. Las líneas verticales solidas indican en todos los casos el valor de la variable predictora que maximiza el reclutamiento (óptimo). Las líneas verticales punteadas indican en todos los casos el valor (o valores) de la variable predictora que tiene un efecto de reducción del 50% del reclutamiento óptimo.

9. DISCUSIÓN

9. 1. Índice de surgencia

El patrón encontrado respecto a la estacionalidad del *IS* en el sur del golfo de California permite identificar que es durante los meses de diciembre y enero cuando típicamente se esperarían obtener los valores más altos de este índice, con un grado de variabilidad tal que los datos que caen en ± 1 desviación estándar han sido siempre positivos. Esto sugiere que la dirección predominante del viento en el área de estudio es de norte a sur durante dichos meses. Lo anterior no fue verificado en el presente estudio pues a partir de los datos de las componentes del transporte de Ekman que proporciona ERDDAP y una orientación a la costa, se puede calcular el *IS* directamente con una función trigonométrica (Kämpf y Chapman, 2016). No obstante, en estudios similares donde el *IS* ha sido calculado a partir de datos de vientos locales y en los cuales es imprescindible conocer la dirección del vector velocidad del viento y la latitud de la estación muestreada, se ha encontrado que en el Golfo de California durante los meses de diciembre y enero el *IS* medio es máximo con un orden de magnitud similar (Lluch-Cota, 2000). Durante el mes de mayo el *IS* medio histórico es muy cercano a 0 con tal grado de variabilidad que puede incluir valores negativos ($0.93 \pm 24.64 \text{ m}^3/\text{s}/100 \text{ m}$ de línea de costa). Este mes parece ser particularmente importante pues se ha registrado que durante este se presenta la mayor abundancia de fitoplancton en Mazatlán Sinaloa (Alonso-Rodríguez y Ochoa, 2004). Intuitivamente se esperarían que la mayor abundancia de fitoplancton fuera durante los meses de mayor intensidad en el *IS*. Sin embargo, condiciones de surgencia débil así como la presencia de ondas internas, podrían favorecer el desarrollo de episodios de calma que a su vez propicien el intercambio de nutrientes de las aguas del fondo con la superficie dando lugar a los florecimientos algales de primavera (Alonso-Rodríguez y Ochoa, 2004).

Por otro lado, en el mes de junio se encontró el valor más bajo del *IS* y con signo negativo, lo cual indica que en promedio durante este mes predomina el transporte

onshore o convergencia hacia la costa (*downwelling*) (Bakun, 1973). Una condición necesaria para que el *IS* tenga signo negativo es que, en el hemisferio norte, la dirección de la cual proviene el vector velocidad del viento, el cual ejerce un esfuerzo sobre la superficie del océano, sea sur. Esto daría como resultado que al cabo de unos días de mantenerse el esfuerzo del viento y en ausencia de otros procesos, el transporte de volumen horizontal en una capa superficial de Ekman se desvíe 90° a la derecha por efectos rotacionales del planeta (Kämpf y Chapman, 2016). Así, también se ha verificado previamente que el *IS* es negativo en los meses de junio y julio en el Golfo de California (Lluch-Cota, 2000), lo cual es consistente con datos sobre el patrón estacional de la dirección del vector velocidad del viento en una zona cerca de la costa oriental de la península de Baja California Sur, donde durante dichos meses el viento sopla del sureste (Bernal *et al.*, 2001).

En el área de estudio, el *IS* de acuerdo a cada zona de pesca también presentó el mismo patrón estacional que los datos en conjunto con máximos en invierno y mínimos en verano. Gráficamente es difícil observar en cual zona de pesca están ocurriendo los mayores o menores valores del índice a través del año tipo, pues las curvas están muy cercanas entre sí. En principio, esto indicaría que el *IS* cambia muy poco entre zonas de pesca a través del tiempo, tal que podrían no existir diferencias estadísticamente significativas en el *IS* de acuerdo con un gradiente latitudinal. Sin embargo, esta conclusión debe de hacerse con cautela ya que habrá que considerar algunos aspectos relacionados con la naturaleza y limitaciones del cálculo de este índice (Ver discusión de la sección **9. 4. 1.**).

En el sur del golfo de California, el *IS* a través del tiempo ha fluctuado de manera importante, estabilizándose en torno a los $12.73 \pm 3.10 \text{ m}^3/\text{s}/100 \text{ m}$ de línea de costa (en la serie de tiempo de tendencia) en los últimos años (2010-2021). En algunos estudios realizados en el Golfo de California ya se ha reportado que el comportamiento interanual del *IS* (calculado a partir de vientos locales) varía con cierta regularidad en el tiempo (Lluch-Cota, 2000; Lluch-Cota *et al.*, 2010). Los años que se pueden comparar de la serie interanual presentada por Lluch-Cota (2000) y

la serie obtenida en el presente estudio (1988-1996) parecen coincidir en tendencia ya que las fluctuaciones del *IS* en el área de estudio a partir de 1988 y hasta 1996 también presentan una tendencia negativa (comparación no mostrada aquí). No obstante, la magnitud del *IS* encontrado en el presente trabajo es marcadamente menor que lo expuesto en dicho estudio. Es posible que estas diferencias en magnitud del *IS* estén relacionadas con la procedencia de los datos dado que Pérez-Brunius *et al.* (2007) documentaron que los datos del *IS* calculado a partir de vientos locales y vientos geostróficos son diferentes, siendo el primero de mayor magnitud en todas las estaciones analizadas entre los 27° y 30° latitud norte en la costa occidental de Baja California Norte. Al respecto, los autores discuten que esto es debido a que el *IS* calculado a partir vientos geostróficos presenta una variación espacial a gran escala (>100 km). En su cálculo se han usado campos de presión al nivel del mar separados hasta por 3° (1° en tiempos recientes) lo que lo vuelve incapaz de captar la variabilidad de menor escala.

Sin duda, uno de los resultados más interesantes de la serie de tiempo interanual del *IS* 1988-2021 en el sur del golfo de California es la tendencia a disminuir en magnitud con respecto al tiempo hasta 2009 y una posterior tendencia positiva hacia 2021. Sin embargo, es aventurado hablar de un cambio en el régimen del *IS* dado que en el presente estudio no se llevaron a cabo análisis que permitan esta conclusión. Por tal razón, no es posible saber con certeza el porqué de dichas variaciones. Al respecto, estudios paleoclimáticos como el realizado por Juillet-Leclerc y Schrader (1987) aportan evidencia a favor de que la intensidad de la surgencia en el Golfo de California ha venido disminuyendo desde 1900 y por lo menos hasta 1980. En contraparte, también existe la posibilidad de que la variabilidad interanual encontrada se deba a la evolución en el cálculo del *IS* por parte ERDDAP, la cual ha mejorado en resolución espacial, así como en la forma de calcular el promedio de los campos de presión (cada 6 horas) y en algunos parámetros involucrados en los cálculos (coeficiente de arrastre). De esta manera, el índice puede estar sesgado, sobre todo antes de 1996, año a partir del cual se

dieron algunos de estos cambios en la metodología de cálculo (Jacox *et al.*, 2018). Por otra parte, en Lluch-Cota *et al.* (2010) actualizaron la serie de tiempo del *IS* en la región central del Golfo de California hasta el 2009. Los autores reportaron gráficamente que la tendencia respecto al *IS* del estudio previo (positiva) se mantuvo, pero con una pendiente menor, lo cual indica que el *IS* en esa región se ha mantenido al alza, pero con una ligera disminución en la magnitud promedio. Al respecto, Lluch-Cota (2000) retoma lo mencionado por Bakun (1990) quien sugiere un aumento en la surgencia a escala global (en los grandes sistemas de surgencia) el cual puede ser atribuido al aumento de la temperatura global, que provoca que el gradiente de presión entre el océano y la tierra sea mayor, intensificando los vientos paralelos a la costa (pero no se habla de un cambio de régimen en el *IS* global). No obstante, la manera en que este fenómeno pudiera estar sucediendo en el Golfo de California no está del todo claro, pues si bien los datos sugieren una tendencia de aumento en el *IS* de años recientes, esto no parece estar sucediendo a la velocidad con la que ha sucedido en los grandes sistemas de surgencia presentados en Bakun (1990) (no analizado aquí), Además, el patrón de circulación del viento superficial en meses de invierno es dominado por vientos provenientes del norte-noroeste (Bernal *et al.*, 2001; Parés-Sierra *et al.*, 2003) lo que da lugar a que la surgencia inducida por el viento en todo el Golfo de California sea estacional y no permanente como en los grandes sistemas de surgencia (Kämpf y Chapman, 2016). Asimismo, argumentos para dar soporte a esta idea se encuentran en Lluch-Cota (2000) quien sugiere que la estacionalidad en la *TSM* en el Golfo de California genera baja presión en el golfo y alta presión en tierra dependiendo de la época del año. Esta relación se puede intensificar durante inviernos más fríos y veranos más cálidos, dando lugar a que el viento sople con mayor velocidad en todo el año, pero con variaciones de tendencia positiva (negativa) durante invierno (verano). Sin embargo, no se ha encontrado relación entre las anomalías del *IS* durante invierno y el Índice de oscilación del sur (SOI) (Lluch-Cota, 2000) lo que es sugestivo de que el patrón de circulación del viento que da lugar a eventos de surgencia en el Golfo de

California este influenciado por condiciones locales más que por variaciones en la circulación océano-atmosférica a gran escala.

9. 2. Índice de turbulencia

Como se ha mencionado, en el presente estudio se tomó como un indicador de turbulencia en el medio marino el cubo de la rapidez de viento (viento sin dirección) dado que es fácil de obtener de servidores de datos y existen trabajos tales como la revisión de Mackenzie (2000) donde se muestra que el *IT* ha sido utilizado con cierta regularidad con estos fines.

El patrón estacional del *IT* en el sur del golfo de California 1988-2021 calculado a partir de vientos modelados (MERRA-2) también es similar al del *IS* reportado aquí. Este presentó una forma de domo invertido con mínimos en los meses de verano y máximos en diciembre y enero y la similitud se debe a que ambos índices son una función del viento a través del tiempo. Al respecto, los valores máximos del *IT* en los meses de diciembre y enero se explican porque también la rapidez del viento en esos meses es máxima producto de los fuertes vientos que soplan del nortenoeste en la región (Lluch-Cota, 2000; Parés-Sierra *et al.*, 2003). Los valores mínimos encontrados tienen una explicación inversa pues se sabe que durante los meses cálidos, la zona costera del sur del golfo de California (Sinaloa) se ve dominada por un centro de baja presión (Badan *et al.*, 1991; Badan, 2003) dando lugar a vientos de menor variabilidad y menor magnitud.

A decir del autor, en el área de estudio los trabajos publicados donde se haya presentado el año tipo del *IT* son nulos. En cambio, existen publicaciones en las cuales se analiza el patrón estacional de la rapidez del viento en algunos sitios en el Golfo de California. De esta forma, sabiendo que el *IT* es proporcional al cubo de la rapidez del viento (Oakey y Elliott, 1982), se puede discutir acerca del patrón estacional encontrado en estos otros lugares asumiendo que al elevar al cubo los valores de rapidez del viento reportados, esto no modificaría la forma de la curva, sino que solo aumentarían de magnitud en un orden de x^3 . Así, el patrón estacional

de la rapidez del viento presentado en el presente estudio coincide con lo reportado por Parés-Sierra *et al.* (2003) en el Golfo de California del paralelo 23° al 26° de latitud norte (derivado a partir de datos de viento en superficie obtenidos de satélite). También es similar a lo que obtuvo Bernal *et al.* (2001) en La Paz Baja California Sur con datos provenientes del *Comprehensive Oceanic and Atmospheric Data Set* y con lo presentado por White *et al.* (2007) entre los 26° y 28° de latitud norte en el centro del gofo de California a partir de datos de satélite. Esto se debe a que las estimaciones de datos de rapidez del viento que provienen de algún modelo numérico (ERA-I, ERA5, MERRA-2) tienden a ser congruentes con datos *in situ* pues estos modelos son alimentados con observaciones directas. Específicamente, se ha demostrado que MERRA-2 provee de datos de rapidez del viento en superficie que mejor se han correlacionado con respecto a otros reanálisis (Carvalho, 2019). Además, Thomas *et al.* (2021) documentó que datos provenientes de este modelo se correlacionaron fuertemente durante todo el año ($r > 0.6$) con observaciones de vientos locales tomados en una estación anemométrica ubicada cerca de Topolobampo en Sinaloa México.

La estacionalidad típica del *IT* por zona de pesca indica que durante los meses de la transición de cálido a frío (noviembre y diciembre) y durante los meses plenamente fríos (enero a marzo) este índice es mayor en las zonas de pesca 1,2 y 3. Además se visualiza que en las zonas de pesca 4 y 5 este se comporta prácticamente igual a través del tiempo independientemente de la estación del año. Una discusión más nutrida al respecto se puede ver en la sección **10. 4. 2.** donde se discute a cerca de las diferencias estadísticamente significativas encontradas entre el *IT* por zonas de pesca.

Sobre la serie histórica del *IT* en el sur del golfo de California 1988-2021 y su tendencia, también es posible observar este índice ha ido disminuyendo con respecto al tiempo. Esto ya había sido documentado anteriormente por Vallarta-Zárate y Jacob-Cervantes (2014) en un estudio realizado en esta misma área pero a partir de datos observados de rapidez del viento de 1996-2012 en una estación

meteorológica en Mazatlán Sinaloa. Los autores encontraron una tendencia negativa en los datos del *IT* desde 1996 y hasta 2012 y cuya principal diferencia con respecto a los presentes resultados es la magnitud del *IT*, el cual es mayor en la presente investigación. Una explicación a esto es el origen de los datos, pues en la serie histórica de *IT* de este estudio, se contó con datos de viento de toda el área de estudio y en Vallarta-Zárata y Jacob-Cervantes (2014) únicamente de la zona de pesca 4. Vale la pena mencionar que, de acuerdo con los resultados encontrados, la magnitud del *IT* histórico presentado por está acorde con el *IT* de la zona de pesca 4 de este estudio (comparación no mostrada). Por otro lado, estos mismos autores sugieren que la disminución en la magnitud del *IT* histórico en la zona de estudio puede estar relacionada con un cambio en el régimen de los vientos (aunque no muestran evidencia de los mecanismos que provocan tal cambio). En línea con esto, la información que se presenta acerca de las anomalías del *IT* también sugiere que en la región este índice ha pasado por al menos tres periodos: disminución (1988-1998); aumento (1999-2008) y nuevamente disminución (2009-2021). No obstante, son necesarios más estudios para determinar porque se ha dado esta alternancia en el *IT* en la zona de estudio, tales como análisis de correlación del *IT* con algún índice climático (ONI, PDO, MEI). Tratando de plantear una hipótesis al respecto, la disminución en la magnitud del *IT* puede obedecer al aumento en las temperaturas globales, lo que disminuye el gradiente de presión entre los grandes centros de altas y bajas presiones que se forman estacionalmente en el área de estudio o por el debilitamiento continuo de los vientos alisios. Esta idea es soportada parcialmente por nuevos estudios que sugieren que la disminución en la magnitud de la rapidez del viento (de la cual depende el *IT*) es un fenómeno que puede estar sucediendo en otras partes del mundo por influencia del fenómeno de El Niño (ENSO) (Chen *et al.*, 2013).

9. 3. Temperatura superficial del mar

La *TSM* es quizás la variable más utilizada en las ciencias marinas pues se sabe que influye en muchos de los procesos biológicos de las especies que habitan el

ecosistema marino. Además, con el auge de la era satelital, es fácil acceder a una gran cantidad de datos en tiempo y espacio.

Típicamente, la *TSM* se comporta de manera estacional durante el transcurso del año calendario. Su forma es sinusoidal con máximos en verano y mínimos en invierno. En este trabajo se encontró que la *TSM* tanto global como por zonas de pesca cumple con este patrón al tener un máximo en el mes de agosto y mínimo en el mes de febrero. En algunas localidades en el sur del golfo de California ya se ha reportado que la *TSM* exhibe este mismo patrón estacional. Tales son los trabajos publicados por Herrera-Cervantes (2019) y Bernal *et al.* (2001) en La Paz B. C. S así como por Robles-Tamayo *et al.* (2018) en tres puntos de muestreo al norte del estado de Sinaloa México, solo por mencionar algunos. Es claro que la estacionalidad típica de esta variable ambiental puede obedecer en principio al cambio estacional de la intensidad e incidencia de radiación solar proveniente del sol, que a su vez está relacionado con el ángulo de inclinación del planeta (Valdés-Barrón *et al.*, 2013). Sin embargo, se sabe que en el Golfo de California los valores mínimos de *TSM* coinciden en el tiempo con algunos de los valores más altos del *IS* (Lluch-Cota, 2000). Esto sugiere que la *TSM* también podría estar siendo modulada por el forzante atmosférico, sobre todo en los meses de invierno, con una disminución en la temperatura del agua de la capa de mezcla y una termoclina más somera (Bernal *et al.*, 2001). La prevalencia de agua cálida también podría explicarse por la interacción del agua propia del golfo con otras masas de agua tales como el agua subsuperficial tropical (López-Martínez *et al.*, 2023).

Tal y como comenta Stewart (2008) la *TSM* global varía en función de la latitud mas no de la longitud ya que los cambios en su magnitud a escala zonal son mínimos. En el presente trabajo se encontró que la *TSM* es homogénea en verano con respecto a la latitud (zonas de pesca) pero heterogénea en invierno, es decir, todas las zonas de pesca (21° N – 26° N) tienen una *TSM* muy similar de junio a octubre, mientras que de noviembre a mayo se espera un diferencial de hasta 5 °C entre las zonas de pesca 1 (21° N - 22° N) y 5 (25° N - 26° N). Esto coincide con lo reportado

por Robles-Tamayo *et al.* (2018) quienes encontraron un gradiente en la climatología de la *TSM* a lo largo del Golfo de California durante los meses fríos, y cierto grado de homogeneidad durante los meses cálidos, desde el norte de Sinaloa y hasta Puerto Peñasco en Sonora. También, recientemente López-Martínez *et al.* (2023) encontraron una relación inversa entre la *TSM* y la latitud en el Golfo de California a partir de un modelo de regresión lineal simple con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.9855.

