

**Instituto de Investigación Pesquera**  
Departamento de Pesquerías

**INFORME DE FINAL**

**PROYECTO SUBSECRETARÍA DE PESCA**

---

**Estimación de índices de reclutamiento basados en  
variables y modelos biofísicos de pelágicos pequeños de  
la zona Centro-sur de Chile: Fase I**

**INFORME FINAL**  
**ID:2012-56-DAP-17**

---

15 de Febrero 2013

---

**INFORME FINAL**  
**ID:2012-56-DAP-17**

**Estimación de índices de reclutamiento basados en variables y modelos biofísicos de pelágicos pequeños de la zona Centro-sur de Chile: Fase I**

---

**REQUIRENTE**

Subsecretaría de Pesca

**UNIDAD EJECUTORA**

Instituto de Investigación Pesquera  
Departamento de Pesquerías  
Av. Cristóbal Colón 2780, Talcahuano – Chile  
Teléfono: 56-41-2920410  
Fax: 56-41-2920411  
Correo electrónico: [inpesca@inpesca.cl](mailto:inpesca@inpesca.cl)  
Sitio web: [www.inpesca.cl](http://www.inpesca.cl)

**JEFE DE PROYECTO**

Dr. Carolina Parada Véliz  
Instituto de Investigación Pesquera  
Departamento de Pesquerías  
Avda. Cristóbal Colón 2780, Talcahuano CP 4270789  
Tel: 56-41-2920410  
Fax: 56-41-2920411  
Email: [cparada@inpesca](mailto:cparada@inpesca)

Talcahuano, 15e Febrero de 2012

## INDICE DE CONTENIDOS

|   |    |
|---|----|
| <b>PERSONAL PARTICIPANTE</b>  | 1  |
| <b>RESUMEN EJECUTIVO</b>  | 3  |
| <b>ANTECEDENTES</b>   | 4  |
| <b>Variabilidad ambiental y sardina común en la región centro-sur de Chile.</b>   | 5  |
| <b>Modelación biofísica e índices de reclutamiento</b>  | 5  |
| <b>OBJETIVO GENERAL Y ESPECÍFICOS</b>   |    |
| <b>CAPITULO 1. IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE MODELACION BIOFISICA PARA LA SARDINA COMUN</b>   | 8  |
| <b>1.1. INTRODUCCION</b>  | 8  |
| <b>1.2. METODOLOGIA (OBJETIVO 4.1)</b>  | 8  |
| <b>1.2.1. <i>Desarrollar e implementar un sistema de modelación biofísica para la población de sardina común, que acople modelos biológicos y un modelo hidrodinámico validado para la región centro-sur de Chile</i></b> | 8  |
| <b>1.2.2. <i>Modelo hidrodinámico</i></b>   | 9  |
| <b>1.2.2.1. <i>Configuración ROMS</i></b>   | 10 |
| <b>1.2.2.2. <i>Configuración de simulaciones</i></b>  | 10 |
| <b>1.2.2.3. <i>Grillas-dominios y resolución de las grillas</i></b>   | 11 |
| <b>1.2.2.4. <i>Período de simulación y forzantes</i></b>  | 11 |
| <b>1.2.2.5. <i>Variables modeladas y resolución temporal de salidas del modelo</i></b>  | 12 |
| <b>1.2.2.6. <i>Requerimientos computacionales y aspectos técnicos de la simulación</i></b>  | 12 |
| <b>1.2.3. <i>Validación de modelo hidrodinámico</i></b>   | 13 |
| <b>1.2.3.1. <i>Validación basada en información hidrográfica</i></b>  | 13 |
| <b>1.2.3.2. <i>Validación basada en información satelital</i></b>   | 14 |
| <b>1.3. RESULTADOS</b>  | 15 |
| <b>1.3.1. <i>Descripción de las salida del modelo hidrodinámico (1993-actualidad) de la región comprendida entre los 30°-41°S con alta resolución costera, y con dos subdominios anidados</i></b>                         | 15 |
| <b>1.3.2. <i>Validación de ROMS basada en datos hidrográficos</i></b>   | 18 |
| <b>1.3.3. <i>Validación de ROMS basada en información satelital</i></b>   | 23 |
| <b>1.4. CONCLUSION</b>  | 28 |
| <b>1.5. REFERENCIAS</b>   | 29 |

|   |    |
|---|----|
| <b>CAPITULO 2. TRANSPORTE DE ESTADIOS TEMPRANOS DE SARDINA COMUN Y SU EFECTO SOBRE LA VARIABILIDAD DEL RECLUTAMIENTO E INDICES DE RECLUTAMIENTO INDEPENDIENTES DE LA ESTIMACION ESTIVAL: PARTE 1</b>  | 31 |
| <b>2.1. INTRODUCCION</b>  | 30 |
| <b>2.2. METODOLOGIA</b>   | 31 |
| <i>2.2.1. Acoplamiento modelo hidrodinámico a modelo biofísico</i>  | 31 |
| <i>2.2.2. Compartimentos biológicos y submodelos para la sardina común</i>  | 31 |
| <i>2.2.3. Modelación del proceso de transporte de estadios tempranos de sardina común y su efecto sobre la variabilidad del reclutamiento, identificando regiones fuente y sumidero de juveniles y reclutas de sardina común en la zona centro-sur de Chile</i> | 31 |
| <i>2.2.3.1. Modelo conceptual, análisis y revisión histórica</i>  | 32 |
| <i>2.2.3.2 Configuración del modelo biofísico</i>   | 32 |
| <i>Submodelo de movimiento por estadio</i>  | 33 |
| <i>Submodelo de distribución espacial del desove</i>  | 33 |
| <i>Submodelo de sincronización del desove</i>   | 33 |
| <i>Submodelo de desove bajo condiciones promedio</i>  | 34 |
| <i>Procesos estocásticos, simulaciones y experimentos</i>   | 34 |
| <i>Variables de salida y procesos modelados</i>   | 35 |
| <i>2.2.4. Obtención de índices de reclutamiento de sardina común, independientes de la estimación acústica estival, para la región centro-sur de Chile: Parte I</i>   | 35 |
| <i>2.2.4.1. Generación de índices biofísicos</i>  | 35 |
| <i>2.2.4.2. Indicadores de reclutamiento, definición de criterios</i>   | 35 |
| <i>2.2.4.3. Criterio e índice de reclutamiento</i>  | 36 |
| <i>2.2.4.4. Variabilidad espacial y temporal del los índices de reclutamiento</i>   | 36 |
| <i>2.2.4.5. Contrastación de índices de reclutamiento (biofísicos) con piezas de información relevantes</i>   | 36 |
| <b>2.3. RESULTADOS</b>  | 37 |
| <i>2.3.1. Un sistema biofísico acoplado potencialmente utilizable para abordar otros estudios relacionados a recursos marinos costeros</i>  | 37 |
| <i>2.3.2. Modelación del proceso de transporte de estadios tempranos de sardina común y su efecto sobre la variabilidad del reclutamiento, identificando regiones fuente y sumidero de juveniles y reclutas de sardina común en la zona centro-sur de Chile</i> | 38 |
| <i>2.3.2.1. Revisión de la literatura de la historia de vida de sardina común</i>   | 38 |
| <i>2.3.2.2. Análisis retrospectivo de la información biológica que sustentará el sistema de modelación biofísica</i>  | 40 |
| <i>Submodelo de movimiento por estadio</i>  | 40 |
| <i>Submodelo de distribución espacial del desove</i>  | 41 |
| <i>Condiciones espaciales realistas</i>   | 42 |
| <i>Condiciones espaciales históricas</i>  | 44 |
| <i>Submodelo de sincronización del desove y abundancia</i>  | 45 |
| <i>Índice de pre-reclutamiento espacial</i>   | 47 |
| <i>Índice de pre-reclutamiento temporal</i>   | 54 |
| <b>2.4 CONCLUSION - DISCUSION</b>   | 54 |
| <b>2.5 REFERENCIAS</b>  | 56 |

|   |    |
|---|----|
| <b>CAPITULO 3. INDICES DE RECLUTAMIENTO INDEPENDIENTES DE LA ESTIMACION ESTIVAL</b>   | 61 |
| <b>3.1. INTRODUCCION</b>  | 61 |
| <b>3.2. METODOLOGIA (OBJETIVO 4.3)</b>  | 61 |
| <b>3.2.1. Obtener índices de reclutamiento de sardina común, independientes de la estimación acústica estival, para la región centro-sur de Chile</b> | 61 |
| <b>3.2.2. Índices de reclutamiento inferido desde la información de la actividad pesquera</b>   | 62 |
| <b>3.2.3.1. Reclutamientos desde evaluación de stock</b>  | 63 |
| <b>3.2.3.2. Abundancia</b>  | 64 |
| <b>3.2.3.3. Mortalidad natural y por pesca</b>  | 64 |
| <b>3.2.3.4. Crecimiento</b>   | 64 |
| <b>3.2.3.5. Variables de estado</b>   | 64 |
| <b>3.2.3.6. Patrón de explotación</b>   | 65 |
| <b>3.2.3.7. Captura</b>   | 65 |
| <b>3.2.3.8. Proceso de estimación</b>   | 65 |
| <b>3.2.3.9. Verosimilitud de la composición por edades</b>  | 65 |
| <b>3.2.3.10. Verosimilitud de la biomasa acústica y desovante</b>   | 66 |
| <b>3.2.3.11. Verosimilitud de las Capturas</b>  | 66 |
| <b>3.2.3.12. Verosimilitud de la Captura por Unidad de Esfuerzo (CPUE)</b>  | 66 |
| <b>3.2.4. Estimaciones de reclutamiento mediante métodos hidroacústicos discretizados a escala espacial de las salidas del modelo biofísico</b>       | 66 |
| <b>3.2.4.1. Recepción y ordenamiento de la data acústica.</b>   | 67 |
| <b>3.2.4.2. Distribución espacial de sardina común</b>  | 67 |
| <b>3.2.4.3. Densidad acústica de sardina común por año</b>  | 67 |
| <b>3.2.4.4. Transformación de la densidad acústica a densidad de peces</b>  | 67 |
| <b>3.2.4.5. Distribución latitudinal de densidad de sardina común por año</b>   | 68 |
| <b>3.3. RESULTADOS</b>  | 69 |
| <b>3.3.1. Índices de reclutamiento inferidos de las capturas</b>  | 69 |
| <b>3.3.2. Índices de reclutamientos estimados desde un modelo de dinámica poblacional</b>   | 70 |
| <b>3.3.3. Estimaciones de reclutamiento mediante información hidroacústica discretizada a la escala espacial de las salidas del modelo biofísico</b>  | 71 |
| <b>3.3.3.1. Estimaciones de reclutamiento mediante métodos hidroacústicos provenientes de los cruceros RECLAS organizados por el FIP</b>              | 71 |
| <b>3.3.3.2. Información acústica espacial discretizada</b>  | 72 |
| <b>3.3.3.3. Tracks de navegación</b>  | 73 |
| <b>3.3.3.4. Densidad acústica de Sardina Común por sector y por año</b>   | 80 |
| <b>3.3.4.5. Densidad acústica interanual de sardina común</b>   | 80 |
| <b>3.4. CONCLUSIONES</b>  | 81 |
| <b>3.5. REFERENCIAS</b>   | 82 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>CAPITULO 4. RELACIONES AMBIENTE-RECURSO PARA LA SARDINA COMUN EN LA REGION CENTRO-SUR</b>   | 84  |
| <b>4.1. INTRODUCCION</b>   | 84  |
| <b>4.2. METODOLOGIA (OBJETIVO 4.4)</b>   | 84  |
| <i>4.2.1. Identificar las principales forzantes del ambiente que modulan el proceso de transporte de huevos y larvas de sardina común y que determinan la variabilidad del reclutamiento</i> | 84  |
| <i>4.2.2. Integración de variables ambientales in situ (2002-2010) y la distribución y densidad de huevos y larvas de sardina común usando Modelos aditivos generalizados (GAMs)</i>         | 85  |
| <b>4.3. RESULTADOS</b>   | 87  |
| <i>4.3.1. Frecuencias de Variabilidad</i>  | 87  |
| <i>4.3.2. Variabilidad Espacial</i>  | 90  |
| <i>4.3.3. Reconstrucción espacial del ciclo anual</i>  | 93  |
| <i>4.3.4. Diagramas longitud tiempo</i>  | 99  |
| <i>4.3.5. Variabilidad estacional del viento y nivel del mar</i>   | 101 |
| <i>4.3.6. Modelación y distribución de huevos</i>  | 104 |
| <i>4.3.7. Relación de la densidad de huevos y el medioambiente</i>   | 111 |
| <b>4.4. CONCLUSION Y DISCUSION</b>   | 127 |
| <b>4.5 REFERENCIAS</b>   | 130 |
| <b>CAPITULO 5. REVISION BIBLIOGRÁFICA Y DESARROLLO DE MODELO CONCEPTUAL</b>  | 132 |
| <b>5.1. INTRODUCCIÓN</b>   | 132 |
| <b>5.2. REVISIÓN DE METODOLOGÍAS PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS ECOLÓGICOS</b>   | 132 |
| <i>5.2.1. Tipos de Modelos aplicables a la población de sardina común</i>  | 133 |
| <i>5.2.1.1. Clasificación de Modelos</i>   | 133 |
| <b>5.3. PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA REDUCCIÓN DE INCERTIDUMBRE EN LA DINÁMICA POBLACIONAL DE LA SARDINA COMÚN.</b>  | 136 |
| <b>5.4. PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA INCORPORACIÓN Y VALIDACIÓN DE ÍNDICES.</b>  | 138 |
| <i>5.4.1. Validación de índices</i>  | 138 |
| <i>5.4.2. Descriptor del simulador y estimador</i>   | 139 |
| <i>5.4.3. Consideraciones ambientales</i>  | 140 |
| <i>5.4.4. Modelo de Simulación con variable temporal con curva tipo seno</i>   | 141 |
| <b>5.5. MODELO CONCEPTUAL</b>  | 141 |
| <i>5.5.1. Recomendaciones</i>  | 143 |
| <b>5.6. REFERENCIAS</b>  | 143 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>6. TALLERES</b>   | 148 |
| <b>6.1. Taller de coordinación con Subsecretaría de Pesca (SUBPESCA)</b>   | 148 |
| <b>6.1.2. Taller de revisión y validación del modelo hidrodinámico.</b>  | 149 |
| <b>6.1.3. Taller Internacional de Modelación ecosistémica (MSE)</b>  | 149 |
| <b>6.1.4. Taller de discusión del grupo de trabajo de dinámica poblacional.</b>  | 149 |
| <b>6.1.5. Taller de Inducción de herramientas de modelación biofísica a la subsecretaría de pesca.</b>                         | 149 |
| <b>6.1.6. Taller de difusión y discusión de resultados finales.</b>  | 149 |
| <b>6.2. TRABAJOS PRESENTADOS EN EL PROGRAMA South Pacific Integrated eCcosystem Studies (SPICES) asociados a este proyecto</b> | 150 |
| <b>7. CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES</b>   | 151 |

## INDICE DE FIGURAS

**Figura 1.1.** Sistema de modelación biofísica de sardina común. Se trata de un modelo hidrodinámico y uno biofísico acoplados y validados.

**Figura 1.2.** Área de estudio y distintos dominios del modelo hidrodinámico. El dominio “Padre” y los 2 hijos, poseen una resolución espacial horizontal de  $\sim 4$  y  $\sim 1.3$  km, respectivamente.

**Figura 1.3.** Batimetría utilizada para las simulaciones en ROMS: es una combinación de ETOPO2 y sondeos realizados por el servicio hidrológico y oceanográfico de la armada de Chile.

**Figura 1.4.** Flujos de descarga medias mensuales usados en ROMS entre los años 1993 y 2012. (Panel superior: la Desembocadura del Bio Bio, río Itata, Mataquito y Maullin, Panel inferior: los ríos Bueno, Cautín, Maule y Valdivia) (fuente de información: Dirección General de Aguas de Chile).

**Figura 1.5.** Diagnostico de conservación de volumen y energía entre el período de simulación de enero 1998 y diciembre 2001 para el dominio sin ríos. Arriba, anomalía de volumen en  $\text{km}^2$ . Al centro energía cinética superficial promedio en  $\text{cm}^2\text{s}^{-2}$ . Abajo, energía cinética de volumen promedio en  $\text{cm}^2\text{s}^{-2}$ .

**Figura 1.6.** Diagnostico de conservación de volumen y energía entre el período de simulación de enero 1998 y marzo 2012 para el dominio con ríos. Arriba, anomalía de volumen en  $\text{km}^2$ . Al centro energía cinética superficial promedio en  $\text{cm}^2\text{s}^{-2}$ . Abajo, energía cinética de volumen promedio en  $\text{cm}^2\text{s}^{-2}$ .

**Figura 1.7.** Análisis Wavelet para el dominio Padre con ríos. a) Poder espectral de TSM y b) Espectro global TSM. Es evidente el gran aporte a la varianza del sistema de la señal anual.

**Figura 1.8.** Análisis Wavelet para el dominio Padre con ríos. a) Poder espectral de SSM y b) Espectro global SSM. Se nota un aporte a la varianza de la señal anual y decadal, aunque esta última no es confiable por encontrarse fuera del cono de significancia.

**Figura 1.9.** Diagrama Hovmoller. A la izquierda TSM y a la derecha SSM. En ambos es posible observar una señal anual con núcleos más fríos y menos salinos cercanos a los  $-74^\circ\text{W}$ .

**Figura 1.10.** Histograma de diferencias en profundidad para a) Temperatura y b) Salinidad. Se aprecia claramente una distribución normal.

**Figura 1.11.** Histograma de diferencias en el tiempo en el rango de valores entre 1 y 10 m de profundidad para a) Temperatura y b) Salinidad.

**Figura 1.12.** Histograma de diferencias en latitud para a) Temperatura y b) Salinidad.

**Figura 1.13.** Histograma de diferencias en el tiempo en el rango de valores entre 35° y 37 °S de latitud para a) Temperatura y b) Salinidad.

**Figura 1.14.** Histograma de diferencias en longitud para a) Temperatura y b) Salinidad.

**Figura 1.15.** Histograma de diferencias en el tiempo en el rango de valores entre 72.5 y 73.5 °W de longitud para a) Temperatura y b) Salinidad.

**Figura 1.16.** Diagrama T-S correspondiente a agosto de todos los años con registros hidrográficos (1999-2011) de la data hidrográfica (panel izquierdo) y del modelo (panel derecho).

**Figura 1.17.** Área de análisis para validación de ROMS, incluyendo promedio estacional de TSM para: a) datos observados por satélite desde Modis Aqua, b) modelo ROMS configuración sin ríos, y c) modelo ROMS configuración con ríos.

**Figura 1.18.** Varianza explicada por cada uno de los modos de variabilidad de la TSM en modelo y satélite para a) Dominio ROMS sin ríos sector costa, b) Dominio ROMS sin ríos sector océano, c) Dominio ROMS con ríos sector costa y d) Dominio ROMS con ríos sector océano.

**Figura 1.19.** Comparación los componentes principales del primer modo de variabilidad de TSM para el sector costero dominio sin ríos en a) series de tiempo entre los datos satelitales de Modis Aqua (línea azul) y las salidas de ROMS (línea roja) y el nivel de correlación entre las series; y b) dominio espacial de satélite y ROMS.

**Figura 1.20.** Comparación los componentes principales del primer modo de variabilidad de TSM para el sector oceánico dominio sin ríos en a) series de tiempo entre los datos satelitales de Modis Aqua (línea azul) y las salidas de ROMS (línea roja) y el nivel de correlación entre las series; y b) dominio espacial de Satélite y ROMS.

**Figura 1.21.** Comparación los componentes principales del primer modo de variabilidad de TSM para el sector costero dominio con ríos en a) series de tiempo entre los datos satelitales de Modis Aqua (línea azul) y las salidas de ROMS (línea roja) y el nivel de correlación entre las series; y b) dominio espacial de Satélite y ROMS.

**Figura 1.22.** Comparación los componentes principales del primer modo de variabilidad de TSM para el sector oceánico dominio con ríos en a) series de tiempo entre los datos satelitales de Modis Aqua (línea azul) y las salidas de ROMS (línea roja) y el nivel de correlación entre las series; y b) dominio espacial de satélite y ROMS.

**Figura 1.23.** Comparación del análisis espectral de la temperatura superficial del mar proveniente de los datos satelitales Modis Aqua y las salidas de ROMS.

**Figura 2.1.** Simulación Lagrangeana de partículas liberadas en un área circular centrada en los 36.512°S y los 73.512°W con un radio de 10 km. Se siguió la evolución del transporte por 20 días.

**Figura 2.2.** Modelo conceptual de la sardina común, estadios de desarrollo, relaciones ambiente-recurso, comportamientos modelados.

**Figura 2.3.** Distribución de huevos de sardina común durante cruceros FIP desarrollados entre Agosto y Octubre de cada año desde 2002-2005.

**Figura 2.4.** Distribución de huevos de sardina común durante cruceros FIP desarrollados entre Agosto y Octubre de cada año desde 2007-2010 (excepto 2006).



**Figura 2.5.** Dominio total discretizado en celdas en el Sistema de Información geográfico que contempla las coordenadas del área geográfica total que abarca el modelo asociado a las zonas de desove conocidas (puntos amarillos para todos los años) y las zonas potenciales de reclutamiento.

**Figura 2.6.** Distribución espacial del desove discretizada en celdas de 5 x 5 km para el año 2002-2005.

**Figura 2.7.** Distribución espacial del desove discretizada en celdas de 5 x 5 km para el año 2007-2010 (excepto 2010 y 2011).

**Figura 2.8.** Distribución espacial del desove normalizada y discretizada en celdas de 5 x 5 km integrada para todos los años.

**Figura 2.9.** Serie de tiempo del índice gonadosomático (IGS) normalizado (azul) de sardina común a una escala semanal desde 1993-actualidad, y el ciclo anual del IGS (rojo).

**Figura 2.10.** Variación del índice gonadosomático normalizado al 70% (líneas punteadas) y máximos del desove de sardina común (cuadrados) a una escala semanal desde 1993-actualidad,

**Figura 2.11.** Índice de pre-reclutamiento espacial (biofísico) para los años 1994 a 1997 forzado con condiciones promedio en los años 1993-1997 respectivamente.

**Figura 2.12.** Índice de pre-reclutamiento espacial (biofísico) para los años 1999 al 2002 forzado con condiciones promedio en los años 1998-2001 respectivamente.

**Figura 2.13.** Índice de pre-reclutamiento espacial (biofísico) para los años 2003 al 2006 forzado con condiciones realistas (basadas en cruceros de distribución de huevos de sardina común) en los años 2002-2005 respectivamente. La última gráfica correspondiente a la proyección del índice de pre-reclutamiento del año 2007 fue forzada con condiciones promedio debido a la falta de información de campo ese año.

**Figura 2.14.** Índice de pre-reclutamiento espacial (biofísico) para los años 2008 al 2012 forzado con condiciones realistas (basadas en cruceros de distribución de huevos de sardina común) en los años 2007-2011 respectivamente.

**Figura 2.15.** Simulación del transporte, dispersión y retención de huevos de sardina común realizada bajo condiciones promedio de distribución de huevos del año 1999.

**Figura 2.16.** Simulación del transporte, dispersión y retención de huevos de sardina común realizada bajo condiciones promedio de distribución de huevos del año 2008.

**Figura 2.17.** Integración del resultado del índice de pre-reclutamiento espacial proveniente del modelo biofísico en función de las áreas definidas en la tabla 2.3. Esta información fue contrastada con los índices espaciales generados a partir de la información hidroacústica del capítulo 3. Cada año indicado en la gráfica corresponde al índice de pre-reclutamiento (las fechas indican período de reclutamiento no de forzamiento del modelo).

**Figura 2.18.** Integración anual del resultado del índice de pre-reclutamiento espacial proveniente del modelo biofísico en función de las áreas definidas en la tabla 2.3. En rojo años basados en condiciones iniciales promedio.

**Figura 2.19.** Integración del resultado del índice de pre-reclutamiento espacial proveniente del modelo biofísico en función de las áreas definidas en la tabla 2.3 y para cada año.

**Figura 2.20.** Modelo conceptual de transporte, dispersión, conectividad y retención de estadios tempranos de sardina común de la región centro-Sur de Chile basado en 19 años de simulaciones biofísicas.

**Figura 3.1.** Series temporales de proporción de reclutas mensual (panel superior), esfuerzo de pesca (panel inferior, izquierdo) y capturas (panel inferior derecho) en sardina común desde 1991 a 2011.

**Figura 3.2.** Series temporales de longitud mensual (panel superior) y peso mensual (panel inferior) en sardina común desde 1991 a 2011.

**Figura 3.3** Series temporales de reclutamiento mensual (panel superior) y anual (panel inferior) de sardina común en número de individuos desde 1991 a 2011 (fuente series de información de captura y esfuerzo).

**Figura 3.4.** Series temporales de reclutamiento de sardina común en número de individuos (panel superior) y en biomasa (panel inferior) desde 1991 a 2012 bajo escala de tiempo biológica, desde modelo de evaluación de stock edad estructurado.

**Figura 3.5.** Distribución espacial de las densidades de sardina común (NASC,  $m^2/mn^2$ ) provenientes de los cruceros hidroacústicos entre los años 1999, 2000 y 2001.

**Figura 3.5.1.** Distribución espacial de las densidades de sardina común (NASC,  $m^2/mn^2$ ) provenientes de los cruceros hidroacústicos entre los años 2002, 2003 y 2004.

**Figura 3.5.2.** Distribución espacial de las densidades de sardina común (NASC,  $m^2/mn^2$ ) provenientes de los cruceros hidroacústicos entre los años 2007, 2008 y 2009.

**Figura 3.6** Tracks acústicos de navegación para los años 1999, 2000 y 2001.

**Figura 3.6.1.** Tracks acústicos de navegación para los años 2002, 2003 y 2004.

**Figura 3.6.2.** Tracks acústicos de navegación para los años 2007, 2008 y 2009.

**Figura 3.7.** Densidad acústica de sardina común por sector. **1:** Sector Norte de Constitución, **2:** Sector Sur de Constitución (Sur de Constitución a Cobquecura); **3:** Sector del Río Itata (Sur de Cobquecura a Bahía Coliumo); **4:** Sector del Golfo de Arauco (Sur Bahía Coliumo a Golfo de Arauco); **5:** Sector Punta Lavapie (Sur del Golfo de Arauco a Lebu); **6:** Sector Isla Mocha (Sur de Lebu a Puerto Saavedra); **7:** Sector Corral (Sur de Puerto Saavedra a Corral); **8:** Sector Sur Corral.

**Figura 3.8.** Densidad total de sardina común por año. gráfico de la sumatoria de NASC ( $m^2/mn^2$ ) por año.

**Figura 4.1.** Espectro de varianza fraccional local (LFV) del esfuerzo del viento (línea negra continua) y del rotor del esfuerzo del viento (línea gris continua) para la región centro-sur de Chile (33-42°S; 76-71°W). Los niveles de significancia de 50%, 80%, 90%, 95% y 99%, fueron obtenidos a través de un experimento de remuestreo aleatorio (bootstrap).

**Figura 4.2.** Espectro de varianza fraccional local (LFV) del nivel del mar (línea negra continua) y de la energía cinética (línea gris continua) para la región centro-sur de Chile (33-42°S; 76-71°W). Los niveles de significancia de 50%, 80%, 90%, 95% y 99%, fueron obtenidos a través de un experimento de remuestreo aleatorio (bootstrap).

**Figura 4.3.** Espectro de varianza fraccional local (LFV) de temperatura superficial del mar satelital, para la región centro-sur de Chile (33-42°S; 76-71°W). Los niveles de significancia de 50%, 80%, 90%, 95% y 99%, fueron obtenidos a través de un experimento de remuestreo aleatorio (bootstrap).

**Figura 4.4.** Espectro de varianza fraccional local (LFV) de clorofila-a satelital para la región centro-sur de Chile (33-42°S; 76-71°W). Los niveles de significancia de 50%, 80%, 90%, 95% y 99%, fueron obtenidos a través de un experimento de remuestreo aleatorio (bootstrap).

**Figura 4.5.** Distribución espacial de la fracción de varianza de la clorofila que es explicada por las fluctuaciones con periodos de 2.3 años (a), 1 año (b), 6 meses (c), 3.8 meses (d), 48 días (e) y 26 días (f). Los tonos azules intensos indican zonas con una baja contribución y los tonos rojos intensos zonas con una alta contribución a la varianza de cada una de los períodos.

**Figura 4.6.** a) Distribución espacial de la fracción de varianza de la clorofila satelital y b) de la

temperatura superficial del mar que es explicada por las fluctuaciones con periodos anuales. Las líneas de contornos están graficados cada 5 unidades (0, 5, 10, 15, 20) para la clorofila y cada 20 unidades (20:20:100) para la temperatura. La varianza explicada esta en expresada en % respecto de la varianza total de cada serie.

**Figura 4.7.** Distribución espacial de la varianza explicada por el ciclo anual, para a) esfuerzo del viento, b) rotor del esfuerzo del viento, c) nivel del mar y d) energía cinética.

**Figura 4.8.** Reconstrucción espacial del ciclo anual de la clorofila-a satelital para la región centro-sur de Chile. La fase 0 corresponde al inicio de la serie (mitades del mes de julio), representando también el comienzo del ciclo anual. Por tanto, la fase 315 corresponde al final del ciclo (comienzos del mes de junio).

**Figura 4.9.** Reconstrucción espacial del ciclo de la temperatura superficial del mar satelital para la región centro-sur de Chile. La fase 0 corresponde al inicio de la serie (mitades del mes de julio), representando también el comienzo del ciclo anual. Por tanto, la fase 315 corresponde al final del ciclo (comienzos del mes de junio).

**Figura 4.10.** Ciclo canónico de la reconstrucción MTM-SVD de la frecuencia anual del esfuerzo del viento. Los tonos azules (rojos) indican anomalías negativas (positivas) en el esfuerzo del viento. El tamaño y dirección de las flechas indican intensidad y dirección de las anomalías del esfuerzo del viento.

**Figura 4.11.** Ciclo canónico de la reconstrucción MTM-SVD de la frecuencia anual del rotor del esfuerzo del viento. Los tonos azules (rojos) indican anomalías negativas (positivas) en el rotor. El tamaño y dirección de las flechas indican intensidad y dirección de las anomalías del esfuerzo del viento.

**Figura 4.12.** Ciclo canónico de la reconstrucción MTM-SVD de la frecuencia anual del nivel del mar y las corrientes geostróficas. Los tonos azules (rojos) indican anomalías negativas (positivas) del nivel del mar. El tamaño y dirección de las flechas indican intensidad y dirección de las anomalías las corrientes geostróficas.

**Figura 4.13.** Ciclo canónico de la reconstrucción MTM-SVD de la frecuencia anual de la energía cinética y las corrientes geostróficas. Los tonos azules (rojos) indican anomalías negativas (positivas) de la energía cinética. El tamaño y dirección de las flechas indican intensidad y dirección de las anomalías las corrientes geostróficas.

**Figura 4.14.** Diagrama Hovmöller que muestra variabilidad interanual de la clorofila-a satelital promedio de los primeros 100 km de la costa.

**Figura 4.15.** Diagrama Hovmöller que muestra la variabilidad interanual de la temperatura superficial del mar promedio de los primeros 100 km de la costa.

**Figura 4.16.** Promedio estacional de clorofila-a satelital ( $\text{mg m}^{-3}$ ) para la región centro-sur de Chile ( $33^{\circ}\text{-}42^{\circ}\text{S}$ ;  $76^{\circ}\text{-}71^{\circ}\text{W}$ ). Las líneas de contorno corresponden a las isolíneas de 2, 1 y  $0.5 \text{ mg m}^{-3}$ .

**Figura 4.17.** Promedio estacional de temperatura superficial del mar satelital ( $^{\circ}\text{C}$ ) en la región centro-sur de Chile ( $33^{\circ}\text{-}42^{\circ}\text{S}$ ;  $76^{\circ}\text{-}71^{\circ}\text{W}$ ).

**Figura 4.18.** Promedio estaciona del esfuerzo del viento y el rotor del esfuerzo del viento en la región. Los tonos azules (rojos) indican bajas (altas) magnitudes en el esfuerzo del viento. El tamaño y dirección de las flechas indican intensidad y dirección en el esfuerzo del viento. Los contornos continuos (segmentados) de color gris indican valores de 1 a  $3 \times 10^{-7}$  (de  $-1$  a  $-3 \times 10^{-7}$ ) en el rotor del

esfuerzo del viento.

**Figura 4.19.** Promedio estacional del nivel del mar y las corrientes geostróficas. Los tonos azules (rojos) indican niveles bajos (altos) en el nivel del mar. El tamaño y dirección de las flechas indican intensidad y dirección de las corrientes geostróficas.

**Figura 4.20.** Salida del modelo evaluado a través de GAM para la densidad de huevos sardina común en la zona centro-sur de Chile, años 2002. La escala corresponde al logaritmo de la densidad observada (panel izquierdo) y estimada (panel derecho). (Modelo 6: interacción longitud-latitud + profundidad de fondo + viento + Temperatura).

**Figura 4.21.** Salida del modelo evaluado a través de GAM para la densidad de huevos sardina común en la zona centro-sur de Chile, años 2003. La escala corresponde al logaritmo de la densidad observada (panel izquierdo) y estimada (panel derecho). (Modelo 6: interacción longitud-latitud + profundidad de fondo + viento + Temperatura).

**Figura 4.22.** Salida del modelo evaluado a través de GAM para la densidad de huevos sardina común en la zona centro-sur de Chile, años 2004. La escala corresponde al logaritmo de la densidad observada (panel izquierdo) y estimada (panel derecho). (Modelo 10: interacción longitud-latitud + profundidad de fondo + viento + Temperatura + Salinidad + Oxígeno).

**Figura 4.23.** Salida del modelo evaluado a través de GAM para la densidad de huevos sardina común en la zona sur de Chile, años 2005. La escala corresponde al logaritmo de la densidad observada (panel izquierdo) y estimada (panel derecho). (Modelo 10: interacción longitud-latitud + profundidad de fondo + viento + Temperatura + Salinidad + Oxígeno).

**Figura 4.24.** Salida del modelo evaluado a través de GAM para la densidad de huevos sardina común en la zona centro-sur de Chile, años 2007. La escala corresponde al logaritmo de la densidad observada (panel izquierdo) y estimada (panel derecho). (Modelo 10: interacción longitud-latitud + profundidad de fondo + viento + Temperatura + Salinidad + Oxígeno).

**Figura 4.25.** Salida del modelo evaluado a través de GAM para la densidad de huevos sardina común en la zona sur de Chile, años 2008. La escala corresponde al logaritmo de la densidad observada (panel izquierdo) y estimada (panel derecho). (Modelo 10: interacción longitud-latitud + profundidad de fondo + viento + Temperatura + Salinidad + Oxígeno).

**Figura 4.26.** Salida del modelo evaluado a través de GAM para la densidad de huevos sardina común en la zona centro-sur de Chile, años 2009. La escala corresponde al logaritmo de la densidad observada (panel izquierdo) y estimada (panel derecho). (Modelo 10: interacción longitud-latitud + profundidad de fondo + viento + Temperatura + Salinidad + Oxígeno).

**Figura 4.27.** Salida del modelo evaluado a través de GAM para la densidad de huevos de sardina común en la zona centro-sur de Chile, años 2010. La escala corresponde al logaritmo de la densidad observada (panel izquierdo) y estimada (panel derecho). (Modelo 10: interacción longitud-latitud + profundidad de fondo + viento + Temperatura + Salinidad + Oxígeno).

**Figura 4.28.** Relaciones predictoras (profundidad, viento, temperatura) sobre la densidad de huevos de sardina común en la zona centro durante el 2002.

**Figura 4.29.** Relaciones predictoras (profundidad, viento, temperatura) sobre la densidad de huevos de sardina común en la zona sur durante el 2002.

**Figura 4.30.** Relaciones predictoras (profundidad, viento, temperatura) sobre la densidad de huevos de sardina común en la zona centro durante el 2003.

**Figura 4.31.** Relaciones predictoras (profundidad, viento, temperatura) sobre la densidad de huevos de sardina común en la zona sur durante el 2003.

**Figura 4.32.** Relaciones predictoras (profundidad, viento, temperatura, salinidad, oxígeno disuelto) sobre la densidad de huevos de sardina común en la zona centro durante el 2004.

**Figura 4.33.** Relaciones predictoras (profundidad, viento, temperatura, salinidad, oxígeno disuelto) sobre la densidad de huevos de sardina común en la zona sur durante el 2004.

**Figura 4.34.** Relaciones predictoras (profundidad, viento, temperatura, salinidad, oxígeno disuelto) sobre la densidad de huevos de sardina común en la zona sur durante el 2005.

**Figura 4.35.** Relaciones predictoras (profundidad, viento, temperatura, salinidad, oxígeno disuelto) sobre la densidad de huevos de sardina común en la zona centro durante el 2007.

**Figura 4.36.** Relaciones predictoras (profundidad, viento, temperatura, salinidad, oxígeno disuelto) sobre la densidad de huevos de sardina común en la zona sur durante el 2007.

**Figura 4.37.** Relaciones predictoras (profundidad, viento, temperatura, salinidad) sobre la densidad de huevos de sardina común en la zona sur durante el 2008.

**Figura 4.38.** Relaciones predictoras (profundidad, viento, temperatura, salinidad, oxígeno disuelto) sobre la densidad de huevos de sardina común en la zona centro durante el 2009.

**Figura 4.39.** Relaciones predictoras (profundidad, temperatura, salinidad, oxígeno disuelto) sobre la densidad de huevos de sardina común en la zona sur durante el 2009.

**Figura 4.40.** Relaciones predictoras (profundidad, viento, temperatura, salinidad, oxígeno disuelto) sobre la densidad de huevos de sardina común en la zona centro durante el 2010.

**Figura 4.41.** Relaciones predictoras (profundidad, temperatura, salinidad, oxígeno disuelto) sobre la densidad de huevos de sardina común en la zona sur durante el 2010.

**Figura 4.42.** Esquema del efecto de las variables predictoras sobre la densidad de huevos de sardina común en la zona centro-sur de Chile, mediante Modelos Aditivos Generalizados (GAMs).

**Figura 4.43.** Esquema de las interacciones entre el hábitat y la densidad de huevos de sardina común.

## INDICE DE TABLAS

**Tabla 1.1.** Herramientas utilizadas en el establecimiento y configuración del modelo hidrodinámico.

**Tabla 2.1.** Listado de proyectos que cuentan con datos respecto a la distribución espacial del desove de sardina común.

**Tabla 2.2.** Descripción de los cruceros efectuados para evaluar la zona de desove de sardina común en el período 1997 – 2010.

**Tabla 2.3.** Areas de discretización de índice espacial biofísico para ser comparado con la información acústica.

**Tabla 2.4.** Revisión histórica de los estudios de Sardina común.

**Tabla 3.1.** Abundancia (millones de ejemplares) en el stock de sardina común y anchoveta, la que ha sido evaluada en los cruceros acústicos de reclutamiento. Norte, se refiere a la zona comprendida entre la V y VIII Región, y Sur a la zona comprendida entre el sur de la Isla Mocha y Punta Galera (38°28'S-40°S).

**Tabla 3.2.** Biomasa (toneladas) en el stock de sardina común y anchoveta, la que ha sido evaluada en los cruceros acústicos de reclutamiento. Norte, se refiere a la zona comprendida entre la V y VIII Región, y Sur a la zona comprendida entre el sur de la Isla Mocha y Punta Galera (38°28'S-40°S).

**Tabla 4.1.** Resumen de la data disponible para los diferentes años (d.c.: Data completa, d.i.: Data incompleta, n.d.: No hay data).

**Tabla 4.2.** Resumen de los parámetros utilizados en los modelos aditivos generalizados (GAMs) para los diferentes años (2002, 2003, 2004, 2005, 2007, 2008, 2009, 2010).

**Tabla 4.3.** Resultados de los modelos aditivos generalizados para la densidad de huevos de sardina común en función de la longitud (lon), latitud (lat), profundidad del ecosonda (E), viento (V), temperatura (T), salinidad (S), y oxígeno disuelto (O) entre los años 2002 al 2010 (**n**: número de datos, **R<sup>2</sup>**: Coeficiente de determinación, **VE**: Varianza explicada en porcentaje, **GVC**: Validación cruzada general).

**Tabla 4.4.** Resultados de los modelos GAM por zona y año (lon: longitud, lat: latitud, E: profundidad del ecosonda, V: viento, T: temperatura, S: salinidad, O: oxígeno disuelto).

**Tabla 4.5.** Rango óptimo de las variables predictoras asociados a la densidad de huevos de sardina común (variables respuesta) por zonas y años.

## PERSONAL PARTICIPANTE

---

|                                 |  |
|---------------------------------|--|
| CAROLINA EUGENIA PARADA VÉLIZ   | Jefe de Proyecto.<br><br>Participación en la evaluación de la evolución y desarrollo del proyecto. Participación como experto extranjero en discusión acerca de la inserción de compartimentos biofísicos y la incorporación de esta información en el manejo de recursos.   |
| ELIZABETH FULTON                | Desarrollo y programación de los submodelos de distribución espacial del desove, sincronización del desove, y de abundancia del desove. Generación de índices biofísicos y su interpretación. Co-dirección en el taller de inducción de modelación biofísica. Elaboración de informes.   |
| SEBASTIÁN VÁSQUEZ PASTENE       | Desarrollo y programación de los submodelos de movimiento, crecimiento y mortalidad. Generación de índices biofísicos. Procesamiento de datos oceanográficos y su relación con huevos y larvas: Aplicación de análisis estadísticos (GAMs, GLMs). Elaboración de informes.   |
| SAMUEL SOTO MENDOZA             | Identificación y caracterización de los principales forzantes (procesos físicos) de la variabilidad del ambiente de la región. Identificación de las escalas de tiempo y espacio de los principales forzantes y su asociación a la dinámica del reclutamiento de sardina común. Abocado a Objetivo 4. Elaboración de informes. |
| SAMUEL ERNESTO HORMAZÁBAL FRITZ | Procesamiento y análisis de información oceanográfica. Análisis de la distribución espacial de huevos y asociación con variables oceanográficas. Identificación de las escalas de tiempo y espacio de los principales forzantes y su asociación a la dinámica del reclutamiento de sardina común. Elaboración de informes.     |
| SERGIO NÚÑEZ ELÍAS              | Procesamiento y análisis de información para el submodelo de distribución espacial del desove utilizando SIG. Participación en desarrollo de objetivo 2.   |
| MARCELO GONZÁLEZ LUNA           | Procesamiento y análisis de datos  |
| TECNICO 1                       | Procesamiento y análisis de datos  |
| TECNICO 2                       | Procesamiento y análisis de datos  |

---

|                               |   |
|-------------------------------|---|
| ANDRÉS SEPÚLVEDA ALLENDE      | Coordinación de las actividades de modelación hidrodinámica. Supervisión y generación de corridas del modelo. Generación de variables de salida. Validación de las salidas del modelo en base a la aplicación de métodos estadísticos. Su labor se asocia al objetivo 1. Elaboración de Informes. |
| EMANUELLE DI LORENZO          | Participación como experto especialista en modelación hidrodinámica y experto en el modelo ROMS. Revisión de desempeño de la configuración y validación del modelo. Su labor se asocia al objetivo 1  |
| CRISTIAN SALAS DOMÍNGUEZ      | Participación de la generación de grillas y sub-dominios. Preparación de archivos de forzamiento, condiciones de borde e iniciales. Corridas de modelos y la generación de las variables de salidas. Su labor se asocia al objetivo 1.  |
| OSVALDO ENRIQUE ARTAL ARRIETA | Participación de la generación de grillas y sub-dominios. Preparación de archivos de forzamiento, condiciones de borde e iniciales. Corridas de modelos y la generación de las variables de salidas. Su labor se asocia al objetivo 1.  |
| TECNICO 3                     | Bases de datos (objetivo 1)   |

---

|                            |  |
|----------------------------|--|
| AQUILES SEPÚLVEDA ORÓSTICA | Coordinación general del grupo de trabajo de dinámica poblacional. Participación en la elaboración de un modelo conceptual que permita la inclusión de resultados provenientes de la modelación biofísica en el ordenamiento pesquero nacional. Elaboración de informes. |
|----------------------------|--|

|                        |  |
|------------------------|--|
| CLAUDIO GATICA MOLINA  | Dirección del taller interno de discusión para la elaboración de un modelo conceptual que permita la inclusión de resultados provenientes de la modelación biofísica en el ordenamiento pesquero. Revisión bibliográfica. Análisis de modelos de evaluación. Participación en la elaboración del modelo conceptual. Elaboración de informes. |
| MARCOS ARTEAGA VÁSQUEZ | Co-dirección del taller interno de discusión para la elaboración de un modelo conceptual que permita la inclusión de resultados provenientes de la modelación biofísica en el ordenamiento pesquero. Revisión bibliográfica. Análisis de modelos de evaluación. Participación en la elaboración del modelo conceptual.                       |
| NICOLAS ALEGRIA        | Procesamiento y análisis estadístico de información asociada a la componente del grupo de dinámica poblacional.  |

---



## RESUMEN EJECUTIVO

Se implementó un sistema de modelación biofísica para la sardina común, con el objetivo de generar estimaciones de reclutamiento independientes respecto a la pesquería, que incorporen de manera explícita el efecto de señales ambientales y su variabilidad. Este estudio comprendió la formulación de un sistema de modelación complejo que incluye el diseño y formulación de un modelo hidrodinámico, y un modelo biofísico acoplado con la especificación de submodelos biológicos realistas (por ejemplo condiciones espaciales, temporales, movimiento, transporte, dispersión), el entendimiento de las relaciones ambiente-recurso, y la elaboración de un modelo conceptual que permita implementar índices de reclutamiento biofísico para ser incorporados en la administración de los recursos. La implementación de este sistema de modelación, validación y generación de índices de reclutamiento independientes requirió la utilización de datos oceanográficos, satelitales, de los cruceros de la evaluación de biomasa desovantes, y de reclutamiento (RECLAS). Se formuló y configuró un modelo hidrodinámico para la región con dos configuraciones una sin ríos y otra con ríos las cuales incorporaron una grilla Madre de resolución de 4 km y dos dominios anidados hijos que con alta resolución (1.2 km) representan las zonas de desove de la sardina común. Se realizó una validación del modelo hidrodinámico basado en dos métodos uno basado en data hidrográfica para los meses de Julio y Agosto y otro método basado en el análisis de información satelital para 12 años. Los resultados de la validación indicaron que el modelo resuelve apropiadamente la dinámica vertical, que existe algún grado de disimilitud horizontal dado particularmente por la influencia de los ríos. Por otro lado, los resultados de la validación utilizando datos satelitales indican que las señales de TSM mostraron un mayor ajuste en el dominio tiempo/frecuencia. La implementación del modelo biofísico incluyó el acoplamiento del modelo hidrodinámico, el desarrollo de un modelo conceptual y el desarrollo de los submodelos biológicos. Se identificaron piezas de información relevantes provenientes de los cruceros acústicos y de los modelos de evaluación indirecta tanto temporal como espacialmente para realizar las comparaciones con los índices de pre-reclutamiento que se generaron con el modelo biofísico. El estudio de las relaciones ambiente-recurso incluyó el análisis de gran volumen de información satelital. La data satelital utilizada correspondió a una resolución mayor (2 km) a la que se había propuesto originalmente (4 km). Se realizaron análisis de la variabilidad de la clorofila, TSM, viento en la zona costera y oceánica, y donde se estudia la contribución de esta variabilidad en términos de las frecuencias fraccionadas. En relación a la elaboración de un modelo conceptual que permita incorporar las variables biofísicas, se avanzó tanto en la revisión de literatura en torno a este tema como a la recopilación de información, talleres de discusión y el esbozo de un modelo conceptual. El presente estudio cumplió con todos los objetivos planteados en la propuesta. Se desarrolló un modelo validado para la región centro-Sur de Chile, se acopló a un modelo biofísico de la sardina común. Se generaron índices de reclutamiento espacial y temporal de pre-reclutamiento los que se contrastaron con piezas de información provenientes de las capturas y la evaluación indirecta de la sardina común. Se generó un modelo conceptual que incorpora información acerca de zonas de retención, transporte diferencial hacia zonas sur y norte, identificación de patrones de dispersión fuera de la costa (pérdida de productos reproductivos), así como también se identificó el “atrapamiento” de partículas en remolinos y filamentos muy cercanos a la costa. Se elaboraron dos modelos conceptuales. Un modelo conceptual de la historia temprana de transporte de sardina común, así como un modelo operacional donde se integre la información biofísica en pro de mejorar las estimaciones de reclutamiento con la incorporación de proxies ambientales. Además, se discriminaron forzantes físicos a diferentes escalas y se establecieron relaciones ambiente recurso que potencialmente podrían ser útiles para inicializar los modelos biofísicos para condiciones donde se carece de información realista. Se cubrieron todos los objetivos del proyecto y cada capítulo corresponde a los productos que se generaron del desarrollo de éstos. Además se realizaron 5 talleres de difusión final, interacción con especialistas en modelación hidrodinámica (Dr. Emanuelle Di Lorenzo), talleres de inducción de la

temática biofísica hacia la subsecretaría de pesca, taller de discusión para la elaboración de un modelo operacional, y finalmente un taller de modelación ecosistémica (Dr. Elizabeth Fulton).

## ANTECEDENTES

Las especies pelágicas sardina común (*Strangomera bentincki*) y anchoveta (*Engraulis ringens*), en la actualidad son los recursos pesqueros con mayor desembarque en Chile, con una cuota anual de captura de 1.050.000 toneladas, de las cuales un 70% corresponde a la flota artesanal de cerco que opera principalmente en la Octava Región (Decreto Exc. 392 del 18 de Abril de 2012). Ambas especies se caracterizan por presentar un ciclo de vida corto, con tres a cuatro años de longevidad ([Cubillos et al., 2001](#)), rápido crecimiento ([Cubillos & Arancibia, 1993](#); [Cubillos et al., 2001](#); [Castillo-Jordán et al., 2010](#)), una tasa elevada de mortalidad natural ([Cubillos, 1999](#)) y por estar marcadamente influenciadas por factores ambientales en todas las etapas de su ciclo vital ([Yáñez et al., 1990, 1992](#); [Cubillos & Arcos, 2002](#); [Arcos et al., 2004](#); [Gómez, 2008](#); [Cubillos, 1999](#); [Castillo-Jordán et al., 2010](#)). Además, estas especies forman cardúmenes relativamente densos con un ciclo diario marcado caracterizado por una alto nivel de agregación durante el día y dispersión en la noche con agregaciones superficiales menos densas ([Castillo et al., 2001](#)). Estos recursos evidencian una distribución espacial muy costera, tanto al analizar la expresión espacial del desove (huevos y larvas, [Cubillos et al., 2007, 2010, 2011](#)) como en la distribución de juveniles/adultos ([Castillo et al., 2008, 2010](#)). Esta distribución no supera las 20 mn en el caso de huevos y las 20-30 mn en el caso de juveniles y adultos, mostrando en éstos últimos mayores abundancias en las primeras 5-10 mn asociadas con focos de surgencia y con la desembocadura de ríos ([Cubillos et al., 1994](#)). Sardina común y anchoveta son consideradas desovantes parciales durante todo el año, con una mayor actividad reproductiva entre julio y agosto, extendiéndose hasta enero en el caso de la anchoveta ([Castro et al. 1996](#); [Cubillos et al., 1999](#); [Castillo-Jordán et al., 2007](#); [Cubillos et al., 2007](#)). El reclutamiento se presenta en forma masiva entre octubre hasta marzo, registrándose también pulsos de reclutamiento menores durante el otoño-invierno en anchoveta, provocados probablemente por el desove secundario de verano ([Castillo et al., 2010](#)).

En la región centro-sur, la pesquería de sardina se desarrolla estacionalmente en los meses de marzo y abril, especialmente por la flota artesanal de cerco en la Octava Región, mientras que durante los meses de Septiembre-Noviembre el mayor esfuerzo está dado por la flota industrial en la macrozona desde la V y la X regiones. Las capturas de sardina común son variables y altamente dependientes de los pulsos de reclutamiento anual ([Cubillos, 1999](#)), el cual ocurre entre noviembre y enero de cada año y está caracterizado por peces de cuatro a cinco meses de edad y longitud modal centrada entre los 6 y 7 cm de longitud total ([Cubillos et al., 1998, 2001](#)). La administración pesquera ha establecido como objetivo el asegurar la viabilidad de nuevos contingentes de adultos jóvenes al stock mediante vedas en el período de reclutamiento principal, las cuales operan entre los primeros días de diciembre y la primera semana de marzo ([Castillo et al., 2010](#)). La determinación del reclutamiento de sardina común en la región centro-sur de Chile se ha realizado desde 1999 mediante métodos hidroacústicos ([Castillo et al., 2010](#)), en tanto que la evaluación de la biomasa desovante se ha llevado a cabo desde el año 2002 por medio de la aplicación del método de producción diaria de huevos ([Cubillos et al., 2003](#); [Claramunt et al., 2003](#)), que incorpora la dinámica reproductiva y la producción de huevos. A través de este tipo de proyectos se ha obtenido información valiosa acerca de la distribución espacial de diferentes estadios de desarrollo de sardina común para la región centro-sur de Chile, así como la cuantificación de la abundancia, y la caracterización espacial del desove y del reclutamiento ([Castro et al., 1997](#); [Castillo et al., 2010](#)).

[Castillo et al. \(2010\)](#) a partir de las prospecciones acústicas realizadas entre 2000-2010 en la época del reclutamiento, evidencian una homogeneidad en la estructura espacial de las tallas de la sardina común en la región centro-sur, sugiriendo que la zona de reclutamiento y crecimiento se presenta entre las VI y IX Regiones, mientras que el desove y alimentación de adultos se presenta preferentemente en las regiones XIV y X. Esto parece ser consistente con el campo horizontal del desove estudiado al término del período invernal (julio-agosto, [Castro et al. 1997](#), [Cubillos et al., 2010](#)).

### **Variabilidad ambiental y sardina común en la región centro-sur de Chile.**

Una pregunta clave es ¿cómo la variabilidad ambiental y factores biofísicos determinan en alguna medida la variabilidad del reclutamiento? Numerosos estudios han abordado esta temática con una variedad de aproximaciones, las cuales han permitido explorar la variabilidad del reclutamiento de sardina común. El resultado de las aproximaciones asociadas a entender las fluctuaciones ambiente-recurso en esta región, ha sugerido un acoplamiento del período de desove de sardina común con la alternancia entre convergencias/divergencias que ocurren al término del invierno/inicio de primavera en la región centro-sur de Chile, donde el enriquecimiento primaveral permite a juveniles de sardina común crecer a altas tasas, acumulando reservas energéticas, las que podrían ser canalizadas hacia la reproducción ([Cubillos, 1999](#)). Por otra parte, una buena asociación entre el reclutamiento de sardina común y teleconexiones accionadas durante El Niño, las cuales generan una modulación interanual y decadal en el inicio de la estación de surgencia ([Montecinos & Gómez, 2008](#)), sugiriendo un impacto del retraso de la estación de surgencia sobre el éxito reproductivo de esta especie, afectando negativamente el reclutamiento ([Gómez, 2008](#)), debido a la reducción en la disponibilidad de alimento a prerreclutas, disminuyendo su sobrevivencia. En dicho estudio se hipotetiza que las fluctuaciones decadales en la abundancia de sardina-común podrían estar vinculadas con fluctuaciones decadales en la fecha de inicio de dicha estación de surgencias. Por otro lado, en la época de reclutamiento se observa una intensificación de la distribución de sardina común hacia la costa en el período otoñal basado en la aplicación de GAMs en el análisis de asociación de variables oceanográficas ([Castillo et al., 2010](#)). Además, comparativamente salinidades más bajas hacen suponer una asociación espacial con aportes de los ríos más importantes de la región, especialmente el complejo Itata-Bío Bío, río Imperial y Valdivia-Tornagaleones (estuario de Corral). Por otra parte, [Gómez \(2008\)](#) muestran buenas correlaciones entre el log del reclutamiento de sardina común con la concentración de Clorofila a ( $R^2= 0,96$ ) y el transporte zonal de Ekman  $R^2= 0,62$ ).

### **Modelación biofísica e índices de reclutamiento**

Si bien se han establecido esfuerzos por entender las fluctuaciones de variables climático-oceanográficas y biológicas que impactan en el reclutamiento de pelágicos pequeños como sardina común en la región centro-sur de Chile, la mayoría de estos estudios no han abordado de manera consistente las escalas en que las posibles variables operan, así como tampoco de que manera afectan a la historia de vida de estas poblaciones. Así mismo, estos estudios no han permitido generar un esquema de estudio que incorpore la variabilidad ambiental explícitamente en las estimaciones de reclutamiento.

Recientemente dos estudios basados en modelación biofísica han contribuido a entender patrones de transporte y distribución de estadios tempranos de anchoveta en la zona centro-sur de Chile a través de la incorporación explícita de la variabilidad ambiental en el esquema de modelación ([Parada et al., 2012](#); [Soto-Mendoza et al., 2012](#)). En ambas contribuciones se utilizó un modelo hidrodinámico acoplado a un modelo biológico para entender la conectividad entre zonas de desove y crianza/pre-

reclutamiento, información que puede ser utilizada para explorar medidas de manejo que apoyen de manera eficiente a la administración de estos recursos en Chile, así como también abren la posibilidad de nuevas hipótesis para explicar la relevancia de zonas de crianza asociadas con la región sur de Chile y sus implicaciones para el reclutamiento.

