



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS



CLIMATOLOGÍA DE UN FRENTE MAREAL Y SU
RELACIÓN CON LARVAS DE PECES EN EL
GOLFO DE CALIFORNIA

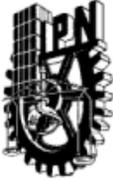
TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS

PRESENTA

AMARU MÁRQUEZ ARTAVIA

LA PAZ, B.C.S., DICIEMBRE DEL 2014



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., siendo las 12:00 horas del día 12 del mes de noviembre del 2014 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CICIMAR para examinar la tesis titulada:

"CLIMATOLOGÍA DE UN FRENTE MAREAL
Y SU RELACIÓN CON LARVAS DE PECES EN EL GOLFO DE CALIFORNIA"

Presentada por el alumno:

MÁRQUEZ
Apellido paterno

ARTAVIA
materno

AMARU
nombre(s)

Con registro:

A	1	3	0	4	8	9
---	---	---	---	---	---	---

Aspirante de:

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS

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

LA COMISION REVISORA

Directores de Tesis

DRA. LAURA SÁNCHEZ VELASCO
Directora de Tesis

DR. EMILIO JOSÉ BEIER MARTÍN
2º. Director de Tesis

DRA. CLAUDIA JANETL. HERNÁNDEZ CAMÁCHO

MC. GUSTAVO DE LA CRUZ AGÜERO

DR. VÍCTOR MANUEL GODÍNEZ SANDOVAL

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

DRA. MARÍA MARGARITA CASAS VALDEZ



IPN
CICIMAR
DIRECCION



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., el día 24 del mes noviembre del año 2014
el (la) que suscribe BIÓL. AMARU MÁRQUEZ ARTAVIA alumno(a) del
Programa de MAESTRÍA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS
con número de registro A130489 adscrito al CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS
manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de tesis, bajo la dirección de:
DRA. LAURA SÁNCHEZ VELASCO Y DR. EMILIO JOSÉ BEIER MARTIN
y cede los derechos del trabajo titulado:

"CLIMATOLOGÍA DE UN FRENTE MAREAL

Y SU RELACIÓN CON LARVAS DE PECES EN EL GOLFO DE CALIFORNIA"

al Instituto Politécnico Nacional, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Éste, puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: tupac.marquez@gmail.com - lsvelasc@gmail.com - ebeier@cicese.mx

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

BIOL. AMARU MÁRQUEZ ARTAVIA

nombre y firma

La vida es hermosa. Que las futuras generaciones la libren de todo mal, opresión y violencia y la disfruten plenamente

L. Trotsky

Dedicatoria.....

Este trabajo lo dedico a la persona más importante de mi vida: Ligia Artavia Rodríguez.

*Su paciencia y dedicación durante mis primeros años forjaron las bases de mi educación. Junto con ella debo poner a mi hermanos: Nela, Xiomara, Nosara y Juan
A mi compañera Isabel Valles que durante este periodo ha estado conmigo y me ha
dado su apoyo y sus consejos*

*Al Dr. Miguel F. Lavín Peregrina. En cada artículo y nota leída de sus trabajos, vuelven a
surgir sus ideas, haciéndolo permanecer con nosotros. A él se debe que hoy escriba
estas líneas en tierras aztecas.*

*Finalmente, he escrito este trabajo en medio de circunstancia convulsas en el país que
me ha recibido. No puedo dejar de dedicarlo al pueblo mexicano, a ese México bronco
que he visto en las calles, a los 43 y a quienes luchan por mejorar la sociedad*

Agradecimientos

A CONACyT por haber brindado la beca para realizar este trabajo de maestría.

Al Instituto Politécnico Nacional de México y al Centro Interdisciplinario en Ciencias Marinas por los apoyos económicos durante este periodo.

Al proyecto SEP-CONACyT 20140539: Oceanografía y larvas de peces como indicadores del sistema pelágico del Golfo de California, por el apoyo económico brindado.

A la Dra. Laura Sánchez Velasco y el Dr. Emilio Beier por dirigir este trabajo. Además, por su paciencia y anuencia a discutir de forma abierta en cada sección.

Al Dr. Víctor Godínez por su compromiso y por haber dirigido la edición de las figuras de este documento.

A los sinodales: Dr. Victor M. Godínez, M.C. Gustavo de la Cruz Agüero y la Dra. Claudia J. Hernández, por sus valiosos comentarios con los que se pudo mejorar este escrito y por su opinión profesional a lo largo del desarrollo de la tesis.

Al Dr. Héctor Villalobos y M.C. Carmen Meza por brindar las plantillas de \LaTeX con la que se le dió formato al escrito.

A M.C. Xiomara Márquez, BSc. Juan Salazar y al Dr. Viatcheslav Makarov, por tomarse el tiempo de enseñar y discutir con un biólogo algunos aspectos de la física, meteorología y matemática que son el fundamento teórico para entender el trabajo.

A Josue Valles e Isabel Valles, por su colaboración en la edición y presentación final de las figuras y el manuscrito.

Un agradecimiento especial a mis compañeros: Erick Ruvalcaba, Fernando Contreras, Javier Hernández, Susan Davis, M^a José Ochoa, Rosabel Camacho, Rocío Pacheco y Noe Díaz. Quienes han contribuido en la mejora del trabajo con su opinión respecto a la forma y fondo durante nuestras reuniones.

Y a todos los que han aportado para que haya logrado finalizar con este trabajo: Jesús Priego, Hisol Arellanes, Aldo Aquino, Lenin Oviedo...

Índice general

Lista de figuras	VI
Lista de tablas	VII
Lista de Acrónimos	X
Glosario	XI
1. RESUMEN	1
2. ABSTRACT	2
3. INTRODUCCIÓN	3
4. ANTECEDENTES	6
4.1. Efectos sobre la abundancia: Retención larval	6
4.2. Evolución temporal de los frentes y efecto en las comunidades de larvas de peces	7
4.3. Frentes mareales en el GC: Región de las Grandes Islas	9
5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
6. HIPÓTESIS Y OBJETIVO	13
6.1. Hipótesis	13
6.2. Objetivo General	13
6.3. Objetivos Específicos	13
7. ÁREA DE ESTUDIO	14
8. MATERIAL Y MÉTODOS	16
8.1. Obtención de datos	17
8.2. Análisis de datos	19

9.	RESULTADOS	23
9.1.	Campo medio	23
9.2.	Componente anual	25
9.3.	Componente semianual	29
9.4.	Funciones empíricas ortogonales de campos no estacionales	30
9.5.	Algoritmo de Canny	35
9.6.	Progresión temporal de los frentes en escala climatológica	37
9.7.	Patrones Generales de Distribución de larvas de peces	41
9.8.	Cambios temporales de la distribución de larvas de peces	44
10.	DISCUSION	49
10.1.	Media de Largo Periodo	49
10.2.	Armónicos anual y semianual	51
10.3.	Estacionalidad	53
10.4.	Funciones Empíricas Ortogonales	53
10.5.	Evolución temporal del frente	55
10.6.	Efecto del frente sobre la distribución de larvas de peces	58
11.	CONCLUSIONES	62
12.	RECOMENDACIONES	63
	Referencias bibliográficas	75
13.	ANEXOS	76
13.1.	Anexo I	76
13.2.	Anexo II	77

Índice de figuras

1.	Regionalización y área de estudio dentro del GC	14
2.	Media de largo plazo de CLA, TSM y VNT en el GC	24
3.	Reconstrucción del ciclo anual en febrero.	26
4.	Reconstrucción del ciclo anual en agosto.	28
5.	Ciclo semianual reconstruido en febrero.	29
6.	Ciclo semianual reconstruido en mayo.	30
7.	Primer modo FEOs de tres campos geofísicos (TSM, CLA, VNT)	32
8.	Relación entre el tercer modo FEOs de temperatura superficial del mar (TSM3) y el segundo modo del campo de viento (VNT2).	34
9.	Algoritmo de Canny con diferentes parámetros para el mes de abril.	36
10.	Evolución temporal de los frentes en la RAC.	38
11.	Distribución y abundancia de los taxones restringidos al GN (<i>Anchoa</i> spp y <i>M. productus</i>).	42
12.	Distribución y abundancia de los taxones restringidos al GS (<i>D. laternatus</i> , <i>S. sagax</i> y <i>V. lucetia</i>).	43
13.	Distribución y abundancia de algunos taxones de amplia distribución (<i>B. panamense</i> , <i>E. mordax</i> y <i>Auxis</i> spp.).	44
14.	Cambios temporales en la distribución y abundancia de <i>Auxis</i> spp. entre junio y agosto	45
15.	Cambios temporales en la distribución y abundancia de <i>B. panamense</i> entre junio y agosto.	46

16. Cambios temporales en la distribución y abundancia de <i>Anchoa</i> spp. entre junio y agosto.	47
17. Distribución y abundancia de <i>V. lucetia</i> , <i>S. sagax</i> y <i>E. mordax</i> durante diciembre de 2002.	48
18. Tormentas de polvo en el GC observadas en imágenes de color verdadero obtenidas por MODIS-Aqua el 27 de noviembre de 2011. Obtenidas de http://earthobservatory.nasa.gov	55
19. Cambios temporales en la distribución de <i>D. laternatus</i>	77
20. Cambios temporales en la distribución de <i>O. libertate</i>	78
21. Cambios temporales en la distribución de <i>S. sagax</i>	79

Índice de tablas

1.	Fechas de cada uno de los cruceros y sus correspondientes métodos de muestreo del plancton.	18
2.	Variación explicada por los tres primeros modos FEOs de clorofila (CLA), temperatura (TSM), y viento (VNT)	31
3.	Coeficiente de correlación y valor de p de las correlaciones entre las series de tiempo del primer modo FEOs	33
4.	Valores óptimos para el umbral menor (U_2), umbral mayor (U_1) y la desviación estándar (σ) usados en la detección de bordes sobre las climatologías mensuales de TSM	37
5.	Hábitat, afinidad zoogeográfica y época de desove de los taxones considerados en este trabajo.	76

Lista de Acrónimos

ADCP Acoustic Doppler Current Profiler; Perfilador Acústico de Corrientes.

ADEOS-II Advanced Earth Observing Satellite-II.

AMSR-E Advanced Microwave Scanning Radiometer-Earth Observing System.

CCMP Cross-Calibrated Multiplatform.

CLA Concentración de Clorofila-*a*.

CTD Conductivity, Temperature and Depth; Conductividad, temperatura y profundidad.

FEOs Funciones Empíricas Ortogonales.

FTP File Transfer Protocol.

GC Golfo de California.

GEM Grandes Ecosistemas Marinos.

GN Golfo Norte.

GS Golfo Sur.

JPL-PODAAC Jet Propulsion Laboratory - Physical Oceanography Distributed Active Archive Center.

MEI Multivariate El Niño Index; Índice Multivariado de El Niño.

MODIS-T Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer-Terra.

NASA National Aeronautics and Space Administration.

QuikSCAT Quick Scatterometer.

RAC Región del Archipiélago Central.

SeaWiFS Sea-viewing Wide Field-of-View Sensor.

SSM/I Special Sensor Microwave Imager.

TRMM TMI Tropical Rainfall Measuring Mission's Microwave Imager.

TSM Temperatura Superficial del Mar.

VNT Campo de Viento.

XBT Expendable Bathythermograph; Batitermógrafo reemplazable.

GLOSARIO

Algoritmo: Secuencia de instrucciones ordenadas lógicamente para obtener algún resultado.

Armónico: Dicho de una onda, corresponde a un componente que ocurre a una determinada frecuencia y que es múltiplo entero de la frecuencia fundamental.

Barrera: Estructura física que impide el paso entre dos regiones

Borde: En visión de computadoras se definen como las regiones de una imagen donde ocurren cambios bruscos en la intensidad del color (escala de grises).

Cizallamiento: Deformación lateral que se produce por la acción de fuerzas externas paralelas que actúan en direcciones opuestas y que generan tensión tangencial a la superficie sobre la que actúan.

Comunidad: La biota en un ecosistema como forma distinta del ambiente abiótico, es decir, los organismos o especies y sus relaciones tróficas (Tett *et al.*, 2013).

Cuasi-Estacionario: Dicho de un proceso, que tienen pequeñas variaciones en el tiempo.

Ensamblaje: Subconjunto taxonómico de una comunidad.

Estacionario: Dicho de algún proceso, que no cambia con el tiempo, manteniendo sus propiedades estadísticas como su función de densidad de probabilidad, media y desviación estándar.

Estacionalidad: Cualquier patrón de una serie de tiempo que es recurrente y que se repite sobre periodos de un año.

Estratificación: Se refiere a la estructura vertical de la columna de agua cuando se forman varias capas debido a las diferencias de densidad. Se puede determinar

por la diferencia de alguna propiedad conservativa entre la superficie y el fondo (por ejemplo, temperatura), o usando algún parámetro.

Frecuencia Angular: Frecuencia con la que ocurre un movimiento periódico respecto a un cambio de ángulo.

Frente oceánico: Región estrecha del océano donde el gradiente horizontal de una o más propiedades (por ejemplo temperatura, salinidad, densidad, velocidad, etc.), se intensifican respecto a las condiciones climáticas.

Gradiente: Operador matemático diferencial, que al ser aplicado a un campo produce una cantidad vectorial conocida como vector gradiente y que apunta en la dirección de variación máxima.

Límite: Línea imaginaria que separa dos regiones consideradas como entidades distintas

Masa de Agua: En el océano hace referencia a cuerpos de agua cuyas propiedades conservativas son claramente distinguibles y de las cuales se puede inferir su origen.

Patrón: Forma regular y recurrente en la que ocurre algún proceso. También puede definirse como una disposición o arreglo regular que se encuentra en objetos comparables.

Periodograma: Método para estimar la densidad espectral de una señal.

Radian: Unidad de medida de un ángulo (1 rad equivale a $\approx 57.30^\circ$).

Taxón: Cualquier unidad de clasificación taxonómica o biológica que agrupa a un conjunto de organismos emparentados

1. RESUMEN

Al sur de las grandes islas del Golfo de California (GC), se encuentra un frente hidrográfico que afecta la distribución de larvas de peces, entre otros organismos marinos. A pesar de su permanencia, se desconocen las escalas que podrían influir en su variabilidad. El objetivo de este trabajo es estudiar la variabilidad del frente e inferir los efectos que podría tener sobre la distribución de larvas de peces como indicadores del ecosistema pelágico, mediante series de imágenes de satélite y observaciones puntuales *in situ*. En los resultados se observa que la clorofila-a (CLA) y la temperatura superficial (TSM) presentan una marcada variabilidad transversal y longitudinal. Se identificaron zonas con alta concentración de CLA en zonas costeras y en la región del archipiélago central (RAC), donde también se encontró el mínimo de TSM. El ciclo estacional explica gran parte de la varianza total (60-70 % CLA; 95-98 % TSM). Los residuos a la estacionalidad muestran una oscilación conjunta entre las tres variables y una buena correlación del primer modo temporal con el índice MEI. El algoritmo de Canny sugiere una variación en la posición del frente. De junio-agosto parece tener una posición paralela al eje longitudinal del golfo, mientras que de diciembre a abril es perpendicular. La variabilidad del frente térmico está dominada por la estacionalidad del GC. La interacción con estructuras frontales asociadas a surgencias costeras continentales durante el invierno, y la presencia de una corriente costera con eventos de intensificación puede estar produciendo los cambios en la posición geográfica del frente. La distribución de los taxones muestra tres patrones: (i) taxones con distribución limitada al Golfo Sur, (ii) taxones restringidos al Golfo Norte, y (iii) taxones de amplia distribución, con registros al norte y sur del frente. Además, los resultados sugieren una variación conjunta de la distribución de larvas y la posición del frente. Considerando los resultados, se hipotetiza que los sistemas frontales de la RAC, limitan la distribución de algunas especies y pueden tener un rol importante en la conformación de hábitats larvarios.

Palabras clave: Frentes, Algoritmo de Canny, Variabilidad, Larvas de peces.

2. ABSTRACT

The persistence of minimum SST over the sills area and the Ballenas Channel are a distinctive feature of the Midriff Archipelago Region (MAR) in the Gulf of California. This cool waters are surrounded by ubiquitous thermal fronts visible in satellite data. It had been demonstrated the effect of the fronts on the distribution and abundance of fish larvae and the formation of different habitats. Nevertheless the variability of the frontal interfaces is unknown and had been hypothesized a seasonal change in the geographical position of the front located southward of the MAR. The aim of this contribution is to analyze the front variability and its implications in the distributions of individual fish larvae species applying times series decomposition of satellite data, edge detection algorithms and distribution/abundance plots. The results shown the highest mean values of CHL over the coastal areas and in the Ballenas Channel, where the minimum SST values in the long term mean were found. The explained variance of the seasonal cycle of CHL and SST was relatively high (60-70% CHL; 95-98% SST). The first EOF mode shown a co-oscillation of the three fields and a correlation with the Multivariate El Niño Index. The Canny edges suggests a seasonal variability in the position of the front. From July-August the front had an along gulf configuration while from December-April had a cross-gulf position. This variability was the result of interaction of the tidal mixing front with other structures like the upwelling fronts on the continental mainland in winter and the coastal current in summer. Three patterns of distribution of fish larvae were found (i) species restricted to the Northern Gulf of California where the SST were relatively low and in absence of intense tidal stirring, (ii) species of tropical and subtropical affinity distributed mainly in the warm side of the fronts and limited to the north by this structures, and (iii) widespread species with no apparent relationship with the frontal interface. Taking into account this results we hypothesized that the front affect differentially each specie and it could be considered like a boundary between different habitats.

Keywords: Fronts, Canny Algorithm, Variability, Fish larvae.

3. INTRODUCCIÓN

Los frentes son considerados estructuras dinámicas susceptibles a inestabilidades baroclínicas que ocurren en una gran variedad de escalas. Tienen una variabilidad propia que depende de los forzamientos que lo producen y las condiciones oceanográficas en las que se desarrollan (Fedorov, 1986). Incluso los frentes climatológicos de escala planetaria como el *Gulf Stream* y los cuasi-estacionarios como los presentes en los mares del este de China, presentan cambios en su posición (Horton 1983; Horton 1984; Hickox *et al.* 2000; Belkin *et al.* 2009). Estos cambios en la posición de los frentes de distintos orígenes, se debe entre otras cosas, a la acción del viento y cambios en los patrones de circulación, estratificación y mezcla vertical (Horton 1983; Horton 1984; Munk *et al.* 1999).

Por los flujos horizontales convergentes y el aumento en las magnitudes del campo de velocidad ocasionada por la presencia de un *jet* frontal, los frentes se han considerado como barreras para la dispersión de organismos planctónicos (Lough & Manning, 2001). Sin embargo, las características de circulación secundarias (es decir, convergencias y divergencias en el plano vertical) y la presencia de remolinos, filamentos y meandros, permiten el intercambio de propiedades a través de los frentes (Simpson & James 1986; Munk 2014).

El frecuente enriquecimiento con nutrientes de un lado de los frentes y su consecuente efecto sobre el fitoplancton ocasionan un aumento en la producción secundaria que puede beneficiar a niveles tróficos superiores (Sournia 1994; Belkin *et al.* 2009). Estos efectos sobre los organismos han permitido considerarlos como estructuras clave para ecosistemas marinos y ha sido discutido ampliamente en la literatura (por ejemplo, Le Fèvre 1986; Belkin *et al.* 2009; Bakun 2006; Belkin *et al.* 2014 Murase *et al.* 2014).

En el ictioplancton, la retención o concentración de organismos y la regulación de la distribución de hábitats han sido asociadas a estructuras frontales en distintas localidades

geográficas alrededor del mundo. Incluso, se ha reportado una influencia de la variabilidad espacio-temporal sobre los rangos de distribución de las especies y se ha planteado la hipótesis de que pueden estar relacionados con el aislamiento y mantenimiento de poblaciones y stock biológicos (Iles & Sinclair 1982; Shaw *et al.* 2004).

En este sentido, Bakun (2006) los ha considerado estructuras clave que pueden brindar oportunidades a organismos del plancton, debido a que las condiciones de enriquecimiento, retención y mantenimiento pueden favorecer el desarrollo larval (Bakun, 1996). Se ha llegado a plantear que son hábitats que presentan las características de los ecotonos en el sentido de Shelford (1963) y Odum (1971) y que cumplen un rol importante en la distribución de organismos a escala global (Margalef 1997; Longhurst 2007).

En un sistema altamente dinámico como el Golfo de California (GC), donde son frecuentes los procesos de mesoescala y donde se ha reportado la presencia de frentes de diversos tipos (Simpson *et al.* 1994; Collins *et al.* 2014), se han impulsado investigaciones multidisciplinarias que relacionan las respuestas biológicas con diversos factores físicos determinados por estas estructuras (por ejemplo Peguero-Icaza *et al.* 2008; Sánchez-Velasco *et al.* 2009; Sánchez-Velasco *et al.* 2013). Particularmente se ha encontrado que en ciertas zonas del GC la frecuencia de frentes es mayor comparada con la obtenida para sistemas frontales en la Corriente de California (Kahru *et al.*, 2012).

La Región del Archipiélago Central (RAC), donde se localizan los mínimos de Temperatura Superficial del Mar (TSM) del GC, asociados a la mezcla mareal y surgencias inducidas por convergencia, está limitada por frentes térmicos al norte y al sur que son visibles en imágenes satelitales. Es reconocido que el frente al sur de la RAC se caracteriza por presentar gradientes intensos de TSM y cambios en otras propiedades como la concentración de oxígeno y fluorescencia (Inda-Díaz *et al.*, 2010).

Además, se ha estudiado el efecto del frente de marea sobre los organismos del plancton, demostrando que el frente puede funcionar como una barrera para la distribución de larvas de peces y por lo tanto pueden regular la distribución de los hábitats

larvarios (Danell-Jiménez *et al.* 2009; Inda-Díaz *et al.* 2010; Inda-Díaz *et al.* 2014). Estos estudios puntualizan que el efecto del frente sobre la distribución de larvas de peces y el cambio en las propiedades físicas, químicas y biológicas de cada lado del frente, originan distintos hábitats de larvas de peces que son contiguos.

A partir de los resultados de las aportaciones descritas en los dos párrafos anteriores, surgen preguntas importantes para la ecología del GC tal como ¿Es el frente mareal permanente?, ¿Cuál es su variabilidad espacio-temporal? ¿Representa una barrera para la dispersión de organismos del plancton? ¿Cuál es su función sobre la evolución del GC? . Este trabajo pretende contestar a algunas de estas preguntas con la finalidad de conocer la variación espacial de mesoescala y escalas mayores (estacional e interanual) del frente ubicado al sur de la RAC, e inferir implicaciones en el ecosistema pelágico indicado por la distribución de larvas de algunas especies de peces de interés comercial y ecológico.

4. ANTECEDENTES

En muchas regiones del mundo se han desarrollado trabajos acerca de distintos tipos de frentes y sus interacciones con larvas de peces. Aunque cada tipo de frente tiene características propias, se han encontrado algunos efectos similares en los organismos del plancton. En esta sección se tratarán tres apartados : (i) Retención larval, (ii) el efecto de las variaciones temporales sobre las comunidades del ictioplancton, y (iii) estudios frontales en la RAC.

4.1. Efectos sobre la abundancia: Retención larval

Los efectos de un frente mareal en la Bahía de Haizhou sobre *Engraulis japonicus* fueron estudiados por [Hao et al. \(2003\)](#) mediante simulaciones numéricas. Estos autores encontraron que la mezcla mareal de los frentes de la Bahía Haizhou, tienen un rol importante en los procesos de retención. Aunque la retención asociada a la estructura fue variable a lo largo del frente por posibles efectos de giros de mesoescala.

Un efecto similar fue encontrado por [Sabatés & Olivar \(1996\)](#) en las costas del Mar Catalán, quienes argumentan que la distribución de especies de larvas costeras y de plataforma podría estar limitada hacia el océano por la presencia de un frente de plataforma.

De la misma forma, [Lough & Manning \(2001\)](#), demostraron que la convergencia de un frente mareal podría retener a las larvas de los primeros estadios en el lado estratificado y sobre la termoclina. Sin embargo, en este estudio también se encontró que puede haber un transporte a lo largo del frente y una influencia de los patrones de circulación secundarios que podrían favorecer el transporte de juveniles hacia el lado mezclado.