Con respecto al patrón interanual y la tendencia histórica de los datos de *TSM* en el área de estudio, se observó que a pesar de que la serie histórica no es tan amplia (2002-2021), los datos disponibles sugieren que el desarrollo de la *TSM* en el tiempo reciente ha pasado por al menos dos periodos cuya amplitud ha sido de 10 años (2002-2011 y 2012-2021). El primero se caracterizó por presentar alternancia entre *TSM* cálida y fría aproximadamente cada tres años y el segundo porque la *TSM* desestacionalizada fue sostenidamente mayor que las del primer periodo (más cálido). Aunque aquí no se comparó estadísticamente la *TSM* media y la variabilidad asociada a cada periodo presuntamente distinto (25.78 ± 3.59 °C y 26.25 ± 3.38 °C respectivamente), en estudios tales como el de López-Martínez *et al.* (2023) los resultados indican que las anomalías de *TSM* en el Golfo de California de 2000 a 2022 presentan una tendencia positiva, es decir, la *TSM* en el área de estudio es más cálida en el tiempo reciente. Esto es congruente con el incremento de *TSM* de un periodo a otro encontrado en el presente trabajo (0.47 °C por década), que a la vez es mayor a lo que reportaron estos mismos autores (0.27-0.35 °C). Más relevante, el incremento decadal aquí encontrado es muy cercano al incremento de 0.57 °C por década documentado por Sanchez-Cabeza *et al.* (2022) para la bahía de Mazatlán Sinaloa durante 1973-2016. Sin embargo, en el presente trabajo el incremento decadal que se reporta podría estar sesgado pues se ha calculado sin eliminar la influencia de eventos anómalamente cálidos o fríos y el cálculo es para toda el área de estudio. No obstante, el origen del calentamiento puede ser por los mismos factores previamente sugeridos por Sanchez-Cabeza *et al.* (2022): la

interacción del agua del Golfo de California con la masa de agua tropical superficial, la influencia de la alberca cálida del Pacífico Oriental durante eventos El Niño y por el efecto del calentamiento global, con los correspondientes efectos negativos sobre los procesos biológicos y ecológicos del ecosistema del área.

Las anomalías de *TSM* en toda el área de estudio, así como por zona de pesca no parecen presentar diferencias en cuanto al patrón de desarrollo de las mismas en el periodo de 2002-2021. Por el contrario, se puede apreciar que tanto los periodos de calentamiento, así como de enfriamiento suceden en toda la región del sur de golfo de California aparentemente en la misma intensidad y posiblemente relacionadas con la misma señal. Así, es común que, para tratar de explicar el desarrollo de las anomalías térmicas, estas se correlacionen con algún índice climático de cuenca (ONI, MEI, PDO). Al respecto, Robles-Tamayo *et al.* (2018) relacionaron las anomalías de *TSM* en la región norte de Sinaloa (Zona de pesca 1 y 2 del presente estudio) con el SOI. Las anomalías interanuales de *TSM* se explicaban en buena medida por este índice, lo que sugiere la influencia del ENSO sobre el agua en la entrada del Golfo de California. Sin embargo, durante algunos años, el SOI no logró explicar las variaciones en las anomalías de la *TSM*, entre ellos 2013-2015, donde para valores de SOI negativos, las anomalías de *TSM* fueron positivas. Los autores no discuten sobre esta cuestión, pero se retoma aquí pues es probable que se trate de la señal de un evento anómalamente cálido denominado “*Warm Blob*”. De acuerdo con Ramos-Rodríguez *et al.* (2020) este fenómeno, el cual es una especie de masa de agua cálida errante proveniente del norte (Alaska) con desplazamiento hacia el sur, logró elevar las anomalías de *TSM* hasta 4 °C durante 2013-2015. En la serie de anomalías de *TSM* aquí reportada para toda el área de estudio, se observó un pico anómalamente cálido correspondiente a los años 2013-2015 con anomalías de hasta 2 °C el cual podría corresponder a la señal del *Warm Blob*. No obstante, son necesarios análisis adicionales para establecer dicha relación causal dada la relevancia que puede

tener la ocurrencia de fenómenos anómalamente cálidos sobre la productividad del ecosistema del Golfo de California (Durán-Campos *et al.*, 2022).

9. 4. Pruebas de hipótesis estadísticas

9. 4. 1. Índice de surgencia

Tal y como se mencionó en la sección **9. 1.** aquí se discute acerca de los resultados que se encontraron al comparar el *IS* histórico por zona de pesca. Dicha comparación se hizo con el ánimo de determinar si el sur del golfo de California tenía un comportamiento heterogéneo en el desarrollo de los eventos de surgencia por gradiente latitudinal a partir de una prueba de hipótesis estadística. Si bien no es el objetivo de una herramienta estadística de este tipo, puede resultar particularmente útil pues de manera indirecta se puede llegar a determinar regiones donde el desarrollo de las condiciones ambientales han (o no) de variar en el espacio, lo cual es equiparable solamente por un verdadero análisis de *cluster* (Torre y Kanade, 2006).

En principio, es de mencionar que los datos por zonas de pesca no presentaron distribución normal. Esto se debió a la presencia de datos extremos (positivos y negativos) que sesgaron las distribuciones de frecuencia en la mayoría de los conjuntos de datos.

Con respecto a la comparación estadística entre el *IS* por zonas de pesca se encontró que la prueba de hipótesis no paramétrica no fue significativa, es decir, este índice fue estadísticamente igual en las 5 zonas de pesca. Resultados similares han sido reportados por Pérez-Brunius *et al.* (2007) en la costa occidental de B. C. S. donde el *IS* a partir de datos de vientos geostroficó fue estadísticamente igual en tres estaciones separadas por 3° de latitud y por hasta 4° de longitud de distancia de la costa. Esto se explica por el hecho de que, tal y como lo menciona ERDDAP en su portal de internet (<https://oceanview.pfeg.noaa.gov/products/upwelling/bakun>) “*El índice de afloramiento de Bakun pretende ser una estimación de las variaciones a gran escala del índice de afloramiento, no un valor absoluto de la cantidad de agua*

aflorada” lo cual puede estar aludiendo al hecho de que este índice no puede captar la variabilidad de menor escala por su poca resolución espacial (Pérez-Brunius *et al.*, 2007). No obstante, se creó que hay más razones por las cuales este índice no representa bien lo que sucede a escala espacial: la cercanía a la costa de los puntos asignados a cada zona de pesca; la diferencia de solo 1° de latitud entre los puntos asignados y la topografía alta del estado de Sinaloa. Además, tal y como se ha mostrado en esta investigación, los datos de viento (*IT*) por zona de pesca no presentaron un comportamiento completamente homogéneo en el área de estudio por lo que cabría esperar un comportamiento similar en el *IS* a escala espacial.

Estos resultados tienen importantes implicaciones pues asumir que el área presenta condiciones homogéneas del *IS* por gradiente latitudinal podría llevar a concluir que, por ejemplo, *O. libertate* se puede distribuir también de manera homogénea en el área de estudio. Sin embargo, es sabido por estudios previos que durante el verano la biomasa de la sardina crinuda *Opisthonema* spp. en el sur del golfo de California se concentra mayormente en la zona norte de Sinaloa (zonas de pesca 1 y 2) (Acal, 1990).

El análisis en dos dimensiones (tiempo y espacio) del *IS* arrojó resultados similares: el *IS* es estadísticamente igual por zonas de pesca en todos los meses con excepción de mayo y junio donde la prueba de hipótesis detectó zonas de pesca estadísticamente diferentes. Atrae la atención que la zona de pesca 4 sea estadísticamente diferente a las demás durante estos dos meses pues se puede relacionar con lo que encontraron Alonso-Rodríguez y Ochoa (2004) respecto a los florecimientos algales de invierno-primavera en la bahía de Mazatlán Sinaloa (dentro de la zona de pesca 4). Los autores sugieren que en ese tiempo y espacio se dan condiciones océano-atmosféricas muy particulares que dan lugar a que se presente el pico en los florecimientos algales. Ambos factores (surgencia que estimula los florecimientos algales) en combinación con otros tales como periodos de calma, corrientes internas y radiación solar de primavera, podrían estar a la vez relacionados con el único pico reproductivo que presenta la sardina crinuda del sur

del golfo de California, el cual se sabe que se alcanza durante el mes de mayo de cada año (Jacob-Cervantes *et al.*, 2021).

9. 4. 2. Índice de turbulencia

Como se hizo en la sección 9. 2. la discusión aquí también se basa en la premisa de que al ser el *IT* proporcional al cubo de la rapidez del viento (Oakey y Elliott, 1982) entonces se puede hablar en términos de la misma y nutrir así la discusión sobre la variabilidad del *IT* de acuerdo al gradiente latitudinal en el sur del golfo de California.

La hipótesis nula de que la distribución los datos del *IT* es normal fue rechaza en todos los casos, es decir, en ninguna zona de pesca la densidad observada del *IT* fue aproximada por la distribución normal. En cambio, los datos en todas las zonas de pesca se encontraron ligeramente sesgados hacia valores cercanos a 0. Algo similar es lo que han encontrado otros investigadores que trabajan con datos de vientos (rapidez en m/s) pues han determinado que distribuciones tales como la de Weibull, Lognormal o Gamma describen mejor la densidad observada en este tipo de datos (Amaya- Martínez *et al.*, 2014; Sedliačková *et al.*, 2022).

El p-valor asociado al estadístico de la prueba de hipótesis no paramétrica a los datos del *IT* por zona de pesca fue sugestivo de diferencias estadísticas y se determinó en la prueba *post hoc* que las zonas de pesca 1-2 y 4-5 comparten cada par las mismas condiciones en el *IT*. Sobre esto, la hipótesis es que la variabilidad en la presión atmosférica entre un grado de una latitud a otro ($24^{\circ} - 25^{\circ}$ N a $25^{\circ} - 26^{\circ}$ N y $21^{\circ} - 22^{\circ}$ N a $22^{\circ} - 23^{\circ}$ N) no es suficiente como para crear un gradiente de presión tal que las condiciones del viento difieran de una zona a otra en cada "región". Más estudios son necesarios para probar esta hipótesis y dar una explicación clara al respecto. No obstante, los que existen sobre la descripción del desarrollo de la atmósfera baja en el Golfo de California la sustentan parcialmente pues sabe que tanto la presión atmosférica como la rapidez del viento varían estacional y espacialmente, a causa de la topografía y por la influencia de forzantes

externos como los grandes centros de alta y baja presión y la *TSM* (Badan *et al.*, 1991).

Aquí también se documentó que la magnitud del *IT* en el área de estudio presenta un gradiente norte a sur: la turbulencia disminuye conforme se avanza hacia el sur en cada zona de pesca. Además, la variabilidad en cada una también se rige por este patrón. Sobre esto, se tienen registros de que al dividir el Golfo de California en 4 regiones (23° - 26° N, 26° - 28° N, 28° - 30° N y 30° - 32° N) la variabilidad de la rapidez del viento es mayor en latitudes mayores (Parés-Sierra *et al.*, 2003). Múltiples son los factores que pueden explicar este patrón, entre ellos la cantidad de radiación solar que incide a distintas latitudes (Valdés-Barrón *et al.*, 2013). Esto ha de provocar el calentamiento de la superficie del océano, cuya relación con la rapidez del viento se sabe que es inversa (Bernal *et al.*, 2001). De esta manera, si aumenta el gradiente de *TSM*, el gradiente de presión es mayor y con ello también aumenta la rapidez del viento (Li *et al.*, 2022) originando mayor turbulencia en el océano.

Al analizar el patrón del *IT* por zonas de pesca durante cada mes del año se encontró que solo durante los meses de agosto y septiembre el *IT* es estadísticamente igual (homogéneo) en todas las zonas de pesca mientras que el resto del año hay una importante heterogeneidad en el desarrollo de este índice en cada zona. Esto supone que las condiciones de viento no varían en latitud durante los meses cálidos mientras que, en los meses templados y fríos, la rapidez del viento es dinámica en relación a la latitud (zonas de pesca). En otras regiones del mundo como en el suroeste de China (20° – 32° N) Li *et al.* (2022) han reportado que la rapidez del viento es constante durante el verano independientemente de la latitud y durante el invierno esta tiende a aumentar con la latitud.

En el Golfo de California son necesarios estudios a escala espacial más fina sobre variabilidad de la presión atmosférica al nivel del mar dada la estrecha relación entre esta y la variabilidad del viento. Al respecto, Badan *et al.* (1991) sugieren la existencia de condiciones distintas a gran escala en invierno que en verano pero en

cuanto al desarrollo de los campos de presión en el Golfo de California. Por un lado, durante febrero se ha documentado que el área de estudio es dominada por alta presión con gradiente norte a sur (isobara de 1024 hPa pasando por 30° N e isobara de 1012 hPa pasando por 21° N) mientras que en verano (julio) prevalecen condiciones de baja presión atmosférica, quedando el Golfo de California dentro de la isobara de 1012 hPa. Este conocimiento previo permite hipotetizar que las zonas de pesca 1-2 y 4-5 son estadísticamente iguales durante todo el año debido a que el desarrollo de los campos de presión las engloba siempre dentro del mismo campo de presión de gran escala, siendo el gradiente de presión mínimo y por lo tanto el cambio en el desarrollo del viento también es mínimo. Sin embargo, una hipótesis en este mismo sentido no explica, por ejemplo, por qué otras zonas de pesca contiguas (3-4) son estadísticamente diferentes todo el año (excepto durante agosto y septiembre). Son necesarias más investigaciones en este sentido, aunque en principio, la interacción de esta parte del área de estudio con el Océano Pacífico podría estar relacionada con este patrón irregular.

9. 4. 3. Temperatura superficial del mar

Cuando se analizan datos de *TSM* lo más común es presentarlos como series de tiempo o por medio de mapas que muestren su comportamiento espacial. Sin embargo, si quisiéramos modelar la *TSM* como una función de alguna(s) otra(s) variable(s) por medio de modelos de regresión, necesitaríamos evaluar su distribución de frecuencias para tomar algunas decisiones. Por ejemplo, si esta no tuviera distribución normal no sería recomendable realizar una regresión lineal simple, teniendo que optarse por otra alternativa (modelos lineales generalizados) pues de no hacerlo, seguramente el diagnóstico de residuales indicaría un mal ajuste del modelo a los datos tal y como ocurrió en el estudio presentado por Miftahuddin (2016). Así, en el presente trabajo se muestra como al graficar la distribución de frecuencias de la *TSM* esta no tiene distribución normal. En cambio, los datos parecieran mostrar una distribución bimodal, con una moda en la *TSM* cercana al mínimo y otra cercana al máximo. Algo similar es lo que se ha encontrado

al representar gráficamente datos de *TSM* que provienen de boyas situadas alrededor del planeta (Emery *et al.*, 2001). En el caso particular de esta región, esto sucede por el marcado patrón estacional que presenta esta variable, donde por unos meses (invierno) la *TSM* disminuye hasta los 16 °C y en otros aumenta (verano) hasta 32 °C generando cada año dos modas (con cierto grado de variabilidad respecto a ellas). Estos resultados tienen importantes implicaciones pues al evidenciarse que la *TSM* no tiene distribución normal, la media podría no ser un buen estimador de tendencia central de este tipo de datos en la región (Benzon, 2021). En su lugar, la recomendación es, en adelante, utilizar la mediana como medida de tendencia central para la *TSM* lo cual ya ha sido considerado en trabajos recientes realizados en Mazatlán Sinaloa (Sanchez-Cabeza *et al.*, 2022).

Tal y como se reporta aquí, la variabilidad en la *TSM* aumenta con la latitud, siendo esta mayor en la parte norte (zona de pesca 1) y menor en el sur (zona de pesca 5). Además, de acuerdo con los resultados del análisis no paramétrico, zonas de pesca contiguas presentaron *TSM* estadísticamente igual y zonas de pesca no contiguas tienen una *TSM* estadísticamente diferente. La interpretación a esto es que el sur del golfo de California pudiera dividirse en 4 subregiones (estadísticas) de aproximadamente 2 grado de latitud las cuales serían distintas a lo propuesto por Lavín y Marinone (2003) y por López-Martínez *et al.* (2023), quedando como sigue: región 1, 24° - 26° N; región 2, 23° - 25° N; región 3, 22° - 24° N y región 4, 21° - 23° N o que cada zona de pesca es en efecto una zona con condiciones de *TSM* única siempre y cuando se le considere como un estrato sin interacciones con zonas de pesca contiguas. Es de aclarar que se llega a este resultado habiendo comparado la *TSM* por zona de pesca de todo un periodo (2002-2021) sin tener en cuenta la variabilidad inter e intraanual. Sin embargo, al verlo de este modo está claro que las 4 subregiones que sugieren los resultados del análisis se traslapan, dando como resultado que todo el sur del golfo de California se pueda simplificar a una misma región, lo cual, a su vez, es contradictorio a la idea de una regionalización. Además, tampoco se puede considerar a cada zona de pesca no contigua como una zona o región con características de *TSM* únicas porque

caeríamos en la zonificación original, lo cual también es paradójico. No queda del todo claro porque sucede esto, pero una posible respuesta al respecto puede tener sustento meramente estadístico. Es probable que la delimitación espacial de las zonas de pesca a partir de las cuales se tomaron los datos de *TSM* no garantiza que las muestras cumplan con el supuesto de independencia estadística (lo que pasa en una zona de pesca no influye en lo que sucede en otra) el cual es el requerimiento principal para aplicar la prueba no paramétrica de Kruskal Wallis (Kruskal y Wallis, 1952). Aunque no se comprobó aquí, puede ser que esta violación al supuesto de independencia se deba a que los datos de *TSM* de las zonas de pesca estén altamente correlacionados entre sí. Esto provocaría un sesgo estadístico al disminuir la potencia de la prueba de hipótesis realizada (la probabilidad de rechazar la hipótesis nula cuando es falsa) hasta solo 26% tanto en el ANOVA como en la prueba de hipótesis no paramétrica de Kruskal Wallis (en datos provenientes de distribución normal) (Zimmerman y Zumbo, 1992). En palabras más claras, habría hasta un 26% de probabilidad de que en efecto la *TSM* entre zonas de pesca sea diferente pero también habría un 95% de probabilidad ($1 - \alpha$) de estar tomando la decisión equivocada (la *TSM* entre zonas de pesca es igual). Así, múltiples son los motivos para sugerir tomar con precaución los resultados que aquí se presentan. En principio, las consideraciones anteriores llevan a recomendar un uso cauteloso de las pruebas de hipótesis estadísticas como herramienta para determinar diferencias entre muestras de datos de *TSM* en donde no se garantiza que la disposición espacial de las mismas no interfiere con el supuesto de independencia estadística. Y es que diversos estudios han demostrado que la parte sur del golfo de California es dinámica y que el acontecer allí está mediado por múltiples procesos relacionados con el Océano Pacífico (Castro *et al.*, 2017), así como por las corrientes marinas y por el patrón de circulación superficial y de los vientos (Lavín y Marinone, 2003), solo por mencionar algunos. Además, la *TSM* es una variable que tiene un fuerte comportamiento estacional, lo que podría generar diferencias si se evalúa en invierno, en verano, o durante un año con condiciones El Niño o La Niña (Escalante *et al.*, 2013). La idea central de todo esto es que la

TSM en cualquier punto del Golfo de California es multifactorial y que cualquier intento de regionalización o de evaluación de diferencias que involucre esta variable en una zona u otra, debe de tratar de considerar todas las fuentes de variación de la misma para ser cercano a la realidad.