Administrativamente, estas pesquerías se encuentran sometidas al Régimen de Plena Explotación a partir de agosto del 2000 y a la medida denominada límite máximo de captura por armador y desde febrero del 2001 a cuotas de captura. Estas medidas administrativas se deben sustentar en información confiable para la determinación del tamaño y de las fuentes de variación del stock explotable de sardina común.

El presente proyecto pretende implementar un sistema de modelación biofísica para la sardina común, de manera de poder generar estimaciones de reclutamiento independientes de la pesquería que incorporen de manera explícita el efecto de señales ambientales y su variabilidad. A continuación se describe el avance en el proyecto por objetivo.

## **OBJETIVO GENERAL Y ESPECÍFICOS**

El objetivo general del proyecto es la implementación de un modelo biofísico espacialmente explícito que permita obtener índices de reclutamiento a través de retrocálculo y proyección actual, para sardina común de la zona centro-sur de Chile. Se aborda la problemática con un enfoque multidisciplinario que incluye la modelación hidrodinámica, biofísica y de dinámica poblacional, la oceanografía física y pesquera, ecología larval, evaluación de stock, estadística, análisis espacial basado en sistema de información geográfica, lo que permite abordar la problemática de forma integral en términos de generación de indicadores de reclutamiento independientes de sardina común en la región centro-sur de Chile.

Los objetivos específicos a desarrollar son los siguientes:

1. Desarrollar e implementar un sistema de modelación biofísica para la población de sardina común, que acople modelos biológicos y un modelo hidrodinámico validado para la región centro-sur de Chile.
2. Modelar el proceso de transporte de estadios tempranos de sardina común y su efecto sobre la variabilidad del reclutamiento, identificando regiones fuente y sumidero de juveniles y reclutas de sardina común en la zona centro-sur de Chile
3. Obtener índices de reclutamiento de sardina común, independientes de la estimación acústica estival, para la región centro-sur de Chile.
4. Identificar las principales forzantes del ambiente que modulan el proceso de transporte de huevos y larvas de sardina común y que determinan la variabilidad del reclutamiento.

Este informe se ha dividido en 7 capítulos. El capítulo 1 describe la implementación de un modelo hidrodinámico para la región centro-sur de Chile, la validación de este utilizando información proveniente de cruceros y de información satelital. El capítulo 2 describe la implementación de un modelo basado en el individuo para sardina-común y la generación de un “proxy” de reclutamiento basado en indicadores biofísicos. El capítulo 3 aborda la generación de índices de reclutamiento

basado en otras piezas de información como de la evaluación de stock, las estimaciones acústicas y las capturas. El capítulo 4 describe los forzantes ambientales relevantes t la relación ambiente-recurso. En el capítulo 5 se detalla la elaboración de un modelo conceptual para el uso de variables biofísicas en el asesoramiento. En el capítulo 6 se detallan los talleres realizados en el marco de este proyecto. En el capítulo 7 se detallan las recomendaciones del estudio.

## **CAPITULO 1. IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE MODELACION BIOFISICA PARA LA SARDINA COMUN**

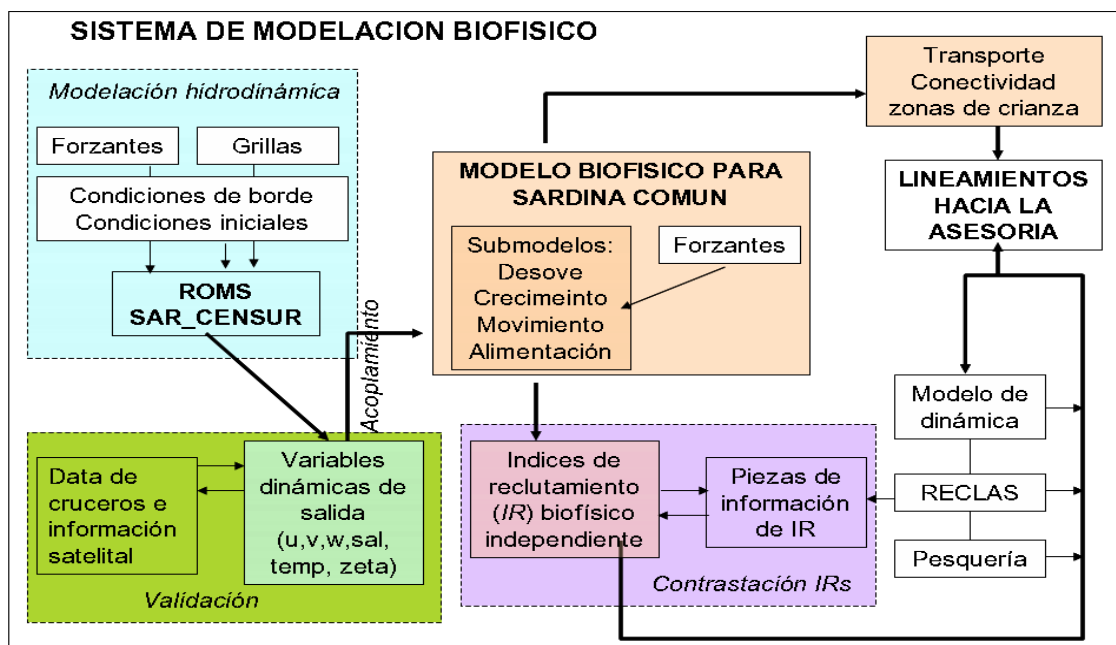
### **1.1. INTRODUCCION**

El desarrollo e implementación de un sistema de modelación biofísica, metodológicamente, comprende el acoplamiento de un modelo hidrodinámico de la región de interés y un modelo biológico que represente la historia de vida de la sardina común en la zona centro-sur de Chile. A partir de este sistema biofísico se generan índices de reclutamiento, los que deben ser contrastados con piezas de información relevantes, lo que permitirá en conjunto con un modelo de dinámica generar lineamientos hacia la administración. La implementación general de este estudio se basa en un enfoque multidisciplinario comprendido por: modelación hidrodinámica y biofísica, relaciones ambiente-recurso, y dinámica poblacional. Este trabajo está apoyado por expertos internacionales de vasta experiencia, los que contribuyeron de manera significativa en diferentes etapas de la investigación para el logro de los objetivos.

### **1.2. METODOLOGIA (OBJETIVO 4.1)**

#### ***1.2.1. Desarrollar e implementar un sistema de modelación biofísica para la población de sardina común, que acople modelos biológicos y un modelo hidrodinámico validado para la región centro-sur de Chile***

El sistema de modelación biofísica requiere la conformación de distintos módulos que serán acoplados para hacer emerger patrones y rasgos de la población de sardina común. En un esquema generalizado, los módulos son: a) implementación de un modelo hidrodinámico, b) validación del modelo hidrodinámico, c) estimación de sub-modelos biológicos para la población de sardina común, d) implementación de un sistema de simulación biofísica, e) post-análisis de la información, evaluación del transporte y generación de índices de reclutamiento, f) análisis comparativo respecto a otras piezas de información del reclutamiento y g) discusión y elaboración de un modelo conceptual para la población de sardina común que apoye los lineamientos del manejo pesquero. La Figura 1.1 describe el esquema de modelación biofísica, cada uno de sus componentes esenciales y como interactúan para hacer emerger patrones espacio-temporales de la población de sardina común. En este capítulo se abordará principalmente los ítems 1 y 2.



**Figura 1.1.** Sistema de modelación biofísica de sardina común. Se trata de un modelo hidrodinámico y uno biofísico acoplados y validados.

### 1.2.2. Modelo hidrodinámico

En este estudio se implementó el modelo hidrodinámico ROMS versión Agrif (Regional Ocean Modelling System, <http://www.romsagrif.org/>). Este es un modelo de última generación utilizado ampliamente por la comunidad científica del área de modelación hidrodinámica (Shchepetkin & McWilliams, 2005; Penven *et al.*, 2006). Este modelo resuelve las ecuaciones de movimiento primitivas del océano, hidrostática y de superficie libre. Nuestra aplicación utiliza, además, 32 coordenadas verticales sigma que siguen la topografía de la región de estudio y con 466 x 333 coordenadas curvilíneas horizontales. Incluye, además, esquemas de advección y mezcla vertical, en particular un modelo basado en la frecuencia de Brunt-Vaisala (BVF) y el modelo LMD (Large *et al.*, 1994), precisos algoritmos de gradiente de presión, capas de borde atmosféricas, oceánicas y de fondo oceánico, condiciones de borde radiativas (Marchesiello *et al.*, 2001), potencialidad para la construcción de grillas con subdominios anidados (soluciones de mayor resolución para área como la costa) entre otros. Las herramientas utilizadas en el establecimiento y configuración del modelo hidrodinámico se listan a continuación en la Tabla 1.1.

**Tabla 1.1.** Herramientas utilizadas en el establecimiento y configuración del modelo hidrodinámico.

| Nombre de la herramienta | Función   | Website   | Referencia  |
|--------------------------|---|---|---|
| ROMS AGRIF               | Modelación hidrodinámica  | <a href="http://www.romsagrif.org/">http://www.romsagrif.org/</a>                     | Penven <i>et al.</i> , 2006; Shchepetkin & McWilliams, 2005   |
| GNU Octave               | Lenguaje de alto nivel y ambiente interactivo para realizar computación numérica, visualización y programación. | <a href="http://www.gnu.org/software/octave/">http://www.gnu.org/software/octave/</a> | GNU Octave. A high-level interactive language for numerical computations Edition 3 for Octave version 3.6.1 |
| NCO utilities            | The netCDF Operators  | <a href="http://nco.sourceforge.net/">http://nco.sourceforge.net/</a>                 | Zender, 2012 (documentación)  |

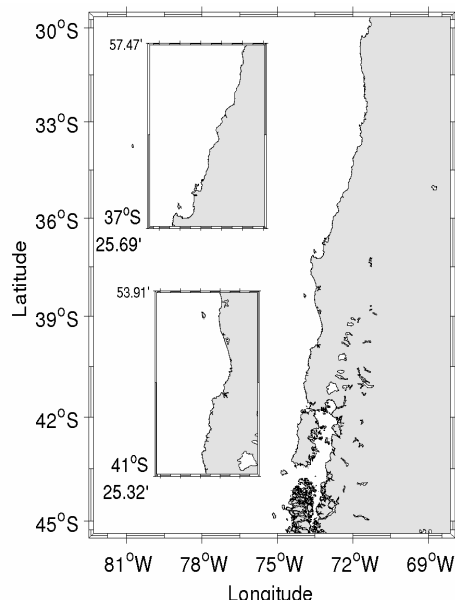
A continuación se detallan las configuraciones del modelo ROMS de baja resolución denominada “SARCO\_CENSUR” (configuración Sardina Común Centro sur) y dos configuraciones anidadas de alta resolución. A continuación se definirán la configuración ROMS, configuración simulaciones, grillas y dominios del estudio, resolución de grillas, período de simulación y forzantes, variables modeladas, requerimientos computacionales y procesos de validación.

### 1.2.2.1. Configuración ROMS

La configuración de ROMS que se generó en este estudio fue especialmente diseñada para el caso específico de sardina común para la región centro-sur de Chile, de tal manera de poder responder específicamente a los requerimientos asociados a la obtención de índices de reclutamientos. Ello implica que los requerimientos de modelación deben estar orientados a resolver salidas del modelo asociado a la costa en alta resolución. Debido a que la resolución del orden de 1 km es costosa computacionalmente, la solución frecuente es desarrollar un modelo de menor resolución y mayor dominio espacial (dominio “Padre”) y usarlo como condición de borde para otras configuraciones de alta resolución (dominios “Hijos” anidados), que resuelvan estructuras oceanográficas asociadas a la costa que influirán en el transporte y desarrollo de estados tempranos y juveniles de sardina común en la zona centro-sur de Chile.

### 1.2.2.2. Configuración de simulaciones

La primera aproximación propuesta consistió en realizar una simulación continua para todo el periodo analizado, sin embargo por limitaciones computacionales y de tiempo en la obtención de la data para los archivos de entrada, y con el fin de obtener los resultados dentro de los tiempos establecidos en el proyecto, se dividió el trabajo en 2 experimentos. El primero consiste en una simulación anidada (AGRIF) de 1 dominio padre y 2 dominios hijos sin descargas puntuales de agua dulce mediante ríos. El segundo consistió en simular el dominio padre con ríos y usar estas salidas como borde para los 2 hijos de forma separada (RIOS), es decir 3 simulaciones con descarga de agua dulce.



**Figura 1.2.** Área de estudio y distintos dominios del modelo hidrodinámico. El dominio “Padre” y los 2 hijos, poseen una resolución espacial horizontal de ~4 y ~1.3 km, respectivamente.

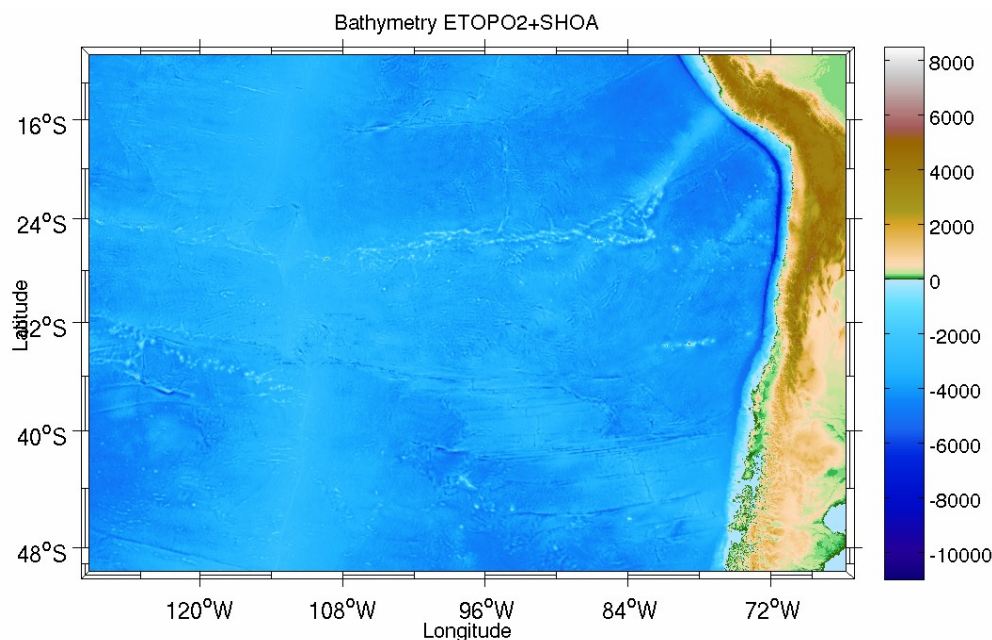


### 1.2.2.3. Grillas-dominios y resolución de las grillas

El área de modelación hidrodinámica consistió en un área que comprende desde los 30 a 45°S y desde los 68 a 82°W, con una resolución de ~4 km para el dominio “Padre”. Los dominios “Hijos” corresponden a dos subregiones con una resolución 3 veces mayor (~1.3 km) en donde recurrentemente se han encontrado huevos y larvas de sardina común en las campañas oceanográficas asociadas históricamente a los cruceros que se encargan de establecer la biomasa desovante del recurso (MPDH, FIP). Estos dominios comprenden el área de 34.5 – 37.5°S (costa – 74°W), y entre los 37.5 – 41.5°S (costa a 74.5°W), para los dominios hijos 1 y 2, respectivamente (Figura 1.2).

### 1.2.2.4. Período de simulación y forzantes

Ambos experimentos, las simulaciones AGRIF y RIOS, responden a una simulación multidecadal que comprende el período entre el año 1993 y marzo del 2012. Los forzantes del modelo son tomados desde re-análisis NCEP/NCAR con una frecuencia de 6 horas y las condiciones de borde se basan en ECCO, el cual combina un modelo general de circulación (GCM) y observaciones. La batimetría es obtenida de una combinación entre la base de datos ETOPO2 y sondajes realizados por el servicio hidrológico y oceanográfico de la armada de Chile (SHOA). ETOPO2 tiene una resolución espacial horizontal de 2 minutos de arco y es derivada de sondeos y observaciones gravitacionales satelitales (Figura 1.3). Para el caso específico de la simulación RIOS, se incluyeron la descarga mensual promedio de los ríos: Bío-bío, Bueno, Cautín, Itata, Mataquito, Maule, Maullin y Valdivia. Esta información fue obtenida de la dirección general de aguas de Chile (DGA). Las brechas existentes fueron rellanadas usando interpolación lineal y extrapolando con polinomios en los casos necesarios (Figura 1.4).



**Figura 1.3.** Batimetría utilizada para las simulaciones en ROMS: es una combinación de ETOPO2 y sondajes realizados por el servicio hidrológico y oceanográfico de la armada de Chile.

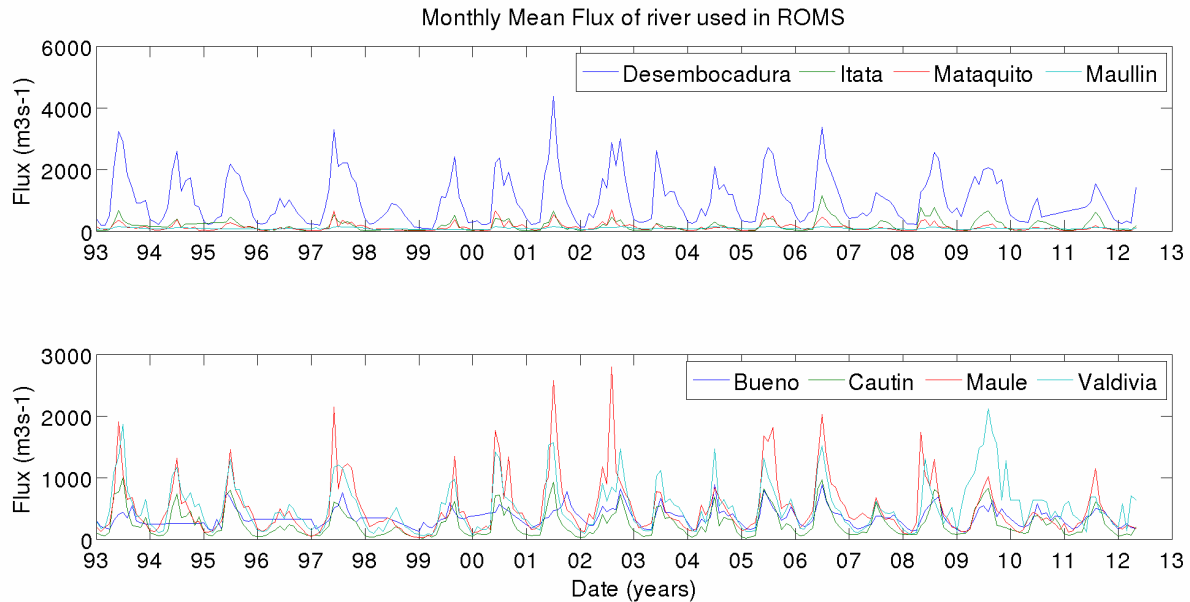
#### 1.2.2.5. *Variables modeladas y resolución temporal de salidas del modelo*

Las variables modeladas serán componentes de velocidad (u, v, w), temperatura, salinidad y elevación del nivel del mar. La resolución temporal de ROMS está asociada a segundos, sin embargo, existe un costo computacional alto en el almacenamiento de la información. De tal manera, que las salidas del modelo serán almacenadas diariamente para el dominio padre, y cada 6 horas para los dominios hijos.

#### 1.2.2.6. *Requerimientos computacionales y aspectos técnicos de la simulación*

Los requerimientos computacionales para correr el modelo hidrodinámico son muy altos. Se utilizó un nodo de cálculo para simular un mes de prueba con una configuración de prueba haciendo uso de las capacidades computacionales del Departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción, (DGEO) a través del Dr. Andrés Sepúlveda, el que cuenta con un cluster con sistema operativo Red Hat Enterprise Linux Server release 5.6. La configuración de prueba consistió en un paso temporal de 500 (s), 32 niveles verticales o capas sigma con un  $\theta_s = 6$  y un  $\theta_b = 0$ . El modelo fue corrido en modo paralelo, bajo un entorno openMP con 8 hilos. El tiempo de simulación fue alrededor de 3 horas y el tamaño de la salida fue de 2.8 GB, correspondiente a un mes de simulación con frecuencia temporal diaria. Debido a que se simulan dos configuraciones (con y sin ríos) con sus respectivas grillas anidadas los requerimientos computacionales aumentaron de manera considerable, cada mes aumento a 2 días de simulación y 10 GB de almacenamiento en las salidas.

Si bien inicialmente se trabajó con el equipo computacional disponible en el DGEO, que consiste en un cluster con 6 nodos de cálculo, un nodo maestro, y 3 nodos auxiliares de menor capacidad, equipamiento computacional valorado en alrededor de \$18M, la demora en los tiempos de cálculo debido a aspectos inherentes a la modelación, como es el ajuste de las configuraciones, inestabilidades numéricas y ocasionales cortes de luz implico que se buscaran mas nodos de calculo en distintos lugares. Finalmente, se trabajó con una capacidad computacional de casi 7 veces más a lo estimado inicialmente. Esta consistió de 2 nodos de cálculo facilitados por el Centro de Estudios Avanzados en Zonas Aridas (CEAZA, Coquimbo), 4 nodos de calculo facilitados por el laboratorio ALGES, de la Universidad de Chile (CB), y 48 nodos de cálculo facilitados por el Centro de Modelamiento Matemático (CMM) de la Universidad de Chile. El masivo uso de estos recursos computacionales es una muestra de la complejidad de la simulación propuesta.



**Figura 1.4.** Flujos de descarga medias mensuales usados en ROMS entre los años 1993 y 2012. (Panel superior: la Desembocadura del Bio Bio, río Itata, Mataquito y Maullin, Panel inferior: los ríos Bueno, Cautín, Maule y Valdivia) (fuente de información: Dirección General de Aguas de Chile).

### 1.2.3. Validación de modelo hidrodinámico

Un punto relevante en el sistema de modelación biofísica es la validación del modelo hidrodinámico que debe rescatar los principales rasgos espaciales y temporales del sistema en donde habita la población de sardina común. Para contrastar el modelo ROMS presentado anteriormente, se utilizarán dos fuentes de información: primero, se analizarán las salidas del modelo respecto a información hidrográfica proveniente de los proyectos RECLAS y Evaluación acústica de merluza común del Fondo de Investigación Pesquera (FIP, meses de Enero y Agosto respectivamente); segundo, se compararán las condiciones de salida del modelo hidrodinámico y las condiciones observadas a través de sensoramiento remoto (información satelital). Cada uno de los sistemas de validación se desarrolla a continuación.

#### 1.2.3.1. Validación basada en información hidrográfica

Se validarán las salidas del modelo utilizando herramientas de estadística descriptiva y análisis de series de tiempo. Se utilizaron condiciones oceanográficas obtenidas en el marco de los proyectos FIP entre los años 1999-2011. Se seleccionaron los datos FIP, por su extensión geográfica y temporal como representativos de las condiciones de temperatura y salinidad mensuales en regiones distintas a lo largo de la costa en el área distribución de la sardina común. La primera aproximación metodológica consistió en realizar una simple estimación de residuos entre las salidas del modelo y la data disponible. Para esto, los datos de superficie de temperatura (T) y salinidad (S) para cada campaña fueron comparados con los puntos de grilla del modelo ROMS más cercanos, considerando tanto la posición del perfil hidrográfico como la fecha en que fue realizado. Posteriormente se calculó la diferencia entre estas dos series de tiempo (residuos). Los resultados se analizaron en forma de histogramas dejando fija latitud, longitud, profundidad y tiempo. Como control de calidad usaremos los rangos de error de Mercator (<http://www.mercator-ocean.fr>).

El segundo enfoque aplicado para validar las simulaciones usando la información hidrográfica consistió en graficar los perfiles verticales de temperatura y salinidad, y compararlos con los perfiles verticales obtenidos del dominio madre simulado, así como el diagrama T-S de esos perfiles. En los diagramas T-S de los cruceros antes mencionados, se identifica en rangos de color la profundidad a la cual fue registrado cada valor y en contorno negro se destacan las isolíneas de anomalías de densidad con el objetivo de identificar masas de agua características como el agua ecuatorial subsuperficial (AESS), intermedia antártica (AIA) y el agua subantártica (ASAA).

### 1.2.3.2. Validación basada en información satelital

Consistió en la implementación de un sistema de validación basado en la comparación entre las condiciones de salida del modelo hidrodinámico y las condiciones observadas a través de sensoramiento remoto (información satelital). Para este fin, se utilizaron tres aproximaciones metodológicas: a) Análisis comparativo de la señal estacional de modelo y observación; b) el uso de Funciones Ortogonales Empíricas (EOF) para cuantificar el desempeño del modelo en reproducir la variabilidad del océano en el tiempo y espacio, y c) análisis comparativo en el dominio de la frecuencia. Como variable a analizar se utilizó la Temperatura Superficial del Mar (TSM). Para contrastar el modelo, la información observada provino del programa de información Satelital Modis Aqua Level 3, con resolución espacial de 4 x 4 km. La resolución temporal de modelo y observación fue mensual. Los análisis consideraron el dominio espacial situado entre 30° y 40°S y entre la costa y 79°W y temporal entre julio de 2002 y marzo de 2012.

La primera aproximación se realizó a través de un análisis climatológico trimestral en año calendario para las salidas del modelo ROMS y para la información satelital con el objeto de analizar que las señales estacionales estuvieran bien representadas en el modelo. Para la aproximación basada en EOF, las salidas del modelo  $M$  y las observadas por satélite  $O$ , fueron organizadas en matrices espacio-tiempo para las matrices modeladas  $M$  ( $m \times n$ ) y observadas  $O$  ( $m \times n$ ), donde  $n$  es la longitud de la serie de tiempo en cada una de las  $m$  localidades. La media y desviación estándar fueron removidas de las matrices espacio-tiempo. Las matrices fueron descompuestas en un número limitado de funciones ortogonales ( $nfoes$ ) a través de:

$$(M * M') * Em = Em * Am \quad (1)$$

$$Am = Em' * M \quad (2)$$

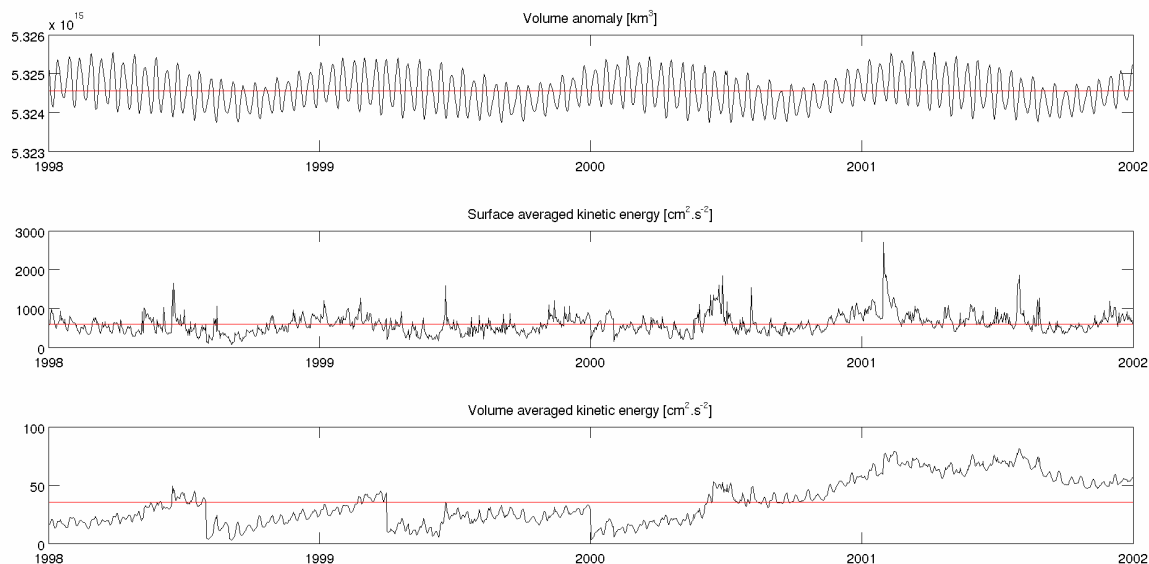
Donde  $Em$  son las matrices de vectores propios o funciones ortogonales de la información modelada.  $Am$  son los valores propios y  $Am$  son los componentes principales de las variables modeladas, \* denota un producto matricial y es la matriz transpuesta. El mismo procedimiento fue aplicado para las variables satelitales.

Se utilizó el método multitaper de descomposición del valor singular (MTMSVD) para el análisis del dominio de la frecuencia, el que consistió en un número independiente de estimaciones espectrales de las series de datos obtenidos usando filtros. Las señales (data o modelo) analizadas son descompuestas en frecuencias. Para cada frecuencia se construye una matriz  $F$  con  $k$  estimaciones espectrales, y luego un SVD complejo es aplicado en esas  $F$  matrices. Un espectro de poder de la variabilidad fraccional local (LFV) se obtiene de los valores singulares normalizados desde el primer modo. El índice de desempeño en el dominio de la frecuencia se estimó la correlación entre LFV del modelo (LFVm) y las observaciones del satélite (LFVo).

### 1.3. RESULTADOS

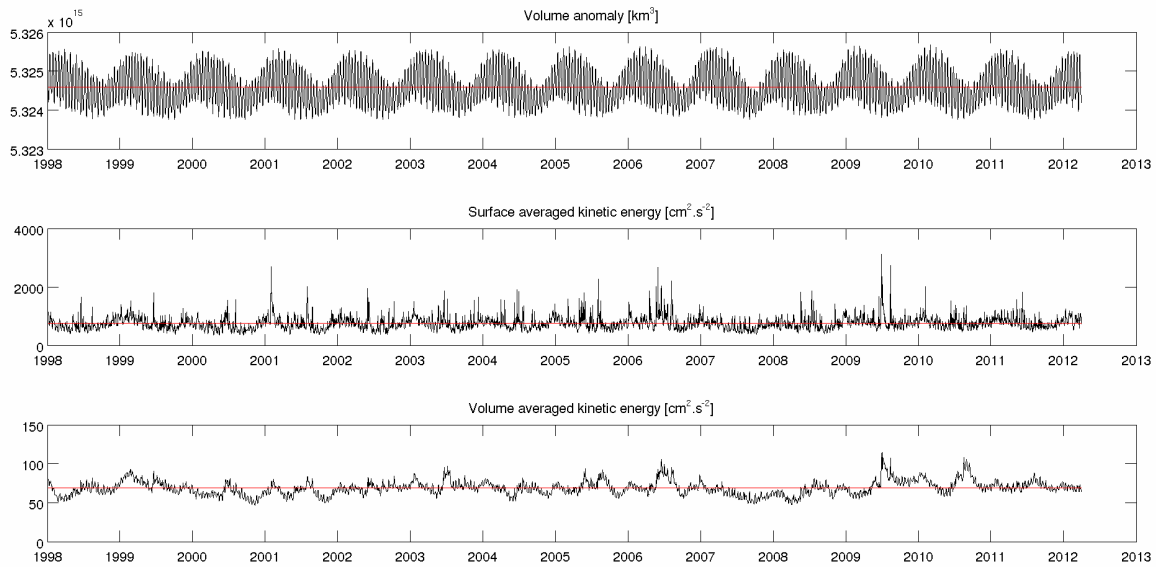
#### 1.3.1. Descripción de las salidas del modelo hidrodinámico (1993-actualidad) de la región comprendida entre los 30°-41°S con alta resolución costera, y con dos subdominios anidados

Los resultados serán referentes a las simulaciones del caso con ríos, pues esta es una simulación continua, calculada en una sola maquina de calculo inicializada en enero de 1993, a diferencia de la simulación sin ríos que fue inicializada en 15 partes diferentes y ocupando 5 maquinas diferentes, cada una de diferentes arquitecturas. A su vez, estas simulaciones poseen la información de descargas puntuales de agua dulce mediante ríos, lo que es fundamental en estas zonas, pues se requiere una buena representación de la pycnoclina, termoclina y haloclina en la zona de estudio. El principal problema de la configuración sin ríos es que no se logra un modelo numéricamente estable, que conserve la energía del sistema (Figura 1.5).



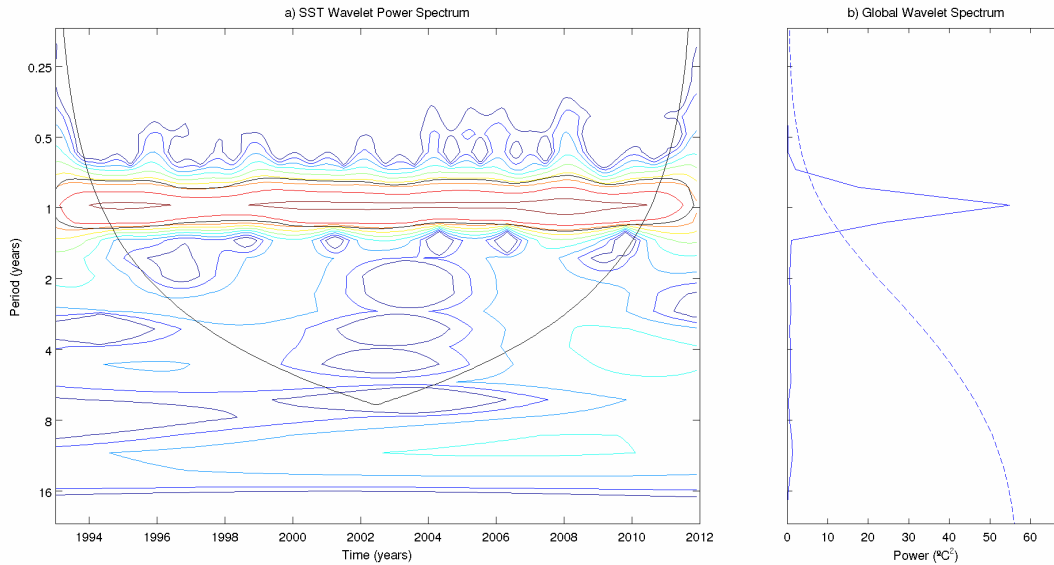
**Figura 1.5.** Diagnostico de conservación de volumen y energía entre el período de simulación de enero 1998 y diciembre 2001 para el dominio sin ríos. Arriba, anomalía de volumen en  $\text{km}^3$ . Al centro energía cinética superficial promedio en  $\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-2}$ . Abajo, energía cinética de volumen promedio en  $\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-2}$ .

El primer diagnostico realizado a las salidas del modelo hidrodinámico tiene que ver con algo fundamental en oceanografía física, (y en física en general) como es la conservación de masa, volumen y energía. Para esto estudiamos la anomalía de volumen y la energía cinética superficial promedio y volumen promedio para las salidas del modelo entre enero de 1998 y marzo del 2012 (Figura 1.6). El valor promedio de anomalía de volumen fue de  $5.3246\text{e}+15 \text{ km}^3$  y se puede apreciar que las oscilaciones de anomalía se mantienen regulares con un claro ciclo anual bien definido. La energía cinética superficial promedio y volumen promedio tienen un valor medio de  $753.2$  y  $68.9 \text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-2}$ , respectivamente. En ambas podemos apreciar un ciclo anual, pero que en la superficial promedio podemos observar que la serie se mantiene generalmente oscilando entre  $500$  y  $1000 \text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-2}$ , pero con 4 peaks significativos mayores a  $2000 \text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-2}$ , a principio del año 2001 y a mediados de los años 2006 y 2009. Esto demuestra que el modelo superó el período de spin-up y que se encuentra estable para las distintas aproximaciones de validación.

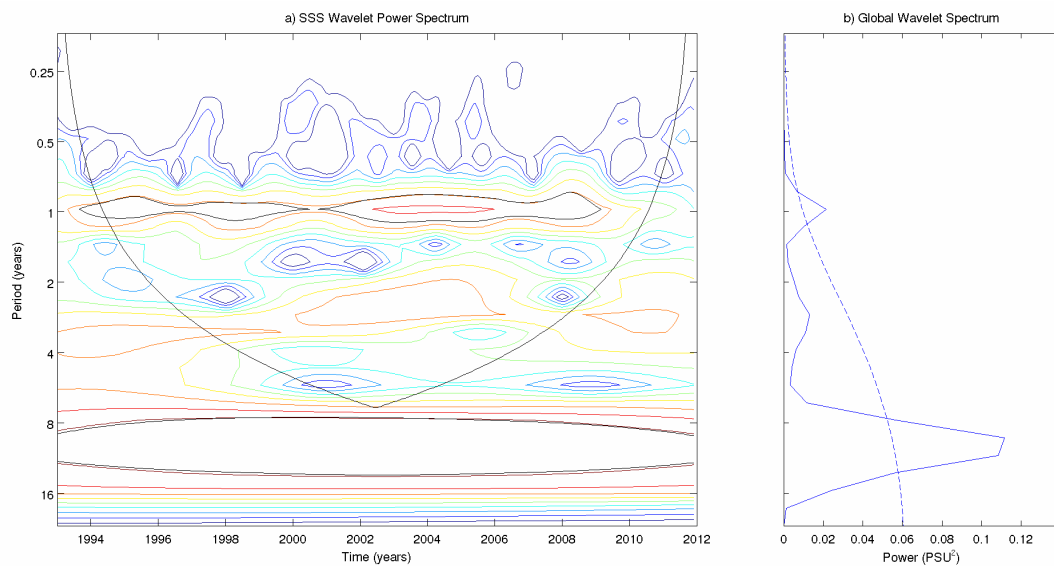


**Figura 1.6.** Diagnostico de conservación de volumen y energía entre el período de simulación de enero 1998 y marzo 2012 para el dominio con ríos. Arriba, anomalía de volumen en  $\text{km}^3$ . Al centro energía cinética superficial promedio en  $\text{cm}^2\text{s}^{-2}$ . Abajo, energía cinética de volumen promedio en  $\text{cm}^2\text{s}^{-2}$ .

Se realizó un análisis Wavelet para la temperatura y salinidad superficial del mar (TSM y SSM). Para este análisis, se tomaron los valores medios mensuales y globales (de toda la zona) de ambas variables para todo el período de estudio. En el caso de TSM, la varianza es explicada de manera significativa por la componente anual en un nivel de confianza del 95 % (Figura 1.7), con un valor de poder espectral de  $54.8 \text{ }^\circ\text{C}^2$ . No se observan componentes significativas en otros rangos de frecuencia. Esto también se refleja en la SSM, con la diferencia que se aprecia un aporte significativo a la varianza de la señal interdecadal, la cual es dudosa pues se encuentra fuera del cono de significancia (Figura 1.8). El valor de poder espectral para SSM es de  $0.11 \text{ PSU}^2$ . En un futuro, es recomendable separar este estudio en diferentes zonas para discriminar el aporte a la varianza entre la zona costera y oceánica, y entre diferentes latitudes.

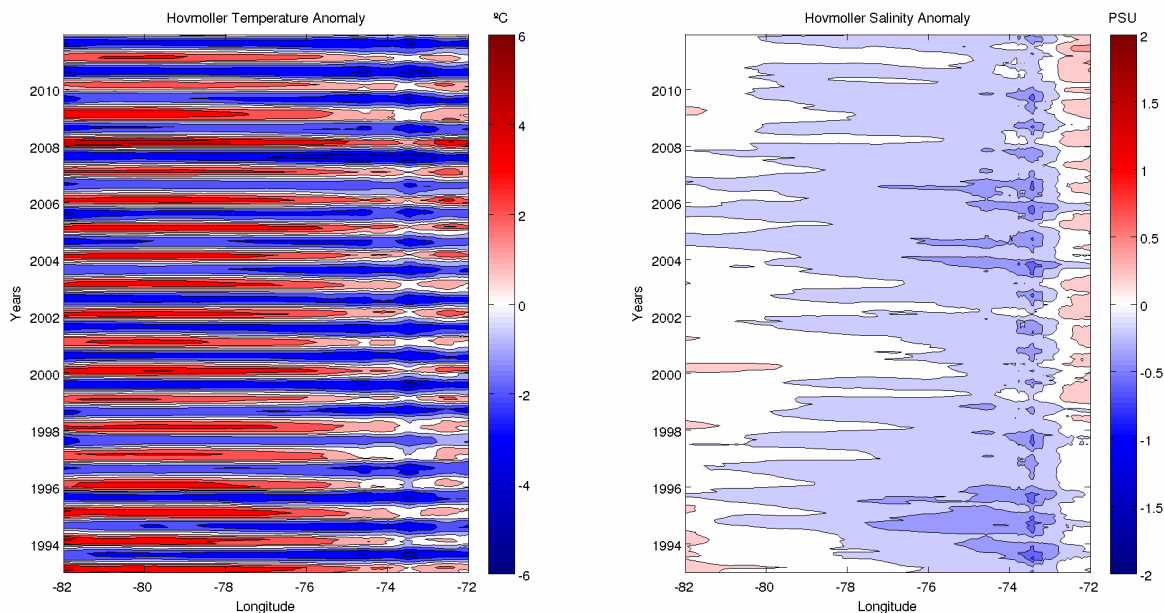


**Figura 1.7.** Análisis Wavelet para el dominio Padre con ríos. a) Poder espectral de TSM y b) Espectro global TSM. Es evidente el gran aporte a la varianza del sistema de la señal anual.



**Figura 1.8.** Análisis Wavelet para el dominio Padre con ríos. a) Poder espectral de SSM y b) Espectro global SSM. Se nota un aporte a la varianza de la señal anual y decadal, aunque esta última no es confiable por encontrarse fuera del cono de significancia.

Para estudiar las características de propagación tanto de los campos de TSM y SSM utilizamos un diagrama de Hovmoller. La frecuencia de muestreo de las salidas de las simulaciones es diaria para el caso del dominio padre, por lo tanto los datos primero se promediaron mensualmente. Luego de esto se integro en la latitud resultando un diagrama longitud vs tiempo. Finalmente, se trabajo con las anomalías por lo que le restamos el promedio global. En este diagrama, podemos observar claramente una variabilidad del tipo anual tanto para la temperatura como para la salinidad (Figura 1.9). Se puede observar que en la zona mas costera  $\sim 72^\circ\text{W}$  se observa un patrón de anomalías positivas al inicio de cada año, caso contrario que se muestra en los  $\sim 73.5$ , donde las anomalías son negativas en ambos campos. Este diagrama nos muestra a su vez que no existe propagación de señales de baja frecuencia.



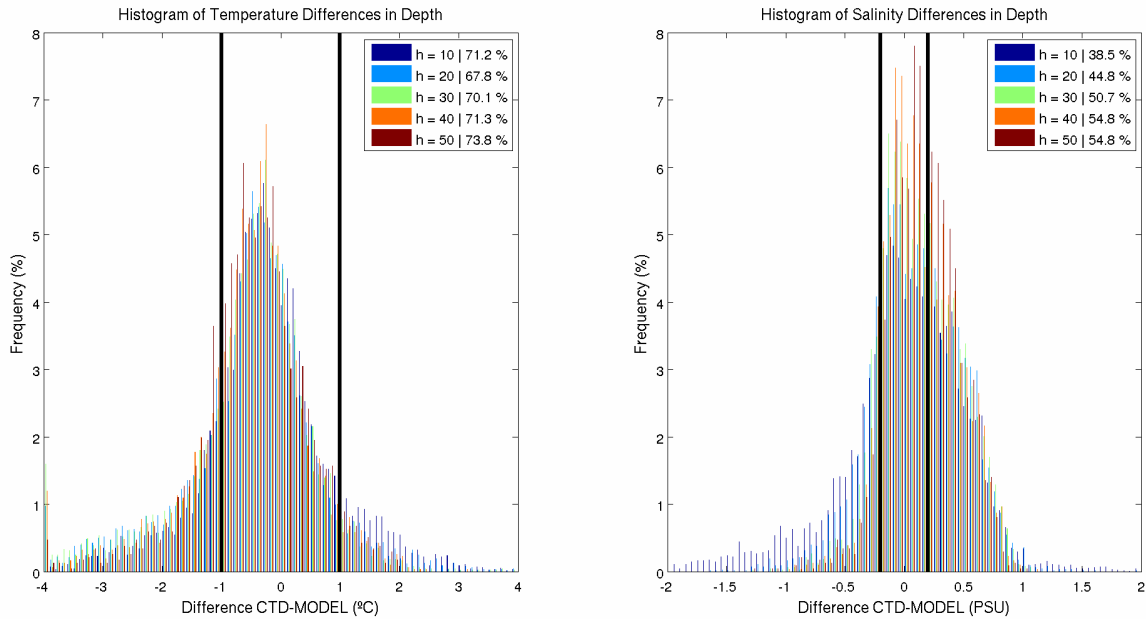
**Figura 1.9.** Diagrama Hovmoller. A la izquierda TSM y a la derecha SSM. En ambos es posible observar una señal anual con núcleos más fríos y menos salinos cercanos a los  $-74^{\circ}\text{W}$ .

### 1.3.2. Validación de ROMS basada en datos hidrográficos

Como se detalló anteriormente, se utilizaron datos hidrográficos para contrastar el modelo ROMS. Lo primero que se realizó fue una cuantificación de las diferencias que se encuentran entre la data *in situ* y las salidas del modelo. Estas residuales fueron calculados tomando la ubicación, profundidad y tiempo más cercana de los datos de CTD en el dominio de nuestras simulaciones. Además, se hace un control de calidad, utilizando los valores promedios que utilizan en la validación para el producto de Mercator de 1/4 de resolución, es decir,  $-1$  y  $+1$  °C para la temperatura y  $-0.2$  y  $+0.2$  PSU para la salinidad.

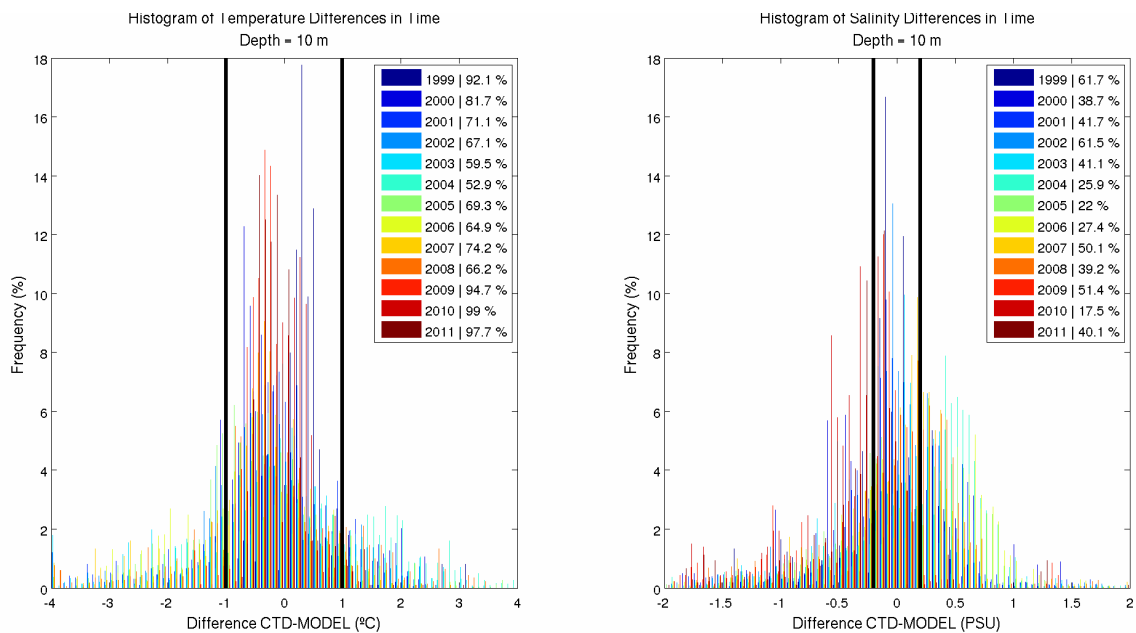
La primera comparación fue por profundidad. Esta consistió en separar las diferencias por rangos de profundidad considerando todos los años donde se tienen registros. Los rangos van de 0 a 10, 11-20, 21-30, 31-40 y 41-50 m. Al graficar un histograma, podemos apreciar una distribución normal, tanto para la temperatura como para la salinidad (Figura 1.10). Considerando todas las profundidades, un 70,4 y un 48,7 % de los datos de diferencias en temperatura y salinidad, respectivamente, se encuentran dentro de los rangos aceptables del control de calidad. En general, las diferencias mejoran con la profundidad, presentando menor porcentaje de datos en los primeros 20 m.





**Figura 1.10.** Histograma de diferencias en profundidad para a) Temperatura y b) Salinidad. Se aprecia claramente una distribución normal.

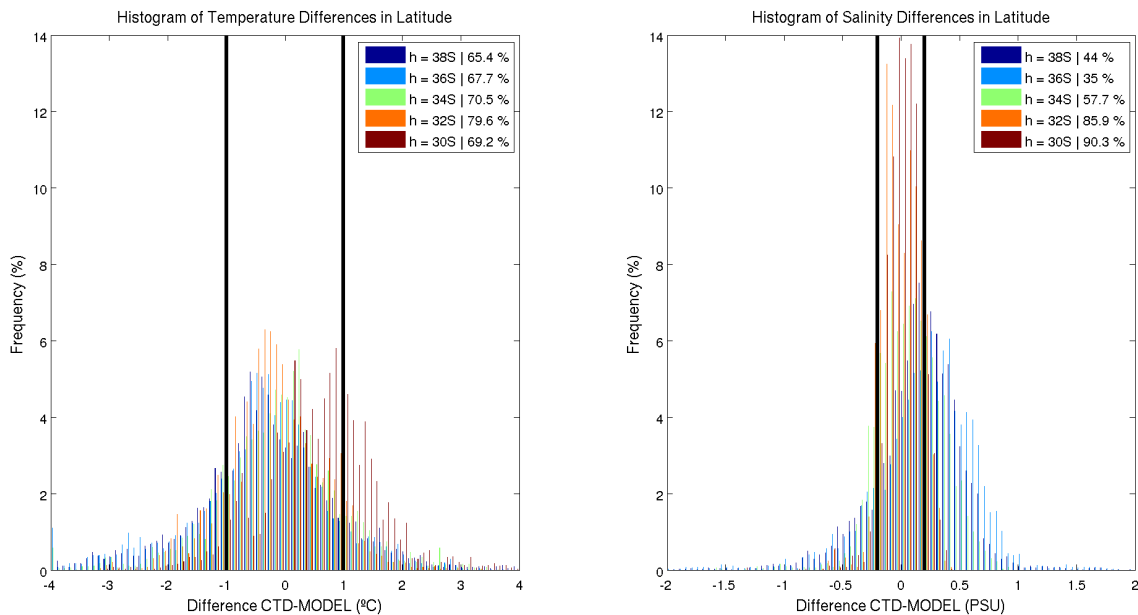
Ahora, vemos la evolución de las diferencias en el tiempo para los valores entre 1 y 10 m, pues son la que presentan el porcentaje mas bajo de datos dentro del control de calidad para la salinidad (Figura 1.11). En temperatura, ningún año presenta un porcentaje de confianza menor al 50 %, lo más bajo fue el año 2004, con 52.9 %. En salinidad, notamos que 1999 y 2002 son años que presentan un porcentaje de confianza sobre el 50%, con un 61.7 y 61.5 %, respectivamente. Pero en general, podemos decir que no hay un patrón claro en el tiempo para explicar una disminución o aumento del valor de porcentajes de confianza.



**Figura 1.11.** Histograma de diferencias en el tiempo en el rango de valores entre 1 y 10 m de profundidad para a) Temperatura y b) Salinidad.

Análogamente, separamos las diferencias por rangos de latitud considerando todos los años donde se tienen registros. Los rangos van de 39°-37°, 37°-35°, 35°-33°, 33°-31° y 31°-29°S. Al comparar la distribución de las diferencias en latitud, podemos apreciar que globalmente, el porcentaje de confianza es de 70.5 y 62.6 %, para la temperatura y salinidad, respectivamente (Figura 1.12). En temperatura, el rango entre 37 y 39°S (38°S) presenta en valor mínimo de 65.4 % y el máximo se encuentra entre 31 y 33 °S (32 °S) con un valor de 79.6 %. En salinidad, el rango entre 35 y 37 °S (36 °S) presenta en valor mínimo de 35 % y el máximo se encuentra entre 31 y 33 °S (32 °S) con un valor de 90.3 %. Del mismo modo, podemos resumir que la salinidad es mejor representada en la zona sur del dominio bajo los 37 °S, mientras que la temperatura, no presenta grandes diferencias (~ 5 %).

Similar a lo que se hizo con la profundidad, escogimos el rango entre 35 y 37 °S, para estudiar su evolución en el tiempo (Figura 1.13). En el caso de la temperatura, notamos que el año 2004 es el único con un porcentaje de confianza menor al 50 %, con un valor de 44.9 %. En salinidad, sucede lo mismo, el año 2004 registra el valor más bajo, con un 14.4 %. A su vez, los años con registros mayores al 50 % son 1999 y 2002, con 54 y 72.6 %.

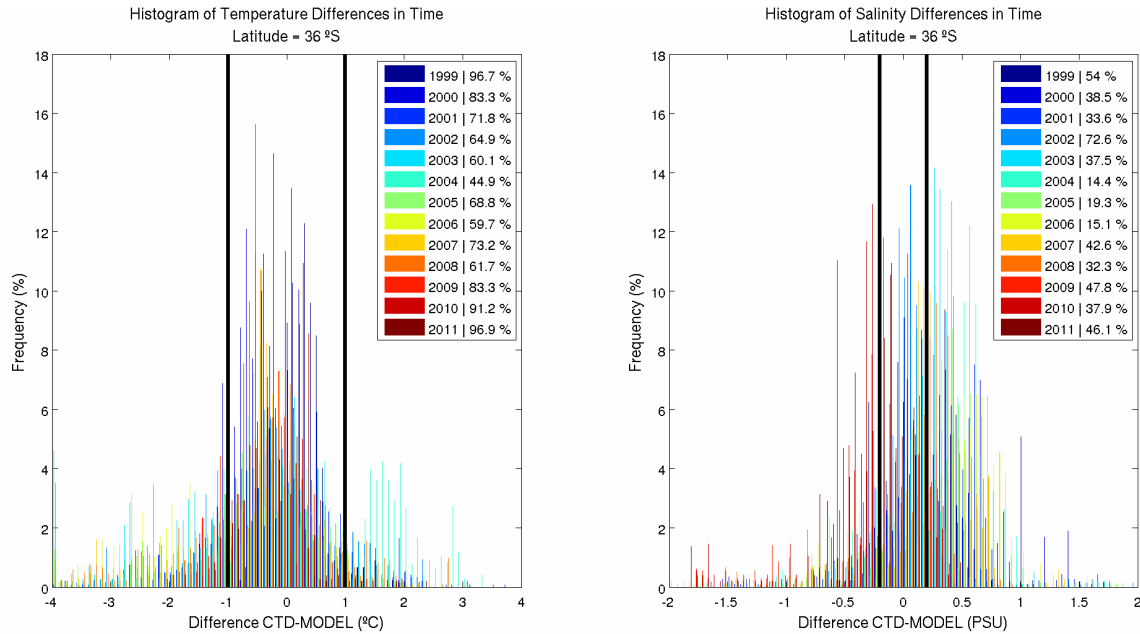


**Figura 1.12.** Histograma de diferencias en latitud para a) Temperatura y b) Salinidad.

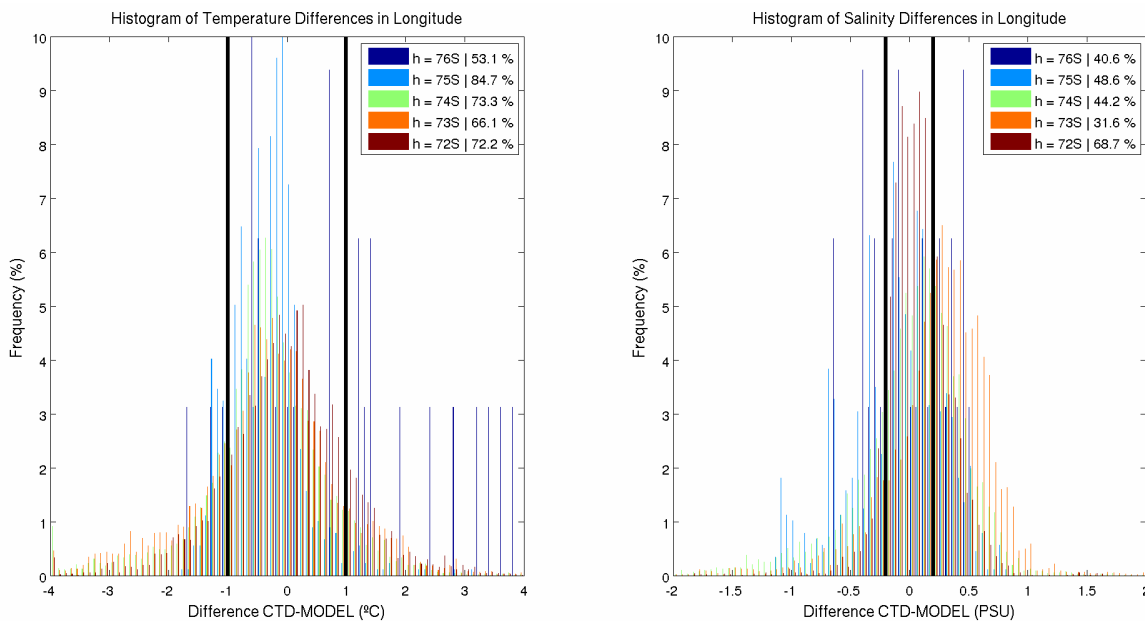
Finalmente, separamos las diferencias por rangos de longitud considerando todos los años donde se tienen registros. Los rangos van de 76.5°-75.5°, 75.5°-74.5°, 74.5°-73.5°, 73.5°-72.5° y 72.5°-71.5 °W. Al comparar la distribución de las diferencias en longitud, podemos apreciar que globalmente, el porcentaje de confianza es de 69.9 y 46.7 %, para la temperatura y salinidad, respectivamente (Figura 1.14). Para la temperatura, el menor y máximo valor se registran en las longitudes entre 76.5° -75.5° (76 °W) y 75.5°-74.5° (75 °W), respectivamente. Para la salinidad, el menor y máximo valor se registran en las longitudes entre 73.5° -72.5° (73 °W) y 72.5°-71.5° (72 °W), respectivamente.