En el reciente trabajo de [Munk \(2014\)](#), estudiando la distribución horizontal y vertical de larvas de gádidos, encontró resultados similares a los estudios previamente mencionados. El autor señala que obtuvo mayores abundancias cerca de un frente asociado al

fondo originado por la interacción de masas de agua entre las costas de Noruega y Dinamarca. Además, sugiere que los frentes pueden ser sitios iniciales de dispersión, en los cuales ocurre transporte a lo largo del frente y en menor magnitud, transporte a través de la estructura.

4.2. Evolución temporal de los frentes y efecto en las comunidades de larvas de peces

Los cambios espacio-temporales de los frentes han sido abordados desde la física del océano o analizando la respuesta biológica de los organismos. Desde el punto de vista físico, *Hickox et al. (2000)* analizaron la climatología y variabilidad estacional de los frentes en mares del este de China, elaborando mapas de probabilidad frontal y calculando el cambio de temperatura a través de los frentes. En sus resultados identificaron 10 frentes con un patrón estacional marcado; la mayoría de los frentes aparecieron durante el otoño y el invierno y posteriormente desaparecían en verano, debido a que el calentamiento superficial alisaba el campo de temperatura superficial. Sin embargo, cada frente individual tuvo su propio comportamiento y dos de los frentes fueron visibles aún al final del verano.

Kahru et al. (2012), usando métodos similares, analizaron las estadísticas de frentes en el sistema de la corriente de California, encontrando un ciclo anual en la frecuencia de frentes de clorofila y temperatura superficial, además de un efecto asociado a la dinámica de giros en ambos campos geofísicos. Sin embargo, el control local fue más evidente en el campo de clorofila, mientras que las variaciones interanuales producidas por ondas atrapadas a la costa y de origen tropical, sólo se correlacionaron con los frentes de temperatura, lo que sugiere comportamientos distintos dependiendo de la variable estudiada.

En una visión global que abarca los Grandes Ecosistemas Marinos (GEM) se realizó

el trabajo de **Belkin *et al.* (2009)**, quienes encontraron comportamientos particulares en los frentes detectados dentro de cada GEM, debido a la gran variabilidad de forzamientos físicos que producen los frentes. Algunos de los GEM presentaron frentes estables con un comportamiento estacionario o cuasi-estacionario. Sin embargo, en regiones de frente dinámicos, como en la corriente de California, se demostró que pueden ocurrir cambios drásticos en el patrón frontal entre distintas estaciones, que pueden ser expresados en términos de las escalas dominantes de los frentes individuales. Estos resultados concuerdan con los obtenidos en los dos trabajos previamente descritos, enfatizando que los frentes son estructuras altamente dinámicas, cuya variabilidad puede ocurrir en varias escalas, cambiar estacionalmente y responder de forma distinta, dependiendo del tipo de frente.

Abordando la variabilidad de los sistemas frontales con una perspectiva biológica, **Iles & Sinclair (1982)** estudiaron de forma cualitativa la relación entre las áreas de desove del arenque del Atlántico y los sitios con estratificación moderada asociadas a interfases frontales. Estos autores teorizan que la persistencia de estructuras hidrográficas particulares puede sustentar la existencia de distintos stock biológicos de la especie, y concluyen que la variabilidad de estas estructuras podría influir en los tamaños de la clase anual y eventualmente en el tamaño del stock.

Sabatés & Masó (1990) analizaron el efecto de un frente sobre la plataforma continental en el Mar Catalán, asociado a un gradiente de densidad inverso (mayor densidad cerca de la costa), que fue considerado como un evento anómalo. Estos autores encontraron que el frente que separaba las aguas más densas cercanas a la costa de las aguas más cálidas y menos saladas sobre el talud, actuó como una barrera, evitando la dispersión hacia aguas más oceánicas. No obstante, indicaron que los cambios producidos en la distribución de las especies por el evento, podrían haber sido desfavorables para la supervivencia de las larvas porque fueron forzadas a desarrollarse en zonas que no son las usuales.

Además, tal y como lo demostró [Sabatés & Olivar \(1996\)](#) la variabilidad en la posición y presencia de los frentes puede producir distintas respuestas de las comunidades biológicas debido al alto grado de acoplamiento entre la posición de un frente y la distribución de larvas de peces. Al analizar conjuntos multiespecíficos, estos autores encontraron que los cambios en la posición del frente ocasionaban cambios en la distribución de distintas asociaciones de larvas de peces.

[Munk *et al.* \(1999\)](#), encontraron una relación entre los patrones de distribución de gádidos y la posición de frentes en la porción nororiental del Mar del Norte basados en observaciones de distribución y abundancia. En este trabajo se reportó que las características del frente presentaban cambios a lo largo de la estructura y en la escala interanual, debido a cambios en las propiedades de las masas de aguas, a eventos de viento, o a cambios en las corrientes costeras.

4.3. Frentes mareales en el GC: Región de las Grandes Islas

Los procesos de mesoescala como giros y sitios con intensificación de los gradientes de alguna propiedad son comunes en el GC. Estas estructuras han llamado la atención de los oceanógrafos y ha dado pie al desarrollo de una serie de trabajos en zonas particulares como la RAC desde la década de los ochenta.

Uno de estos trabajos es el de [Badan-Dangon *et al.* \(1985\)](#), quienes con mediciones de radiómetros satelitales observaron los patrones térmicos de esta región del GC en primavera y verano. En sus resultados muestran cambios en los patrones de distribución de las aguas frías del Canal de Ballenas, sus frentes asociados, así como la generación de plumas o filamentos fríos. En este estudio las aguas frías del Canal de Ballenas se extendieron 100 Km hacia el sur, lo que produjo un desplazamiento de la posición del frente que fue visible en una imagen de TSM correspondiente al mes de marzo.

[Paden *et al.* \(1991\)](#), demostró que el comportamiento de los frentes al sur de la RAC

eran distintos a los de otros frentes mareales de aguas someras. Estos autores encontraron que el frente se acercaba a los umbrales (aguas menos profundas), durante las mareas vivas, mientras que en mareas muertas, el desplazamiento fue hacia aguas más profundas. Este comportamiento particular del frente guió a la conclusión de que la posición de la estructura está conducida principalmente por advección.

Durante las expediciones hechas por [Simpson *et al.* \(1994\)](#) en julio de 1990, también se asoció la advección al sistema frontal. Las asimetrías en el enfriamiento neto de las aguas superficiales sugerían la presencia de procesos advectivos hacia el sureste y de esa forma explicar las temperaturas relativamente bajas que se encontraron 50 Km al sur de los umbrales

En 1995, [Argote *et al.* \(1995\)](#), realizaron un estudio que combinó mediciones *in-situ* y modelación numérica, para evaluar la disipación de la marea semidiurna M_2 y su relación con aspectos de la estratificación, como la posición de los frentes en el GC. Los autores encontraron cambios estacionales en la estratificación y en la posición de los frentes. La posición de estas estructuras estuvo controladas principalmente por la mezcla mareal durante el verano y es modificada por la acción del viento que se intensifica durante el invierno cuando los flujos de calor son muy bajos o negativos. Además, apuntan que la advección tuvo una influencia del mismo orden de magnitud que la mezcla mareal, por lo que podría tener un rol importante en la posición geográfica de los sistemas frontales en el GC.

Por otro lado, los aspectos biológicos de los sistemas frontales han sido escasamente estudiados y únicamente se han realizado tres trabajos enfocados de forma directa, en investigar las relaciones con los organismos del plancton.

El primer trabajo que directamente aborda las relaciones de larvas de peces con frentes en el GC es el de [Danell-Jiménez *et al.* \(2009\)](#), en el que investigaron la distribución vertical y horizontal de larvas al sur del archipiélago central durante un verano. Sus resultados mostraron que el frente tiene efectos profundos sobre la comunidad del zoo-

plancton y plantean que aunque el frente puede ser considerado como una barrera, no son impermeables al transporte de propiedades entre los lados del frente, posiblemente asociados a fenómenos de sub-mesoescala.

Durante un invierno [Inda-Díaz et al. \(2010\)](#), estudiaron la distribución tridimensional de *Engraulis mordax* y *Sardinops sagax* en un área que incluía la RAC encontrando que el frente ubicado al sur de la región, tuvo diferentes efectos sobre cada una de las especies y los distintos estadios del desarrollo. Para *E. mordax* en estadios de pre-flexión representó una barrera, mientras que para *S. sagax*, los cambios de temperatura y los efectos del frente se indican como factores que regularon su distribución hacia el norte.

El último trabajo publicado ha sido el de [Inda-Díaz et al. \(2014\)](#), quienes analizaron la respuesta de hábitats de larvas de peces a la presencia de un frente mareal en invierno. Describen que el frente funcionó como un límite tridimensional entre los hábitats que se encontraron al norte y al sur, aún en condiciones de estratificación débil.

Con base en lo anterior, se considera que los frentes son sitios de importancia ecológica, en donde ocurre retención o acumulación de larvas de peces y cuya variabilidad depende del tipo de frente, de su escala y de las variaciones de las condiciones oceanográficas donde ocurren. Esta variabilidad, produce una respuesta de las comunidades biológicas, influenciando la distribución de las especies y la conformación de distintos hábitat y asociaciones de larvas de peces.

5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Debido a que las estructuras frontales tienen un rol importante en el ecosistema marino y que pueden proveer condiciones adecuadas para el desarrollo de larvas de peces, se ha planteado el estudio de su impacto sobre la distribución y abundancia de larvas en una región compleja del GC por sus características oceanográficas: la RAC. Los trabajos previos como los de [Danell-Jiménez *et al.* \(2009\)](#), [Inda-Díaz *et al.* \(2010\)](#) y el reciente de [Inda-Díaz *et al.* \(2014\)](#), han demostrado que las estructuras frontales al sur de la RAC funcionan como barreras para la dispersión de larvas de peces y permiten la conformación de hábitats contiguos debido al cambio de propiedades a cada lado del frente. Estos trabajos se han realizado de forma contrastante unos durante el invierno y otros en verano pero de forma independiente, llegando a plantear la hipótesis de que el frente tiene un cambio de posición asociado a los cambios estacionales ([Inda-Díaz *et al.*, 2014](#)). Esto plantea la necesidad de estudiar la variabilidad de los sistemas frontales localizados al sur de la RAC de manera puntual, debido a que no se conocen las escalas de variabilidad que perturban su posición geográfica y las repercusiones que puede tener en el ecosistema pelágico.

6. HIPÓTESIS Y OBJETIVO

6.1. Hipótesis

El frente mareal al sur de la RAC tiene un cambio en su posición, pasando de transversal a paralelo respecto al eje longitudinal del GC. Cuando es transversal, será una barrera para el intercambio de organismos entre la región del Golfo Norte (GN) y Golfo Sur (GS). De forma contrastante, el frente permitirá el intercambio de organismos entre estas dos regiones, cuando su posición es paralela. Esta variación será una respuesta a los patrones de circulación general y estará influenciada por fenómenos de mesoescala e interanuales.

6.2. Objetivo General

El objetivo de este trabajo es conocer la variabilidad del frente mareal ubicado al sur de la RAC a través de análisis de datos obtenidos mediante sensores abordo de satélites, para inferir sus implicaciones en el ecosistema pelágico indicado por larvas de peces.

6.3. Objetivos Específicos

1. Identificar las escalas de variabilidad dominantes en el GC con énfasis en la RAC, usando métodos matemáticos y estadísticos.
2. Detectar estructuras frontales en la climatología de la temperatura superficial del mar, a través de algoritmos de detección de bordes.
3. Identificar si los cambios en la posición del frente producen patrones de distribución de larvas de peces y cual es su efecto sobre algunas especies.

7. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio de este trabajo se extendió de los 114.5°W a 111°W, y de los 27°N a 31°N en el GC (Fig. 1). El área abarca parcial o completamente, tres de las regiones oceanográficas descritas por Lavín & Marinone (2003) para el GC: (i) la porción sur del GN, (ii) la RAC, y (iii) el extremo norte del GS; (ver Lavín & Marinone (2003) para una descripción detallada de las regiones del GC).

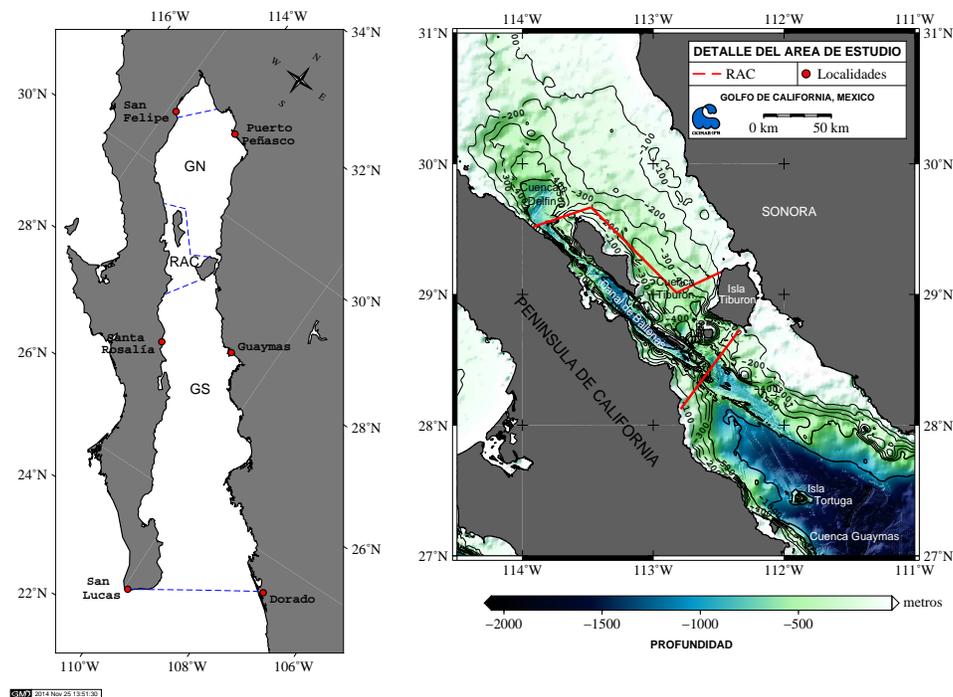


Figura 1: Regionalización y área de estudio dentro el GC. La división del GC en el Golfo Norte, Archipiélago Central (RAC) y Golfo Sur (GS) se basó en los límites propuestos por Lavín & Marinone (2003)

Se considera que el GN tiene las características de un mar de plataforma (Lavín & Marinone, 2003). Las masas de agua que se han encontrado en la región son, el Agua del Golfo de California (AGC) en los primeros 150 metros y Agua Subsuperficial Subtro-

pical (ASsSt) por debajo (Torres-Orozco 1993; Lavín & Marinone 2003). La presencia de frentes, en su margen norte se ha relacionado con la mezcla mareal en verano y por convección vertical y mezcla mareal en invierno, produciendo cambios en su posición desde la isobata de los 30m a la de 60m respectivamente (Argote *et al.* 1995; Lavín & Marinone 2003). Otra de sus características es la ocurrencia de un giro estacional reversible que se ha observado con modelación numérica y se ha corroborado con mediciones de derivadores y ADCP (Beier 1997; Beier & Ripa 1999; Palacios-Hernández *et al.* 2002; Lavín *et al.* 1997; Lavín *et al.* 2014).

Por su parte, en la región del GS se encuentra el AGC, ASsSt y el Agua intermedia del Pacífico (AIP). Es una región con cuencas profundas (2500-3000 m), con una dinámica muy rica y en la que las surgencias costeras continentales, constituyen una de las características sobresalientes de la región (Lavín & Marinone, 2003). Además, la presencia de una corriente costera que interactúa con las irregularidades topográficas, se ha relacionado con la generación de giros geostróficos, los cuales tienen un papel importante en la circulación de esta zona (Zamudio *et al.* 2008; Lavín *et al.* 2014). También se han observado otras estructuras de mesoescala, como filamentos y plumas, mediante imágenes de satélite y en perfiles verticales de mediciones con XBT y CTD (Badan-Dangon *et al.* 1985; Navarro-Olache *et al.* 2004).

La RAC separa las cuencas profundas del GS (> 1500 m) de las aguas más someras (menores a 500 m) del GN. En esta zona los umbrales, canales y cuencas relativamente someras, además de la constricción del ancho del GC, le convierten en una de las zonas más complejas desde la perspectiva oceanográfica. Incluso el Canal de Ballenas ha sido considerado como una región aparte, debido a que la heterogeneidad de la topografía y la interacción con las corrientes de mareas generan mezcla vertical continua que influencia la dinámica en la región (Paden *et al.* 1991; Argote *et al.* 1995; Gutiérrez *et al.* 2004).

En el Canal de Ballenas se registran la menor temperaturas superficial durante todo el año dentro del GC, y ha sido asociada con la mezcla vertical sobre los umbrales, así como

a surgencias inducidas por convergencia en Canal de Ballenas (Paden *et al.* 1991; López *et al.* 2006). Esta área con menor temperatura está limitada al norte y al sur por frentes mareales térmicos y de clorofila, los cuales muestran frecuentemente meandros, giros y filamentos que dispersan el agua más fría y rica en nutrientes alrededor de la RAC (Badan-Dangon *et al.* 1985; Paden *et al.* 1991; Navarro-Olache *et al.* 2004). Además de la mezcla por marea y las surgencias por convergencia, la presencia de otros fenómenos oceanográficos como las mareas internas y el rompimientos de ondas internas, podrían contribuir al mantenimiento de las menores temperatura en la región.

8. MATERIAL Y MÉTODOS

Para estudiar la variabilidad y co-oscilación de Concentración de Clorofila-*a* (CLA), TSM y Campo de Viento (VNT), se obtuvieron datos disponibles en la red de Internet, derivados de sensores abordo de satélites (CLA y TSM) y de análisis de varias plataformas (VNT). Además, los datos de TSM fueron usados para estimar la posición climatológica de los frentes térmicos, que fueron relacionados con la distribución de algunas especies de larvas de peces de forma cualitativa en este trabajo.

La descripción detallada del procesamiento y características de los datos, se exponen en la primera parte y posteriormente se indican los métodos detallados para cada una de las variables obtenidas.

8.1. Obtención de datos

Clorofila y temperatura superficial del mar

Se obtuvieron datos mensuales de CLA y TSM del periodo 2000-2013, adquiridos por MODIS-T con resolución espacial de 4 X 4 Km. Los datos fueron descargados del archivo del grupo de color del océano de la NASA (<http://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/MODIST/Mapped/Monthly/4km>) y procesados por el *Ocean Biology Processing Group* usando el algoritmo OC versión 6, con los coeficientes globales típicos de la NASA (O'Reilly *et al.* 1998; O'Reilly *et al.* 2000; Hooker & McClain 2000; http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cms/atbd/chlor_a/doc/html).

Velocidad del viento (VNT)

Los datos del campo de viento se adquirieron de la multiplataforma con calibración cruzada (CCMP por sus siglas en inglés) en periodo 2000-2011. Estos datos fueron diseñados para aplicaciones meteorológicas y oceanográficas, y construidas mediante el método análisis variacional para combinar los datos de QuikSCAT, ADEOS-II, AMSR-E, TRMM TMI y SSMI, que han sido validados con datos de boyas y embarcaciones (Atlas *et al.* 1996; Atlas *et al.* 2009; Atlas *et al.* 2011). Cuentan con una resolución horizontal de un cuarto de grado y están disponibles a través del FTP del Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA (JPL-PODAAC; <ftp://podaac-ftp.jpl.nasa.gov/OceanWinds/ccmp/L3.0/>). Los datos semanales fueron promediados por mes para utilizarlos en los análisis posteriores.

Distribución de larvas de peces

Se consideraron bases de datos de larvas de peces colectadas durante ocho cruceros oceanográficos que se realizaron cerca de la zona frontal al sur de la RAC (Tabla 1). Estas bases de datos contienen registros de biomasa del zooplancton y abundancia de larvas de peces, las cuales están a cargo de la Dra. Laura Sánchez Velasco. La metodología detallada de cada crucero se encuentra en tesis y publicaciones del grupo de trabajo (por ejemplo [Danell-Jiménez et al. 2009](#); [Sánchez-Velasco et al. 2009](#); [Inda-Díaz et al. 2010](#)). En cada estación de muestreo se utilizó un CTD y redes bongo o de cierre-apertura-cierre, en todos los casos, con ancho de malla de 505 μ m. Los lances de zooplancton se realizaron siguiendo la metodología estándar de [Smith & Richardson \(1977\)](#). En la boca de cada red se colocó un flujómetro para conocer el volumen filtrado en cada arrastre. Las muestras fueron fijadas en formalina al 5% y algunas en alcohol al 70%. Las larvas se identificaron con ayuda de literatura especializada ([Moser, 1996](#)) y expertos en la taxonomía de larvas de peces. Las abundancias fueron estandarizadas por cada 10m² de superficie, siguiendo los métodos de [Smith & Richardson \(1977\)](#).

Tabla 1: Fechas de cada uno de los cruceros y sus correspondientes métodos de muestreo del plancton.

Fecha	Método
Diciembre 2002	Bongo
Agosto 2003	Bongo
Junio 2005	Bongo
Agosto 2005	Cierre-apertura-cierre
Febrero 2006	Bongo
Junio 2006	Cierre-apertura-cierre
Febrero 2007	Cierre-apertura-cierre
Junio 2008	Cierre-apertura-cierre

8.2. Análisis de datos

Descomposición de las series de tiempo.

Para descomponer los registros secuenciales de algún campo $F(x, y, t)$, que depende de su posición espacial (x, y) y del tiempo (t) , se debe de considerar a la serie como la suma de varias componentes, de la forma:

$$F(x, y, t) = F_0(x, y) + F_{An}(x, y, t) + F_{Sem}(x, y, t) + F_{Res}(x, y, t) \quad (1)$$

Con:

- $F_0(x, y) \rightarrow$ media de largo plazo
- $F_{An}(x, y, t) = A_a * \cos(\omega t - \varphi_a) \rightarrow$ Ciclo Anual
- $F_{Sem}(x, y, t) = A_s * \cos(2\omega t - \varphi_s) \rightarrow$ Ciclo semianual
- $F_{Res}(x, y, t) \rightarrow$ Residuos

La media de largo plazo fue calculada para cada pixel de acuerdo a la ecuación 2, donde F_0 corresponde a la media de cualquier campo geofísico, y N es la cantidad total de mediciones

$$F_0(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N F(x, y, t_j) \quad (2)$$

Se considero como ciclo estacional (F_{est}) a la suma de los tres primeros términos de la derecha en la ecuación 1, obteniendo:

$$F_{est} = F_0 + A_a * \cos(\omega t - \varphi_a) + A_s * \cos(2\omega t - \varphi_s) \quad (3)$$

donde A_a y A_s corresponden a la amplitud anual y semianual respectivamente, ω es la frecuencia anual en radianes, t es el tiempo, φ_a y φ_s son las fases de los armónicos anual

y semianual respectivamente, y que fueron obtenidos mediante el ajuste de cuadrados mínimos siguiendo la técnica de análisis armónico (Emery & Thomson, 2004).

El ciclo estacional fue sustraído del campo para obtener los residuos (*ver ecuación 4*), que en general incluyen a otros componentes como eventos no periódicos, otros armónicos, la tendencia y el ruido. Debido a que los residuos son estocásticos fueron analizadas de forma estadística usando las Funciones Empíricas Ortogonales (FEOs).

Funciones Empíricas Ortogonales

Al igual que en otros trabajos (por ejemplo en Ruiz-Ochoa *et al.* 2012), las FEOs son utilizadas para reducir la gran cantidad de dimensiones de los campos geofísicos de TSM, CLA y VNT o visto de otro modo, para descomponer la señales en componentes ortogonales (Para una revisión exhaustiva de las FEOs ver Kantha & Clayson 2000; Venegas 2001; Navarra & Simoncini 2010).

Para calcular las FEOs se utilizó la matriz de covarianza, y se encontró la solución del sistema característico mediante la descomposición del valor singular. Además, los componentes principales de cada modo FEOs (series de tiempo) fueron estandarizadas dividiendo entre su valor máximo.

En este sentido los residuos pueden ser expresados como la sumatoria de N-Funciones empíricas no correlacionadas entre sí, lo que es:

$$F_{Res}(x, y, t) = F(x, y, t) - F_{est}(x, y, t) = \sum_{n=1}^N F_n(x, y) f_n(t) \quad (4)$$

Por otro lado, debido a las características de los datos de VNT, estos fueron analizados mediante el uso de una variante de las FEOs llamada FEOs conjuntas (Venegas *et al.*, 2008). La modificación respecto al método convencional, consiste en analizar las dos componentes del vector de viento de forma simultánea.