El análisis en busca de diferencias estadísticas entre la *TSM* por zonas de pesca considerando el mes del año muestra resultados similares a lo discutido en el párrafo anterior: durante los meses en que las pruebas de hipótesis encontraron diferencias estadísticas (meses fríos y templados), zonas de pesca contiguas fueron estadísticamente iguales, con excepción de las zonas de pesca 3 y 4 que durante febrero, marzo, abril y mayo fueron estadísticamente diferentes. Una posible explicación a esto desde una perspectiva oceanográfica pudiera ser lo que se menciona en Escalante *et al.* (2013) donde se explica que en la boca del Golfo de California (zonas de pesca 3 y 4) las condiciones oceanográficas son similares a las del Océano Pacífico, e incluso que esta región en particular es más susceptible a la señal de El Niño. Por otro lado, en el presente trabajo se encontró que durante meses cálidos (julio y agosto) todas las zonas de pesca fueron estadísticamente iguales. Al respecto, también en Escalante *et al.* (2013) se reportó que la *TSM* es estadísticamente diferente entre condiciones cálidas y frías, aunque las zonas de pesca comparadas en ese trabajo si se encontraban considerablemente separadas geográficamente.

9. 5. Datos de stock-reclutamiento

El stock reproductor de *O. libertate* y su nivel de reclutamiento asociado en el sur del golfo de California durante 1988-2021 ha fluctuado de manera importante pasando por al menos tres etapas. El análisis de captura a la edad realizado por el IMIPAS en 2021 arrojó que durante los primeros 11 años (1988-1999), tanto reproductores como reclutas tenían una abundancia baja. Posteriormente, tanto reproductores como reclutas alcanzaron su primer pico (reclutas en 2006 y reproductores en 2009) para posteriormente disminuir y volver a alcanzar un segundo pico en abundancia (reclutas en 2016 y reproductores en 2018). Así

mismo, los datos indican que los picos de reclutamiento se han dado durante años en los cuales el modelo predijo una disminución en la abundancia del stock reproductor y viceversa. Al respecto Sharma *et al.* (2019) discuten que la relación funcional entre reproductores y reclutas, además de ser poco clara, está influenciada tanto por la calidad de los datos y su dependencia de la actividad pesquera (selectividad) como por la variabilidad ambiental. Aunado a esto, dichos autores mencionan que existen dos procesos distintos por los cuales la densidad del stock reproductor puede o no influir sobre el reclutamiento. El primer proceso se encuentra implícito en el modelo de stock-reclutamiento propuesto por Beverton y Holt (1957) donde, a partir de cierto nivel de abundancia del stock reproductor, el reclutamiento tiende a permanecer constante, siendo este independiente de la abundancia de los reproductores. En este caso, múltiples factores relacionados casi exclusivamente con las condiciones ambientales podrían provocar una disminución de la abundancia de reclutas por mortalidad denso-independiente (Allee *et al.*, 1949). Un segundo proceso es la base del modelo de stock-reclutamiento propuesto por Ricker (1975) y en el cual asume que existe crecimiento compensatorio de la abundancia de reclutas: a densidades bajas del stock reproductor, los reclutas aumentan, mientras que, a densidades altas del stock reproductor, los reclutas disminuyen (Rose *et al.*, 2001; Chen *et al.*, 2002). Esto se da porque de hecho existen factores que provocan mortalidad denso-dependiente (competencia por alimento, espacio, canibalismo). Así mismo, de acuerdo con Allee *et al.* (1949) la mortalidad denso dependiente puede ser de dos tipos: directa e inversa. La primera implica que a medida que aumenta la densidad de la población, la mortalidad también aumenta (organismos fecundos y sin cuidado parental) y la segunda es el proceso contrario, a medida que la densidad de la población aumenta, la mortalidad disminuye (organismos poco fecundos, pero con cuidado parental).

La existencia de una mortalidad denso-dependiente parece encajar bien en lo que se observa en la serie de datos histórico de reclutas de *O. libertate* 1988-2021 en la región. Por un lado, durante los años en que la abundancia de los reproductores era

baja (1988-1999) también lo era la abundancia de reclutas, es decir, existía una abundancia de reclutas condicionada quizás a la propia abundancia de reproductores. Además, como ya se dijo, los picos de abundancia de reproductores coinciden con una disminución en la abundancia de los reclutas, la cual se ha dado 3 años después del pico en la abundancia de reclutas (en el periodo que abarca de 2000 a 2021). Esto último sugiere que existen factores intra o interespecíficos en el stock, que condicionan la supervivencia de los reclutas según la abundancia de los reproductores. Es probable que, a mayor abundancia de reproductores, exista mayor competencia por el alimento o por el espacio. Incluso, según se sugiere en Allee *et al.* (1949) es igual de posible que al haber mayor densidad de organismos en general, exista una mayor facilidad para la transmisión de enfermedades y parásitos entre los peces. Esto podría afectar más a los peces jóvenes, provocando mayor mortalidad en ese grupo de la población y, por ende, una disminución en su abundancia.

Paradójicamente, asumir que la abundancia histórica de reclutas de *O. libertate* en la región únicamente responde a factores denso-dependientes implicaría ignorar toda la evidencia que demuestra que las condiciones ambientales también tienen efecto sobre el proceso de reclutamiento en los pelágicos menores. Desde la extensa revisión realizada por Allee *et al.* (1949) donde mencionan todos los posibles factores ambientales que se encargan de regular el tamaño de cualquier población, hasta Cury y Roy (1989) y su teoría del éxito del reclutamiento de pelágicos menores dependiendo de las condiciones del viento (surgencia y turbulencia).

Se debe de considerar la posibilidad de que el stock de *O. libertate* esté experimentando simultáneamente mortalidad tanto denso-dependiente como denso-independiente. Esta hipótesis podría ayudar a explicar por qué reproductores y reclutas presentaron una abundancia baja y prácticamente constante de 1988 a 1999 (i) y el aumento acelerado en su abundancia posterior al año 2000 (ii). i: tal y como lo mencionan Juillet-Leclerc y Schrader (1987) a inicios de siglo la surgencia

en el Golfo de California eran más intensa y datos recientes sugieren que esta se ha venido debilitando con respecto al tiempo (Lluch-Cota, 2000; Lluch-Cota *et al.*, 2010). Esta intensidad previa en la surgencia podría haber generado una pérdida constante de la estratificación de la columna de agua, limitando la tasa de encuentro entre los parches de larvas y parches de alimento, aumentando con esto la mortalidad durante los primeros estadios larvarios (Lasker, 1978). Sin embargo, el hecho de que la actividad pesquera de la región en esos años fuera todavía incipiente (Jacob Cervantes, comunicación personal, 25 de marzo de 2024) pudo haber ayudado a la preservación involuntaria de la abundancia del stock reproductor sin llevarlo por debajo del umbral de recuperación. Chen *et al.* (2002) y Morales-Bojórquez y Nevárez-Martínez (2005) mencionan que las poblaciones de pelágicos menores pueden estar sujetas a experimentar una disminución en su crecimiento si la densidad de la población también disminuye (efecto Allee). Básicamente, si la abundancia de reproductores de *O. libertate* hubiera caído por debajo de cierto valor umbral, el reclutamiento habría fallado. Durante la evaluación de stock más reciente realizada por el IMIPAS Mazatlán (Información no publicada) se ha asumido que el crecimiento de reclutas en la población es tanto compensatorio como dependensatorio pues para evaluar el stock se ajustó el modelo de stock-recluta de Ricker reparametrizado citado en Morales-Bojórquez y Nevárez-Martínez (2005). Este modelo, además de tener los dos parámetros conocidos (alfa y beta), tiene un tercer parámetro cuya interpretación biológica es la de valor umbral del número de reproductores por debajo del cual el reclutamiento fracasa. Así, hasta 2021, este parámetro tuvo un valor de 16.4×10^7 reproductores (Jacob-Cervantes y Payán-Alejo, 2021) y los datos indican que el número de reproductores estimados históricamente nunca ha estado por debajo de ese. ii: a partir del año 2000, es posible que ciertos factores necesarios para el crecimiento del stock se hallan conjugado. Por un lado, la disminución de la intensidad de la surgencia, pudo generar que periodos de calma se dieran con mayor frecuencia, facilitando con esto la alimentación de las larvas (Lasker, 1978). Además, una menor intensidad en la surgencia se traduciría en agua subsuperficial menos fría (Lluch-Cota, 2000). Esto

es particularmente importante pues algunos estudios experimentales indican que el tiempo de incubación de los huevos en peces es inversamente proporcional a la temperatura (Fuiman y Werner, 2002). De esta manera, con una temperatura del mar menos fría, el tiempo de incubación se reduciría, lo que minimizaría la posibilidad de depredación de huevos e incluso la pérdida de hábitats favorables para el crecimiento y la primera alimentación provocado por la deriva y el transporte larvario (Bakun, 1996). Al mismo tiempo, la abundancia de reclutas y reproductores de un año a otro pudo haber propiciado que el stock se regenerara y alcanzara su máxima capacidad de carga por la mezcla y acumulación de sobrevivientes de las distintas clases anuales (Morales-Bojórquez y Nevárez-Martínez, 2005) dadas las condiciones idóneas. Esta hipótesis puede asumirse como válida no sin antes tener en cuenta que el éxito en la supervivencia de huevos y larvas de peces (y por tanto del proceso de reclutamiento) es un fenómeno que se ha tratado de explicar desde una perspectiva muy amplia (Hjort, 1913; May, 1974; Lasker, 1978; Bakun, 1985; Cury y Roy, 1989; Cushing, 1990; Fuiman y Werner, 2002).

9. 6. Modelos aditivos generalizados (GAM)

De acuerdo con Cury y Roy (1989) los primeros intentos analíticos para tratar de evaluar la respuesta del reclutamiento de pelágicos menores ante las variaciones del ambiente se hicieron por medio de un enfoque estadístico lineal. Posteriormente, estos mismos autores hicieron uso de una técnica estadística basada en un algoritmo interactivo propuesta por Breiman y Friedman (1985) para tratar el mismo problema. Dicho método denominando esperanzas condicionales alternas (ACE por sus siglas en inglés) permite realizar transformaciones empíricas óptimas a la variable de respuesta y a los predictores de una regresión lineal múltiple (bivariada o multivariada) minimizando la fracción de la varianza que no es explicada por la regresión (Breiman y Friedman, 1985). A decir de estos autores, este método tiene la bondad de no necesitar conocer previamente la distribución de la variable de respuesta además de tener un costo computacional bajo. No obstante, una vez que el algoritmo converge a una solución (se han encontrado las transformaciones

óptimas) este no informa ecuaciones ni unidades específicas de cada transformación (son adimensionales). Básicamente, con ACE se puede inferir la relación funcional más probable de la variable de respuesta con cada predictor teniendo en cuenta el efecto de todos los predictores en la regresión, pero sin una ecuación explícita ni unidades para la transformación. Años después, Hastie y Tibshirani (1986) y Hastie y Tibshirani (1990) proponen una extensión del GLM para evaluar relaciones no lineales entre la variable de respuesta y los predictores por medio de la suma de funciones suavizadas asumiendo que la distribución de la variable de respuesta es de la familia exponencial: el GAM. Este tipo de modelos de regresión semiparamétrico ha sido ampliamente usado para evaluar el efecto del ambiente sobre el reclutamiento en especies de peces.

La distribución observada del reclutamiento de *O. libertate* de 1988-2021 en la región fue asimétrica y sesgada hacia valores cercanos —pero nunca igual— a cero. Analizándolo desde el punto de vista biológico, el reclutamiento es una cantidad siempre positiva, igual a cero (si es que en algún momento se registró una falla en el reclutamiento) o mayor a cero. En términos estadísticos eso se traduce en que el reclutamiento es una variable aleatoria continua, estrictamente positiva en el dominio de 0 a infinito. Una distribución de probabilidad ampliamente usada que cumple con estas características es la distribución Gamma (Eric *et al.*, 2021), razón por la cual en este trabajo se utilizó dicha distribución de probabilidad para modelar el reclutamiento de *O. libertate*. Esto coincide con la distribución de probabilidad utilizada por Cardinale y Arrhenius (2000) quienes también asumieron distribución Gamma para modelar la respuesta del reclutamiento de *Gadus morhua* ante las variaciones ambientales utilizando GAM. En otros estudios como el de Daskalov (1999) se discute la posibilidad de aplicar una transformación logarítmica a los datos de reclutamiento para aproximarlos a una distribución normal y estabilizar la varianza.

En este trabajo se probó la hipótesis de que el reclutamiento anual de *O. libertate* no solo está en función del stock reproductor anual, sino que también es posible

tratar de explicar sus variaciones añadiendo predictores ambientales. A partir de un enfoque poco ortodoxo, se construyeron 9 modelos, cada uno con la idea implícita de que el éxito en el reclutamiento anual de la especie podría explicarse por el desarrollo de las condiciones ambientales (*IS*, *IT* y *ONI*) durante y hasta 7 meses después del evento reproductivo en el sur del golfo de California (ver de nuevo sección 7. 7.). Este enfoque es similar al aplicado por Daskalov (1999) quien para modelar la respuesta del reclutamiento en tres especies de pelágicos menores calculó promedios estacionales (diciembre a marzo y mayo a agosto) para los predictores ambientales (*TSM*, *IT* entre otras). Este autor sugirió que cuando se tiene identificado interanualmente el periodo de reclutamiento es ideal considerar también el efecto de las condiciones ambientales interanuales que pueden ser responsables del éxito del reclutamiento anual.

El resultado del modelado paso a paso por criterio ambiental fue interesante desde el punto de vista estadístico, pero también por el grado de congruencia con las premisas biológicas y ecológicas previamente planteadas. De esta manera, el siguiente fragmento de la discusión (y hasta la discusión del GAM seleccionado) está enfocado en tratar de dar sentido a lo encontrado producto de la aplicación de las herramientas estadísticas, pues al final, debe de existir coherencia entre lo que sugiere el modelo, lo que se observa en la realidad y el conocimiento previo sobre el fenómeno en cuestión.

El modelo con los datos ambientales como la mediana del mes de mayo no mostró buen desempeño al agregar los predictores ambientales, quedando el reclutamiento solamente en función del stock reproductor anual y no de lo que sucedió en el ambiente durante mayo (mes en que se da el pico reproductivo de la especie). Sin embargo, en un contexto biológico es difícil pensar que una especie pueda realizar el mayor gasto energético en su ciclo anual sin considerar las señales ambientales. Cushing (1990) hipotetiza que la fuerza de la clase anual en peces se explica por el grado de coincidencia temporal entre la producción de larvas y el alimento necesario para su supervivencia. Esta hipótesis conocida como ajuste-desajuste (en inglés

match-mismatch) se ha asumido como la razón de que los peces de aguas templadas tiendan a desovar durante los picos de microalgas en primavera para maximizar las posibilidades de que su progenie coincida en el tiempo con la productividad primaria. Sin embargo, el *match* no siempre es perfecto y se ha documentado que tanto la amplitud del periodo reproductivo como de la producción de alimento tienen implicaciones en la fuerza de la clase anual (Mertz y Myers, 1994). Esto último puede estar relacionado con que el modelo de reclutamiento con los datos ambientales como la mediana del mes de mayo a junio fue sustancialmente mejor que el modelo del mes de mayo. Este modelo logró explicar las variaciones en el reclutamiento de *O. libertate* considerando el efecto acumulado del *IT* y *ONI* hasta 1 mes después del pico en la reproducción lo que anticipa que el grado de estabilidad de la columna de agua (turbulencia) sumado a la condición del ENSO hasta el mes de junio puede tener un efecto significativo en el reclutamiento anual de la especie en la región. Por otro lado, los modelos de reclutamiento con los datos ambientales como la mediana del mes de mayo a julio y mayo a agosto no tuvieron implícito ningún efecto ambiental indicando que lo que sucede en el ambiente hasta tres meses después del pico reproductivo (mayo) no tiene influencia sobre reclutamiento anual. No está del todo claro cómo o porque sucede esto, pero es posible que los peces producto del evento reproductivo del mes de mayo y que hayan sobrevivido hasta el mes de agosto (4 meses de edad) ya no sean tan susceptibles de experimentar mortalidad relacionada con las condiciones del ambiente y que esto se refleje de alguna forma en el reclutamiento anual. Por el contrario, los modelos de reclutamiento anual de *O. libertate* con los datos ambientales como la mediana del mes de mayo a septiembre, mayo a octubre, mayo a noviembre y mayo a diciembre tuvieron todos implícitos el efecto ambiental del *IT*. Así mismo, se encontró que la relación entre el reclutamiento y el *IT* fue significativa y no lineal en todos los casos ($EDF > 1$) y que esta perdía linealidad según se acumula su efecto en el tiempo. Al respecto, se sabe que en el Golfo de California la rapidez del viento aumenta a inicios del otoño boreal y sopla mayormente en dirección norte-noroeste (Bernal *et al.*, 2001) lo que puede inducir surgencia costera

(Lluch-Cota, 2000) y turbulencia en el ambiente marino de la región. Esta señal ambiental podría estar generando que *O. libertate* responda realizando desoves intermitentes o parciales durante esta época del año tal y como lo han sugerido investigaciones aun no publicadas (Páez-Barrera, 1976) y que al mismo tiempo este nuevo aporte del stock reproductor también se refleje en el reclutamiento anual de ese mismo año. Por otro lado, lo encontrado para estos últimos modelos es diferente a lo que reportaron Vallarta-Zárate y Jacob-Cervantes (2014) tras aplicar regresiones lineales con la captura mensual por año del complejo sardina crinuda (*Opisthonema* spp.) como variable de respuesta y la *TSM* y el *IT* como predictores durante 1996-2012. Los autores encontraron que la *TSM* fue la variable que logró explicar significativamente los cambios en la captura mensual del complejo mientras que el *IT* solo figuró como variable significativa en 2 de 17 modelos. No obstante, más allá de que la variable de respuesta de dicho estudio sea distinta a la aquí utilizada y que el supuesto de linealidad esté implícito en los modelos ajustados, la discrepancia puede atribuirse a que los criterios de modelado son conceptualmente distintos; aquí se acumuló el efecto mensual de los predictores y se emparejó siempre con la variable de respuesta anual y en dicho estudio se emparejó el efecto mensual con su correspondiente observación en la variable de respuesta mensual. En lo que respecta al noveno modelo ajustado, este incluyó los datos ambientales como la mediana anual y fue el que obtuvo la mayor devianza explicada, el menor diferencial de AIC, así como una capacidad predictiva del 90%. Este fue seleccionado como el mejor modelo (GAM seleccionado) para representar la variabilidad del reclutamiento anual de *O. libertate* en la región durante 1988-2021 teniendo como predictores estadísticamente significativos a *BR*, el *IS* y el *IT*, todos con una clara relación no lineal con el reclutamiento ($EDF > 2.6$). Aunque este resultado fue sorprendente, tiene sentido que un modelo con la variable respuesta resumida en escala anual ajuste razonablemente bien cuando se considera a los predictores en la misma escala temporal. También causó sorpresa el hecho de que el índice de concurvidad fuera bajo para los predictores del modelo (< 0.3) pues dos de ellos son función del viento y se esperaría que el efecto de una variable pudiera

ser enmascarado por el de la otra. Ramsay *et al.* (2003) mencionan que es difícil saber exactamente qué grado de correlación entre predictores es causa de concurvidad y sugieren que un coeficiente de correlación arriba de 0.5 entre predictores podría dar problemas de concurvidad. En este sentido, tal y como se describe en Bakun (1975) el *IS* depende de factores tales como la latitud geográfica así como de la dirección y rapidez del viento mientras que el *IT* solo varia proporcionalmente a la rapidez del viento (Bakun y Parrish, 1982; Mackenzie, 2000) lo que explicaría el bajo valor de concurvidad aquí reportado.