Escogimos el rango entre 72.5° y 73.5°W (73 °W), para estudiar su evolución en el tiempo (Figura 1.15). En el caso de la temperatura, notamos que el año 2004 tiene valor mínimo de porcentaje de confianza con un valor del 50%. En salinidad, sucede lo mismo, el año 2004 registra el valor más bajo, con un 10.2%. A su vez, los años con registros mayores al 50 % son 1999 y 2002, con 61.7 y 67.9 %.

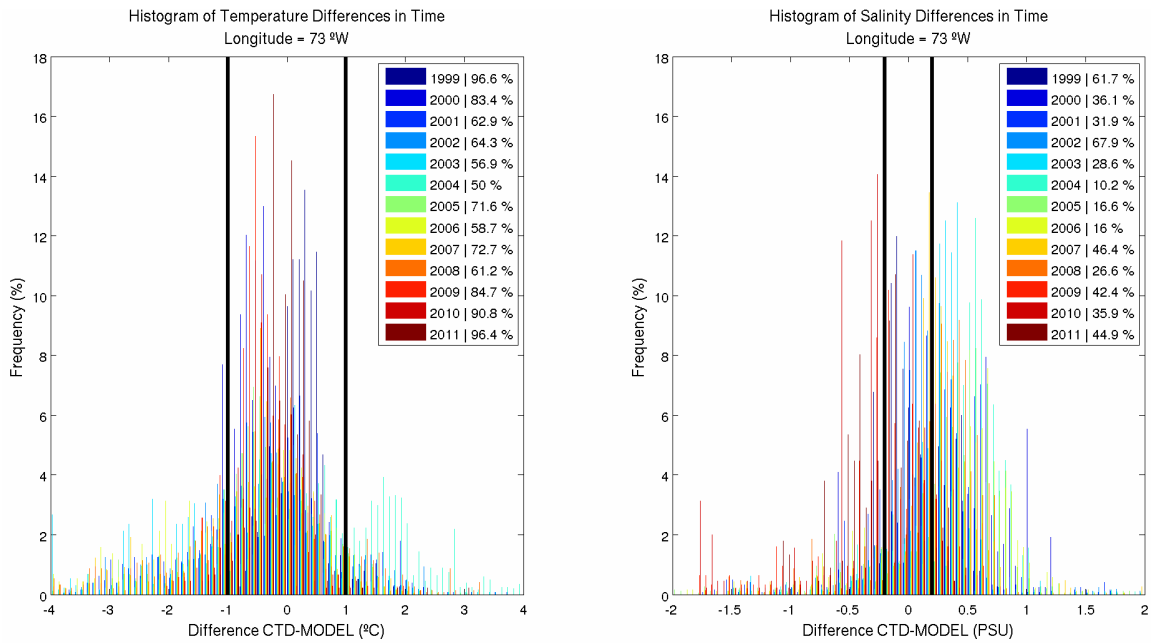
De este análisis se puede concluir que en el caso de la temperatura y salinidad, el año que peor se ajusta es el 2004. En contraste, los años 1999 y 2002 son los años con un porcentaje de confianza mayor para los valores de diferencias en salinidad. Los rangos de temperatura en general, para cada análisis bordean el 70 %, mientras que en salinidad, bordean el 50 %.



**Figura 1.13.** Histograma de diferencias en el tiempo en el rango de valores entre 35° y 37 °S de latitud para a) Temperatura y b) Salinidad.

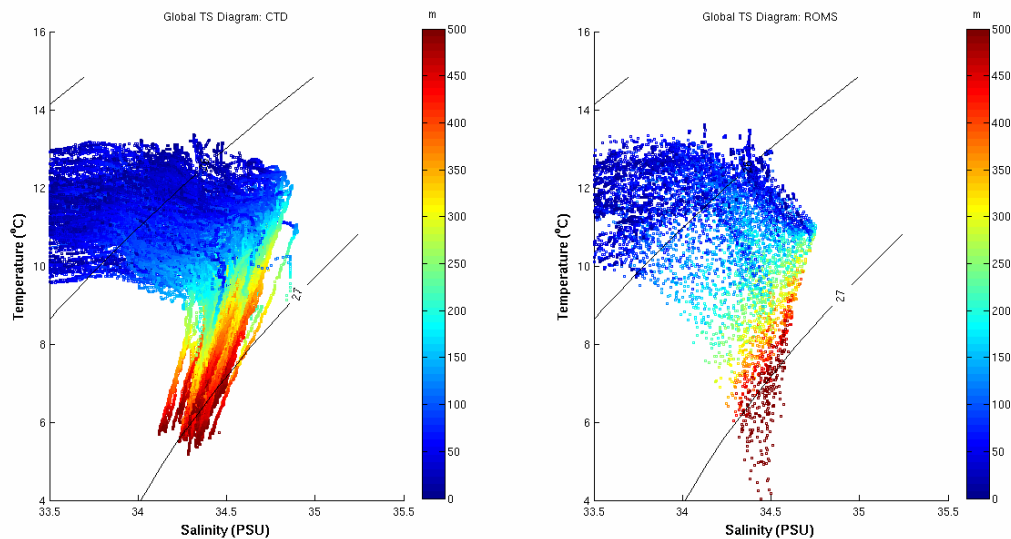


**Figura 1.14.** Histograma de diferencias en longitud para a) Temperatura y b) Salinidad.



**Figura 1.15.** Histograma de diferencias en el tiempo en el rango de valores entre 72.5 y 73.5 °W de longitud para a) Temperatura y b) Salinidad.

El último análisis realizado consistió en estudiar las masas de aguas de los datos y el modelo, mediante diagramas T-S. Al estudiar todos los meses analizados (1999-2011), se observa que el modelo captura adecuadamente la variación en profundidad de estas propiedades ya que tienen un patrón promedio similar en su distribución, lo que indicaría que las masas de agua observadas en los perfiles hidrográficos están siendo representadas por el modelo. Es posible identificar las masas de Agua Ecuatoriales SubSuperficiales, Aguas Intermedias Antárticas y las Aguas SubAntárticas. Como ejemplo se presenta el diagrama T-S correspondiente a todos los perfiles efectuados en Agosto (Figura 1.16).

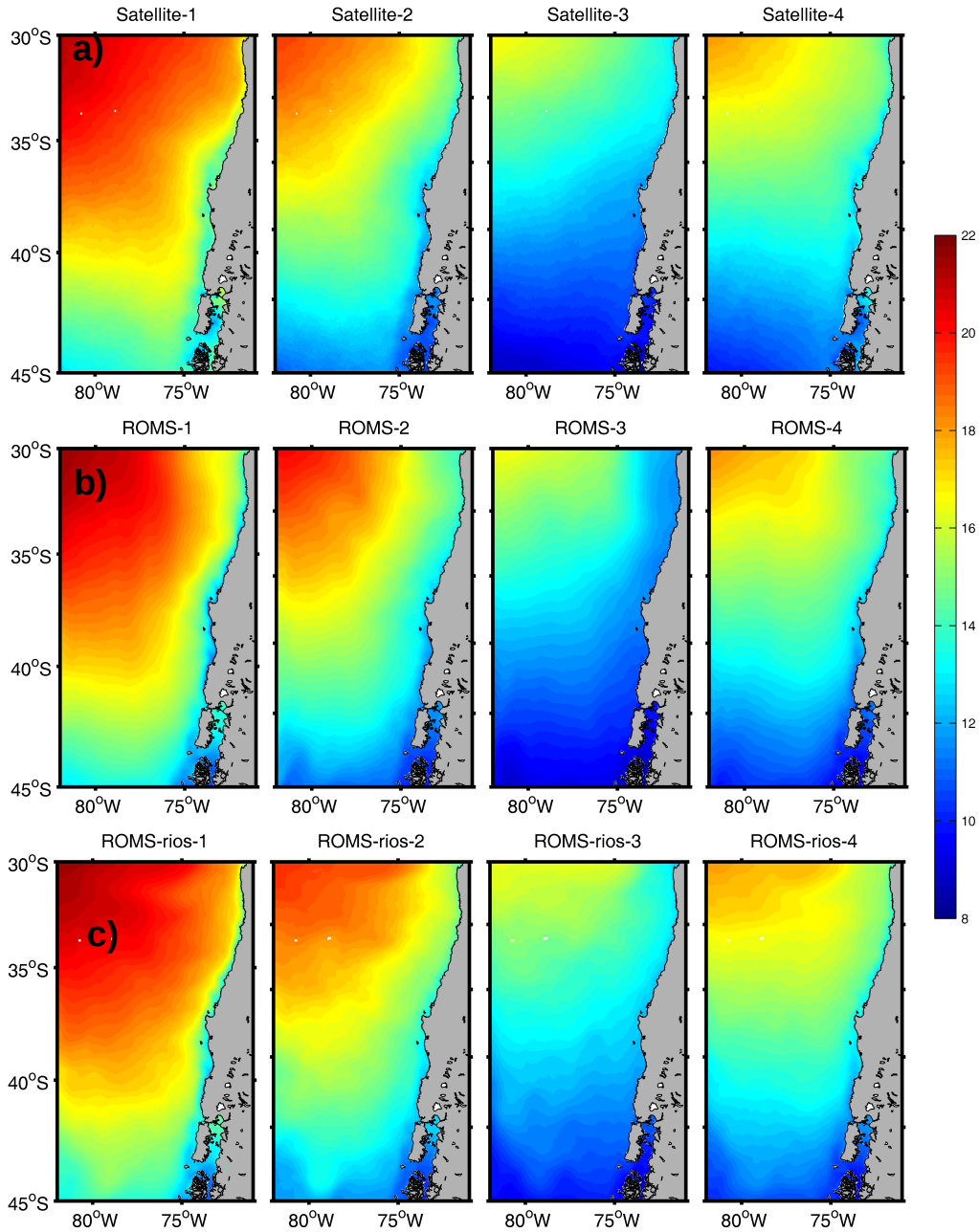


**Figura 1.16.** Diagrama T-S correspondiente a agosto de todos los años con registros hidrográficos (1999-2011) de la data hidrográfica (panel izquierdo) y del modelo (panel derecho).

### **1.3.3. Validación de ROMS basada en información satelital**

Los análisis de la validación con datos satelitales se basaron en tres metodologías: a) Análisis comparativo de la señal estacional de modelo y observación; b) el uso de Funciones Ortogonales Empíricas (*EOF*) para cuantificar el desempeño del modelo en reproducir la variabilidad del océano en el tiempo y espacio, y c) análisis comparativo en el dominio de la frecuencia; para evaluar el grado de realismo de las salidas de ROMS en relación a los datos observados.

La Figura 1.17 muestra los resultados del análisis climatológico de la TSM para los datos observados (Figura 1.17a) los del modelo ROMS configuración sin ríos (Figura 1.17b) y los del modelo ROMS configuración con ríos (Figura 1.17c). El modelo ROMS sin ríos reprodujo apropiadamente la variabilidad estacional de la TSM y los gradientes espaciales de esta variable, lo que es especialmente válido en el extremo oceánico del dominio. En el extremo costero, el modelo arrojó una señal moderadamente más fría al norte de los 37°S, especialmente en el primer trimestre en donde reprodujo adecuadamente el avance del frente cálido desde el norte y la surgencia de aguas frías en la plataforma continental. En el caso de la configuración que incluye al aporte de aguas continentales, el modelo mostró un buen desempeño en la señal estacional y los gradientes espaciales, sin embargo muestra una cobertura espacial más amplia de las aguas cálidas respecto a los datos observados, lo que se refleja en una disminución de las coberturas de aguas frías y una contracción de la franja costera de surgencia (Figura 1.17c)

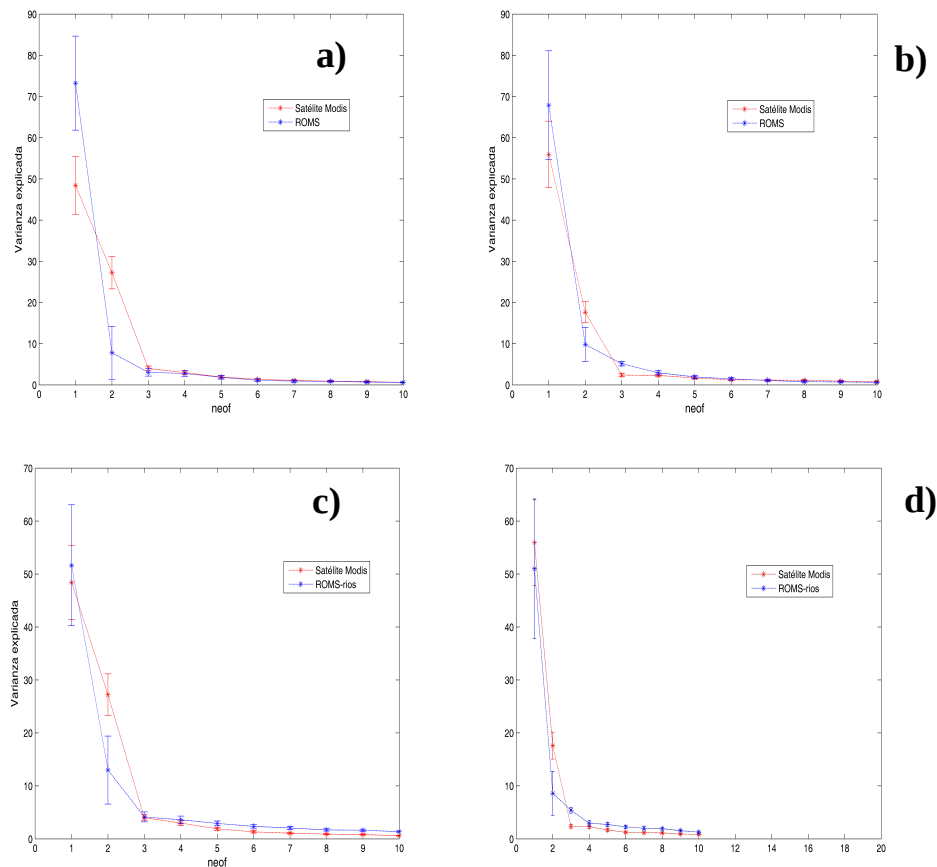


**Figura 1.17.** Área de análisis para validación de ROMS, incluyendo promedio estacional de TSM para: a) datos observados por satélite desde Modis Aqua, b) modelo ROMS configuración sin ríos, y c) modelo ROMS configuración con ríos.

El análisis basado en funciones ortogonales empíricas (EOF) permite separar la señal temporal y espacial en distintos componentes de variabilidad tanto para el modelo ROMS como para los datos satelitales. Para analizar el desempeño del modelo, este análisis se llevó a cabo en dos dominios espaciales distintos con el fin de entender si existen diferencias entre el sector interior y exterior de la plataforma continental, los dominios fueron: a) entre 30° - 40°S y costa - 74°W, b) entre 30° - 40°S y 74° y 79°W, que llamaremos por convención “costa” y “océano”. Posterior a la remoción de la señal estacional, se calculó al aporte a la variabilidad de la TSM de los primeros 10 modos de variabilidad basado en EOF para los datos satelitales y se comparó a lo obtenido para el modelo ROMS en ambas

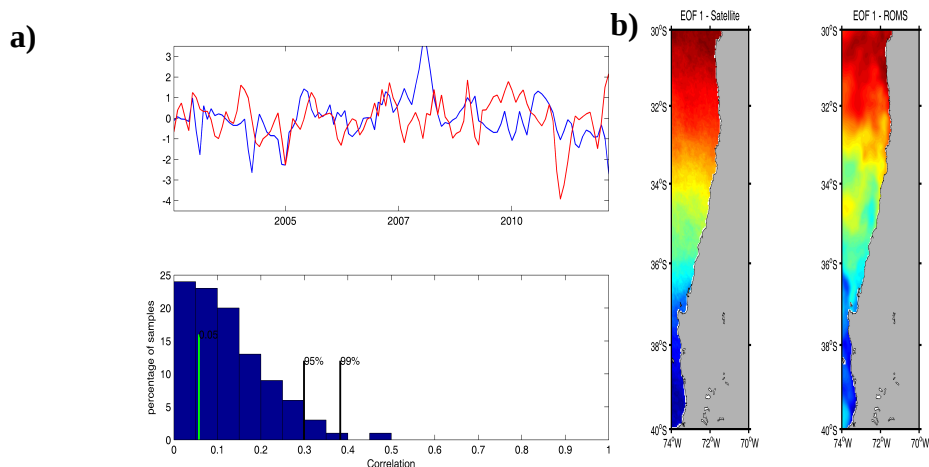
configuraciones (Figuras 1.18a, b, c, d). Para todos los casos evaluados el primer componente de variabilidad explicó sobre el 50% de la variabilidad de la TSM en ROMS y satélite. Por esto, dicho componente se utilizó para comparar modelo y observación.

Los modos de variabilidad temporal y espacial de la TSM fueron calculados y el primer modo de variabilidad fue comparado en tiempo y espacio para el sector costero y oceánico. Para el sector costero el primer modo de variabilidad temporal de la TSM observada y simulada mostraron un bajo nivel de correlación para el dominio ROMS sin ríos ( $R = 0,05$ ; Figura 1.19a) pero un buen desempeño en el espacio (Figura 1.19b). En el caso del sector oceánico, el dominio sin ríos mostró un mejor desempeño en la reproducción temporal ( $R = 0,35$ ; Figura 1.20a) y mantuvo el buen desempeño espacial de la señal de la TSM (Figura 1.20b).

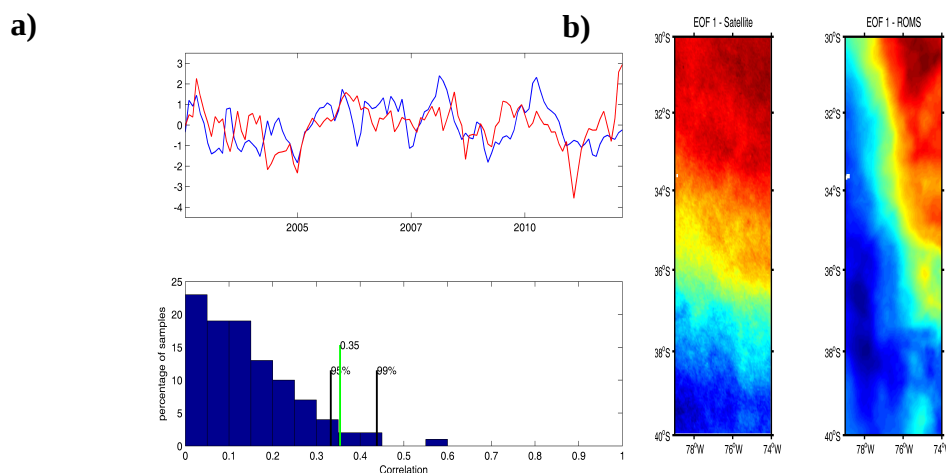


**Figura 1.18.** Varianza explicada por cada uno de los modos de variabilidad de la TSM en modelo y satélite para a) Dominio ROMS sin ríos sector costa, b) Dominio ROMS sin ríos sector océano, c) Dominio ROMS con ríos sector costa y d) Dominio ROMS con ríos sector océano.

De la misma manera que en el dominio sin ríos, los modos de variabilidad temporal y espacial de la TSM fueron calculados y el primer modo de variabilidad fue comparado en tiempo y espacio para el sector costero y oceánico del modelo ROMS que incluyó el aporte de aguas continentales. Para el sector costero el primer modo de variabilidad temporal de la TSM observada y simulada mostraron un bajo nivel de correlación, que sin embargo fue más alto que en el dominio ROMS sin ríos ( $R = 0,1$ ; Figura 1.21a) y mantuvo un buen en el espacio (Figura 1.21b). En el caso del sector oceánico, el dominio con ríos mostró un mejor desempeño en la reproducción temporal ( $R = 0,33$ ; Figura 1.22a) y disminuyó parcialmente el desempeño espacial de la señal de la TSM (Figura 1.22b).

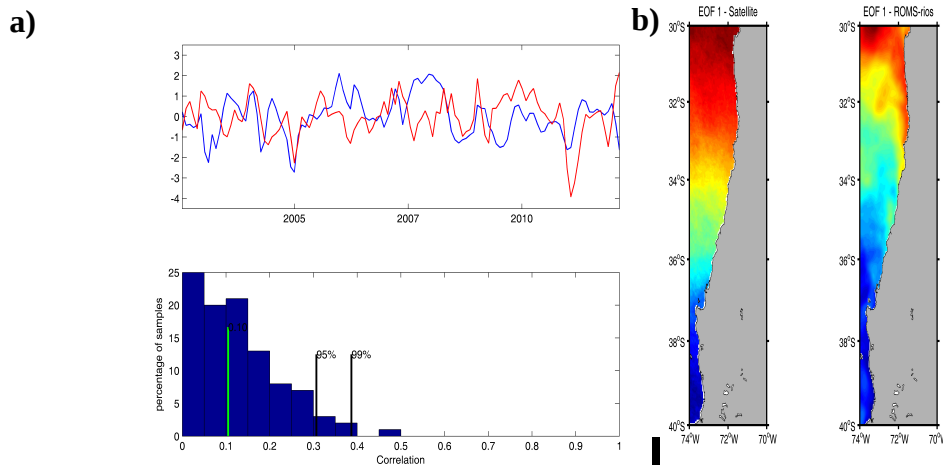


**Figura 1.19.** Comparación los componentes principales del primer modo de variabilidad de TSM para el sector costero dominio sin ríos en a) series de tiempo entre los datos satelitales de Modis Aqua (línea azul) y las salidas de ROMS (línea roja) y el nivel de correlación entre las series; y b) dominio espacial de satélite y ROMS.

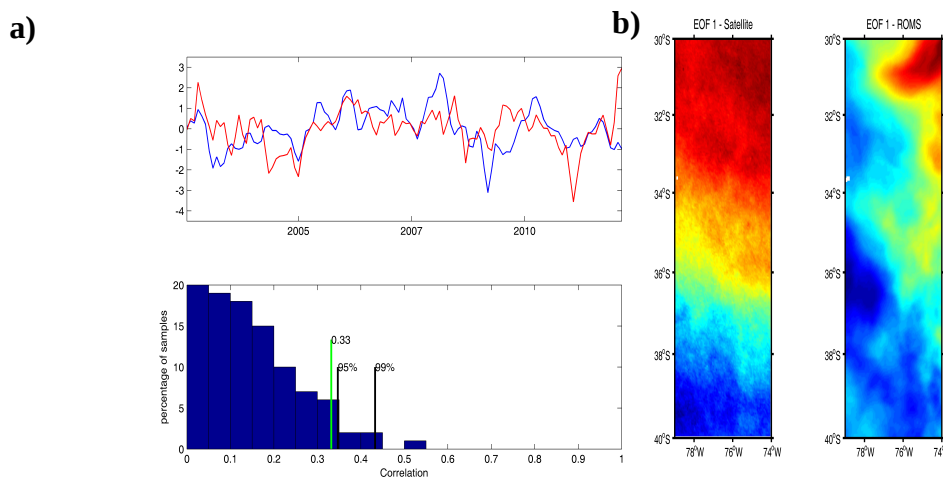


**Figura 1.20.** Comparación los componentes principales del primer modo de variabilidad de TSM para el sector oceánico dominio sin ríos en a) series de tiempo entre los datos satelitales de Modis Aqua (línea azul) y las salidas de ROMS (línea roja) y el nivel de correlación entre las series; y b) dominio espacial de Satélite y ROMS.





**Figura 1.21.** Comparación los componentes principales del primer modo de variabilidad de TSM para el sector costero dominio con ríos en a) series de tiempo entre los datos satelitales de Modis Aqua (línea azul) y las salidas de ROMS (línea roja) y el nivel de correlación entre las series; y b) dominio espacial de Satélite y ROMS.



**Figura 1.22.** Comparación los componentes principales del primer modo de variabilidad de TSM para el sector oceánico dominio con ríos en a) series de tiempo entre los datos satelitales de Modis Aqua (línea azul) y las salidas de ROMS (línea roja) y el nivel de correlación entre las series; y b) dominio espacial de satélite y ROMS.

La correlación entre las funciones espectrales (LFV) de los datos de TSM modelados y observados fue de  $R = 0,70$  mostrando un buen nivel explicatorio en el dominio de la frecuencia del modelo ROMS respecto a los datos observados por el satélite (Figura 1.23). El análisis de frecuencia mostró en ambos casos un máximo significativo en el periodo de 1 año, en el cual ambos conjuntos de datos mostraron una alta equivalencia. En el caso de altas frecuencias ambas señales mostraron un espectro muy similar representando de manera correcta los periodos menores a un año. En el segmento de las bajas frecuencias es donde el modelo y la observación se desacoplaron mayormente disminuyendo el desempeño del modelo respecto a la observación (Figura 1.23).

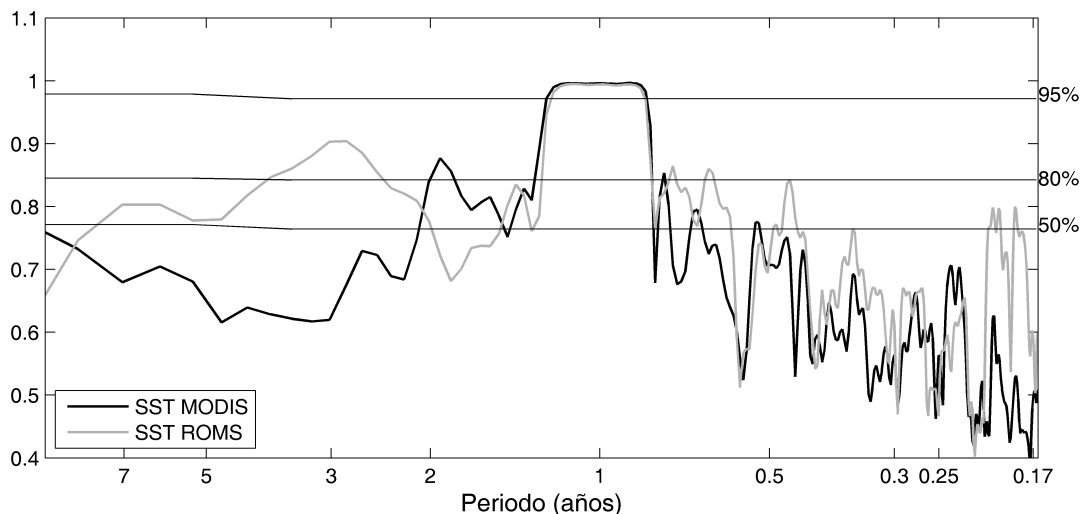


Figura 1.23. Comparación del análisis espectral de la temperatura superficial del mar proveniente de los datos satelitales Modis Aqua y las salidas de ROMS.

#### 1.4. CONCLUSION

El estudio hidrodinámico mediante modelos numéricos presenta un gran desafío a futuro para nuestro país. El alto poder computacional, junto a los costos involucrados, tanto en equipos, como en almacenamiento y procesamiento de información es elevado pero necesario. En esta ocasión se trabajó de manera excepcional, para lograr los objetivos comprometidos dentro de los plazos indicados. Se logró implementar un modelo numérico hidrostático de nueva generación, altamente utilizado por el medio científico y simular 20 años en la zona centro-sur del país, con una resolución horizontal espacial de 4 y 1.3 km con una batimetría realista y descarga puntuales de ríos.

El modelo fue capaz de reproducir en gran parte la dinámica local de la zona de estudio, como lo demuestra la validación con los datos de las campañas de los cruceros oceanográficos en el marco de los proyectos FIP. El estudio de los residuos arroja que los rangos de error son comparables con los rangos que utiliza Mercator en su validación de sus salidas de  $1/4^\circ$ . Donde más de un 70 y un 50 % de la temperatura y salinidad, respectivamente, se encuentran dentro de esos rangos de tolerancia. A su vez, el modelo también fue capaz de reproducir las diferentes masas de agua características de la zona de estudio.

La metodología basada en información satelital permitió evaluar el modelo ROMS en los dominios del tiempo, espacio y frecuencia. El modelo evidenció un buen comportamiento en el espacio, según lo revelado por el análisis climatológico y de EOF, tanto para el sector costero como oceánico y para ambas configuraciones del ROMS (con y sin ríos).

En el dominio del tiempo se registró un comportamiento disímil para el sector costero y oceánico del área evaluada. Tanto para el dominio con y sin ríos, el modelo mostró un mejor desempeño en el sector oceánico que en sector costero, evidenciado por un mayor nivel de correlación entre las series de tiempo de satélite y ROMS.

En el dominio de la frecuencia ambas fuentes de información revelaron un espectro similar, con un alto nivel de correlación que fue especialmente valido para periodos inferiores a los dos años lo que

entrega un buen diagnóstico para el esquema de modelación de la sardina común.

## 1.5. REFERENCIAS

- Large, W. G. J. C. McWilliams, and S. C. Doney, 1994: Oceanic vertical mixing: A review and a model with a nonlocal boundary layer parameterization. *Rev. Geophys.*, 32, 363–403.
- Marchesiello, P., McWilliams, J. C., & Shchepetkin, A. F. (2001). Open boundary conditions for long-term integration of regional oceanic models. *Ocean Modelling*, 3(1), 20.
- Penven, P., Debreu, L., Marchesiello, P., McWilliams, J.C., 2006. Application of the ROMS embedding procedure for the Central California Upwelling System. *Ocean Modelling* 12, 157-187.
- Shchepetkin, A. F., McWilliams, J. C. 2005. The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean Modelling*, 9(4): 347-404. doi:10.1016/j.ocemod.2004.08.002.

## **CAPITULO 2. TRANSPORTE DE ESTADIOS TEMPRANOS DE SARDINA COMUN Y SU EFECTO SOBRE LA VARIABILIDAD DEL RECLUTAMIENTO E INDICES DE RECLUTAMIENTO INDEPENDIENTES DE LA ESTIMACION ESTIVAL: PARTE 1**

### **2.1. INTRODUCCION**

Numerosos modelos biofísicos han sido implementados para estudiar la historia de vida temprana de pequeños pelágicos en diferentes ecosistemas a nivel mundial, especialmente asociado a sistemas de surgencia costera. Se han realizado numerosos estudios de recursos pelágicos como *Engraulis ringens* (en Chile, [Parada et al., 2012](#); [Soto-Mendoza et al., 2012](#)), *Engraulis encrasicolus* (en el sistema de Benguela, Parada et al., 2008), anchoveta del mediterráneo ([Ospina-Alvarez et al., 2011](#); [Ospina-Alvarez et al., 2012](#)), así como jurel ([Parada et al., 2010a](#)), y especies asociadas al sistema del Golfo de Alaska y mar de Bering ([Parada et al., 2010b](#)) implementando sistemas de modelación biofísicos acoplados. La ventaja de este tipo de estudio es que permite estudiar y entender la historia de vida temprana de recursos pelágicos y generar proxies de reclutamiento.

En este capítulo se abordan dos objetivos:

-La modelación del proceso de transporte de estadios tempranos de sardina común y su efecto sobre la variabilidad del reclutamiento, identificando regiones fuente y sumidero de juveniles y reclutas de sardina común en la zona centro-sur de Chile.

-La obtención de índices de reclutamiento de sardina común, independientes de la estimación acústica estival, para la región centro-sur de Chile. En relación a este último se utilizan 5 piezas de información para estudiar esta problemática:

1. Índices biofísicos: Índices de reclutamiento para sardina común asociados a rasgos biofísicos del sistema, y la variabilidad espacial y temporal de las zonas de crianza/reclutamiento basadas en los resultados de la modelación biofísica en base a índices serán informadas,
2. Índices de reclutamiento inferido desde información de la actividad pesquera, a través de las capturas,
3. Índices de reclutamiento estimado a través del modelo de dinámica poblacional para sardina común,
4. Estimaciones de reclutamiento mediante métodos hidroacústicos provenientes de los cruceros RECLAS realizados por el FIP,
5. Información acústica espacial discretizada a la misma escala espacial que las salidas del modelo biofísico utilizando la integración de los NASC obtenidos en los cruceros del RECLAS en áreas discretizadas y generadas en el marco del objetivo 2.

En este capítulo sólo se abordará el primer índice, mientras que el índice 2 a 5 se abordará en el capítulo 3.

El estudio del transporte de estadios tempranos de sardina común y su efecto sobre la variabilidad del reclutamiento y la generación de índices de reclutamiento independientes de la estimación estival se realizó a través de la implementación de un modelo biofísico.

## 2.2. METODOLOGIA

Se implementó un modelo biofísico en la plataforma ICHTHYOP ([Lett et al., 2008, http://www.brest.ird.fr/ressources/ichthyop/index.php](http://www.brest.ird.fr/ressources/ichthyop/index.php)) desarrollado para el estudio de transporte de estados tempranos de peces, y determinación de efectos de factores físicos (temperatura, densidad, corrientes) y biológicos (movimiento, desove entre otros) en la dinámica de estos organismos, hacia la definición de índices de reclutamiento.

El modelo biofísico implementado permite simular individuos de una población de forma explícita basado en el concepto de programación objeto orientado, donde el ambiente físico experimentado por cada individuo está caracterizado por variables oceánicas de estado provenientes del modelo hidrodinámico. Los individuos modelados están caracterizados por variables de estado a nivel del individuo. Estas variables de estado corresponden a edad, estado, posición (latitud, longitud, profundidad), y estatus de sobrevivencia, entre otras.

### 2.2.1. *Acoplamiento modelo hidrodinámico a modelo biofísico*

Las variables de estado ambientales (variables de entrada: temperatura, salinidad, u, v, w, zeta) provendrán de la grilla discreta de ROMS proveniente de la configuración con ríos. De tal manera, que el modelo biofísico heredará la estructura espacial de la grilla del modelo hidrodinámico, y será forzado por las variables de estado ambientales a la escala espacial en que estas han sido almacenadas (diaria y subdiaria para las grillas anidadas). Para determinar la localización de cada uno de los individuos y sus propiedades, las variables ambientales fueron interpoladas en el espacio y tiempo. De esta manera, el modelo biofísico es capaz de generar trayectorias de movimiento de partículas y su evolución en el tiempo.

### 2.2.2. *Compartimentos biológicos y submodelos para la sardina común*

ICHTHYOP posee compartimentos biológicos genéricos. Estos compartimentos fueron modificados o re-estructurados para los requerimientos asociados a los compartimentos biológicos específicos (detallados en la siguiente sección) que se requiere utilizar en la modelación, para seguir en el tiempo el transporte de sardina común. En el objetivo siguiente se definen los submodelos y configuración del modelo biofísico a utilizar, claves para recrear las condiciones biológicas de la sardina común en la zona centro-sur de Chile. Así como se describe en detalle las variables biológicas que serán utilizadas como datos de entrada para el modelo biológico acoplado al modelo hidrodinámico.

### 2.2.3. *Modelación del proceso de transporte de estadíos tempranos de sardina común y su efecto sobre la variabilidad del reclutamiento, identificando regiones fuente y sumidero de juveniles y reclutas de sardina común en la zona centro-sur de Chile*

La modelación del proceso de transporte de estadíos tempranos de sardina común y su efecto en la variabilidad del reclutamiento, está estrechamente ligado al modelo conceptual de historia de vida que se ha considerado como válido y a la información que lo apoye.

### 2.2.3.1. Modelo conceptual, análisis y revisión histórica

El modelo biofísico de sardina común se basa en el modelo conceptual de la historia de vida de la sardina común. La historia de vida de sardina común se caracteriza por presentar un máximo de desove de sardina común entre Agosto y Octubre (de acuerdo al período de realización de cruceros), posteriormente alrededor 4 meses después ocurre el reclutamiento (talla ~6 cm de longitud ([Castillo et al., 2010](#))). El ciclo anual de vida llega a su término en junio del año siguiente cuando los individuos de la población de sardina común alcanzan sus condiciones de reproductivas (talla ~11 cm de longitud; [Cubillos, 1999](#); [Arteaga & Cubillos, 2008](#)). Se realizó una amplia revisión bibliográfica y análisis de los estudios disponibles para revisar la información de sardina común en la región para refinar el modelo conceptual.

### 2.2.3.2 Configuración del modelo biofísico

#### *Compartimentos biológicos e información de entrada*

Basado en el modelo conceptual, el modelo biofísico de sardina común incluye los submodelos biológicos que se listan a continuación. Cabe destacar que una fuente de información relevante para esta sección del estudio es la que describe la distribución espacial y abundancia del desove. Estos datos han sido registrados por diversos proyectos del Fondo de Investigación Pesquera (FIP; ver Tabla 2.1). La ejecución de este proyecto consideró la solicitud formal de las bases de datos de distribución de huevos y larvas de sardina común al FIP (para cada uno de los proyectos enumerados).

**Tabla 2.1.** Listado de proyectos que cuentan con datos respecto a la distribución espacial del desove de sardina común.

| Año  | Proyecto  | Código    | Unidad ejecutora |
|------|---|-----------|------------------|
| 1997 | Ant. Biol. del stock desovante de anchoveta y sardina común de la V a la IX regiones  | FIP 97-04 | INPESCA          |
| 1997 | Areas de desove de anchoveta y sardina común en la zona central                       | FIP 96-11 | UDEC             |
| 2001 | Ev. hidroacústica del stock desovante de anchoveta y sardina común, centro sur , 2001 | FIP 01-14 | IFOP             |
| 2002 | Ev. del stock desovante de anchoveta y sardina común entre la V y X regiones, 2002    | FIP 02-14 | INPESCA          |
| 2003 | Ev. del stock desovante de anchoveta y sardina común entre la V y X Regiones, 2003    | FIP 03-06 | IFOP             |
| 2004 | Ev. del stock desovante de anchoveta y sardina común entre la V y X Regiones, 2004    | FIP 04-03 | UDEC             |
| 2005 | Ev. del stock desovante de anchoveta y sardina común entre la V y X Regiones, 2005    | FIP 05-02 | UDEC             |
| 2007 | Ev. del stock desovante de anchoveta y sardina común entre la V y X Regiones, 2007    | FIP 07-06 | UDEC             |
| 2008 | Ev. del stock desovante de anchoveta y sardina común en la zona centro-sur, Año 2008  | FIP 08-09 | UDEC             |
| 2009 | Ev. del stock desovante de anchoveta y sardina común en la zona centro-sur, Año 2009  | FIP 09-08 | UDEC             |
| 2010 | Ev. del stock desovante de anchoveta y sardina común en la zona centro-sur, Año 2010  | FIP 10-02 | UDEC             |

### *Submodelo de movimiento por estadio*

El movimiento horizontal (lagrangeano) de huevos y larvas de sardina común se estima en el modelo biofísico usando una aproximación Runge Kutta de 4to orden o Euler forward donde las posiciones de las partículas modeladas dependen de las componentes horizontales de velocidad de la corriente ( $u$ ,  $v$ ) y de las posiciones de las partículas en el paso anterior. El movimiento asociado a la boyantez del huevo y migración vertical no fueron modelados explícitamente debido a que la información existente es escasa o de muy baja resolución vertical como para definir este esquema de distribución.

### *Submodelo de distribución espacial del desove*

Este submodelo consistió en la configuración de las condiciones realistas de desove en su aspecto espacial. La abundancia y distribución espacial de huevos de sardina común en la zona centro sur de Chile, ha sido estudiada ampliamente a través de proyectos del Fondo de Investigación Pesquera (FIP). La tabla 2.2 resume los proyectos del FIP donde se ha determinado el área de desove anual de la sardina común durante la temporada de máxima actividad reproductiva. Muestreos planctónicos adaptativos y sistemáticos han sido realizados en una escala temporal de observación variable abarcando una vasta área que permite describir el área de desove de la sardina común. La distribución espacial de huevos de sardina común registrada en cada crucero, fue utilizada para describir la distribución espacial de liberación de partículas en los experimentos realizados para cada año del período en el cual se cuenta con esta data. Debido a las dimensiones del área cubierta por los cruceros, ésta será dividida en subzonas, de igual área (5 x 5 km) y que abarca la zona histórica de evaluación del desove de sardina común situada entre el 33 y 4°S y la zona al interior de la plataforma continental dentro de las cuales se liberarán partículas de forma proporcional a lo observado en el campo. Para esto, se utiliza el Sistema de Información Geográfica (SIG). Se describe ampliamente la generación de las condiciones espaciales en los resultados.

### *Submodelo de sincronización del desove*

La sardina común es una especie desovante parcial asincrónica, lo que implica que en un determinado período de tiempo es posible encontrar ejemplares en diferentes estados de madurez sexual. Esta especie que manifiesta una rápida maduración y corta época reproductiva que ocurre entre julio y septiembre ([Arrizaga, 1981](#)). Dentro de las técnicas para conocer los cambios que ocurren durante el proceso de maduración gonádica en peces, un índice ampliamente usado, simple y económico de aplicar, es el índice gonadosomático (IGS) que corresponde al peso de la gónada expresado como porcentaje del peso corporal eviscerado y sin ovario. Este índice en especies con desove estacional cambia muy notoriamente en las sucesivas etapas del desarrollo gonadal y permite identificar la época reproductiva. En este estudio, se utilizará este indicador para describir de manera precisa la evolución de la temporada reproductiva de la sardina común. El Instituto de Investigación Pesquera (IIP) cuenta con una base de datos de muestreos biológicos (reproductivos) que se extiende desde el año 1991 a la actualidad. Utilizando esta base de datos, se estructurará una serie de tiempo, en escala semanal, que describa la trayectoria del IGS de las hembras que están por sobre la talla de primera madurez sexual. De esta manera, se obtendrá una curva que de cuenta del comportamiento reproductivo de la especie en un ciclo anual, además de la extensión y máxima actividad de desove de las hembras maduras.

**Tabla 2.2.** Descripción de los cruceros efectuados para evaluar la zona de desove de sardina común en el periodo 1997 – 2010.

| Año  | Período       | Rango Latitudinal | Tipo de muestreo | Distancia inter-transecta | Número de estaciones | Estaciones positivas (%) |
|------|---------------|-------------------|------------------|---------------------------|----------------------|--------------------------|
| 1997 | 10/09 - 14/09 | 36°16' - 37°09'   | Adaptativo       | -                         | 53                   | 87                       |
| 1998 | 30/01 - 20/08 | 35°13' - 39°53'   | Adaptativo       | -                         | 64                   | 75                       |
| 1998 | 06/08 - 07/08 | 36°52' - 37°14'   | Adaptativo       | -                         | 26                   | 38                       |
| 1998 | 22/08 - 24/08 | 39°23' - 39°42'   | Adaptativo       | -                         | 10                   | 90                       |
| 1999 | 06/08 - 25/08 | 36°21' - 39°42'   | Sistemático      | -                         | 177                  | 68                       |
| 2001 | 22/08 - 18-09 | 34°00' - 40°00'   | Sistemático      | 20 mn                     | 104                  | 23                       |
| 2002 | 15/08 - 09/09 | 33°00' - 40°00'   | Sistemático      | 5 mn                      | 761                  | 14                       |
| 2003 | 23/08 - 24/10 | 33°10' - 41°20'   | Sistemático      | 5 mn                      | 429                  | 18                       |
| 2004 | 21/08 - 26/09 | 33°00' - 40°35'   | Sistemático      | 8 mn                      | 295                  | 11                       |
| 2005 | 24/08 - 11/09 | 33°00' - 40°19'   | Sistemático      | 8 mn                      | 288                  | 14                       |
| 2007 | 28/08 - 22/09 | 33°00' - 40°28'   | Sistemático      | 5 mn                      | 400                  | 36                       |
| 2008 | 04/09 - 10/10 | 33°00' - 40°50'   | Sistemático      | 5 mn                      | 377                  | 12                       |
| 2009 | 02/09 - 10/10 | 33°00' - 41°20'   | Sistemático      | 5 mn                      | 381                  | 19                       |
| 2010 | 10/09 - 26/10 | 33°00' - 41°20'   | Sistemático      | 5 mn                      | 396                  | 27                       |

### *Submodelo de desove bajo condiciones promedio*

Para aquellos años en que la distribución espacial temporal y la abundancia de huevos es desconocida o no hay crucero disponible, se realizará un experimento de simulación con las distribuciones y abundancias históricas del recurso. Además, se utilizará los resultados del Objetivo 4 (asociación de densidades de huevos a condiciones ambientales basado en GAMs, ver capítulo 4) para identificar en el modelo biofísico aquellas condiciones para realizar la liberación de partículas.

### *Procesos estocásticos, simulaciones y experimentos*

Los procesos estocásticos en el modelo biofísico están asociados a la liberación de cada individuo en forma aleatoria en las áreas de liberación definidas en el submodelo de desove. Además, los componentes de dispersión vertical y horizontal del movimiento son también estocásticos.

Las simulaciones consisten en el seguimiento de las posiciones y propiedades (variables de estado) de las partículas simuladas (huevos y larvas de sardina común) a pasos de tiempo discretos (subdiarios cada 20 minutos) y durante toda la simulación. Se inicializa el modelo, dada las condiciones del submodelo de desove. En cada paso de tiempo cada individuo se mueve, crece (experimenta en el tiempo una serie de estadios), evalúa su estado de mortalidad y reclutamiento, de acuerdo a los submodelos propuestos. Las variables ambientales acopladas al modelo biofísico son actualizadas cada día para el modelo de baja resolución y subdiariamente para los modelos anidados en función de la frecuencia a la que las salidas de las configuraciones de ROMS son almacenadas.

Se realizarán una serie de experimentos de simulación para generar variables de salida (definidas a



continuación) los cuales consisten en simulaciones multidecadales basadas en las 2 condiciones de desove: 1) Condiciones realistas y 2) Condiciones históricas de desove.

### *Variables de salida y procesos modelados*

Las simulaciones y experimentos a realizar generan información de salida. Estas salidas están caracterizadas por las variables de estado de cada uno de los individuos modelados y sus condiciones ambientales. Para cada paso de tiempo se evalúa la edad, estadio de desarrollo, estado de sobrevivencia, longitud, latitud, profundidad, áreas geográficas (en zona de desove, de reclutamiento, bahías específicas, zonas de advección, etc). En base a las simulaciones, se modelan procesos de transporte, advección fuera de la costa, conectividad entre zonas de desove y crianza, sobrevivencia y reclutamiento.

Los modelos biofísicos poseen la particularidad de ser espacialmente explícitos y que permiten acceder a información ambiental en el dominio geográfico especificado para la modelación tridimensionalmente (información desde los modelos hidrodinámicos). Esto da una ventaja comparativa en relación a modelos poblacionales que solamente realizan proyecciones en el tiempo y con variables agregadas. Los modelos biofísicos generan las condiciones para modelar toda la historia de vida de los recursos, con sus procesos claves en el espacio y en el tiempo, lo que permite generar más información en términos de los resultados y los procesos modelados. En este estudio además, serán extraídos una serie de índices en base a estos procesos modelados, los cuáles serán desarrollados en el objetivo siguiente.

## ***2.2.4. Obtención de índices de reclutamiento de sardina común, independientes de la estimación acústica estival, para la región centro-sur de Chile: Parte I***

### ***2.2.4.1. Generación de índices biofísicos***

En base a cada experimento (asociado a condiciones iniciales particulares) propuesto se generarán simulaciones multidecadales (salidas de variables respuesta del modelo biofísico para la serie 1993-actualidad) las cuales modelarán procesos de transporte, advección fuera de la costa, conectividad entre zonas de desove y crianza, sobrevivencia, crecimiento y reclutamiento. Además, una serie de índices serán extraídos en base a estos procesos modelados, generando indicadores multidecadales para cada proceso modelado. Estos índices se describen a continuación.

### ***2.2.4.2. Indicadores de reclutamiento, definición de criterios***

El desove de sardina común presenta principalmente un máximo en la estación de invierno asociado principalmente en Julio-Agosto de cada año ([Cubillos & Arcos, 2002](#); [Arteaga & Cubillos, 2008](#)). Posteriormente el reclutamiento ocurre aproximadamente a los 4 meses de vida donde se encuentran ejemplares de alrededor de 6 cm, cerrándose el ciclo anual de vida al término de Junio del año siguiente cuando sardina común alcanza condiciones reproductivas asociadas a longitudes de alrededor de 11 cm ([Cubillos, 1999](#)). Sin embargo, individuos de 4 meses presentan una fuerte componente de movimiento desacoplado de las corrientes (*Com. pers.* Samuel Soto), procesos no modelados en esta configuración del modelo biológico. Se considera el movimiento aun acoplado a las corrientes al mes de edad. Espacialmente, las áreas donde ha ocurrido el reclutamiento en la región

corresponden a dos zonas localizadas espacialmente entre los 40°-38.5°S (entre Corral y Pto. Saavedra) y los 37.2-34.2°S (Límite sur del Golfo de Arauco y Topocalma; basado en informes finales de Reclas; [Castillo et al., 2010](#)) con una alta variabilidad interanual dependiente de la fuerza del reclutamiento, que es registrado en las estimaciones acústicas. En el sentido costa océano los reclutas se encuentran muy cercanos a la costa. De esta manera, el índice biofísico de reclutamiento se basará en un criterio estándar de reclutamiento asociado a los rasgos anteriormente descritos.

#### **2.2.4.3. Criterio e índice de reclutamiento**

Este criterio considera como individuos pre-reclutas a aquellos que alcanzan la edad de 1 o > 1 mes, y que permanecen circunscritos a la región ubicada entre la isóbata de 200m y la costa. El índice de pre-reclutamiento corresponderá a la densidad de individuos que cumplan con este criterio.

#### **2.2.4.4. Variabilidad espacial y temporal del los índices de reclutamiento**

En base a este criterio y considerando las condiciones iniciales realistas y promedio se analizarán 3 índices:

Índices de pre-reclutamiento espacial: Se estimaron índices espaciales de pre-reclutamiento basado en las condiciones iniciales de forzamiento ambiental, el modelo hidrodinámico acoplado y los criterios de reclutamiento indicados arriba. Esto se realizará discretizando el área distribucional del recurso y cuantificando todos aquellos individuos que cumplen con el criterio de reclutamiento en dos escalas. La primera escala espacial constituye 8 áreas correspondientes a zonas escogidas en función de su topografía (bahías, Golfos, etc, Tabla 2.1.), áreas que fueron también utilizadas para discretizar la información acústica para su posterior contrastación. La segunda escala correspondió a la integración de la información a una escala de 5x5 km a la cual se integró la información proveniente del modelo biofísico para generar los índices espaciales de pre-reclutamiento (Figura 2.11 a 2.14). Al provenir las salidas del modelo de un modelo hidrodinámico con submodelos biológicos, ambos índices implícitamente integran el efecto intranual de la variabilidad de las condiciones oceanográficas y entregarán señales de cuando existen variaciones en las condiciones oceanográficas (transporte-advención fuera de la costa) asociadas al proceso de retención y transporte en bahías y golfos en la región de distribución de los reclutas.

Índice de pre-reclutamiento temporal: Se generará un índice de pre-reclutamiento con variabilidad temporal el cual será calculado posterior a la liberación del pulso de partículas liberadas (inicio del desove) y hasta que todos los individuos de la población hayan finalizado el proceso de modelación (3 meses posterior a la última liberación). Temporalmente, serán integrados en escala anual para reconstruir el proceso de reclutamiento y estimar diferencias interanuales en el pre-reclutamiento.

#### **2.2.4.5. Contrastación de índices de reclutamiento (biofísicos) con piezas de información relevantes**

Los índices temporales y espaciales serán contrastados con diferentes piezas de información actualmente disponibles. El índice de pre-reclutamiento temporal será contrastado con las series de reclutamiento que provienen de los modelos de evaluación de sardina común. Por otro lado, el índice

espacial de pre-reclutamiento y que representa las zonas de crianza disponibles cada año para sardina común será contrastado con la información acústica disponible de los informes del RECLAS, la cuál permitirá identificar núcleos de agregación (magnitud) de reclutas en el espacio y su variabilidad interanual. Se integrará la información espacialmente en 8 áreas de Norte a Sur (Tabla 2.3).

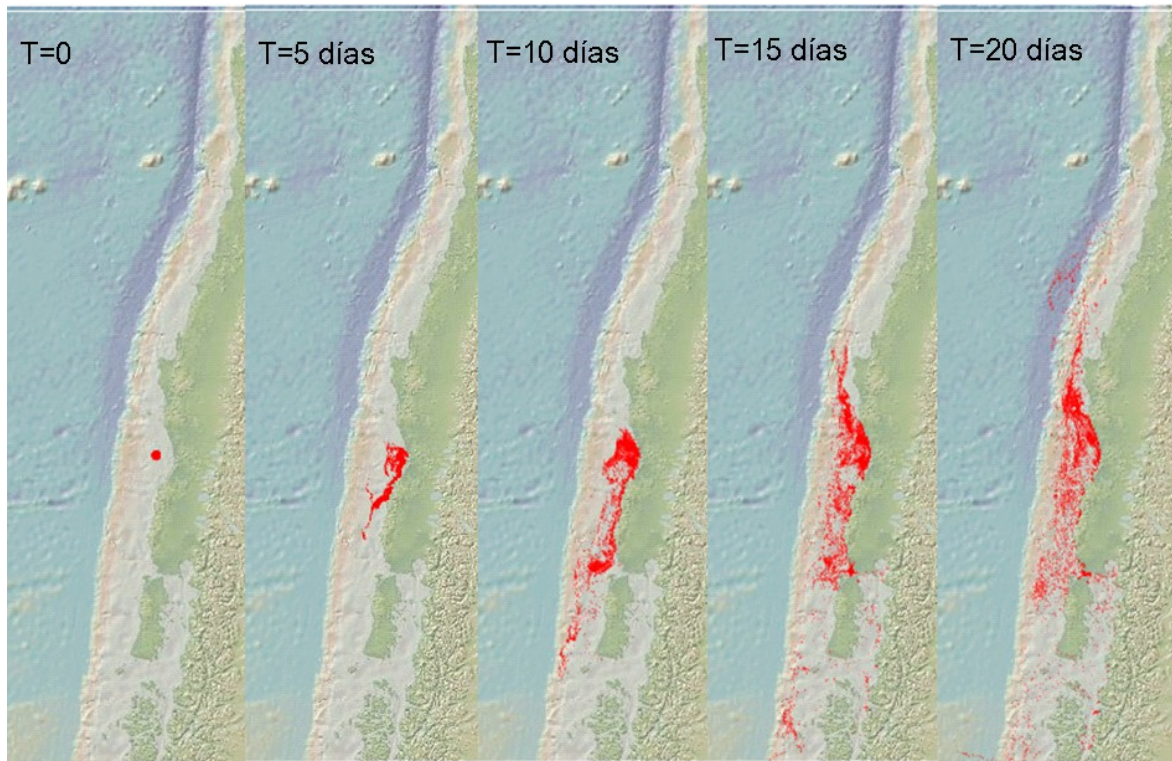
**Tabla 2.3.** Áreas de discretización de índice espacial biofísico para ser comparado con la información acústica.

| Areas | Limite inicio | Límite final | Nombre zona                            |
|-------|---------------|--------------|--|
| A1    | 34.000000°S   | 35.337205°S  | Sector Norte de Constitución           |
| A2    | 35.337205°S   | 36.139129°S  | Sur de Constitución a Cobquecura       |
| A3    | 36.139129°S   | 36.537590°S  | Sur de Cobquecura a Bahía Coliumo      |
| A4    | 36.537590°S   | 37.194631°S  | Sur de Bahía Coliumo a Golfo de Arauco |
| A5    | 37.194631°S   | 37.608309°S  | Sur de golfo de Arauco a Lebu          |
| A6    | 37.608309°S   | 38.816499°S  | Lebu a Puerto Saavedra                 |
| A7    | 38.816499°S   | 39.884154°S  | Sur de Puerto Saavedra a Corral        |
| A8    | 39.884154°S   | 40.300000°S  | Sur de Corral a Sur del río Bueno      |

## 2.3. RESULTADOS

### 2.3.1. *Un sistema biofísico acoplado potencialmente utilizable para abordar otros estudios relacionados a recursos marinos costeros*

Las salidas del modelo hidrodinámico SARCO\_CENSUR (“grilla Madre”), temperatura, salinidad, u, v, w y zeta, fueron acopladas “offline” con la plataforma ICHTHYOP (Lett *et al.*, 2008). El modelo biofísico hereda la estructura espacial de la grilla del modelo hidrodinámico, y es forzado por las variables de estado ambientales a la escala espacial en que estas han sido almacenadas (diaria y subdiaria para las grillas anidadas). La localización de cada uno de los individuos y sus propiedades son interpoladas en el espacio y en el tiempo. Así, el modelo biofísico genera trayectorias de movimiento de partículas y su evolución en el tiempo. Los individuos modelados son caracterizados por variables de estado a nivel del individuo tales como edad (días), estado, posición (latitud, longitud, profundidad), y estatus de sobrevivencia, entre otras. El modelo hidrodinámico fue exitosamente acoplado y se realizó una simulación de prueba para evaluar el desempeño del acoplamiento. Se realizó una simulación por 20 días donde se liberaron 10000 partículas en un área circular centrada en la posición 36.512°S y 73.512°W (Entre Lebu y Corral) con un radio de 10 km el primero de Enero de 1993. Se siguió la evolución del transporte de las partículas en el tiempo mediante un esquema Runge Kutta con un paso de tiempo interno (del modelo biofísico) de 6h (Figura 2.1). Para este ejemplo, el transporte de partículas muy costero en sentido norte y sur alcanzando en 20 días: hacia el sur, el mar interior de Chiloé y hacia el norte, la parte exterior del Golfo de Arauco. Además, se observa la formación de un remolino estacionario levemente más al sur de la zona de liberación que permanece por todo el período de simulación, identificándose una zona de retención importante en esta zona de desove-crianza (Figura 2.1). Una vez que el modelo hidrodinámico esté validado este sistema de modelación puede ser utilizado para realizar estudios de otros recursos de interés que coexistan en este hábitat.