Detección de bordes

Se utilizó el algoritmo de Canny (Canny, 1986), para detectar los bordes sobre datos climatológicos de TSM utilizando la función `edge` disponible en Matlab versión 2012b ¹. Este algoritmo involucra cuatro pasos: un alisado de la imagen usando un filtro gaussiano, el cálculo del gradiente, la supresión no máxima y la histéresis del umbral. El filtro gaussiano tienen la forma de la función de distribución de probabilidad normal o gaussiana de la forma:

$$G_{\sigma} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

donde G_{σ} , es el filtro gaussiano con $\mu = 0$ y σ definido por el usuario. σ determina el ancho del filtro y un valor de $\sigma = 1$, equivale a un filtro de 8x8 pixeles.

Debido a que la diferenciación es una operación lineal, puede conmutar con las operaciones de filtrado lineal (aplicación del filtro G_{σ}), por lo que el gradiente de una imagen alisada se obtiene por:

$$J_{\sigma} = \nabla [G_{\sigma} * I] = [\nabla G_{\sigma}] * I \quad (6)$$

donde I representa la imagen o la matriz de entrada y $(*)$ representa la operación de convolución. El kernel es de una sola dimensión por lo que se debe hacer convolución a la matriz de entrada con las derivadas horizontales y verticales del kernel gaussiano. Posterior al cálculo del gradiente, el algoritmo detecta los máximos locales y suprime cualquier pixel que no cumpla con esta condición (supresión no máxima), permitiendo el adelgazamiento de los bordes. Finalmente dos umbrales ($U_1 > U_2$) son utilizados en la histéresis para asegurar que bordes ruidosos no se fragmenten en múltiples segmentos.

¹Las rutinas pueden cambiar su comportamiento y pueden provocar resultados distintos. En aras de la reproducibilidad del trabajo se describen los pasos utilizados para aplicar esta rutina específica

El algoritmo primero busca aquellos pixeles mayores al umbral mayor (U_1), para seguir a lo largo de las crestas del frente (es decir perpendicular al gradiente) etiquetando como bordes a todos los pixeles hasta que la magnitud del gradiente sea menor que el umbral menor (U_2). Debido a que en las rutinas aplicadas el gradiente se normaliza entre su valor máximo, los umbrales deben cumplir con la condición $0 < U_2 < U_1 < 1$

Distribución y abundancia de larvas

De los datos obtenidos en los cruceros oceanográficos, se consideraron únicamente las abundancias de 11 especies epipelágicas o mesopelágicas. Las especies se seleccionaron por su importancia comercial o dominancia numérica previamente reportadas para el GC (*Sánchez-Velasco et al. 2004*; *Sánchez-Velasco et al. 2009*; *Avendaño Ibarra et al. 2013*)

De los datos obtenidos con redes de cierre-apertura-cierre, se seleccionaron únicamente los que correspondieron al primer nivel de muestreo (0-50 m de profundidad), mientras que los bongo contienen datos de toda la columna (0-200 m).

Aunque los datos provienen de diferentes métodos de colecta (bongo y cierre-apertura-cierre), se debe de considerar que en estudios previos se ha demostrado que la mayor concentración de larvas ocurre en los primeros metros, justo sobre la termoclina cuando hay estratificación o en el límite de la capa de mezcla (*Sánchez-Velasco et al. 2007*; *Danell-Jiménez et al. 2009*; *Inda-Díaz et al. 2010*). Los gráficos de abundancia y distribución de cada una de las especies seleccionadas, se hicieron en términos de órdenes de magnitud, para encontrar relaciones espaciales cualitativas entre la posición del frente y la distribución de larvas de peces.

Los rangos seleccionados para estos gráficos fueron de 0-10, 10-100, 100-1000 y > 1000 larvas/10 m². Estos gráficos se sobreponen a la climatología de TSM en el mes correspondiente y sobre la posición del frente identificado.

9. RESULTADOS

9.1. Campo medio

En esta sección se presentan las características de la media temporal a largo plazo de CLA, TSM y VNT. El campo medio de CLA muestra una banda de valores máximos en la zona costera continental, extendiéndose desde los 25°N hasta la región GN, justo al norte de la Isla Tiburón (Fig. 2A). Del lado peninsular, la banda costera de valores máximos está presente desde el norte de 26°N hasta $\approx 31^\circ\text{N}$. Sin embargo, esta banda costera es más estrecha que la observada en el lado continental. Estas dos bandas de máximos en la CLA se ensanchan en la RAC. La concentración CLA es baja en la región del GS y aumentan hacia la cabeza, estableciendo un gradiente meridional (Fig. 2A). Ese patrón no es continuo y en la RAC se encuentran valores relativamente altos ($1\text{-}1.5\text{ mg/m}^3$), en una banda que cruza el golfo. Sin embargo, en esta zona el Canal de Ballenas, la porción central y la costera, muestran diferencias en la magnitud de CLA. El Canal de Ballenas y la zona costera tienen los valores más altos, mientras que la porción central de RAC muestra valores de menor magnitud.

Como se muestra en la Figura 2B, la temperatura tiene sus valores máximos ($25\text{-}26^\circ\text{C}$) en la boca del GC y disminuye de forma gradual hacia el norte. Los valores mínimos (22°C) se observan sobre el Canal de Ballenas al este y sureste de la Isla Ángel de la Guarda entre los 112°W y 114°W . Hacia el norte de la región RAC, la temperatura tiene un ligero aumento, pero mantiene valores intermedios (24°C). El comportamiento de las isotermas en el GS, indica que existen menores temperaturas en el lado occidental del golfo respecto a la contraparte oriental y de la misma forma, menores temperatura en ambas costas respecto a la porción central (Fig. 2B). En la RAC, sobre el Canal de Ballenas, las isotermas están más cercanas entre sí y adoptan una posición paralela al eje longitudinal del GC (Fig. 2B).

MEDIA DE LARGO PLAZO

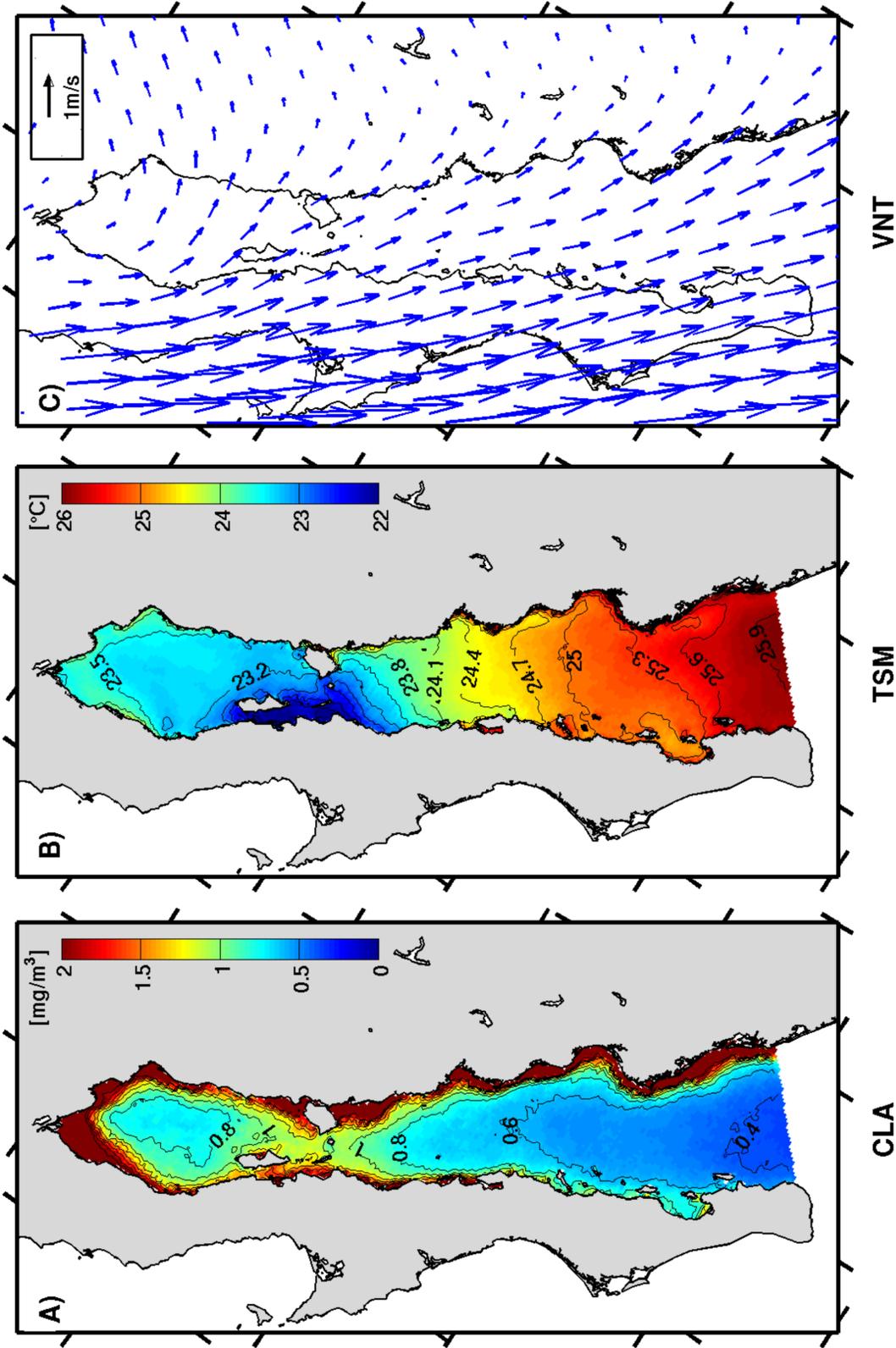


Figura 2: Media del periodo 2000-2013, de la concentración de clorofila (CLA), temperatura superficial del mar (TSM) y el campo de viento (VNT), en el GC. Las líneas de los campos de CLA y TSM representan isolíneas. En el campo de viento solo se muestra uno de cada cuatro vectores

El viento es predominantemente del noroeste, con vectores de mayor magnitud sobre el océano abierto y la península y con una disminución de su magnitud hacia el continente. Este patrón marca un gradiente zonal entre el océano Pacífico y el GC (Fig. 2C).

La región GN presenta un comportamiento singular de los vectores de viento que presentan magnitudes menores respecto al GS y la boca. Además, en esta zona, ocurre un cambio de dirección del viento rota hacia el este (Fig 2C).

9.2. Componente anual

En general las tres variables no se encuentran en fase, pero se pueden observar las características espaciales generales del ciclo anual al reconstruir el armónico en febrero y agosto (Figs. 3 y 4).

La reconstrucción del ciclo anual de la CLA indica que en el GC las amplitudes varían entre los 0 y 0.5 mg/m^3 en casi toda su extensión, pero con máximos de 2 mg/m^3 sobre la franja costera continental que se extiende desde el norte de 24°N , hasta el norte de la Isla Tiburón (Fig.3A). Otra característica distintiva se observa en las dos regiones con amplitudes cercanas a cero: El Canal de Ballenas y parte del Alto Golfo de California entre San Felipe y Puerto Peñasco.

Por otro lado, la reconstrucción del ciclo anual para TSM en febrero muestra una disminución de la temperatura en todo el GC (Notar que la disminución es respecto la media y en la figura 3 se omiten los resultados obtenidos de otros componentes). Estas disminuciones, no son homogéneas y muestran un patrón espacial, con amplitudes mínimas en el extremo de la península, desde Cabo San Lucas hasta el norte de la Bahía de la Paz y de forma asimétrica cruzando el golfo (Fig. 3B). Esta asimetría es aparente en las amplitudes de la TSM en la mayor parte del GS (entre 24°N y 27°N), donde las amplitudes siempre son menores del lado peninsular con respecto al continental (Fig. 3B).

CICLO ANUAL: FEBRERO

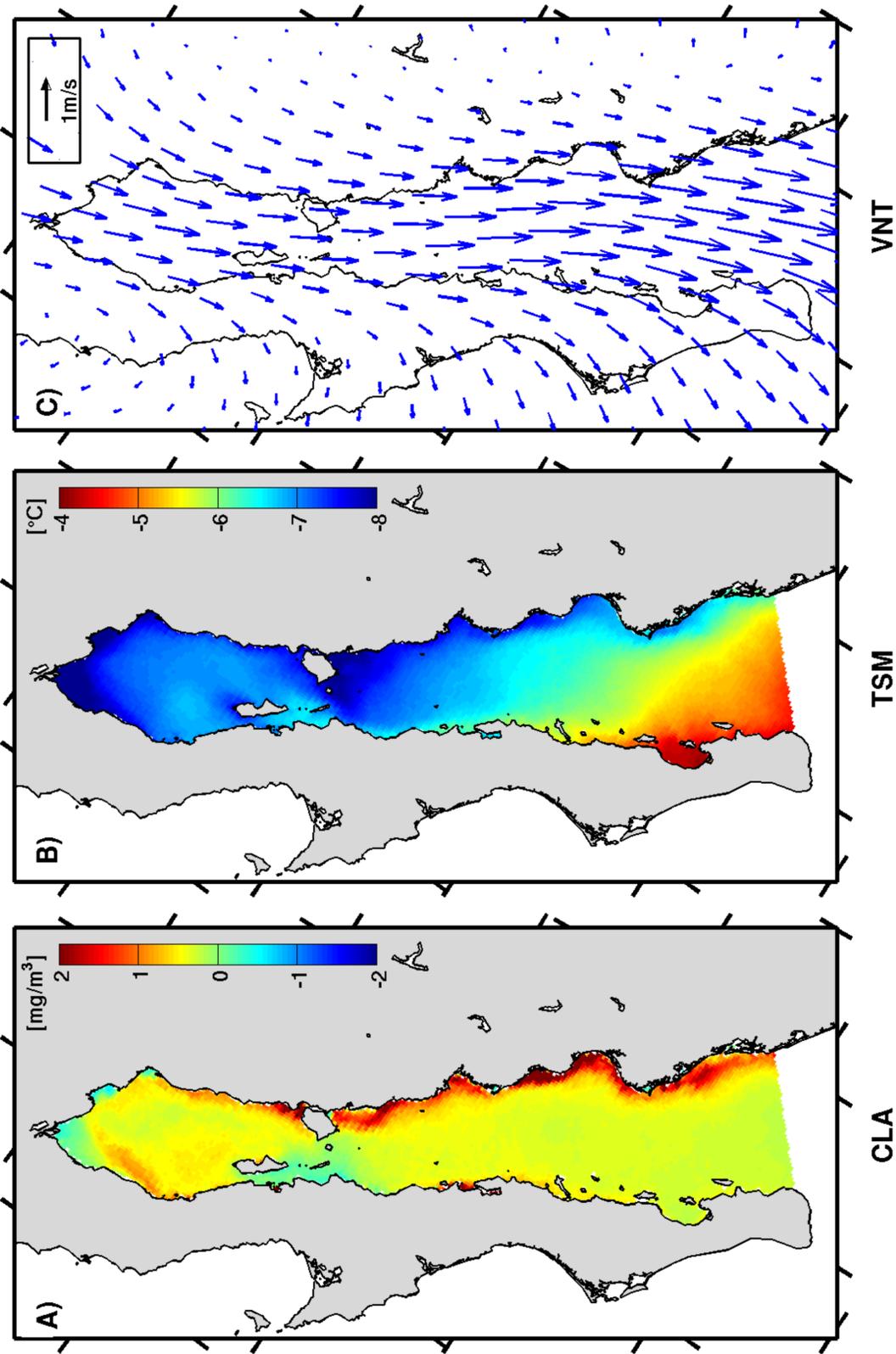


Figura 3: Reconstrucción del ciclo anual en febrero. Se muestra la concentración de clorofila (CLA), temperatura superficial (TSM) y campo de viento (VNT)

A partir de los 27°N, las amplitudes son mucho mayores (7-7.5 °C) y prácticamente homogéneas a lo ancho del GC, aunque con una disminución marcada en el Canal de Ballenas ($\approx 6.5^{\circ}\text{C}$)

El campo de viento anual reconstruido para febrero presenta una dominancia de vientos del noroeste fluyendo a lo largo del eje longitudinal del GC con velocidades en aumento desde la cabeza hacia la boca (Fig. 3C).

En el extremo de la península, y coincidiendo con la región de mínimas amplitudes de TSM, los vectores se desvían hacia el lado peninsular. En el GN los vientos soplan desde el continente hacia el GC o de la península hacia el Océano Pacífico. Los vientos que soplan desde el continente se incorporan al flujo general a lo largo del eje longitudinal del GC (Fig. 3C).

Al observar de forma conjunta CLA, TSM y VNT de la figura 3, se observa una co-oscilación entre ellas. En febrero el viento dentro del golfo es paralelo a la costa con dirección noroeste-sureste, hay menor temperatura en la costa continental y una mayor CLA en esta misma zona. De forma opuesta en agosto (Fig.4) el viento sufre un cambio de dirección y es predominantemente sureste. Hay aumento de TSM y disminución de CLA principalmente en la banda costera, es decir, que TSM y CLA se encuentran en contrafase.

CICLO ANUAL: AGOSTO

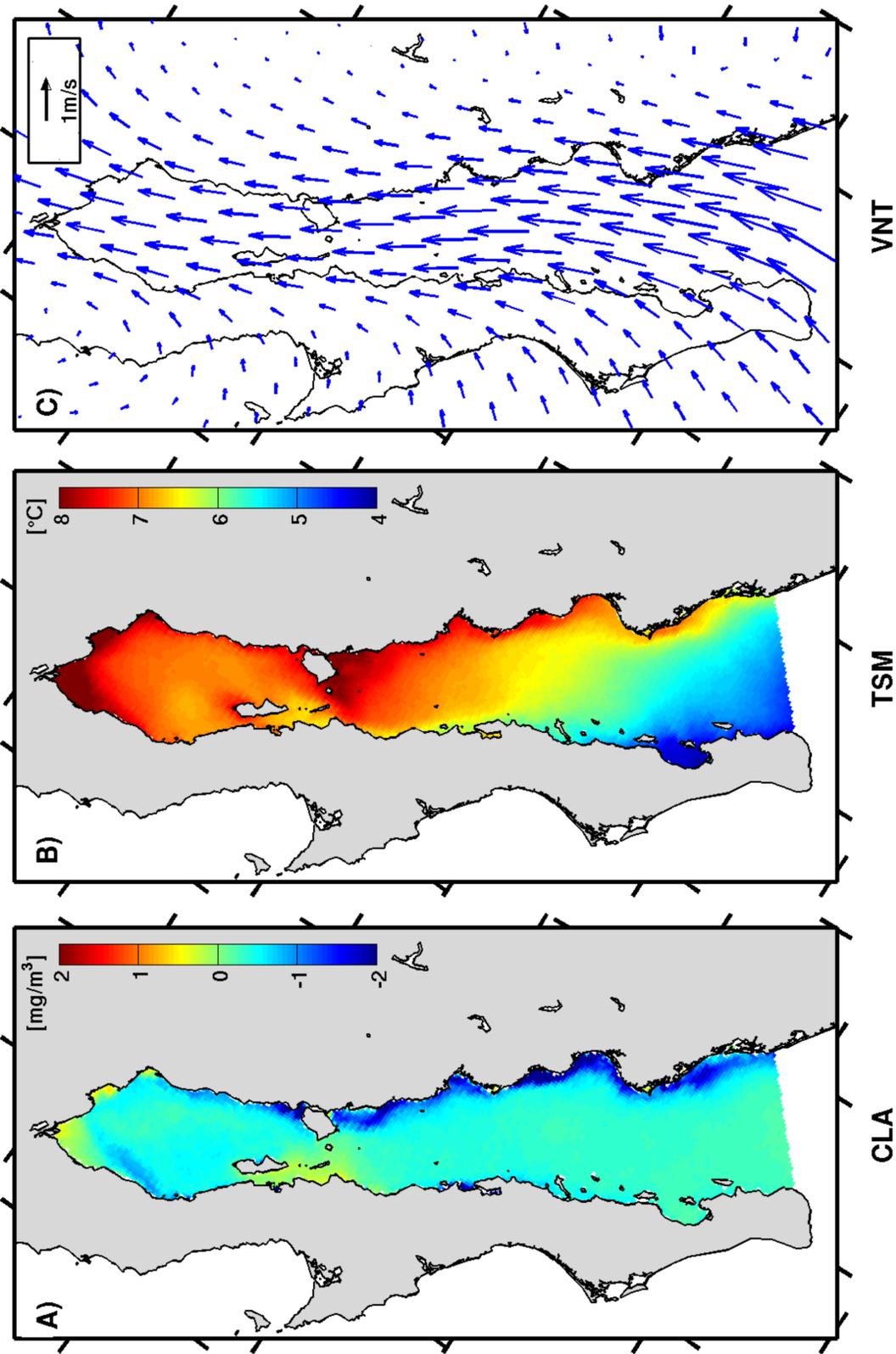


Figura 4: Reconstrucción del ciclo anual en agosto. Se muestra la concentración de clorofila (CLA), temperatura superficial (TSM) y campo de viento (VNT)

9.3. Componente semianual

La clorofila tiene las máximas amplitudes (0.5 mg/m^3) en la RAC con desviaciones negativas en febrero (Fig. 5) y positivas en mayo (Fig. 6A). El patrón espacial de TSM coincide con el de CLA, pero se encuentra en contrafase (Figs. 5B y 6B); en febrero (mayo), las desviaciones del ciclo semianual respecto a la media, son positivas (negativas) alrededor de la RAC. Es notable en las figuras 5 y 6, la coincidencia en los patrones espaciales de TSM y CLA en la RAC.

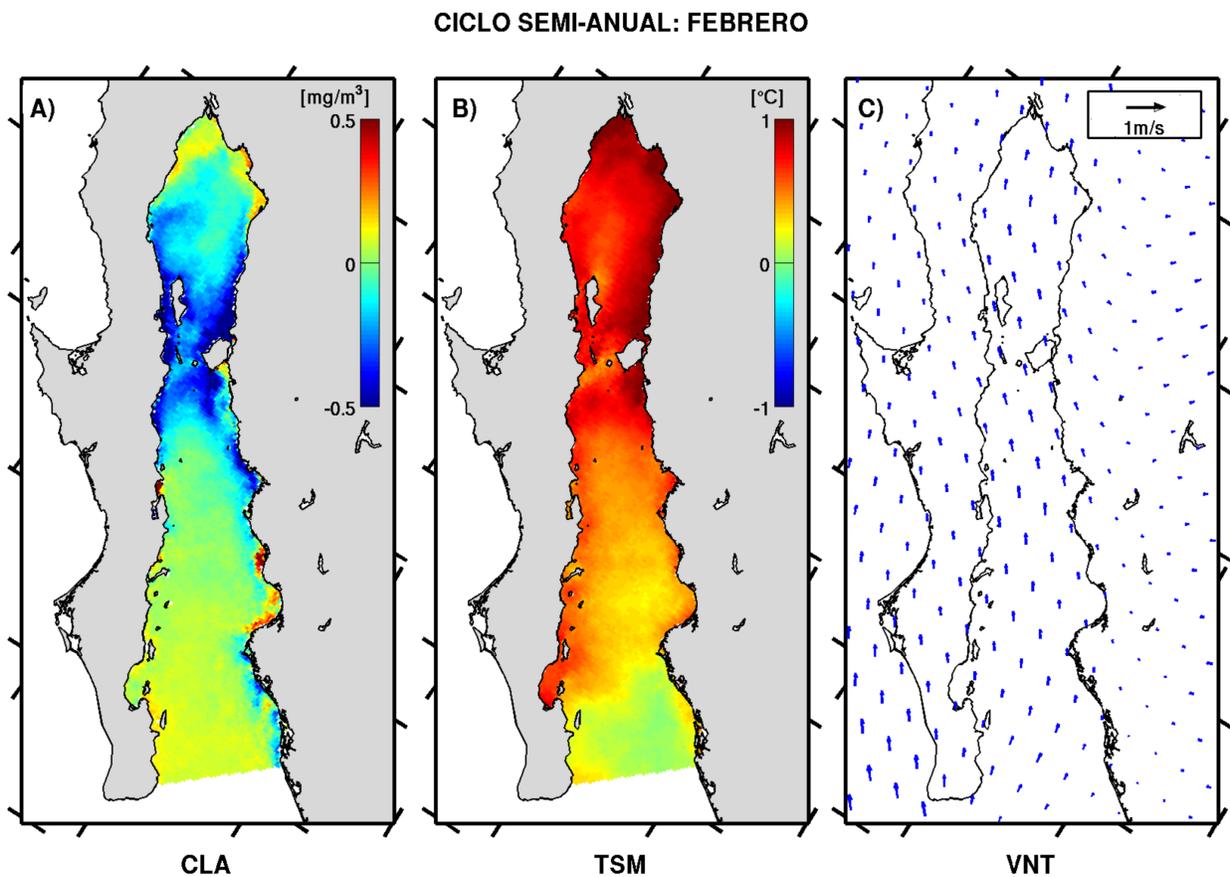


Figura 5: Ciclo semianual reconstruido en febrero. Se muestra la concentración de clorofila (CLA), temperatura superficial (TSM) y campo de viento (VNT)

En este armónico el viento en febrero tiene una dirección predominantemente hacia el norte sobre el eje del GC la península, pero sobre el continente es mayormente zonal con dirección hacia el oeste. En mayo el patrón se invierte (Fig. 6C).