9. 7. GAM seleccionado

Como se mencionó, el modelo seleccionado como el mejor para representar la variabilidad del reclutamiento anual de *O. libertate* en el sur del golfo de California durante 1988-2021 fue el que involucró los predictores ambientales como la mediana anual (*IS* e *IT*). Este modelo tuvo a su favor múltiples indicadores estadísticos. Entre ellos destacan la significancia aproximada de todos los términos suaves ($p < 0.05$) con evidente relación no lineal con la variable de respuesta de acuerdo con la escala que se menciona en Hunsicker *et al.* (2016): un valor de EDF igual a 1 es equivalente a relación lineal mientras que un valor de EDF entre 1 y 2 se puede considerar como relación no lineal pero débil y un EDF mayor a 2 indica relación no lineal fuerte. Tampoco hubo evidencia de que la concurvidad entre predictores pueda afectar la interpretación del modelo (Ramsay *et al.*, 2003). Así mismo, no hay evidencia estadística de que el tamaño de la base (número máximo de funciones base para captar la tendencia real de la relación entre predictor y respuesta) indicado *a priori* en cada término suave ($k=5$) fuera bajo, esto según la interpretación de la prueba de hipótesis (k -index) propuesta por Pya y Wood (2016): si k -índice es cercano a 1 el tamaño de la base es adecuado y si k -índice es menor a 1 el tamaño de la base es bajo y se debe de considerar incrementarlo. Además, el alto porcentaje de devianza explicada indica que el GAM seleccionado es sustancialmente mejor que el modelo nulo (el peor modelo posible) en cuanto a la descripción de la variabilidad en los datos de la variable de respuesta (Wood, 2017).

Así mismo, No obstante, el criterio decisivo para ser seleccionado fue su diferencial de AIC el cual fue de 0 unidades con respecto al modelo con el AIC más bajo, es decir, con el mismo. De acuerdo con Burnham y Anderson (2002) basta con que un modelo tenga una diferencia de entre 0 y 2 unidades en el AIC respecto de otros para ser seleccionado como un modelo con un nivel sustancial de soporte empírico sobre los datos.

De acuerdo con Feng *et al.* (2020) el análisis residual es el primer paso para verificar si un modelo de regresión ha ajustado razonablemente bien a los datos. Estos deben estar estandarizados a la raíz cuadrada de la varianza (residuales de Pearson) y probar que son robustos a los supuestos estadísticos básicos (normalidad, homocedasticidad e independencia). Sin embargo, de la revisión de literatura contemporánea aquí realizada, destaca el hecho de que en otros estudios donde también se ha modelado la respuesta del reclutamiento en peces ante las variaciones del ambiente, no es común encontrar una demostración explícita de que los residuales estandarizados soportan la selección del mejor modelo. En este sentido, el diagnóstico aplicado a los residuales del GAM seleccionado del presente estudio confirmó que los residuos del modelo con los datos como la mediana anual cumplen con los supuestos estadísticos básicos. Otros trabajos como los de Daskalov (1999), Cardinale y Arrhenius (2000) y Ligas *et al.* (2015) coinciden con esto pues en ellos se documentó que los residuales de los GAM si cumplían con los supuestos estadísticos.

La distribución de probabilidad teórica asumida para los datos de reclutamiento observado de *O. libertate* fue la de una distribución Gamma. Al ajustar el GAM seleccionado y predecir nuevos valores de la variable de respuesta, lo que se esperaría es que, si el ajuste fue razonablemente bueno, la distribución de probabilidad de los valores ajustados también pudiera ser descrita por una Gamma (sumado a toda la serie de indicadores considerados hasta ahora). Si bien lo que se probó aquí no fue esto último, si se verificó que por lo menos ambas distribuciones fueran estadísticamente iguales, esto por medio de la prueba de

Kolmogorov Smirnov para dos muestras según se explica en Pratt y Gibbons (1981). De esto modo, al cumplirse lo anterior, se puede decir que la distribución de los valores ajustados también puede ser representada por una distribución Gamma lo que prueba que el GAM seleccionado replica adecuadamente la distribución del reclutamiento observado.

Otro argumento para evaluar el buen ajuste del GAM seleccionado es la dispersión entre los valores observados de reclutamiento y los predichos por el modelo. De hecho, en los múltiples ejemplos que presenta Wood (2017) sobre el ajuste de modelos aditivos es común ver una representación visual de la dispersión entre la respuesta y los valores ajustados. La idea detrás de esto es, de nuevo, que si el modelo es certero entonces la dispersión de estos dos conjuntos de datos será mínima, agrupándose en una línea recta (indicando que los datos ajustados son iguales a los valores observados). En este sentido, la dispersión de los valores observados de reclutamiento y el ajuste del GAM seleccionado cumplen con esto último, lo que se suma al alto grado de asociación lineal sugerido por el coeficiente de correlación lineal de Spearman. Si bien el coeficiente de correlación (Pearson o Spearman) es una herramienta utilizada para medir el grado de asociación lineal entre variables no controladas (Hernández-Lalinde *et al.*, 2018; Ali Abd AlHameed, 2022), en este trabajo se utilizó para dar soporte cuantitativo a la dispersión de los valores observados de reclutamiento y el ajuste del GAM seleccionado así como para evaluar la capacidad predictiva del modelo (90%) junto con la interpretación del RMSE.

Típicamente, el reclutamiento es representado con respecto al stock reproductor y no contra el tiempo. Esto tiene implicaciones importantes pues hay estudios en los que se menciona que los modelos de stock-reclutamiento convencionales rara vez ajustan correctamente a los datos (Pierre *et al.*, 2018) lo que puede llevar a un pronóstico equivocado del reclutamiento a través del tiempo. En aras de contribuir a esta cuestión, en el presente estudio se muestra la serie de tiempo de reclutamiento observado de *O. libertate* en el sur del golfo de California durante

1988-2021 y el ajuste del GAM seleccionado. Es posible observar que el modelo predice bien la tendencia en los datos observados sin sobrestimar ni subestimar el reclutamiento en los años de mayor incertidumbre (2000 a 2021). Además, tampoco hay evidencia de que el modelo sobreajuste a los datos. Esto cumple con lo que sugieren autores como Wood (2017) y Simpson (2018) quienes entre líneas mencionan que cuando se ajusta un GAM a una serie de tiempo lo ideal es buscar ajustar a la tendencia y no al ruido de los datos observados. Al hacer esto se da la libertad al modelo de que pueda variar en torno a la incertidumbre asociada y ser capaz de responder ante variaciones estocásticas en los datos observados. En relación con el patrón histórico de los datos de reclutamiento observado de *O. libertate* en el sur del golfo de California este es similar al reportado por Zwolinski y Demer (2014) para *S. sagax* en la costa oeste de Estados Unidos durante 1980 a 2010 donde el reclutamiento observado de esa especie también fue bajo durante los primeros 10 años de la serie con respecto a años posteriores. Además, ajustaron a estos datos un GLM teniendo como predictores a la biomasa reproductora y al índice de oscilación decadal del Pacífico (PDO por sus siglas en inglés). La tendencia del mejor modelo también coincide la tendencia del GAM seleccionado en el presente estudio.

9. 8. Reclutamiento óptimo y ventana ambiental óptima

La introducción de los conceptos de reclutamiento óptimo, reclutamiento óptimo al 50% y la metodología para la determinación analítica de los límites de la VAO es una contribución original de esta tesis. Esto surgió por la falta de un procedimiento analítico con el cual determinar la VAO del reclutamiento hipotetizada por Cury y Roy (1989). En este contexto debe entenderse como reclutamiento óptimo el nivel máximo de reclutamiento dado el efecto parcial de cada variable predictora sobre la variable de respuesta. Este puede variar en magnitud según el predictor pues al calcular los efectos parciales se considera que el efecto de los demás predictores es constante (Breheny y Burchett, 2017) lo que impide que se pueda tomar como una cantidad de referencia (por ejemplo, para el manejo) ya que es siempre relativa

al predictor. El reclutamiento óptimo al 50% se obtuvo al dividir entre 2 el valor de reclutamiento óptimo y tiene las mismas características que se mencionan para este último. La utilidad del reclutamiento óptimo al 50% es que siempre es simétrico respecto al reclutamiento óptimo. Así, en una curva de efectos parciales se pueden identificar los valores de la variable predictora que corresponden al reclutamiento óptimo y al reclutamiento óptimo al 50%. En el caso de este último, en este trabajo se propone que dichos valores en la variable predictora pueden ser interpretados como los límites de la VAO a partir de los cuales el efecto del predictor puede ser tal que el reclutamiento puede disminuir al 50% de su valor óptimo.

La idea de tomar como referencia un punto al 50% es una práctica común en la ciencia pesquera. Por ejemplo, ajustando modelos logísticos de selectividad del arte de pesca y madurez sexual se puede establecer la talla a la cual el 50% de los organismos son retenidos por el arte de pesca y se encuentran sexualmente maduros, respectivamente (Trippel y Harvey, 1991; Punt *et al.*, 2014). Estas cantidades sirven como punto de referencia o valores umbrales a partir de los cuales se pueden esperar desviaciones con respecto a la tendencia central de los datos. Un enfoque similar es el que subyace al modelo de evaluación de Schaefer (1954) utilizado para evaluar el efecto del esfuerzo pesquero sobre los rendimientos de una pesquería donde la tasa de captura máxima en equilibrio se alcanza cuando la biomasa es el 50% de la capacidad de carga (Schnute, 1977). No obstante, el porcentaje del reclutamiento óptimo que aquí se propone para inferir la VAO puede ser variable pues se sabe que hay especies como *S. sagax* en la costa del Pacífico que pueden ser más sensibles a cambios abruptos en las condiciones ambientales (Zwolinski y Demer, 2014).

El efecto del número de reproductores de *O. libertate* sobre el reclutamiento exhibió la típica relación en forma de domo, muy similar a la forma que toma el modelo de stock-reclutamiento propuesto por Ricker (1954). Esto sugiere que el reclutamiento en la especie es regulado por un proceso de denso-dependencia en el cual un nivel suficientemente alto del stock reproductor puede tener un efecto reductor del

reclutamiento y viceversa (Chen *et al.*, 2002). Esto coincide con lo que reportado por Morales-Bojórquez y Nevárez-Martínez (2005) para *S. sagax* en el Golfo de California donde la relación entre el stock reproductor y el reclutamiento fue descrita adecuadamente por el modelo de Ricker (1954). En relación a la respuesta del reclutamiento de *O. libertate* considerando el efecto de los reproductores, se encontró que el óptimo se alcanza cuando el stock reproductor toma un valor de 248.263×10^7 . Además, si bien no se puede establecer una VAO considerando este predictor (pues no es una variable ambiental), el método arrojó que el reclutamiento óptimo se encuentra entre 120.5551 y 423.86143×10^7 reproductores. El nivel de reproductores que da el reclutamiento óptimo y el límite inferior del mismo al 50% son dos cantidades que si pueden ser de utilidad en el manejo de la especie ya que conocerlos permite hacer inferencias sobre el efecto esperado de la abundancia de reproductores sobre la clase anual. Estos indicadores se suman al parámetro de depleción (Chen *et al.*, 2002) el cual ha sido estimado en 16.8×10^7 reproductores de *O. libertate* en estudios recientes realizados por el IMIPAS en el sur del golfo de California.

La relación entre el reclutamiento *O. libertate* y la mediana del *IS* anual en la región también fue no lineal y en forma de domo. Este tipo de relación funcional ha sido documentada para múltiples especies de pelágicos menores en varias partes del mundo. Diversos autores han sugerido que el reclutamiento responde de esta forma debido a que los niveles excesivamente bajos o altos en la surgencia generan pobre enriquecimiento de la columna de agua y altas tasas de mortalidad larvaria respectivamente (Lasker, 1978; Bakun y Parrish, 1982; Peterman y Bradford, 1987). Ambos procesos (enriquecimiento y estabilidad) son mutuamente excluyentes y al anularse dan como resultado que el efecto sea en forma de domo o campana (Lluch-Cota *et al.*, 1999). En este sentido, la VAO del reclutamiento de *O. libertate* considerando el efecto del *IS* se estimó entre 5.286 y $22.716 \text{ m}^3/\text{s}/100 \text{ m}$ de línea de costa. Sin embargo, fuera de esos valores se observó una respuesta aún positiva del reclutamiento la cual fue más pronunciada cuando el *IS* fue nulo. Una explicación

a esto sería lo que mencionan Alonso-Rodríguez y Ochoa (2004) quienes encontraron que en la bahía de Mazatlán Sinaloa el mayor número de florecimientos algales se da durante el mes de mayo. Dichos florecimientos coinciden con el periodo de surgencia en calma según la climatología del IS de la región lo cual podría ser un factor clave para el éxito de la clase anual de la especie en algunos años (Lasker, 1978; Peterman y Bradford, 1987). Sobre la VAO y su concordancia con estudios previos, esta es diferente a lo que reportaron Nevárez-Martínez *et al.* (2008) en un estudio sobre la abundancia relativa (CPUE) de *S. sagax* y su relación con algunas variables ambientales en el Golfo de California. En dicho trabajo los autores concluyeron que el óptimo de la CPUE de la especie se alcanzaba a un nivel de surgencia de entre 60 y 80 m³/s. La discrepancia es atribuible al tipo variable de respuesta utilizada en ese estudio (CPUE), la cual se sabe que está influenciada por múltiples factores relacionados con la actividad pesquera (Maunder y Punt, 2004). También es posible que la VAO sea de mayor magnitud para *S. sagax* debido a que la surgencia es de mayor magnitud en la región central del Golfo de California (Lluch-Cota, 2000) y la especie se ha adaptado para que ciertos procesos biológicos como la reproducción prosperen a esa VAO (Lluch-Cota *et al.*, 1999).

Mucho se ha mencionado en esta tesis acerca de la importancia de la turbulencia como factor limitante del proceso de reclutamiento en peces. La revisión hecha por Mackenzie (2000) muestra que independientemente de la manera en que se mida el grado de energía cinética transferida de la atmósfera a la superficie del océano (turbulencia), es seguro que existe relación entre esta y múltiples procesos ecológicos que tienen lugar en la zona de mezcla y que definen el éxito del reclutamiento. Así, la forma más simple de estimar un índice de turbulencia es elevar la rapidez del viento al cubo (Bakun y Parrish, 1982; Husby y Nelson, 1982; Mackenzie, 2000; MacKenzie, 2002) aunque el que sea simple no implica que no haya sustento físico del mismo (Oakey y Elliott, 1982). De hecho, la turbulencia fue la base de los primeros estudios enfocados a entender como el viento, en extremo fuerte o débil, repercute en la mortalidad larvaria (Lasker, 1978) originando la

hipótesis de la VAO (Cury y Roy, 1989). Aquí se documentó que la relación entre el reclutamiento de *O. libertate* y el *IT* en el sur del golfo de California claramente es no lineal y que la VAO considerando el efecto del *IT* es de 79.561 y 106.673 m³/s³. Estos valores de la VAO son equivalentes a una rapidez del viento de entre 4.30 y 4.74 m/s y son menores a la generalización hecha por Cury y Roy (1989): la VAO del reclutamiento en peces está entre 5 y 6 m/s. No obstante, esta fue hecha considerando información biológica y de vientos provenientes de zonas muy activas en cuanto a la actividad del viento sobre la superficie del océano (Kämpf y Chapman, 2016). Este trabajo no es el único donde se ha evidenciado que la VAO en pelágicos menores considerando el efecto de la rapidez del viento puede ser menor de 5 a 6 m/s. En un estudio realizado por Diankha *et al.* (2018) se encontró que el reclutamiento de *S. aurita* y *S. maderensis* en la costa de Senegal se maximizaba en condiciones del *IT* menores a 100 m³/s³ (4.64 m/s). Así, queda demostrado que *O. libertate* prospera en una región donde el desarrollo de la intensidad de la turbulencia inducida por el viento es moderada, siendo sensible a condiciones extremas del *IT* anual.