**Figura 2.1.** Simulación Lagrangeana de partículas liberadas en un área circular centrada en los 36.512°S y los 73.512°W con un radio de 10 km. Se siguió la evolución del transporte por 20 días.

### ***2.3.2. Modelación del proceso de transporte de estadios tempranos de sardina común y su efecto sobre la variabilidad del reclutamiento, identificando regiones fuente y sumidero de juveniles y reclutas de sardina común en la zona centro-sur de Chile***

#### ***2.3.2.1. Revisión de la literatura de la historia de vida de sardina común***

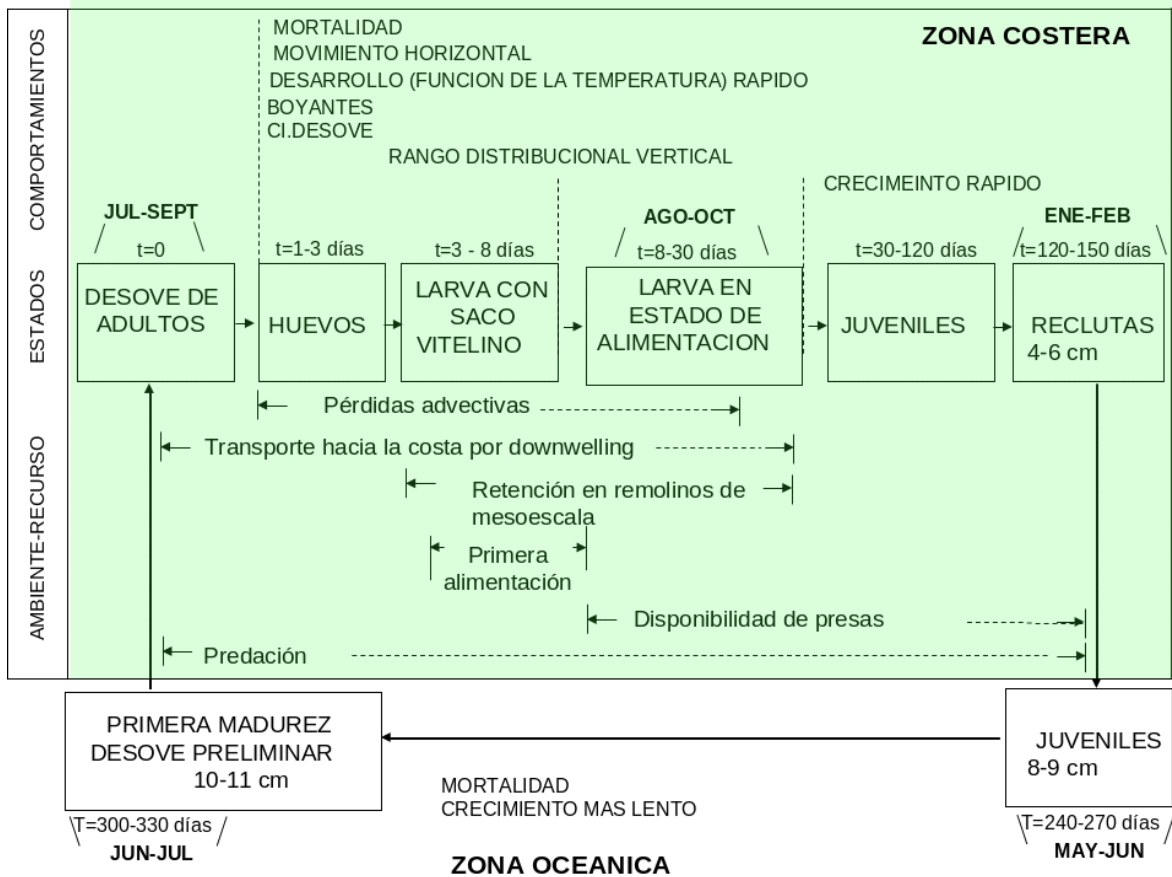
Se realizó una revisión de la información histórica existente de la sardina común por estado de desarrollo (Adulto, juvenil y huevos y larvas) con el fin de generar un modelo conceptual (Tabla 2.4). Para adultos se encontró un amplio espectro de estudios que van desde investigaciones acerca de la distribución, crecimiento población, relaciones con el ambiente, reproducción, fecundidad, área y época de desove, stock desovante, dinámica poblacional, biomasa y abundancia poblacional. Otros estudios que resaltan son los estudios de genética, estudios asociados a las zonas de surgencia, estudios pesqueros y de administración. Por otro lado, la información recopilada en función de los estadios juveniles se refiere a reclutamiento, mientras que la información acerca de estadios tempranos se asocia a la distribución, crecimiento, movilidad vertical y mortalidad del recurso.

**Tabla 2.4.** Revisión histórica de los estudios de sardina común.

| Estado de desarrollo | Estudios           | Item  | Estudios  |
|----------------------|--------------------|---|---|
| Adulto               | Distribución       | Ambiente  | Pequeño (2000)  |
|                      |                    | Poblacional                                       | Aguayo & Soto (1978), Barria <i>et al.</i> (1999)   |
|                      | Crecimiento        | Poblacional + ambiente                            | Cubillos <i>et al.</i> (2001)   |
|                      |                    | Poblacional en base a la longitud                 | Cubillos & Claramunt (2009)   |
|                      | Reproducción       | Área desove                                       | Castro <i>et al.</i> (1997)   |
|                      |                    | Época de desove                                   | Cubillos <i>et al.</i> (1999)   |
|                      |                    | Dinámica poblacional                              | Cubillos <i>et al.</i> (2009a)  |
|                      | Abundancia (Stock) | Fecundidad  | Cubillos <i>et al.</i> (2011a), Claramunt <i>et al.</i> (2001)  |
|                      |                    | Biomasa Poblacional                               | Cubillos <i>et al.</i> (1998a), Cubillos <i>et al.</i> (2002), Gatica <i>et al.</i> (2007), Artega <i>et al.</i> (2008), Niklitschek <i>et al.</i> (2007)   |
|                      | Stock Desovante    | Genética  | Galleguillos <i>et al.</i> (1995), Galleguillos <i>et al.</i> (1997)  |
|                      |                    | Distribución, abundancia                          | Sepúlveda <i>et al.</i> (2000), Cubillos <i>et al.</i> (2003), Bernal <i>et al.</i> (2004), Cubillos <i>et al.</i> (2005), Cubillos <i>et al.</i> (2006), Cubillos <i>et al.</i> (2007), Cubillos <i>et al.</i> (2008), Cubillos <i>et al.</i> (2009b), Cubillos <i>et al.</i> (2010), Cubillos <i>et al.</i> (2011b),  |
|                      | Bioquímico         | Poblacional                                       | Krautz <i>et al.</i> (2012)   |
|                      | Ecosistémico       | Zonas de surgencia (Humboldt y Benguela)          | Molones <i>et al.</i> (2005), Pedraza-García & Cubillos (2008)  |
|                      | Pesquerías         | Administración                                    | Serra (1978), Barria <i>et al.</i> (1998), Feltrin & Ernst (2010)   |
|                      |                    | Indicadores (abundancia, esfuerzo de pesca)       | Cubillos <i>et al.</i> (1998b), Gerlotto <i>et al.</i> (2004), Cubillos <i>et al.</i> (2009c)   |
| Hidroacústica        | Calibración        | Robotham <i>et al.</i> (2012)                     |   |
| Juvenil              | Reclutamiento      | Abundancia, distribución, ambiente y alimentación | Castillo <i>et al.</i> (1996), Castillo <i>et al.</i> (2000), Castillo <i>et al.</i> (2001), Castillo <i>et al.</i> (2002), Castillo <i>et al.</i> (2003a), Castillo <i>et al.</i> (2003b), Castillo <i>et al.</i> (2004), Castillo <i>et al.</i> (2005), Castillo <i>et al.</i> (2007), Castillo <i>et al.</i> (2009), Castillo <i>et al.</i> (2010), Castillo <i>et al.</i> (2012), |
|                      |                    | Abundancia, distribución y ambiente               | Núñez <i>et al.</i> (1996), Cubillos <i>et al.</i> (2002), Gomez <i>et al.</i> (2012)   |
| Huevos y larvas      | Distribución       | Abundancia estacional                             | Balbontín & Bernal (2005), Landaeta & Castro (2006), Landaeta <i>et al.</i> (2009), Soto <i>et al.</i> (2006a),   |
|                      |                    | Abundancia  | Castillo-Jordán <i>et al.</i> (2007), Hernández-Miranda <i>et al.</i> (2003), Landaeta <i>et al.</i> (2008), Soto <i>et al.</i> (2006b), Cubillos <i>et al.</i> (2007),   |
|                      | Mortalidad         | Abundancia, ambiente                              | Bustos <i>et al.</i> (2008), Soto-Mendoza <i>et al.</i> (2009), Soto-Mendoza <i>et al.</i> (2010), Thiel <i>et al.</i> (2007)   |
|                      |                    | Anomalías embrionarias                            | Llanos-Rivera <i>et al.</i> (2010), Llanos-Rivera <i>et al.</i> (2011), Vásquez <i>et al.</i> (2010)  |
|                      | Crecimiento        | Función de la temperatura                         | Cubillos <i>et al.</i> (2007)   |
|                      | Movimiento         | boyantes  | Espinoza (2010)   |

A partir de esta información recopilada se generó un modelo conceptual de la historia de vida de la sardina común (Figura 2.2). Los múltiples procesos biológicos y físicos relevantes generan un escenario de modelación muy complejo. Se carece de toda la información biológica y física como para implementar en esta fase un modelo de estas dimensiones. De tal manera, que se generó una simplificación del modelo basada en el estudio de transporte y dispersión basado en condiciones de desove realistas para aquellos años en que se dispone de información de distribución de huevos de

cruceros FIP.



**Figura 2.2.** Modelo conceptual de la sardina común, estadios de desarrollo, relaciones ambiente-recurso, comportamientos modelados.

### 2.3.2.2. Análisis retrospectivo de la información biológica que sustentará el sistema de modelación biofísica

En base a la revisión bibliográfica y a la simplificación del modelo de la Figura 2.2. se implementaron los comportamientos biológicos para el modelo, los cuales se describen los submodelos a continuación.

#### Submodelo de movimiento por estadio

Se incorporó un esquema de movimiento horizontal (lagrangeano) de huevos y larvas de sardina común, el cual se estima en el modelo biofísico usando una aproximación “Euler Forward” donde las posiciones de las partículas modeladas depende de las componentes horizontales de velocidad de la corriente ( $u, v$ ) y de las posiciones de las partículas en el paso anterior.

En relación al movimiento vertical de huevos y larvas de sardina común, la información es escasa o de muy baja resolución vertical (lances integrados). La información acerca de la distribución vertical nos permite sólo definir rangos distribucionales. Estos consistieron en la liberación de los productos

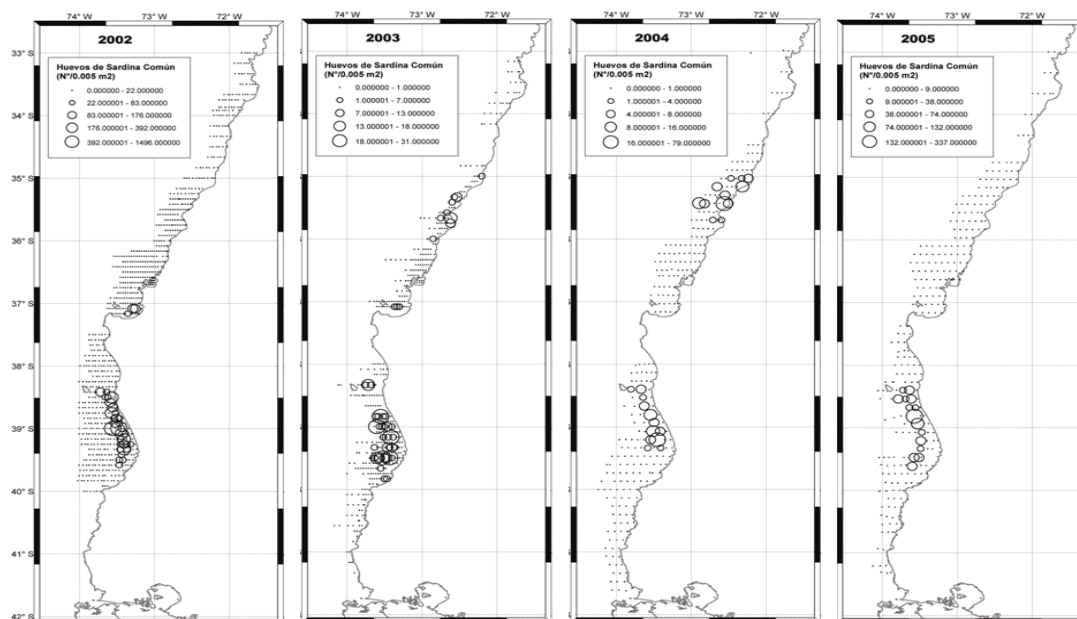
reproductivos de sardina común asociados a los primeros 70 de profundidad al inicializar el modelo. Posteriormente, las partículas son advectadas dentro de la columna de agua.

### Submodelo de distribución espacial del desove

Se definieron las condiciones iniciales espaciales del desove basado en los cruceros FIP del stock desovante de sardina común desarrollados en el:

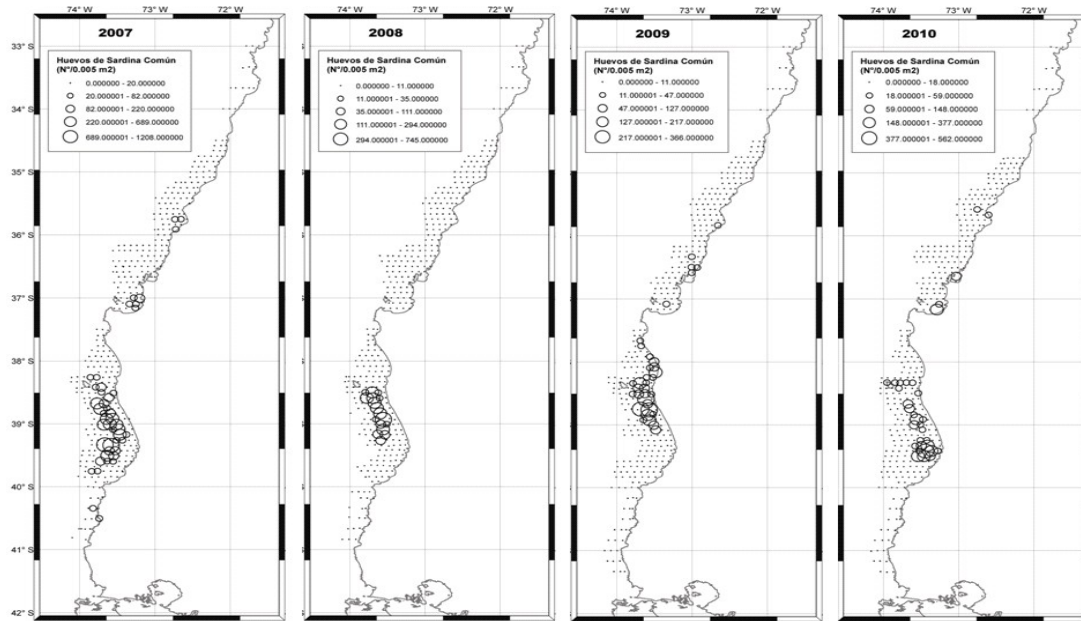
- 2002 : 15 agosto – 8 septiembre
- 2003 : 23 agosto – septiembre - 22 octubre
- 2004 : 21 agosto – 26 septiembre
- 2005 : 21 agosto – 22 septiembre
- 2007 : 28 agosto – 30 septiembre
- 2008 : 04 septiembre – 10 octubre
- 2009 : 02 septiembre – 10 octubre
- 2010 : 10 septiembre – 26 octubre

La distribución de huevos de sardina común muestra dos centros principales de desove asociados a la zona de Constitución al Golfo de Arauco y la zona comprendida entre Isla Mocha y Corral se mantiene durante los años en que se realizó el muestreo (Figura 2.3 y 2.4).



**Figura 2.3.** Distribución de huevos de sardina común durante cruceros FIP desarrollados entre Agosto y Octubre de cada año desde 2002-2005.

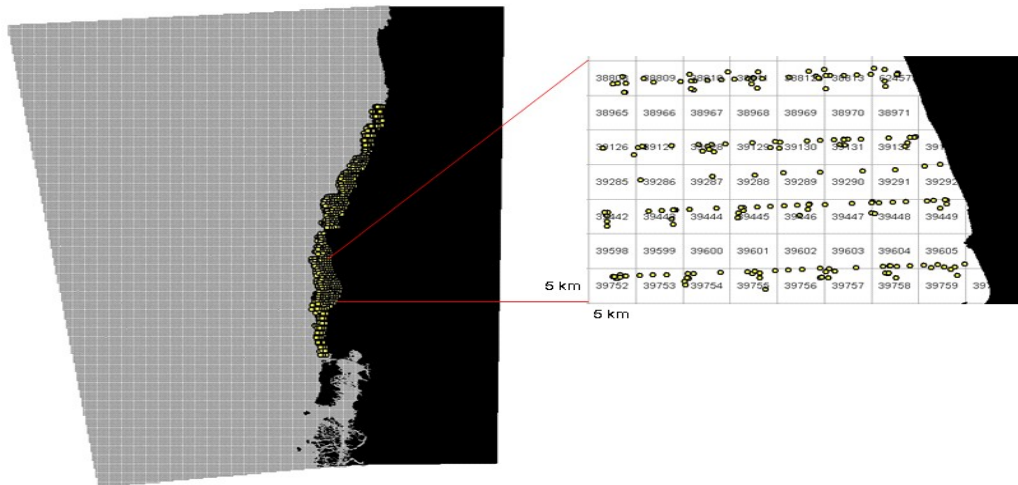
En base a esta información y utilizando el Sistema de Información Geográfico (SIG) se generaron las condiciones iniciales espaciales realistas. A continuación se detalla el procedimiento utilizado para generar celdas discretas que sirvieron como áreas de siembra de huevos en el proceso de simulación y posterior determinación de zonas de pre-reclutamiento.



**Figura 2.4.** Distribución de huevos de sardina común durante cruceros FIP desarrollados entre Agosto y Octubre de cada año desde 2007-2010 (excepto 2006).

*Condiciones espaciales realistas*

Inicialmente se definen las coordenadas latitudinales y longitudinales del área geográfica total que abarca el modelo y que contempla las zonas de desove conocidas y las zonas potenciales de reclutamiento (Figura 2.5).



**Figura 2.5.** Dominio total discretizado en celdas en el Sistema de Información geográfico que contempla las coordenadas del área geográfica total que abarca el modelo asociado a las zonas de desove conocidas (puntos amarillos para todos los años) y las zonas potenciales de reclutamiento.

Estas coordenadas latitudinales y longitudinales del área geográfica total que abarca el modelo y que contempla las zonas de desove conocidas (puntos amarillos para todos los años) y las zonas



potenciales de reclutamiento georeferenciado son transformadas a unidades UTM. Mediante las herramientas de *Spatial Analyst* de ARCGIS se generan áreas de 5x5 km. Se transforman estas áreas a polígonos utilizando el Toolbox “*Raster to Polygon*”, para posteriormente enumerar cada uno de los polígonos utilizando un índice único. Una vez generados los polígonos se determinaron las coordenadas de las intersecciones de los bordes vecinos con los polígonos más cercanos. Para ello se usa Toolbox “*Polygon to line*” y se genera una capa de líneas. Para identificar las coordenadas de las intersecciones de las líneas se usa el Toolbox “*Vertex to Point*” que usa la intersección de líneas y las transforma a puntos. Se le aplica el comando “*Add xy*” que agrega las coordenadas a cada vértice, que hereda el índice original de cada polígono. Se transforma de UTM a unidades geográficas. Se exporta la tabla con la información de los polígonos con sus índices y coordenadas. Esta información permite generar celdas de información que permitirán definir las condiciones iniciales de desove. Una vez generadas las celdas, se utilizó la data de los cruceros FIP de distribución de huevos de sardina (latitud, longitud, densidad de huevos cada año) y se integra espacialmente la información de densidad de huevos a la escala de las celdas generadas. Se normaliza la densidad de huevos totales de tal manera de tener el aporte de cada celda cada año en una escala de 0 a 1. En la Figura 2.6 (2002-2005) y 2.7 (2007-2010, excepto 2006), se observa la distribución espacial del desove normalizada y discretizada en celdas para cada año.

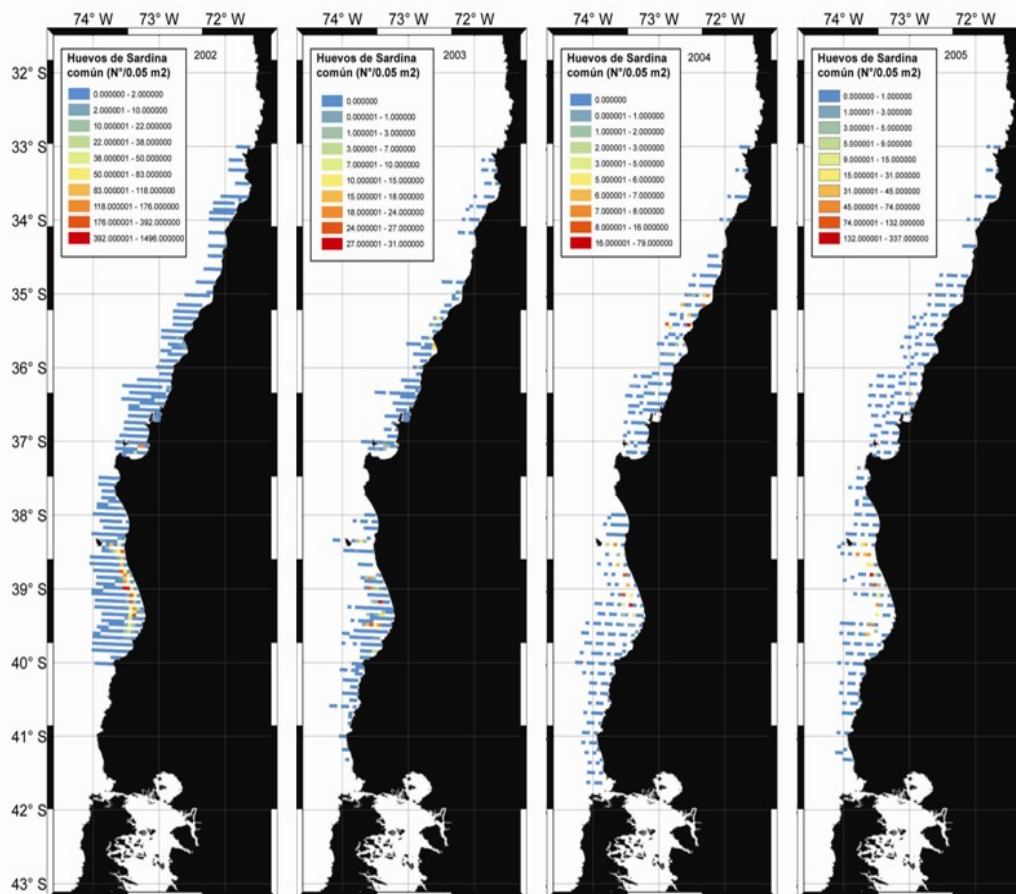


Figura 2.6. Distribución espacial del desove discretizada en celdas de 5 x 5 km para el año 2002-2005.

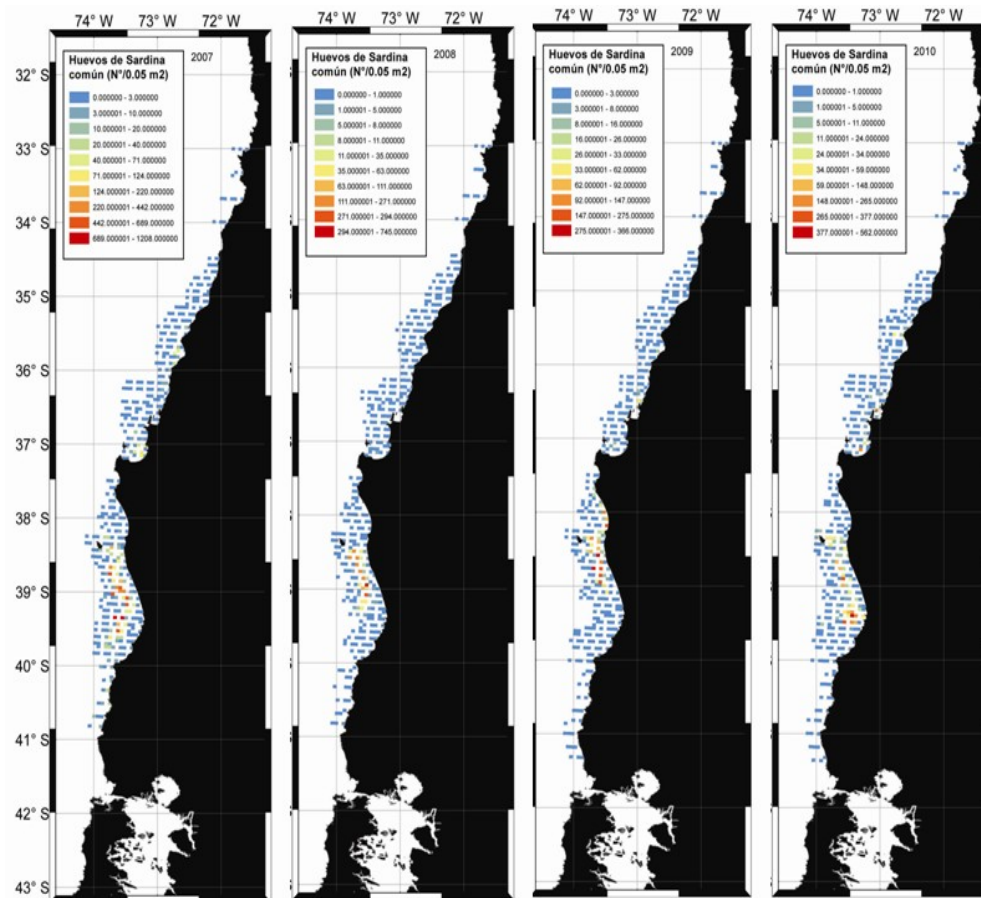
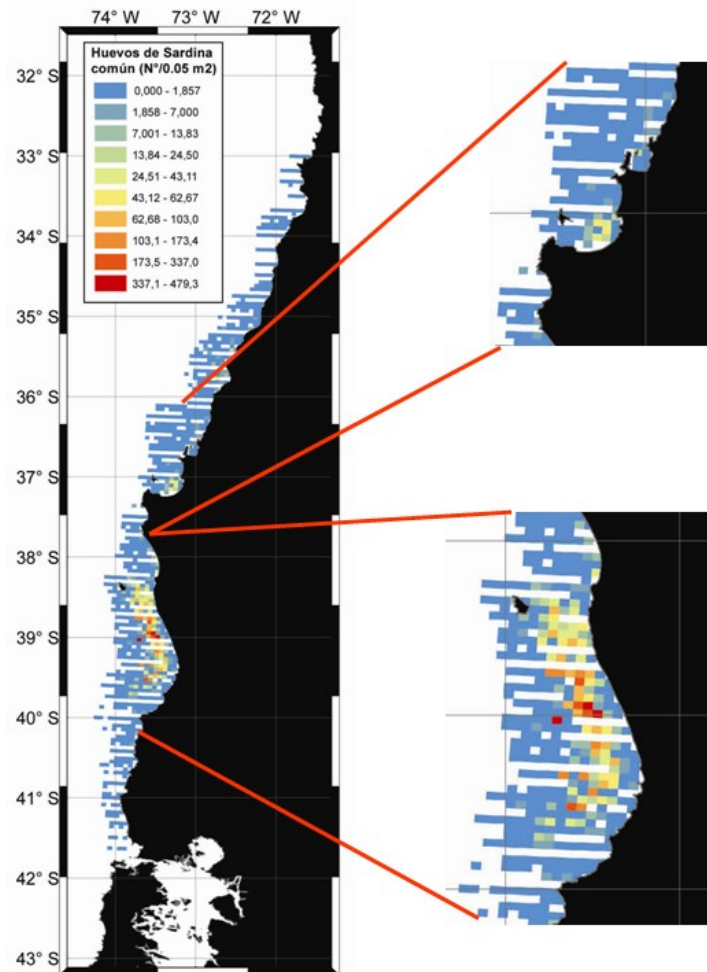


Figura 2.7. Distribución espacial del desove discretizada en celdas de 5 x 5 km para el año 2007-2010 (excepto 2010 y 2011).

### Condiciones espaciales históricas

Debido a que los índices de pre-reclutamiento que se requiere simular van desde el año 1993-actualidad, y los cruceros FIP del stock desovante sólo abarcan los años 2002-2010 (excepto 2006), se requiere utilizar un criterio para definir las condiciones iniciales espaciales para los años en que no existe información disponible. El criterio utilizado corresponde a la integración de la información correspondiente a todos los años en su conjunto (Figura 2.8).

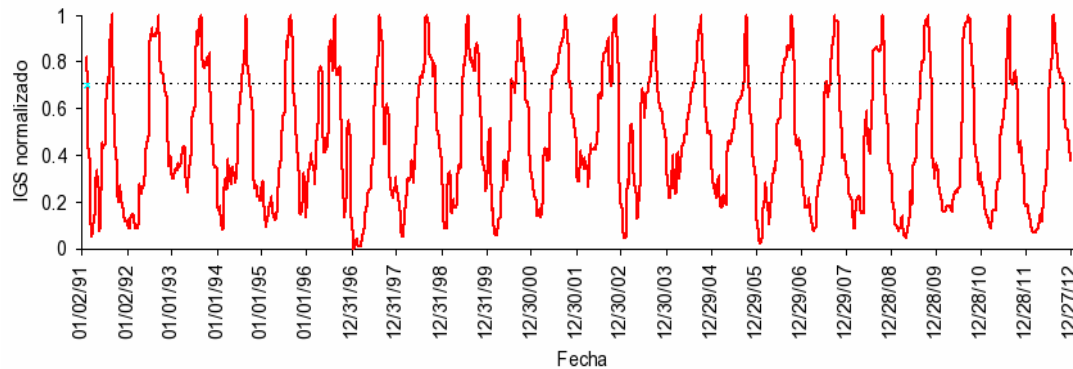


**Figura 2.8.** Distribución espacial del desove normalizada y discretizada en celdas de 5 x 5 km integrada para todos los años.

#### *Submodelo de sincronización del desove y abundancia*

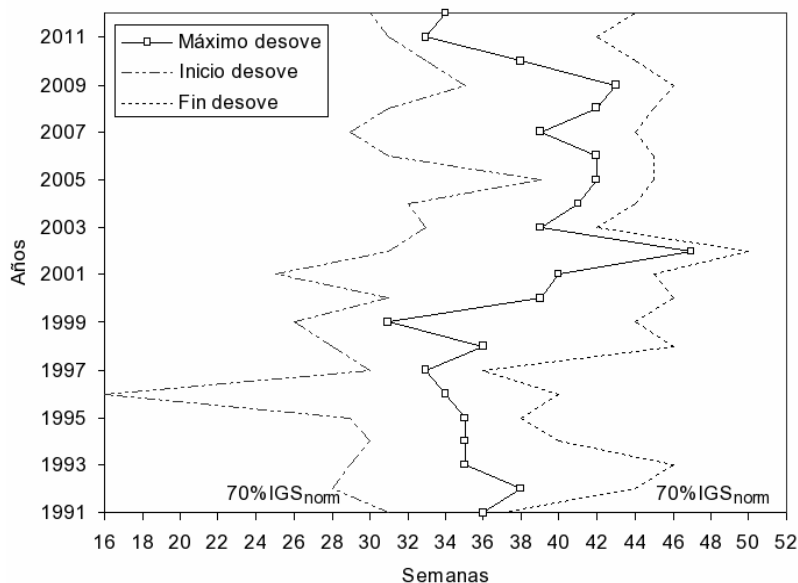
Se utilizó la base de datos en escala diaria proveniente de los muestreos biológicos reproductivos de sardina común que se realizan desde las lanchas artesanales y barcos industriales que se encuentran en actividad de pesca. Las limitantes de esta base de datos (Instituto de Investigación pesquera) del Índice Gonosodomático (IGS) de la sardina común (que abarca desde 1991-actualidad) se asocia principalmente a los vacíos temporales asociados a las épocas de veda. En relación a la veda de reclutamiento los vacíos no representarían un problema significativo, ya que la población se encuentra inactiva reproductivamente. Sin embargo, la veda reproductiva podría presentar problemas, ya que en este período no se estarían realizando muestreos (no hay pesca) y podría no estar siendo representado el estado reproductivo de manera certera por esta serie de datos. La base de datos de INPESCA debe ser complementada con la información proveniente de la actividad reproductiva reportada en los cruceros de MPH para sardina común en una próxima fase del proyecto. A partir de esta información se genera una serie de tiempo integrada a una escala semanal de las condiciones reproductivas de IGS y la proporción de hembras activas (estados macroscópicos de la gónada con 5 estados, 3-5 estado reproductivo). El objetivo es obtener el ciclo de la reproducción cada año, para lo cual se utilizó

análisis de series de tiempo. Inicialmente se integró la información diaria del IGS semanalmente. Se rellenaron las brechas de la serie utilizando análisis armónico. Se filtro la serie con una media móvil de 3 días para reducir la alta variabilidad de la señal. La serie completa de IGS fue normalizada (azul) con valores que fluctuaron entre 0 y 1, con su variabilidad anual (rojo). Desde esta serie se aislaron individualmente los máximos reproductivos, para posteriormente forzar el modelo biofísico y extraer para el año siguiente los índices de pre-reclutamiento Figura 2.9).



**Figura 2.9.** Serie de tiempo del índice gonadosomático (IGS) normalizado (azul) de sardina común a una escala semanal desde 1993-actualidad, y el ciclo anual del IGS (rojo).

Las condiciones temporales del modelo fueron seleccionadas en función del máximo del desove. Sin embargo, existe un alta variabilidad en la extensión del período del desove, así como un corrimiento temporal en el máximo del desove. En la Figura 2.10 se muestra la variación del índice gonadosomático normalizado al 70% (líneas punteadas) y los máximos del desove de sardina común (cuadrados) a una escala semanal desde 1993 al 2011. Desde 1991 a 1999 se observa una tendencia al adelantamiento en período del desove desde la semana 36 a la 31. Posteriormente se observa un retraso del máximo del desove desde la semana 31 en el año 1999 a la semana 47 en el año 2002. Entre los años 2002 a 2011 se observa una tendencia al adelantamiento de la estación de desove (Figura 2.10). El índice 70% IGS actualmente propuesto muestra una alta variabilidad, con una marcada tendencia al adelantamiento o retraso del máximo del desove. Sin embargo, este índice es calculado con muestras asociadas predominantemente a la región centro-sur de Chile. En próximas aproximaciones deberían incluirse una división por región de desove (centro-sur y norte).



**Figura 2.10.** Variación del índice gonadosomático normalizado al 70% (líneas punteadas) y máximos del desove de sardina común (cuadrados) a una escala semanal desde 1993-actualidad,

### *Índice de pre-reclutamiento espacial*

A partir de las simulaciones realizadas en base a condiciones temporales y espaciales promedio del desove se obtuvieron índices espaciales de reclutamiento para los períodos 1994 al 2012 (Figura 2.11 a 2.14) basadas en condiciones de desove tanto realistas como promedio, dependiendo de la información de cruceros FIP disponible (distribución de huevos de sardina común). Las simulaciones basadas en condiciones promedio desde 1993 al 2001 muestran una alta variabilidad en la proyección de las zonas de pre-reclutamiento (inferidas por el modelo) a pesar de las condiciones iniciales promedio fueron las mismas los años 1993-2001, y año 2006. Un rasgo característico de estas simulaciones es que se repite la alta retención observada desde Isla Mocha a Corral, y en menor grado en el Golfo de Arauco, especialmente los años forzados con condiciones iniciales del 1994, 1998, 2001, 2005, 2006, 2008 y 2010. (Figura 2.11-2.14) Excepcionalmente se observa retención al norte del Golfo de Arauco el año forzado con condiciones iniciales del 2004. Se observa un claro transporte desde zonas más al sur hacia el norte. Además, se observó un claro patrón de transporte desde la zona de Isla Mocha a Corral hacia el sur de Corral alcanzando en algunos años el mar interior de Chiloé, acumulándose individuos en el Seno de Reloncaví donde se retienen estas partículas (Figura 2.11-2.14). Los años 1994, 1997, 1999 y 2011 se observa este último patrón de transporte hacia el sur y/o retención de partículas en zonas del mar de Chiloé.

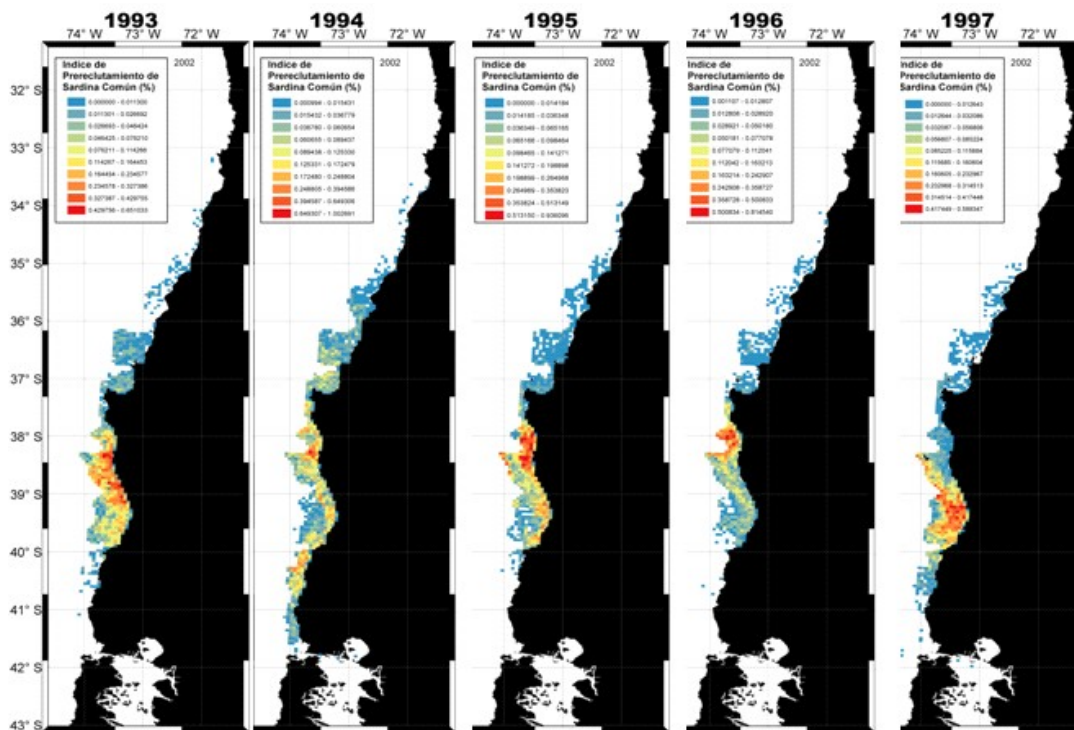


Figura 2.11. Índice de pre-reclutamiento espacial (biofísico) para los años 1994 a 1997 forzado con condiciones promedio en los años 1993-1997 respectivamente.

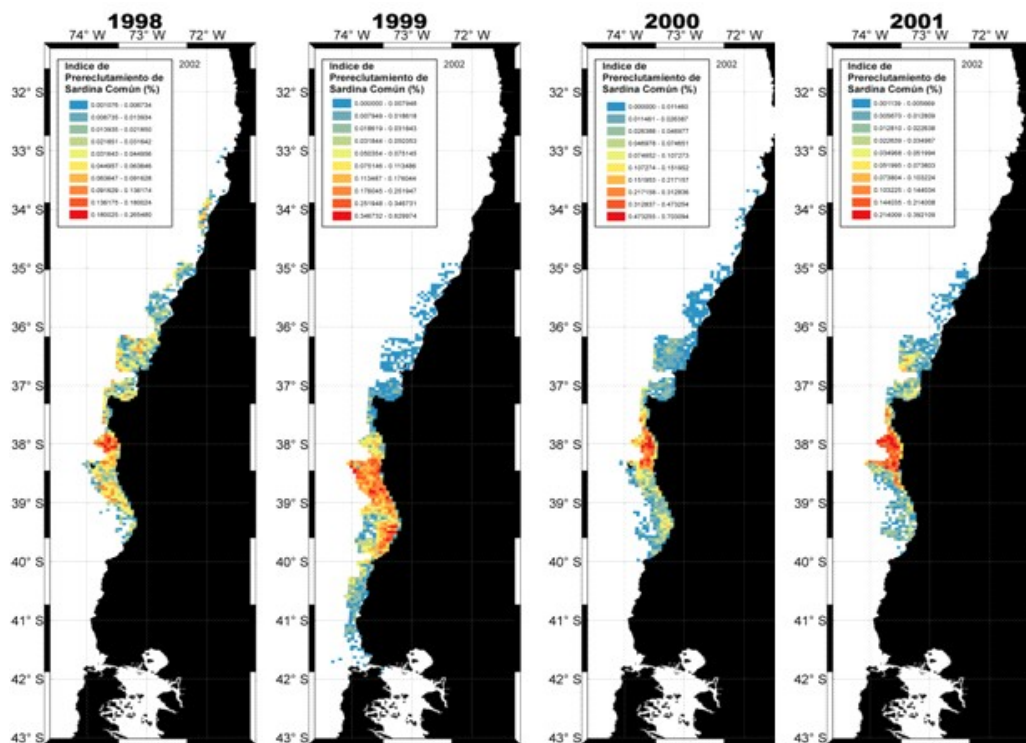
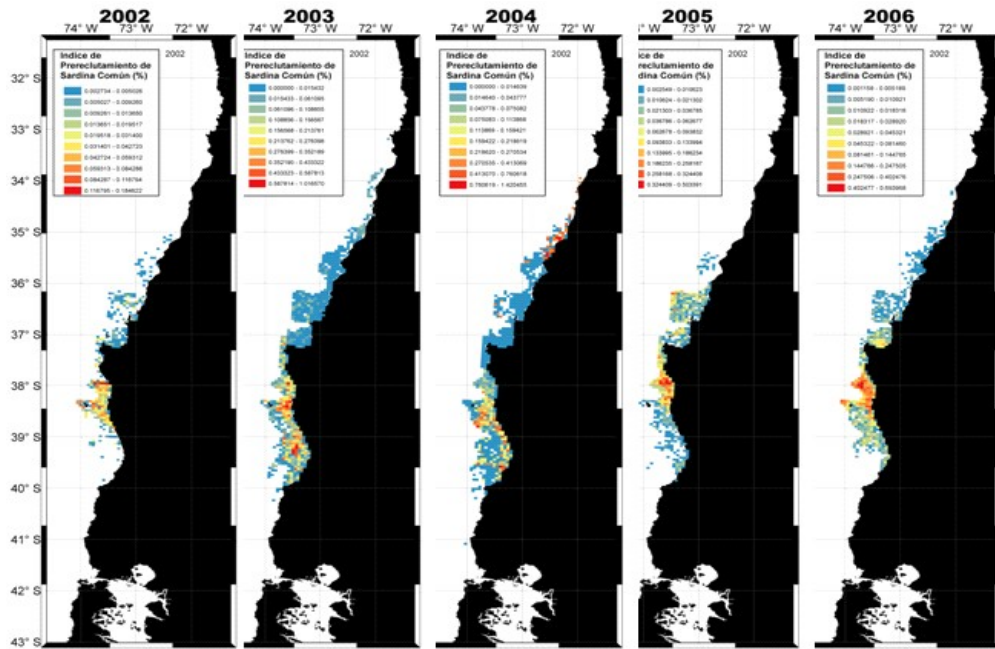
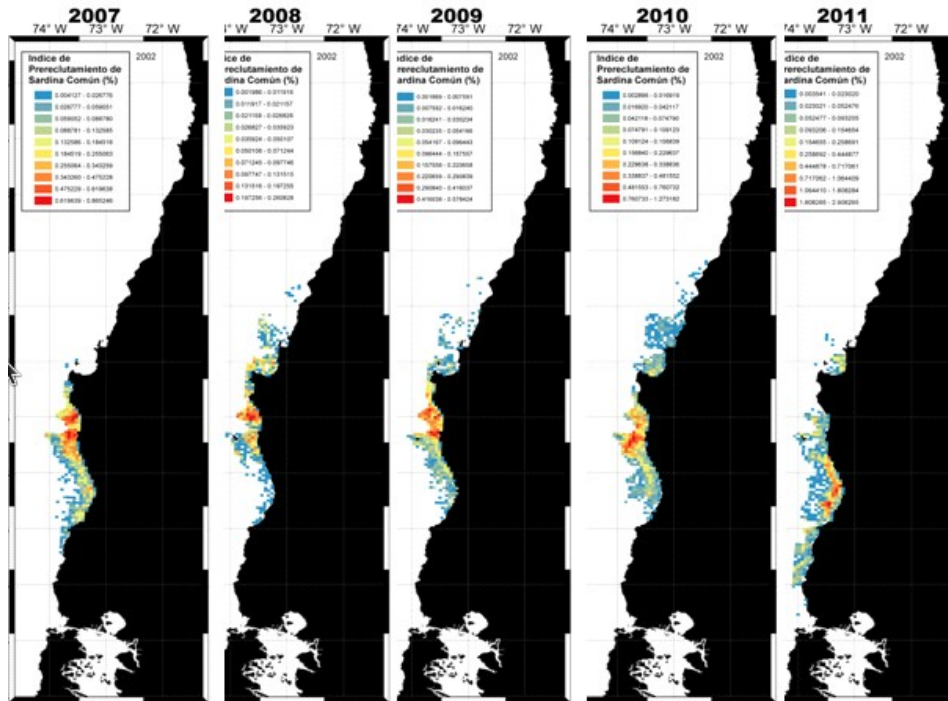


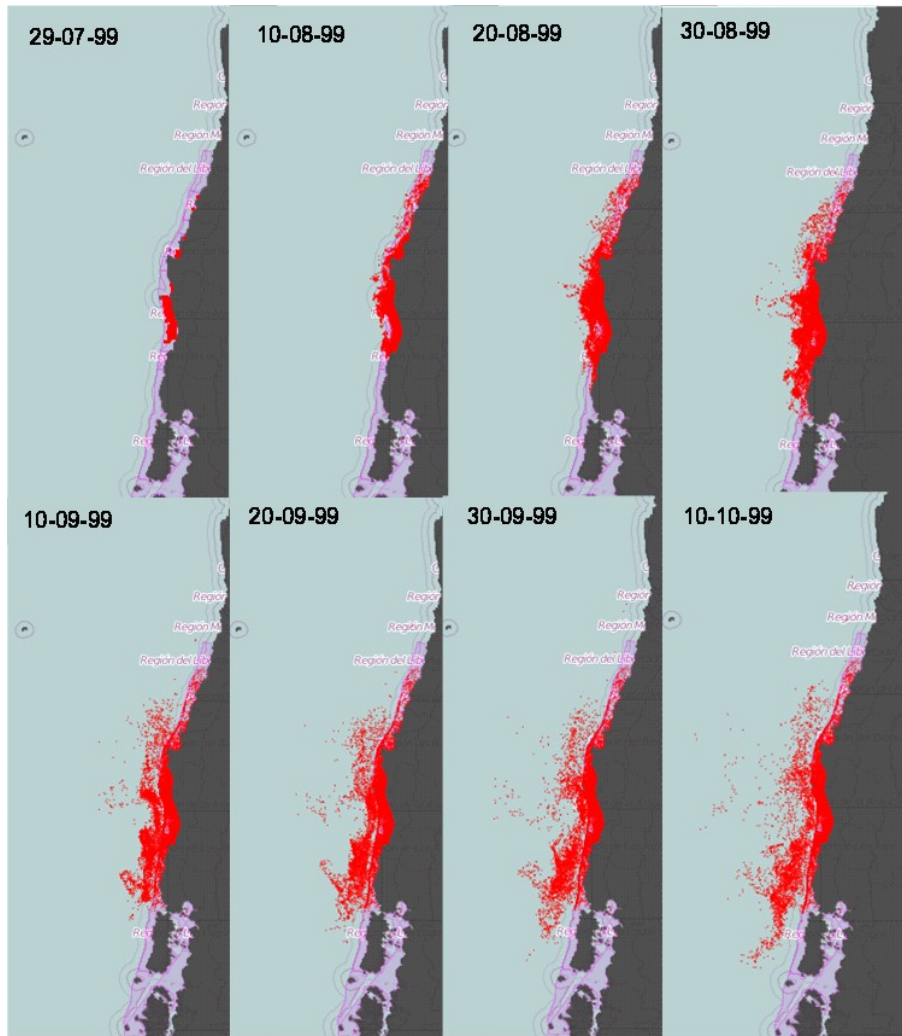
Figura 2.12. Índice de pre-reclutamiento espacial (biofísico) para los años 1999 al 2002 forzado con condiciones promedio en los años 1998-2001 respectivamente.



**Figura 2.13.** Índice de pre-reclutamiento espacial (biofísico) para los años 2003 al 2006 forzado con condiciones realistas (basadas en cruceros de distribución de huevos de sardina común) en los años 2002-2005 respectivamente. La última gráfica correspondiente a la proyección del índice de pre-reclutamiento del año 2007 fue forzada con condiciones promedio debido a la falta de información de campo ese año.

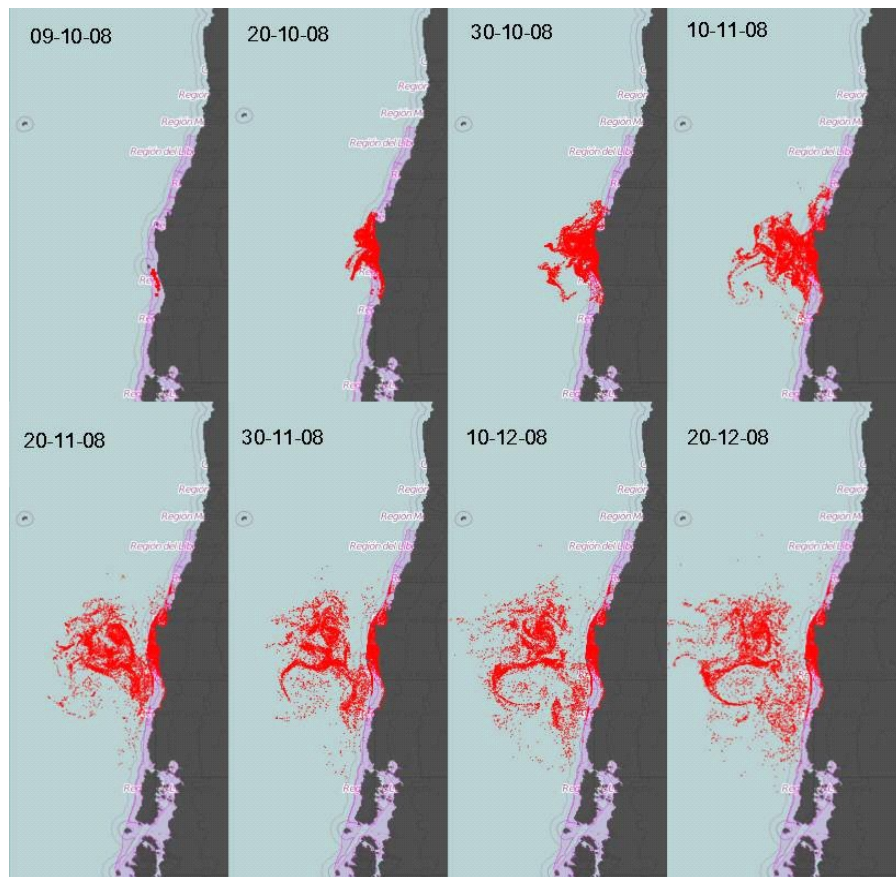


**Figura 2.14.** Índice de pre-reclutamiento espacial (biofísico) para los años 2008 al 2012 forzado con condiciones realistas (basadas en cruceros de distribución de huevos de sardina común) en los años 2007-2011 respectivamente.



**Figura 2.15.** Simulación del transporte, dispersión y retención de huevos de sardina común realizada bajo condiciones promedio de distribución de huevos del año 1999.

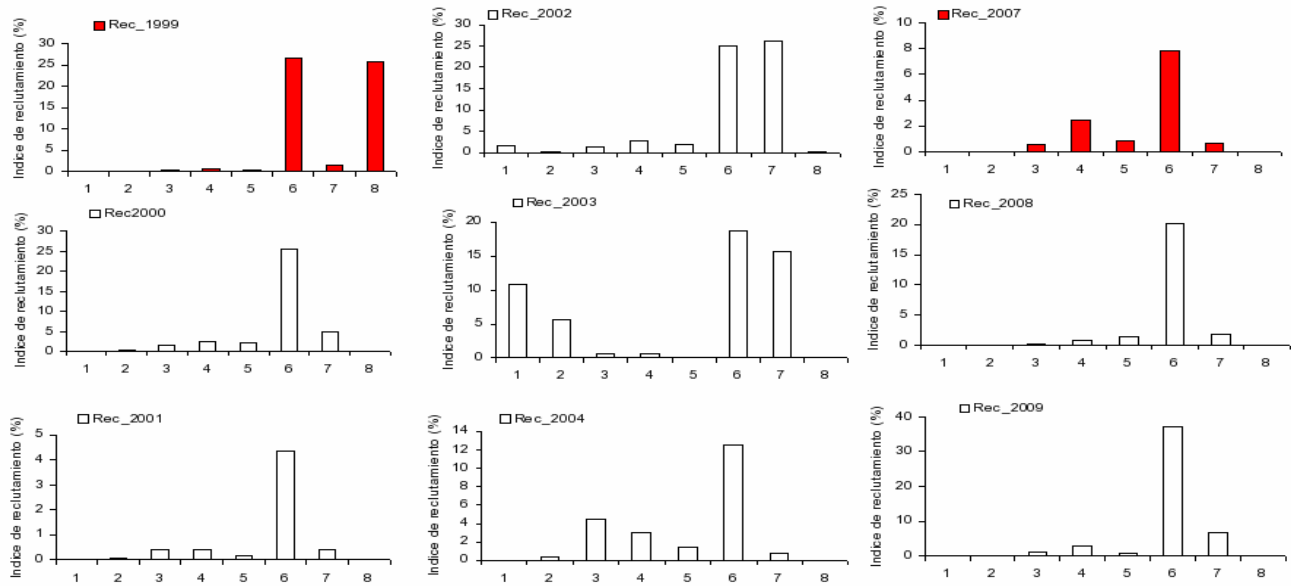




**Figura 2.16.** Simulación del transporte, dispersión y retención de huevos de sardina común realizada bajo condiciones promedio de distribución de huevos del año 2008.

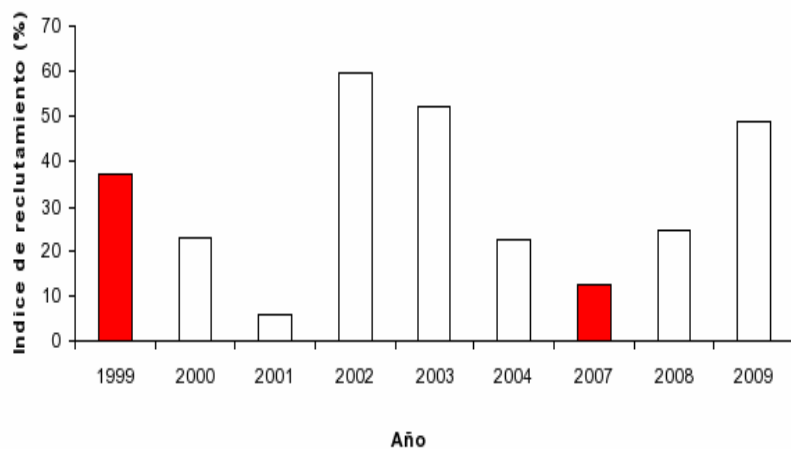
Las animaciones muestran una clara pérdida advectiva en toda la zona de estudio. La intensidad de la pérdida varía con la intensidad y dirección de las corrientes forzadas por el viento. Las observaciones de los patrones de transporte se corroboran en las animaciones realizadas los años de simulación forzados por condiciones iniciales del año 1999 y 2008. Los patrones muestran transporte y transferencia de zonas de crianza más al sur. Se corrobora el patrón de transporte hacia el sur, y la retención en la zona entre Isla Mocha y Corral, en el Golfo de Arauco y en el Seno de Reloncaví (Figura 2.15 y 2.16).