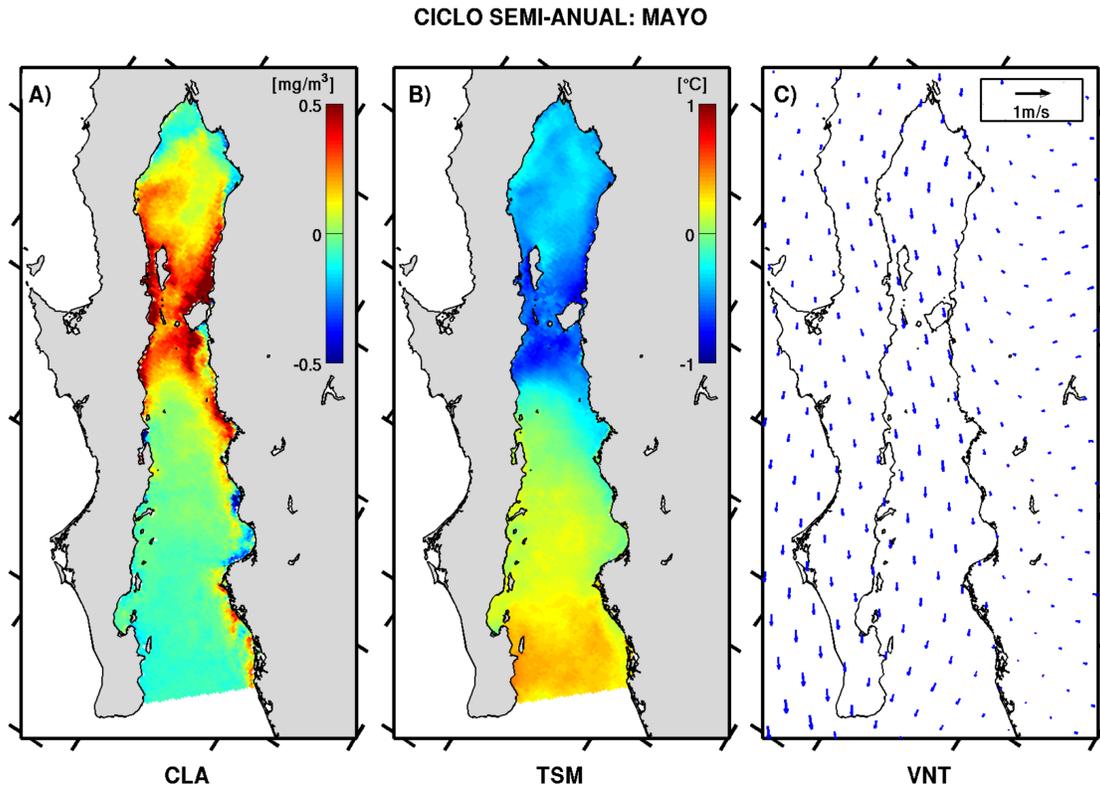


Figura 6: Ciclo semianual reconstruido en mayo. Se muestra la concentración de clorofila (CLA), temperatura superficial (TSM) y campo de viento (VNT)

9.4. Funciones empíricas ortogonales de campos no estacionales

Los primeros tres modos FEOs explican el 41.92, 81.89 y 67.58% de la variancia de los residuos para CLA, TSM y VNT respectivamente (Tabla 2).

Tabla 2: Variancia explicada por los tres primeros modos FEOs de clorofila (CLA), temperatura (TSM), y viento (VNT)

	CLA	TSM	VNT
FEOs-1	30.85	70.14	35.99
FEOs-2	6.53	7.37	18.71
FEOs-3	4.54	4.38	12.88
SUMA	41.92	81.89	67.58

El patrón espacial del primer modo FEOs está representado en la figura 7, presenta máximos de CLA en la región costera desde el GS hasta los 30°N, con amplitudes entre los 0.8-1mg/m³ (Fig. 7A). En el resto del GC las amplitudes son menores a 0.2 mg/m³, con excepción de algunas bandas que cruzan el golfo y que presentaron amplitudes aproximadas de 0.4 mg/m³.

El primer modo FEOs de TSM muestra dos regiones en su componente espacial: el GN con amplitudes entre 1.5-2°C, y GS con valores mayores a los 2.5°C y alcanzando amplitudes de hasta 3°C en una banda costera en la porción continental (Fig. 7B). Además, en el GN, se nota una zona donde la TSM varía en menor magnitud que el resto de la región. Esta zona se extiende desde el este de Isla Angel de la Guarda donde es estrecha, hasta el norte de 30°N donde su área se amplía (Fig. 7B).

La banda costera del primer modo de CLA coincide espacialmente con las máximas amplitudes descritas para el primer modo de TSM (Fig. 7A y B). Esta banda costera es uno de los rasgos más evidentes en el patrón espacial de CLA, aunque otras particularidades, como las amplitudes espaciales de ~ 0 mg/m³ a lo largo del Canal de Ballenas, también son notorias (Fig. 7A). Por otra parte, en el campo de viento de este modo predomina la dirección noroeste a lo largo del eje del GC (Fig. 7C).

PRIMER MODO FEOS

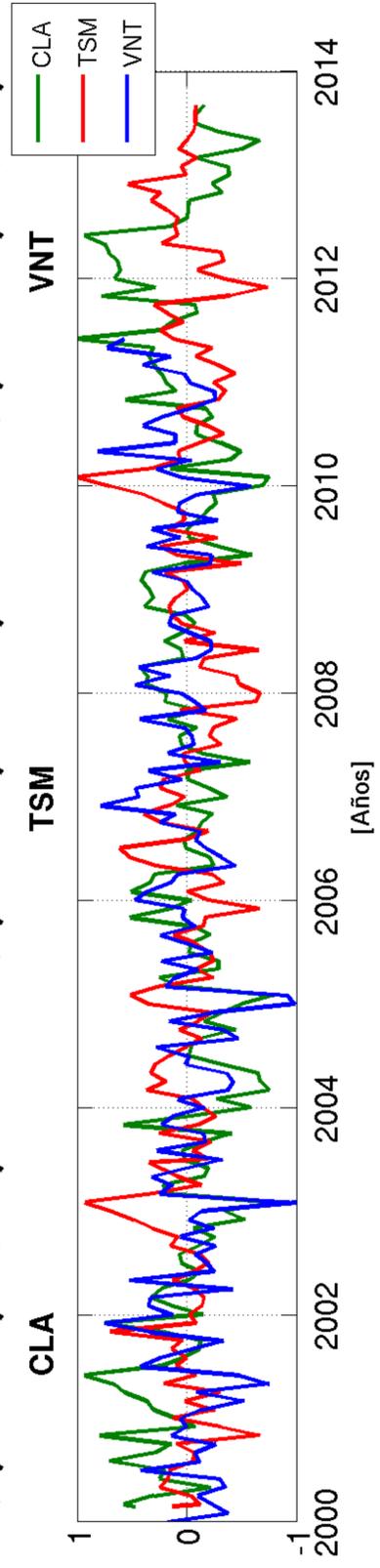
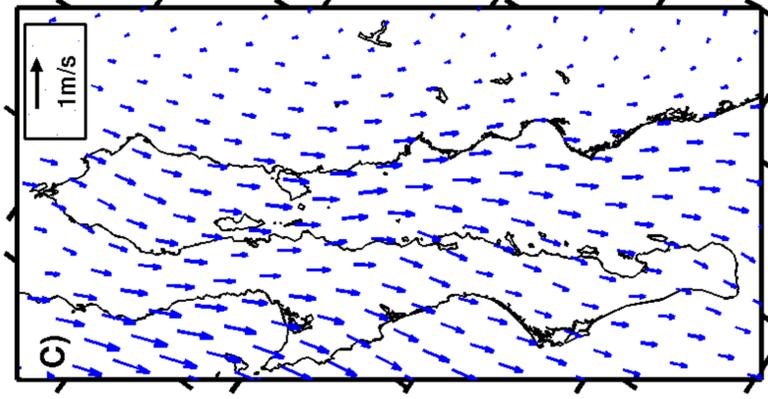
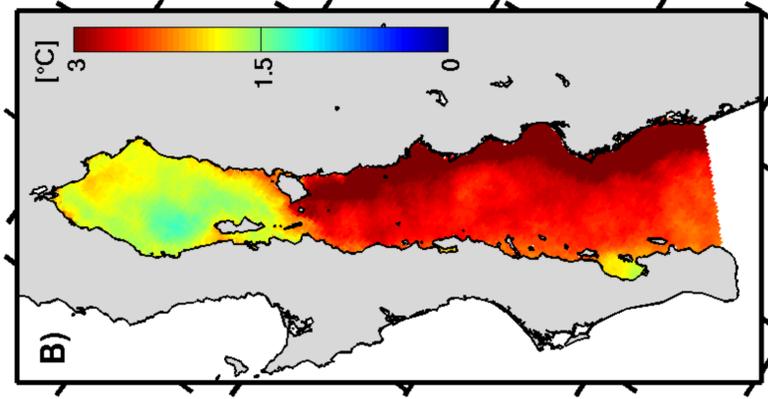
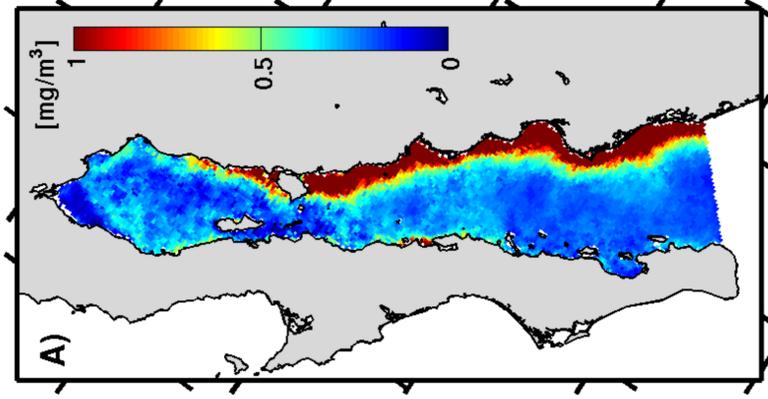


Figura 7: Primer modo FEOS de tres campos geofísicos. Concentración de clorofila a (CLA), temperatura superficial del mar (TSM) y velocidad del viento (VNT)

Las tres variables tienen un comportamiento espacial de monopolo (todos los valores con el mismo signo en Fig. 7) en el primer modo FEOs, que se encuentra modulado por las amplitudes de las series temporales mostradas en el panel inferior de la figura 7.

Al hacer correlaciones lineales entre las series de tiempo del primer modo FEOs, se encontró una relación inversa entre la TSM y CLA (Tabla 3), aunque oscilando de forma conjunta. Es decir, con un aumento de TSM ocurre una disminución de CLA. El viento también tuvo una co-oscilación con la TSM, que se puede ver claramente en un evento del 2010, donde junto con el aumento de la temperatura ocurre una inversión en la dirección del campo de viento (Fig. 7).

Tabla 3: Coeficiente de correlación y valor de p de las correlaciones entre las series de tiempo del primer modo FEOs

	CLA	TSM	VNT
CLA	1		
TSM	-0.4 (p<0.05)	1	
VNT	0.28 (p<0.05)	0.22 (p<0.05)	1

El segundo y tercer modo de las FEOs tienen sus patrones espaciales definidos, pero no se encontraron coincidencias en los patrones espaciales, ni correlaciones entre sus series temporales.

Al hacer correlaciones entre la TSM del segundo modo y VNT del tercero se encontraron correlaciones negativas ($r=-0.27$, *valor-p*<0.05, n=137), mientras que la TSM del tercer modo y el VNT del segundo tuvieron una correlación positiva ($r = 0.28$, *valor-p* < 0.05, n=137). Sin embargo, estas correlaciones se consideraron muy bajas.

La relación entre el tercer modo de TSM y el segundo modo de VNT se muestran en la figura 8, donde se diferencian tres regiones, una en el GN y dos en el GS. En el GN, se define la primer región donde las amplitudes de TSM son superiores a los 0.5°C en su centro y con disminución hacia las costas. En esta región el patrón de viento atraviesa el golfo desde el continente hacia la península, en un claro patrón transversal que es muy conspicuo sobre la Isla Angel de la Guarda.

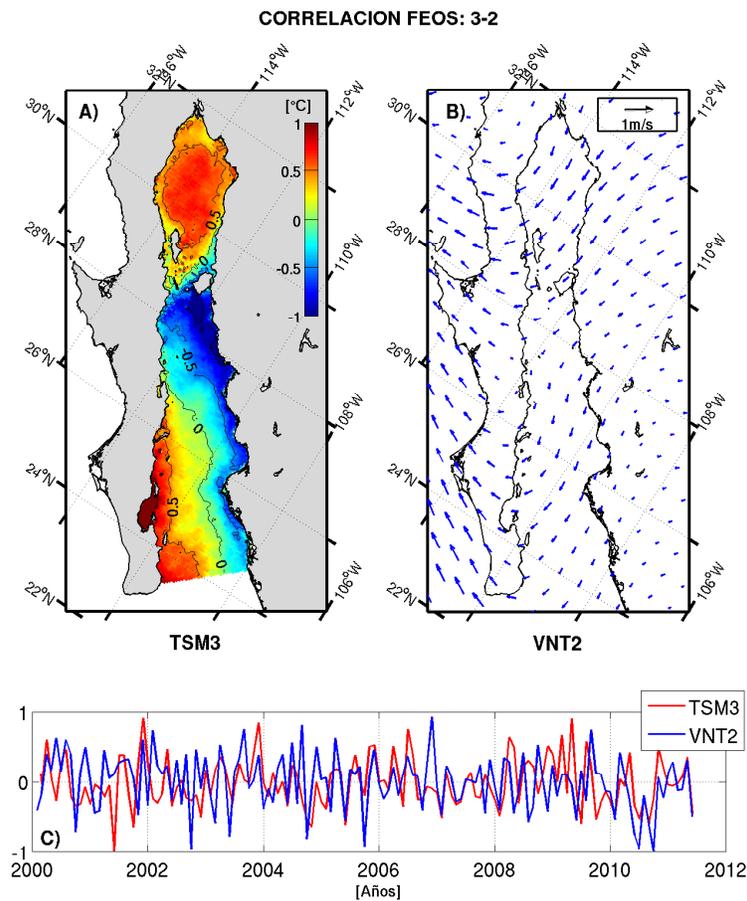


Figura 8: Relación entre el tercer modo FEOs de temperatura superficial del mar (TSM3) y el segundo modo del campo de viento (VNT2). En el panel superior se muestran los patrones espaciales que se encuentra modulados por las series temporales del panel inferior

En el GS las dos regiones a las que se hace referencia se encuentran separadas por el 0 en las amplitudes de TSM (color verde en la Fig. 8A), que corre paralelo al eje longitudinal del golfo. La primer zona comprende una banda costera continental estrecha con valores negativos de TSM menores a los -0.5°C y ubicados entre los 24°N y 27°N . Al norte de los 27°N la banda se extiende a lo ancho de golfo , cubriendo el área entre 27°N y 28°N , justo hasta el sur-suroeste de la Isla Tiburón, donde los vectores de viento se bifurcan en dos ramas. Una de las cuales presenta dirección hacia el noroeste y la otra hacia el sur-sureste (Fig. 8B).

La segunda zona del GS corresponde a un área que se extiende a lo largo del extremo sur de la península de California, desde los 26°N , en donde las los valores del componente espacial de TSM son positivos, con máximos en la Bahía de la Paz y aguas circundantes. El viento en esta zona es predominante hacia el sur y cambia su dirección al salir de GC dirigiéndose el noroeste (Fig. 8B).

9.5. Algoritmo de Canny

En la figura 9 se muestra una comparación, en el mes de abril, de la detección de frentes con los parámetros óptimos y los que producen resultados no adecuados. Al usar un umbral mayor de 0.03 y una desviación estándar de 0.50, se detecta una gran cantidad de bordes en el GN, la región RAC y parte del GS. Estos bordes fueron asociados al ruido o altas frecuencias que se acentúan con los cálculos del gradiente (Fig.9A).

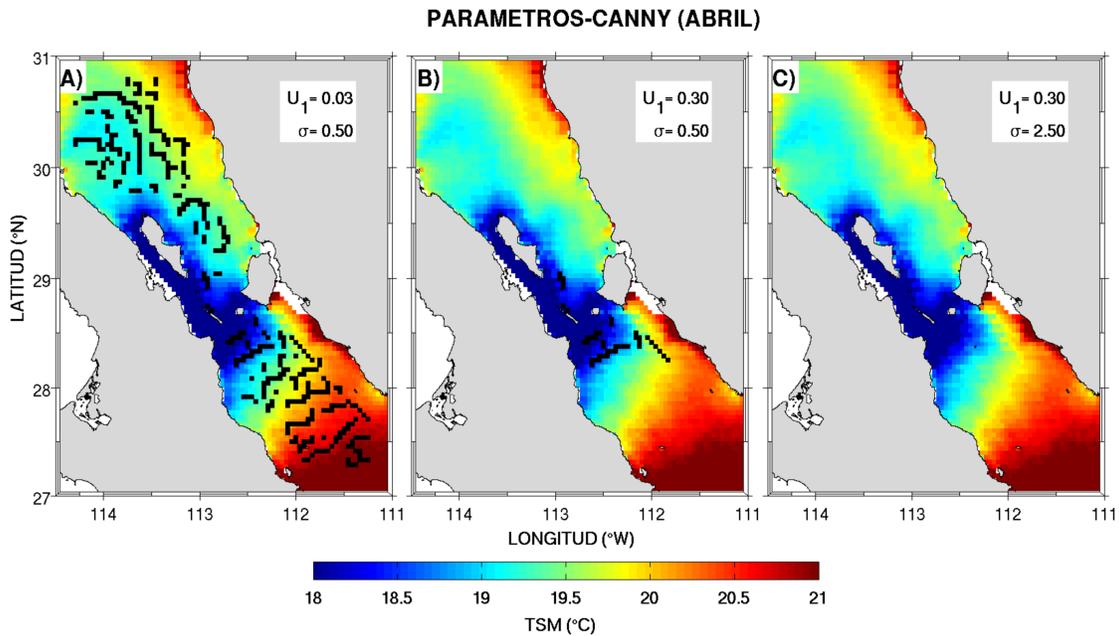


Figura 9: Algoritmo de Canny con diferentes parámetros para el mes de abril. Se comparan los resultados de los parámetros que producen ruido (A), los óptimos (B) y un alisado excesivo por altos valores de sigma (C). Los bordes corresponden a los píxeles marcados en negro, los colores a la TSM climatológica y en los recuadros insertos se indican los valores de los parámetros

Con valores de 0.3 y 0.5 para U_2 y σ respectivamente, se obtienen dos únicos bordes en la RAC justo donde se encuentran los mínimos de temperatura (Fig. 9B). Por otro lado, si se mantiene el valor de umbral mayor en 0.3 y se aumenta σ a 2.50, se observa que el algoritmo no puede detectar ningún borde (Fig. 9C). Esto ocurre porque sigma define las características del filtro utilizado para eliminar el ruido, que con valores muy altos, suaviza completamente el campo e imposibilita la detección de algún borde. Considerando esto, se seleccionaron los parámetros óptimos para cada mes y se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4: Valores óptimos para el umbral menor (U_2), umbral mayor (U_1) y la desviación estándar (σ) usados en la detección de bordes sobre las climatologías mensuales de TSM

Mes	U_2	U_1	σ
Enero	0.11	0.28	1.00
Febrero	0.10	0.25	0.50
Marzo	0.12	0.30	0.50
Abril	0.12	0.30	0.50
Mayo	0.11	0.28	1.00
Junio	0.10	0.25	1.00
Julio	0.12	0.30	0.50
Agosto	0.12	0.30	0.50
Septiembre	0.10	0.25	1.00
Octubre	0.12	0.30	1.00
Noviembre	0.14	0.35	1.00
Diciembre	0.12	0.30	1.00

9.6. Progresión temporal de los frentes en escala climatológica

En enero sobre el GN se evidenció una estructura circular de aguas menos frías delimitadas por bordes, que parece estar asociada a un brazo que alcanza la Isla Ángel de la Guarda (Fig. 10A). El brazo se extiende desde los 30.5°N siguiendo hacia el sureste hasta llegar a la cuenca Tiburón con un frente detectado en su lado oriental. Al sur de las islas San Lorenzo y San Esteban se prolonga un borde desde la península hacia la Isla Tiburón siguiendo los mínimos de TSM ($\sim 16^\circ\text{C}$). Este borde se encuentra con otra estructura que sale de la costa continental hacia el centro de la zona con menor TSM al sur de las islas sobre los ≈ 16 y 17°C . Otros bordes aparecen más al sur en aguas relativamente más cálidas sobre la porción central del GC (Fig. 10A).

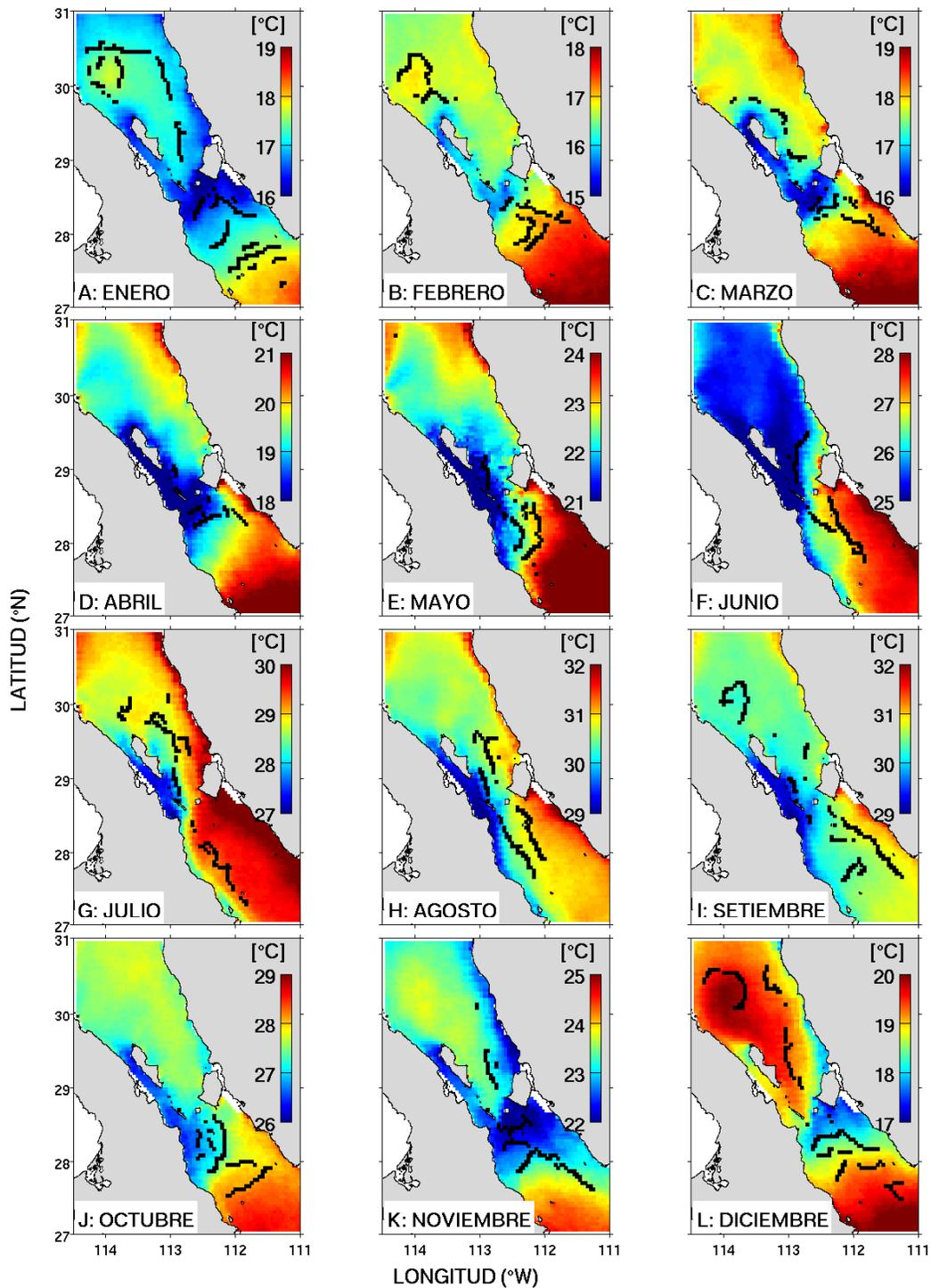


Figura 10: Evolución temporal de los frentes en la RAC. En colores la climatología mensual de TSM. Los pixeles marcados en negro corresponde a bordes detectados con el algoritmo de canny con los parámetros óptimos

En febrero (Fig. 10B), se encontraron temperaturas bajas y se sigue distinguiendo el núcleo relativamente cálido ($\approx 17^\circ\text{C}$) centrado en 30°N y 114°W (Fig. 10B). El brazo de aguas que incursiona hacia el sur es evidente en los valores climatológicos de TSM, pero el borde ya no es detectado. Otros tres bordes se detectaron al sur de las grandes islas, siguiendo las TSM entre los 15.5 y 16°C , en la zona donde se presentan los mínimos de temperatura para este mes. Otros dos frentes fueron detectados sobre aguas relativamente más cálidas (16.5 - 17.5°C) con una posición más al sur y una prolongación en su parte central que incursiona hacia el norte (Fig. 10B).