10. CONCLUSIONES

10. 1. Patrón temporal y espacial de las variables ambientales en el sur del golfo de California durante 1988-2021

Los datos de surgencia y turbulencia aquí analizados indican que estas dos variables tienen un claro patrón estacional en la región (domo invertido). Los valores más altos para ambos índices se encontraron en los meses de invierno mientras que estos tienden a disminuir hacia el verano en los meses cálidos. El desarrollo histórico interanual sugiere una disminución continua en la magnitud de estos dos índices en los últimos años y cuya causa aún no está del todo clara. Además, por zona de pesca, el comportamiento histórico también es variable, dependiendo de la latitud geográfica. Respecto a La *TSM*, esta tiene un patrón estacional sinusoidal inverso al *IS* e *IT* pues para la región del sur del golfo de California los valores mínimos típicamente se encuentran durante los meses de invierno mientras que los más altos ocurren durante los meses de verano. Interanualmente la *TSM* parece tener un comportamiento estable. Sin embargo, el análisis de tendencia mostró que ocurrió una mayor alternancia entre periodos cálidos y fríos durante 2002 a 2011 mientras que de 2012 a 2021 la *TSM* de la región presentó una tendencia cálida, con un aumento de 0.47 °C con respecto a la década anterior. Históricamente esta variable también se comportó de manera distinta según la latitud geográfica siendo mayor en las zonas cerca de la boca del Golfo de California (zonas de pesca 4 y 5) y menor al norte de Sinaloa (zona de pesca 1) con diferencias mínimas en el patrón estacional por zonas de pesca dependiendo de la época del año.

10. 2. Pruebas de hipótesis estadísticas

Las distintas zonas de pesca de la pesquería de pelágicos menores del sur del golfo de California tienen un comportamiento propio dependiendo de la latitud geográfica. Las tres variables ambientales (*IS*, *IT* y *TSM*) mostraron una distribución distinta a la distribución normal en todas las zonas de pesca lo que condujo al uso de herramientas no paramétricas para la búsqueda de diferencias entre zonas de

pesca. Así, el *IT* se comportó estadísticamente diferente en la región al norte de Sinaloa (zonas de pesca 1 y 2) con respecto a la parte sur del área de estudio (zonas de pesca 4 y 5) lo cual implica condiciones de turbulencia diferentes en los extremos del sur del golfo de California y que se mantienen durante todo el año. Por otra parte, no fue posible establecer diferencias en el desarrollo del *IS* por zonas de pesca lo cual fue atribuido a la falta de resolución espacial y otras cuestiones relacionadas con el mismo, así como con la topografía de la zona. En contraste, el análisis no paramétrico respecto a la *TSM* por zonas de pesca arrojó resultados incongruentes pues la *TSM* de zonas de pesca contiguas fue estadísticamente igual dando como resultado 5 regiones diferentes las cuales al mismo tiempo se traslapan sugiriendo un comportamiento homogéneo de la *TSM* en el área de estudio. Esta contradicción se atribuyó a la falta de independencia de los datos de *TSM* por zona de pesca.

10. 3. GAM del reclutamiento de *Opisthonema libertate* en el sur del golfo de California 1988-2021.

El reclutamiento de *O. libertate* en la región ha variado de manera importante en el tiempo. Durante los primeros 10 años (1988-1998) este mantuvo niveles muy bajos (abundancia mediana de reclutas de 31.09×10^7 org., RIQ 10.71×10^7 org.) al igual que los reproductores (34.09×10^7 org., RIQ 7.71×10^7 org.). Posterior a eso se dió un crecimiento en el número de reclutas el cual ha tenido oscilaciones interanuales que se desfazan aproximadamente 3 años de los incrementos en el número de reproductores. También, se observó que estos datos no presentaron observaciones atípicas y que su distribución fue sesgada hacia valores cercanos a 0 (pero nunca igual a 0) sugiriendo distribución Gamma. Esto llevó a que el modelado del efecto de las variables ambientales sobre el reclutamiento se hiciera asumiendo dicha distribución de probabilidad. En este sentido, de los 9 GAM ajustados, el modelo que mejor desempeño demostró fue el modelo que utiliza los datos ambientales (*IS* e *IT*) como la mediana anual con 86.4% de devianza explicada y una capacidad predicativa del 90% y RMSE de 55.1831451×10^7 org., entre otras características deseadas. El diagnóstico a los residuos de dicho modelo indicó que estos fueron

válidos con respecto a los supuestos estadísticos básicos. Además, el modelo también cumplió con otros aspectos tales como una distribución de los valores ajustados estadísticamente igual a los valores observados de reclutamiento ($p < 0.05$) así como una alta correlación lineal entre los mismos ($\rho = 0.9104$). De esta manera el GAM seleccionado logró ajustar correctamente a los datos de reclutamiento de *O. libertate* en el sur del golfo de California durante 1988-2021 logrando representar satisfactoriamente la tendencia en los datos observados (sin sobreajustar o subestimar) considerando la influencia de los reproductores, el *IS* y el *IT*, estos dos últimos en términos anuales.

10. 4. Ventana ambiental óptima del reclutamiento de *Opisthonema libertate*

Aquí se propuso un criterio nuevo y no arbitrario para determinar la VAO del reclutamiento de *O. libertate* además de sugerir que esta metodología puede ser utilizada para otras especies y demás variables ambientales de interés. En este sentido, partiendo del análisis de los efectos parciales de las variables predictoras del GAM seleccionado se encontró que tanto reproductores como *IS* e *IT* tienen un efecto no lineal sobre el reclutamiento de la especie en la región. Este se maximiza a un valor intermedio del *IS* (14.891 m³/s/100 m de línea de costa) con una VAO de entre 5.286 y 22.716 m³/s/100 m de línea de costa. Por su parte, considerando el efecto del *IT*, el reclutamiento también es máximo a valores de turbulencia intermedios (92.11 m³/s³) cuya VAO es de entre 79.561 y 106.673 m³/s³. Estos resultados son evidencia sólida en favor de la teoría de la VAO planteada por Cury y Roy (1989) demostrando que las condiciones extremas en el desarrollo del *IS* e *IT* mediano anual influyen de manera negativa el éxito del reclutamiento de la especie en la región. Con base en estos resultados se acepta parcialmente la hipótesis de investigación aquí planteada pues si bien se demostró la existencia de un efecto sobre el reclutamiento de *O. libertate* por parte de las variables ambientales antes citadas, la VAO encontrada discrepó de la hipotetizada tras la revisión del estado del arte para la especie y afines en la región.

11. RECOMENDACIONES

11. 1. Futuras investigaciones

Cualquier trabajo de investigación es perfectible y debe de tener la característica de ser replicable, ya sea desarrollando los mismos objetivos o partiendo de nuevos objetivos, esto a la luz de información nueva, actualizada o proveniente de una fuente distinta. Es por eso que, considerando los posibles puntos de mejora del presente trabajo, se hacen las siguientes recomendaciones:

1. Obtener información satelital de vientos (por ejemplo, de QuickSCAT), replicar los métodos aquí desarrollados y evaluar el grado de congruencia (o disimilitud) de los nuevos resultados.
2. Obtener información de *TSM* de otras misiones que logren abarcar un periodo de tiempo mayor o en su caso probar si empalmar series de tiempo de *TSM* de distintos sensores es técnicamente válido.
3. Realizar un análisis de clusters para caracterizar el desarrollo de las variables ambientales en la región sur del golfo de California y comparar con lo aquí desarrollado sobre el tema.
4. Obtener un indicador de reclutas y reproductores que esté en una escala mensual. Esto permitiría parearlo con datos mensuales de las variables ambientales y poder observar tendencias y efectos estacionales.
5. Incorporar otras variables ambientales al proceso de modelado.
6. Actualizar las variables del modelo anualmente.
7. Realizar proyecciones para pronosticar cambios en el reclutamiento a partir de la expectativa en el desarrollo de las condiciones ambientales.
8. Realizar análisis de correlación cruzada entre la variable dependiente y las variables independientes para evaluar con que desfase se da el efecto de las variables ambientales sobre el reclutamiento.

Todo esto con el ánimo de generar información nueva que sea comparable con la del presente estudio, para así nutrir la discusión con respecto a estos temas y tratar

de vislumbrar el verdadero patrón que subyace al proceso de reclutamiento de *O. libertate*, la especie de pelágicos menores más importante de la región sur del Golfo de California México.

11. 2. Manejo de la especie

El reclutamiento de una especie marina sujeta a explotación es un aspecto esencial en la evaluación del stock. Esto vuelve imperativo que tanto investigadores como usuarios del recurso conozcan y entiendan cuales son los factores ajenos a este que causan variabilidad, sobre todo en el contexto de un ambiente tan cambiante como el que ahora se desarrolla. Así, se recomienda a los usuarios del recurso:

1. Tomar la información disponible en esta tesis como el punto de referencia más actualizado acerca de la influencia de viento (en términos de surgencia y turbulencia) sobre el reclutamiento de *O. libertate* en el sur del golfo de California.
2. Seguir de cerca las actualizaciones anuales de estos índices para saber que esperar en el desarrollo de la pesca, pues se demostró que condiciones extremas tienen un efecto negativo sobre el reclutamiento de la especie y por ende sobre los rendimientos futuros de la misma.
3. Programar cualquier posible cambio en los aspectos económico y social teniendo en cuenta siempre la información más actualizada del desarrollo de estas variables en la región.
4. Colaborar con las instituciones públicas o privadas que siguen de cerca el desarrollo de este recurso pesquero y su respuesta ante el ambiente, dada la relevancia económica y social de la actividad pesquera sardinera en la región.

12. LITERATURA CITADA

- Acal D. E. (1990). Biomasa y Rendimiento potencial de la sardina crinuda (*Opisthonema* spp.) en las costas de Sinaloa y Nayarit. *Ciencias Marinas*, 16(4): 61-73. <http://dx.doi.org/10.7773/cm.v16i4.710>.
- AGRICULTURA. 2020. Anuario estadístico de acuicultura y pesca 2020. AGRICULTURA, CONAPESCA. 291 p. http://nube.conapesca.gob.mx/sites/cona/dgppe/2020/ANUARIO_ESTADISTICO_DE_ACUACULTURA_Y_PESCA_2020.pdf.
- Ali Abd AlHameed K. (2022). Spearmans correlation coefficient in statistical analysis. *International Journal of Nonlinear Analysis and Applications*, 13(1): 3249-3255. <http://dx.doi.org/10.22075/ijnaa.2022.6079>.
- Alonso-Rodríguez R. y J. L. Ochoa. (2004). Hydrology of winter–spring “red tides” in Bahía de Mazatlán, Sinaloa, México. *Harmful Algae*, 3(2): 163-171. <http://doi.org/10.1016/j.hal.2003.10.002>.
- Álvarez-Borrego S. y J. R. Lara-Lara. 1991. The physical environment and primary productivity of the Gulf of California. p. 555-567. En Dauphin J.-P. y Simoneit B. R. Eds. *The Gulf of California and peninsular province of the Californias*. American Association of Petroleum Geologist, E.U.A., 834 p. <http://doi.org/10.1306/M47542C26>
- Allee W. C., O. Park, A. E. Emerson, T. Park y K. P. Schmidt. 1949. *Principles of animal ecology*. W. B. Saunders Co. Ltd., Philadelphia, 849 p. www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19502201180.
- Allen G. R. y R. Robertson. 1994. *Fishes of the tropical eastern Pacific*. University of Hawai Press, Hawai, 380 p. <http://uhpress.hawaii.edu/title/fishes-of-the-tropical-eastern-pacific/>.
- Amaya- Martínez P. A., A. J. Saavedra-Montes y E. I. Arango-Zuluaga. (2014). A statistical analysis of wind speed distribution models in the Aburrá Valley, Colombia. *CT&F Ciencia, Tecnología y Futuro*, 5(5): 121-136. <http://doi.org/10.29047/01225383.36>.

- Amodio S., M. Aria y A. D'Ambrosio. (2014). On concavity in nonlinear and nonparametric regression models. *Statistica*, 74(1): 85-98. <http://doi.org/10.6092/issn.1973-2201/4599>.
- Anderson C. N., C. H. Hsieh, S. A. Sandin, R. Hewitt, A. Hollowed, J. Beddington, R. M. May y G. Sugihara. (2008). Why fishing magnifies fluctuations in fish abundance. *Nature*, 452(7189): 835-839. <http://doi.org/10.1038/nature06851>.
- Badan A. 2003. The Atmosphere Over the Gulf of California. p. 205-212. En Velasco Fuentes O. U., Sheinbaum J.yOchoa J. Eds. *Nonlinear Processes in Geophysical Fluid Dynamics: A tribute to the scientific work of Pedro Ripa*. Springer Netherlands, Dordrecht, 376 p. http://doi.org/10.1007/978-94-010-0074-1_12
- Badan A., C. Dorman, M. Merrifield y C. Winant. (1991). The lower atmosphere over the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, 96: 16877-16896. <http://doi.org/10.1029/91JC01433>.
- Bakun A. 1973. Coastal Upwelling Indices, West coast of North America 1946-71. United States, National Marine Fisheries Service. NOAA Technical Report NMFS SSRF ; 671. 103 p. <http://repository.library.noaa.gov/view/noaa/9041>.
- Bakun A. 1975. Daily and Weekly Upwelling Indices, West Coast of North America, 1967-73. United States, National Marine Fisheries Service. NOAA Technical Report NMFS SSRF; 693. 124 p. <http://repository.library.noaa.gov/view/noaa/15387>.
- Bakun A. (1985). Comparative studies and the recruitment problem: Searching for generalizations. *CALCOFI Reports.*, 26: 30-40. <http://swfsc-publications.fisheries.noaa.gov/publications/CR/1985/8506.PDF>.
- Bakun A. (1990). Global Climate Change and Intensification of Coastal Ocean Upwelling. *Science*, 247(4939): 198-201. <http://do.org/10.1126/science.247.4939.198>.
- Bakun A. 1996. Patterns in the ocean: Ocean processes and marine population dynamics. University of California Sea Grant, in cooperation with Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, La Paz, Baja California Sur, San Diego, California, USA,, 323 p.

- Bakun A. y C. S. Nelson. (1991). The seasonal cycle of Wind stress curl in subtropical Eastern boundary current regions. *Journal Physics Oceanography*, 21: 1815-1834. [http://doi.org/10.1175/1520-0485\(1991\)021%3C1815:TSCOWS%3E2.0.CO;2](http://doi.org/10.1175/1520-0485(1991)021%3C1815:TSCOWS%3E2.0.CO;2).
- Bakun A. y R. H. Parrish. (1982). Turbulence, transport, and pelagic fish in the California and Peru current systems. *CALCOFI Rep.*, 23: 99-112. <http://swfsc-publications.fisheries.noaa.gov/publications/CR/1982/8205.PDF>.
- Beier E. (1997). A Numerical Investigation of the Annual Variability in the Gulf of California. *Journal of Physical Oceanography*, 27: 615-632. [http://doi.org/10.1175/1520-0485\(1997\)027<0615:ANIOTA>2.0.CO;2](http://doi.org/10.1175/1520-0485(1997)027<0615:ANIOTA>2.0.CO;2).
- Benson B. (2021). The normal distribution, an epistemological view. *St open*, 2: 1-16. <http://doi.org/10.48188/so.2.6>.
- Bernal G., P. Ripa y J. C. Herguera. (2001). Variabilidad oceanográfica y climática en el bajo Golfo de California: Influencias del trópico y Pacífico norte. *Ciencias Marinas*, 27(4): 595-617. <http://doi.org/10.7773/cm.v27i4.498>.
- Berry H. y I. Barrett. 1963. Gillraker analysis and speciation in the thread herring genus *Opisthonema*. *Inter-American Tropical Tuna Commission bulletin*. 81 p. <http://hdl.handle.net/1834/20386>.
- Beverton R. J. H. y S. J. Holt. 1957. *On the dynamics of exploited fish populations*. Springer Science+Business Media Dordrecht, U.K. , 533 p. <http://doi.org/10.1007/978-94-011-2106-4>.
- Borja A., A. Uriarte y J. Egaña. (2002). Environmental factors and recruitment of mackerel, *Scomber scombrus* L. 1758, along the north-east Atlantic coasts of Europe. *Fisheries Oceanography*, 11(2): 116-127. <http://doi.org/10.1046/j.1365-2419.2002.00190.x>.
- Bray N. A. (1988). Thermohaline Circulation in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, 93(C5): 4993-5020. <http://doi.org/10.1029/JC093iC05p04993>.
- Breheny P. y W. Burchett. (2017). Visualization of regression models using visreg. *The R Journal*, 9(2): 56-71. <http://doi.org/10.32614/RJ-2017-046>.

- Breiman L. y J. H. Friedman. (1985). Estimating Optimal Transformations for Multiple Regression and Correlation. *Journal of the American Statistical Association*, 80(391): 580-598. [10.1080/01621459.1985.10478157](https://doi.org/10.1080/01621459.1985.10478157).
- Burnham K. P. y D. R. Anderson. 2002. *Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach*. Springer, New York, 488 p. <http://doi.org/10.1007/b97636>.
- Camp E., A. B. Collins, R. N. M. Ahrens y K. Lorenzen. (2020). Fish Population Recruitment: What recruitment means and why it matters. *EDIS*, 1(2): 1-6. <http://doi.org/10.32473/edis-fa222-2020>.
- Cardinale M. y F. Arrhenius. (2000). The influence of stock structure and environmental conditions on the recruitment process of Baltic cod estimated using a generalized additive model. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*., 57(12): 2402-2409. <http://doi.org/10.1139/f00-221>.
- Carvalho D. (2019). An Assessment of NASA's GMAO MERRA-2 Reanalysis Surface Winds. *Journal of Climate*, 32(23): 8261-8281. <http://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0199.1>.
- Casella E., A. Molcard y A. Provenzale. (2011). Mesoscale vortices in the Ligurian Sea and their effect on coastal upwelling processes. *Journal of Marine Systems*, 88(1): 12-19. <http://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2011.02.019>.
- Castro R., C. A. Collins, T. A. Rago, T. Margolina y L. F. Navarro-Olache. (2017). Currents, transport, and thermohaline variability at the entrance to the Gulf of California (19–21 April 2013). *Ciencias Marinas*, 43(3): 173-190. <http://doi.org/10.7773/cm.v43i3.2771>.
- Cervantes-Hernandez P. y M. M. Manzano-Sarabia. 2017. *Procesamiento y análisis satelital*. Windows Image Manager. Universidad Autónoma de Sinaloa., Culiacán Sinaloa México., 125 p. <http://editorial.uas.edu.mx/VerLibro.php?id=272>.
- Cole J. y J. McGlade. (1998). Clupeoid population variability, the environment and satellite imagery in coastal upwelling systems. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 8: 445-471. <http://doi.org/10.1023/A:1008861224731>.