Se integró el resultado del índice de pre-reclutamiento espacial proveniente del modelo biofísico en función de las áreas definidas en la tabla 2.3. Esta información será contrastada con los índices espaciales generados a partir de la información hidroacústica del Capítulo 3. A continuación se muestran los índices espaciales discretizados provenientes de las estimaciones biofísicas.

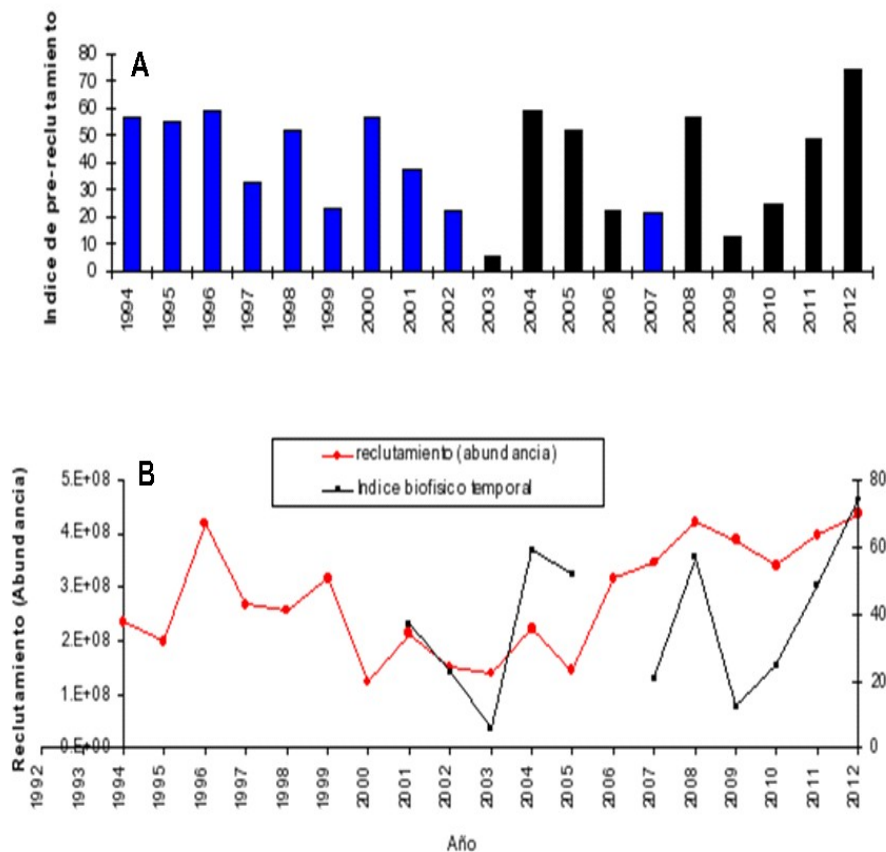


**Figura 2.17.** Integración del resultado del índice de pre-reclutamiento espacial proveniente del modelo biofísico en función de las áreas definidas en la tabla 2.3. Esta información fue contrastada con los índices espaciales generados a partir de la información hidroacústica del capítulo 3. Cada año indicado en la gráfica corresponde al índice de pre-reclutamiento (las fechas indican período de reclutamiento no de forzamiento del modelo).

Al comparar los resultados del índice de pre-reclutamiento espacial proveniente del modelo biofísico en función de los índices de reclutamiento de la acústica descritos en el capítulo 3 (Figura 3.7), se observó que existe una baja correspondencia con la información acústica especialmente en la zona al norte de Punta Lavapié (Figura 2.17). Existe una sobreestimación del aporte al índice del pre-reclutamiento en la zona 6 a 8, y una subestimación del aporte de las zonas 1 a 5. El índice de pre-reclutamiento integrado por área para el año 1999 y 2007 se basa en condiciones iniciales promedio, por lo que se excluyeron del análisis (gráficos de barra en rojo). Al comparar el índice de pre-reclutamiento biofísico integrado por año y por área con el índice acústico (Figura 3.8) integrado anualmente muestra que el indicador biofísico sobrestima los valores obtenidos para el año 2002 y 2003 (Figura 2.18)..



**Figura 2.18.** Integración anual del resultado del índice de pre-reclutamiento espacial proveniente del modelo biofísico en función de las áreas definidas en la tabla 2.3. En rojo años basados en condiciones iniciales promedio.



**Figura 2.19.** Integración del resultado del índice de pre-reclutamiento espacial proveniente del modelo biofísico en función de las áreas definidas en la tabla 2.3 y para cada año.

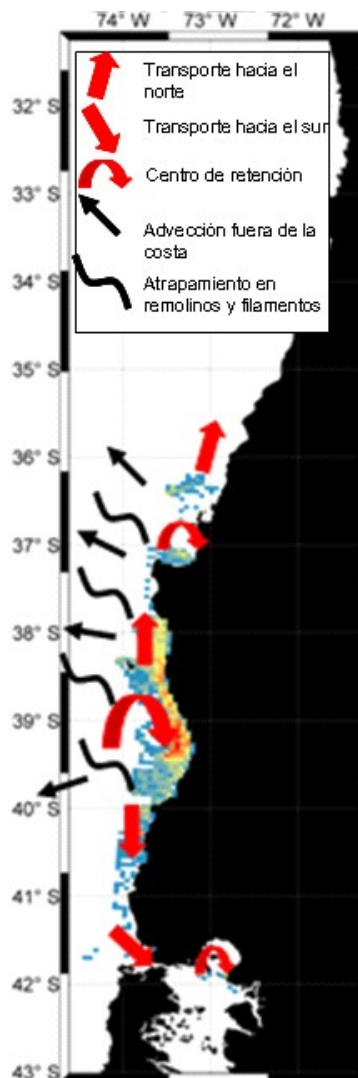
### *El índice de pre-reclutamiento temporal*

Temporalmente se estimó un índice de pre-reclutamiento biofísico. Las estimaciones de pre-reclutamiento realizadas entre los años 1994 a 2002 estuvieron basadas en condiciones espaciales de desove promedio (Figura 2.19 A). Las estimaciones realizadas entre el 2003 al 2012 (excepto el año 2006) se basaron en condiciones iniciales de desove (desde los cruceros FIP) (Fig.2.19 B). Se comparó este índice biofísico temporal con las salidas del modelo de evaluación de sardina común (serie de abundancia del reclutamiento, Figura 2.19 B) descrito ampliamente en el capítulo 3. Se observa coherencia en el aumento y disminución de ambas señales.

## **2.4 CONCLUSION - DISCUSION**

Se implementó un sistema de modelación biofísica utilizando un modelo hidrodinámico validado para la región centro-sur de Chile. Se realizaron simulaciones basadas en condiciones iniciales temporales y espaciales del desove desde los años 1993 a 2011. A partir de estas simulaciones se generaron índices de reclutamiento espaciales y temporales para los años 1994 al 2012. Los índices biofísicos espaciales fueron comparados con la señal hidroacústica obtenida en los cruceros RECLAS para los años 1999 a 2005, y 2007 a 2009. El índice biofísico subestimó la contribución de zonas al norte del Golfo de Arauco al reclutamiento, mientras que sobreestimó esta contribución en la zona sur. Sin embargo, el índice biofísico temporal mostró una buena correspondencia con la señal de reclutamiento proveniente de la evaluación de stock realizada por el instituto de investigación pesquera. La inconsistencia entre estos resultados puede deberse a que el proceso de reclutamiento modelado biofísicamente no fue cubierto en su totalidad. Se simuló el transporte y dispersión de huevos y larvas de sardina común basado sólo en los máximos del desove observado a través del IGS 70% y de las condiciones espaciales del desove observadas desde los cruceros FIP de MPDH (método de producción de huevos). Para futuros estudios se debería recrear en la simulación el proceso completo de desove en el tiempo. Como se observa en la Figura 2.10 existe una alta variación del índice gonadosomático normalizado al 70% con períodos previo y posterior al desove no siempre simétrico. El efecto acumulado de transporte y sobrevivencia bajo un escenario donde se evalúe la extensión real del desove considerando esas asimetrías, retrasos y adelantamiento del desove debe ser considerado en estudios futuros. Otro aspecto relevante es que el modelo biofísico implementado requiere la incorporación de otros procesos biológicos relevantes, como fuentes de mortalidad diferentes a las pérdidas advectivas (predación, inanición etc.), así como mecanismos de movimiento que podrían generar cambios a los patrones dispersivos observados en las simulaciones (boyantez del huevo, migración vertical y natación). Sin embargo, el entendimiento de estos procesos requiere el desarrollo de estudios que apunten a mejorar nuestro conocimiento de la historia de vida temprana de sardina común en la región centro sur de Chile. La consistencia temporal que muestra la señal del índice biofísico para los años basados en condiciones realistas y el hecho de que el modelo hidrodinámico muestra patrones realistas en comparación con datos hidrográficos y satelitales, nos dan confianza en que el modelo biofísico proporciona mecanismos pasivos de transporte que caracterizan el sistema. En este sentido, se debe recalcar que este estudio hace una contribución hacia los mecanismos y vías de transporte pasivo, identificando un claro transporte y conectividad desde zonas de desove más al sur hacia el norte, con la identificación de zonas de alta retención potencial como es la zona comprendida entre Isla Mocha y Corral, en el Golfo de Arauco y en el Seno de Reloncaví. Además, se identifica un transporte al sur de Corral con claro transporte hacia el Seno de Reloncaví y el mar interior de Chiloé. Se requiere evaluar si esa contribución es significativa o no en términos de la

sobrevivencia de las cohortes transportadas hacia esas zonas de reclutamiento potencial y el establecimiento de subpoblaciones o no locales en tales zonas. En la figura 2.20 se presenta un nuevo modelo conceptual hipotético que debería ser contrastado con nueva información que permita ponerla a prueba. Los aspectos más relevantes muestran al área de Isla Mocha a Corral como una zona altamente retentiva, secundariamente Golfo de Arauco y Seno de Reloncaví. Se observa un claro transporte en dirección Norte. Sin embargo, existe claramente un transporte al sur inclusive llegando al mar interior de Chiloé con una zona de retención importante en el Seno de Reloncaví (Figura 2.20). Hay altas pérdidas advectivas hacia fuera de la costa, las cuales tienen una alta variabilidad interanual. La fase I de implementación de modelos acoplados biofísicos está completa. Esfuerzos deberían ser puestos en el refinamiento de la biología del modelo y el establecimiento/validación del modelo biofísico y la operatividad como una herramienta complementaria de apoyo a la administración para establecer proyecciones para el siguiente año.



**Figura 2.20.** Modelo conceptual de transporte, dispersión, conectividad y retención de estadios tempranos de sardina común de la región centro-Sur de Chile basado en 19 años de simulaciones biofísicas.

## 2.5 REFERENCIAS

- Arrizaga, A. 1981. Nuevos antecedentes biológicos para la sardina común, *Clupea (Strangomera) bentincki* Norman 1936. Bol. Soc. Biol. Concepción, 52: 5-66.
- Arcos, D., Cubillos, L., Núñez, S. 2004. Efectos de El Niño 1997-1998 sobre las principales pesquerías pelágicas de la zona centro-sur de Chile. In: EL Niño-La Niña 1997-2000, sus efectos en Chile. S. Avaria, J. Carrasco, J. Rutllant y E. Yañez (eds.). Comité Oceanográfico Nacional (CONA), Valparaíso, Chile.
- Arteaga, M., Cubillos, L.A. 2008. Análisis de los cambios de abundancia de sardina común (*Strangomera bentincki*): estructura año calendario versus año biológico. Lat. Am. J. Aquat. Res., (36)2: 137-151. DOI: 10.3856/vol36-issue 2-fulltext-1.
- Bakun, A. 1996. Patterns in the ocean: ocean processes and marine population dynamics. Cal. Sea Grant System, NOAA and Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, La Paz, BCS Mexico.
- Bartsch J, Coombs SH. 2004. An individual-based model of the early life history of mackerel (*Scomber scombrus*) in the eastern North Atlantic, simulating transport, growth and mortality. Fish Oceanogr 13:365-379.
- Brander, KM. 2003. What kinds of fish stock predictions do we need and what kinds of information do we need to help us make better predictions? Scientia Marina, 67(Supp.1): 21-33.
- Dalgaard, P. 2008. Introductory Statistics with R. Introductory Statistics with R. Series: Statistics and Computing. 2nd ed., 2008, XVI, 364 p. SpringerLink. ISBN 978-0-387-79053-4.
- Castillo, J., Barbieri, M.A., Espejo, M., Catasti, V. 2001. Evaluación acústica del reclutamiento de anchoveta y sardina común en la zona centro-sur, año 2000. Informe Final FIP 2000-09. Informes Técnicos FIP – IT/2000-09, 151 p.
- Castillo, J., E. Molina, F. Leiva, S. Núñez, S. Vásquez, E. Navarro. 2008. Evaluación hidroacústica del reclutamiento de anchoveta y sardina común entre la V y X Regiones, año 2008. Informe de Avance proyecto FIP 2007-04, 62 p+anexos Inst. Fom. Pesq. Valparaíso, Chile
- Castillo, J., Saavedra, A.G., Leiva, F., Reyes, H., Pizarro, M., Espindola, F., Lang, C., Catasti, V., San Martín, M., Keiva, B., Hernández, C., Molina, E., Cerna, F., López, A., Nuñez, S., Valenzuela, L., Vásquez, S. 2010. Evaluación hidroacústica del reclutamiento de anchoveta y sardina común entre la V y X Regiones, año 2010, Informe Técnico FIP2009-04. 309pp, + anexos.
- Castillo-Jordán, C., Cubillos, L.A., Paramo, J. 2007. The spawning spatial structure of two co-occurring small pelagic fish off central southern Chile in 2005. Aquatic Living Resources 20: 77-84.
- Castillo-Jordán, C, Cubillos, L.A, Navarro, E. 2010. Inter-cohort growth rate changes of common sardine (*Strangomera bentincki*) and their relationship with environmental conditions off central southern Chile. Fisheries Research, 105:228-236.
- Castro, L, Quiñones, R, Arancibia, H, Figueroa, D, Roa, R, Sobarzo, M, Retamal, M. 1997. Areas de desove de anchoveta y sardina común, en la zona central, Informe final, Fondo de Investigación Pesquera, proyecto 96-11. Universidad de Concepción, Departamento de Oceanografía.
- Claramunt, G., Roa, R., Cubillos, L. 2003. Estimating daily spawning fraction using the gonadosomatic index: application to three stocks of small pelagic fish from Chile. In: Modern approaches to assess maturity and fecundity of warm-and cold-water fish and squids. O.S. Kjesbu, J.R. Hunter and P.R. Witthames (Eds.) IMR series Fisken og Havet 12, p. 43-50.
- Cubillos, L., Arancibia, H. 1993. On the seasonal growth of common sardine (*Strangomera bentincki*) and anchovy (*Engraulis ringens*) off Talcahuano, Chile. Revista de Biología Marina 28(1):43-49.

- Cubillos, L.A. 1999. Estrategia reproductiva, crecimiento y reclutamiento de *Strangomera bentincki* (Norman, 1936) en el sistema de surgencia de la zona centro-sur de Chile. Tesis de Magíster en Oceanografía, Escuela de Graduados, Universidad de Concepción, 180 pp.
- Cubillos, L., M. Canales, D. Bucarey, A. Rojas y R. Alarcón. 1999. Época reproductiva y talla media de primera madurez sexual de *Strangomera bentincki* y *Engraulis ringens* en el período 1993-1997, zona centro-sur de Chile (1993-97). Investigaciones Marinas, Valparaíso 28:73-85.
- Cubillos, L.A., Arcos, D.F., Bucarey, D.A., Canales, M. 2001. Seasonal growth of small pelagic fish off Talcahuano (37°S-73°W), Chile: a consequence of their reproductive strategy to seasonal upwelling?. Aquatic Living Resources 14(2): 115-124.
- Cubillos, L.A., Arcos, D. 2002. Recruitment of common sardine (*Strangomera bentincki*) and anchovy (*Engraulis ringens*) off central-south Chile in the 1990s and the impact of the 1997-1998 El Niño. Aquat. Living Resour. 15 (2002): 87-94.
- Cubillos, L., Nuñez, S., Ruiz, P., Véjar, F., Oliva, J., Claramunt, G., Herrera, G., Pizarro, P., Muñoz, Y., Díaz, E., Oyarzún, C., Valero, C., Daza, E., Leal, E., Castro, L., Nuñez, S., Veas, R., Rebolledo, H., Pino, C., Ruiz, P., Sepúlveda, A., Alarcón, C. 2003. Evaluación del stock desovante de anchoveta y sardina común entre la V y X Región, año 2002. Informe Final FIP 2002-14, 127 p.
- Cubillos, L., Castro, L., Oyarzún, C. 2005. Evaluación del stock desovante de anchoveta y sardina común entre la V y X Región, año 2004. Informe Final FIP 2004-03, 136 p.
- Cubillos, L., Castro, L., Claramunt, G., Oyarzún, C. 2006. Evaluación del stock desovante de anchoveta y sardina común entre la V y X Regiones, año 2005. Informe Final FIP 2005-02.
- Cubillos, L.A., Ruiz, P., Claramunt, G., Gacitúa, S., Nuñez, S., Castro, L., Riquelme, K., Alarcón, C., Oyarzún, C., Sepúlveda, A. 2007. Spawning, daily egg production, and spawning stock biomass estimation for common sardine (*Strangomera bentincki*) and anchovy (*Engraulis ringens*) off central southern Chile in 2002. Fisheries Research 86 (2007): 228-240.
- Cubillos, L., Castro, L., Claramunt, G., Oyarzún, C. 2008. Evaluación de stock desovante de anchoveta y sardina común entre la V y X Regiones, año 2007. Informe Final FIP 2007-06.
- Cubillos, L.A., Castro, L., Claramunt, G., Navarro, E., Alarcón, C., Zúñiga, M., Castillo-Jordán, C., Pedraza, M., Rebolledo, H. 2010. Evaluación del stock desovante de anchoveta y sardina común en la zona centro-sur, año 2009. Informe Final Proyecto FIP 2009-08. Agosto de 2010.
- Cubillos, L.A., Castro, L. & G. Claramunt. 2011. Evaluación del stock desovante de anchoveta y sardina común en la zona centro-sur, año 2010. Informe Final Proyecto FIP 2010-02. Diciembre de 2011.
- Di Lorenzo, E., 2003: Dynamics of the Southern California Current. *PhD thesis*, defended at SIO/UCSD on April 28. [ [PDF](#) ]
- Ebisuzaki, W. 1997. Method to Estimate the Statistical Significance of a Correlation When the Data Are Serially Correlated. Journal of climate, 10:2147-2153.
- Espinoza, R. 2010. Variación ontogenética en la densidad de huevos de anchoveta *Engraulis ringens* en las zonas de desove de la VIII región de Chile. Tesis para optar al título de Biología Marina con Mención en pesquerías y acuicultura. Depto Oceanografía, Universidad de Concepción.
- Feltrin, M., Ernst, B. 2010. Inter-cohort growth variability and its implication for fishery management of the common sardine (*Strangomera bentincki*) stock off the coast of south-central Chile. Fisheries Research 106: 368-377.
- Fournier, D.A., Skaug, H.J., Ancheta, J., Iannelli, J., Magnusson, A., Maunder, M.N., Nielsen, A., Sibert, J. 2012. AD Model Builder: using automatic differentiation for statistical inference of highly parameterized complex nonlinear models. Optim. Methods Softw. 27:233-249.

- Fulton, E.A., Smith, A.D.M., Smith., D.C. 2007. Alternative management strategies for southeast Australian commonwealth fisheries: Stage 2: Quantitative management strategy evaluation. Technical report, CSIRO Marine and Atmospheric Research, Hobart, Tasmania.
- Gómez, F. 2008. Variabilidad ambiental y pequeños pelágicos de la zona norte y centro-sur de Chile. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias con mención en Pesquerías. Universidad de Concepción, 113 páginas.
- Gong, D., Wang, S., 1999. Definition of Antarctic Oscillation index. *Geophysical research letters*. 26(4):459-462. doi:10.1029/1999GL900003
- Heath MR. 1992. Field investigations of the early life history stages of marine fish. *Advances in Marine Biology*. 28: 1-174.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M. (1996). The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(3), 437–471. doi:10.1175/1520-0477.
- Large, W. G. J. C. McWilliams, and S. C. Doney, 1994: Oceanic vertical mixing: A review and a model with a nonlocal boundary layer parameterization. *Rev. Geophys.*, 32, 363–403.
- Lett, C., Verley, P., Mullon, C., Parada, C., Brochier, T., Penven, P., Blanke, B. 2008. A Lagrangian tool for modelling ichthyoplankton dynamics. *Environment Modelling & Software*. 23(9):1210-1214.
- Marchesiello, P., McWilliams, J. C., & Shchepetkin, A. F. (2001). Open boundary conditions for long-term integration of regional oceanic models. *Ocean Modelling*, 3(1), 20.
- Köster FW, Hinrichsen H-H, Schnack D, St. John MA, MacKenzie BR, Tomkiewicz J, Möllmann C, Kraus G, Plikshs M, Makarchouk A, Aro E. 2003. Recruitment of Baltic cod and sprat stocks: identification of critical life stages and incorporation of environmental variability into stock–recruitment relationships. *Scientia Marina*, 67(Supp.1): 129-154
- MacKenzie, B. R., Horbowy, J., Köster, F. W. 2008. Incorporating environmental variability in stock assessment - predicting recruitment, spawner biomass and landings of sprat (*Sprattus sprattus*) in the Baltic Sea. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 65: 1334-1341.
- Marchesiello, P., McWilliams, J., Shchepetkin, A. 2003. Equilibrium Structure and Dynamics of the California Current System. *J. of physical Oceanography*. 33: 753-783.
- Mann, M. E., Park, J. 1999. Oscillatory spatiotemporal signal detection in climate studies: A multiple-taper spectral domain approach. *Adv. Geophys.* 41, 1– 131.
- Maunder, M.N., Watters, G.M. 2003. A general framework for integrating environmental time series into stock assessment models: model description, simulation testing, and example. *Fish. Bull.* 101:89-99.
- Megrey, B., Hinckley, S. 2001. Effect of turbulence on feeding of larval fishes: a sensitivity analysis using an individual-based model. *ICES Journal of Marine Science*, 58: 1015–1029. doi:10.1006/jmsc.2001.1104.
- Parada, C., Van Der Lingen, C., Mullon, C., Penven, P. 2003. Modelling the effect of buoyancy on the transport of anchovy (*Engraulis capensis*) eggs from spawning to nursery grounds in the southern Benguela: an IBM approach. *Fisheries Oceanography* 12 (3): 170-184.
- Parada, C., Mullon, C., Roy, C., Fréon, P., Hutchings, L., Van der Lingen, C. 2008. Does vertical migratory behaviour retain fish larvae onshore in upwelling ecosystems? A modeling study of anchovy in the southern Benguela. *African Journal of Marine Science* 30 (3), 437-452.
- Parada, C., Núñez, S., Correa-Ramírez, M., Vásquez, S., Sepúlveda, A., Hormazabal, S., Combes, V. and Di Lorenzo, E. 2010a. Advances in biophysical modeling of Chilean jack mackerel in the South Pacific. *ICES CM 2010/L:20*. 32 p.



- Parada, C., Armstrong, D., Ernst, B., Hinckley, S., Orensanz, J.M. (Lobo). 2010b. Spatial dynamics of snow crab (*Chionoecetes opilio*) in the Eastern Bering Sea-Putting together the pieces of the puzzle. *Bulletin of Marine Sciences*. 86(2):413-437. (ISI).
- Parada, C., Colas, F., Soto-Mendoza, S., Castro, L. 2012. Effects of across- and alongshore transport seasonal variability of anchoveta (*Engraulis ringens*) larvae on modeled-based pre-recruitment indices off central Chile. *Progress in Oceanography* (92-95). doi:10.1016/j.pocean.2011.07.015.
- Penven, P., Debreu, L., Marchesiello, P., McWilliams, J. C. 2006. Evaluation and application of the ROMS 1-way embedding. procedure to the central California upwelling system. *Ocean Modelling*.12(1-2): 157–187.
- Penven, P., Debreu, L., Marchesiello, P., McWilliams, J.C., 2006. Application of the ROMS embedding procedure for the Central California Upwelling System. *Ocean Modelling* 12, 157-187.
- Peliz, A., Dubert, J., Haidvogel, D. 2003. Subinertial Response of a Density-Driven Eastern Boundary Poleward Current to Wind Forcing. *J. of Physical Oceanography* 33: 1633-1650.
- Planque, B., Fox, C., Saunders, MA, Rockett, P. 2003. On the prediction of short term changes in the recruitment of North sea cod (*Gadus morhua*) using statistical temperature forecasts. *Scientia Marina*, 67(Supp.1):211-218.
- Porobic, J., Parada, C., Ernst, B., Hormazábal, S., Combes, V. Aceptado. Modelación de la conectividad de las subpoblaciones de la langosta de Juan Fernández a través de un modelo biofísico. LA-JAR.
- Shchepetkin, A. F., McWilliams, J. C. 2005. The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean Modelling*, 9(4): 347-404. doi:10.1016/j.ocemod.2004.08.002.
- Scheffer, M., Baveco, J.M., DeAngelis, D.L., Rose, K.A., Van Nes, E.H. 1995. Super-individuals: a simple solution for modelling large populations on an individual basis. *Ecological Modeling*, 80: 161–170.
- Soto-Mendoza, S., Parada C., Castro, L., Colas, F., Schneider, W. 2012. Modeling transport and survival of anchoveta eggs and yolk sac larvae in the coastal zone off central-south Chile: assessing spatial and temporal spawning parameters. *Progress in Oceanography*, Volumes, (92-95): 178-191. doi:10.1016/j.pocean.2011.07.001.
- Smith, W.H.F., Sandwell, D.T., 1997. Global seafloor topography from satellite altimetry and ship depth soundings. *Science* 277, 1957-1962.
- Smith, A.D.M., Fulton, E.J., Hobday, A.J., Smith, D.C., Shoulder. P. 2007. Scientific tools to support the practical implementation of ecosystem-based fisheries management. *ICES Journal of Marine Science*, 64(4):633–639.
- Stammer, D., Davis, R., Fu, L.L., Fukumori, I., Giering, R., Lee, T., Marotzke, J., Marshall, J., Menemenlis, D., Niiler, P., Wunsch, C., Zlotnicki, V., 1999. The consortium for estimating the circulation and climate of the ocean (ECCO) - Science goals and task plan - Report No 1. Technical report, Jet Propulsion Laboratory - Massachusetts Institute of Technology - Scripps Institution of Oceanography.
- Ospina-Álvarez, A., Palomera, I., Parada, C. 2011. Changes in egg buoyancy during development and its effects on the vertical distribution of anchovy eggs. *Fisheries Research*. doi:10.1016/j.fishres.2011.01.030.
- Ospina-Alvarez A, Parada, C, Palomera, I. 2012. Vertical migration effects on the dispersion and recruitment of European anchovy larvae: from spawning to nursery areas. *Ecol. Mod.* 231:65–79. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2012.02.001

- Torrence, C., Compo, G. P. 1998. A Practical Guide to Wavelet Analysis. Bull. Amer. Meteor. Soc. 79: 61-78.
- Torrence, C., Webster, P. J. 1999. Interdecadal changes in the ENSO–monsoon system. J. Climate. 12: 2679–2690.
- Vásquez, S., Parada, C., Ruiz, P., Hormazábal, S., Núñez, S. 2010. Exploring connectivity between spawning and nursery grounds of Chilean Jack Mackerel through a biophysical coupled model. International Conference on Environment and Resources of the South Pacific, 22-26 November 2010, Viña del Mar, Chile.
- Vásquez, S., Correa-Ramírez, M., Parada, C., Sepúlveda, A., submitted. influence of oceanographic processes on jack mackerel (*Trachurus murphyi*) larval distribution and population structure in the southeastern Pacific Ocean. ICES.
- von Storch, H., Zwiers, F. W., 1999. Statistical Analysis in Climate Research. Cambridge University Press.
- Yáñez, E., Barbieri, M.A., Montecinos, A. 1990. Relaciones entre las variaciones del medio ambiente y las fluctuaciones de los principales recursos pelágicos explotados en la zona de Talcahuano, Chile. En: Perspectivas de la actividad pesquera en Chile. M.A. Barbieri (Ed.) Escuela de Ciencias del Mar, Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso: 49-62.
- Yáñez, E., Barbieri, M.A., Santillán, L. 1992. Long-term environmental variability and pelagic fisheries in Talcahuano, Chile. In: Payne, A.I., Brink, L., Mann, K.H., Hilborn, R. (Eds.), Benguela Trophic Functioning. S. Afr. J. Mar. Sci. 12, 175-188.
- Zieler, M. 2000. Modeling Our World : The Esri Guide to Geodatabase Design ESRI Press, 200 p. ISBN: 1879102625.

## **CAPITULO 3. INDICES DE RECLUTAMIENTO INDEPENDIENTES DE LA ESTIMACION ESTIVAL**

### **3.1. INTRODUCCION**

El reclutamiento de la sardina común tiene una frecuencia anual, y es el que sustenta la pesca en la zona centro-sur de Chile. Por este motivo las estimaciones de reclutamiento deben presentar una mayor precisión y menor incertidumbre, con el objeto de conocer de la manera más verosímil la robustez del reclutamiento en cada período estival. En la estimación del reclutamiento de sardina común se han identificados tres métodos: hidroacústicos, edad-estructurada y estadísticos somáticos. El primero es un método directo de evaluación, se basa en un crucero hidroacústico que cubre las zonas de distribución del stock y por lo que proporciona información de manera directa, rápida y confiable. El segundo incorpora estimaciones de parámetros del grupo de abundancia menos longevo o funciones denso-dependientes de la relación stock-recluta y el tercero, se obtiene de la información pesquera en escalas temporales intra-anales. El problema principal que presentan estos métodos, es que están acotados a un período de tiempo específico (estival).

Por tanto, el objetivo de este capítulo en lo que implica la estimación de índices de reclutamiento de sardina común, es obtener índices independientes de la estimación acústica estival, para la región centro-sur de Chile.

### **3.2. METODOLOGIA (OBJETIVO 4.3)**

#### ***3.2.1. Obtener índices de reclutamiento de sardina común, independientes de la estimación acústica estival, para la región centro-sur de Chile***

En relación a este objetivo, se ha abordado la problemática utilizando 5 piezas de información:

1. Índices biofísicos: Índices de reclutamiento para sardina común asociados a rasgos biofísicos del sistema, y la variabilidad espacial y temporal de las zonas de crianza/reclutamiento basadas en los resultados de la modelación biofísica en base a índices serán informadas (ver capítulo 2),
2. Índices de reclutamiento inferido desde información de la actividad pesquera, a través de las capturas,
3. Índices de reclutamiento estimado a través del modelo de dinámica poblacional para sardina común,
4. Estimaciones de reclutamiento mediante métodos hidroacústicos provenientes de los cruceros RECLAS realizados por el FIP,
5. Información acústica espacial discretizada a la misma escala espacial que las salidas del modelo biofísico utilizando la integración de los NASC obtenidos en los cruceros del RECLAS en áreas discretizadas y generadas en el marco del objetivo 2.

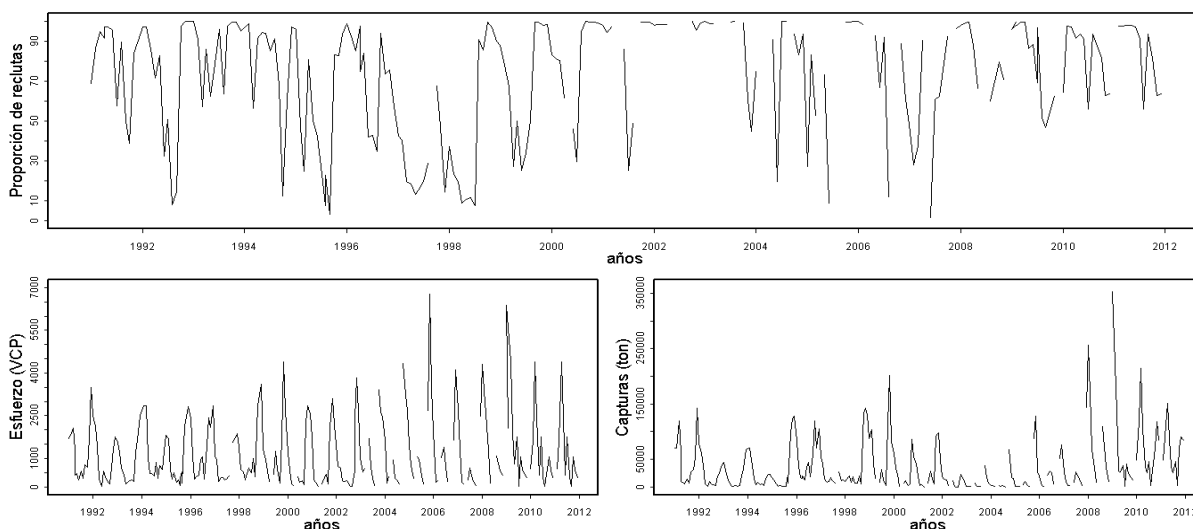
### 3.2.2. Índices de reclutamiento inferido desde la información de la actividad pesquera

Desde la perspectiva de los reclutamientos, en esta especie se conoce preferentemente estimaciones anuales que están relacionadas con la generación de pulsos de individuos en la temporada estival. La magnitud de tales pulsos de abundancia de esta especie está fuertemente ligada a las condiciones ambientales que configuran una surgencia estacional en la zona centro sur de Chile. No obstante que se reconoce una importante estacionalidad en el reclutamiento y en la reproducción (temporada invernal), el atributo de desovante parcial permite a la especie tener desoves a lo largo de todo el año. Desde lo anterior, se espera en rigor contar con un patrón de reclutamiento a lo largo de todo el año y con mayor concentración en la época estival donde las condiciones ambientales son mayormente favorables a los estados tempranos de vida de la especie.

Con el propósito de conocer el reclutamiento en una menor escala temporal asociada al mes, se construyó un índice de reclutamiento en base a los criterios reportados por [Santojanni et al. \(2003\)](#). El método implica la siguiente notación:

$$R_{año} = \sum_{mes} P_{mes} \frac{\sum C_{mes}}{\sum E_{mes} W_{t_{mes}}} \quad (1)$$

Donde  $R_{año}$  es el índice de reclutamiento,  $P_{mes}$  la proporción mensual de reclutas en las capturas mensuales del puerto seleccionado y  $W_t$  es el peso medio mensual del pez utilizado para transformar la captura por unidad de esfuerzo (CPUE) correspondiente en peso a CPUE en número de individuos. Además,  $W_{t_{mes}}$  representa el peso promedio mensual de sardina común, el cual fue obtenido desde la relación potencial  $P = aL^b$  (P: peso, L: longitud). A su vez, la información de las capturas desde los años 1990 a 2011 muestran un significativo porcentaje de individuos inmaduros en las capturas (Figura 3.1).



**Figura 3.1.** Series temporales de proporción de reclutas mensual (panel superior), esfuerzo de pesca (panel inferior, izquierdo) y capturas (panel inferior derecho) en sardina común desde 1991 a 2011.

### 3.2.3. Índices de reclutamiento estimado mediante un modelo de dinámica poblacional

Se utilizará la evaluación de stock mediante el empleo de modelos estadísticos con estructura de edad a través de los cuales se determina la situación de los stock de peces pelágicos pequeños, sardina común (*Strangomera bentincki*) en la zona centro-sur de Chile realizada en el Instituto de Investigación pesquera. Se presentan estimaciones de reclutamiento anual en sardina común desde dos fuentes de información. En primer lugar aquellas estimaciones relacionadas con la evaluación de stock, la cual es compuesta bajo una escala observacional anual y cuya información de entrada es edad estructurada.

#### 3.2.3.1. Reclutamientos desde evaluación de stock

El Instituto de Investigación Pesquera (INPESCA) ha sido la única institución en Chile que ha llevado a cabo evaluaciones de stock sobre los recursos sardina común y anchoveta de manera paralela al trabajo del Instituto de Fomento Pesquero (IFOP). La primera evaluación de stock sobre ambos recursos se llevo a cabo en 1996 a través del Fondo de Investigación Pesquera (FIP), en donde se revisaron los principales métodos indirectos de evaluación de la época, tal como el Análisis de Población Virtual (APV) y el Análisis Secuencial de la Población (ASP) y se construyo una nueva metodología basada en un análisis de captura que reconstruye las abundancias de manera mensual y asume un pulso de reclutamiento que decae por pesca y mortalidad natural ([Cubillos et al., 1998](#)).

Posterior a este proyecto y a partir del 2005 la evaluación de stock de sardina común y anchoveta en INPESCA se han realizado en forma rutinaria, cuyos resultados son considerados en mesas de expertos, denominados Comités Científicos y que son convocados por la autoridad de gobierno (Subsecretaria de Pesca, SUBPESCA).

La evaluación de la sardina común en INPESCA consta de la siguiente característica: incluye un modelo de evaluación talla estructurado, no obstante, la evaluación edad estructura es la que predomina y es considerada como estudio base, cuyo esquema general incluye los siguientes supuestos:

- La población de sardina común entre la V y X Región, constituyen una sola unidad de stock.
- Las pérdidas entendidas disminución de la abundancia se explican por mortalidad natural y por pesca.
- La mortalidad por pesca es producto un componente de selectividad edad-específica y la mortalidad por pesca anual.
- La mortalidad natural es constante a través de los años y edades.
- La selectividad es edad específica y considera una función de tipo logística.

Este esquema de modelación, considera que los datos observados son muestreados con error, siendo viable desarrollar modelos de las observaciones y estimación estadística de parámetros por método de máxima verosimilitud, lo que permite la estimación simultánea de los parámetros del modelo correspondientes a: Reclutamiento, Abundancia, Mortalidad por pesca anual y Parámetros relacionados (capturabilidad, selectividad), a través de la minimización de una función objetivo.

### 3.2.3.2. Abundancia

La abundancia en número de ejemplares en el año  $t$  de edad  $a$  ( $N_{t,a}$ ) puede ser modelada de la siguiente forma:

$$N_{t,a} = \begin{cases} N_{t,0} & a = 0 \\ N_{t-1,a-1} \exp(-Z_{t-1,a-1}) & a = 1-2(\text{sard}); 1-3(\text{anch}) \\ \square N_{t-1,m-1} \square \exp(-Z_{t-1,m-1}) + N_{t,m} \square \exp(-Z_{t,m}) & m = 3(\text{sard}); 4(\text{anch}) \end{cases} \quad (2)$$

donde

$$Z_{t,a} = F_{t,a} + M \quad (3)$$

donde  $m$  representa el número total de edades,  $Z_{t,a}$  es la tasa de mortalidad total,  $F_{t,a}$  es la tasa de mortalidad por pesca, y  $M$  es la tasa de mortalidad natural. Se considera en sardina común cuatro edades (0-3). Donde la clase de edad 0 representa el reclutamiento. La abundancia inicial de las clases anuales a la edad 0 en todos los años fueron estimadas según la expresión:

$$N_{t,0} = \bar{R} \times \exp(\eta_t) \quad (4)$$

donde  $\bar{R}$  es el reclutamiento promedio y  $\eta_t$  es la desviación anual en escala logarítmica. Por tanto, se asume que  $\eta_t \in N[0, \sigma_R^2]$ , donde  $\sigma_R^2$  es el coeficiente de variación del reclutamiento.

### 3.2.3.3. Mortalidad natural y por pesca

La tasa de mortalidad natural  $M$  se asume constante considerando cuatro clases de edad (0-3), siendo igual a (0,96 año<sup>-1</sup>) ([Cubillos et al., 1998](#)). Para la mortalidad por pesca se asume un modelo multiplicativo compuesto por un factor edad específico  $S_i$  y otro año específico  $F_i$ .

$$F_{t,a} = v_a \times F_t \quad (5)$$

### 3.2.3.4. Crecimiento

Los parámetros de crecimiento utilizados en la ecuación von Bertalanffy que incorpora cambios estacionales tiene como parámetros:  $L_\infty = 17.7\text{cm}$ ,  $k = 0.79 \text{ año}^{-1}$ ,  $t_0 = -0.35 \text{ año}$  para la sardina común;  $L_\infty = 20.8\text{cm}$ ,  $k = 0.44 \text{ año}^{-1}$ ,  $t_0 = -0.392 \text{ año}$  en el caso de la anchoveta ([Cubillos et al., 2002](#)).

### 3.2.3.5. Variables de estado

La biomasa total  $B_a^T$  es descrita por:

$$B_a^T = \sum_{a=1}^m N_{t,a} w_a \quad (6)$$

Mientras que la biomasa adulta  $B_a^A$  queda definida a comienzos de cada año por la siguiente expresión:

$$B_a^A = \sum_{a=1}^m N_{t,a} w_a \mu_a \quad (7)$$

donde  $N_{t,a}$  es la abundancia en número,  $w_a$  es el peso medio a la edad, y  $\mu_a$  es el vector de madurez correspondiente. Luego, la biomasa desovante  $B_a^D$  queda definida como la biomasa adulta que sobrevive a fines de invierno (= 4/12):

$$B_a^D = \sum_{a=1}^m N_{t,a} w_a \mu_a \exp(-0,33Z_{t,a}) \quad (8)$$

### 3.2.3.6. Patrón de explotación

El factor de explotación edad-específico  $v_a$  aplicado en sardina común fue modelado considerando un modelo logístico según:

$$v_a = [1 + \exp(-\ln(19) \times (\alpha - \alpha_{50}) / (\alpha_{95} - \alpha_{50}))]^{-1} \quad (9)$$

### 3.2.3.7. Captura

El proceso de captura en número por edad  $C_{t,a}$  se modela a través del modelo operacional de Baranov:

$$C_{t,a} = F_{t,a} \square N_{t,a} (1 - \exp(-Z_{t,a})) / Z_{t,a} \quad (10)$$

### 3.2.3.8. Proceso de estimación

Los parámetros desconocidos del modelo son estimados suponiendo funciones conocidas para la estructura del error de los datos observados, utilizando métodos de estimación de máxima verosimilitud.

### 3.2.3.9. Verosimilitud de la composición por edades

Nosotros asumimos una distribución multi-nomial para la composición por edades asociada a la información de la pesquería, siendo la función de verosimilitud negativa dada por:

$$\ell_1 = -n_{a,t} \sum_{t=1}^n \sum_{a=1}^n p_{t,a} \ln \hat{p}_{t,a} \quad (11)$$

donde  $n_{a,t}$  representa el número efectivo de individuos muestreados en el año  $t$  pertenecientes a la edad  $a$ ;  $p_{t,a}$  corresponde a la proporción observada y  $\hat{p}_{t,a}$  es la proporción estimada.

### 3.2.3.10. Verosimilitud de la biomasa acústica y desovante

Los datos de biomasa hidroacústica ( $B_t^h$ ), se relacionan con la biomasa acústica estimada por el modelo ( $\hat{B}_t^{Est}$ ), según una distribución Log-normal y cuya función de log-verosimilitud se expresa por:

$$\ell_2 = \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{t=1}^n \left( \ln(B_t^h) - \ln(\hat{B}_t^{Est}) \right)^2 \quad (12)$$

### 3.2.3.11. Verosimilitud de las Capturas

Las capturas anuales en peso  $C_t$  observadas fueron asumidas con una distribución log-normal con el negativo de la verosimilitud dado por:

$$\ell_4 = \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^n \left( \ln(C_t) - \ln(\hat{C}_t) \right)^2 \quad (13)$$

### 3.2.3.12. Verosimilitud de la Captura por Unidad de Esfuerzo (CPUE)

La CPUE como índice de abundancia relativo fue modelada asumiendo una distribución de tipo

Log-normal de la forma:

$$\ell_5 = \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^n \left( \ln(CPUE_t) - \ln(\hat{CPUE}_t) \right)^2 \quad (14)$$

## 3.2.4. Estimaciones de reclutamiento mediante métodos hidroacústicos discretizados a escala espacial de las salidas del modelo biofísico

La hidroacústica es la rama de las ciencias marinas que estudia la propagación del sonido en el medio acuático, permite llevar a cabo estimaciones de abundancia, biomasa, distribución espacial y batimétrica de los recursos marinos. Para éste estudio se proporcionará información acústica espacial discretizada a la misma escala espacial que las salidas del modelo biofísico utilizando la integración de



los NASC (Nautical Area Scattering Coefficient) obtenidos en los cruceros RECLAS en áreas discretizadas y generadas en el marco del objetivo 2.

#### 3.2.4.1. Recepción y ordenamiento de la data acústica.

Se realizó un ordenamiento de la data acústica (1999-2010) proporcionada por la Subsecretaría de Pesca (SUBPESCA). Dicha información fue generada por el Instituto de Fomento Pesquero (IFOP) en los cruceros acústicos de reclutamiento de sardina común, en la zona centro-sur de Chile. La data señalada se recibió en 2 períodos, la primera recepción comprendió los años 1995, 1999, 2002, 2004, 2007, 2008, 2009 y 2010, de los cuales los años 1999, 2002, 2007 y 2009 presentaban toda la información requeridas, y el resto de los años presentaron data incompleta (carpetas vacías o archivos dañados) y la segunda recepción (afines de enero del año en curso) contemplo la información faltante para los años 1995, 2000, 2002, 2003, 2004, 2008 y 2010, sin embargo para los años 1995 y 2010 la información enviada no presentaban una estructura clara, por lo cual no se utilizó en los análisis. Finalmente los años que se utilizaron para cumplir con el objetivo corresponden a los años 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2007, 2008 y 2009.

Posteriormente se realizó un segundo ordenamiento, con el fin de obtener la distribución espacial y otros indicadores acústicos, esto se hizo mediante la unión de los archivos de geo-referencia (latitud-longitud) con los datos de  $S_A$  (NASC), tomando como referencia las unidades básicas de muestreo (UBMs) asignadas a cada uno de los componentes de la data acústica de cada año.

#### 3.2.4.2. Distribución espacial de sardina común

Se ordenó la data para cada año, teniendo como componentes principales la latitud, longitud, NASC, UBMs y la hora de cada registro, con el fin de generar los mapas de los tracks de navegación (Figuras 3.6, 3.6.1, 3.6.2) y de distribución espacial (Figuras 3.5, 3.5.1, 3.5.2) a través del software Ocean Data View (ODV, versión 4.2.1), el cual utiliza el algoritmo Data Interpolating Variational Análisis (DIVA, <http://modb.oce.ulg.ac.be/projects/1/diva>), que es un método de análisis e interpolación de una grilla regular, el cual considera en los análisis la línea costera y características batimétricas de la zona de estudio (Barth *et al.*, 2010; Troupin *et al.*, 2010).

#### 3.2.4.3. Densidad acústica de sardina común por año

Los valores de densidad entregados en cada figura están expresados en NASC, cuya unidad de medida son  $m^2/mn^2$ . El NASC es una medida de densidad acústica interpretada por la formula,

$$S_A = 4\pi(1852)^2 S_a \quad (15)$$

donde,  $S_a$  representa al coeficiente de retrodispersión por unidad de área, en  $m^2/m^2$ ,

$$S_a = \int_{z_1}^{z_2} S_v dz \quad (16)$$

#### 3.2.4.4. Transformación de la densidad acústica a densidad de peces

El NASC se puede convertir a una medida biológica de densidad de peces  $z$  (Ton/mn<sup>2</sup>), al dividirlo entre la sección transversal de retrodispersión sonora, normalizada por unidad de peso ( $\sigma_{\text{Ton}}$ ) en m<sup>2</sup>/ton. El sigma-ton está relacionado a la longitud y peso promedio de los peces, de tal manera que refleja la estructura de tamaños del área donde se realizó la maniobra de pesca ([Sepúlveda et al., 2006](#)). Debido a que los valores de densidad están referenciados a una localidad geográfica ( $x,y$ ) la “Densidad Biológica de Peces” queda expresada como:

$$z_i(x, y) = \frac{NASC_i(x, y)}{\sigma_{\text{Ton}(i)}(x, y)} \quad (17)$$

Donde,

$$\sigma_{\text{Ton}(i)}(x, y) = \frac{\bar{\sigma}_i(x, y)}{\bar{W}_i(x, y)} \quad (18)$$

$\bar{W}_i(x, y)$  es el peso promedio (en Ton) de la especie  $i$  del lance de identificación en la localidad ( $x,y$ )

$\bar{\sigma}_i(x, y)$  es la sección transversal promedio de retrodispersión sonora (en m<sup>2</sup>) de la especie  $i$  fue:

$$\bar{\sigma}_i(x, y) = 4\pi \sum_j f_j 10^{TS_j/10} \quad (19)$$

donde;  $f_j$  es la frecuencia de clases de tamaños  $j$  a partir de los lances de pesca de identificación y  $TS$  (Target Strength) es la fuerza de blanco de tamaño de clase  $L$ ,  $L_j$ .

### 3.2.4.5. Distribución latitudinal de densidad de sardina común por año

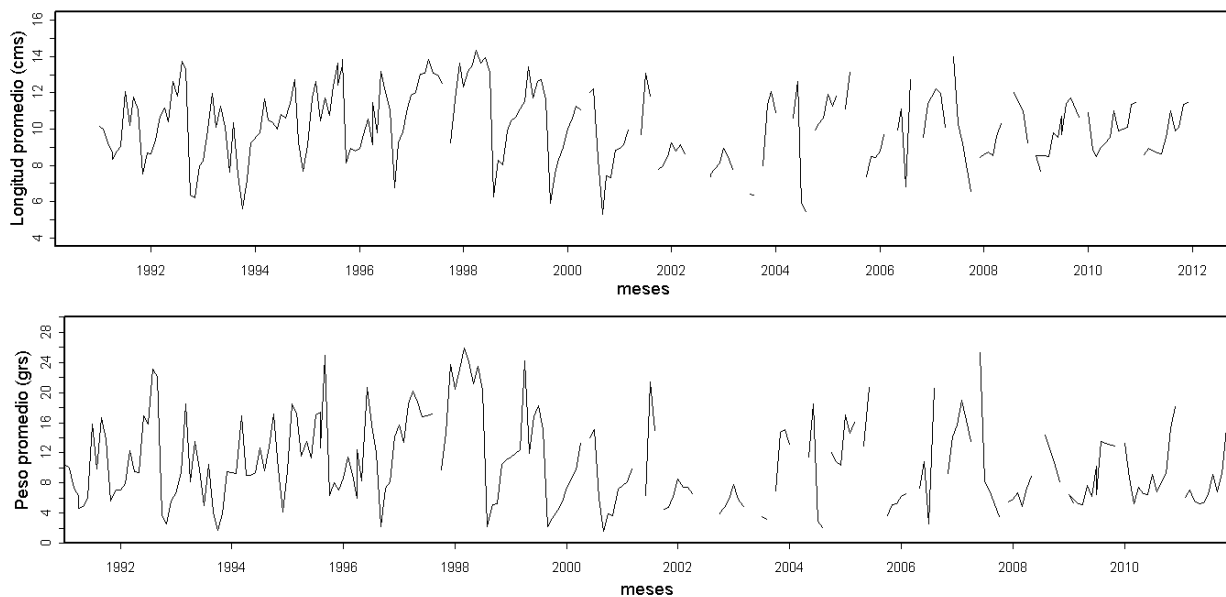
Para observar los cambios intranuales de la densidad acústica del recurso por sector (Figura 3.7) se subdividió el área de barrido realizado por los cruceros RECLAS en 8 sectores discretizados, el primer sector corresponde a la zona al norte de Constitución (al norte del 35,337205° S), el segundo se encuentra al sur de Constitución mas precisamente entre dicha ciudad y Cobquecura (35,337205° S al 36,139129° S), el tercero pertenece al sector río Itata, entre Cobquecura y Bahía Coliumo (36,139129° S al 36,537590° S), el cuarto está en el Gofu de Arauco y comprende las bahías de Coliumo, Concepción y el Golfo de Arauco (36,537590° S al 37,194631° S), el quinto corresponde al sector de Punta de Lavapie e incluye al sur del Golfo de Arauco y Lebu (37,194631° S al 37,608309° S), el sexto corresponde a la Isla Mocha, entre el sur de Lebu y Puerto Saavedra (37,608309° S al 38,816499° S), el séptimo pertenece a Corral, entre puerto Saavedra y Corral (38,816499° S al 39,884154° S), y el octavo sector comprende el sur de Corral (sur del 39,884154° S). Posteriormente, se procedió a integrar la data acústica (NASC) por año y área de interés, con el fin de generar gráficos

de densidad por sector con el software R versión 2.15.2. Además se integro la información acústica por año, obteniendo un gráfico de densidad acústica que permite observar la variación interanual (Figura 3.8).

### 3.3. RESULTADOS

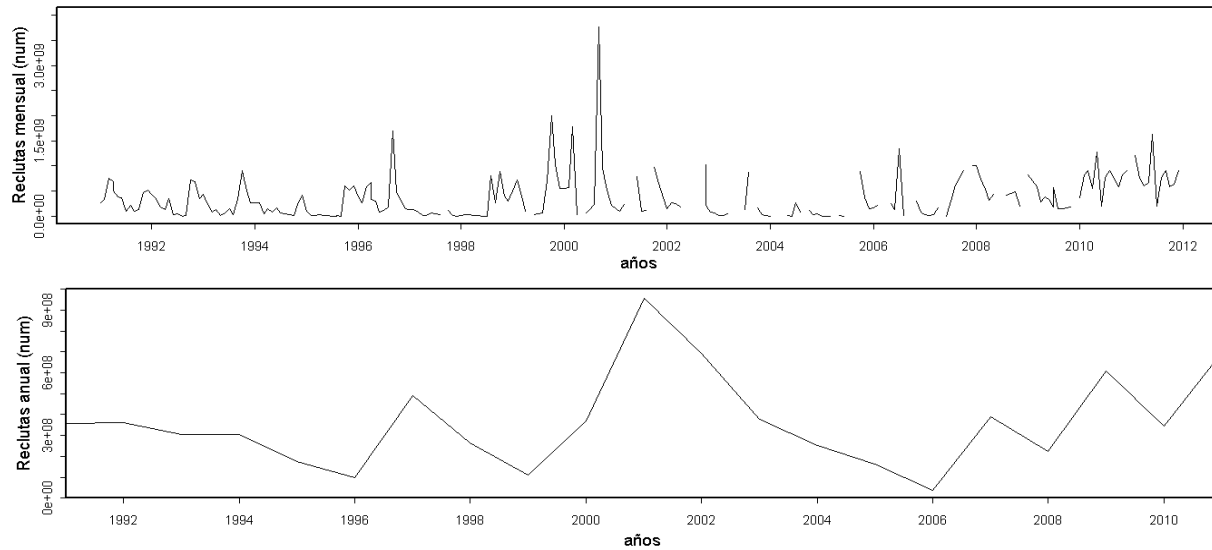
#### 3.3.1. Índices de reclutamiento inferidos de las capturas

Los estadísticos somáticos necesarios para llevar a cabo el índice de reclutamiento tal como la longitud promedio  $L$  y los parámetros  $a$  y  $b$  provienen desde los muestreos de frecuencia de tamaños colapsados al mes. De esta manera, la relación obtenida bajo escala mensual nos permite obtener el más verosímil valor de peso (Figura 3.2).



**Figura 3.2.** Series temporales de longitud mensual (panel superior) y peso mensual (panel inferior) en sardina común desde 1991 a 2011.

El indicador de reclutamiento mensual (Figura 3.3) durante el periodo 1991 a 2011, da cuenta de un aporte constante de reclutas a lo largo del año, concordando con la dinámica reproductiva del recurso que presenta desoves parciales a lo largo del año. Sin embargo, persiste en la serie la fuerte estacionalidad de esta variable de estado asociada en mayor abundancia a la época estival y que cuadra con la surgencia estacional en la zona. Al colapsar este indicador hacia una escala anual (Figura 3.3) refleja una tendencia muy similar con el indicador de reclutamiento anual desde la evaluación de stock. En efecto, se rescatan los fuertes reclutamientos de la especie en los últimos cinco años y que han sustentado importantes volúmenes de captura en la zona centro sur.