En marzo los bordes rodean la parte media y el extremo noreste de Isla Ángel de la Guarda, mientras que al sur de las grandes islas se mantiene un borde perpendicular al eje longitudinal del GC entre los 16 y 17°C (Fig. 10C). En el lado continental se observan bordes con dirección noreste- sureste desde los 28.5°N hasta los 27.5°N siguiendo la línea costera. Estos bordes disminuyen en longitud para abril (Fig. 10D), cuando las aguas frías del Canal de Ballenas parecen extenderse hacia el sur a lo largo de la costa peninsular. Las aguas con menores TSM parecen tener su límite sur delimitado por dos bordes paralelos entre sí pero de longitud variable (Fig. 10 D).

Mayo se distingue de otros meses por presentar una forma de transición en la posición del frente, por una extensión hacia el sur de los mínimos de TSM en el lado peninsular hasta los 27.5° de latitud norte y por el establecimiento de un gradiente este-oeste (Fig. 10E). Las aguas relativamente más cálidas se encuentran del lado continental, extendiéndose desde el sur del área de estudio hasta el sur de la Isla Tiburón. Los dos bordes detectados en mayo (Fig. 10E), parecen limitar la distribución de aguas relativamente cálidas ($\text{TSM} > 23^\circ\text{C}$) de las menores TSM ($\text{TSM} < 22^\circ\text{C}$). En el GN, ya no se distingue el núcleo y el brazo de aguas relativamente cálidas ni sus bordes asociados. Únicamente se observa una TSM mayor cerca de las costas, mientras en la zona central la TSM se encuentra alrededor de los 22.5°C (Fig. 10E).

En junio los frentes tienen una forma cóncava respecto al continente (Fig. 10F). Esta

concauidad disminuye en julio (Fig. 10G) y deja de ser evidente en agosto cuando el frente adopta una posición paralela al eje longitudinal (Fig. 10H). Para setiembre el frente continúa paralelo, aunque la cantidad de pixeles considerados como bordes disminuye, tal y como se muestra en la figura 10I.

Octubre al igual que mayo, se considera una forma de transición y se observan tres estructuras frontales de considerable longitud (Fig. 10J). En noviembre el frente al sur de las grandes islas vuelve a una posición transversal, pero aparece junto con tres bordes más (Fig. 10K). Uno que parece limitar un brazo de aguas cálidas que provienen del GN y que se observa al sureste de la Isla Ángel de la Guarda. Inmediatamente al sur de las islas San Lorenzo y San Esteban, se encuentran el frente del sur de la RAC y un borde más hacia el sur. Finalmente para este mes el borde de mayor longitud se encuentra separando las aguas con TSM mayores de 23°C de las aguas con temperaturas entre los 22-22.5°C (Fig. 10K).

En diciembre mostrado en la figura 10L, los patrones son similares a enero, debido a que se observa un núcleo de aguas con temperaturas mayores o iguales a los 20°C al norte de la Isla Ángel de la Guarda y un brazo de TSM relativamente cálidas que se extiende justo hasta el extremo de la Isla San Lorenzo. Tanto el núcleo como el brazo se encuentran delimitados por bordes.

Al sur y suroeste de la Isla Tiburón se observan las mínimas temperatura y es en donde se ubica el borde de mayor longitud (Fig. 10L). Este borde es transversal al eje longitudinal del golfo hasta los 112°W, y posteriormente se desvía hacia el sureste siguiendo los mínimos de TSM.

En síntesis en la figura 10, se observa un cambio en la posición del frente respecto al eje longitudinal del GC, pasando de paralelo a transversal y regresando a ser paralelo de una forma cíclica. De noviembre a abril (Fig. 10 paneles A,B,C,D,K,L) los resultados sugieren una posición perpendicular, es decir, extendiéndose desde la costa peninsular hacia el continente.

En los meses de junio a setiembre mantiene una posición paralela (Fig. 10F-I), y finalmente marzo y octubre son considerados como formas intermedias o de transición (Fig. 10C y J respectivamente).

9.7. Patrones Generales de Distribución de larvas de peces

De los diferentes taxones analizados en este estudio se pueden generalizar tres patrones de distribución: (i) taxones restringidos al GN (*Anchoa* spp. y *Merluccius productus*), (ii) ubicados al sur del frente en el GS (*Vinciguerria lucetia*, *Sardinops sagax* y *Diogenichthys laternatus*), y (iii) taxones con presencia tanto en el GN como el GS, que en el contexto de este trabajo se les consideró como taxones de amplia distribución (*Engraulis mordax*, *Benthoosema panamense*, *Auxis* spp., *Opisthonema libertate* y *Scomber japonicus*).

La distribución individual de los dos taxones con distribución al norte se muestra en la figura 11. *Anchoa* spp. (Fig. 11A), presentó una afinidad hacia la costa peninsular donde tienen la mayor frecuencia de aparición y abundancias relativamente altas (mayores de 101-1000 larvas/10m²). Además, es notable la ausencia del género en la porción central del GN y una prolongación de su distribución hacia el sur hasta los 27.5°N sobre el Canal de Ballenas. Por otro lado *M. productus* tiene sus mayores abundancias en la porción central del GN sobre la plataforma, con disminución hacia las costas y ausencia total sobre el Canal de Ballenas (Fig. 11B).

Las especies con distribución al sur presentan la mayor cantidad de registros al sur de los 28.5°N, con notable ausencia sobre los mínimos de temperatura (TSM < 23°C) y muy pocos registros en el GN (Fig. 12). Particularmente, *D. laternatus* tiene sus mayores abundancias (101-1000 larvas/10m²) en la porción central del GS siguiendo la dirección del eje del GC y con una disminución de un orden de magnitud hacia las zonas costeras, aunque con más registros en lado peninsular que sobre la costa continental (Fig. 12A).

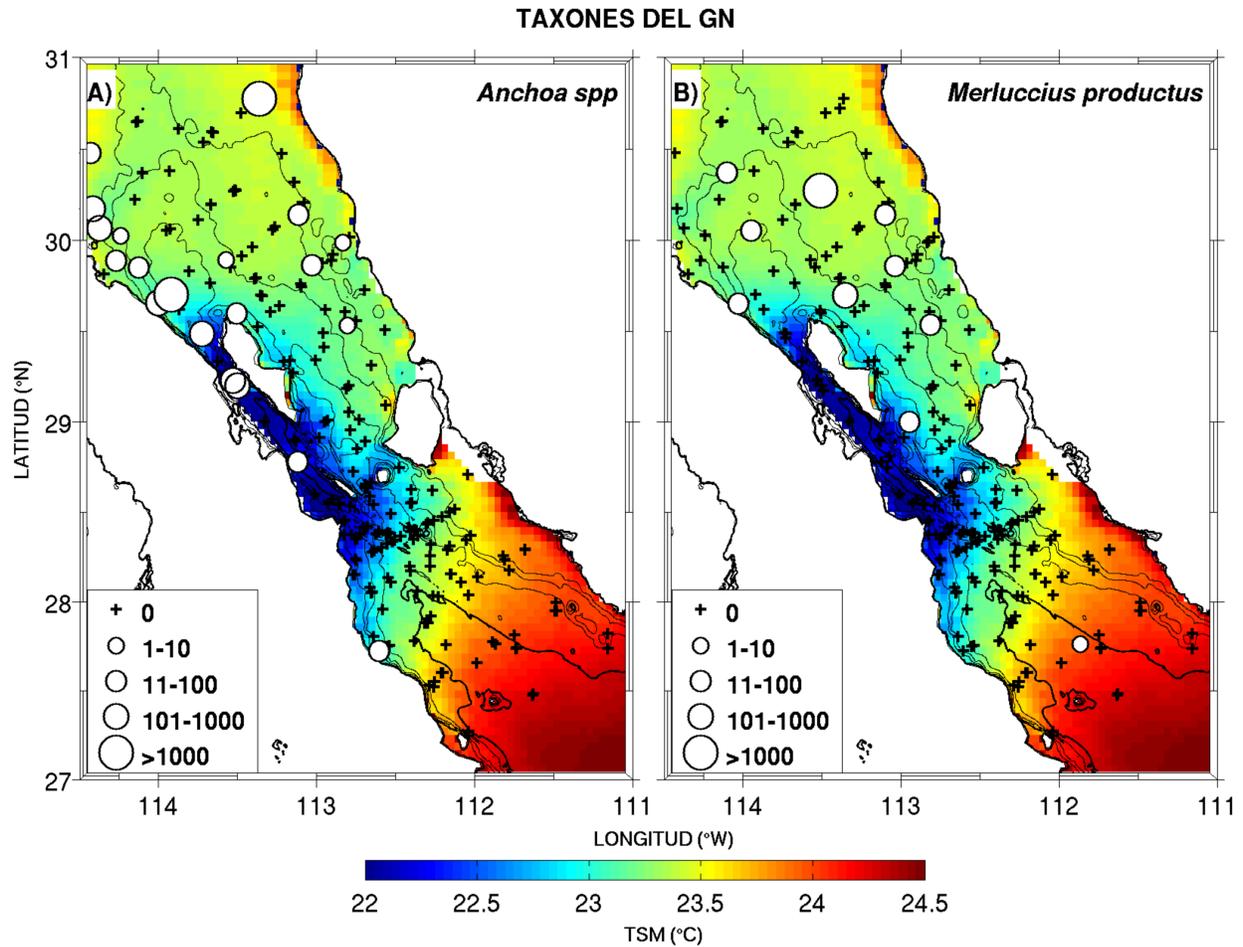


Figura 11: Distribución y abundancia de los taxones restringidos al GN. La distribución individual de *Anchoa* spp. (A) y *M. productus* (B) en el área de estudio, se muestran sobre la media a largo plazo del periodo 2000-2013 en colores y las isotermas representadas por los contornos

S. sagax tuvo sus mayores abundancias al sur de los 27.5°N, en zonas con temperaturas mayores a los 23.5°C, con mayor frecuencia hacia el centro y oeste del GS (Fig. 12B). Por otra parte, *V. lucetia* exhibió una clara disminución de sur a norte, con las mayores abundancias entre los 27-28°N donde la TSM es mayor a los 23.5°C (Fig. 12C).

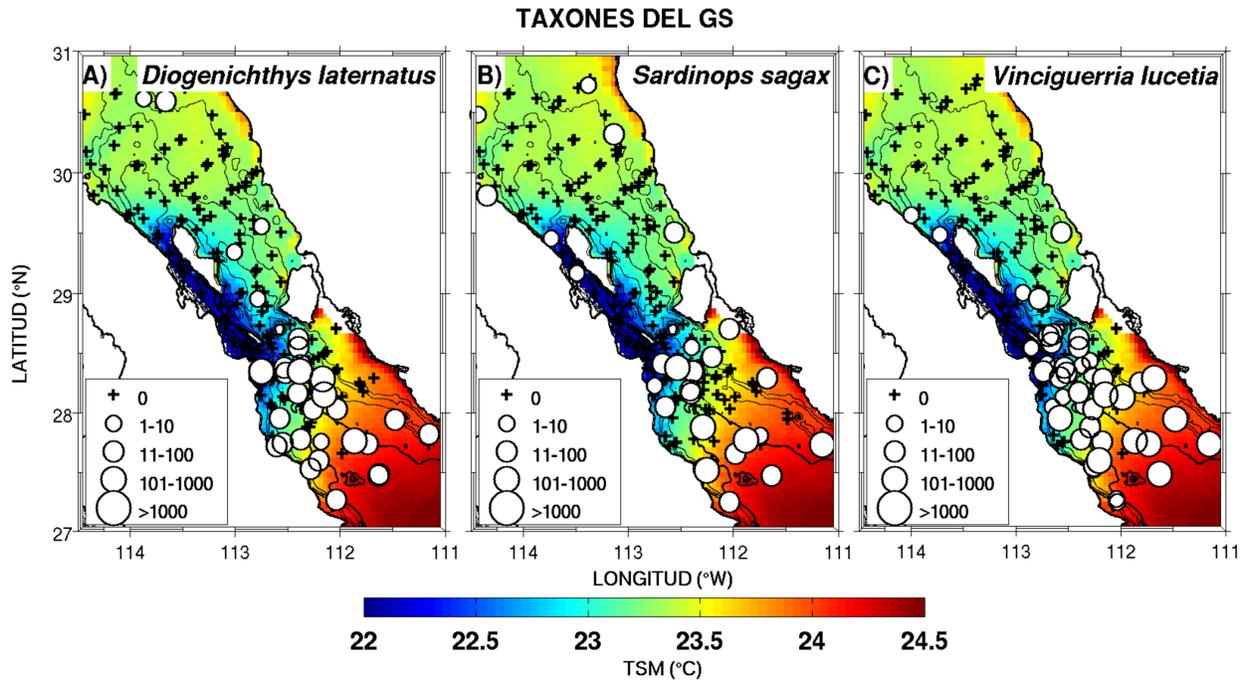


Figura 12: Distribución y abundancia de los taxones restringidos al GS. Se muestra la distribución individual de *D. laternatus* (A), *S. sagax* (B) y *V. lucetia* (C). En colores se presenta la media TSM del periodo 2000-2013 y las isotermas representadas por los contornos.

En la figura 13 se muestra la distribución y abundancia de *B. panamense*, *E. mordax* y *Auxis* spp., considerados como taxones de amplia distribución. Los primeros dos taxones tienen las mayores densidades larvales y frecuencias de aparición. En la mayor parte del área de estudio tienen densidades del orden de magnitud de 100-1000 larvas/m² o de más de 1000 larvas/10m² (Fig. 13A y B).

Además en estos dos taxones se nota una disminución de hasta tres ordenes de magnitud al oeste de la Isla San Lorenzo. El género *Auxis* spp. mostró mayores abundancias y frecuencias del lado continental en el GS, su frecuencia disminuyó en el GN y no se registró sobre el Canal de Ballenas (Fig. 13C)

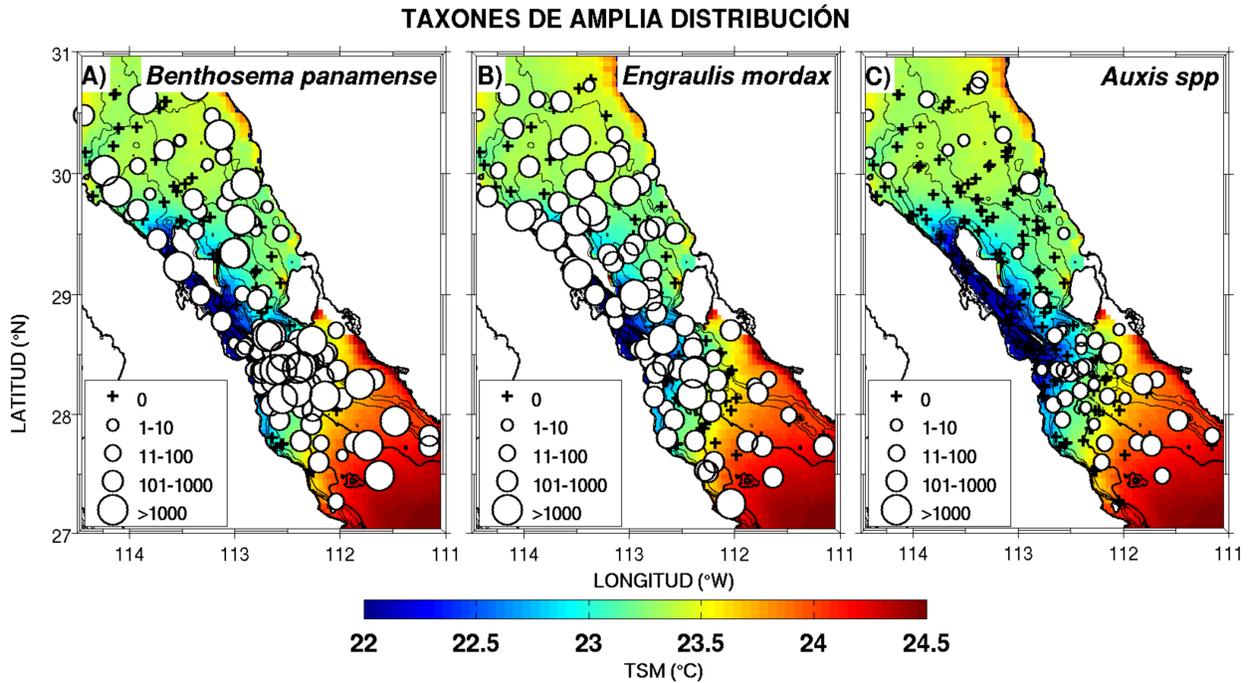


Figura 13: Distribución y abundancia de algunos taxones de amplia distribución. Se muestra la distribución individual de *B. panamense* (A), *E. mordax* (B) y *Auxis spp.* (C). En colores se presenta la media de TSM del periodo 2000-2013 y las isotermas representadas por los contornos.

9.8. Cambios temporales de la distribución de larvas de peces

Los patrones generales de las especies son el resultado de la agregación de los datos de distribución y abundancia de larvas de peces en cruceros individuales (Tabla 1). Sin embargo, en algunas especies estos patrones mostraron cambios notables dependiendo del mes de muestreo y sugieren una relación con el desplazamiento de los sistemas frontales ubicados al sur de las grandes islas. Los ejemplos más claros se abordan en esta sección y en el anexo II se muestra la distribución de los taxones no considerados.

Uno de estos casos es el de *Auxis spp.*, un género que presentó las mayores frecuencias y abundancias durante junio y agosto.

En junio las mayores concentraciones estuvieron en zonas con temperaturas superiores a los 26.5°C, al sur de 29°N y cerca de la costa continental (Fig. 14A). Se puede notar que las estaciones donde la TSM fue menor a los 26°C del lado peninsular tienen ausencia del género.

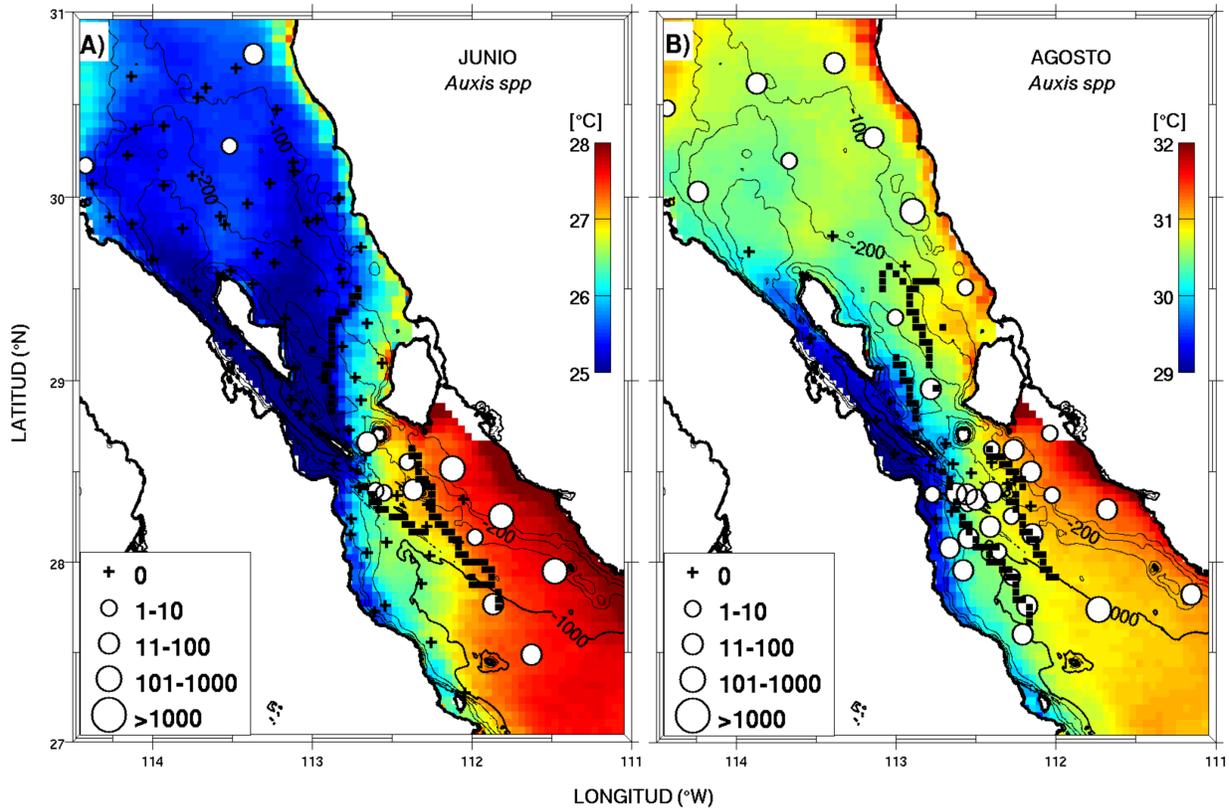


Figura 14: Cambios temporales en la distribución y abundancia de *Auxis spp.* entre junio (A) y agosto (B)

Por otra parte en agosto, en esta misma área se observa una ampliación de la distribución del género que ocupa prácticamente todo el ancho del GC (Fig. 14B).