- Cowpertwait P. S. P. y A. V. Metcalfe. 2009. *Introductory Time Series with R*. Springer Science+Business Media, LLC., Spring Street, New York, USA., 254 p. <http://doi.org/10.1007/978-0-387-88698-5>.
- Cury P. y C. Roy. (1989). Optimal Environmental Window and Pelagic Fish Recruitment Success in Upwelling Areas. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 46: 670-680. <http://doi.org/10.1139/f89-086>.
- Cushing D. H. 1990. Plankton Production and Year-class Strength in Fish Populations: an Update of the Match/Mismatch Hypothesis. p. 249-293. En Blaxter J. H. S. y Southward A. J. Eds. *Advances in Marine Biology*. Academic Press, 314 p. [http://doi.org/10.1016/S0065-2881\(08\)60202-3](http://doi.org/10.1016/S0065-2881(08)60202-3)
- Chen D. G., J. R. Irvine y A. J. Cass. (2002). Incorporating Allee effects in fish stock-recruitment models and applications for determining reference points. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 59: 242-249. <http://doi.org/10.1139/f02-005>.
- Chen L., D. Li y S. Pryor. (2013). Wind speed trends over China: Quantifying the magnitude and assessing causality. *International Journal of Climatology*, 33: 2579-2590. <http://doi.org/10.1002/joc.3613>.
- Daskalov G. (1999). Relating fish recruitment to stock biomass and physical environment in the Black Sea using generalized additive models. *Fisheries Research*, 41: 1-23. [http://doi.org/10.1016/S0165-7836\(99\)00006-5](http://doi.org/10.1016/S0165-7836(99)00006-5).
- De Anda-Montañez J. A., A. Ramos-Rodríguez y S. Martínez-Aguilar. (2010). Effects of environmental variability on recruitment and bioeconomic modelling in the Pacific sardine (*Sardinops sagax caerulea*) fishery from Magdalena Bay, Baja California Sur, Mexico. *Scientia Marina*, 74: 25-35. <http://doi.org/10.3989/scimar.2010.74n1025>.
- Diankha O., A. Ba, P. Brehmer, T. Brochier, B. A. Sow, M. Thiaw, A. T. Gaye, F. Ngom y H. Demarcq. (2018). Contrasted optimal environmental windows for both sardinella species in Senegalese waters. *Fisheries Oceanography*, 27(4): 351-365. <http://doi.org/10.1111/fog.12257>.

- DOF. 2012. Acuerdo mediante el cual se da a conocer el Plan de Manejo Pesquero para la pesquería de Pelágicos Menores (sardinas, anchovetas, macarelas y afines) del noroeste de México. Diario Oficial de la Federación. México D. F. Jueves 8 de noviembre de 2012.
- DOF. 2022. Acuerdo por el que se da a conocer la Actualización de la Carta Nacional Pesquera. Diario Oficial de la Federación. México D. F. Martes 26 de julio de 2022.
- Durán-Campos E., E. Coria-Monter, M. A. Monreal-Gómez y D. A. Salas de León. (2022). Impact of the Blob 2014 and 2019 in the sea surface temperature and chlorophyll-a levels of the Gulf of California: a satellite-based study. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 50: 479-491. <http://dx.doi.org/10.3856/vol50-issue3-fulltext-2910>
- Ekman V. W. (1905). On the influence of the earth's rotation on ocean currents. *Arkiv för Matematik, Astronomi och Fysik*, 2(11): 1-51. <http://empslocal.ex.ac.uk/people/staff/gv219/classics.d/Ekman05.pdf>.
- Emery W. J., D. J. Baldwin, P. Schlüssel y R. W. Reynolds. (2001). Accuracy of in situ sea surface temperatures used to calibrate infrared satellite measurements. *Journal of Geophysical Research*, 106(C2): 2387-2405. <http://doi.org/10.1029/2000JC000246>.
- Eric U., M. O. O. Oti y C. E. Francis. (2021). A Study of Properties and Applications of Gamma Distribution. *African Journal of Mathematics and Statistics Studies*, 4: 52-65. <http://doi.org/10.52589/AJMSS-MR0DQ1DG>.
- Escalante F., J. E. Valdez-Holguín, S. Álvarez-Borrego y J. R. Lara-Lara. (2013). Temporal and spatial variation of sea surface temperature, chlorophyll a, and primary productivity in the Gulf of California. *Ciencias Marinas*, 39(2): 203-215. <http://doi.org/10.7773/cm.v39i2.2233>.
- Feng C., L. Li y A. Sadeghpour. (2020). A comparison of residual diagnosis tools for diagnosing regression models for count data. *BMC Medical Research Methodology*, 20: 1-21. <http://doi.org/10.1186/s12874-020-01055-2>.

- Fisher W., F. Krup, W. Schneider, C. Sommer, K. E. Carpenter y V. H. Niem. 1995. Guía FAO para la identificación de las especies para los fines de la pesca. Pacífico centrooriental. Roma Italia, 1813 p. www.fao.org/4/t0851s/t0851s00.htm.
- Fox-Kemper B., L. Johnson y F.-L. Qiao. 2022. Ocean near-surface layers. p. 65-94. En Meredith M. y Naveira Garabato A. Eds. Ocean Mixing. Elsevier, 369 p. <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-821512-8.00011-6>
- Fuiman L. A. y R. G. Werner. 2002. Fishery Science: The Unique Contributions of Early Life Stages. Malden MA: Blackwell Science., Oxford, UK., 326 p. www.wiley.com/en-us/Fishery+Science%3A+The+Unique+Contributions+of+Early+Life+Stages-p-9780632056613.
- Galindo-Cortes G., J. A. De Anda-Montañez, F. Arreguín-Sánchez, S. Salas y E. F. Balart. (2010). How do environmental factors affect the stock-recruitment relationship? The case of the Pacific sardine (*Sardinops sagax*) of the northeastern Pacific Ocean. Fisheries Research, 102: 173-183. <http://doi.org/10.1016/j.fishres.2009.11.010>.
- GMAO. 2015. MERRA-2 instM_2d_lfo_Nx: 2d, Monthly mean, Instantaneous, Single-Level, Assimilation, Land Surface Forcings V5.12.4. Greenbelt, MD, USA. GESDISC. (1 de marzo de 2023). doi:10.5067/11F99Y6TXN99.
- Gray J. S., R. Shiu-sun Wu y Y. Ying Or. (2002). Effects of hypoxia and organic enrichment on the coastal marine environment. Marine Ecology Progress Series, 238: 249-279. www.int-res.com/abstracts/meps/v238/p249-279/.
- Guisande C., J. M. Cabanas, A. R. Vergara y I. Riveiro. (2001). Effect of climate on recruitment success of Atlantic Iberian sardine *Sardina pilchardus*. Marine Ecology Progress Series, 223: 243-250. www.int-res.com/abstracts/meps/v223/p243-250/.
- Haddon M. 2011. Modelling and Quantitative Methods in Fisheries. Chapman & Hall, E.U.A., 407 p. <http://doi.org/10.1201/9781439894170>.
- Hastie T. J. y R. J. Tibshirani. (1986). Generalized Additive Models. Statistical science, 1(3): 297-318. www.jstor.org/stable/2245459.
- Hastie T. J. y R. J. Tibshirani. 1990. Generalized Additive Models. Chapman & Hall, Londres, 335 p. <http://doi.org/10.1201/9780203753781>.

- Helber R. W. y R. H. Weisberg. (2001). Equatorial Upwelling in the Western Pacific Warm Pool. *Marine Science Faculty Publications*, 106: 8989-9003. <http://doi.org/10.1029/2000JC000401>.
- Hernández-Lalinde J. D., F. R. Espinosa-Castro, E. Johe, J. G. Chacón-Rangel, C. A. Toloza-Sierra, M. K. Arenas-Torrado, S. M. Carrillo-Sierra y V. J. Bermúdez-Pirela. (2018). Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de Pearson: definición, propiedades y suposiciones. *Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica*, 37(5): 587-595. www.redalyc.org/articulo.oa?id=55963207025.
- Herrera-Cervantes H. (2019). Sea surface temperature, ocean color and wind forcing patterns in the Bay of La Paz, Gulf of California: Seasonal variability. *Atmósfera*, 32(1): 25-38. <http://doi.org/10.20937/atm.2019.32.01.03>.
- Hilborn R. y C. J. Walters. 1992. *Quantitative Fisheries Stock Assessment: Choice, Dynamics & Uncertainty*. Chapman & Hall, E.U.A., 570 p. <http://doi.org/10.1007/978-1-4615-3598-0>.
- Hill K. T., P. R. Crone y J. P. Zwolinski. 2019. Assessment of the pacific sardine resource in 2019 for U.S. management in 2019-2020. United States. National Marine Fisheries Service; Southwest Fisheries Science Center. NOAA Technical Memorandum NMFS; 615. 130 p. <http://repository.library.noaa.gov/view/noaa/20275>.
- 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. <http://core.ac.uk/download/pdf/225949122.pdf>.
- Hunsicker M. E., C. V. Kappel, K. A. Selkoe, B. S. Halpern, C. Scarborough, L. Mease y A. Amrhein. (2016). Characterizing driver–response relationships in marine pelagic ecosystems for improved ocean management. *Ecological Applications*, 26(3): 651-663. <http://doi.org/10.1890/14-2200>.
- Husby D. M. y C. S. Nelson. (1982). Turbulence and vertical stability in the California current. *CALCOFI Rep.*, 23: 113-129. http://calcofi.org/downloads/publications/calcofireports/v23/Vol_23_Husby___Nelson.pdf.

- Iglesias I., M. N. Lorenzo y M. Gomez-Gesteira. (2010). La temperatura superficial del mar como herramienta de predicción climática. ACT, 1: 95-108. <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5502981>.
- Jacob-Cervantes M. L. (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. www.gob.mx/imipas/documentos/revista-ciencia-pesquera-volumen-18-numero-2.
- Jacob-Cervantes M. L. 2012. Evaluación y manejo de pelágicos menores: Aplicación bioeconómica al stock de la región sur del Golfo de California. Tesis de Doctorado. Posgrado en Ciencias Biológico Agropecuarias y Pesqueras. Universidad Autónoma de Nayarit. Xalisco, Nayarit. 69 p. <http://dspace.uan.mx:8080/jspui/handle/123456789/1777>.
- Jacob-Cervantes M. L., E. Delgado-Robles, J. Payán-Alejo, J. Osuna-Soto y J. C. Díaz-Figueroa. 2021. Análisis integral de la pesquería de pelágicos menores del sur del golfo de California durante el 2020. AGRICULTURA-INAPESCA-CRIAP, Mazatlán, Sinaloa. 85 p.
- Jacob-Cervantes M. L., M. Gallardo-Cabello, X. Chiappa Carrara y A. Ruiz-Luna. (1992). 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. <http://revistas.ucr.ac.cr/index.php/rbt/article/view/24540>.
- Jacob-Cervantes M. L. y J. Payán-Alejo. 2021. Evaluación de las poblaciones de sardina crinuda (*Opisthonema libertate*, *O. medirastre* y *O. bulleri*) del sur del Golfo de California 2021. AGRICULTURA-INAPESCA-CRIAP-Mazatlán, Mazatlán, Sinaloa. 26 p.
- Jacobs Z. L., F. Jebri, D. E. Raitsos, E. Popova, M. Srokosz, S. C. Painter, F. Nencioli, M. Roberts, J. Kamau, M. Palmer y J. Wihsgott. (2020). Shelf-Break Upwelling and Productivity Over the North Kenya Banks: The Importance of Large-Scale Ocean Dynamics. Journal of Geophysical Research, 125(1): 2169-9275. <http://doi.org/10.1029/2019JC015519>.

- Jacox M. G., C. A. Edwards, E. L. Hazen y S. Bograd. (2018). Coastal Upwelling Revisited: Ekman, Bakun, and Improved Upwelling Indices for the U.S. West Coast. *Journal of Geophysical Research*, 123: 1-19. <http://doi.org/10.1029/2018JC014187>.
- Jafari M. y N. Ansari-Pour. (2019). Why, When and How to Adjust Your P Values? *Cell Journal*, 20(4): 604-607. <http://doi.org/10.22074/cellj.2019.5992>.
- Juillet-Leclerc A. y H. Schrader. (1987). Variations of upwelling intensity recorded in varved sediment from the Gulf of California during the past 3,000 years. *Nature*, 329: 146-149. <http://doi.org/10.1038/329146a0>.
- Kämpf J. y P. Chapman. 2016. *Upwelling Systems of the World. A Scientific Journey to the Most Productive Marine Ecosystems*. Springer International Publishing, 433 p. <http://doi.org/10.1007/978-3-319-42524-5>.
- Kruskal W. H. y W. A. Wallis. (1952). Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 47(260): 583-621. <http://doi.org/10.1080/01621459.1952.10483441>.
- Lanz E., J. López-Martínez, M. O. Nevárez-Martínez y J. Dworak. (2009). Small pelagic fish catches in the gulf of California associated with sea surface temperature and chlorophyll. *CALCOFI Rep.*, 50: 134-146. http://calcofi.org/downloads/publications/calcofireports/v50/134-146_Lanz.pdf.
- 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. <http://swfsc-publications.fisheries.noaa.gov/publications/CR/1978/7821.PDF>.
- Lavín M. F. y S. G. Marinone. 2003. An Overview of the Physical Oceanography of the Gulf of California. p. 173-204. En Velasco Fuentes O. U., Sheinbaum J. y Ochoa J. Eds. *Nonlinear Processes in Geophysical Fluid Dynamics: A tribute to the scientific work of Pedro Ripa*. Springer Netherlands, Dordrecht, 337 p. http://doi.org/10.1007/978-94-010-0074-1_11
- Li X. j., X. Liu, H. y. Zhang y W. k. Bao. (2022). Latitudinal patterns of climatic variables and influence of local topography on climatic variables in the dry valleys of

- southwestern China. *Journal of Mountain Science*, 19(5): 1348-1356. <http://doi.org/10.1007/s11629-021-7070-2>.
- Ligas A., F. Colloca, M. Lundy, A. Mannini, P. Sartor, M. Sbrana, A. Voliani y P. Belcari. (2015). Modeling the growth of recruits of European hake (*Merluccius merluccius*) in the northwestern Mediterranean Sea with generalized additive models. *Fishery Bulletin*, 113: 69-81. <http://doi.org/10.7755/FB.113.1.7>.
- López-Martínez J., E. B. Farach-Espinoza, H. Herrera-Cervantes y R. García-Morales. (2023). Long-Term Variability in Sea Surface Temperature and Chlorophyll a Concentration in the Gulf of California. *Remote Sensing*, 15(16): 1-24. <http://doi.org/10.3390/rs15164088>.
- Lluch-Belda D., D. B. Lluch-Cota, S. Hernandez-Vázquez, C. A. Salinas-Zavala y R. A. Schwartzlose. (1991). Sardine and anchovy spawning as related to temperature and upwelling in the California current system. *CALCOFI Rep.*, 32: 105-111. www.calcofi.com/publications/calcofireports/v32/Vol_32_Lluch-Belda_etal.pdf.
- Lluch-Belda D., R. A. Schwartzlose, R. Serra, R. Parrish, T. Kawasaki, D. Hedgecock y R. J. M. Crawford. (1992). Sardine and anchovy regime fluctuations of abundance in four regions of the world oceans: a workshop report. *Fisheries Oceanography*, 1: 339-347. <http://doi.org/10.1111/j.1365-2419.1992.tb00006.x>.
- Lluch-Cota S. (2000). Coastal upwelling in the eastern Gulf of California. *Oceanologica Acta*, 23(6): 731-740. [http://doi.org/10.1016/S0399-1784\(00\)00121-3](http://doi.org/10.1016/S0399-1784(00)00121-3).
- Lluch-Cota S. E., D. B. Lluch-Cota, D. Lluch-Belda, M. O. Nevárez-Martínez, A. Parés-Sierra y S. Hernández-Vázquez. (1999). Variability of sardine catch as related to enrichment, concentration, and retention processes in the central Gulf of California. *CALCOFI Rep.*, 40: 184-190. http://calcofi.org/downloads/publications/calcofireports/v40/CalCOFI_Rpt_Vol_40_1999.pdf.
- Lluch-Cota S. E., A. Parés-Sierra, V. O. Magaña-Rueda, F. Arreguín-Sánchez, G. Bazzino, H. Herrera-Cervantes y D. Lluch-Belda. (2010). Changing climate in the Gulf of California. *Progress In Oceanography*, 87: 114-126. <http://doi.org/10.1016/j.pocean.2010.09.007>.

- Mackenzie B. (2000). Turbulence, larval fish ecology and fisheries recruitment: A review of field studies. *Oceanologica Acta*, 23: 357-375. [http://doi.org/10.1016/S0399-1784\(00\)00142-0](http://doi.org/10.1016/S0399-1784(00)00142-0).
- MacKenzie B. R. (2002). Understanding the role of turbulence on fisheries production during the first century of ICES. *ICES Marine Science Symposia*, 215: 227-236. <http://doi.org/10.17895/ices.pub.8751>.
- Madani N., J. S. Kimball, A. P. Ballantyne, D. L. R. Affleck, P. M. van Bodegom, P. B. Reich, J. Kattge, A. Sala, M. Nazeri, M. O. Jones, M. Zhao y S. W. Running. (2018). Future global productivity will be affected by plant trait response to climate. *Scientific Reports*, 8: 1-10. <http://doi.org/10.1038/s41598-018-21172-9>.
- Magaña-Rueda V. 2004. Los impactos de El Niño en México. Dirección General de Protección Civil de la Secretaría de Gobernación, México, 229 p. www.atmosfera.unam.mx/wp-content/uploads/2022/09/EINino.pdf.
- Marín-Hernández E. (2021). A statistical approach for modeling shallow (<200 m) temperature profiles in the Pacific Ocean off northwestern Mexico. *Ciencias Marinas*, 47(3): 147-174. <http://doi.org/10.7773/cm.v47i3.3027>.
- Maunder M. N. y A. E. Punt. (2004). Standardizing catch and effort data: a review of recent approaches. *Fisheries Research*, 70(2-3): 141-159. <http://doi.org/10.1016/j.fishres.2004.08.002>.
- May R. C. 1974. Larval mortality in marine fishes and the critical period concept. p. 3-19. En Blaxter J. H. S. Ed., *The early life history of fish*. Springer, Berlín, 214 p. <http://doi.org/10.1007/978-3-642-65852-5>
- Mertz G. y R. A. Myers. (1994). Match/mismatch predictions of spawning duration versus recruitment variability. *Fisheries Oceanography*, 3(4): 236-245. <http://doi.org/10.1111/j.1365-2419.1994.tb00101.x>.
- Methot R. D. y C. R. Wetzel. (2013). Stock synthesis: A biological and statistical framework for fish stock assessment and fishery management. *Fisheries Research*, 142: 86-99. <http://doi.org/10.1016/j.fishres.2012.10.012>.