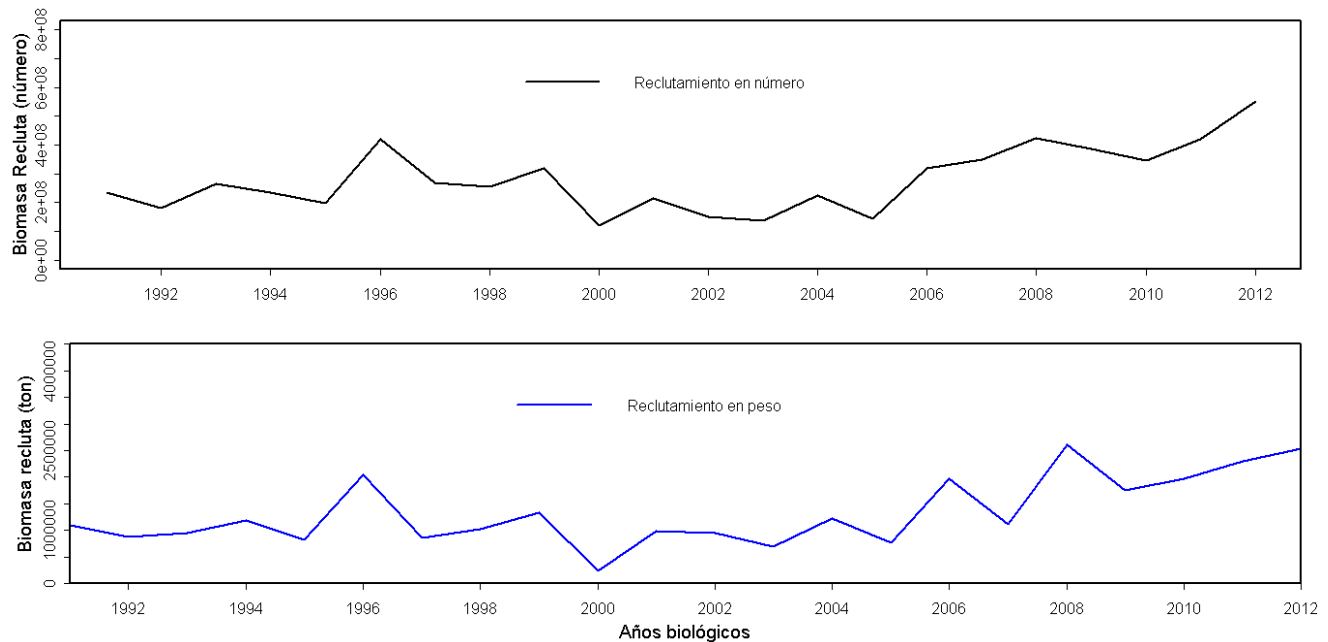
**Figura 3.3.** Series temporales de reclutamiento mensual (panel superior) y anual (panel inferior) de sardina común en número de individuos desde 1991 a 2011 (fuente series de información de captura y esfuerzo).

### 3.3.2. Índices de reclutamientos estimados desde un modelo de dinámica poblacional

El análisis cubre el período comprendido entre los años 1991 al 2011 con información de entrada configurada bajo un esquema año biológico para sardina común. La modelación de sardina común se basa en información correspondiente a capturas, rendimientos (CPUE), biomasa estimada por métodos acústicos y composición por tamaños y edades en la captura y cruceros. La modelación emplea un enfoque de máxima verosimilitud para la estimación de los parámetros del modelo. El stock de sardina común presenta altos niveles de abundancia atribuidos a las fuertes clases anuales entrantes los últimos cuatro años y principalmente a la más contemporánea del año 2010/11 ([Comm pers. Marcos Arteaga.](#)).

La Figura 3.4 muestra las estimaciones de biomasa recluta y reclutamiento en número de sardina común entre los años biológicos 1990/1991 y 2011/2012. Se observa un importante incremento de esta variable de estado en el último quinquenio lo que dio lugar a altas cuotas de captura en el mismo periodo. Se observa además que los niveles de reclutamiento más bajo en la serie ocurren en el período de años entre 2000 y 2005, aspecto que contraste con lo correspondiente a los más altos niveles de abundancia de reclutas en los últimos 3 a 4 años de la serie analizada.

Las tendencias de la abundancia de reclutas en escala anual son muy similares bajo las aproximaciones desde el modelo de evaluación de stock (Figura 3.4) como el indicador desde las capturas (Figura 3.3). Sin embargo, la mayor discrepancia entre ambas series se sitúa en el año 1999, donde se manifiesta un alto reclutamiento en el análisis basado en las capturas del año citado condicionando el reclutamiento hacia una alta abundancia. Lo anterior, conduce a un condicionamiento en la generación del índice desde las capturas, ya que son la principal fuente de información de este análisis. Esto no fue apreciado en el indicador desde la evaluación de stock, ya que la estimación está condicionada a una mayor fuente de observaciones.



**Figura 3.4.** Series temporales de reclutamiento de sardina común en número de individuos (panel superior) y en biomasa (panel inferior) desde 1991 a 2012 bajo escala de tiempo biológica, desde modelo de evaluación de stock edad estructurado.

### 3.3.3. Estimaciones de reclutamiento mediante información hidroacústica discretizada a la escala espacial de las salidas del modelo biofísico

#### 3.3.3.1. Estimaciones de reclutamiento mediante métodos hidroacústicos provenientes de los cruceros RECLAS organizados por el FIP

La hidroacústica constituye una poderosa herramienta para evaluar la biomasa y abundancia de los peces en forma directa e independiente de la actividad extractiva. La evaluación directa cubre toda el área de distribución de la especie en estudio, la que queda restringida según los límites en el sentido latitudinal entre las regiones V a X y longitudinalmente dentro de las primeras 40mn de la costa. En el caso del reclutamiento de la sardina común, las campañas acústicas se realizan centradas en el período de máxima presencia de juveniles (verano).

En las tablas 3.1 y 3.2 se resumen la abundancia y biomasa estimada por región (Norte (N), Sur (S)), basada en los cruceros acústicos realizados entre los años 2000 a 2008. Las mayores abundancias de sardina común se registraron en la zona norte, principalmente en los años 2006 y 2008, y los menores valores se presentaron en el año 2004 y 2007 para zona sur y norte respectivamente (Tabla 3.1). Los mayores valores de biomasa de recluta se presentaron en la zona sur durante el 2007 y 2008, siendo este último el máximo registró (2,68 millones de toneladas) (Tabla 3.2).

**Tabla 3.1.** Abundancia (millones de ejemplares) en el stock de sardina común y anchoveta, la que ha sido evaluada en los cruceros acústicos de reclutamiento. Norte, se refiere a la zona comprendida entre la V y VIII Región, y Sur a la zona comprendida entre el sur de la Isla Mocha y Punta Galera (38°28'S-40°S).

| Años     | Sardina común |        |        | Anchoveta |       |        |
|----------|---------------|--------|--------|-----------|-------|--------|
|          | Norte         | Sur    | Total  | Norte     | Sur   | Total  |
| 2000     | 193707        |        | 193707 | 51395     | 10414 | 61809  |
| 2001     | 186398        |        | 186398 | 69615     | 20594 | 90209  |
| 2002     | 118378        | 39649  | 158027 | 37666     | 57732 | 95398  |
| 2003     | 18900         | 23819  | 42719  | 37655     | 7278  | 44933  |
| 2004     | 64867         | 5680   | 70547  | 36270     | 52841 | 89111  |
| 2005     | 25492         | 9705   | 35197  | 60842     | 24572 | 85414  |
| 2006     | 479376        | 36606  | 515982 | 81496     | 18909 | 100405 |
| 2007     | 14175         | 109276 | 123451 | 24086     | 61019 | 85105  |
| 2008     | 444150        | 101599 | 545749 | 25967     | 33477 | 59444  |
| Promedio | 171716        | 46619  | 207975 | 47221     | 31871 | 79092  |
| CV (%)   | 103.6         | 90.4   | 92.4   | 42.1      | 64.4  | 24.0   |

**Tabla 3.2.** Biomasa (toneladas) en el stock de sardina común y anchoveta, la que ha sido evaluada en los cruceros acústicos de reclutamiento. Norte, se refiere a la zona comprendida entre la V y VIII Región, y Sur a la zona comprendida entre el sur de la Isla Mocha y Punta Galera (38°28'S-40°S).

| Año      | Sardina común |         |         | Anchoveta |         |         |
|----------|---------------|---------|---------|-----------|---------|---------|
|          | Norte         | Sur     | Total   | Norte     | Sur     | Total   |
| 2000     | 252601        |         | 252601  | 169366    | 234650  | 404016  |
| 2001     | 601383        |         | 601383  | 133231    | 317587  | 450818  |
| 2002     | 441063        | 425768  | 866831  | 165334    | 1337973 | 1503307 |
| 2003     | 103602        | 380003  | 483605  | 138929    | 104627  | 243556  |
| 2004     | 253227        | 141092  | 394319  | 180441    | 1064114 | 1244555 |
| 2005     | 147662        | 251672  | 399334  | 332042    | 577217  | 909259  |
| 2006     | 1337523       | 840875  | 2178397 | 376924    | 408916  | 785840  |
| 2007     | 51577         | 2064005 | 2115582 | 124180    | 909010  | 1033191 |
| 2008     | 1950979       | 2688135 | 4639114 | 146588    | 829550  | 976138  |
| Promedio | 571068        | 970221  | 1325685 | 196337    | 642627  | 838964  |
| CV (%)   | 113.8         | 103.2   | 108.8   | 46.9      | 64.8    | 49.2    |

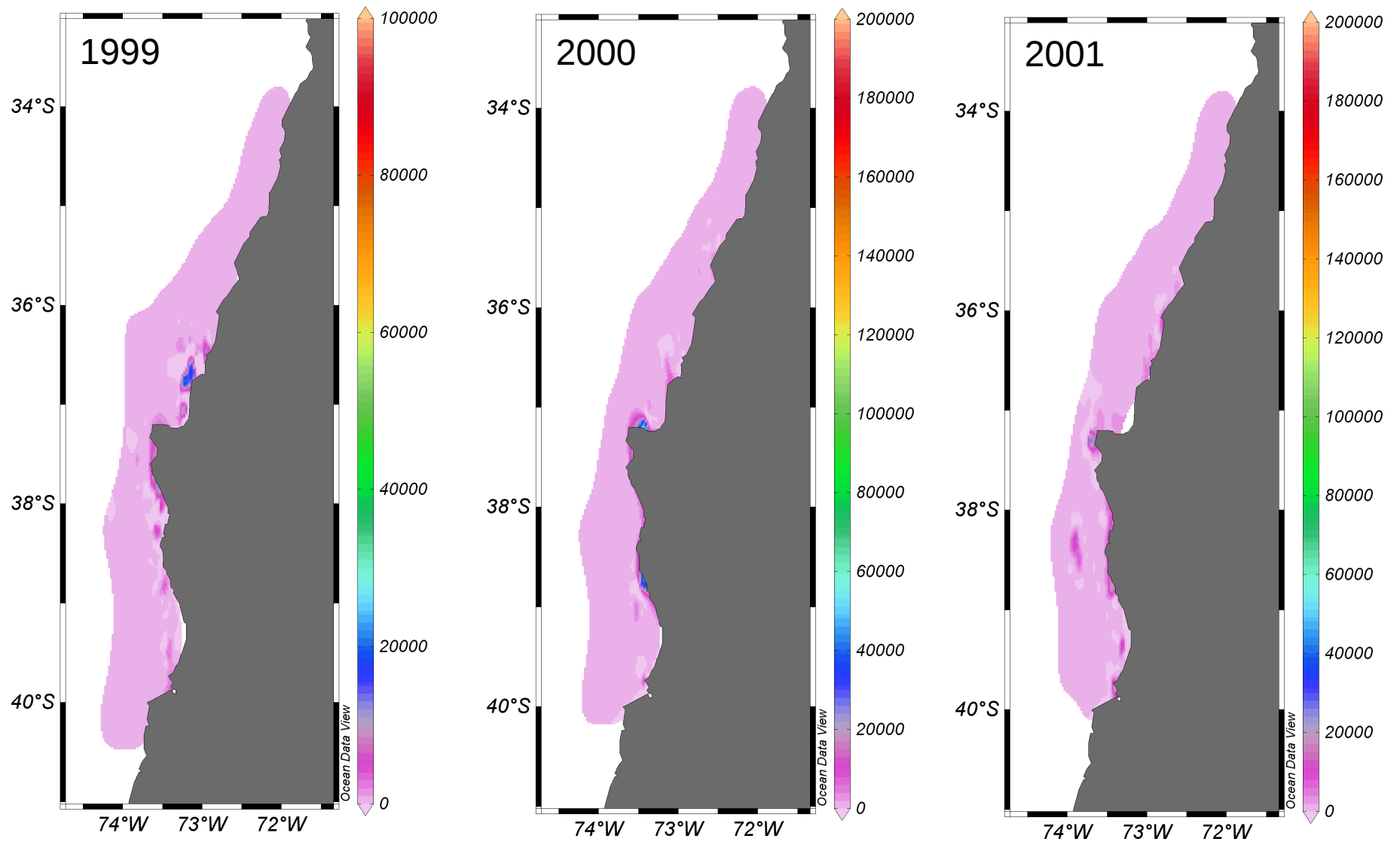
### 3.3.3.2. Información acústica espacial discretizada

Se realizó el mismo procedimiento utilizado para discretizar la densidad de huevos utilizando las celdas generadas con 8 áreas (ver capítulo 2 Tabla 2.3). Las salidas del modelo biofísico (capítulo 2) se analizaron a la misma escala espacial que la interacción de todos los registros de NASC obtenidos de los cruceros del RECLAS disponibles para la sardina común. Se aplicaron técnicas estadísticas para identificar el nivel de concordancia entre los patrones espaciales de los índices biofísicos y los registros integrados del NASC. En la Figura 3.5 se muestra la distribución espacial de los registros NASC provenientes del crucero hidroacústicos de los años 1999, 2000 y 2001. El año 1999 el recurso se distribuye de forma homogénea entre los 36.5° y los 40° S, con un máximo de abundancia a la altura de Coronel, sin embargo en el año 2000 se presenta con 2 núcleos con abundancia relativamente

alta ubicados en el Golfo de Arauco y frente a Puerto Saavedra. En el año 2001, se presenta una mayor distribución del recurso en comparación a los años anteriores, las densidades son bajas, sólo mostrando un pequeño núcleo adyacente al Golfo de Arauco. En la figura 3.5.1 se observa la distribución espacial de la sardina común en los años 2002, 2003 y 2004, en líneas generales las densidades son bajas. En 2002 se observan 3 núcleos principales, frente a Punta Nugurne (36°S), Golfo de Arauco y Corral (39.5°S), en cambio en el 2003 y 2004 solo se presentó un sólo núcleo ubicado entre los 37°-38°S y 39°-40°S, respectivamente. Por último, la distribución y la densidad de sardina común en los años 2007, 2008 y 2009, mostraron los mayores valores en comparación a los años anteriores (Figura 3.5.2). En el 2007, se presentaron varios núcleos ubicados principalmente entre Constitución (35.3°S) a Corral (39.8°S). En el 2008, se observó una disminución de la densidad y distribución, encontrándose entre Punta Nugurne (36°S) y Puerto Saavedra (39°S), en cambio en el año 2009 la distribución fue más amplia abarcando desde Topocalma (34.2°S) a Corral (39°S), con dos núcleos principales ubicados en el Golfo de Arauco y norte del Puerto Saavedra-Corral.

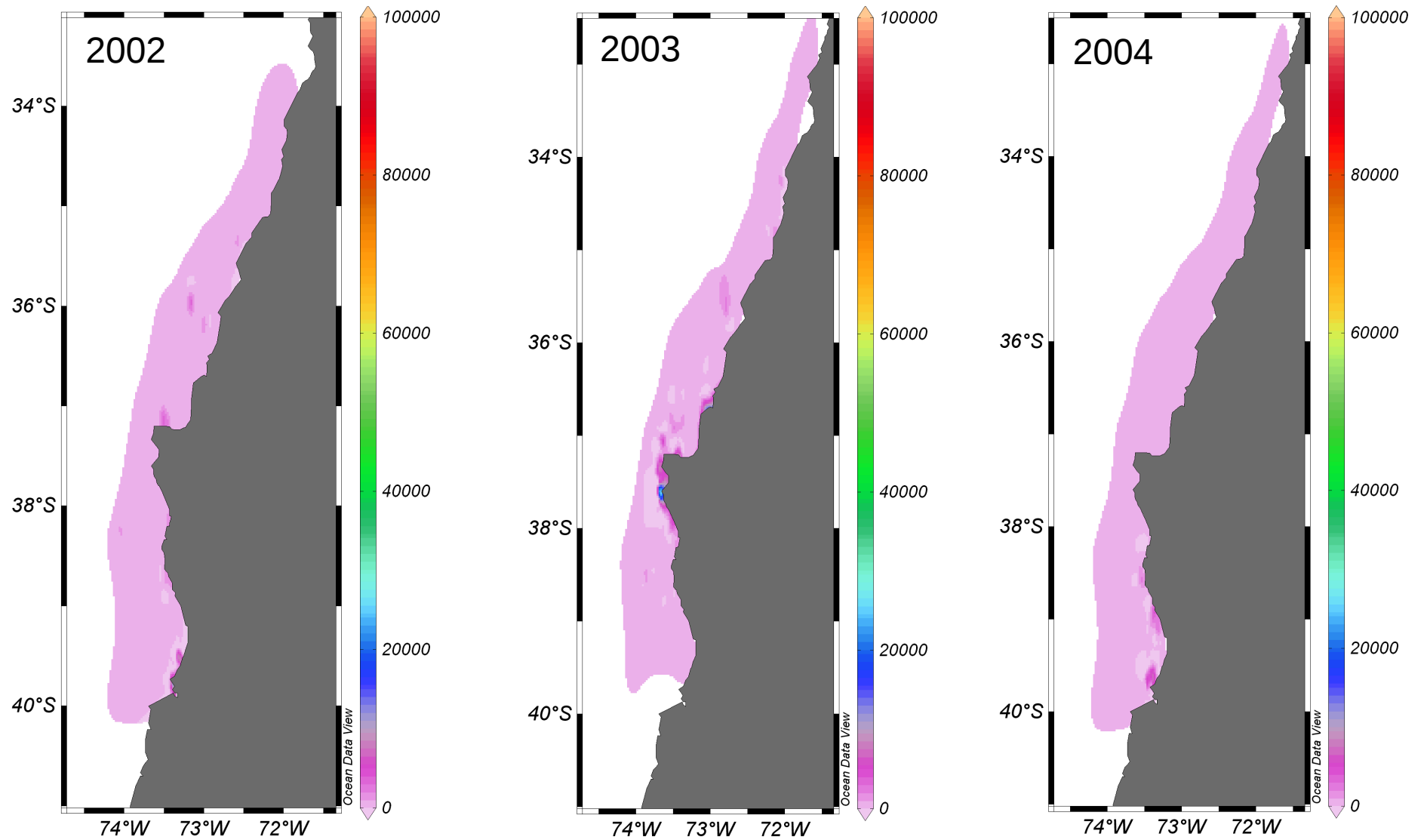
### **3.3.3.3. *Tracks de navegación***

Los tracks de navegación para los diferentes años (Figuras 3.6, 3.6.1, 3.6.2) presentaron una cobertura similar (34° a 40°S), excepto para los años 2003, 2004 y 2007 que presentan un grado mas hacia el sector norte del área de estudio.

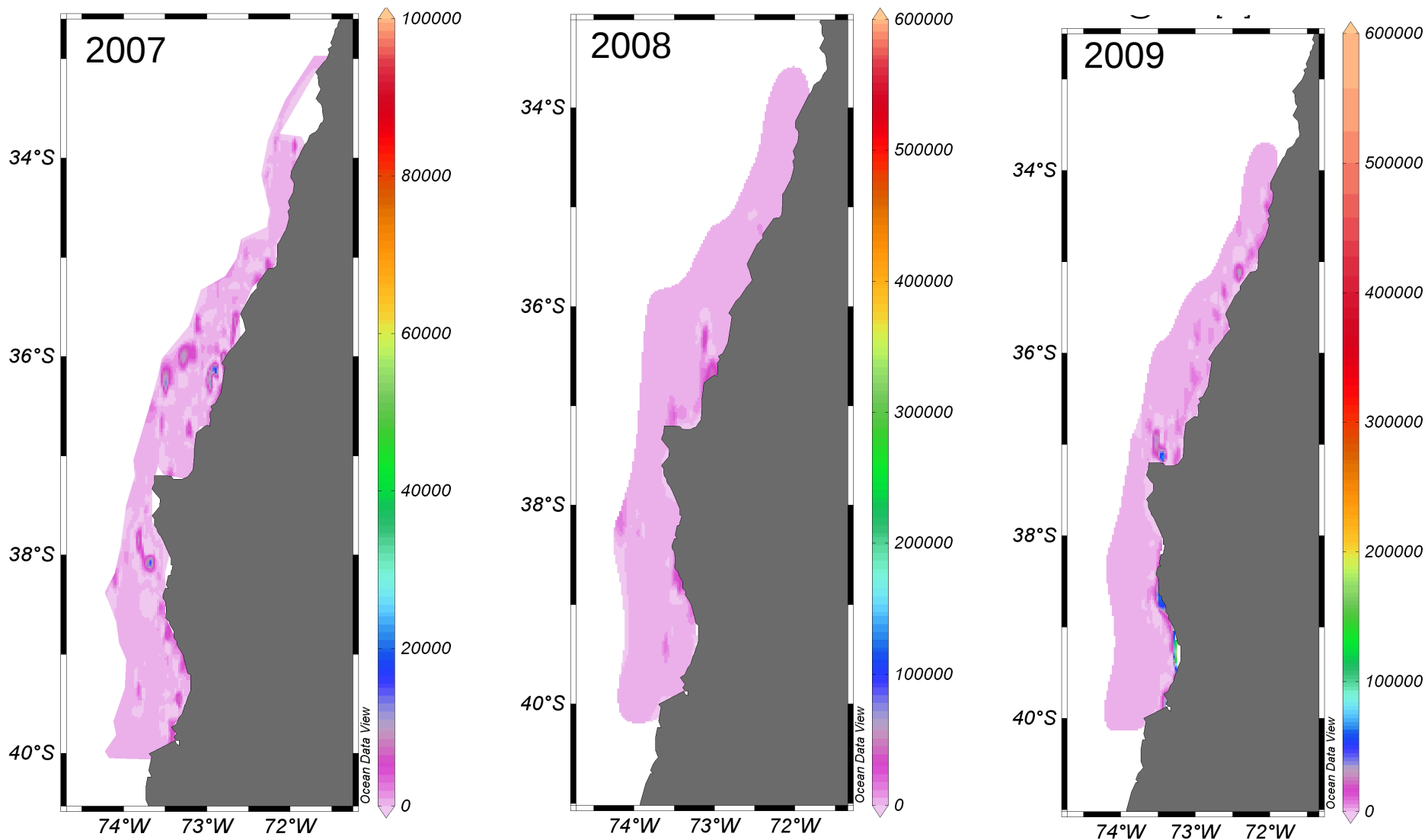


**Figura 3.5** Distribución espacial de las densidades de sardina común (NASC,  $\text{m}^2/\text{mn}^2$ ) provenientes de los cruceros hidroacústicos entre los años 1999, 2000 y 2001.





**Figura 3.5.1.** Distribución espacial de las densidades de sardina común (NASC,  $m^2/mm^2$ ) provenientes de los cruces hidroacústicos entre los años 2002, 2003 y 2004.



**Figura 3.5.2.** Distribución espacial de las densidades de sardina común (NASC,  $m^2/mn^2$ ) provenientes de los cruceros hidroacústicos entre los años 2007, 2008 y 2009.

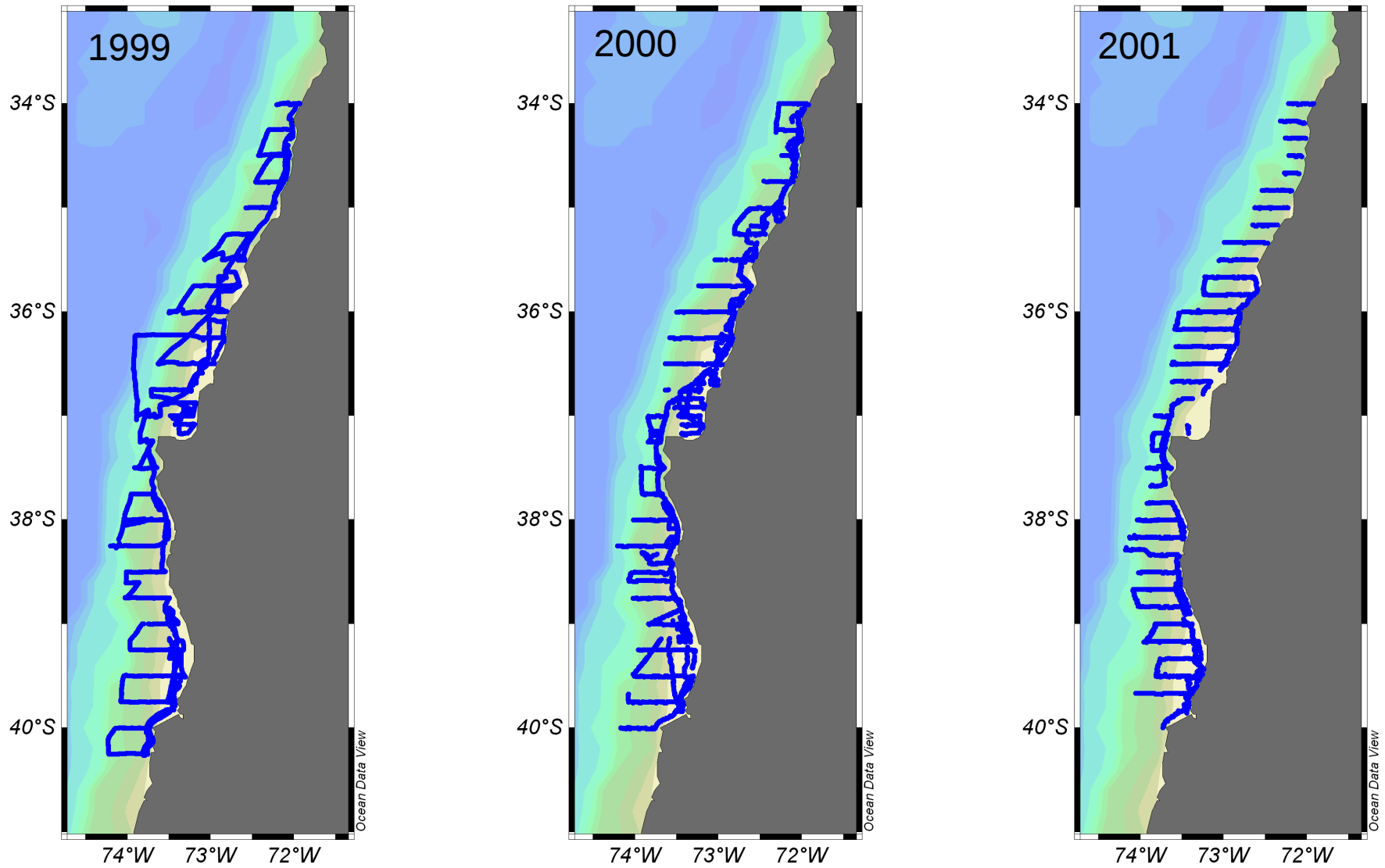


Figura 3.6. Tracks acústicos de navegación para los años 1999, 2000 y 2001.

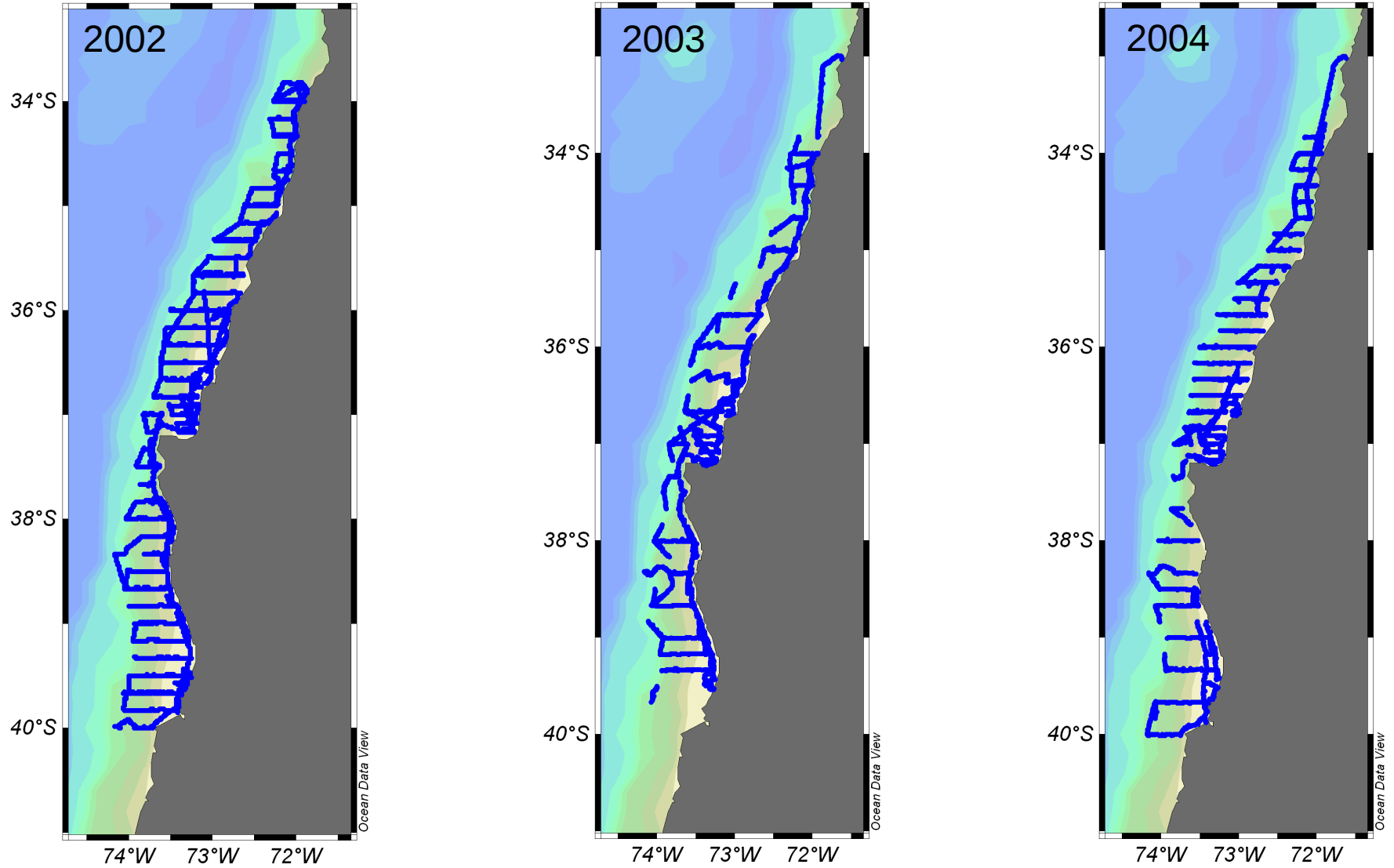


Figura 3.6.1. Tracks acústicos de navegación para los años 2002, 2003 y 2004.

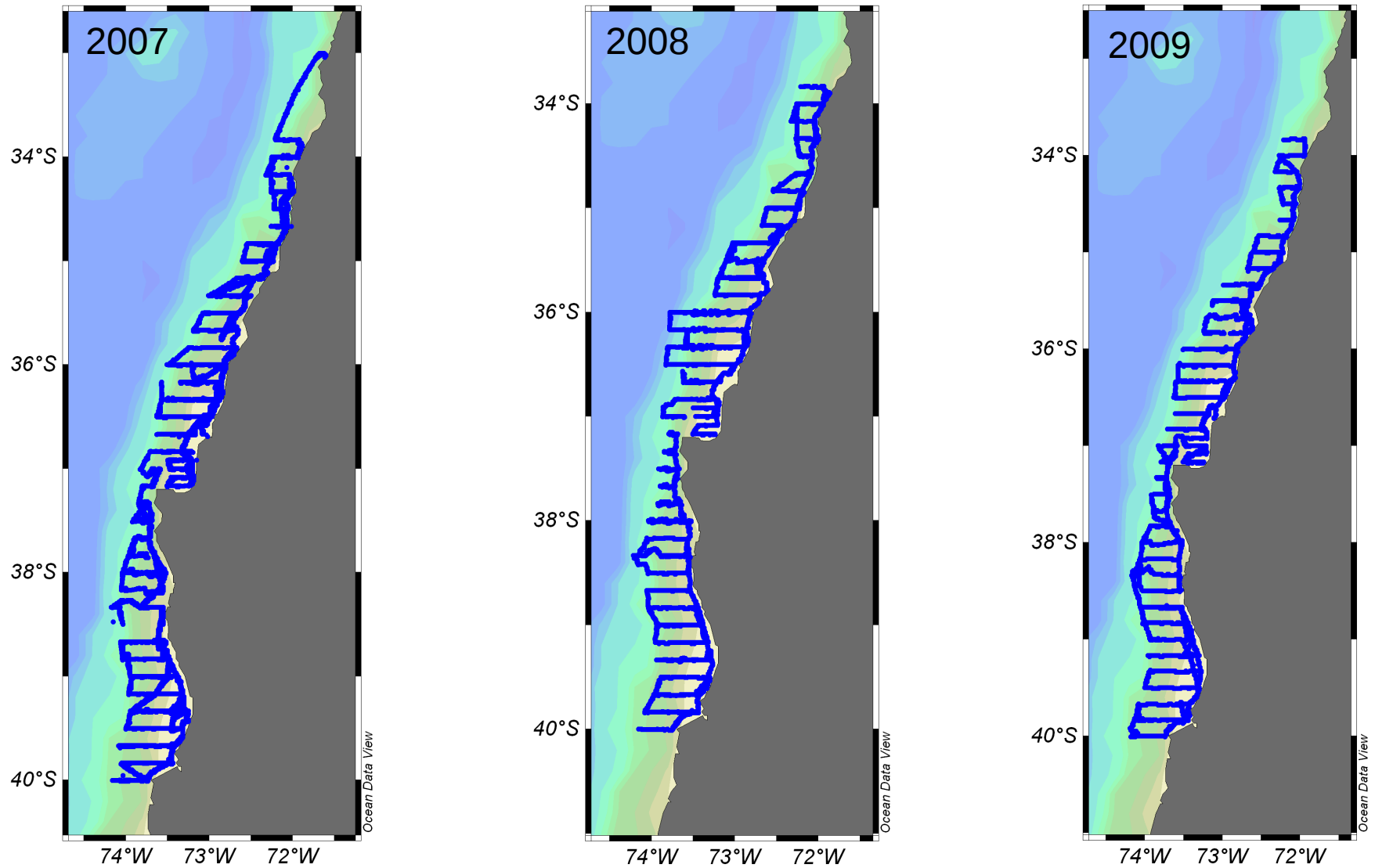
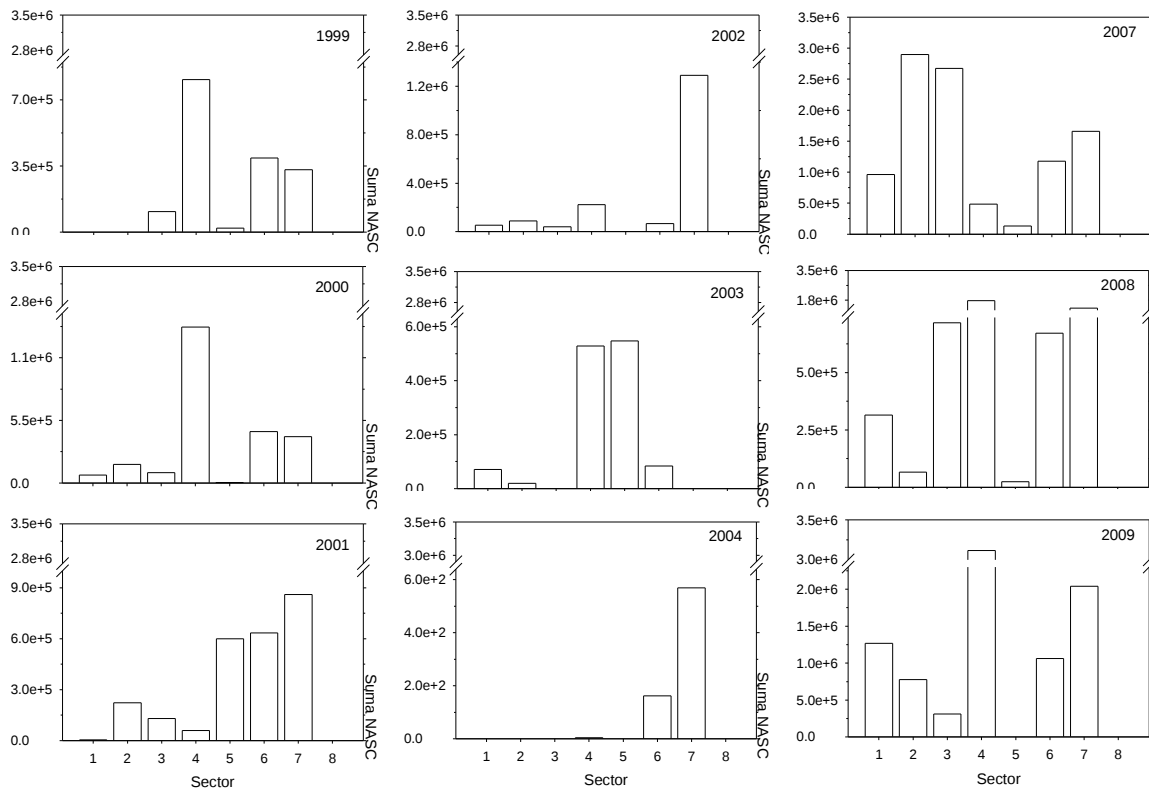


Figura 3.6.2. Tracks acústicos de navegación para los años 2007, 2008 y 2009.

### 3.3.3.4. Densidad acústica de Sardina Común por sector y por año

La densidad acústica (NASC,  $m^2/mn^2$ ) de sardina común por zona se representa en la figura 3.7. En los años 1999 y 2000 las mayores densidades se presentaron en el Golfo de Arauco, Isla Mocha y Corral. En el 2001, las máximas densidades se presentaron en los sectores de Punta de Lavapie, Isla Mocha y Corral, en cambio para los años 2002 y 2004 sólo se encontraron en el sector de Corral, mientras que el año 2003 las mayores densidades se observaron en el Golfo de Arauco y Punta de Lavapie. Los años 2007, 2008 y 2009 representan las mayores densidades con respecto a los de más años, y se ubicaron en Constitución, Río Itata, Isla Mocha y Corral en los años 2007 y 2008, finalmente en el año 2009 la mayor densidad de sardina común se presentaron en el Golfo de Arauco y Corral.

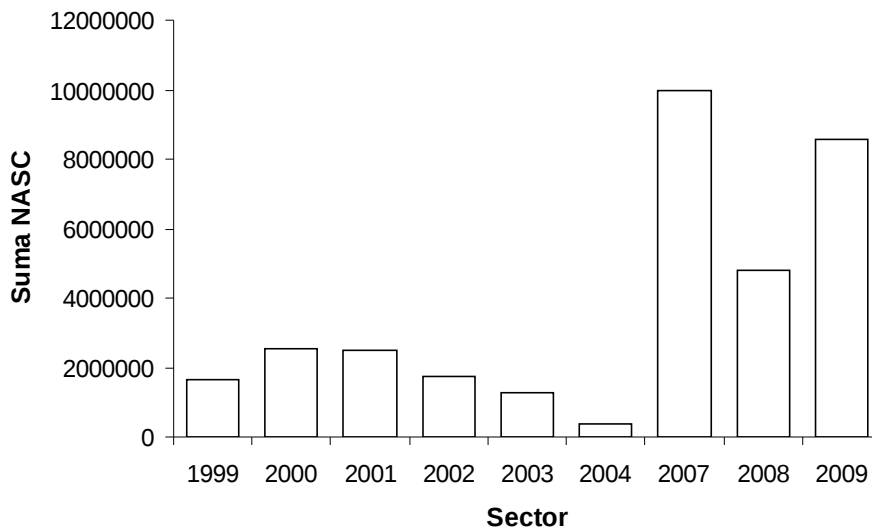


**Figura 3.7.** Densidad acústica de sardina común por sector. **1:** Sector Norte de Constitución, **2:** Sector Sur de Constitución (Sur de Constitución a Cobquecura); **3:** Sector del Río Itata (Sur de Cobquecura a Bahía Coliumo); **4:** Sector del Golfo de Arauco (Sur Bahía Coliumo a Golfo de Arauco); **5:** Sector Punta Lavapie (Sur del Golfo de Arauco a Lebu); **6:** Sector Isla Mocha (Sur de Lebu a Puerto Saavedra); **7:** Sector Corral (Sur de Puerto Saavedra a Corral); **8:** Sector Sur Corral.

### 3.3.4.5. Densidad acústica interanual de sardina común

La figura 3.8 muestra la densidad total (suma NASC,  $m^2/mn^2$ ) de sardina común por año. Entre los años 1999 a 2004 se observaron bajas densidades, las cuales, no superaron los 3 millones de NASC. En el 2007 se registró la máxima densidad (10 millones  $m^2/mn^2$ ), con un segundo

máximo en el 2009 (9 millones,  $m^2/mn^2$ ),



**Figura 3.8.** Densidad total de sardina común por año. Gráfico de la sumatoria de NASC ( $m^2/mn^2$ ) por año.

### 3.4. CONCLUSIONES

La modelación basada en modelos de evaluación del stock de sardina común emplea un enfoque de máxima verosimilitud para la estimación de los parámetros del modelo. El stock de sardina común presenta altos niveles de abundancia atribuidos a las fuertes clases anuales entrantes los últimos cuatro años y principalmente a la más contemporánea del año 2010/11. Esta modelación de sardina común se basa en información correspondiente a capturas, rendimientos (CPUE), biomasa estimada por métodos acústicos y composición por tamaños y edades en la captura y cruceros. Las estimaciones de biomasa recluta y reclutamiento en número de sardina común entre los años biológicos 1990/1991 y 2011/2012 muestra un incremento de esta variable de estado en el último quinquenio lo que dio lugar a altas cuotas de captura en el mismo periodo. Se observa además que los niveles de reclutamiento más bajo en la serie ocurren en el período de años entre 2000 y 2005, aspecto que contraste con lo correspondiente a los más altos niveles de abundancia de reclutas en los últimos 3 a 4 años de la serie analizada. Las tendencias de la abundancia de reclutas en escala anual son muy similares bajo las aproximaciones desde el modelo de evaluación de stock (Figura 3.4) como el indicador desde las capturas (Figura 3.3). Sin embargo, la mayor discrepancia entre ambas series se sitúa en el año 1999, donde se manifiesta un alto reclutamiento en el análisis basado en las capturas del año citado condicionando el reclutamiento hacia una alta abundancia. Lo anterior, conduce a un condicionamiento en la generación del índice desde las capturas, ya que son la principal fuente de información de este análisis. Esto no fue apreciado en el indicador desde la evaluación de stock, ya que la estimación está condicionada a una mayor fuente de observaciones.

El indicador de reclutamiento mensual (Figura 3.3) durante el periodo 1991 a 2011, da cuenta de un aporte constante de reclutas a lo largo del año, concordando con la dinámica reproductiva

del recurso que presenta desoves parciales a lo largo del año. Sin embargo, persiste en la serie la fuerte estacionalidad de esta variable de estado asociada en mayor abundancia a la época estival y que cuadra con la surgencia estacional en la zona. Al colapsar este indicador hacia una escala anual (Figura 3.3) refleja una tendencia muy similar con el indicador de reclutamiento anual desde la evaluación de stock. En efecto, se rescatan los fuertes reclutamientos de la especie en los últimos cinco años y que han sustentado importantes volúmenes de captura en la zona centro sur.

Por otro lado, la información proveniente de la acústica nos indica que la distribución espacial de sardina común en los años incorporados en el presente estudio se centraron en los 36° y 39°S, principalmente en el Golfo de Arauco y Bahía de Concepción. El área cubierta por los tracks de navegación es constante en el tiempo, excepto en los años 2003, 2004 y 2007, donde la data muestra una extensión del área de estudio en un grado de latitud hacia el norte, esto puede ser atribuible a que el personal encargado comenzó la grabación de la información acústica apenas salió del puerto en Valparaíso. Los sectores del Río Itata, Golfo de Arauco, Isla Mocha y Corral muestran las mayores densidades de reclutas de sardina común en el periodo de estudio. Los años 2007, 2008 y 2009 presentaron las mayores densidades acústicas de sardina común. De la información acústica desprendida de los informes FIP (Provenientes de los cruceros RECLAS), las mayores abundancias de sardina común se registraron en la zona norte y la mayor cantidades de ejemplares se hidroacustaron en los años 2006 y 2008, por el contrario las estimaciones de Biomasa de los cruceros de investigación en el periodo comprendido entre los años 2000 y 2008, exhiben mayores valores en la zona sur, siendo éste último año el mismo que presenta la mayor biomasa total dentro de los años en estudio. El análisis realizado en función de la intensidad acústica o NASC fueron realizados sin considerar diferencias en tallas. En próximos análisis esa información debería ser incorporada en los análisis para la correcta interpretación de la densidad de reclutas en el sistema.

### 3.5. REFERENCIAS

- Barth, A., A. Alvera-Azcárate, C. Troupin, M. Ouberdous & J.M. Beckers. 2010. A web interface for gridding arbitrarily distributed in situ data based on Data-Interpolating Variational Analysis (DIVA). *Advances in Geosciences*. 28: 29-37. doi: 10.5194/adgeo-28-29-2010 <http://www.adv-geosci.net/28/29/2010/adgeo-28-29-2010.html>.
- Cubillos, L., Bucarey, D., Canales, M., Sobarzo, M., Vilugrón, L. 1998. Evaluación indirecta del stock de anchoveta y sardina común en la zona centro-sur. Proyecto Fondo de Investigación Pesquera, FIP 1996-10. p 258.
- Cubillos, L.A., Bucarey, D.A., Canales, M., 2002. Monthly abundance estimation for common sardine *Strangomera bentincki* and anchovy *Engraulis ringens* in the central-southern area off Chile (34-40°S). *Fish. Res.* 57, 117-130.
- Santojanni. A., Arneri, E., Barry, C., Belardinelli, A., Congolani, N., Giannetti, G., G. Kirkwood. 2003. Trends of anchovy *Engraulis encrasicolus*, L biomass in the northern and central Adriatic Sea. *Sci. Mar.*, 67 (3): 327, 340.
- Sepúlveda, A., R. Alarcón & C. González. 2006. Evaluación de la biomasa de jurel con embarcaciones de la flota pesquera 2005. *Doc. Téc. Inst. Invest. Pesq. (IIP)*, Talcahuano, 14(4):1-52.
- Troupin, C., F. Machín, M. Ouberdous, D. Sirjacobs, A. Barth & J.-M. Beckers. 2010. High-



resolution Climatology of the North-East Atlantic using Data-Interpolating Variational Analysis (Diva). *Journal of Geophysical Research*. 115: C08005. doi: 10.1029/2009JC005512. <http://www.agu.org/pubs/crossref/2010/2009JC005512.shtml>

## CAPITULO 4. RELACIONES AMBIENTE-RECURSO PARA LA SARDINA COMUN EN LA REGION CENTRO-SUR

### 4.1. INTRODUCCION

En las costas de la zona centro-sur de Chile, la población de sardina común (*Strangomera bentincki*) ha presentado grandes fluctuaciones en abundancia, tales cambios se atribuyen a factores medioambientales que afectan principalmente los estados tempranos de vida de esta especie. Estas asociaciones (hábitat-sobrevivencia) son utilizadas principalmente en estudios de mortalidad y dinámica reproductiva con el medioambiente (método de preferencia-rechazo de [Perry & Smith \(1994\)](#)). Sin embargo, los resultados obtenidos entre la abundancia de huevos y las características del medio ambiente son poco claros. De este modo, es importante caracterizar las potenciales asociaciones entre el hábitat espacio-temporal con la presencia de huevos de sardina común en la zona centro-sur de Chile, a través de modelos aditivos generalizados (GAMs).

### 4.2. METODOLOGIA (OBJETIVO 4.4)

#### 4.2.1. *Identificar las principales forzantes del ambiente que modulan el proceso de transporte de huevos y larvas de sardina común y que determinan la variabilidad del reclutamiento*

Para caracterizar la variabilidad espacial y temporal de las condiciones oceanográficas en la región centro-sur de Chile (33°-42°S; 76°-71°W), se utilizaron bases de datos satelitales de nivel del mar (nm), corrientes geostróficas, vientos, clorofila-*a* (clo-*a*) y temperatura superficial del mar (tsm). Los dieciocho años (1992-2011) de datos semanales de nivel del mar y corrientes geostróficas, con resolución espacial de 25 km, fueron obtenidos desde el producto combinado de las misiones Topex/Poseidon, ERS y Jason 1-2, distribuidos por AVISO (<http://aviso.oceanobs.com>). Para este mismo periodo datos diarios de viento, con resolución espacial de 25 km, fueron obtenidos desde el producto Cross-Calibrated Multi-Plataform Ocean Surfless Wind (CCMP) que integra las mediciones de las misiones SSM/I, SSMIS, AMSR-E, TRMM TMI, QuickScat, SeaWinds y WindSat (<ftp://podaac-ftp.jpl.nasa.gov/allData/ccmp/L3.0/>). Los diez años (2002-2012) de datos diarios de clo-*a* (algoritmo OC3; [Werdell, 2009](#)) y tsm, con una resolución espacial de 1 km, fueron obtenidos desde los productos nivel-2 de la misión MODIS-Aqua (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>). Las brechas de información en la clo-*a*, producto de la presencia de nubes, fueron completadas a través de una interpolación objetiva mediante el método DINEOF (Data Interpolating Empirical Orthogonal Function), aplicada en forma iterativa con una caja móvil de 31 días ([Alvera-Azcárate et al., 2007](#)). A partir de los datos de nivel del mar satelital se determinó la energía cinética de remolinos (Eddy Kinetic Energy, EKE), mientras que a partir del viento superficial CCMP se obtuvo el esfuerzo del viento, el rotor del esfuerzo del viento y el transporte de Ekman.

Las principales frecuencias de variabilidad espacial y temporal de las distintas variables fueron evaluadas a través del método “MultiTaper Method-Singular Value Decomposition” (MTM-SVD). El nombre del método se debe a que combina dos técnicas desarrolladas de manera independiente; el método de multitaper (MultiTaper Method, MTM), y la descomposición del valor singular (Singular Value

Descomposition, SVD). El MTM-SVD permitir encontrar las oscilaciones que son estadísticamente significativas, cuya señal se encuentra altamente correlacionada dentro de un gran número de series de tiempo obtenidas en un campo espacial y dentro de un ancho de banda particular. Además, el método permite describir las características espaciales de las frecuencias de interés, a través de la reconstrucción espacial de la oscilación asociada a cada frecuencia y de su ciclo canónico ([Mann & Park, 1999](#); [Correa-Ramirez y Hormazabal, 2012](#)).

#### 4.2.2. Integración de variables ambientales in situ (2002-2010) y la distribución y densidad de huevos y larvas de sardina común usando Modelos aditivos generalizados (GAMs)

Con la información de los proyectos “Evaluación del stock desovante de anchoveta y sardina común entre la V y X Regiones”, ejecutados en los años 2002, 2003, 2004, 2005, 2007, 2008, 2009 y 2010, se construyeron matrices geo-referenciadas con las densidades de huevos de sardina común (huevos\*0,05m<sup>2</sup>) y variables oceanográficas, correspondiente a las zonas centro (Constitución-Golfo de Arauco) y sur (Lebu-Corral) de Chile.

La base de datos oceanográfica (temperatura (°C), salinidad y oxígeno (ml/L)) en los distintos años se encontraba incompleta (Tabla 4.1), por tanto fue analizada a través del algoritmo Data Interpolating Variational Análisis (DIVA, <http://modb.oce.ulg.ac.be/projects/1/diva>), que es un método de análisis e interpolación de una grilla regular, el cual considera como parte de los análisis, la línea costera y características batimétricas de la zona de estudio ([Barth et al. 2010](#); [Troupin et al. 2010](#); [Tyberghein et al. 2011](#)) con el fin de generar dicha información faltante.

**Tabla 4.1.** Resumen de la data disponible para los diferentes años (d.c.: Data completa, d.i.: Data incompleta, n.d.: No hay data).

| Año  | Zona   | Densidad Huevos | Ecosonda (m) | Viento (n) | Temperatura (°C) | Salinidad | Oxígeno (ml/L) |
|------|--------|-----------------|--------------|------------|------------------|-----------|----------------|
| 2002 | Centro | d.c.            | d.c.         | d.c.       | d.i.*            | n.d.      | n.d.           |
|      | Sur    | d.c.            | d.c.         | d.c.       | d.i.*            | n.d.      | n.d.           |
| 2003 | Centro | d.c.            | d.c.         | d.c.       | d.i.*            | n.d.      | n.d.           |
|      | Sur    | d.c.            | d.c.         | d.c.       | d.i.*            | n.d.      | n.d.           |
| 2004 | Centro | d.c.            | d.c.         | d.i.       | d.i.*            | d.i.*     | d.i.*          |
|      | Sur    | d.c.            | d.c.         | d.i.       | d.i.*            | d.i.*     | d.i.*          |
| 2005 | Centro | d.c.*           | d.c.         | d.c.       | d.i.*            | d.i.*     | d.i.*          |
|      | Sur    | d.c.            | d.c.         | d.i.       | d.i.*            | d.i.*     | d.i.*          |
| 2007 | Centro | d.c.            | d.c.         | d.i.       | d.i.*            | d.i.*     | d.i.*          |
|      | Sur    | d.c.            | d.c.         | d.i.       | d.i.*            | d.i.*     | d.i.*          |
| 2008 | Centro | d.c.*           | d.c.         | d.c.       | d.i.*            | d.i.*     | d.i.*          |
|      | Sur    | d.c.            | d.c.         | d.c.       | d.i.*            | d.i.*     | d.i.*          |
| 2009 | Centro | d.c.            | d.c.         | d.c.       | d.i.*            | d.i.*     | d.i.*          |
|      | Sur    | d.c.            | d.c.         | d.i.       | d.i.*            | d.i.*     | d.i.*          |
| 2010 | Centro | d.c.            | d.c.         | d.c.       | d.i.*            | d.i.*     | d.i.*          |
|      | Sur    | d.c.            | d.c.         | d.i.       | d.i.*            | d.i.*     | d.i.*          |

(d.c.\*: Data completa pero con bajo número de estaciones positivas, d.i.\*: Data incompleta por tanto se interpola con DIVA ver metodología)

Posteriormente, se relacionó la densidad de los huevos de las distintas zonas y años con las variables predictoras (Tabla 4.2) a través de los modelos aditivos generalizados (GAMs), con el objetivo de ser utilizadas en la predicción y la caracterización del hábitat cuando los modelos seleccionados consideran explícitamente a estas variables predictoras ([Cubillos et al., 2010](#)). Estas relaciones esperadas son claramente no lineales, ya que este método acomoda una amplia gama de formas funcionales y no requiere ninguna asunción acerca de la forma de las funciones ([Augustin et al., 1998](#); [Bernal 1999](#); [Agenbag et al., 2003](#); [Stratoudakis et al., 2003](#)). El modelo aditivo permite al modelo lineal reemplazar las funciones lineales de los predictores por funciones suavizadas. La forma general del modelo lineal es,

$$Y = \alpha + \sum_{i=1}^n \beta X_i + \varepsilon \quad (1)$$

al reemplazar que daría de la siguiente forma,

$$Y = \alpha + \sum_{i=1}^n f(X_i) + \varepsilon \quad (2)$$

Donde  $Y$  es la respuesta,  $X_i$  es el predictor,  $\alpha$  y  $\beta$  son los parámetros y  $\varepsilon$  es el error. La  $f_i$  es una función generalmente desconocida y es estimada usando el suavizado (ajuste) en base a la dispersión de los datos. El análisis de los modelos aditivos generalizado (GAM) fue a través del programa R, que es un programa de libre distribución (<http://www.r-project.org>, [Hornik, 2002](#)) e integra paquetes computacionales que permiten incluir modelos GAM (<http://www.cran.r-project.org>). El paquete utilizado fue el “*mgcv*”, es el principal programa para ajustar GAM ([Wood 2003](#)). Este programa selecciona en forma automática de modelos a utilizar tales como el Método de Validación Cruzada General (GCV) o Método de Akaike (AIC), además utiliza los suavizadores multidimensionales ([Wood 2003](#)). Los criterios metodológicos utilizados en los GAMs se basan en los expuestos en los proyectos de la Unión Europea (EU Study 99/080, <http://ruwpa-st.andrews.ac.uk/depmodel>) y Chile (FIP 2010-02, [Cubillos et al. 2011](#)), cuyas mejoras principales se resumen en: a) Modelación independiente del sistema de coordenadas, de esta manera los modelos serían insensitivos a cambios en el sistema de coordenadas y b) Modelación de interacciones, cuyo principal tópico es cómo escalar la covarianza relativa de las variables.

Para la visualización de las salidas de los modelos GAMs y datos reales de abundancia de huevos de sardina común, se utilizó el programa Ocean Data View (ODV, versión 4.2.1).

Criterios y recomendaciones generados al momento de analizar la data son:

- Se utilizaron las estaciones ubicadas hasta la isóbata de los 550m, la cual representa entre el 98 y 99 % de las estaciones muestreadas.
- La zona centro de los años 2005 y 2008 no se utilizó en el proceso de ajuste de los GAMs, debido a la baja presencia de estaciones positivas (4 y 1 respectivamente) y muy distante entre ellas.
- En la zona sur, para los años 2008, 2009 y 2010, no se utilizaron en los procesos de ajuste de los GAMs, las variables oxígeno y viento debido a los pocos registros generados en los cruceros.

- Para el proceso de ajuste de los modelos aditivos generalizados (GAMs) se utilizó una probabilidad de distribución de tipo *Quasi-Poisson* que describe correctamente la alta ocurrencia de datos cero, como lo son la data de densidad por estación (ver [Sepúlveda et al., 2009](#)).