Sin embargo, en lado con menores temperaturas (lado frío) de los frentes térmicos detectados, hay menor frecuencia del género. Un comportamiento similar se observa en *B. panamense* en estos mismo meses (Fig. 15) y es un poco menos claro en *V. lucetia* (Anexo II)

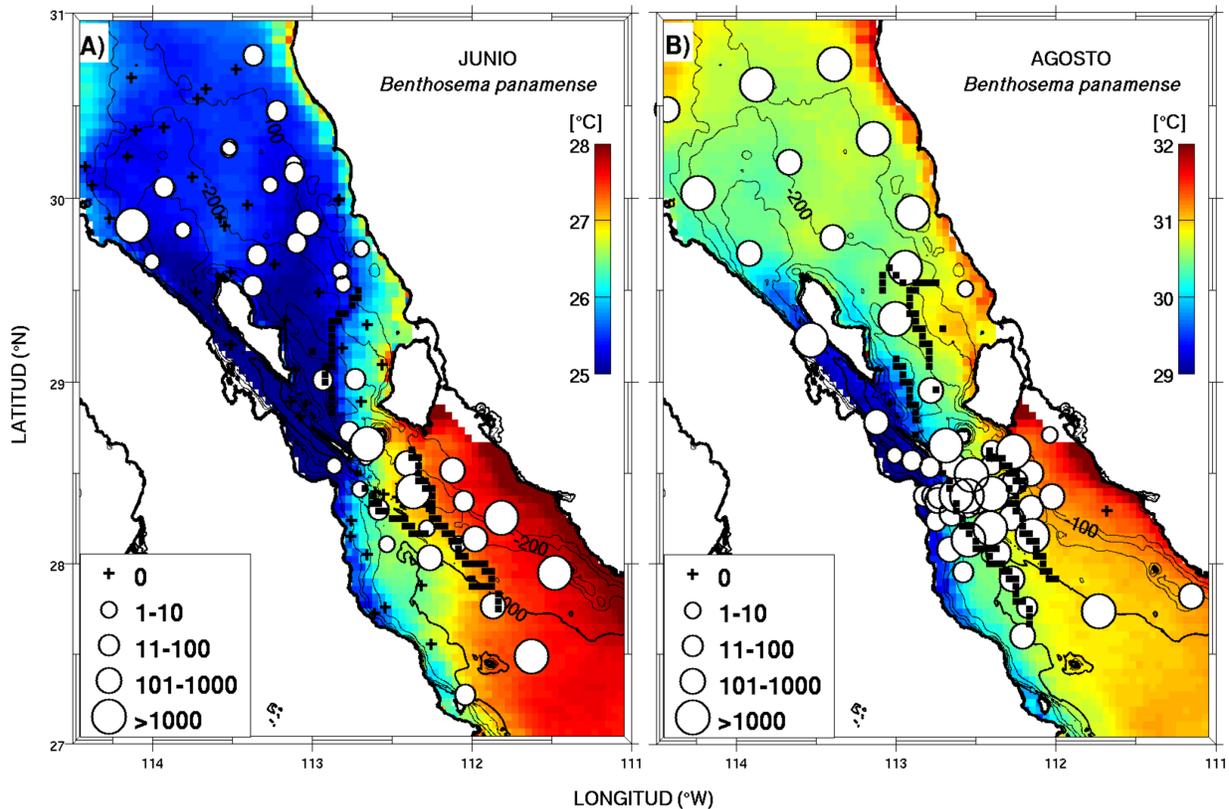


Figura 15: Cambios temporales en la distribución y abundancia de *B. panamense* entre junio (A) y agosto (B).

De los taxones limitados al norte, solo *Anchoa* spp. mostró una variación temporal en su patrón de distribución (ver Fig. 16A y B).

Su tendencia es hacia el lado peninsular, pero durante los cruceros de junio hubo presencia de la especie del lado continental teniendo las mayores concentraciones al norte de los 30.5°N (Fig.16B).

Los datos obtenidos en el único crucero realizado en diciembre (ver tabla 1), muestran un comportamiento particular que se ejemplifica en la figura 17. La distribución de los taxones asociados al GS (*V. lucetia* y *S. sagax*) se amplia hacia el norte y su abundancia es relativamente homogénea. *E. mordax* que es considerada de afinidad templada, tuvo una relativa homogeneidad en sus abundancias, pero con una disminución de hasta dos órdenes de magnitud.

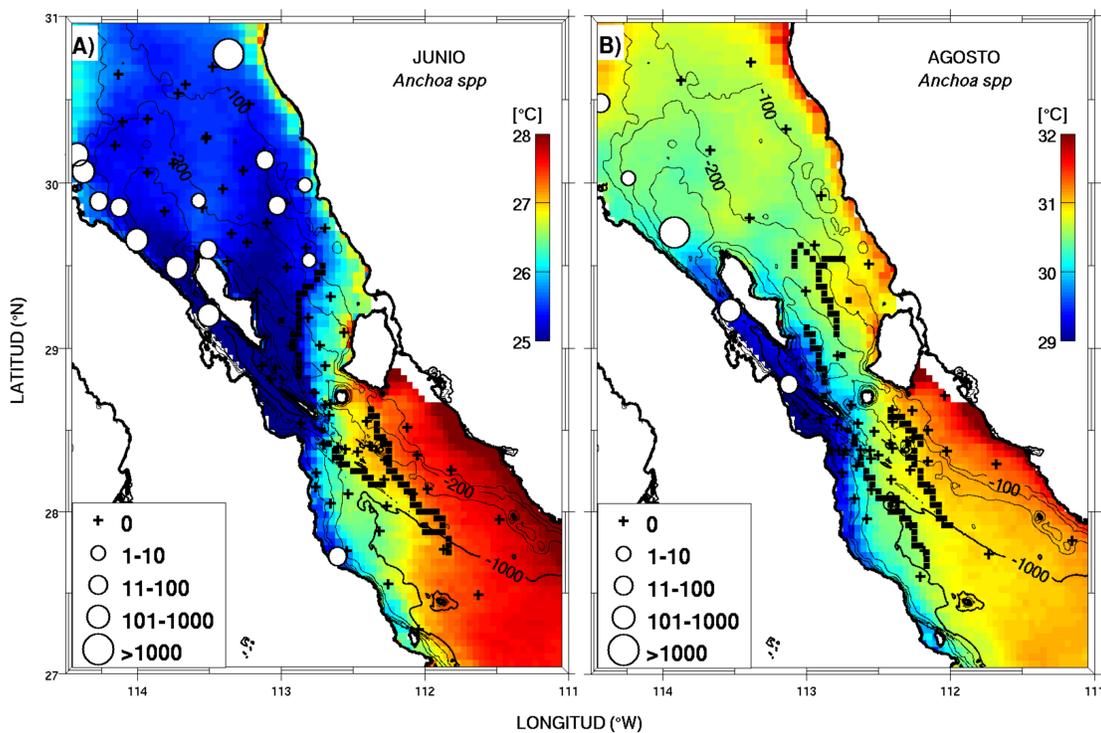


Figura 16: Cambios temporales en la distribución y abundancia de *Anchoa* spp. entre junio (A) y agosto (B).

DISTRIBUCION DE LARVAS DURANTE UN ENOS (DEC-2002)

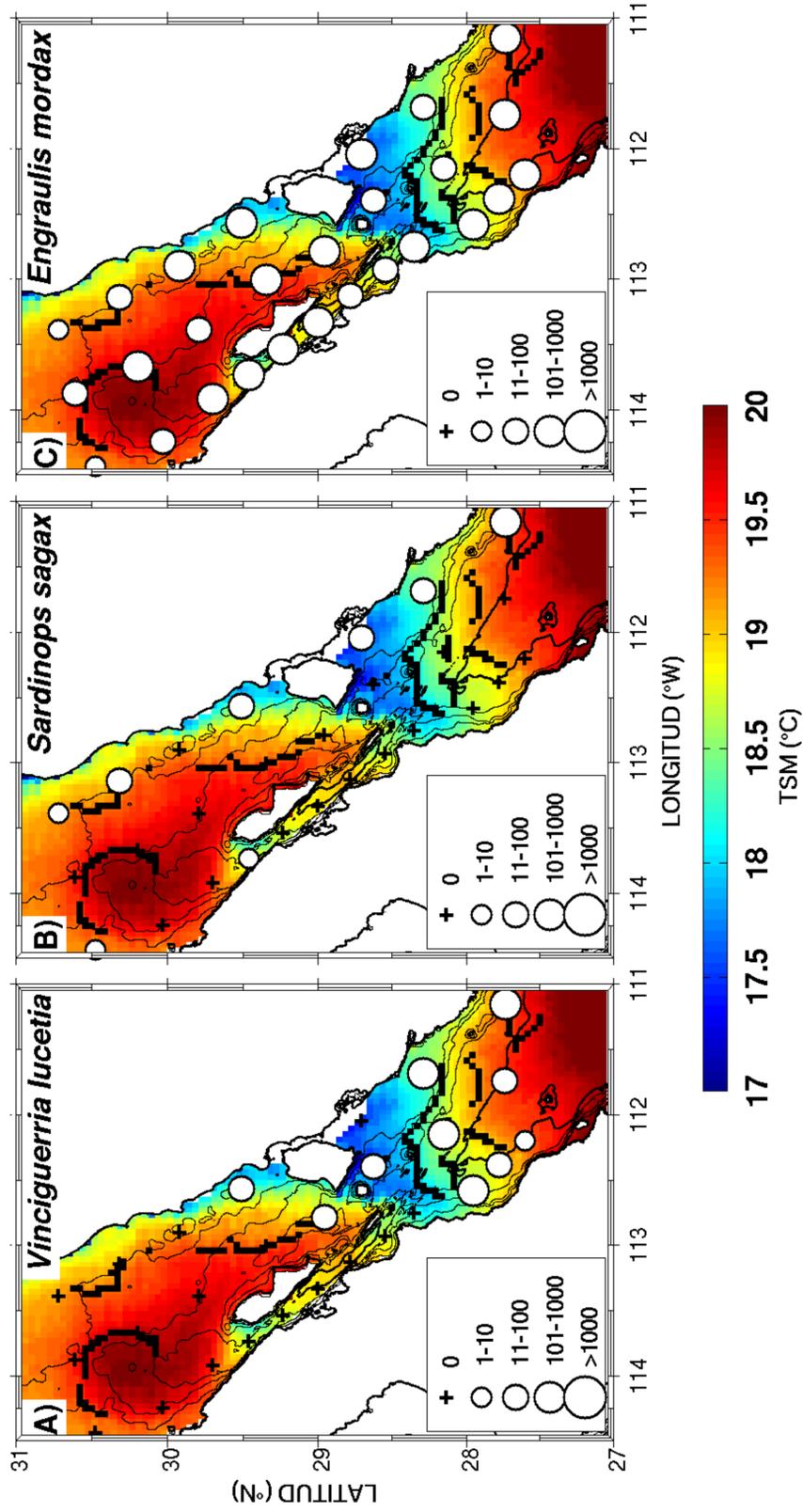


Figura 17: Distribución y abundancia de *V. lucetia* (A), *S. sagax* (B) y *E. mordax* (C) durante diciembre de 2002.

10. DISCUSION

10.1. Media de Largo Periodo

El patrón espacial de la media CLA del periodo 2000-2013, muestra coincidencias con los resultados de [Espinosa-Carreón & Valdez-Holguín \(2007\)](#) quienes analizaron las variaciones interanuales de clorofila en el GC, a pesar de que utilizaron una serie de tiempo de 1997-2002 y el sensor SeaWiFS. Las similitudes con este trabajo son consistentes en su patrón espacial y magnitud. Los valores máximos del campo medio se encuentran en la banda costera continental y corresponden a valores mayores o iguales a los $2\text{mg}/\text{m}^3$. Esto sugiere que aunque MODIS-T no tiene independencia de otros sensores en sus incertidumbres, es suficiente para los fines de este trabajo en el que se pretende analizar principalmente las variaciones espaciales y temporales de forma relativa, y en donde los valores absolutos no son tan relevantes. En este contexto se discuten los patrones generales en GC, enfatizando en las características de la RAC.

En la RAC, donde se encuentran valores relativamente altos de CLA, la ocurrencia de mezcla mareal intensa, el rompimiento de ondas internas y las surgencias inducidas por convergencia, pueden estar enriqueciendo las aguas superficiales ([Simpson *et al.* 1994](#); [Gaxiola-Castro *et al.* 2002](#); [López *et al.* 2006](#)). Sin embargo, el patrón difiere sobre el Canal de Ballenas, la porción central y la zona costera continental de la RAC, posiblemente porque estos forzamientos actúan de forma distinta en cada una de estas zonas. Sobre los umbrales y el Canal de Ballenas opera la mezcla vertical inducida por marea y las surgencias por convergencia ([Paden *et al.* 1991](#); [Soto-Mardones *et al.* 1999](#); [Simpson *et al.* 1994](#); [Argote *et al.* 1995](#); [López *et al.* 2006](#); [López *et al.* 2008](#)). En la costa continental, [Santamaría-del Angel *et al.* \(1994\)](#), apunta que esta zona se encuentra sujeta a surgencias inducidas por el viento y la reconoce como una región biogeográfica distinta. En la región central del RAC es posible que el rompimiento de ondas internas reportado para esta zona ([Fu & Holt, 1984](#)), esté relacionado con el aumento en la concentración

de CLA (Gaxiola-Castro *et al.* 2002; Santamaría-del Angel *et al.* 1994). Esta zona es considerada como una región biogeográfica por Santamaría-del Angel *et al.* (1994) y aunque presenta valores relativamente altos que destacan en el campo medio, no son de la misma magnitud que los observados en la costa continental ni sobre el Canal de Ballenas. Por esto, además de los mecanismos asociados al rompimiento de ondas internas, se propone que hay transporte por filamentos y remolinos asociados a inestabilidades baroclínicas del sistema frontal, sobre todo entre la Isla Angel de la Guarda y la Isla Tiburón. El Canal de Ballenas puede considerarse como un sitio de exportación de aguas enriquecidas, apoyando lo sugerido por Peguero-Icaza *et al.* (2010), sobre el transporte hacia la costa continental en el GN, durante al verano.

Una de las particularidades del campo de TSM en el GC, es la inclinación o asimetría de las isotermas observada en la Fig. 2, indicando que hay mayores TSM del lado continental, respecto a los valores en las costas de la península. Esta inclinación de las isotermas, puede estar asociada al patrón de circulación general del GC en el que se espera un influjo de aguas más cálidas y de menor salinidad sobre la región costera del continente, mientras que en la península ocurre un reflujó de aguas más saladas y de menor temperatura, que incluso da origen a sistemas frontales en la zona de cizallamiento en el límite sur del GS (Collins *et al.*, 2014). Este mismo patrón ha sido observado en estudios previos, donde se han notado ciertos rasgos característicos en el campo de TSM. La disminución de TSM en las costas respecto a la parte central se ha asociado a la presencia de surgencias y como uno de los rasgos más destacados se ha reconocido que en el Canal de Ballenas ocurren los mínimos locales de TSM durante todo el año (Soto-Mardones *et al.* 1999; Lavín *et al.* 2003).

Por su parte el patrón del campo de viento está relacionado con características atmosféricas regionales dominadas por un centro de alta presión cuasi-permanente (Amador *et al.*, 2006). Este centro de alta presión y el aislamiento isobárico del GC han sido reportados como las causas del *jet* de viento de bajo nivel que en su campo medio presenta vientos del noroeste (Badan, 2003).

10.2. Armónicos anual y semianual

Debido a que se realizó una descomposición de la señal de los tres campos geofísicos (CLA, TSM y VNT), en componentes ortogonales entre sí, estos deben ser vistos como perturbaciones respecto a un estado base, que en este caso es la media de largo periodo. De esta forma, los armónicos constituyen anomalías respecto a la media y para poder obtener el campo original debe de sumarse la magnitud de cada uno de ellos a la media.

La reconstrucción del armónico anual, sugiere una co-oscilación entre CLA, TSM y VNT. Las mayores amplitudes sobre la región costera continental en CLA y TSM parecen estar asociadas a la dirección de los vectores de viento que, de acuerdo a la teoría de Ekman, son favorables a surgencias del lado continental durante el mes de enero. Durante este mes la disminución de hasta 8°C es evidente sobretodo en GN. Las asimetrías del patrón de TSM en el GS al sur de 26°N ocurren en zonas donde el viento se deflecta. Todos estos resultados soportan la idea de un gran acople entre el patrón de vientos y la respuesta de la capa superficial del mar en el GC, que se ha sugerido que responde rápidamente al efecto del viento (Badan-Dangon *et al.*, 1985). En agosto el patrón de vientos y las magnitudes de las anomalías se invierten, coincidiendo con los resultados de simulaciones numéricas y observaciones puntuales (Beier 1997; Marinone 2003; Lavín & Marinone 2003).

El acoplamiento con el campo de viento también se puede inferir al observar como las magnitudes de TSM cambian en el GN. Los mayores enfriamientos se observan en la porción más norteña de la región del GN y en el Alto Golfo de California (UGC). En estas zonas Paden *et al.* (1991) ha mencionado que las masas de aire frío que soplan desde Estados Unidos con baja humedad, producen mezcla vertical y absorben calor de la capa superficial en una zona más somera respecto a localidades más hacia el sur, produciendo una mayor disminución de la temperatura. Estos mismos resultados fueron obtenidos por Argote *et al.* (1995), quienes asociaron el desplazamiento de aguas mezcladas de la isobata de 30 a la 60 m por la acción de la mezcla producida por las masas de aire frío.

Aunado a estas características de mayor escala en el GC, resaltan dos singularidades que podrían estar asociadas con la localización de los frentes y que deben ser discutidas. La primera corresponde a la extensión de anomalías relativamente altas de TSM ($\approx 8^{\circ}\text{C}$) al sur de la Isla Tiburón, que espacialmente se asemejan a la forma de la plataforma (*ver Fig. 1*). Aunque esta zona comprendida entre los $28.5\text{-}28^{\circ}\text{N}$, ha sido señalada como una de las zonas del GC sujetas a mezcla vertical por mareas, podría estar más relacionado con surgencias costeras estacionales y con los patrones de circulación general, debido principalmente a que este armónico representa fenómenos que ocurren con periodos de un año. Es decir que si se debiera a mezcla vertical por marea, debería estar presente todo el año y tener oscilaciones en escala quincenales que no serían evidentes dentro del periodo considerado en este armónico. Esto no pretende contradecir los hallazgos de *Argote et al. (1995)*, sino solo indicar que este armónico no tiene relación con la mezcla mareal y que su patrón espacial puede ser explicado a través de otros agentes forzantes.

La zona descrita arriba para TSM, no es evidente en el armónico anual de CLA, en el cual únicamente resalta una banda estrecha con magnitudes de 2 mg/m^3 , prolongándose desde el norte de 24°N hasta el sur de 30°N . La segunda singularidad se encuentra en una coincidencia entre la magnitud de las amplitudes de CLA y TSM sobre el Canal de Ballenas. En esta región las amplitudes son cercanas a cero en la reconstrucción del ciclo anual para febrero y agosto, mientras que en la reconstrucción del ciclo semianual la RAC destaca por tener los valores máximos de CLA y TSM (0.5mg/m^3 y 1°C respectivamente). Además, se observaron semejanzas considerables en sus patrones espaciales.

Partiendo de las amplitudes de los ciclos anual y semianual, puede decirse que para la región RAC tienen mayor peso las oscilaciones con periodos de 6 meses, coincidiendo con los resultados de *Kahru et al. (2004)*, quien a través de un análisis con periodograma de Lomb, encontraron que en la RAC tanto la CLA como la producción primaria, tienen mayor influencia de variaciones semianuales que fueron asociadas a la mezcla por mareas.

10.3. Estacionalidad

La estacionalidad considerada como la suma de la media a largo plazo y los armónicos anual y semianual, explica gran parte de la varianza de TSM ($VE > 95\%$). Sin embargo, en CLA explica entre 50-80% de la varianza total, y siendo evidentes algunas bandas explica un porcentaje menor al sur de las grandes islas y en una línea entre San Felipe y Puerto Peñasco. Esas bandas de menor varianza explicada podrían estar relacionadas con la posición de estructuras frontales en donde el control de la concentración de clorofila podría estar conducido por diversos factores como los discutidos anteriormente en la sección 10.1, como las ondas internas y estructuras de submesoescala (inestabilidades asociadas al frente: filamentos y remolinos).

De esta forma los frentes en el Alto Golfo y el ubicado al sur de las grandes islas, pueden ser considerados como rasgos distintivos que tienen sus mayores variaciones asociadas a otras escalas y que dependen de la respuesta de cada variable, debido a que la CLA y la TSM se comportan de forma distinta. Es posible que los cambios en la CLA en el GC y en particular en las regiones donde la mezcla mareal es importante, estén relacionados con procesos locales o por el impacto regional de fenómenos interanuales como el fenómeno de El Niño que se expondrá en la sección 10.4.

10.4. Funciones Empíricas Ortogonales

El primer modo de las FEOs muestra una correlación entre las series temporales de CLA, TSM y VNT (Tabla 4), además de que mostraron un comportamiento principalmente interanual. Debido a esto se realizó una correlación lineal entre cada una de las series temporales y el MEI.

Las correlaciones resultaron positivas entre el MEI y la TSM ($r=0.51$, $valor-p < 0.05$, $n=164$), mientras que para la CLA y VMT fueron negativas ($r=-0.39$, $valor-p < 0.05$, $n=164$; $r=-0.10$ $valor-p=0.24$, $n=138$, respectivamente). Las correlaciones fueron significa-

tivas únicamente entre el MEI, TSM y CLA; entre el MEI y VNT no hay suficiente evidencia para establecer una correlación estadística.

Gráficamente la oscilación entre el MEI y las variables analizadas se observan en la figura 7. Esto aporta evidencia de que el primer modo está asociado a las variaciones interanuales que se de acuerdo con Lavín *et al.* (2003) están dominadas por el fenómeno ENSO y que de acuerdo a los resultados obtenidos en este trabajo, podrían modificar la dirección y magnitud del campo de viento, además de producir aumento de la TSM y una disminución en la CLA.

La falta de relación entre las series temporales dentro del primer y tercer modo, pueden ser debido a de que los modos de las FEOs no necesariamente corresponden con modos dinámicos (Venegas, 2001). Sin embargo, las relaciones entre distintos modos de las variables TSM y VNT, si pueden tener relación con algún fenómeno atmosférico o oceanográfico debido a que se correlacionaron de forma significativa y su componente espacial tiene cierta coincidencia (Fig. 8)

Las relaciones entre el tercer modo de TSM y el segundo de VNT parecen indicar una relación entre las variables y un comportamiento de las series temporales de VNT con periodos de ≈ 3 meses. Una de las características más llamativas del componente espacial del segundo modo FEOS de VNT, es su la presencia de vectores transversales al GC en la RAC. Este comportamiento del VNT en la RAC ha sido previamente reportado por Martínez-Díaz-de León *et al.* (2013) quienes mediante mediciones puntuales con estaciones meteorológicas reportaron que la mayor variación del viento es hacia el este en esta zona.

Además, en imágenes de color verdadero obtenidas mediante MODIS-Aqua es posible observar como nubes de polvo son transportadas hacia la región del RAC en un claro patrón transversal (Fig. 18). Esto apoya la idea de que vientos transversales ocurren en esta región, siendo posible la modulación de el campo de TSM en la zona e incluso un efecto sobre crecimiento del fitoplancton debido a que los vientos transversales podrían

ser fuente de aportación de algunos nutrientes a la RAC.



Figura 18: Tormentas de polvo en el GC observadas en imágenes de color verdadero obtenidas por MODIS-Aqua el 27 de noviembre de 2011. Obtenidas de <http://earthobservatory.nasa.gov>

10.5. Evolución temporal del frente

Los cambios evidentes en la posición de los bordes detectados y mostrados en la figura 10, son considerados como cambios en la posición de las estructuras frontales dentro de la región RAC. Estos cambios parecen estar relacionados con la circulación estacional y con la ocurrencia de surgencias costeras.

De noviembre a abril (Fig. 10A, B, C, D, K y L) la estructura frontal inmediatamente al sur de las grandes islas tienen una clara posición transversal aunque a partir de los 112 °W, el frente cambia de dirección prolongándose hacia el sureste y aproximándose a la costa conforme progresa hacia el sur, sugiriendo la presencia de un frente asociado a las surgencias costeras al sur de la Isla Tiburón. Esto indica que varias interfases frontales de características similares coexisten en esta región y que pueden interaccionar entre ellas y pudiendo fusionarse. Por ejemplo una estructura al sur de la Isla San Lorenzo fue detectada en enero, al igual que un frente al sur de la Isla Tiburón con dirección noroeste-sureste, y varias frentes al sude 28°N. (Fig. 10A). Estos resultados se ajustan

a los de [Badan-Dangon et al. \(1985\)](#), quienes indicaron que las aguas frías al sur de las Isla Tiburón y las que se ubicaron sobre el Canal de Ballenas tuvieron diferentes orígenes y que era posible distinguirlas debido a que la advección horizontal es baja. Además, de que puntualizan que los frentes asociados a estas dos zonas llegan a fusionarse.

En este trabajo las aguas al sur de la Isla Tiburón se observan en los patrones climatológicos de TSM y coinciden con una zona donde ocurren amplitudes de hasta 8°C en ciclo anual que se observan en la reconstrucción del armónico en febrero y agosto (Figs. 3 y 4). Esto sugiere que la zona es afectada por la acción del viento y por la advección asociada a los patrones de circulación general obtenidos mediante simulaciones numéricas. (Fig. 4 de [Marinone 2003](#). Los resultados del modelo HAMSON publicados por [Marinone \(2003\)](#) indican que en el nivel superficial(0-10 m), la circulación residual en agosto rodea la Isla Tiburón y se invierte en enero.