- Miftahuddin. (2016). Fundamental fitting of the SST data using linear regression models. 2016 12th International Conference on Mathematics, Statistics, and Their Applications (ICMSA): 128-133. <http://doi.org/10.1109/ICMSA.2016.7954324>.
- Montañez A. (2010). Effects of environmental variability on recruitment and bioeconomic modelling in the Pacific sardine (*Sardinops sagax caerulea*) fishery from Magdalena Bay, Baja California. *Scientia Marina*, 74(1): 25-35. <http://doi.org/10.3989/scimar.2010.74n1025>.
- Morales-Bojórquez E., V. M. Gómez-Muñoz, R. Félix-Uraga y R. M. Alvarado-Castillo. (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. <http://doi.org/10.3989/scimar.2003.67n125>.
- Morales-Bojórquez E. y M. O. Nevárez-Martínez. (2005). Spawner-recruit patterns and investigation of allee effect in pacific sardine (*Sardinops sagax*) in the Gulf of California, Mexico. *CALCOFI Rep.*, 46: 161-174. www.calcofi.com/publications/calcofireports/v46/Vol_46_Morales_Nevarez_Allee_Effect.pdf.
- Nevárez-Martínez M. O., M. Á. Cisneros-Mata y D. Lluch-Belda. 2008. Las capturas de sardina Monterrey *Sardinops sagax* (Jenyns, 1842) y su relación con el medio ambiente y el esfuerzo pesquero. p. 183-200. En López-Martínez J. Ed., *Variabilidad ambiental y Pesquerías de México*. Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca, México, 200 p. <http://dspace.cibnor.mx:8080/handle/123456789/1694>
- Nevárez-Martínez M. O., D. Lluch-Belda, M. Á. Cisneros-Mata, P. Santos-Molina, M. Á. Martínez-Zavala y S. E. Lluch-Cota. (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: 565-580. [http://doi.org/10.1016/S0079-6611\(01\)00041-6](http://doi.org/10.1016/S0079-6611(01)00041-6).
- Nevárez-Martínez M. O., E. Morales-Bojórquez, M. A. Martínez-Zavala, H. Villalobos, M. A. Luquin-Covarrubias, V. E. González-Máynez, J. López-Martínez, J. P. Santos-Molina, A. Ornelas-Vargas y F. Delgado-Vences. (2023). An integrated catch-at-age

- model for analyzing the variability in biomass of Pacific sardine (*Sardinops sagax*) from the Gulf of California, Mexico. *Frontiers in Marine Science*, 10: 1-19. <http://doi.org/10.3389/fmars.2023.940083>.
- NOAA. 2010. Upwelling index. Pacific Fisheries Environmental Laboratory. National Oceanic and Atmospheric Administration. E.U.A. www.pfel.noaa.gov.
- Oakey N. S. y J. A. Elliott. (1982). Dissipation within the surface mixed layer. *Journal of Physical Oceanography*, 12: 171-185. [http://doi.org/10.1175/1520-0485\(1982\)012%3C0171:DWTSML%3E2.0.CO;2](http://doi.org/10.1175/1520-0485(1982)012%3C0171:DWTSML%3E2.0.CO;2).
- Páez-Barrera F. 1976. Desarrollo gonadal, desove y fecundidad de sardina crinuda de la zona de Mazatlán basados en el análisis histológico de la gónada. *Memorias del Simposium nacional de recursos pesqueros masivos de México*, SEP, Ensenada, Baja California. México. 207-263 p.
- Paka V., V. Zhurbas, B. Rudels, D. Quadfasel, A. Korzh y D. Delisi. (2013). Microstructure measurements and estimates of entrainment in the Denmark Strait overflow plume. *Ocean Science*, 9: 1003–1014. <http://doi.org/10.5194/os-9-1003-2013>.
- Palacios-Hernández E. y L. Carrillo B. (2016). Comportamiento estacional de la capa de mezcla marina en la región norte del Golfo de California. *e-Gnosis*, 14: 1-25. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=73048315001>.
- Parés-Sierra A., A. Mascarenhas, S. G. Marinone y R. Castro. (2003). Temporal and spatial variation of the surface winds in the Gulf of California. *Geophysical Research Letters*, 30(6): 1-4. <http://doi.org/10.1029/2002GL016716>.
- Payán-Alejo J. 2019. Aplicación de un método estructurado por edades para estimación de la biomasa del complejo sardina crinuda (*Opisthonema libertate*, *O. medirastre* y *O. bulleri*), en el sur del golfo de California. Tesis de Doctorado. Facultad de Ciencias del Mar. Universidad Autónoma de Sinaloa. Mazatlán Sinaloa México. 84 p.
- Pedrin O. y A. A. Ancheita. 1976. Estadísticas básicas de la explotación de sardina en el noroeste de México. Instituto Nacional de la Pesca. México. 51 p.

<http://inapesca.gob.mx/portal/Publicaciones/Series/1970s-Serie-Informacion-i/SI-i79-Pedrin-y-Ancheita-1976-Estadisticas-pesqueras-sardina.pdf>.

Pedrin O., V. A. Sokolov y V. D. Molina. 1973. Las capturas por unidad de esfuerzo de la pesquería de sardina Monterrey en el Golfo de California de 1968 a 1972. Instituto Nacional de la Pesca. México. 32 p. http://delfin.cicimar.ipn.mx/Biblioteca/Busqueda/Reimpreso/543?Origen=coleccion_reimpresos.

Pérez-Brunius P., M. Lopez, A. Pares-Sierra y J. Pineda. (2007). Comparison of upwelling indices off Baja California derived from three different wind data sources. CALCOFI Rep., 48: 204-214. http://calcofi.com/publications/calcofireports/v48/Vol_48_Perez_Brunius.pdf.

Peterman R. M. y M. J. Bradford. (1987). Wind speed and mortality rate of a marine fish, the northern anchovy (*Engraulis mordax*). Science, 235: 354-356. <http://www.jstor.org/stable/1698609>.

Pierre M., T. Rouyer, S. Bonhommeau y J. M. Fromentin. (2018). Assessing causal links in fish stock–recruitment relationships. ICES Journal of Marine Science, 75(3): 903-911. <http://doi.org/10.1093/icesjms/fsx202>.

Pratt J. W. y J. D. Gibbons. 1981. Kolmogorov-Smirnov Two-Sample Tests. p. 318-344. En Pratt J. W. y Gibbons J. D. Eds. Concepts of Nonparametric Theory. Springer New York, New York, NY, 463 p. http://doi.org/10.1007/978-1-4612-5931-2_7

Punt A. E., F. Hurtado-Ferro y A. R. Whitten. (2014). Model selection for selectivity in fisheries stock assessments. Fisheries Research, 158: 124-134. <http://doi.org/10.1016/j.fishres.2013.06.003>.

Pya N. y S. N. Wood. (2016). A note on basis dimension selection in generalized additive modelling. arXiv preprint: 8. <http://doi.org/10.48550/arXiv.1602.06696>.

Quiñónez-Velázquez C. y J. F. Elorduy-Galay. 2004. Ambiente y Pesquería de Pelágicos Menores en el Noroeste de México. Comité Editorial CICIMAR-IPN, La Paz B. C. S., 186 p.

R Core Team. 2023. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria.

- Ramos-Rodríguez A., E. González-Rodríguez, H. Villalobos, C. Soldatini y E. Romero-Vadillo. (2020). Historical SST warming events in the Northeastern Pacific: How unique is the Warm Blob? *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 55: 110-118. <http://doi.org/10.22370/rbmo.2020.55.2.2496>.
- Ramsay T. O., D. Burnett Rt Fau Krewski y D. Krewski. (2003). The effect of concurrency in generalized additive models linking mortality to ambient particulate matter. *Epidemiology*, 14(1): 18-23. <http://doi.org/10.1097/00001648-200301000-00009>.
- Ricker W. E. (1954). Stock and recruitment. *Fishery Research*, 11: 559-623. <http://doi.org/10.1139/f54-039>.
- Ricker W. E. 1975. Computation and interpretation of biological statistics of fish populations. Environment Canada. Fisheries and Marine Service. 382 p. <http://publications.gc.ca/site/eng/480738/publication.html>.
- Robles-Tamayo C., J. Valdez-Holguín, R. García-Morales, G. Figueroa-Preciado, H. Herrera-Cervantes, J. López-Martínez y L. Enríquez-Ocaña. (2018). Sea Surface Temperature (SST) Variability of the Eastern Coastal Zone of the Gulf of California. *Remote Sensing*, 10(9): 1-23. <http://doi.org/10.3390/rs10091434>.
- Rose K. A., J. H. Cowan Jr, K. O. Winemiller, R. A. Myers y R. Hilborn. (2001). Compensatory density dependence in fish populations: importance, controversy, understanding and prognosis. *Fish and Fisheries*, 2(4): 293-327. <http://doi.org/10.1046/j.1467-2960.2001.00056.x>.
- Roy C., P. Cury y S. Kifani. (1992). Pelagic fish recruitment success and reproductive strategy in upwelling areas: environmental compromises. *South African Journal of Marine Science*, 12(1): 135-146. <http://doi.org/10.2989/02577619209504697>.
- Ruíz-Domínguez M., C. Quiñónez-Velázquez, D. I. Arizmendi-Rodríguez, V. Gómez-Muñoz y M. O. Nevárez-Martínez. (2021). Assessment of the exploitable biomass of thread herring (*Opisthonema* spp.) in northwestern Mexico. *Acta oceanologica sinica.*, 40(9): 53-65. <http://doi.org/10.1007/s13131-021-1785-3>.
- Ruiz-Luna A. y L. Lyle. (1992). Fluctuaciones periódicas de la captura de sardina crinuda (*Opisthonema* spp.) en el Golfo de California, 1972-1990. *CALCOFI Rep.*, 33: 124-129.

http://calcofi.org/downloads/publications/calcofireports/v33/Vol_33_Ruiz___Lyle.pdf.

- Sanchez-Cabeza J.-A., C. A. Herrera-Becerril, J. L. Carballo, B. Yáñez, L. F. Álvarez-Sánchez, J.-G. Cardoso-Mohedano y A. C. Ruiz-Fernández. (2022). Rapid surface water warming and impact of the recent (2013–2016) temperature anomaly in shallow coastal waters at the eastern entrance of the Gulf of California. *Progress In Oceanography*, 202: 1-9. <http://doi.org/10.1016/j.pocean.2022.102746>.
- Sánchez R., F. Sánchez y J. Gil. (2003). The optimal environmental window that controls hake (*Merluccius merluccius*) recruitment in the Cantabrian Sea. *ICES Marine Science Symposia*, 219: 415-417. <http://doi.org/10.17895/ices.pub.19271945>.
- Sastry J. S. y R. S. D'souza. (1972). Upwelling upward mixing in the Arabina sea. *Indian Journal of Marine Sciences*, 1: 12-17. <http://nopr.niscpr.res.in/handle/123456789/39580>.
- SCS. 2016. Southern Gulf of California Small Pelagics, Purse Seine Fishery, Sinaloa & Nayarit, Mexico. MSC, SCS Global Services. Mazatlán, Sinaloa, México. 265 p.
- Schaefer M. (1954). Some aspects of the dynamics of populations important to the management of the commercial marine fisheries. *Bulletin of Mathematical Biology*, 1(2): 253-279. [http://doi.org/10.1016/S0092-8240\(05\)80049-7](http://doi.org/10.1016/S0092-8240(05)80049-7).
- Schnute J. (1977). Improved Estimates from the Schaefer Production Model: Theoretical Considerations. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 34(5): 583-603. <http://doi.org/10.1139/f77-094>.
- Schwing F. B., M. O. Farrell, J. M. Steger y K. Baltz. 1996. Coastal upwelling indices west coast of North America 1946-95. NOAA-TM-NMFS-SWFSC-231. 32 p. <http://swfsc-publications.fisheries.noaa.gov/publications/TM/SWFSC/NOAA-TM-NMFS-SWFSC-231.pdf>.
- Sedliačková Z., I. Pobočíková, M. Michalková y D. Jurášová. (2022). Wind speed modeling using Weibull distribution: A case of Liptovský Mikuláš, Slovakia. *MATEC Web Conf.*, 357: 1-10. <http://doi.org/10.1051/matecconf/202235708005>.

- Sharma R., C. E. Porch, E. A. Babcock, M. N. Maunder y A. E. Punt. (2019). Recruitment: Theory, estimation, and application in fishery stock assessment models. *Fisheries Research*, 217: 1-4. <http://doi.org/10.1016/j.fishres.2019.03.015>.
- Shepherd J. G. (1982). A versatile new stock-recruitment relationship for fisheries, and the construction of sustainable yield curves. *Journal du Conseil Exploration Mer*, 40(1): 67-75. <http://doi.org/10.1093/icesjms/40.1.67>.
- Simons R. A. y C. John. 2022. ERDDAP. NOAA/NMFS/SWFSC/ERD. Monterey, CA. <http://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap>
- Simpson G. L. (2018). Modelling Palaeoecological Time Series Using Generalised Additive Models. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 6: 1-21. <http://doi.org/10.3389/fevo.2018.00149>.
- Smith P. E. (1985). Year-class strength and survival of 0-group clupeoids. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences.*, 42: 69-82. <http://doi.org/10.1139/f85-263>.
- Sparre P. y S. C. Venema. 1997. Introducción a la evaluación de recursos pesqueros tropicales. Parte 1. Manual. FAO 420 p. <http://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/w5449s>.
- Stewart R. H. 2008. Introduction to Physical Oceanography. Open Textbook Library, 346 p. <https://open.umn.edu/opentextbooks/textbooks/20>.
- Thomas S. R., S. Nicolau, O. Martínez-Alvarado, D. J. Drew y H. C. Bloomfield. (2021). How well do atmospheric reanalyses reproduce observed winds in coastal regions of Mexico? *Meteorological Applications*, 28(5): 1-13. <http://doi.org/10.1002/met.2023>.
- Torre F. D. I. y T. Kanade. 2006. Discriminative cluster analysis. In *Proceedings of the 23rd international conference on Machine learning*, pp. 241–248. Pittsburgh, Pennsylvania, USA: Association for Computing Machinery.
- Trippel E. A. y R. C. Chamber. 1997. The early life history of fishes and its role in recruitment processes p. 515-549. En Chamber R. C.yTrippel E. A. Eds. *Early Life History and Recruitment in Fish Populations* Chapman & Hall, 596 p. <http://doi.org/10.1007/978-94-009-1439-1>

- Trippel E. A. y H. H. Harvey. (1991). Comparison of Methods Used to Estimate Age and Length of Fishes at Sexual Maturity Using Populations of White Sucker (*Catostomus commersoni*). Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 48(8): 1446-1459. <http://doi.org/10.1139/f91-172>.
- Valdés-Barrón M., J. C. Peláez-Chávez, R. Bonifaz-Alfonzo, D. Riveros- Rosas, V. Velasco-Herrera y H. Estévez-Pérez. (2013). UVB solar radiation climatology for Mexico. Geofísica Internacional, 52(1): 31-42. [http://doi.org/10.1016/S0016-7169\(13\)71460-0](http://doi.org/10.1016/S0016-7169(13)71460-0).
- Vallarta-Zárate J. R. 2012. 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. Tesis de Maestría. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. Universidad Nacional Autónoma de México. Mazatlán, Sinaloa. 119 p.
- Vallarta-Zárate J. R. y M. L. Jacob-Cervantes. 2014. La pesca de sardina crinuda (*Opisthonema* spp.) del sur del golfo de California y su relación con la variabilidad ambiental. p. 185-203. En Flores-Campaña L. M., Moran-Angulo R. E. y Karam-Quiñones C. Eds. Sinaloa y el Cambio Climático Global. Universidad Autónoma de Sinaloa, Sinaloa, 300 p.
- Walters C. y D. Ludwig. (1981). Effects of measurement errors on the assessment stock-recruitment relationships. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 38: 704-710. <http://doi.org/10.1139/f81-093>.
- Wang Q., L. Purrafee Dizaj, J. Huang, K. Kumar Sarker, C. Kevrekidis, B. Reichenbacher, H. Reza Esmaeili, N. Straube, T. Moritz y C. Li. (2022). Molecular phylogenetics of the Clupeiformes based on exon-capture data and a new classification of the order. Molecular Phylogenetics and Evolution, 175: 1-13. <http://doi.org/10.1016/j.ympev.2022.107590>.
- White A. E., F. G. Prahl, R. M. Letelier y B. N. Popp. (2007). Summer surface waters in the Gulf of California: Prime habitat for biological N₂ fixation. Global Biogeochemical Cycles, 21(2): 1-11. <http://doi.org/10.1029/2006GB002779>.

- Wood S. N. 2017. Generalized Additive Models. An Introduction with R. Chapman and Hall/CRC, New York, 384 p. <http://doi.org/10.1201/9781315370279>.
- Wood S. N. 2022. Mixed GAM Computation Vehicle with Automatic Smoothness Estimation "mgcv". The Comprehensive R Archive Network. v.1.8-40.
- Zamora-Sarabia F. K. G., F. Arreguín-Sánchez, J. A. De Anda M. y M. L. Jacob-Cervantes. (2022). Effect of sea surface temperature on the growth performance of the thread herring *Opisthonema libertate* (Günther, 1868) in the southern Gulf of California. Lat. Am. J. Aquat. Res., 50(1): 31-38. <http://doi.org/10.3856/vol50-issue1-fulltext-2746>.
- Zar J. H. 1995. Biostatistical Analysis. Prentice Hall, New Jersey, EUA, 662 p.
- Zhabin I., N. Vanin y E. Dmitrieva. (2019). Summer Wind-driven Upwelling and Tidal Mixing on the Western Kamchatka Shelf in the Sea of Okhotsk. Russian Meteorology and Hydrology, 44: 130-135. <http://doi.org/10.3103/S1068373919020067>.
- Zimmerman D. W. y B. D. Zumbo. (1992). Correction for Nonindependence of Sample Observations in ANOVA F Tests. The Journal of Experimental Education, 60(4): 367-381. <http://doi.org/10.1080/00220973.1992.9943874>.
- Zwolinski J. P. y D. A. Demer. (2014). Environmental and parental control of Pacific sardine (*Sardinops sagax*) recruitment. ICES Journal of Marine Science, 71(8): 2198-2207. <http://doi.org/10.1093/icesjms/fst173>.