**Tabla 4.2.** Resumen de los parámetros utilizados en los modelos aditivos generalizados (GAMs) para los diferentes años (2002, 2003, 2004, 2005, 2007, 2008, 2009, 2010).

| Tipo      | Zona   | Parámetro      | Explicación | Unidad              |
|-----------|--------|----------------|-------------|---------------------|
| Respuesta | Centro | Densidad huevo | Densidad    | 0,05 m <sup>2</sup> |
|           | Sur    | Densidad huevo | Densidad    | 0,05 m <sup>2</sup> |
| Predictor |        | Temperatura    |             | °C                  |
|           |        | Salinidad      |             | PSU                 |
|           |        | Oxígeno        |             | ml/l                |
|           |        | Longitud       |             | °W                  |
|           |        | Latitud        |             | °S                  |
|           |        | Profundidad    |             | m                   |
|           |        | Ecosonda       |             | nudos               |

### 4.3. RESULTADOS

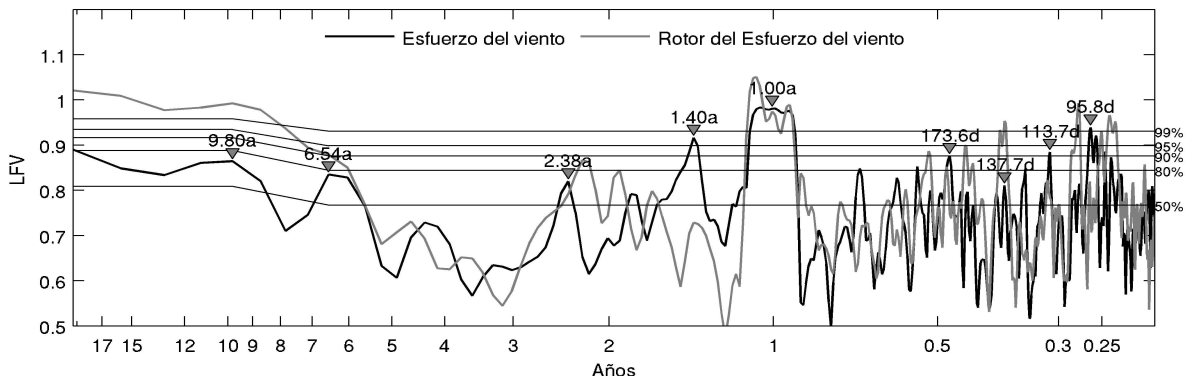
En el desarrollo de este objetivo se identificaron y caracterizaron las principales frecuencias de variabilidad presentes en la zona donde habita la sardina común y anchoveta, abarcando escalas de variabilidad desde la intraestacional hasta la decadal. Se planteó como hipótesis que las frecuencias de variabilidad ambiental, principalmente en la zona costera frente a la costa centro-sur de Chile, determinan la mayor parte de la variabilidad de estas dos especies. De esta manera, el análisis de las principales frecuencias de variabilidad identificadas en la zona costera, dentro de un contexto regional y hemisférico, podría brindar información para ayudar a explicar la variabilidad local de las especies, además del efecto que producen los cambios regionales sobre las mismas.

#### 4.3.1. Frecuencias de Variabilidad

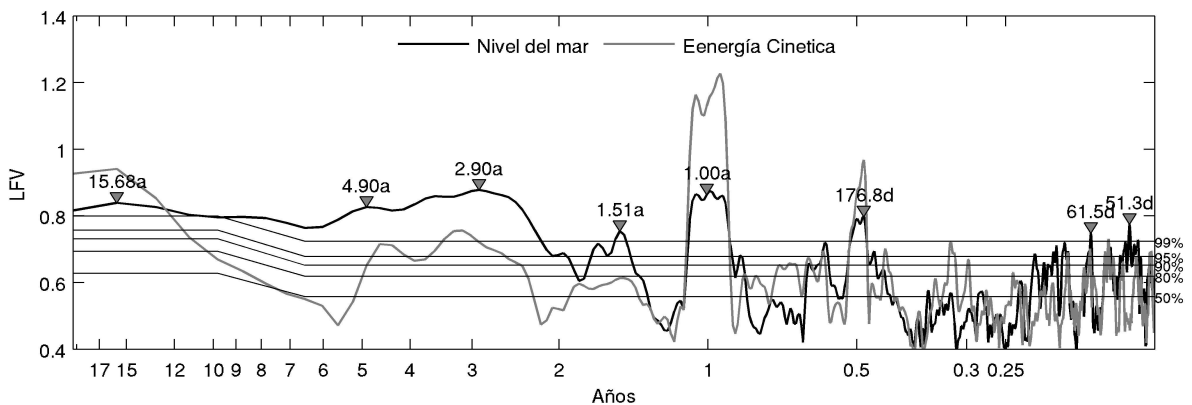
Para describir las principales frecuencias de variabilidad presentes en las series de tiempo de esfuerzo del viento, rotor del esfuerzo del viento, nivel del mar, energía cinética, clorofila y temperatura superficial del mar, se calculó para cada una de estas variables un espectro de Varianza Local Fraccional (LFV) a través del método MTM-SVD, el cual es un espectro de frecuencia regional que da cuenta de la importancia relativa de todas las frecuencias de variabilidad presentes en la región centro-sur de Chile. Para estos espectros se consideró un parámetro de ancho de banda  $p=2$  y  $k=3$  tapers (ventanas o filtros) ortogonales.

El espectro LFV del esfuerzo del viento y del rotor del esfuerzo del viento, presentado en la Figura 4.1, muestra que la principal frecuencia de variabilidad corresponde al ciclo anual. Dentro de la banda intra-anual se observa un máximo en la frecuencia semianual

(173.2 días) y estacional (95.8 días), además de otro máximo en 113.7 días, sobre el 90% de significancia. El rotor del esfuerzo del viento también presenta máximos alrededor de la frecuencia semianual y estacional, y además sobresale un pico sobre el 99% de significancia en la frecuencia de 137.7 días. Dentro de la banda inter-anual, se observa que solo la frecuencia de 1.40 años es significativa sobre el 95% de significancia. En esta banda, las frecuencias de variabilidad de 2.38 y 6.54 años, junto con la frecuencia de variabilidad decadal (9.8 años) poseen una significancia estadística cercana al 50%, indicando que el esfuerzo del viento y el rotor del esfuerzo del viento poseen una menor variabilidad inter-anual y decadal.



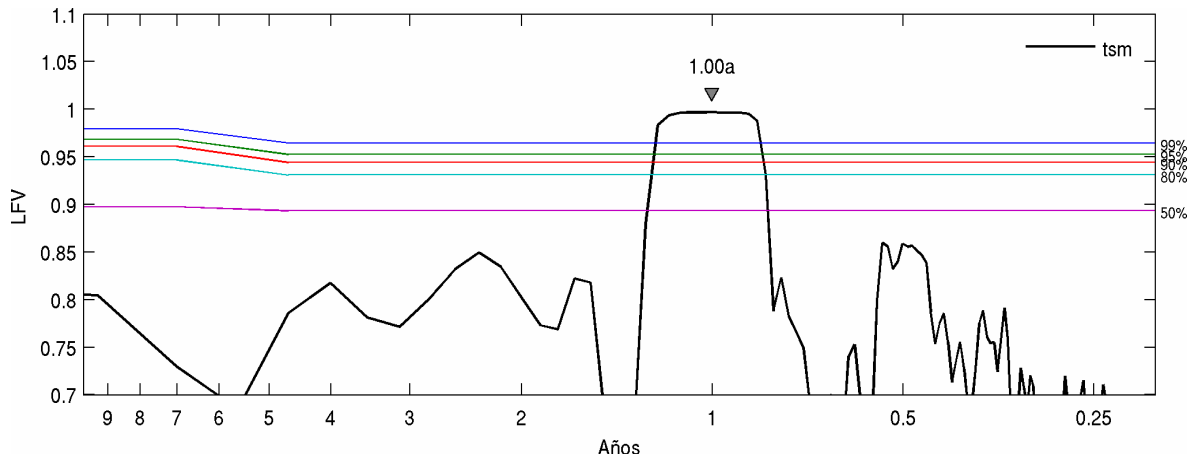
**Figura 4.1.** Espectro de varianza fraccional local (LFV) del esfuerzo del viento (línea negra continua) y del rotor del esfuerzo del viento (línea gris continua) para la región centro-sur de Chile (33-42°S; 76-71°W). Los niveles de significancia de 50%, 80%, 90%, 95% y 99%, fueron obtenidos a través de un experimento de remuestreo aleatorio (bootstrap).



**Figura 4.2.** Espectro de varianza fraccional local (LFV) del nivel del mar (línea negra continua) y de la energía cinética (línea gris continua) para la región centro-sur de Chile (33-42°S; 76-71°W). Los niveles de significancia de 50%, 80%, 90%, 95% y 99%, fueron obtenidos a través de un experimento de remuestreo aleatorio (bootstrap).

En el espectro LFV del nivel del mar y energía cinética (Figura 4.2), la frecuencia anual también aparece con un pico significativo, el cual se destaca de las demás frecuencias. Dentro de la banda intra-anual, se observan picos significativos sobre el 99% de significancia, en la frecuencia semianual (173.8 d) y en la banda intraestacional (picos en 61.5 y 51.3 días). Dentro de la banda inter-anual, el nivel del mar presenta cuatro máximos sobre el 99% de significancia en las frecuencias de 1.51, 2.90, 4.90 y 15.68 años, máximos que también son observados en la energía cinética, aunque con menores

niveles de significancia. El nivel de mar posee un incremento significativo de energía hacia la banda decadal (~10 años) y cuasi-decadal (~15 años), en cambio la energía cinética alcanza niveles de significancia sobre el 90% solo en la banda de frecuencia cuasi-decadal.

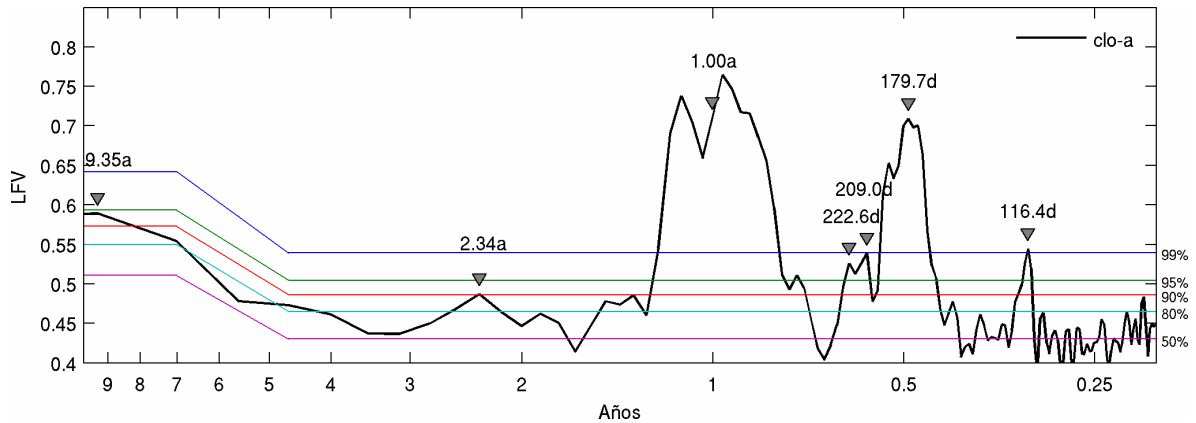


**Figura 4.3.** Espectro de varianza fraccional local (LFV) de temperatura superficial del mar satelital, para la región centro-sur de Chile (33-42°S; 76-71°W). Los niveles de significancia de 50%, 80%, 90%, 95% y 99%, fueron obtenidos a través de un experimento de remuestreo aleatorio (bootstrap).

El espectro LFV de la tsm presenta niveles de significancia sobre el 95% solo en la banda anual, entre 310 y 445 días (Figura 4.3). En las otras bandas de frecuencia no se alcanzan valores significativos al 50%. Esto indica que para la región de estudio, el ciclo anual de la tsm corresponde a la fluctuación más importante. Esto se refleja en que para la región de estudio, en promedio, el ciclo anual explica ~78% de la varianza total.

El espectro LFV de clo-a satelital, calculado a través del método MTM-SVD para toda la región centro-sur de Chile, presenta incrementos significativos de energía, sobre el 99% de significancia, en una amplia banda centrada en la frecuencia anual (426-310 días) y dentro de la banda intra-anual los incrementos significativos de energía (>99%) ocurren entre los periodos de 222-209 días, de 193-279 días (banda semianual) y ~116 días (Figura 4.4). Además, en la banda secular, hacia frecuencias mas bajas que la decadal (>10 años), se observó un incremento de la variabilidad de la clo-a con niveles de significancia sobre el 90%.

En relación a la variabilidad de la clorofila en la región, la variabilidad asociada a periodos entre 120-160 días ha sido atribuida al paso de remolinos de mesoescala generados en la zona costera ([Hormazabal et al., 2004](#)). De otro lado, se ha sugerido que la amplitud de la banda anual se encuentra asociada al corrimiento (retraso/adelanto) del inicio de las estación de primavera a lo largo de la serie de tiempo ([Montecinos & Gómez et al., 2010](#); [Correa-Ramirez et al., 2012](#)).

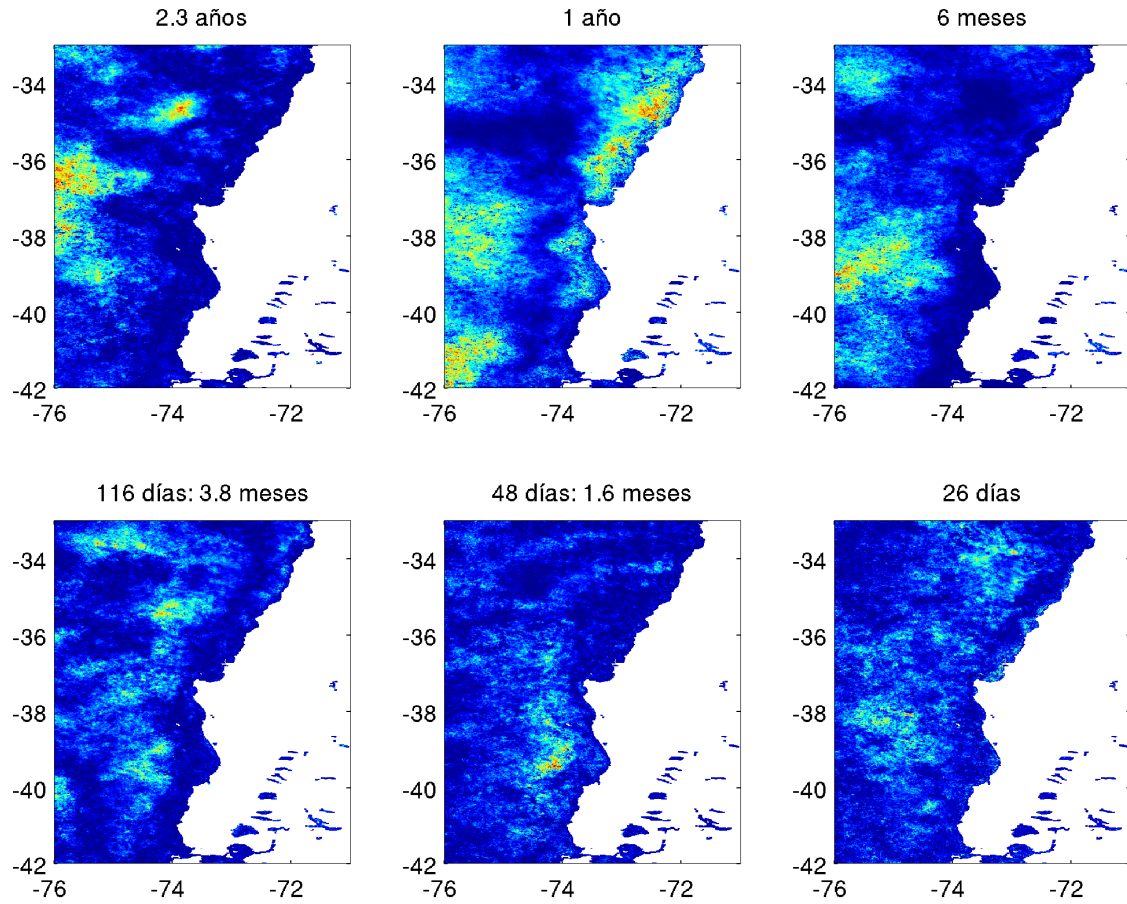


**Figura 4.4.** Espectro de varianza fraccional local (LFV) de clorofila-a satelital para la región centro-sur de Chile (33-42°S; 76-71°W). Los niveles de significancia de 50%, 80%, 90%, 95% y 99%, fueron obtenidos a través de un experimento de remuestreo aleatorio (bootstrap).

#### 4.3.2. Variabilidad Espacial

La distribución espacial de la fracción de varianza de clo-a que es explicada por las fluctuaciones con periodos de 2.3 años, 1 año, 6 meses, 3.8 meses, 48 días y 26 días, se presenta en la Figura 4.5. Los periodos seleccionados corresponden a los periodos donde el espectro LFV de la clo-a presenta incrementos significativos. La contribución que tienen las distintas bandas de frecuencia, a la variabilidad de la clo-a, no es uniforme en la región de estudio. Los periodos interanuales (2.6 años) e intra-anales (6 meses, 3.8 meses, 48 días y 26 días) contribuyen en mayor medida a la variabilidad observada en la zona de transición costera, en cambio el ciclo anual y decadal poseen una mayor contribución a la variabilidad de la clo-a en la zona costera, donde se encuentra el hábitat de sardina común y anchoveta. En la zona costera, el ciclo decadal contribuye principalmente en la zona ubicada al norte de ~37°S (Punta Lavapié), en cambio el ciclo anual contribuye en forma significativa en toda la zona costera de la region de estudio, con un mayor aporte al norte de 37°S (Figura 4.5).



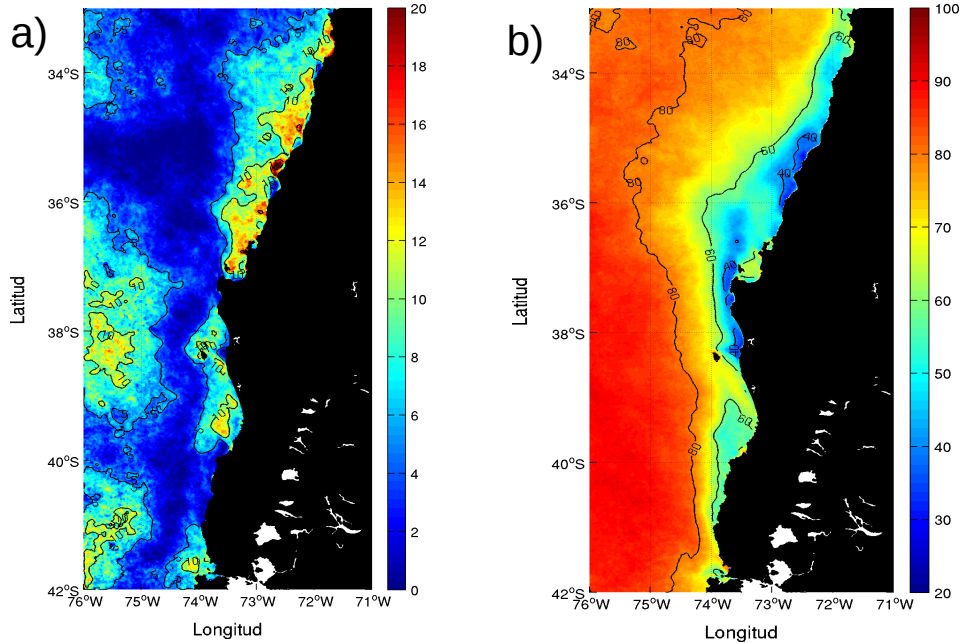


**Figura 4.5.** Distribución espacial de la fracción de varianza de la clorofila que es explicada por las fluctuaciones con periodos de 2.3 años (a), 1 año (b), 6 meses (c), 3.8 meses (d), 48 días (e) y 26 días (f). Los tonos azules intensos indican zonas con una baja contribución y los tonos rojos intensos zonas con una alta contribución a la varianza de cada una de los períodos.

A lo largo de la costa, a una distancia de  $\sim 100$  km, se presenta una franja latitudinal de una muy baja contribución del ciclo anual a la variabilidad de la clo-a (Figura 4.6a). Esta contribución del ciclo anual a la variabilidad de la clo-a, separa toda la región de estudio en una zona costera y otra oceánica. Dentro de la zona costera, el aporte del ciclo anual a la variabilidad de la clo-a es mínimo  $\sim 37^{\circ}\text{S}$  y entre  $40\text{-}41^{\circ}\text{S}$ , subdividiendo esta zona en tres: una zona costera norte que abarca desde  $33^{\circ}$  a  $\sim 37^{\circ}\text{S}$ , la cual posee la mayor extensión hacia fuera de la costa y su ciclo anual presenta la mayor contribución a la variabilidad de la clo-a; una zona costera central que se extiende entre Punta Lavapié ( $\sim 37^{\circ}\text{S}$ ) y Corral ( $\sim 40^{\circ}\text{S}$ ); una zona costera sur entre Corral ( $\sim 40^{\circ}$ ) y Ancud ( $\sim 42^{\circ}\text{S}$ ).

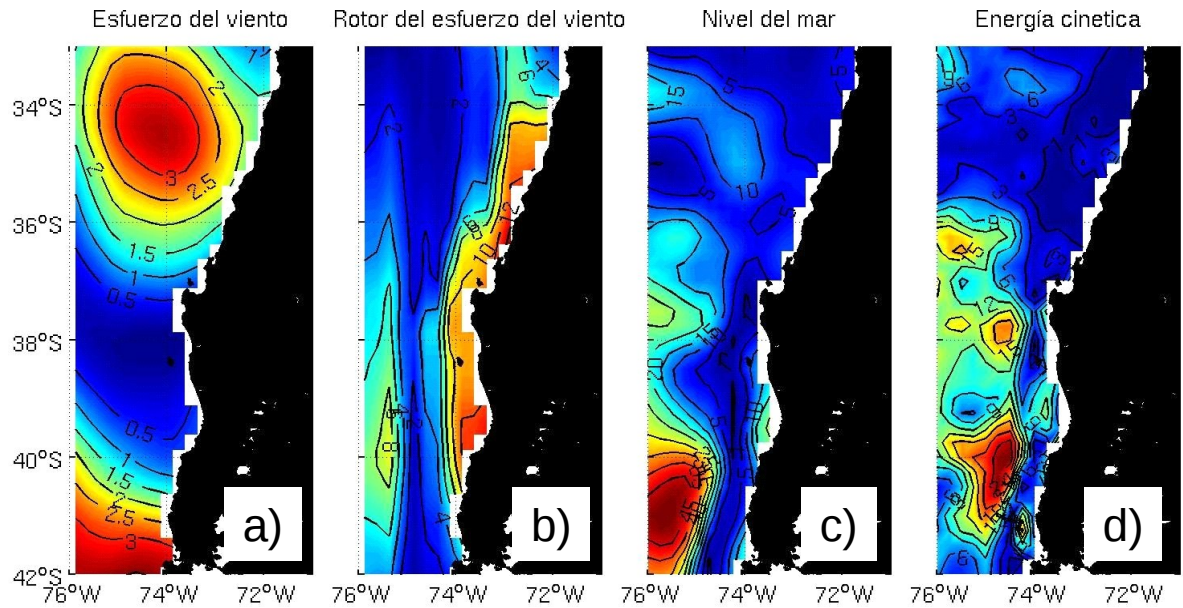
Al contrario de la clo-a, el ciclo anual de la tsm es responsable de la mayor parte de la variabilidad observada, explicando mas del 70% de la variabilidad en la mayor parte de la region, a excepción de la zona costera donde el ciclo anual explica entre el 40-60% de la variabilidad de la tsm (Figura 4.6b). En la banda costera los menores porcentajes de varianza se observan frente a Punta Lavapié ( $\sim 40\%$ ), Constitución ( $\sim 40\%$ ), Corral ( $\sim 60\%$ ) y Ancud (60%). El menor porcentaje de varianza explicado por el ciclo anual en

la zona costera, sugiere la presencia de otras escalas de variabilidad de tsm en esta zona. Debido a que la surgencia costera es el principal agente físico que controla el calentamiento-enfriamiento de las aguas en la zona costera, es posible que la variabilidad de surgencia sobre escalas temporales diferentes a la anual, pueden estar ejerciendo un efecto importante sobre la temperatura de la zona costera.



**Figura 4.6.** a) Distribución espacial de la fracción de varianza de la clorofila satelital y b) de la temperatura superficial del mar que es explicada por las fluctuaciones con periodos anuales. Las líneas de contornos están graficados cada 5 unidades (0, 5, 10, 15, 20) para la clorofila y cada 20 unidades (20:20:100) para la temperatura. La varianza explicada esta en expresada en % respecto de la varianza total de cada serie.

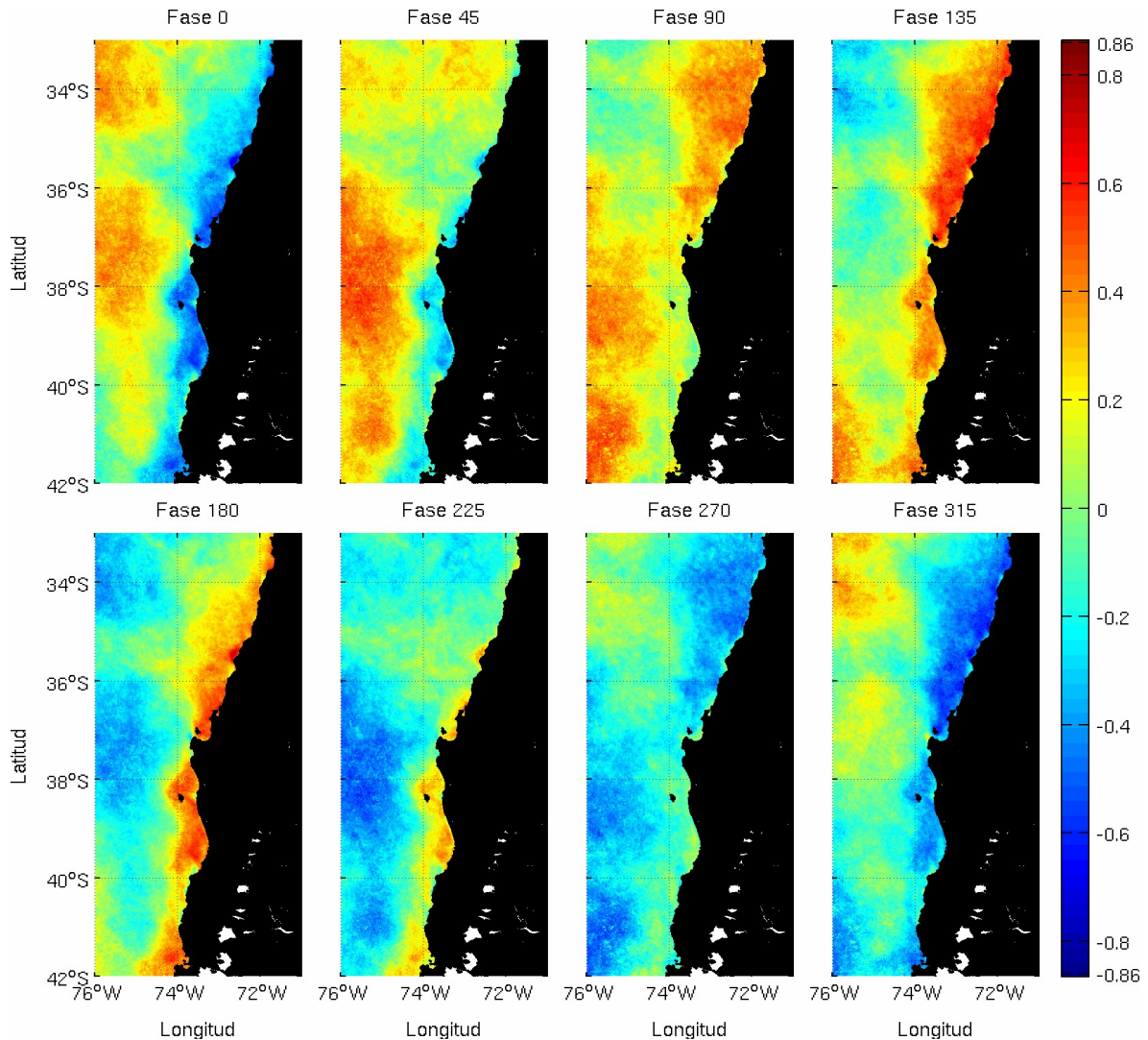
Respecto al esfuerzo del viento, la varianza explicada por la frecuencia anual está entre 1 y 3%, principalmente en dos zonas: la zona ubicada al norte de Punta Lavapie y la zona al sur de Corral (Figura 4.7). Sin embargo, el ciclo anual del rotor del esfuerzo del viento presenta una distribución distinta, donde mas del 7% de la varianza explicada por al ciclo anual se observa en la zona costera entre Corral y Navidad, y en una zona oceánica al oeste de 75°W. El campo de varianza explicada por el ciclo anual del rotor del esfuerzo del viento muestra un patrón espacial que se asemeja al del nivel del mar y la energía cinética (Figura 4.7). En ambas variables el mayor porcentaje de varianza explicada se encuentra fuera de la zona costera al sur de 36°S. Sin embargo, hay un desfase espacial en  $\sim 1^\circ$  de longitud en la ubicación de los mayores valores oceánicos de varianza explicada entre estos campos. De esta manera, los mayores porcentajes de varianza explicada ( $>15\%$ ) en el nivel del mar se ubican al oeste de los 75°W, mientras que los mayores porcentajes en la energía cinética se encuentran entre los 74°-75°W.



**Figura 4.7.** Distribución espacial de la varianza explicada por el ciclo anual, para a) esfuerzo del viento, b) rotor del esfuerzo del viento, c) nivel del mar y d) energía cinética.

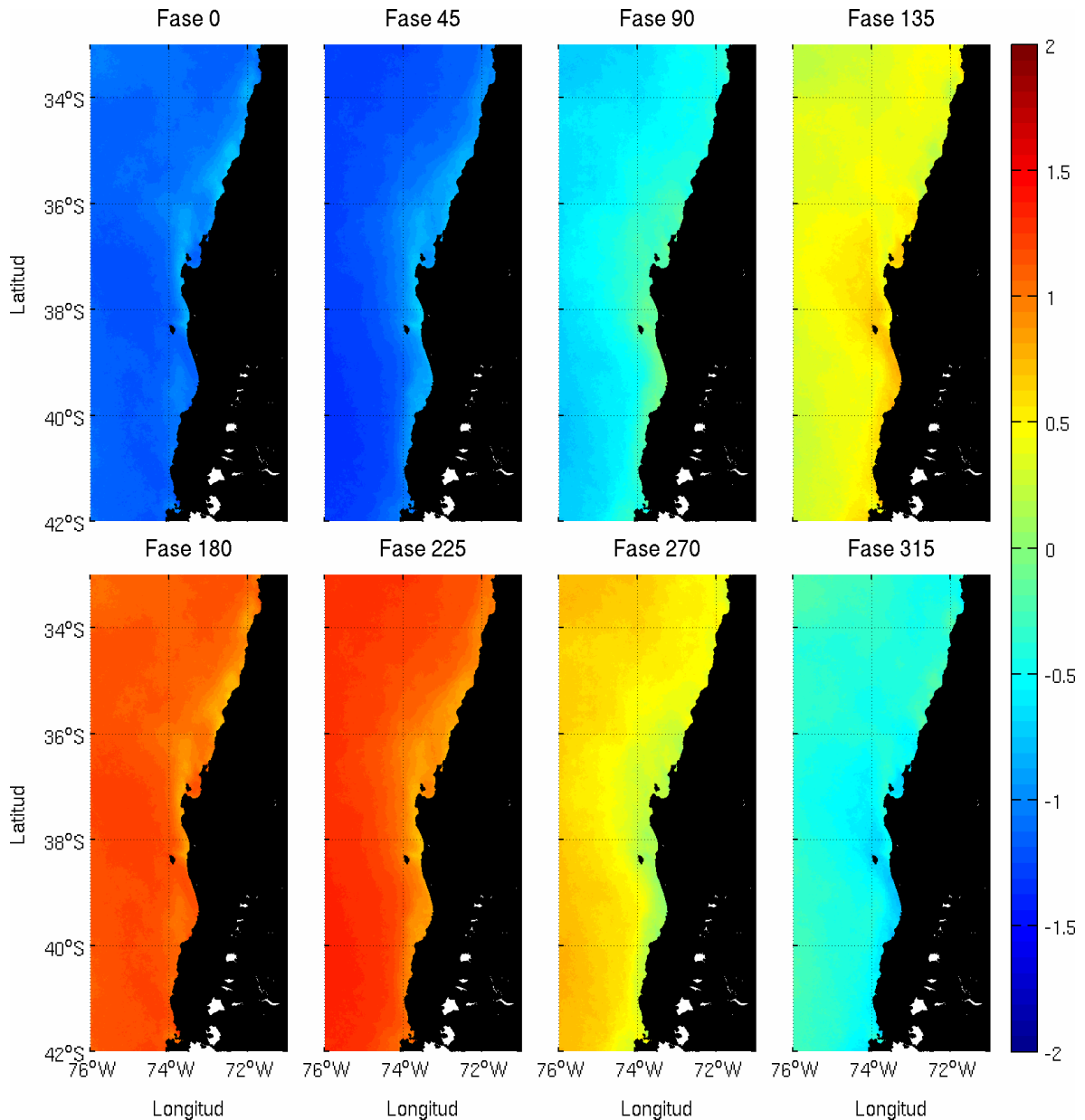
### 4.3.3. Reconstrucción espacial del ciclo anual

La reconstrucción espacial del ciclo anual de la clo-a satelital sobre la región centro-sur de Chile es mostrada en la Figura 4.8. En general, en el patrón espacial de la clo-a se observa una subdivisión, entre zona costera y zona oceánica. En el extremo norte de la zona oceánica, se observa un incremento de la concentración de clo-a a comienzos de invierno (Fase 270°), el cual se intensifica y se extiende hasta 39°S en julio (Fase 0°). Este incremento de clo-a se comienza a debilitar en la zona norte (Fase 45°) y continua propagándose hacia el extremo sur de la zona de estudio, alcanzando un máximo en octubre (45°), cuando en el extremo norte (33°-25°S) comienza a iniciarse el mínimo que luego se propagara hacia el sur.



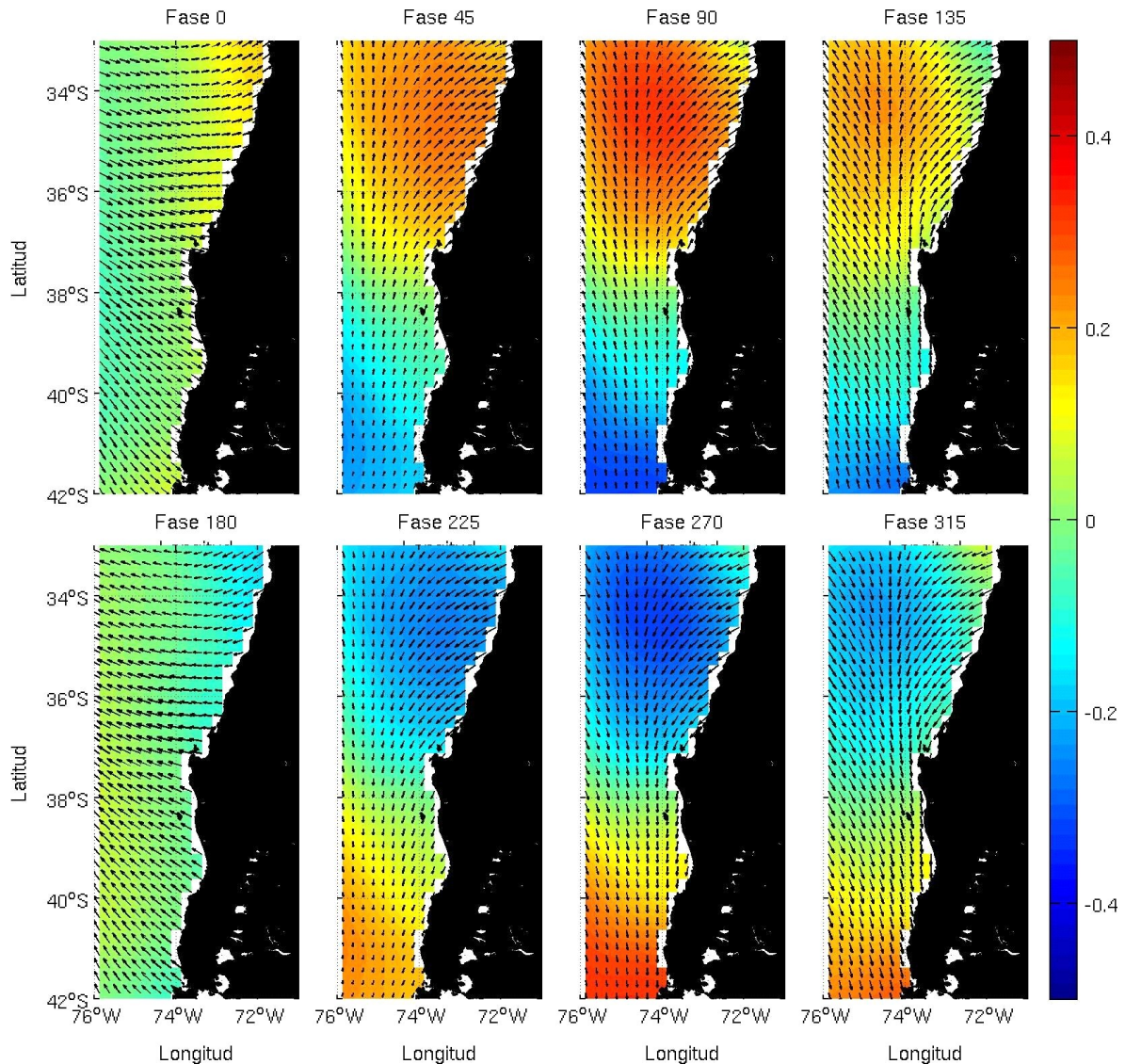
**Figura 4.8.** Reconstrucción espacial del ciclo anual de la clorofila-a satelital para la región centro-sur de Chile. La fase 0 corresponde al inicio de la serie (mitades del mes de julio), representando también el comienzo del ciclo anual. Por tanto, la fase 315 corresponde al final del ciclo (comienzos del mes de junio).

En la zona costera, la señal anual de clo-a se propaga de norte a sur, abarcando toda la zona de estudio (Figura 4.8). Durante septiembre (Fase 45°S), el ciclo se inicia con la aparición de un incremento de clo-a en la zona costera frente a Valparaíso (~33°S). Este incremento de clo-a se extiende hasta Punta Lavapié a mediados de octubre (Fase 90°) y luego alcanza Ancud a inicios de diciembre (135°). El incremento en la clo-a se intensifica en la medida que se propaga hacia el sur, de esta manera alcanza su máximo frente a Valparaíso durante diciembre y posteriormente un máximo frente a Ancud en a mediados de enero (Fase 180°). De forma similar, cuando aparecen las mínimas concentraciones de la clo-a frente a Valparaíso durante marzo (Fase 225), se inicia la propagación del mínimo anual de la clo-a hacia el sur, en fase opuesta a la propagación del máximo.



**Figura 4.9.** Reconstrucción espacial del ciclo de la temperatura superficial del mar satelital para la región centro-sur de Chile. La fase 0 corresponde al inicio de la serie (mitades del mes de julio), representando también el comienzo del ciclo anual. Por tanto, la fase 315 corresponde al final del ciclo (comienzos del mes de junio).

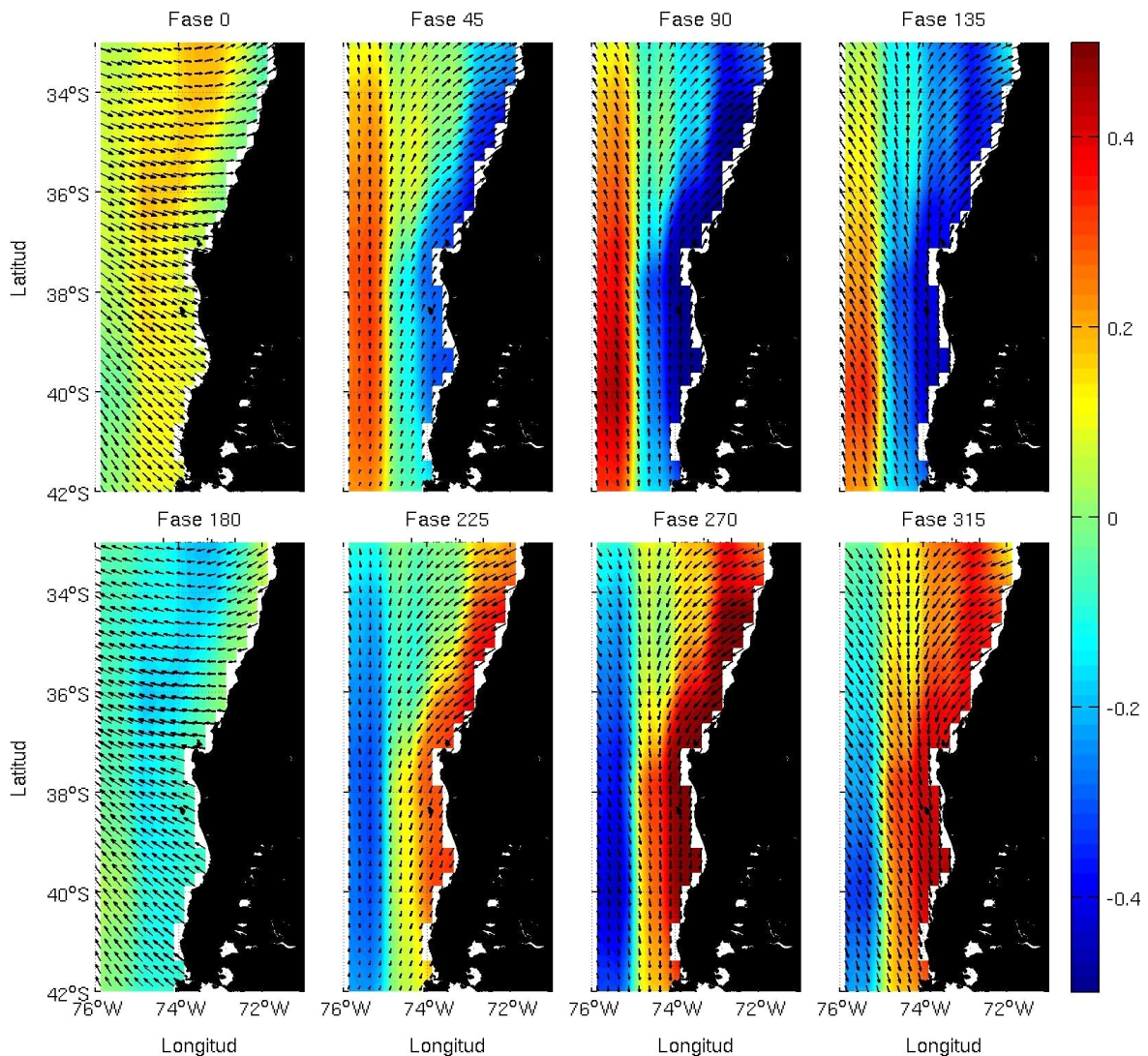
La reconstrucción espacial del ciclo anual de la tsm satelital sobre la región centro-sur de Chile es mostrada en la Figura 4.9. En general, la mayor parte de la región presenta un patrón anual marcado con menores temperaturas en periodo de invierno (Fases 0 y 45), que van aumentando gradualmente hasta alcanzar sus valores máximos en periodo de verano (Fases 180 y 225). Sin embargo, la menor amplitud que alcanzan las anomalías positivas/negativas de la zona costera indica una menor variabilidad de la temperatura costera a lo largo del año. Particularmente se aprecia una leve diferencia de temperaturas para el Golfo de Arauco-Bahía de Concepción e isla Mocha entre el periodo de primavera (Fases 90 y 135) y su fase opuesta (otoño; Fases 270 y 315), e igualmente para Punta Lavapié y la costa de Constitución entre periodos de invierno (Fases 0 y 90) y verano (Fases 180 y 225).



**Figura 4.10.** Ciclo canónico de la reconstrucción MTM-SVD de la frecuencia anual del esfuerzo del viento. Los tonos azules (rojos) indican anomalías negativas (positivas) en el esfuerzo del viento. El tamaño y dirección de las flechas indican intensidad y dirección de las anomalías del esfuerzo del viento.

En el ciclo anual del esfuerzo del viento (Figura 4.10), se observa la propagación hacia el sur de una anomalía positiva donde el esfuerzo del viento fluctúa en dirección norte-sur. Esta anomalía se forma al norte, en la fase 0° (octubre) y se desplaza hacia el sur mientras se intensifica progresivamente, hasta alcanzar la Punta Lavapie en la fase de 90° (enero). Posteriormente esta anomalía se debilita dando cabida a la llegada desde el norte de una anomalía negativa durante la fase de 270° (julio). Al sur, entre Punta Lavapie y 42°S, el ciclo anual es de carácter estacionario, mostrando una intensificación de las anomalías positivas del esfuerzo del viento en dirección norte-sur durante la fase de 270° (julio). A diferencia del esfuerzo del viento, el ciclo anual del rotor del esfuerzo del viento muestra una propagación hacia afuera de la costa. En este ciclo se observa como las anomalías negativas (positivas) en el rotor del esfuerzo del viento empiezan a formarse en la zona costera la fase de 0° (180°), se intensifican en la fase de 90° (270°), después se desprenden de la costa y viajan hacia el oeste mientras se debilitan, hasta

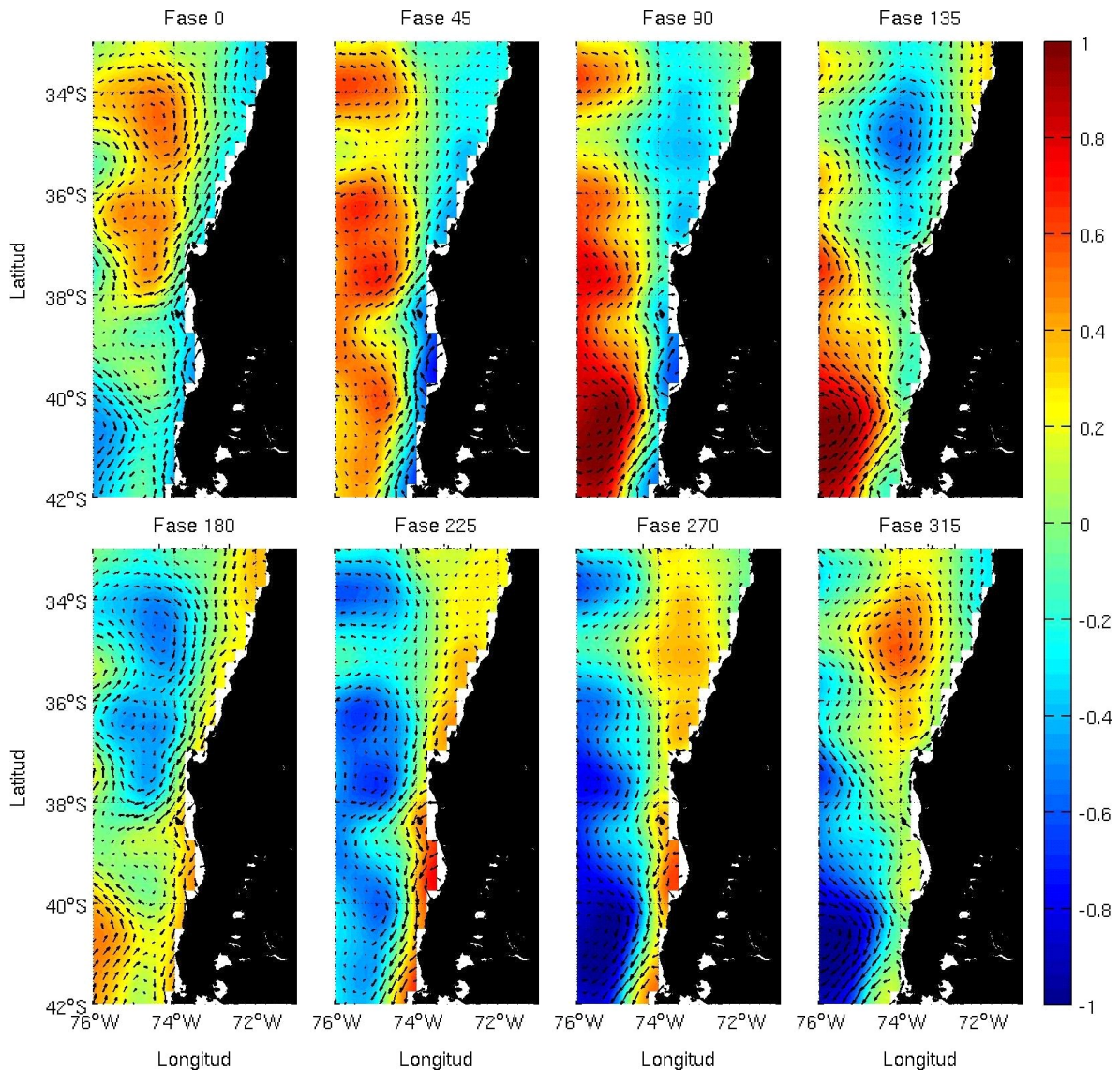
alcanzar su mínimo oceánico en la fase de 180 (360° o 0°). Posteriormente, entre la fase de 225°-270° el rotor del esfuerzo del viento se intensifica y alcanza su máximo oceánico al oeste de los 75°S (Figura 4.11).



**Figura 4.11.** Ciclo canónico de la reconstrucción MTM-SVD de la frecuencia anual del rotor del esfuerzo del viento. Los tonos azules (rojos) indican anomalías negativas (positivas) en el rotor. El tamaño y dirección de las flechas indican intensidad y dirección de las anomalías del esfuerzo del viento.

A lo largo de toda la región, el ciclo anual del nivel del mar se caracteriza por una propagación hacia el oeste de sus anomalías (Figura 4.12). En este ciclo se observa la formación de norte a sur de anomalías positivas en la zona costera, que crecen y se intensifican entre la fase 135° y 225°. Entre las fases 315 y 360° (0°), estas anomalías se desprenden de la costa y viajan hacia el oeste, dando cabida a la formación de nuevas anomalías negativas en la zona costera, durante la fase de 0°. Las anomalías tienen una velocidad de propagación mayor hacia el norte de la región de estudio, y se ha documentado que esta velocidad corresponde a la velocidad teórica de propagación de una onda de Rossby ([Correa-Ramirez et al., 2012](#)). Igualmente, las anomalías en el nivel del mar poseen mayor tamaño ( $\sim 2^\circ$  de diámetro) en el sector norte que en el sector

sur ( $\sim 1^\circ$  de diámetro) de la región de estudio, lo que también es consistente con los radios teóricos de deformación de Rossby para estas latitudes.



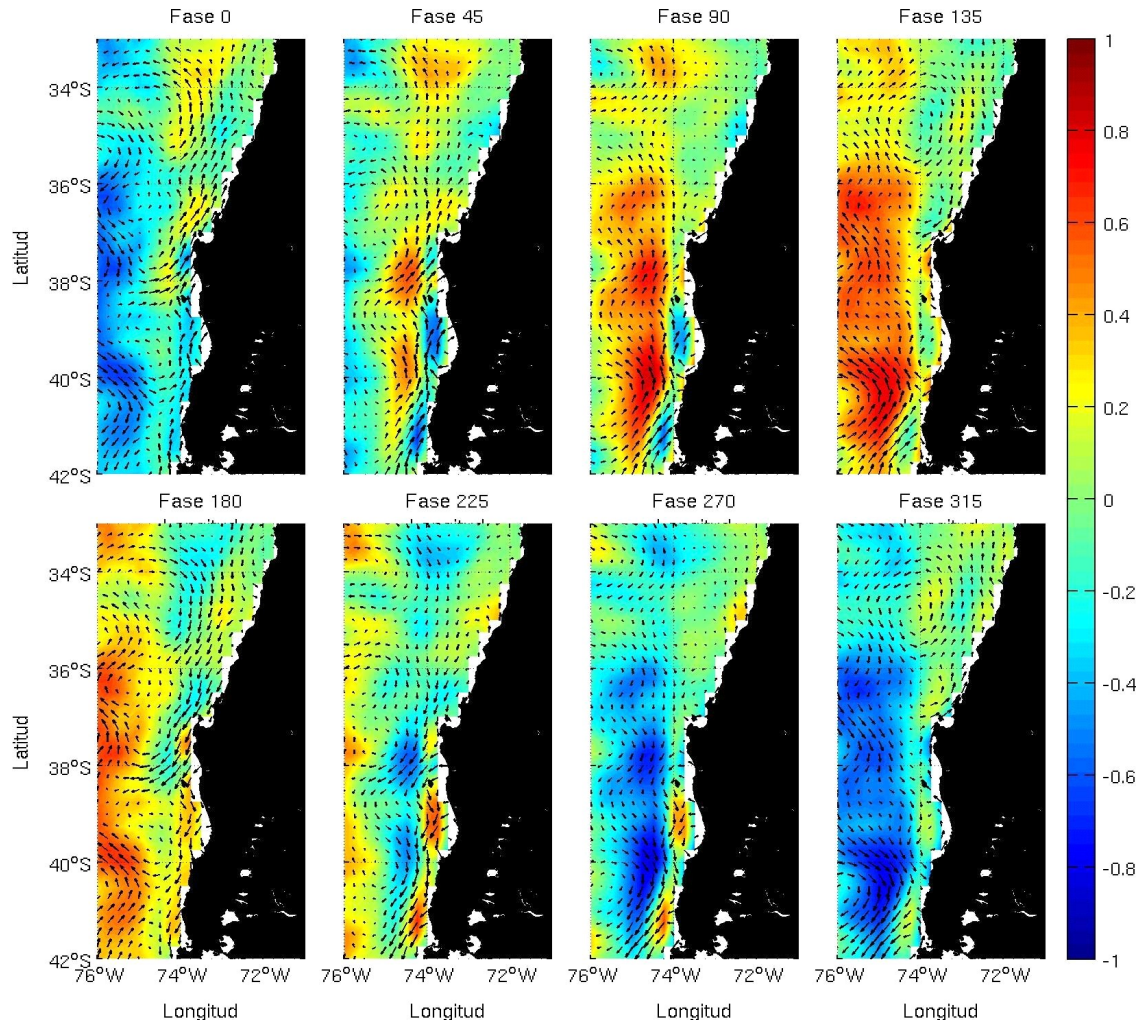
**Figura 4.12.** Ciclo canónico de la reconstrucción MTM-SVD de la frecuencia anual del nivel del mar y las corrientes geostróficas. Los tonos azules (rojos) indican anomalías negativas (positivas) del nivel del mar. El tamaño y dirección de las flechas indican intensidad y dirección de las anomalías las corrientes geostróficas.

La propagación de las anomalías determina una alternancia en la circulación de la región. El paso de anomalías positivas en el nivel del mar genera el predominio de una circulación de tipo anticiclónica, mientras el paso de anomalías negativas favorece una circulación de tipo ciclónica en la región.

En el ciclo anual de la energía cinética (Figura 4.13) también se observa una propagación hacia el oeste de anomalías positivas, que se originan de norte a sur en el límite de la zona costera (alrededor de  $75^\circ\text{W}$ ) durante la fase de  $0^\circ$ . Estas anomalías se intensifican y crecen hacia el oeste entre las fases 45 y  $135^\circ$ . Después de alcanzar su máxima intensidad, las anomalías positivas comienzan a moverse hacia el oeste en la fase de  $180^\circ$ , dando lugar a la formación de una nueva anomalía negativa en el límite de



la zona costera. La propagación de las anomalías de la energía cinética se encuentra asociada con un cambio en el sentido de las corrientes geostroficadas de la región. Las anomalías positivas en la energía cinética se encuentran asociadas a la intensificación de las corrientes en el borde de la zona costera, que se encuentran orientadas en dirección sur-norte, en tanto el paso de anomalías negativas se encuentra asociado a un debilitamiento e inversión de las corrientes hacia el sur.

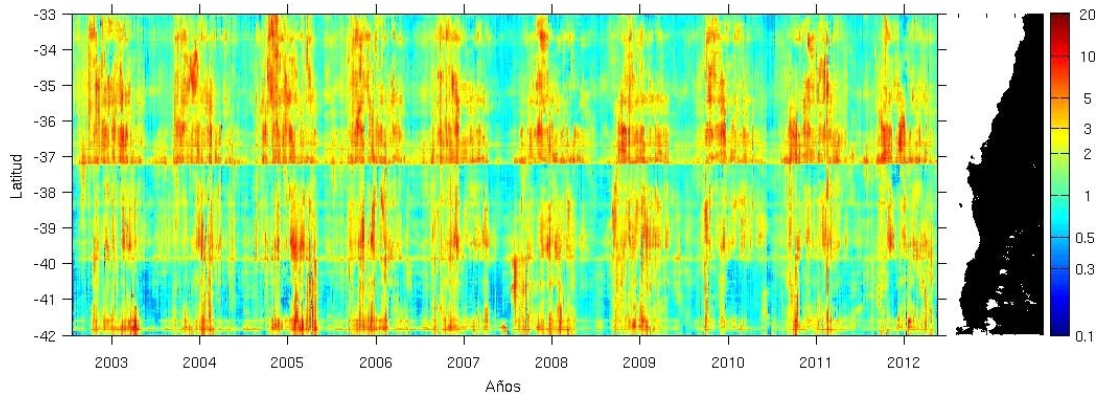


**Figura 4.13.** Ciclo canónico de la reconstrucción MTM-SVD de la frecuencia anual de la energía cinética y las corrientes geostroficadas. Los tonos azules (rojos) indican anomalías negativas (positivas) de la energía cinética. El tamaño y dirección de las flechas indican intensidad y dirección de las anomalías las corrientes geostroficadas.