Mayo y octubre se han considerado como periodos de transición del frente que cambia entre la posición paralela y transversal al eje longitudinal de GC. Estas observaciones coinciden con la transición entre los dos regímenes de circulación que se obtuvieron a través de modelación, usando como forzamientos al océano Pacífico, el viento, la marea y el balance de calor y de salinidad ([Marinone, 2003](#)). Otras similitudes con las salidas del modelo se pueden apreciar en diciembre, enero y febrero, donde es evidente la presencia de un núcleo cálido rodeado por frentes térmicos y debido a que en estas escalas solo se pueden observar estructuras estacionalmente persistentes, se puede asumir que este núcleo corresponde con el giro anticiclónico del GN. El brazo asociado a este núcleo puede corresponder con los patrones de circulación superficial que se encuentran influenciados por el campo de viento. Incluso la forma de los frentes detectados al sur de 28°N, donde se observa una lengua de aguas cálidas se deba a advección de aguas superficiales hacia el sur por efecto del viento. Esto se ajusta con los hallazgos de [Badan-Dangon et al. \(1985\)](#), que encontraron un desplazamiento de hasta 100 Km hacia el sur de las grandes islas y con los resultados de [Simpson et al. \(1994\)](#) que indican que las asimetrías en enfriamiento neto sugieren la operación de advección hasta 50 Km de la

zona de umbrales en dirección sureste.

Finalmente, los meses de Junio a Setiembre en los que el frente presenta una posición paralela al eje del GC (Fig. 10F-I), coinciden con la circulación ciclónica del verano donde un influjo del lado continental es evidente como una corriente costera que se incorpora al GN y termina formando parte de la circulación ciclónica de esta región. Esa corriente costera que transporta agua cálida y que ha sido descrita por Lavín *et al.* (2014) a través de boyas de deriva, puede ser una de las principales causas del cambio de posición del frente.

Sumado a esto la presencia de surgencias del lado peninsular podría estar relacionado con la elongación de la zona de aguas frías hacia el sur de las grandes islas a lo largo de la península, estableciendo los gradientes más intensos a lo ancho del GC. Esta característica se hace evidente en agosto cuando el campo de viento tiene dirección hacia el noroeste (Fig. 4) y favorece las surgencias del lado peninsular.

Los vientos favorable a surgencias del lado peninsular tienen un efecto sobre la TSM que se nota en la amplitud del ciclo anual reconstruido para agosto donde se puede notar una banda estrecha de amplitudes de aproximadamente 6°C a lo largo de la costa peninsular. Sin embargo, las amplitudes en esta porción son mucho menores que en la costa continental donde alcanzan los 8°C, lo que concuerda con el comportamiento de las surgencias peninsulares durante el verano descrito en la revisión de Álvarez Borrego (2012)

De esta forma se puede decir que los cambios en la posición del frente están siendo conducidos por advección asociada a los patrones de circulación general y a la presencia de surgencias relacionadas con el patrón de vientos tipo monzón.

10.6. Efecto del frente sobre la distribución de larvas de peces

Los tres patrones generales de distribución reportados en este trabajo (GS, GN y amplia distribución), pueden estar asociados con el comportamiento de desove y la afinidad de los taxones a un conjunto de condiciones oceanográficas particulares a cada una de las regiones del GC contempladas en este trabajo (GN, RAC y GS).

Las regiones del GN y GS constituyen regímenes oceanográficos distintos que se encuentran separadas por la RAC y por sus frentes térmicos al norte y sur. Estas estructuras pueden ser consideradas como límites en la distribución de algunas especies de larvas de peces, debido a que son la interfase entre dos regiones con características diferentes (GN y GS). Además, es posible que la RAC se encuentre rodeada por frentes térmicos débiles que no fueron detectados con el algoritmo de Canny, pero que constituyen estructuras de importancia biológica como se ha reportado en otros ecosistemas (Etnoyer *et al.*, 2006).

Por otro lado, debido a que se detectaron varios frentes, se deben considerar como sistemas frontales que son el resultado de la interacción de frentes individuales y asociados a distintos forzamientos (p.ej. mezcla mareal y surgencias inducidas por el viento). En este sentido los sistemas frontales de la RAC aunque sean débiles y no se hayan detectado, pueden estar asociados a la distribución de algunos taxones como *M. productus*, en donde pueden constituir su límite sur (Fig. 11B).

Las condiciones del GN pueden favorecer la presencia de *M. productus* y *Anchoa* spp que han sido taxones asociados a salinidades relativamente altas (Peiro-Alcantar *et al.* 2013; Sánchez-Velasco *et al.* 2013), y al giro reversible característico del GN. Sin embargo, la temperatura, la profundidad y las interacciones ecológicas (depredación y competencia) también pueden afectar la distribución de estos y otros taxones.

En el caso de los adultos de *M. productus* a pesar de ser un demersal profundo (Jiménez-Rosenberg *et al.*, 2010), las mayores abundancias larvales se encontraron en

profundidades menores a los 300 m y no sobre el Canal de Ballenas donde las profundidades son mayores a los 1000 m (Fig. 11B). La presencia de larvas de *M. productus* sobre el talud puede ser debido a su comportamiento de desove, que se ha descrito que ocurre frecuentemente en profundidades entre los 200-400 m (Bailey *et al.*, 1982). Por otro lado, su ausencia sobre el Canal de Ballenas, evidente en la figura 12B puede deberse a: (i) que haya una sub-representación del canal por ser de difícil navegación, o (ii) porque la región tiene condiciones desfavorables para el desarrollo de los primeros estadios; hay alta turbulencia que puede producir estrés mecánico y una alta mortalidad de huevos (Bunn *et al.*, 2000).

Anchoa spp. tuvo registros a lo largo del Canal de Ballenas, extendiéndose sobre las mínimas TSM hasta los 27.5°N (Fig. 11), coincidiendo con zonas en donde se observa alta concentración de clorofila en el campo medio (Fig. 2). Además, es posible que el género esté adaptado a condiciones de alta turbulencia en el GC. Esta última idea se apoya en los resultados de trabajos previos, donde se indica que el lado mezclado de un frente mareal en el Alto Golfo es su hábitat preferencial. (Sánchez-Velasco *et al.* 2012; Sánchez-Velasco *et al.* 2013).

El patrón de amplia distribución en la zona de estudio podría deberse a que las condiciones de la RAC son adecuadas para el desove tanto para taxones de afinidad templada (*E. mordax*), como tropical (*Auxis* spp y *B.panamense*) debido a que el GC es altamente estacional, con amplitudes de hasta 9°C en el ciclo anual, pero debido a que la respuesta de los taxones a los cambios en TSM y a los patrones frontales es particular para cada uno se deben discutir de forma puntual.

E. mordax de afinidad templada, se ha reportado que desova en temperaturas entre los 11.5- 16°C en la Corriente de California (Lluch-Belda *et al.*, 1991), mientras que sus principales sitios de desove en el GC se han encontrado al norte de la Isla Tiburón (Green-Ruiz & Hinojosa-Corona, 1997). De acuerdo con estos autores en el GC la anchoveta desova en temperaturas entre 15 y 17 °C, lo que coincide con los resultados

obtenidos en este trabajo: abundancias altas (> 101 larvas/m²) en toda el área de estudio con un rango de TSM entre 15-18°C durante el mes de febrero.

Los adultos de *B. panamense* habitan aguas medias (especie mesopelágica) y ha sido reportada en el GN como una especie dominante en asociaciones de larvas de peces y adultos (Sánchez-Velasco *et al.* 2009; Robinson 1972). En otros trabajos se ha indicado que las mayores abundancias se encuentran sobre la región RAC (Moser *et al.*, 1974), por lo que la zona de estudio puede representar una zona con características adecuadas para el desove de la especie. Además, la distribución de las larvas coincide los reportes de Robinson (1972) para adultos, quien indica que *B. panamense* se vuelve una forma dominante al norte de los 29° de latitud en el GC.

Los taxones distribuidos al sur *V. lucetia*, *S. sagax* y *D. laternatus*, son consideradas como especies de afinidad tropical o subtropical de hábitos pelágicos o mesopelágicos (Jiménez-Rosenberg *et al.*, 2010), y se distribuyen principalmente en el GS, donde se registraron las mayores temperaturas del campo medio y donde las profundidades son mayores a los 900 m (Fig. 12).

Los cambios temporales en la distribución de larvas de peces sugieren que hay un acople entre la distribución de algunos taxones y la posición de los sistemas frontales en la RAC. *Auxis* spp. y *B. panamense* son ejemplos de esta relación y en las figuras 14 y 15, se puede ver como los taxones se contraen o se extienden a lo ancho del GC dependiendo de la posición de los frentes.

Este efecto sobre la distribución de especies individuales puede conducir a cambios en la estructura de la comunidad y la conformación de distintos hábitats que se ven influenciados por los cambios en la posición y forma de los sistemas frontales, que constituyen límites dinámicos que posiblemente tienen implicaciones ecológicas en la región, como los cambios reportados por Sánchez-Velasco *et al.* (2009) en el hábitat denominado MAR-Ballenas. La variación estacional de este hábitat coinciden con la variabilidad detectada en los sistemas frontales detectados sobre el campo de TSM en la RAC. Du-

rante febrero [Sánchez-Velasco et al. \(2009\)](#), presenta a este hábitat extendiéndose casi a todo lo ancho del GC. Esta forma del habita MAR-Ballenas coincide con una forma transversal de los frentes. Por otro lado en agosto esta asociación de larvas de peces se contrae longitudinalmente y se alarga en dirección noroeste-sureste cuando los fretes se extienden a lo largo del eje del GC delimitando gradientes de TSM entre la península y el continente.

No debe descartarse que otras variaciones de las estructuras frontales como las inestabilidades baroclínicas asociadas, pueden tener efectos sobre las larvas de peces. Los cambios en la distribución de *Anchoa* spp. entre Junio y Agosto, pueden estar asociados a la presencia de filamentos y giros que se desprenden de la RAC produciendo transporte larval en el sentido de la circulación durante estos meses, en donde la presencia de la corriente costera que incursiona en el GN puede ser muy importante (*Para una descripción de la corriente costera ver [Lavín et al. \(2014\)](#)*).

Finalmente, el comportamiento particular en diciembre, en el que hay una ampliación de la distribución de los taxones de afinidad tropical y subtropical hacia el GN y una disminución de las abundancias de *E. mordax* que se considera de afinidad templada, puede estar relacionado con la ocurrencia de eventos interanuales como el fenómeno El Niño (ENOS). [McPhaden \(2004\)](#), reporta que durante los meses de octubre a diciembre el evento de El Niño del 2002 tuvo su mayor intensidad, por lo que es posible un debilitamiento del gradiente del campo de TSM, haciendo menos marcado el efecto del frente sobre la distribución de los taxones. Esto junto con el calentamiento de las aguas del GC, podría explicar la ampliación de los taxones de aguas cálidas hacia el norte y la disminución en la abundancia de especies de afinidad templada como *E. mordax*.

11. CONCLUSIONES

El GC se encuentra dominado por el ciclo estacional, aunque ocurren perturbaciones en otras escalas que pueden afectar a algunas regiones particulares. La RAC es una región con baja TSM y alta CLA, en donde las inestabilidades asociadas a los frentes pueden producir remolinos y filamentos.

Al sur de la RAC, los sistemas frontales del campo de TSM tienen un patrón estacional, cambiando su posición de transversal (periodo frío) a paralela (periodo cálido) respecto al eje longitudinal del GC. Estos cambios en la posición del frentes están relacionados a la circulación general, la advección y a la ocurrencia de surgencias costeras y pueden afectar la distribución de algunos taxones.

En general, los patrones de distribución se asocian a la afinidad zoogeográfica de los adultos y al comportamiento de desove. Los frentes al sur de la RAC pueden constituir un límite entre asociaciones de larvas de peces, que debido a su variabilidad espacio-temporal deben ser considerados dinámicos y que incluso podría explicar la existencia de regiones biogeográficas dentro del GC.

Por otro lado, se debe reconsiderar la idea de que funcionan como barrera, debido a que ocurre transporte a través del frente y que existen cambios en sus posición que finalmente permiten el intercambio de propiedades y organismos entre la región del GN y GS. En su lugar, reiteramos que deben ser considerados como límites o como sitios de retención o concentración de organismos del plancton con sus efectos más evidentes en escalas ecológicas.

12. RECOMENDACIONES

En este trabajo el análisis del ictioplancton se realizó mediante datos obtenidos en varios cruceros. Estos datos fueron agrupados por mes, pero sin recurrir a promedios. Con estos datos se pudieron observar patrones generales de distribución, pero se encuentran influenciados por fenómenos de mesoescala e interanuales propios de cada campaña. Por lo que se recomienda que en próximos análisis se realicen promedios por bloques y que se utilicen interpolaciones como el kriging o el análisis objetivo que permitan evaluar el error de la interpolación. Este tipo de métodos ya han sido utilizados en bases de datos irregulares tanto en su cobertura espacial como temporal, como lo ejemplifican los análisis de las series de tiempo de registradores continuos de plancton. Además, para tener un mejor entendimiento de los patrones de distribución de especies individuales deben de considerarse factores biológicos, como la distribución de depredadores y se debe de iniciar una evaluación integrada de la distribución de los taxones utilizando un enfoque biogeográfico evolutivo.

Por otro lado, el estudio de la posición de estructuras frontales mediante algoritmos de detección de bordes debe ser complementado con un otros análisis como cálculos y sus cambios en el tiempo. Además, es importante contar con mediciones del campo de velocidad y de la estructura de la columna para tener un mejor entendimiento de la dinámica de los frentes oceánicos.

Finalmente se recomienda el uso de modelos biofísicos no solo modelen la trayectoria de partículas digitales, sino que incorporen características biológicas de los organismos como la mortalidad y su capacidad natatoria. Estos modelos deberán de ser especie-específicos y deben de considerar la mesoescala, debido a la gran importancia que tienen estos fenómenos en la distribución y abundancia del plancton.

Bibliografía

- Álvarez Borrego, S. 2012. Phytoplankton biomass and production in the Gulf of California: a review. *Botanica Marina*, 55(2):119–128. doi:10.1515/bot.2011.105.
- Amador, J. A., E. J. Alfaro, O. G. Lizano & V. O. Magaña. 2006. Atmospheric forcing of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, 69(2-4):101–142. doi:10.1016/j.pocean.2006.03.007.
- Argote, M. L., A. Amador, M. F. Lavín & J. R. Hunter. 1995. Tidal dissipation and stratification in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, 100(C8):16103–16118.
- Atlas, R., R. N. Hoffman, J. Ardizzone, M. Leidner & J. C. Jusem. 2009. Development of a new cross-calibrated, Multi-platform (CCMP) ocean surface wind product. En: *AMS 13th Conference on Integrated Observing and Assimilation Systems for Atmosphere, Oceans, and Land Surface (IOAS-AOLS)*.
- Atlas, R., R. N. Hoffman, J. Ardizzone, S. M. Leidner, J. C. Jusem, D. K. Smith & D. Gombos. 2011. A Cross-calibrated, Multiplatform Ocean Surface Wind Velocity Product for Meteorological and Oceanographic Applications. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(2):157–174. doi:10.1175/2010BAMS2946.1.
- Atlas, R., R. N. Hoffman, S. C. Bloom, J. C. Jusem & J. Ardizzone. 1996. A Multiyear Global Surface Wind Velocity Dataset Using SSM/I Wind Observations. 77:869–882.
- Avendaño Ibarra, R., E. Godínez-Domínguez, G. Aceves-Medina, E. González-Rodríguez & A. Trasviña. 2013. Fish Larvae Response to Biophysical Changes in the Gulf of

- California, Mexico (Winter-Summer). *Journal of Marine Biology*, 2013:1–17. doi:10.1155/2013/176760.
- Badan, A. 2003. The atmosphere over the Gulf of California. p. 205–212. En: Velasco-Fuentes, O. U., J. Sheinbaum & J. Ochoa (Eds.) *Nonlinear Process in Geophysical Fluid Dynamics*. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1 a.ed.
- Badan-Dangon, A., C. J. Koblinsky & T. Baumgartner. 1985. Spring and summer in the Gulf of California: observations of surface thermal patterns. *Oceanologica Acta*, 8(1):13–22.
- Bailey, K. M., R. C. Francis & P. R. Stevens. 1982. The Life History and Fishery of Pacific Whiting, *Merluccius productus*. Inf. téc.
- Bakun, A. 1996. *Patterns in the Ocean: Ocean Processes and Marine Population Dynamics*. ISBN 1888691018, 323 p.
- Bakun, A. 2006. Fronts and eddies as key structures in the habitat of marine fish larvae: opportunity, adaptive response and competitive advantage. *Scientia Marina*, 70(2):105–122.
- Beier, E. 1997. A Numerical Investigation of the Annual Variability in the Gulf of California. *Journal of Physical Oceanography*, 27(5):615–632.
- Beier, E. & P. Ripa. 1999. Seasonal Gyres in the Northern Gulf of California. *Journal of Physical Oceanography*, 29(2):305–311.
- Belkin, I. M., P. C. Cornillon & K. Sherman. 2009. Fronts in Large Marine Ecosystems. *Progress in Oceanography*, 81(1-4):223–236. ISSN 00796611. doi:10.1016/j.pocean.2009.04.015.
- Belkin, I. M., G. L. Hunt, E. L. Hazen, J. E. Zamon, R. Schick, R. Prieto, J. Brodziak, J. Hare, S. L. Teo, L. Thorne, H. Bailey, S. Itoh, P. Munk, M. K. Musyl, J. K. Willis &

- W. Zhang. 2014. Fronts, Fish, and Predators. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 107:1–2. ISSN 09670645. doi:10.1016/j.dsr2.2014.07.009.
- Bunn, N. A., C. J. Fox & T. Webb. 2000. Review of studies on fish egg mortality: Implications for the estimation of spawning stock biomass by the annual egg production method. *Inf. Téc.* 111.
- Canny, J. 1986. A Computational Approach to Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-8(6):679–698. ISSN 0162-8828. doi:10.1109/TPAMI.1986.4767851.
- Collins, C. a., R. Castro & A. Mascarenhas. 2014. Properties of an upper ocean front associated with water mass boundaries at the entrance to the Gulf of California, November 2004. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. ISSN 09670645. doi:10.1016/j.dsr2.2014.06.002.
- Danell-Jiménez, A., L. Sánchez-Velasco, M. Lavín & S. Marinone. 2009. Three-dimensional distribution of larval fish assemblages across a surface thermal/chlorophyll front in a semienclosed sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 85:487–496. doi:10.1016/j.ecss.2009.09.010.
- Emery, W. J. & R. E. Thomson. 2004. *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. Elsevier.
- Espinosa-Carreón, T. L. & J. E. Valdez-Holguín. 2007. Variabilidad interanual de clorofila en el golfo de California. *Ecología aplicada*, 6(1-2):83–92.
- Etnoyer, P., D. Canny, B. R. Mate, L. E. Morgan, J. G. Ortega-Ortiz & W. J. Nichols. 2006. Sea-surface temperature gradients across blue whale and sea turtle foraging trajectories off the Baja California Peninsula, Mexico. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 53(3-4):340–358. doi:10.1016/j.dsr2.2006.01.010.

- Fedorov, K. N. 1986. *The Physical Nature and Structure of Oceanic Fronts*, tomo 19 de *Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies*. Springer-Verlag, New York. ISBN 3540964452, 333 p.
- Fu, L.-L. & B. Holt. 1984. Internal Waves in the Gulf of California: Observations From a Spaceborne Radar. *Journal of Geophysical Research*, 89(C2):2053–2060.
- Gaxiola-Castro, G., S. Álvarez Borrego, S. Nájera-Martínez & A. R. Zirino. 2002. Internal waves effect on the Gulf of California phytoplankton. *Ciencias Marinas*, 28(3):297–309.
- Green-Ruiz, Y. A. & A. Hinojosa-Corona. 1997. Study of the spawning area of the Northern anchovy in the Gulf of California from 1990 to 1994, using satellite images of sea surface temperatures. *Journal of Plankton Research*, 19(8):957–968. doi: 10.1093/plankt/19.8.957.
- Gutiérrez, O., S. Marinone & A. Parés-Sierra. 2004. Lagrangian surface circulation in the Gulf of California from a 3D numerical model. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 51:659–672. doi:10.1016/j.dsr2.2004.05.016.
- Hao, W., S. Jian, W. Lei & L. Yi'an. 2003. Tidal front and the convergence of anchovy (*Engraulis japonicus*) eggs in the Yellow Sea. *Fisheries Oceanography*, 12(4-5):434–442.
- Hickox, R., I. Belkin, P. Cornillon & Z. Shan. 2000. Climatology and seasonal variability of ocean fronts in the East China, Yellow and Bohai seas from satellite SST data. *Geophysical Research Letters*, 27(18):2945–2948. doi:10.1029/1999GL011223.
- Hooker, S. & C. McClain. 2000. The calibration and validation of SeaWiFS data. *Progress in Oceanography*, 45(3-4):427–465.
- Horton, C. W. 1983. Gulf Stream Surface Front Displacement by the Local Wind Stress: A two dimensional numerical model. Inf. téc., Commanding officer, Naval Oceanographic Office, Missouri.

- Horton, C. W. 1984. Surface Front Displacement in the Gulf Stream by Hurricane/Tropical Storm. *Journal of Geophysical Research*, 89:2005–2012.
- Iles, T. D. & M. Sinclair. 1982. Atlantic herring: stock discreteness and abundance. *Science*, 215:627–633. doi:10.1126/science.215.4533.627.
- Inda-Díaz, E. A., L. Sánchez-velasco & M. F. Lavín. 2010. Three-dimensional distribution of small pelagic fish larvae (*Sardinops sagax* and *Engraulis mordax*) in a tidal-mixing front and surrounding waters (Gulf of California). *Journal of Plankton Research*, 32(9):1241–1254. doi:10.1093/plankt/fbq051.
- Inda-Díaz, E. A., L. Sánchez-Velasco & M. F. Lavín. 2014. The effects of a tidal-mixing front on the distribution of larval fish habitats in a semi-enclosed sea during winter. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 94(7):1517–1530. doi:10.1017/S002531541400023X.
- Jiménez-Rosenberg, S. P. A., R. J. Saldierna-Martínez, G. Aceves-Medina, A. Hinojosa-Medina, R. Funes-Rodríguez, M. Hernández-Rivas & R. Avendaño Ibarra. 2010. Fish larvae off the northwestern coast of the Baja California Peninsula, Mexico. *Check List*, 6(2):334–349.
- Kahru, M., E. Di Lorenzo, M. Manzano-Sarabia & B. G. Mitchell. 2012. Spatial and temporal statistics of sea surface temperature and chlorophyll fronts in the California Current. *Journal of Plankton Research*, 34(9):749–760. doi:10.1093/plankt/fbs010.
- Kahru, M., S. Marinone, S. Lluch-Cota, A. Parés-Sierra & B. Greg Mitchell. 2004. Ocean-color variability in the Gulf of California: scales from days to ENSO. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 51:139–146. doi:10.1016/j.dsr2.2003.04.001.
- Kantha, L. & C. A. Clayson. 2000. *Numerical Models of Oceans and Oceanic Processes*. Academic Press, San Diego, California, 1 a.ed., 750 p.

- Lavín, M. F., R. Castro, E. Beier, C. Cabrera, V. M. Godínez & A. Amador-Buenrostro. 2014. Surface circulation in the Gulf of California in summer from surface drifters and satellite images (2004-2006). *Journal of Geophysical Research*, 119(7):4278–4290. doi:10.1002/2013JC009345.
- Lavín, M. F., R. Durazo, E. Palacios, M. L. Argote & L. Carrillo. 1997. Lagrangian Observations of the Circulation in the Northern Gulf of California. *Journal of Physical Oceanography*, 27(10):2298–2305. doi:10.1175/1520-0485(1997)027<2298:LOOTCI>2.0.CO;2.
- Lavín, M. F. & S. G. Marinone. 2003. An overview of the physical oceanography of the Gulf of California. p. 173–204. En: Velasco Fuentes, O. U., J. Sheinbaum & J. Ochoa (Eds.) *Nonlinear Process in Geophysical Fluid Dynamics*. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1 a.ed. doi:10.1007/978-94-010-0074-1.
- Lavín, M. F., E. Palacios Hernández & C. Cabrera. 2003. Sea surface temperature anomalies in the Gulf of California. *Geofísica Internacional*, 42(003):363–375.
- Le Fèvre, J. 1986. Aspects of the Biology of Frontal Systems. *Advances in marine biology*, 23:163–299.
- Lluch-Belda, D., D. B. Lluch-Cota, S. Hernandez-Vazquez, C. A. Salinas-Zavala & R. A. Schwartzlose. 1991. Sardine and anchovy spawning as related to temperature and upwelling in the California Current System. Inf. téc.
- Longhurst, A. 2007. *Ecological Geography of the Sea*. Elsevier, London, 2 a.ed. ISBN 978-0-1245-5521-1.
- López, M., J. Candela & M. L. Argote. 2006. Why does the Ballenas Channel have the coldest SST in the Gulf of California? *Geophysical Research Letters*, 33(11). doi:10.1029/2006GL025908.
- López, M., J. Candela & J. García. 2008. Two overflows in the Northern Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, 113(C8). doi:10.1029/2007JC004575.