13. ANEXOS

Anexo 1. Marco de datos empleado para ajustar el GAM con el criterio de datos ambientales mediana de mayo para evaluar el efecto de la surgencia, turbulencia y un *proxy* de TSM sobre el reclutamiento de la sardina crinuda *O. libertate* en el sur del golfo de California 1988-2021.

Año	<i>IS</i>	<i>IT</i>	<i>ONI</i>
1988	21.8262	82.9205	-0.9
1989	22.3904	71.7464	-0.6
1990	33.6298	76.2751	0.3
1991	7.7568	56.8446	0.5
1992	1.2077	63.0117	1.1
1993	-11.9770	61.6351	0.7
1994	-0.8983	71.7153	0.4
1995	5.0368	58.9245	0.1
1996	-6.0567	57.7815	-0.3
1997	-4.7175	60.8521	0.8
1998	30.2476	119.2377	0.5
1999	3.4424	76.6789	-1
2000	-4.8863	59.8960	-0.7
2001	0.3585	86.3003	-0.3
2002	21.2983	81.3314	0.4
2003	-9.4253	82.2926	-0.3
2004	-14.0756	63.0612	0.2
2005	-4.6742	56.8238	0.3
2006	-2.9566	64.2974	-0.1
2007	-7.1004	68.9297	-0.4
2008	-8.7751	83.6201	-0.8
2009	-7.3952	38.7298	0
2010	-22.1446	82.7866	-0.2
2011	6.4111	93.2483	-0.6
2012	-5.5006	62.5113	-0.3
2013	-9.2829	83.9037	-0.4
2014	-2.4914	73.3128	0.2
2015	8.5792	97.7481	0.9
2016	9.1592	65.3181	0.4
2017	-2.5122	70.3901	0.3
2018	2.8654	74.8896	-0.2
2019	7.0106	73.4083	0.5
2020	-8.3224	47.3384	-0.1
2021	-5.2259	53.5123	-0.5

IS, índice de surgencia ($m^3/s/100 m$); *IT*, índice de turbulencia (m^3/s^3); *ONI*, índice de El Niño oceánico (en °C).

Anexo 2. Marco de datos empleado para ajustar el GAM con el criterio de datos ambientales mediana de mayo a junio para evaluar el efecto de la surgencia, turbulencia y un *proxy* de TSM sobre el reclutamiento de la sardina crinuda *O. libertate* en el sur del golfo de California 1988-2021.

Año	IS	IT	ONI
1988	16.3042	67.0456	-1.3
1989	33.9425	64.5247	-0.4
1990	30.2099	66.4283	0.3
1991	0.8828	60.3497	0.6
1992	-3.9087	64.0239	0.7
1993	-13.7725	61.1135	0.6
1994	-14.0139	64.6432	0.4
1995	-5.0491	57.3151	0
1996	-8.3579	61.0819	-0.3
1997	-8.2668	63.2512	1.2
1998	-4.8882	100.4006	-0.1
1999	6.3000	73.5444	-1
2000	-10.2355	73.3563	-0.6
2001	-8.6220	75.4292	-0.1
2002	7.3029	83.9317	0.7
2003	-13.3027	80.6952	-0.2
2004	-12.5660	62.1653	0.3
2005	-4.9771	62.2714	0.1
2006	-7.8571	54.0532	0
2007	-8.3423	59.5359	-0.5
2008	-10.7336	73.6254	-0.6
2009	-6.8571	62.7355	0.3
2010	-13.5178	60.7804	-0.7
2011	-5.0838	71.9885	-0.4
2012	-7.4487	65.6534	0
2013	-9.8300	79.4528	-0.4
2014	-4.9876	66.1412	0.2
2015	2.8696	82.5422	1.2
2016	4.4070	60.6377	-0.1
2017	-3.4208	67.1967	0.3
2018	-2.8901	75.6349	0
2019	2.3704	68.8237	0.5
2020	-8.8379	49.9674	-0.3
2021	-6.3633	67.1038	-0.4

IS, Índice de surgencia ($m^3/s/100 m$); IT, índice de turbulencia (m^3/s^3); ONI, Índice de El Niño oceánico (en °C).

Anexo 3. Marco de datos empleado para ajustar el GAM con el criterio de datos ambientales mediana de mayo a julio para evaluar el efecto de la surgencia, turbulencia y un *proxy* de TSM sobre el reclutamiento de la sardina crinuda *O. libertate* en el sur del golfo de California 1988-2021.

Año	<i>IS</i>	<i>IT</i>	<i>ONI</i>
1988	4.5123	51.6391	-1.3
1989	17.8988	57.3030	-0.3
1990	6.0620	54.4374	0.3
1991	-2.5085	52.4536	0.7
1992	-10.9545	62.5590	0.4
1993	-12.5241	55.6384	0.3
1994	-27.0472	60.3566	0.4
1995	-7.2906	48.5250	-0.2
1996	-8.3878	53.3787	-0.3
1997	-12.5343	58.2949	1.6
1998	-4.0073	63.0365	-0.8
1999	-8.1884	64.5083	-1.1
2000	-14.2130	69.3905	-0.6
2001	-10.8756	54.6713	-0.1
2002	0.1866	64.8772	0.8
2003	-17.1800	71.2173	0.1
2004	-13.2101	60.5901	0.5
2005	-4.6742	61.8785	-0.1
2006	-9.7273	54.8701	0.1
2007	-11.3273	68.9297	-0.6
2008	-11.7766	65.3453	-0.4
2009	-7.3952	59.6540	0.5
2010	-13.0928	66.1006	-1
2011	-9.5571	54.6495	-0.5
2012	-7.0331	53.8465	0.2
2013	-10.3772	61.9381	-0.4
2014	-4.6133	45.8220	0
2015	-2.3167	64.5788	1.5
2016	2.7321	54.7711	-0.4
2017	-4.3294	55.5214	0.1
2018	-3.2779	59.7555	0.1
2019	1.0291	67.3738	0.3
2020	-8.3224	49.5008	-0.4
2021	-5.2259	61.3190	-0.4

IS, Índice de surgencia ($m^3/s/100 m$); *IT*, índice de turbulencia (m^3/s^3); *ONI*, Índice de El Niño oceánico (en °C).

Anexo 4. Marco de datos empleado para ajustar el GAM con el criterio de datos ambientales mediana de mayo a agosto para evaluar el efecto de la surgencia, turbulencia y un *proxy* de *TSM* sobre el reclutamiento de la sardina crinuda *O. libertate* en el sur del golfo de California 1988-2021.

Año	<i>IS</i>	<i>IT</i>	<i>ONI</i>
1988	3.5367	50.9690	-1.1
1989	11.1662	55.3019	-0.3
1990	6.2764	46.1894	0.4
1991	-0.2011	50.7135	0.6
1992	-11.3215	56.7340	0.1
1993	-11.8883	55.8441	0.3
1994	-25.4569	56.7926	0.4
1995	-8.3483	57.3151	-0.5
1996	-7.2222	58.4634	-0.3
1997	-9.3830	53.7435	1.9
1998	-1.4404	58.9700	-1.1
1999	-10.6301	64.2300	-1.1
2000	-10.2355	62.6618	-0.5
2001	-10.0781	49.8821	-0.1
2002	-10.1492	55.8281	0.9
2003	-19.9397	66.0094	0.2
2004	-13.2356	48.0938	0.6
2005	-3.7114	56.8023	-0.1
2006	-7.8571	50.5722	0.3
2007	-12.9181	62.4361	-0.8
2008	-13.2306	59.3732	-0.2
2009	-6.8571	46.4574	0.6
2010	-11.8410	55.0918	-1.3
2011	-9.0128	49.0108	-0.6
2012	-7.4768	53.4726	0.4
2013	-9.3014	57.0601	-0.3
2014	-4.5992	40.4636	0.1
2015	-3.0899	46.0682	1.9
2016	0.3450	44.0909	-0.5
2017	-4.5801	50.2332	-0.1
2018	-3.1652	45.6894	0.2
2019	-0.0343	61.1922	0.1
2020	-7.5170	58.9805	-0.6
2021	-5.5721	51.6841	-0.5

IS, Índice de surgencia ($m^3/s/100 m$); *IT*, índice de turbulencia (m^3/s^3); *ONI*, Índice de El Niño oceánico (en °C).

Anexo 5. Marco de datos empleado para ajustar el GAM con el criterio de datos ambientales mediana de mayo a septiembre para evaluar el efecto de la surgencia, turbulencia y un proxy de TSM sobre el reclutamiento de la sardina crinuda *O. libertate* en el sur del golfo de California 1988-2021.

Año	<i>IS</i>	<i>IT</i>	<i>ONI</i>
1988	4.5123	49.6049	-1.2
1989	9.4746	52.0045	-0.2
1990	6.0620	40.2245	0.4
1991	2.2005	47.3691	0.6
1992	-5.0141	44.4563	-0.1
1993	-5.2313	60.5919	0.2
1994	-23.5412	52.2341	0.6
1995	-8.1502	56.9280	-0.8
1996	-6.0567	57.7815	-0.4
1997	-6.4565	55.9908	2.1
1998	-2.3617	63.4171	-1.3
1999	-8.3275	66.4925	-1.2
2000	-11.1925	64.9323	-0.5
2001	-9.2806	61.7164	-0.2
2002	-9.7196	61.3651	1
2003	-18.7048	71.4994	0.3
2004	-10.8621	46.8890	0.7
2005	-4.1475	55.8560	-0.1
2006	-8.4530	54.8701	0.5
2007	-13.5423	60.8944	-1.1
2008	-14.1162	60.4931	-0.2
2009	-8.7820	46.3273	0.7
2010	-10.2623	54.7233	-1.6
2011	-6.8878	44.6924	-0.8
2012	-6.3402	58.4767	0.4
2013	-9.3199	65.0764	-0.3
2014	-5.3619	45.8220	0.2
2015	-2.3167	48.1331	2.2
2016	-4.5419	47.9799	-0.6
2017	-5.8678	50.6018	-0.4
2018	-3.0524	42.0561	0.5
2019	0.1801	54.5684	0.2
2020	-2.4480	49.5008	-0.9
2021	-4.5600	47.1864	-0.7

IS, Índice de surgencia ($m^3/s/100 m$); *IT*, índice de turbulencia (m^3/s^3); *ONI*, Índice de El Niño oceánico (en °C).

Anexo 6. Marco de datos empleado para ajustar el GAM con el criterio de datos ambientales mediana de mayo a octubre para evaluar el efecto de la surgencia, turbulencia y un *proxy* de *TSM* sobre el reclutamiento de la sardina crinuda *O. libertate* en el sur del golfo de California 1988-2021.

Año	<i>IS</i>	<i>IT</i>	<i>ONI</i>
1988	4.3816	49.2593	-1.5
1989	9.1565	51.7998	-0.2
1990	10.0434	38.7390	0.3
1991	6.1758	46.3846	0.8
1992	0.6814	47.5673	-0.2
1993	8.6075	55.8441	0.1
1994	-16.9266	53.6513	0.7
1995	-5.6255	57.9262	-1
1996	-1.5942	59.1950	-0.4
1997	-2.9729	56.6375	2.3
1998	-0.0557	64.5651	-1.4
1999	-8.2579	65.5004	-1.3
2000	-5.0624	70.4954	-0.6
2001	-6.6907	69.8053	-0.3
2002	0.4854	62.7147	1.2
2003	-13.6569	71.3583	0.3
2004	-7.5005	56.5090	0.7
2005	-4.3233	56.8023	-0.3
2006	-7.8571	58.3836	0.8
2007	-12.9181	64.2568	-1.3
2008	-14.1771	59.9167	-0.4
2009	-8.2897	48.9798	1
2010	-9.4221	61.8406	-1.6
2011	-4.9702	49.0108	-1
2012	-5.0301	60.4940	0.3
2013	-5.8978	65.7417	-0.2
2014	-4.5040	62.6613	0.5
2015	0.0499	58.3437	2.4
2016	0.3450	47.8502	-0.7
2017	-3.4208	49.6487	-0.7
2018	-1.0311	44.2517	0.8
2019	1.4795	54.0038	0.3
2020	2.7110	49.4459	-1.2
2021	-2.7066	49.0500	-0.8

IS, Índice de surgencia ($m^3/s/100 m$); *IT*, índice de turbulencia (m^3/s^3); *ONI*, Índice de El Niño oceánico (en °C).

Anexo 7. Marco de datos empleado para ajustar el GAM con el criterio de datos ambientales mediana de mayo a noviembre para evaluar el efecto de la surgencia, turbulencia y un *proxy* de *TSM* sobre el reclutamiento de la sardina crinuda *O. libertate* en el sur del golfo de California 1988-2021.

Año	<i>IS</i>	<i>IT</i>	<i>ONI</i>
1988	6.1227	49.6049	-1.8
1989	11.3638	55.2955	-0.2
1990	12.7289	41.2232	0.4
1991	7.7568	50.4358	1.2
1992	1.3769	50.6784	-0.3
1993	12.2339	56.0498	0
1994	-11.7780	60.2437	1
1995	-3.4495	58.9245	-1
1996	1.1213	60.6681	-0.4
1997	-1.2283	59.7549	2.4
1998	3.4466	73.3755	-1.5
1999	-8.1884	66.4925	-1.5
2000	0.1223	72.5479	-0.7
2001	-4.3960	71.2346	-0.3
2002	8.7504	69.0542	1.3
2003	-9.4253	72.7418	0.4
2004	-4.0564	60.5901	0.7
2005	-3.0510	56.8238	-0.6
2006	-2.4968	58.4515	0.9
2007	-10.2533	64.5357	-1.5
2008	-12.0595	61.1631	-0.6
2009	-7.3952	51.7304	1.4
2010	-5.0791	66.5333	-1.6
2011	-4.1700	51.1899	-1.1
2012	1.1135	62.5113	0.1
2013	-1.6870	68.7429	-0.2
2014	-2.4914	60.2274	0.6
2015	2.7509	61.0802	2.6
2016	3.6074	47.9799	-0.7
2017	0.8117	50.6018	-0.8
2018	1.5644	48.4898	0.9
2019	4.2620	54.0881	0.5
2020	4.4878	55.0172	-1.3
2021	1.1994	53.5123	-1

IS, Índice de surgencia ($m^3/s/100 m$); *IT*, índice de turbulencia (m^3/s^3); *ONI*, Índice de El Niño oceánico (en °C).

Anexo 8. Marco de datos empleado para ajustar el GAM con el criterio de datos ambientales mediana de mayo a diciembre para evaluar el efecto de la surgencia, turbulencia y un *proxy* de *TSM* sobre el reclutamiento de la sardina crinuda *O. libertate* en el sur del golfo de California 1988-2021.

Año	<i>IS</i>	<i>IT</i>	<i>ONI</i>
1988	9.9899	50.9690	-1.8
1989	13.3920	55.3019	-0.1
1990	16.5703	50.3312	0.4
1991	9.9649	52.2128	1.5
1992	6.2228	56.7340	-0.1
1993	15.5937	61.1135	0.1
1994	-3.8594	63.7762	1.1
1995	-1.8997	60.3196	-1
1996	2.3614	62.8138	-0.5
1997	0.0485	63.8035	2.4
1998	10.6226	81.3636	-1.6
1999	2.1991	67.3552	-1.7
2000	4.1340	72.8692	-0.7
2001	-2.8571	75.4292	-0.3
2002	13.0142	71.3095	1.1
2003	-4.7209	80.1449	0.4
2004	0.0341	64.5433	0.7
2005	-0.6602	62.2714	-0.8
2006	0.1073	62.6215	0.9
2007	-7.8974	68.7995	-1.6
2008	-11.5310	63.8134	-0.7
2009	-5.9413	62.2778	1.6
2010	-3.4928	66.3169	-1.6
2011	0.5168	55.0878	-1
2012	2.1819	65.5929	-0.2
2013	0.9958	68.9714	-0.3
2014	0.7400	62.8726	0.7
2015	4.9194	64.2958	2.6
2016	4.6389	49.7211	-0.6
2017	2.4264	53.8981	-1
2018	4.0309	51.7626	0.8
2019	5.4623	54.9158	0.5
2020	6.4331	56.4216	-1.2
2021	6.2168	56.9572	-1

IS, Índice de surgencia ($m^3/s/100 m$); *IT*, índice de turbulencia (m^3/s^3); *ONI*, Índice de El Niño oceánico (en °C).

Anexo 9. Marco de datos empleado para ajustar el GAM con el criterio de datos ambientales mediana anual para evaluar el efecto de la surgencia, turbulencia y un *proxy* de TSM sobre el reclutamiento de la sardina crinuda *O. libertate* en el sur del golfo de California 1988-2021.

Año	<i>IS</i>	<i>IT</i>	<i>ONI</i>
1988	18.6781	66.5939	-1.15
1989	20.2230	60.1052	-0.35
1990	34.4551	73.8644	0.3
1991	24.4609	75.3261	0.6
1992	16.7075	64.9242	0.55
1993	21.6575	68.1389	0.3
1994	8.4846	70.4147	0.4
1995	16.1123	75.5967	-0.1
1996	6.6954	63.0163	-0.4
1997	4.4437	71.1130	1.4
1998	25.0739	107.6767	-0.45
1999	10.4674	78.1981	-1.15
2000	15.3631	75.0109	-0.7
2001	11.5174	89.1221	-0.3
2002	32.3095	87.1032	0.75
2003	10.9857	83.8070	0.3
2004	-1.1168	72.3591	0.45
2005	6.4371	81.8858	0
2006	11.3734	73.6920	0.05
2007	3.7212	83.3210	-0.55
2008	0.3464	73.1823	-0.65
2009	-0.1885	65.5554	0.4
2010	5.8178	70.0893	-0.85
2011	8.8964	74.9982	-0.85
2012	7.2062	70.2055	-0.1
2013	14.6163	76.8584	-0.3
2014	13.1480	68.4218	0.15
2015	10.0036	64.2958	1.35
2016	12.2174	57.4697	-0.25
2017	9.8530	61.1514	-0.15
2018	20.4771	70.8437	0.05
2019	10.8934	66.6587	0.5
2020	17.9862	72.0743	-0.35
2021	9.5813	63.7389	-0.75

IS, Índice de surgencia ($m^3/s/100 m$); *IT*, índice de turbulencia (m^3/s^3); *ONI*, Índice de El Niño oceánico (en °C).