- Lough, R. G. & J. P. Manning. 2001. Tidal-front entrainment and retention of fish larvae on the southern flank of Georges Bank. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 48(1-3):631–644.
- Margalef, R. 1997. *Our Biosphere*. Inter-Research, Oldenfort, Germany.
- Marinone, S. G. 2003. A three-dimensional model of the mean and seasonal circulation of the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research*, 108(C10).
- Martínez-Díaz-de León, a., R. Castro, E. Santamaría-del Ángel, I. Pacheco-Ruiz & R. Blanco-Betancourt. 2013. Sea Surface Heat Fluxes and Fortnightly Modulation of the Surface Temperature within the Ballenas Channel, Gulf of California. *Journal of Coastal Research*, 29(6):1400–1412.
- McPhaden, M. J. 2004. Evolution of the 2002/03 El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(5):677–695. doi:10.1175/BAMS-85-5-677.
- Moser, G. 1996. *CALCOFI Atlas No. 33. The early stages of fishes in the California Current region*. Allen Press, Inc, La Jolla, California, 1505 p.
- Moser, G. H., E. H. Ahlstrom, D. Kramer & E. G. Stevens. 1974. Distribution and abundance of fish eggs and larvae in the Gulf of California. Inf. téc.
- Munk, P. 2014. Fish larvae at fronts: Horizontal and vertical distributions of gadoid fish larvae across a frontal zone at the Norwegian Trench. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 107:3–14. ISSN 09670645.
- Munk, P., P. Olov-Larson, D. S. Danielssen & E. Moksness. 1999. Variability in frontal zone formation and distribution of gadoid fish larvae at the shelf break in the northeastern North Sea. *Marine Ecology Progress Series*, 177:221–233.
- Murase, H., T. Hakamada, K. Matsuoka, S. Nishiwaki, D. Inagake, M. Okazaki, N. Tojo & T. Kitakado. 2014. Distribution of sei whales (*Balaenoptera borealis*) in the subarctic–subtropical transition area of the western North Pacific in relation to oceanic fronts.

- Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 107:22–28. ISSN 09670645. doi:10.1016/j.dsr2.2014.05.002.
- Navarra, A. & V. Simoncini. 2010. *A Guide To Empirical Orthogonal Functions for Climate Data Analysis*. Springer Science+Business Media, New York. ISBN 9789048137015, 160 p. doi:10.1007/978-90-481-3702-2.
- Navarro-Olache, L., M. F. Lavín, L. Alvarez Sanchez & A. Zirino. 2004. Internal structure of SST features in the central Gulf of California. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 51(6-9):673–687. ISSN 09670645.
- Odum, E. P. 1971. *Fundamentals of Ecology*. Holt-Saunders, Philadelphia, 1 a.ed.
- O'Reilly, J. E., S. Maritorena, B. G. Mitchell, D. A. Siegel, K. L. Carder, S. A. Garver, M. Kahru & C. McClain. 1998. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS. *Journal of Geophysical Research*, 103(C11):24937–24953.
- O'Reilly, J. E., S. Maritorena, D. A. O'Brien, Margaret C Siegel, D. Toole, D. Menzies, R. C. Smith, J. L. Mueller, B. G. Mitchell, M. Kahru, F. P. Chavez, P. Strutton, G. F. Cota, S. B. Hooker, C. R. McClain, K. L. Carder, F. Müller-Karger, L. Harding, A. Magnuson, D. Phinney, G. F. Moore, J. Aiken, K. R. Arrigo, R. M. Letelier & M. Culver. 2000. SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses , Part 3. Technical report, NASA.
- Paden, C., M. R. Abbott & C. D. Winant. 1991. Tidal and Atmospheric Forcing of the Upper Ocean in the Gulf of California 1. Sea Surface Temperature Variability. *Journal of Geophysical Research*, 96(C10):18337–18359.
- Palacios-Hernández, E., E. Beier, M. F. Lavín & P. Ripa. 2002. The Effect of the Seasonal Variation of Stratification on the Circulation of the Northern Gulf of California. *Journal of Physical Oceanography*, 32(3):705–729.
- Peguero-Icaza, M., L. Sánchez-Velasco, M. Lavín & S. Marinone. 2008. Larval fish assemblages, environment and circulation in a semienclosed sea (Gulf of California, Mexico). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 79:277–288. doi:10.1016/j.ecss.2008.04.008.

- Peguero-Icaza, M., L. Sánchez-Velasco, M. F. Lavín, S. G. Marinone & E. Beier. 2010. Seasonal changes in connectivity routes among larval fish assemblages in a semi-enclosed sea (Gulf of California). *Journal of Plankton Research*, 33(3):517–533. doi: 10.1093/plankt/fbq107.
- Peiro-Alcantar, M. T., R. Funes-Rodríguez, R. González-Armas, R. Palomares-García, M. O. Nevárez-Martínez & B. Shirasago-Germán. 2013. Influence of hydrographic conditions on larval fish assemblage structure in the northern Gulf of California. *Revista de biología marina y oceanografía*, 48(3):535–551. doi:10.4067/S0718-19572013000300011.
- Robinson, B. H. 1972. Distribution of the Midwater Fishes of the Gulf of California. *Copeia*, 1972(8):448–461.
- Ruiz-Ochoa, M., E. Beier, G. Bernal & E. D. Barton. 2012. Sea Surface temperature variability in the Colombian Basin, Caribbean Sea. *Deep Sea Research I*, 64:43–53.
- Sabatés, A. & M. Masó. 1990. Effect of a shelf-slope front on the spatial distribution of mesopelagic fish larvae in the western Mediterranean. *Deep Sea Research Part A Oceanographic Research Papers*, 37(7):1085–1098.
- Sabatés, A. & M. P. Olivar. 1996. Variation of larval fish distributions associated with variability in the location of a shelf-slope front. *Marine Ecology Progress Series*, 135:11–20.
- Sánchez-Velasco, L., C. Avalos-García, M. Rentería-Cano & B. Shirasago. 2004. Fish larvae abundance and distribution in the central Gulf of California during strong environmental changes (1997–1998 El Niño and 1998–1999 La Niña). *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 51(6-9):711–722. ISSN 09670645.
- Sánchez-Velasco, L., S. P. A. Jiménez-Rosenberg & M. F. Lavín. 2007. Vertical Distribution of Fish Larvae and Its Relation to Water Column Structure in the Southwestern Gulf of California. *Pacific Science*, 61(4):533–548.

- Sánchez-Velasco, L., M. F. Lavín, S. P. A. Jiménez-Rosenberg, V. M. Godínez, E. Santamaría-del Angel & D. U. Hernández-Becerril. 2013. Three-dimensional distribution of fish larvae in a cyclonic eddy in the Gulf of California during the summer. *Deep Sea Research I*, 75:39–51.
- Sánchez-Velasco, L., M. F. Lavín, M. Peguero-Icaza, C. A. León-Chávez, F. Contreras-Catala, S. Marinone, I. V. Gutiérrez-Palacios & V. M. Godínez. 2009. Seasonal changes in larval fish assemblages in a semi-enclosed sea (Gulf of California). *Continental Shelf Research*, 29:1697–1710. ISSN 02784343.
- Santamaría-del Angel, E., S. Alvarez-Borrego & F. E. Müller-Karger. 1994. Gulf of California biogeographic regions based on coastal zone color scanner imagery. *Journal of Ge*, 99(C4):7411–7421.
- Shaw, P. W., a. I. Arkhipkin & H. Al-Khairulla. 2004. Genetic structuring of Patagonian toothfish populations in the Southwest Atlantic Ocean: the effect of the Antarctic Polar Front and deep-water troughs as barriers to genetic exchange. *Molecular ecology*, 13(11):3293–303.
- Shelford, V. E. 1963. *The Ecology of North America*. University of Illinois Press. ISBN 978-0252723896.
- Simpson, J. H. & I. D. James. 1986. Coastal and Estuarine Fronts. p. 63–93. En: Mooers, C. N. K. (Ed.) *Baroclinic Processes on Continental Shelves*, Coastal and Estuarine Sciences. American Geophysical Union, Washington D.C. ISBN 0-87590-252-9.
- Simpson, J. H., A. J. Souza & M. F. Lavín. 1994. Tidal Mixing in The Gulf of California. cap. 9, p. 169–182. En: Beven, K. J., P. C. Chatwin & J. H. Millbank (Eds.) *Mixing and Transport in the Environment*. John Wiley & Sons Ltd, New York.
- Smith, P. E. & S. L. Richardson. 1977. Standard Techniques for Pelagic Fish Egg and Larva Survey.

- Soto-Mardones, L., S. G. Marinone & A. Parés-Sierra. 1999. Time and Spatial Variability of Sea Surface Temperature in the Gulf of California. *Ciencias Marinas*, 25(1):1–30.
- Sournia, A. 1994. Pelagic biogeography and fronts. *Progress in Oceanography*, 34(2-3B):109–120.
- Sánchez-Velasco, L., M. F. Lavín, S. P. A. Jiménez-Rosenberg, J. M. Montes & P. J. Turk-Boyer. 2012. Larval fish habitats and hydrography in the Biosphere Reserve of the Upper Gulf of California (June 2008). *Continental Shelf Research*, 33:89–99.
- Tett, P., R. J. Gowen, S. J. Painting, M. Elliott, R. Forster, D. K. Mills, E. Bresnan, E. Cappuzzo, T. F. Fernandes, J. Foden, R. J. Geider, M. Gilpin, L. Cand Huxham, A. L. McQuatters-Gollop, S. J. Malcom, S. Saux-Picart, T. Platt, R. M. F. S. Sathyendranath, J. van der Molen & M. Wilkinson. 2013. Framework for understanding marine ecosystem health. *Marine Ecology Progress Series*, 494:1–27.
- Torres-Orozco, E. 1993. Análisis Volumétrico de las Masas de Agua del Golfo de California. Tesis de doctorado, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, 80 p.
- Venegas, R. M., P. T. Strub, E. Beier, R. Letelier, A. C. Thomas, T. Cowles, C. James, L. Soto-Mardones & C. Cabrera. 2008. Satellite-derived variability in chlorophyll, wind stress, sea surface height, and temperature in the northern California Current System. *Journal of Geophysical Research*, 113(C3). ISSN 0148-0227. doi: 10.1029/2007JC004481.
- Venegas, S. A. 2001. Statistical Methods for Signaling Detection in Climate. Inf. téc.
- Zamudio, L., P. Hogan & E. J. Metzger. 2008. Summer generation of the Southern Gulf of California eddy train. *Journal of Geophysical Research*, 113(C6). ISSN 0148-0227.

13. ANEXOS

13.1. Anexo I

Tabla 5: Hábitat, afinidad zoogeográfica y época de desove de los taxones considerados en este trabajo. Basado en Moser (1996). Debido a que *Auxis* spp y *Anchoa* spp. son categorías genéricas no se especifican ninguna de sus características

TAXÓN	HÁBITAT (Adultos)	AFINIDAD	ÉPOCA DE DESOVE
<i>Anchoa</i> spp	—	—	—
<i>Auxis</i> spp	—	—	—
<i>Benthoosema panamense</i>	Epi-mesopelágica	Tropical-subtropical	Todo el año.
<i>Diogenichtys laternatus</i>	Epi-mesopelágica	Tropical-subtropical	Todo el año. Más abundante en febrero, abril y agosto
<i>Engraulis mordax</i>	Costera	Subtropical	Todo el año con un pico al final del invierno-primavera.
<i>Euthynnus lineatus</i>	Epipelágica	Tropical	Con un picos de octubre-diciembre
<i>Merluccius productus</i>	Epi-mesopelágica	Templado	Enero -abril con máximos durante enero-febrero
<i>Opisthonema libertate</i>	Costera	Tropical-subtropical	Principalmente de julio a setiembre
<i>Sardinops sagax</i>	Cerca de plataforma	Templada	Todo el año pero con mayor abundancia en primavera -verano y mínimos durante el invierno
<i>Scomber japonicus</i>	Epi-mesopelágico	Cosmopolita	Marzo-octubre con máximos entre abril y agosto
<i>Vinciguerria lucetia</i>	Epi-mesopelágica	Cosmopolita	Todo el año con un pico en setiembre y octubre

13.2. Anexo II

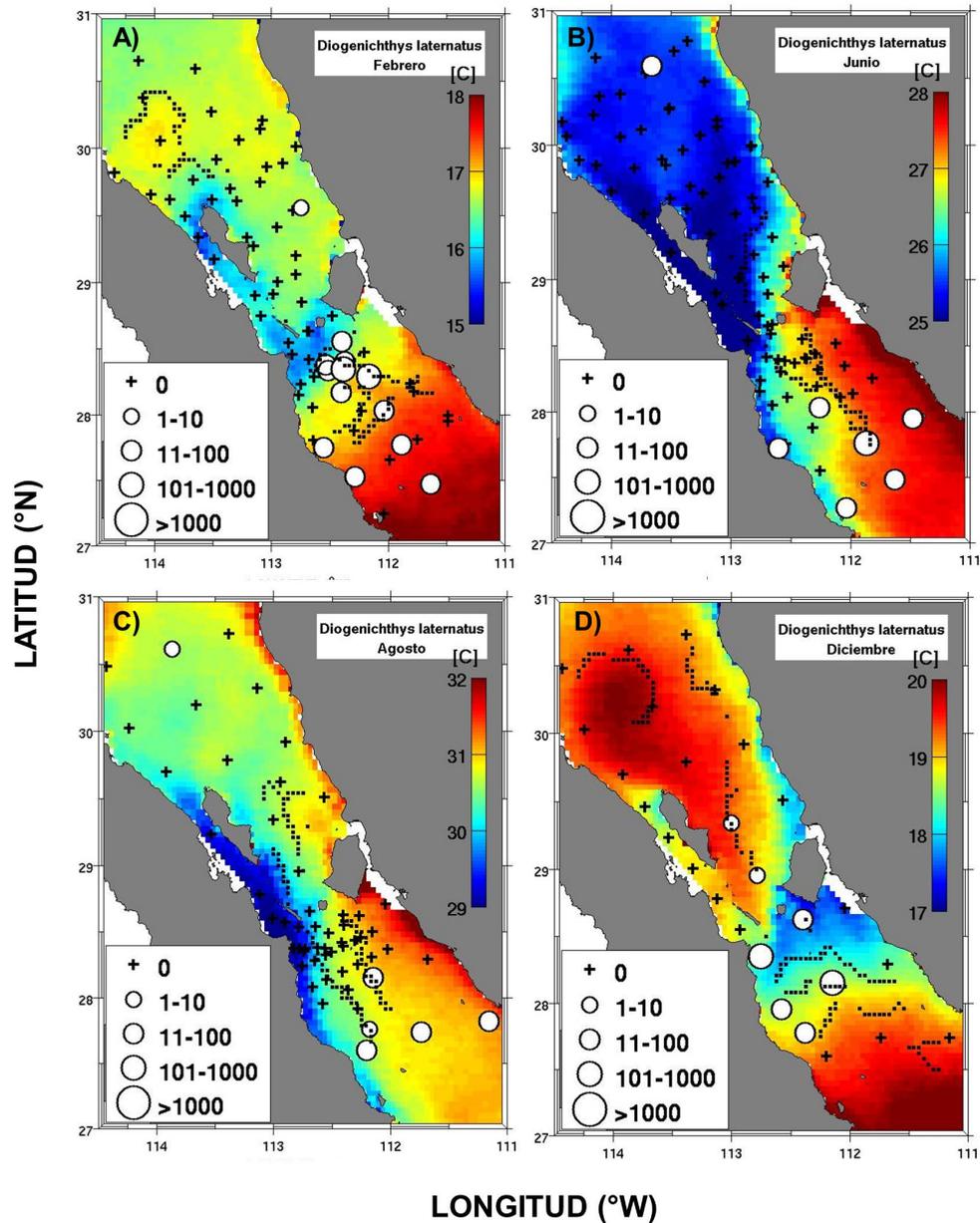


Figura 19: Cambios temporales en la distribución de *D. laternatus*. Se muestra la distribución y abundancia de larvas de peces (larvas/10m²) para febrero (A), junio (B), agosto (C) y diciembre (D) sobre las climatologías mensuales de TSM.

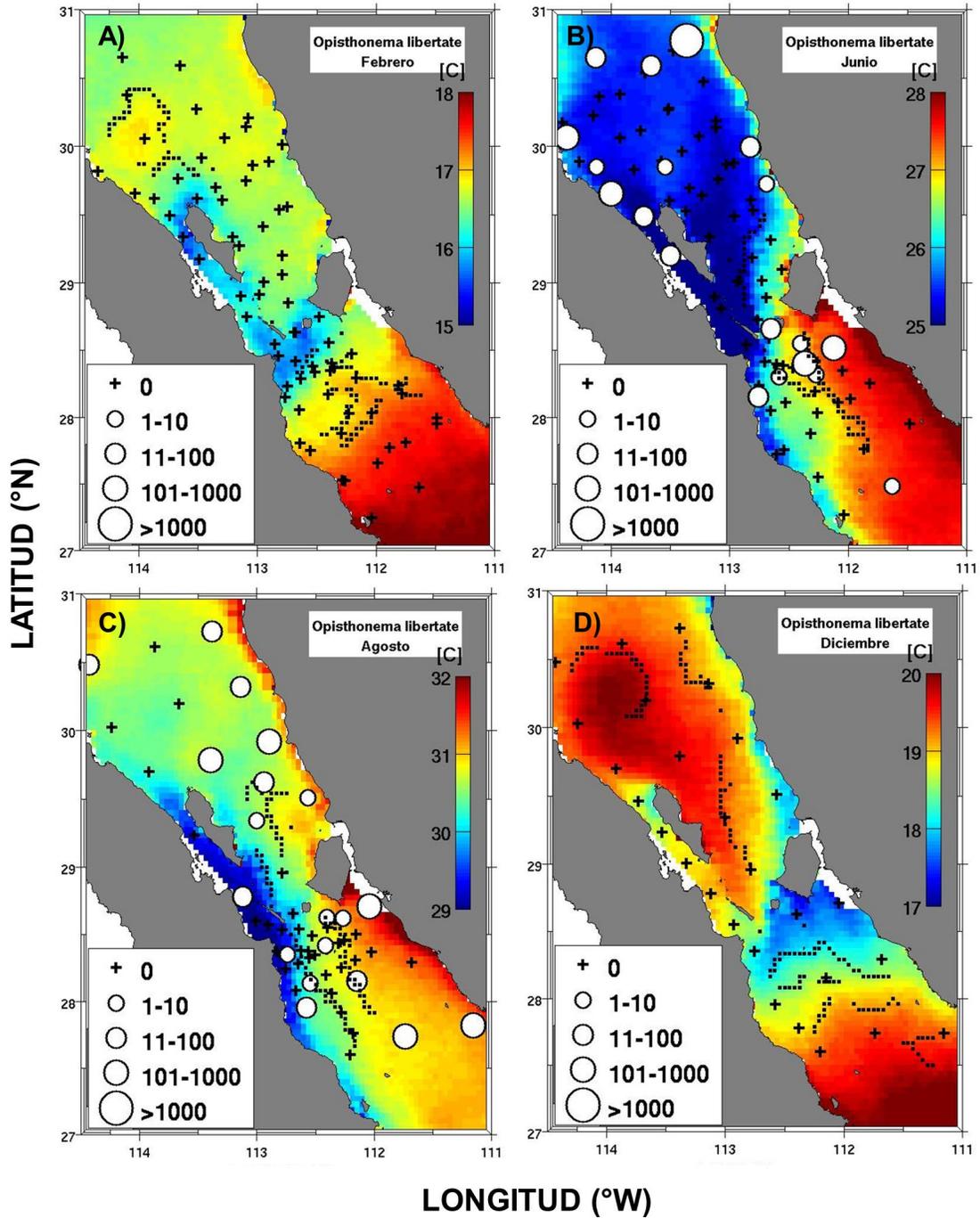


Figura 20: Cambios temporales en la distribución de *O. libertate*. Se muestra la distribución y abundancia de larvas de peces (larvas/10m²) para febrero (A), junio (B), agosto (C) y diciembre (D) sobre las climatologías mensuales de TSM.

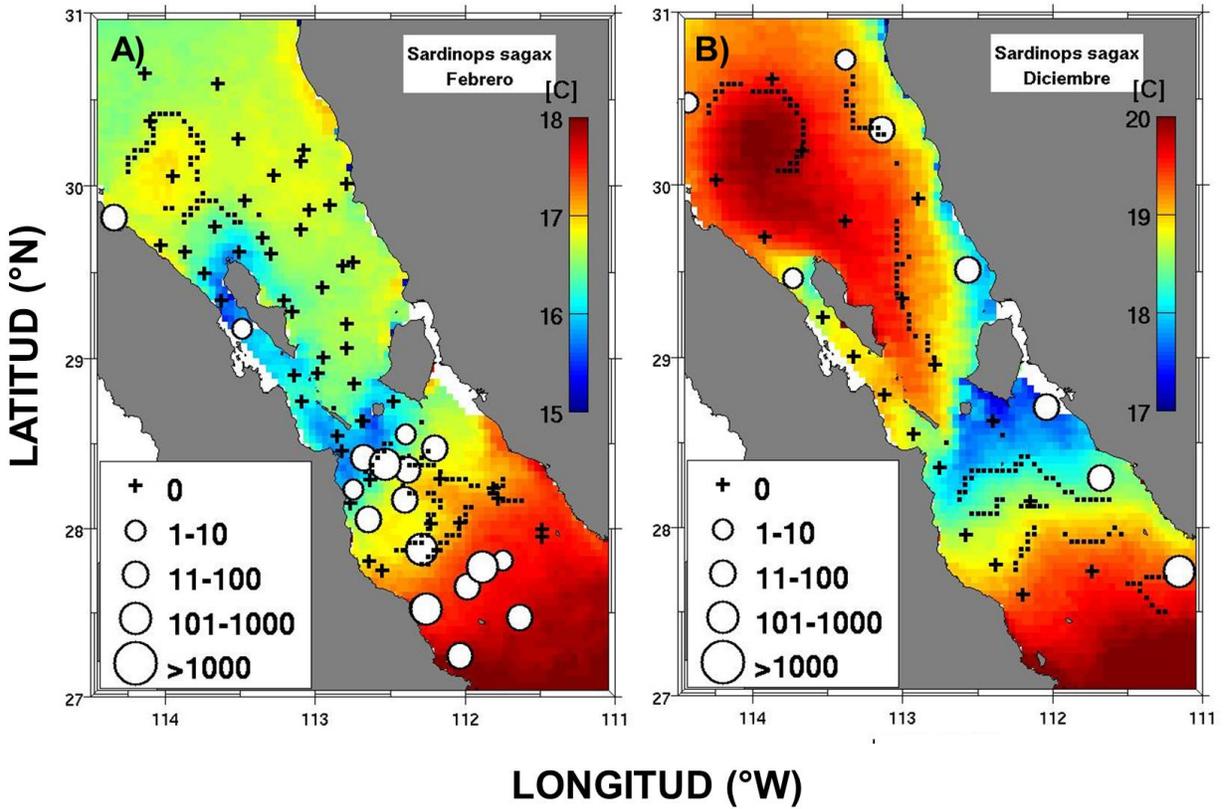


Figura 21: Cambios temporales en la distribución de *S. sagax*. Se muestra la distribución y abundancia de larvas de peces (larvas/10m²) para febrero (A) y diciembre (B). sobre las climatologías mensuales de TSM. En junio y agosto la especie estuvo ausente