#### 4.3.4. Diagramas longitudud tiempo

La variabilidad interanual de la clo-a satelital dentro la banda costera (primeros 100 km desde la costa) a lo largo de la región centro-sur de Chile, es analizada mediante un gráfico Hovmöller latitud-tiempo presentado en la Figura 4.14. Para todo el periodo analizado se identifican tres zonas geográficas que presentan diferencias importantes en la concentración y la variabilidad de clo-a. La primera zona (zona norte) registra los mayores valores de clo-a y una fuerte variabilidad anual, y se extiende desde el límite norte de nuestra área de estudio frente a Valparaíso (33°S) hasta Punta Lavapié (37°S), abarcando la costa de Constitución, la Bahía de Concepción y el Golfo de Arauco. La

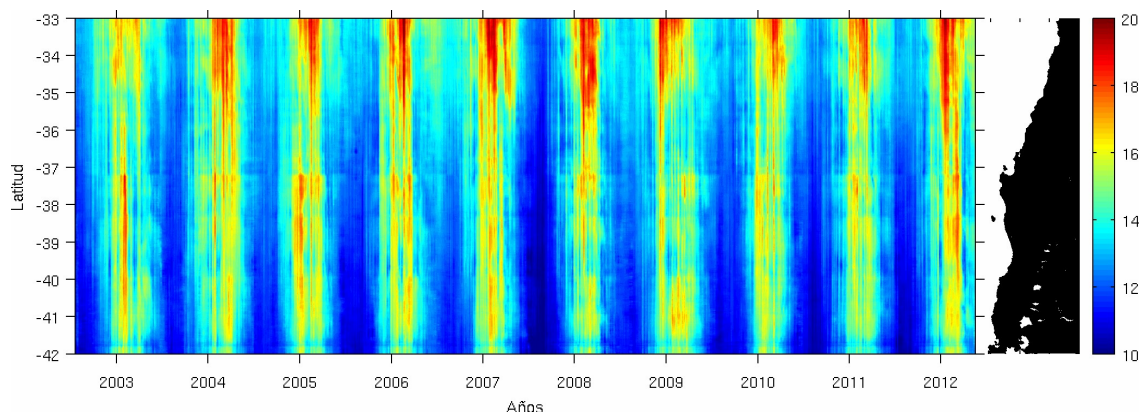
segunda zona (zona central) se extiende desde Punta Lavapié hasta Corral (~40°S) y presenta concentraciones menores a la primera zona y un ciclo anual menos acentuado. La tercera zona (zona sur) es la que presenta las menores concentraciones de clo-a, extendiéndose desde Corral hasta el límite sur de la región analizada, frente a Ancud (42°S).



**Figura 4.14.** Diagrama Hovmöller que muestra variabilidad interanual de la clorofila-satelital promedio de los primeros 100 km de la costa.

Durante el periodo 2007-2012, se observa una disminución en las concentraciones de clorofila en la zona norte. En contraste, en la zona sur se exhibieron las menores concentraciones de clorofila, particularmente durante los meses invernales del periodo 2002-2008. La zona central no presenta una variabilidad interanual significativa en la concentración de clorofila.

La Variabilidad interanual de la temperatura superficial del mar dentro de los primeros 100 km a lo largo de la región centro-sur de Chile es mostrada en la Figura 4.15. Para la región analizada, los campos de tsm también muestran las tres zonas antes descritas para los campos de clo-a (Figura 4.5), aunque de forma menos acentuada. Para todos los años se observan incrementos en la TSM desde la zona norte de las regiones descritas que disminuyen conforme se avanza hacia el sur. Sin embargo, se puede observar un límite más marcado de las temperaturas en Punta Lavapié que continúan su disminución hacia la zona sur. Los años más cálidos dentro de la serie son el 2007 y 2012, y los más fríos el 2003 y el 2010.

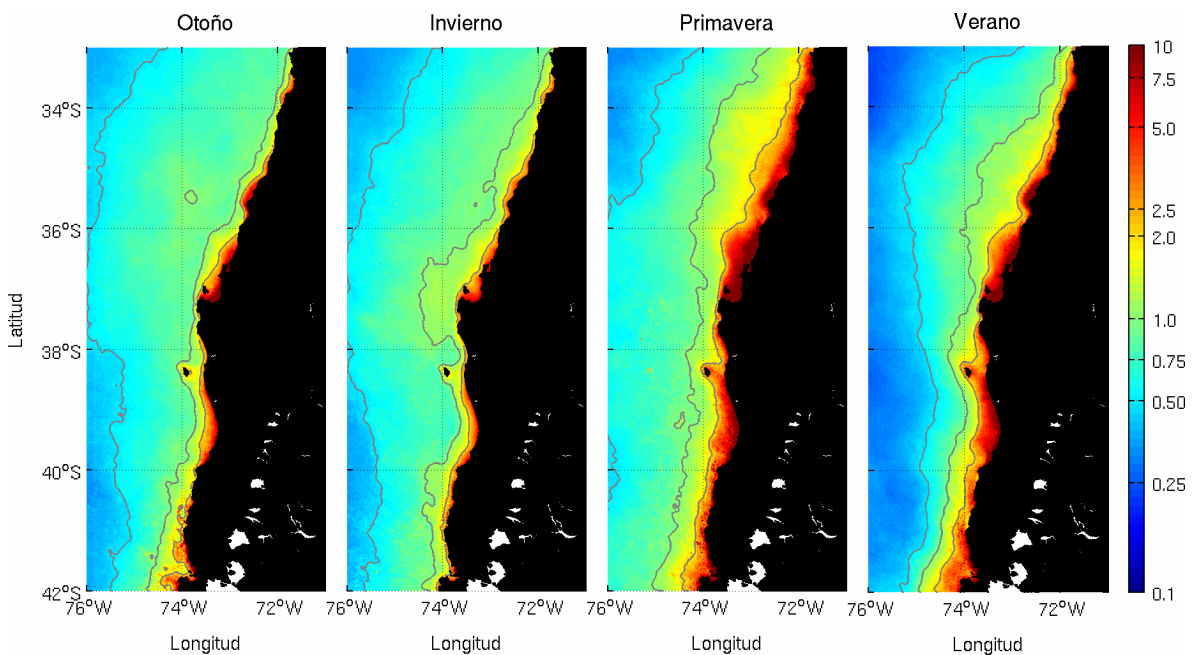


**Figura 4.15.** Diagrama Hovmöller que muestra la variabilidad interanual de la temperatura superficial del mar promedio de los primeros 100 km de la costa.

#### 4.3.5. Variabilidad estacional del viento y nivel del mar

El promedio estacional de clo-a satelital en la región centro-sur de Chile es mostrado en la Figura 4.16. En términos generales se observan dos zonas con distintas magnitudes de concentración de clo-a, donde los mayores valores se encuentran al norte de los 37°S, y los menores valores al sur de este límite latitudinal. Para todos los periodos, la zona norte presenta 2 focos de concentración de clo-a: (1) en la zona comprendida desde el golfo de Arauco hasta la bahía de Concepción, y (2) en la zona costera de Constitución. La zona sur presenta un extenso foco de clo-a que abarca desde Lebu hasta la zona Corral (~40°S). Para los periodos de otoño-invierno, la isolínea de 2 mg m<sup>-3</sup> se presenta como una banda estrecha a largo de las costa, contrario a lo que sucede con la isolínea de 0.5 mg m<sup>-3</sup>, la cual se extiende como una amplia banda hacia océano abierto (~76°W).

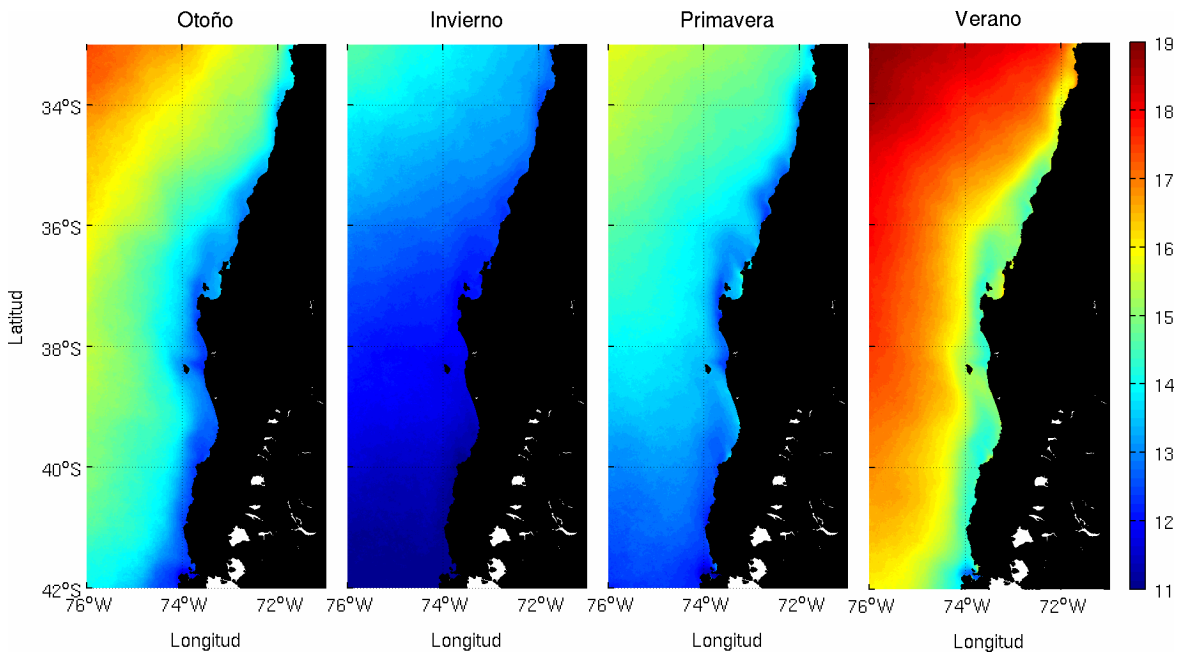
Para el periodo de primavera se observa una extensión de todas las isolíneas de clo-a hacia océano, donde la isolínea de 0.5 mg m<sup>-3</sup> supera los 76°W. En verano todas las isolíneas se estrechan hacia la costa, donde la mínima no supera los ~75°W. Los focos de clo-a mencionados anteriormente coinciden con la extensión latitudinal de las zonas de desove de anchoveta (*Engraulis rigens*) (Soto-Mendoza et al., 2012).



**Figura 4.16.** Promedio estacional de clorofila-a satelital (mg m<sup>-3</sup>) para la región centro-sur de Chile (33-42°S; 76-71°W). Las líneas de contorno corresponden a las isolíneas de 2, 1 y 0.5 mg m<sup>-3</sup>.

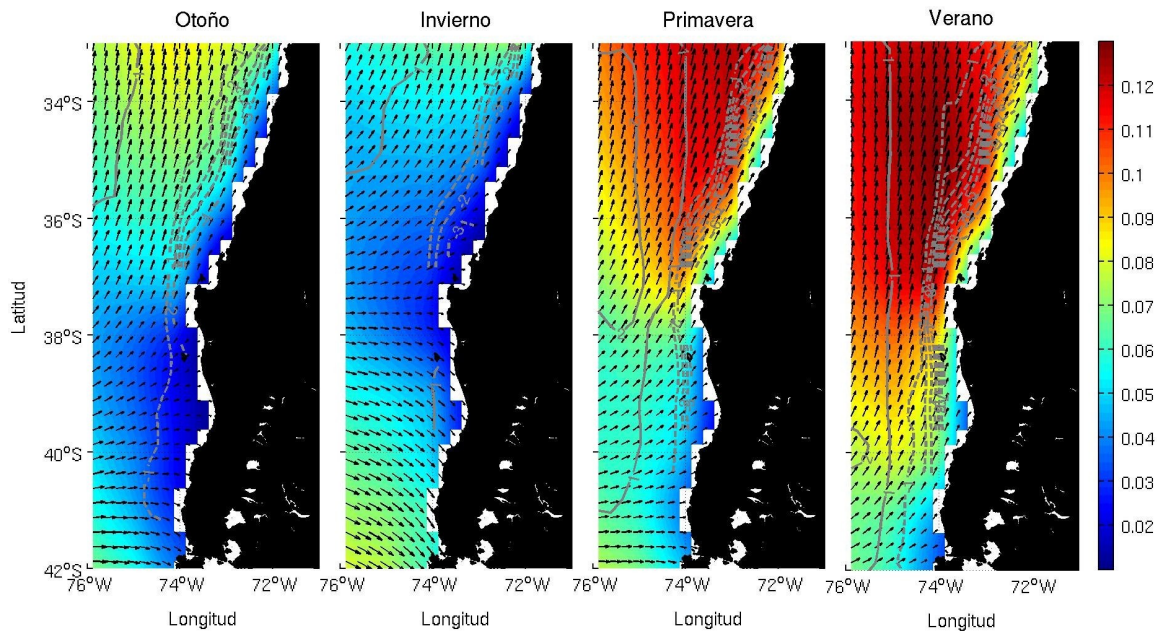
El promedio estacional de tsm satelital en la región centro-sur de Chile es mostrado en la Figura 4.17. En términos generales para todos los periodos se observa un gradiente de los valores de tsm en la zona más oceánica (>75°W), con mayores temperaturas al noroeste del área analizada y menores temperaturas en la zona sureste de la misma. Paralelamente, se observa una estrecha banda costera presentando las mínimas temperaturas a lo largo del año. Las mayores temperaturas promedio se observan en

periodos de verano (19°C) y otoño (17.4°C), y las menores temperaturas se presentaron en periodos de invierno (10.5°C) y primavera (11°C). Además, se observa la entrada de lenguas oceánicas templadas hacia las zonas de la Bahía de Concepción-Golfo de Arauco, y hacia la zona sur de isla Mocha en los periodos de otoño, primavera y verano.

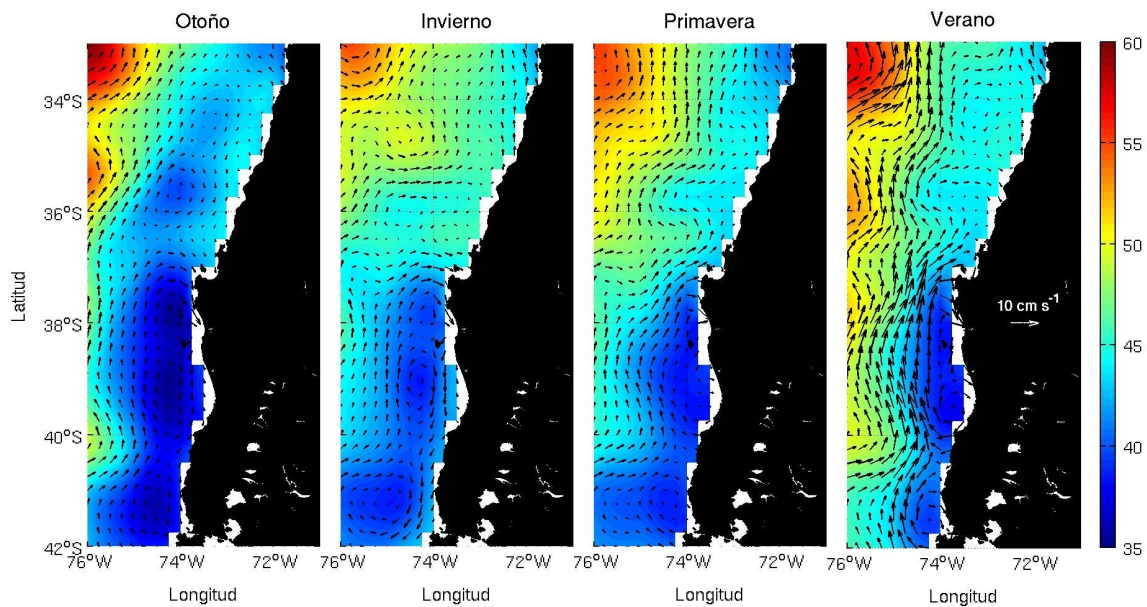


**Figura 4.17.** Promedio estacional de temperatura superficial del mar satelital (°C) en la región centro-sur de Chile (33°-42°S; 76°-71°W).

La descripción de la variabilidad estacional del esfuerzo del viento, el nivel del mar y la energía cinética es apreciada en los promedios estacionales en las Figuras 4.18 y 4.19. La principal característica observada los promedios estacionales del esfuerzo del viento (Figura 4.18) es el desplazamiento latitudinal de la zona de divergencia de los vientos, zona que corresponde con el extremo occidental de la deriva de los vientos del oeste. La divergencia de los vientos alcanza su posición mas norte alrededor de los 37°S en invierno, y su posición mas sur al sur de los 42°S en verano. El desplazamiento estacional de la divergencia de los vientos coincide con la intensificación del jet costero de vientos a lo largo de la costa que ocurre entre primavera y verano, la cual alcanza sus mayores valores al norte de Punta Lavapie (extremo sur del Golfo de Arauco). La dirección predominante de los vientos durante las estaciones de mayor intensidad es sur-norte, dirección que es favorable a la surgencia costera.



**Figura 4.18.** Promedio estacional del esfuerzo del viento y el rotor del esfuerzo del viento en la región. Los tonos azules (rojos) indican bajas (altas) magnitudes en el esfuerzo del viento. El tamaño y dirección de las flechas indican intensidad y dirección en el esfuerzo del viento. Los contornos continuos (segmentados) de color gris indican valores de  $1$  a  $3 \times 10^{-7}$  (de  $-1$  a  $-3 \times 10^{-7}$ ) en el rotor del esfuerzo del viento.



**Figura 4.19.** Promedio estacional del nivel del mar y las corrientes geostroficadas. Los tonos azules (rojos) indican niveles bajos (altos) en el nivel del mar. El tamaño y dirección de las flechas indican intensidad y dirección de las corrientes geostroficadas.

Las menores intensidades en el esfuerzo del viento se observan en la estación de otoño en la zona costera al sur de Punta Lavapie. Esta zona se caracteriza por presentar una inversión en la dirección del esfuerzo del viento en invierno (norte-sur) a diferencia de la zona al norte de Punta Lavapie donde los vientos conservan la dirección sur-norte a lo largo del año. Esto determina que el rotor del esfuerzo del viento siempre sea negativo

en la zona costera al norte de Punta Lavapie, y que exista una inversión estacional en el rotor del esfuerzo del viento de 1 a -3 meses entre invierno y verano en la zona costera al sur de Punta Lavapie.

El promedio estacional del nivel del mar muestra que la zona costera presenta a lo largo del año un nivel del mar menor al observado en la zona oceánica, configurando un gradiente en nivel del mar en dirección sur-este/nor-oeste (Figura 4.19). Sin embargo, los máximos en el nivel del mar se encuentran desfasados entre la costa y el océano, debido a que los mayores valores del nivel del mar en la zona costera son alcanzados en invierno, mientras en la zona oceánica los mayores valores son observados entre verano y otoño.

El promedio de las corrientes geostroficas muestra que en el límite entre la zona costera y la zona oceánica existe una corriente que fluye predominantemente hacia el norte. Esta corriente tiene una trayectoria meándrica que evidencia la presencia de diversos remolinos a lo largo del año. Esta corriente se acerca hacia la costa y se observa intensificada durante la estación de verano. Por otra parte, aunque la estimación de las corrientes geostroficas es menos confiable en aguas someras o en cercanías de la costa, en la zona costera al sur de la Punta Lavapie las corrientes sugieren una circulación ciclónica permanente a lo largo del año, que se intensifica durante otoño.

#### **4.3.6. Modelación y distribución de huevos**

Los resultados de la modelación utilizados en la relación de la densidad de huevos de sardina común con las variables predictoras se resumen en la Tabla 4.3. Se encontró un proceso isotrópico dependiente de la interacción latitud-longitud, por lo general presentaron la más baja desviación explicada para ambas zonas (centro-sur) y años. En la zona centro para los años 2003, 2004, 2007, 2009 y 2010, se encontró que los diferentes modelos que incluyen profundidad, viento, temperatura, salinidad y oxígeno en forma conjunta, entregan los mejores resultados en el coeficiente de determinación ( $> 90$ ), desviación explicada ( $> 90\%$ ); así como el puntaje de la validación cruzada general (GCV). En el año 2002 se observó que el mejor modelo fue el que utilizó la profundidad y viento como variables predictivas (Tabla 4.3). En la zona sur entre los años 2004 al 2010, los modelos evaluados que incluyeron principalmente las interacciones entre la profundidad, viento, temperatura, salinidad y oxígeno, entregaron la mejor explicación de la densidad de huevos en el área de desove, sin embargo en los años 2002 y 2003 los modelos evaluados no explicaron de manera satisfactoria la densidad de huevos de sardina común (Tabla 4.3).

**Tabla 4.3.** Resultados de los modelos aditivos generalizados para la densidad de huevos de sardina común en función de la longitud (lon), latitud (lat), profundidad del ecosonda (E), viento (V), temperatura (T), salinidad (S), y oxígeno disuelto (O) entre los años 2002 al 2010 (n: número de datos, R<sup>2</sup>: Coeficiente de determinación, VE: Varianza explicada en porcentaje, GVC: Validación cruzada general).

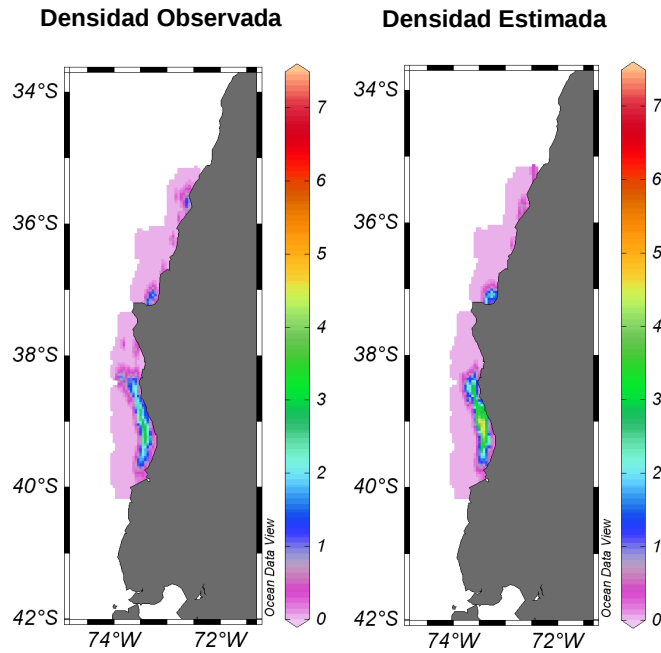
| Año  | Zona   | Modelo | Fórmula                             | n          | R <sup>2</sup> | VE          | GVC            |
|------|--------|--------|-------------------------------------|------------|----------------|-------------|----------------|
| 2002 | Centro | 1      | s(lon-lat)                          | 311        | 0.944          | 90.5        | 0.4936         |
|      |        | 2      | s(lon-lat)+s(E)                     | 311        | 0.990          | 98.1        | 0.2388         |
|      |        | 3      | s(lon-lat)+s(V)                     | 279        | 0.933          | 84.7        | 2.160          |
|      |        | 4      | s(lon-lat)+s(T)                     | 311        | 0.968          | 91          | 1.2524         |
|      |        | 5      | s(lon-lat)+s(E)+s(V)                | 277        | <b>0.998</b>   | <b>98.4</b> | <b>0.29915</b> |
|      |        | 6      | s(lon-lat)+s(E)+s(V)+s(T)           | 277        | <b>0.993</b>   | <b>98.3</b> | <b>1.3913</b>  |
|      | Sur    | 1      | s(lon-lat)                          | 358        | 0.356          | 77.5        | 29.106         |
|      |        | 2      | s(lon-lat)+s(E)                     | 354        | 0.361          | 77.9        | 29.335         |
|      |        | 3      | s(lon-lat)+s(V)                     | <b>352</b> | <b>0.406</b>   | <b>80.3</b> | <b>26.128</b>  |
|      |        | 4      | s(lon-lat)+s(T)                     | 358        | 0.343          | 78.2        | 29.277         |
|      |        | 5      | s(lon-lat)+s(E)+s(V)                | 348        | 0.395          | 73.2        | 34.026         |
|      |        | 6      | s(lon-lat)+s(E)+s(V)+s(T)           | 348        | <b>0.403</b>   | <b>79.9</b> | <b>36.687</b>  |
| 2003 | Centro | 1      | s(lon-lat)                          | 155        | 0.844          | 90.3        | 0.3614         |
|      |        | 2      | s(lon-lat)+s(E)                     | 155        | 0.428          | 61.8        | 1.2371         |
|      |        | 3      | s(lon-lat)+s(V)                     | 105        | 0.659          | 77.2        | 0.5963         |
|      |        | 4      | s(lon-lat)+s(T)                     | 155        | 0.665          | 71.8        | 0.9178         |
|      |        | 5      | s(lon-lat)+s(E)+s(V)                | 105        | 0.833          | 84.8        | 0.4223         |
|      |        | 6      | s(lon-lat)+s(E)+s(V)+s(T)           | 105        | <b>0.902</b>   | <b>91.2</b> | <b>0.2516</b>  |
|      | Sur    | 1      | s(lon-lat)                          | 236        | 0.267          | 53          | 3.2558         |
|      |        | 2      | s(lon-lat)+s(E)                     | 235        | 0.491          | 69.2        | 2.3565         |
|      |        | 3      | s(lon-lat)+s(V)                     | 225        | 0.279          | 50.3        | 3.4248         |
|      |        | 4      | s(lon-lat)+s(T)                     | 236        | 0.625          | 78          | 1.7146         |
|      |        | 5      | s(lon-lat)+s(E)+s(V)                | 224        | 0.288          | 52.6        | 3.3921         |
|      |        | 6      | s(lon-lat)+s(E)+s(V)+s(T)           | 224        | <b>0.668</b>   | <b>83.9</b> | <b>3.3059</b>  |
| 2004 | Centro | 1      | s(lon-lat)                          | 133        | 0.698          | 83.2        | 1.7767         |
|      |        | 2      | s(lon-lat)+s(E)                     | 131        | 0.871          | 79          | 2.2909         |
|      |        | 3      | s(lon-lat)+s(V)                     | 127        | 0.936          | 85.8        | 1.6595         |
|      |        | 4      | s(lon-lat)+s(T)                     | <b>133</b> | <b>0.988</b>   | <b>94.0</b> | <b>0.4665</b>  |
|      |        | 5      | s(lon-lat)+s(S)                     | 133        | 0.697          | 73.6        | 2.6046         |
|      |        | 6      | s(lon-lat)+s(O)                     | 131        | 0.435          | 57.8        | 3.8175         |
|      |        | 7      | s(lon-lat)+s(E)+s(V)                | 126        | 0.942          | 85.2        | 1.6998         |
|      |        | 8      | s(lon-lat)+s(E)+s(V)+s(T)           | 126        | 0.987          | 90.1        | 1.1002         |
|      |        | 9      | s(lon-lat)+s(E)+s(V)+s(T)+s(S)      | 126        | 0.989          | 90.8        | 1.0316         |
|      |        | 10     | s(lon-lat)+s(E)+s(V)+s(T)+s(S)+s(O) | 124        | <b>0.996</b>   | <b>94.9</b> | <b>0.7985</b>  |
|      | Sur    | 1      | s(lon-lat)                          | 140        | 0.133          | 54.5        | 4.061          |
|      |        | 2      | s(lon-lat)+s(E)                     | 136        | 0.558          | 81.5        | 1.755          |
|      |        | 3      | s(lon-lat)+s(V)                     | 139        | 0.992          | 96.3        | 0.3933         |
|      |        | 4      | s(lon-lat)+s(T)                     | 140        | 0.789          | 74.3        | 2.4953         |
|      |        | 5      | s(lon-lat)+s(S)                     | 140        | 0.990          | 96.5        | 0.3727         |
|      |        | 6      | s(lon-lat)+s(O)                     | 140        | 0.145          | 55.9        | 3.9462         |
|      |        | 7      | s(lon-lat)+s(E)+s(V)                | 135        | 0.956          | 91.3        | 0.87275        |
|      |        | 8      | s(lon-lat)+s(E)+s(V)+s(T)           | 135        | 0.874          | 80.9        | 1.7913         |
|      |        | 9      | s(lon-lat)+s(E)+s(V)+s(T)+s(S)      | 135        | 0.867          | 81.7        | 1.7485         |
|      |        | 10     | s(lon-lat)+s(E)+s(V)+s(T)+s(S)+s(O) | 135        | <b>0.993</b>   | <b>96.7</b> | <b>0.5265</b>  |
| 2005 | Sur    | 1      | s(lon-lat)                          | 144        | 0.879          | 79.6        | 5.5327         |
|      |        | 2      | s(lon-lat)+s(E)                     | 138        | 0.898          | 90.7        | 4.5967         |
|      |        | 3      | s(lon-lat)+s(V)                     | 140        | 0.888          | 89.3        | 5.7162         |
|      |        | 4      | s(lon-lat)+s(T)                     | 140        | 0.63           | 83          | 8.6579         |
|      |        | 5      | s(lon-lat)+s(S)                     | 140        | 0.838          | 89.1        | 6.6002         |
|      |        | 6      | s(lon-lat)+s(O)                     | 140        | 0.728          | 80.8        | 10.098         |
|      |        | 7      | s(lon-lat)+s(E)+s(V)                | 138        | 0.981          | 96.8        | 1.8936         |
|      |        | 8      | s(lon-lat)+s(E)+s(V)+s(T)           | 138        | 0.936          | 89.3        | 5.5492         |
|      |        | 9      | s(lon-lat)+s(E)+s(V)+s(T)+s(S)      | 138        | 0.936          | 89.9        | 5.9234         |
|      |        | 10     | s(lon-lat)+s(E)+s(V)+s(T)+s(S)+s(O) | 138        | <b>0.986</b>   | <b>99.8</b> | <b>1.188</b>   |
| 2007 | Centro | 1      | s(lon-lat)                          | 183        | 0.919          | 91.6        | 2.7187         |
|      |        | 2      | s(lon-lat)+s(E)                     | 181        | 0.71           | 89.2        | 2.8616         |
|      |        | 3      | s(lon-lat)+s(V)                     | 183        | 0.448          | 71.8        | 5.9165         |
|      |        | 4      | s(lon-lat)+s(T)                     | 183        | 0.979          | 96.4        | 1.13945        |
|      |        | 5      | s(lon-lat)+s(S)                     | 181        | 0.932          | 92.8        | 2.1547         |
|      |        | 6      | s(lon-lat)+s(O)                     | 183        | 0.985          | 96.3        | 1.2914         |
|      |        | 7      | s(lon-lat)+s(E)+s(V)                | 181        | 0.86           | 87.8        | 3.0054         |
|      |        | 8      | s(lon-lat)+s(E)+s(V)+s(T)           | 181        | 0.993          | 97.0        | 0.85867        |
|      |        | 9      | s(lon-lat)+s(E)+s(V)+s(T)+s(S)      | 179        | 0.993          | 96.9        | 1.104          |
|      |        | 10     | s(lon-lat)+s(E)+s(V)+s(T)+s(S)+s(O) | 179        | <b>0.994</b>   | <b>97.6</b> | <b>0.92339</b> |

Continuación

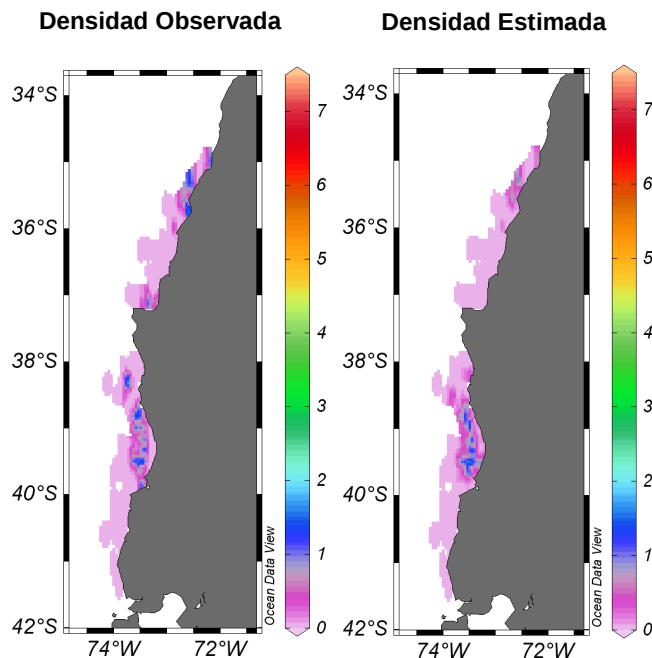
| Año  | Zona   | Modelo | Fórmula                            | n   | R <sup>2</sup> | VE          | GVC           |
|------|--------|--------|------------------------------------|-----|----------------|-------------|---------------|
| 2007 | Sur    | 1      | s(lon-lat)                         | 203 | 0.52           | 77.8        | 61.423        |
|      |        | 2      | s(lon-lat)+s(E)                    | 203 | 0.968          | 96.6        | 15.357        |
|      |        | 3      | s(lon-lat)+s(V)                    | 203 | 0.124          | 33.9        | 135.48        |
|      |        | 4      | s(lon-lat)+s(T)                    | 203 | 0.989          | 98          | 6.0278        |
|      |        | 5      | s(lon-lat)+s(S)                    | 203 | 0.980          | 98.1        | 5.9998        |
|      |        | 6      | s(lon-lat)+s(O)                    | 201 | 0.983          | 98.3        | 9.7537        |
|      |        | 7      | s(lon-lat)+s(E)+s(V)               | 203 | 0.223          | 52.2        | 101.81        |
|      |        | 8      | s(lon-lat)+s(E)+s(V)+s(T)          | 203 | 0.458          | 64.8        | 78.578        |
|      |        | 9      | s(lon-lat)+s(E)+s(V)+s(T)+(S)      | 203 | 0.668          | 74.2        | 63.911        |
|      |        | 10     | s(lon-lat)+s(E)+s(V)+s(T)+(S)+s(O) | 201 | <b>0.991</b>   | <b>98.6</b> | <b>6.9712</b> |
| 2008 | Sur    | 1      | s(lon-lat)                         | 184 | 0.675          | 86          | 0.675         |
|      |        | 2      | s(lon-lat)+s(E)                    | 184 | 0.911          | 93.9        | 7.2258        |
|      |        | 3      | s(lon-lat)+s(V)                    | 152 | 0.863          | 91.2        | 10.624        |
|      |        | 4      | s(lon-lat)+s(T)                    | 184 | 0.561          | 79.6        | 21.461        |
|      |        | 5      | s(lon-lat)+s(S)                    | 184 | 0.985          | 95.3        | 2.2687        |
|      |        | 6      | s(lon-lat)+s(O)                    | -   | -              | -           | -             |
|      |        | 7      | s(lon-lat)+s(E)+s(V)               | 152 | 0.618          | 83.4        | 18.405        |
|      |        | 8      | s(lon-lat)+s(E)+s(V)+s(T)          | 152 | 0.885          | 91.3        | 11.446        |
|      |        | 9      | s(lon-lat)+s(E)+s(V)+s(T)+(S)      | 152 | <b>0.995</b>   | <b>98.6</b> | <b>9.239</b>  |
|      |        | 10     | s(lon-lat)+s(E)+s(V)+s(T)+(S)+s(O) | -   | -              | -           | -             |
| 2009 | Centro | 1      | s(lon-lat)                         | 164 | 0.86           | 88.6        | 0.8418        |
|      |        | 2      | s(lon-lat)+s(E)                    | 160 | 0.947          | 91.5        | 0.6434        |
|      |        | 3      | s(lon-lat)+s(V)                    | 164 | 0.946          | 90.8        | 0.7435        |
|      |        | 4      | s(lon-lat)+s(T)                    | 164 | 0.991          | 96.8        | 0.1014        |
|      |        | 5      | s(lon-lat)+s(S)                    | 163 | 0.878          | 87.6        | 0.9002        |
|      |        | 6      | s(lon-lat)+s(O)                    | 160 | 0.787          | 87.1        | 1.0465        |
|      |        | 7      | s(lon-lat)+s(E)+s(V)               | 160 | 0.984          | 94.7        | 0.4482        |
|      |        | 8      | s(lon-lat)+s(E)+s(V)+s(T)          | 160 | 0.987          | 95.2        | 0.4103        |
|      |        | 9      | s(lon-lat)+s(E)+s(V)+s(T)+(S)      | 159 | 0.994          | 97.1        | 0.2926        |
|      |        | 10     | s(lon-lat)+s(E)+s(V)+s(T)+(S)+s(O) | 155 | <b>0.997</b>   | <b>98.4</b> | <b>0.6409</b> |
|      | Sur    | 1      | s(lon-lat)                         | 203 | 0.643          | 88          | 9.8657        |
|      |        | 2      | s(lon-lat)+s(E)                    | 203 | 0.856          | 92          | 6.2524        |
|      |        | 3      | s(lon-lat)+s(V)                    | -   | -              | -           | -             |
|      |        | 4      | s(lon-lat)+s(T)                    | 203 | 0.751          | 82.2        | 14.658        |
|      |        | 5      | s(lon-lat)+s(S)                    | 203 | 0.775          | 83.6        | 12.988        |
|      |        | 6      | s(lon-lat)+s(O)                    | 157 | 0.823          | 87.7        | 11.371        |
|      |        | 7      | s(lon-lat)+s(E)+s(V)               | -   | -              | -           | -             |
|      |        | 8      | s(lon-lat)+s(E)+s(T)               | 203 | 0.767          | 81.6        | 13.643        |
|      |        | 9      | s(lon-lat)+s(E)+s(T)+(S)           | 203 | 0.869          | 89.9        | 8.5379        |
|      |        | 10     | s(lon-lat)+s(E)+s(T)+(S)+s(O)      | 157 | <b>0.94</b>    | <b>93.8</b> | <b>5.8144</b> |
| 2010 | Centro | 1      | s(lon-lat)                         | 173 | 0.910          | 90.9        | 0.39693       |
|      |        | 2      | s(lon-lat)+s(E)                    | 171 | 0.980          | 98.0        | 0.63233       |
|      |        | 3      | s(lon-lat)+s(V)                    | 173 | 0.959          | 89.6        | 2.6513        |
|      |        | 4      | s(lon-lat)+s(T)                    | 173 | 0.991          | 95.4        | 1.5559        |
|      |        | 5      | s(lon-lat)+s(S)                    | 171 | 0.939          | 90.8        | 2.9091        |
|      |        | 6      | s(lon-lat)+s(O)                    | 173 | 0.997          | 98          | 0.69106       |
|      |        | 7      | s(lon-lat)+s(E)+s(V)               | 171 | 0.981          | 92.6        | 2.0212        |
|      |        | 8      | s(lon-lat)+s(E)+s(V)+s(T)          | 171 | 0.997          | 97.1        | 0.91411       |
|      |        | 9      | s(lon-lat)+s(E)+s(V)+s(T)+(S)      | 169 | 0.991          | 98.8        | 0.61776       |
|      |        | 10     | s(lon-lat)+s(E)+s(V)+s(T)+(S)+s(O) | 169 | <b>0.996</b>   | <b>99.9</b> | <b>1.0310</b> |
|      | Sur    | 1      | s(lon-lat)                         | 209 | 0.86           | 89.8        | 10.12         |
|      |        | 2      | s(lon-lat)+s(E)                    | 206 | 0.975          | 97.2        | 4.2648        |
|      |        | 3      | s(lon-lat)+s(V)                    | -   | -              | -           | -             |
|      |        | 4      | s(lon-lat)+s(T)                    | 209 | 0.978          | 95          | 5.9323        |
|      |        | 5      | s(lon-lat)+s(S)                    | 209 | 0.982          | 95          | 6.1967        |
|      |        | 6      | s(lon-lat)+s(O)                    | 209 | 0.945          | 94          | 7.0677        |
|      |        | 7      | s(lon-lat)+s(E)+s(V)               | -   | -              | -           | -             |
|      |        | 8      | s(lon-lat)+s(E)+s(T)               | 206 | 0.994          | 97.6        | 3.6557        |
|      |        | 9      | s(lon-lat)+s(E)+s(T)+(S)           | 206 | 0.988          | 96.7        | 4.5064        |
|      |        | 10     | s(lon-lat)+s(E)+s(T)+(S)+s(O)      | 206 | <b>0.955</b>   | <b>93</b>   | <b>8.2676</b> |

En as Figuras 4.20 a la 4.27 se presentan los resultados de los datos reales (2002, 2003, 2004, 2005, 2007, 2008, 2009, 2010) y los modelos evaluados para la densidad de huevos de sardina común. En general, ambas distribuciones exhibieron similitud y persistencia interanual, se identificaron núcleos principales, tales como Constitución, Desembocadura del río Itata, Golfo Arauco y Lebú-Corral, siendo esta última la más importante en cuanto a la cobertura y densidad.

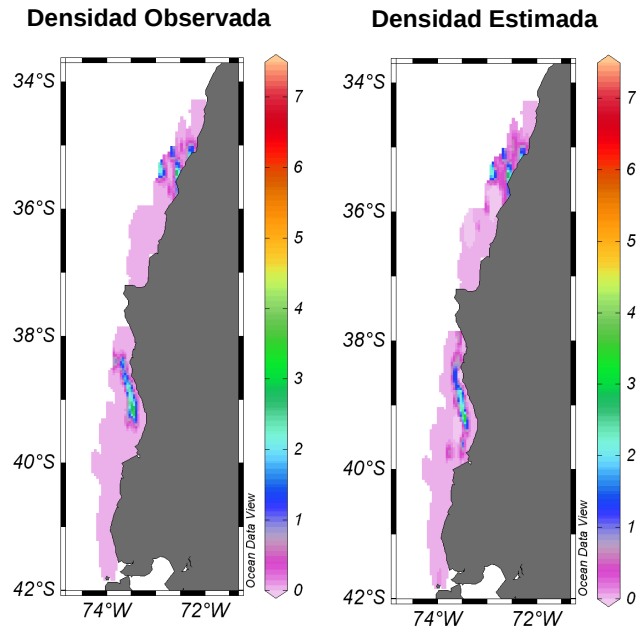




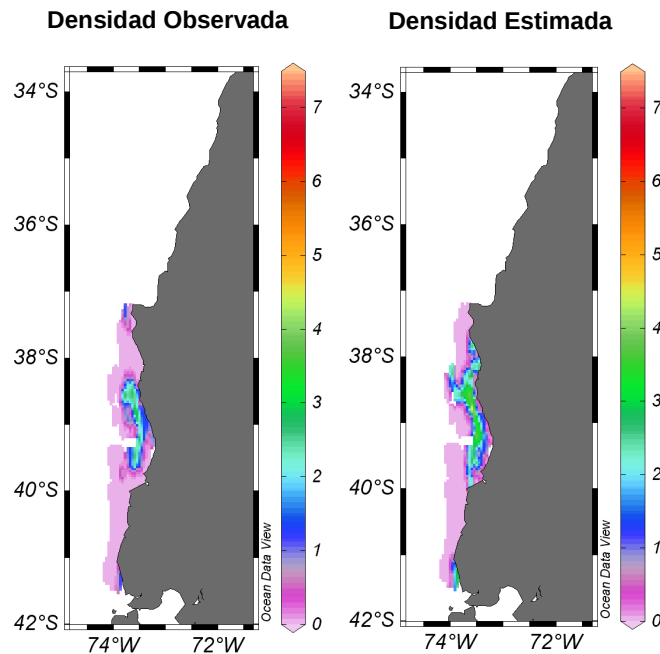
**Figura 4.20.** Salida del modelo evaluado a través de GAM para la densidad de huevos sardina común en la zona centro-sur de Chile, años 2002. La escala corresponde al logaritmo de la densidad observada (panel izquierdo) y estimada (panel derecho). (Modelo 6: interacción longitud-latitud + profundidad de fondo + viento + Temperatura).



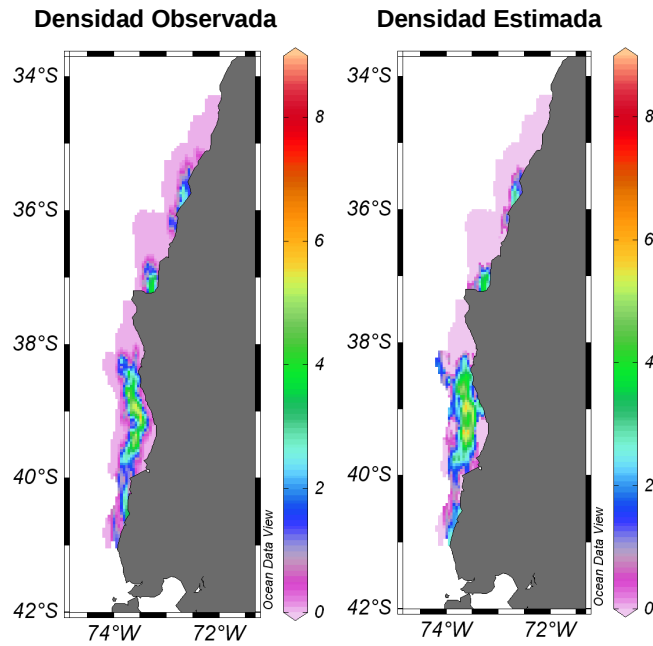
**Figura 4.21.** Salida del modelo evaluado a través de GAM para la densidad de huevos sardina común en la zona centro-sur de Chile, años 2003. La escala corresponde al logaritmo de la densidad observada (panel izquierdo) y estimada (panel derecho). (Modelo 6: interacción longitud-latitud + profundidad de fondo + viento + Temperatura).



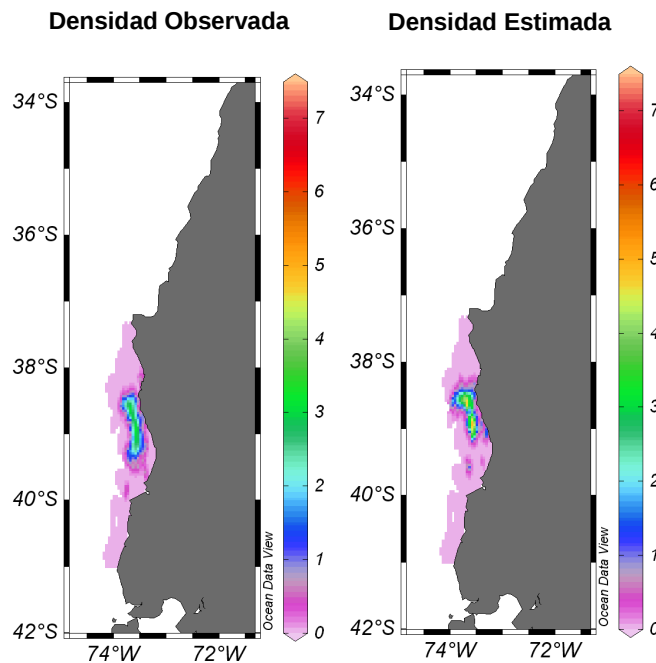
**Figura 4.22.** Salida del modelo evaluado a través de GAM para la densidad de huevos sardina común en la zona centro-sur de Chile, años 2004. La escala corresponde al logaritmo de la densidad observada (panel izquierdo) y estimada (panel derecho). (Modelo 10: interacción longitud-latitud + profundidad de fondo + viento + Temperatura + Salinidad + Oxígeno).



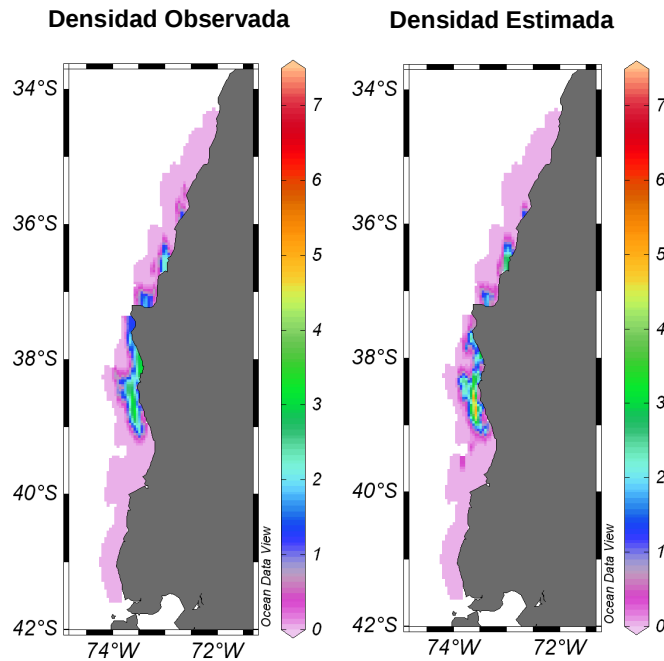
**Figura 4.23.** Salida del modelo evaluado a través de GAM para la densidad de huevos sardina común en la zona sur de Chile, años 2005. La escala corresponde al logaritmo de la densidad observada (panel izquierdo) y estimada (panel derecho). (Modelo 10: interacción longitud-latitud + profundidad de fondo + viento + Temperatura + Salinidad + Oxígeno).



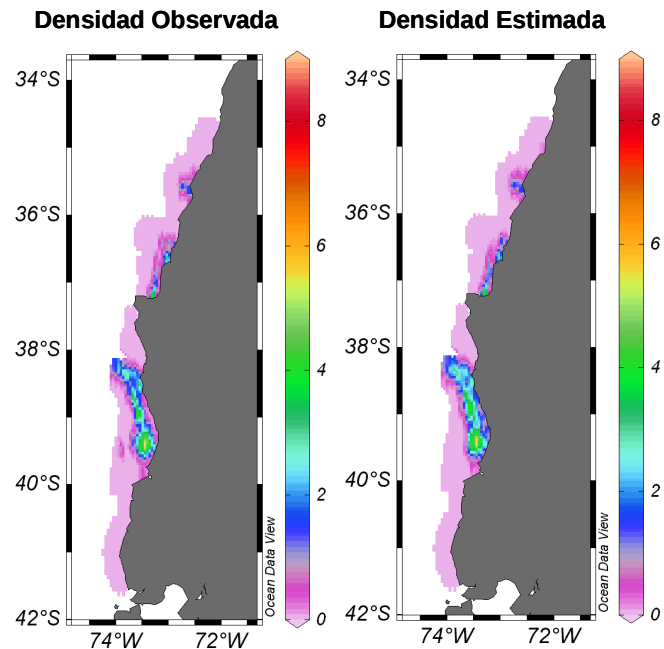
**Figura 4.24.** Salida del modelo evaluado a través de GAM para la densidad de huevos sardina común en la zona centro-sur de Chile, años 2007. La escala corresponde al logaritmo de la densidad observada (panel izquierdo) y estimada (panel derecho). (Modelo 10: interacción longitud-latitud + profundidad de fondo + viento + Temperatura + Salinidad + Oxígeno).



**Figura 4.25.** Salida del modelo evaluado a través de GAM para la densidad de huevos sardina común en la zona sur de Chile, años 2008. La escala corresponde al logaritmo de la densidad observada (panel izquierdo) y estimada (panel derecho). (Modelo 10: interacción longitud-latitud + profundidad de fondo + viento + Temperatura + Salinidad + Oxígeno).



**Figura 4.26.** Salida del modelo evaluado a través de GAM para la densidad de huevos sardina común en la zona centro-sur de Chile, años 2009. La escala corresponde al logaritmo de la densidad observada (panel izquierdo) y estimada (panel derecho). (Modelo 10: interacción longitud-latitud + profundidad de fondo + viento + Temperatura + Salinidad + Oxígeno).



**Figura 4.27.** Salida del modelo evaluado a través de GAM para la densidad de huevos de sardina común en la zona centro-sur de Chile, años 2010. La escala corresponde al logaritmo de la densidad observada (panel izquierdo) y estimada (panel derecho). (Modelo 10: interacción longitud-latitud + profundidad de fondo + viento + Temperatura + Salinidad + Oxígeno).

#### 4.3.7. Relación de la densidad de huevos y el medioambiente

La salida de GAMs para sardina común, se muestra en las Figuras 4.28 a la 4.41, respectivamente. En cada gráfica se observan relaciones no lineales entre la variable respuesta (densidad de huevos) y cada predictor. E eje “y”, está conformado por una escala relativa y, los valores de este eje que sean igual a cero, representan el efecto promedio de la variable medioambiental ajustada en la respuesta (densidad de huevos). Los valores positivos de “y” indican un efecto positivo en la respuesta y un valor negativo de “y” indican un efecto negativo. En todos los gráficos se observan los intervalos de confianza al 95%. Esta línea segmentada diverge principalmente en los extremos de los rangos de los predictores y esto se debe principalmente al bajo número de observaciones. En general, se encontró que las relaciones de los distintos modelos entre la variable respuesta y predictora son significativas ( $p < 0.05$ , Tabla 4.4).

**Tabla 4.4.** Resultados de los modelos GAM por zona y año (lon: longitud, lat: latitud, E: profundidad del ecosonda, V: viento, T: temperatura, S: salinidad, O: oxígeno disuelto).

| Año  | Zona       | Modelo     | Parámetros | Estimado | Valor F | Error standard | Valor t  | p-valor  |
|------|------------|------------|------------|----------|---------|----------------|----------|----------|
| 2002 | Centro     | 1          | Intercepto | -232.35  | -       | 48.21          | -4.819   | 2.36e-06 |
|      |            |            | s(lon-lat) | 28.86    | 22.20   | -              | -        | <2e-16   |
|      |            | 2          | Intercepto | -235.18  | -       | 36.64          | -6.418   | 5.93e-10 |
|      |            |            | s(lon-lat) | 28.582   | 46.66   | -              | -        | <2e-16   |
|      |            |            | s(E)       | 3.483    | 29.55   | -              | -        | <2e-16   |
|      |            | 3          | Intercepto | -16.848  | -       | 2.642          | -6.376   | 8.1e-10  |
|      | s(lon-lat) |            | 8.976      | 27.7     | -       | -              | <2e-16   |          |
|      | s(V)       |            | 5.889      | 22.33    | -       | -              | <2e-16   |          |
|      | 4          | Intercepto | -24.582    | -        | 2.787   | -8.821         | <2e-16   |          |
|      |            | s(lon-lat) | 17.976     | 23.41    | -       | -              | <2e-16   |          |
|      |            | s(T)       | 9.068      | 10.04    | -       | -              | <2e-16   |          |
|      | 5          | Intercepto | -1666      | -        | 435.6   | -3.825         | 0.000165 |          |
|      |            | s(lon-lat) | 17.657     | 44.046   | -       | -              | <2e-16   |          |
|      |            | s(E)       | 3.811      | 5.338    | -       | -              | 0.0014   |          |
|      |            | s(V)       | 4.955      | 43.636   | -       | -              | <2e-16   |          |
|      | 6          | Intercepto | -6.406     | -        | 1.505   | -4.25          | 2.91e-05 |          |
|      |            | s(lon-lat) | 5.000      | 46.4     | -       | -              | <2e-16   |          |
|      |            | s(E)       | 2.105      | 48.05    | -       | -              | <2e-16   |          |
| s(V) |            | 3.828      | 24.93      | -        | -       | <2e-16         |          |          |
| s(T) |            | 4.456      | 19.49      | -        | -       | <2e-16         |          |          |
|      |            |            |            |          |         |                |          |          |
| Sur  | 1          | Intercepto | -15.276    | -        | 4.814   | -3.173         | 0.00165  |          |
|      |            | s(lon-lat) | 26.47      | 6.356    | -       | -              | <2e-16   |          |
|      | 2          | Intercepto | -27.496    | -        | 8.336   | -3.298         | 0.00108  |          |
|      |            | s(lon-lat) | 27.88      | 5.480    | -       | -              | 2.73e-13 |          |
|      |            | s(E)       | 1.00       | 3.446    | -       | -              | 0.0643   |          |
|      | 3          | Intercepto | -15.553    | -        | 3.262   | -4.768         | 2.82e-06 |          |
|      |            | s(lon-lat) | 16.77      | 19.278   | -       | -              | < 2e-16  |          |
|      |            | s(V)       | 10.95      | 6.311    | -       | -              | 3.47e-11 |          |
|      | 4          | Intercepto | -16.861    | -        | 5.796   | -2.909         | 0.00387  |          |
|      |            | s(lon-lat) | 26.766     | 5.228    | -       | -              | 2.96e-13 |          |
|      |            | s(T)       | 5.758      | 1.271    | -       | -              | 0.251    |          |
|      | 5          | Intercepto | -1.863     | -        | 1.886   | -0.988         | 0.324    |          |
|      |            | s(lon-lat) | 8.737      | 19.42    | -       | -              | < 2e-16  |          |
|      |            | s(E)       | 3.819      | 14.55    | -       | -              | < 2e-16  |          |
|      |            | s(V)       | 6.614      | 7.50     | -       | -              | 9.24e-11 |          |
|      | 6          | Intercepto | -0.2291    | -        | 1.8560  | -0.123         | 0.902    |          |
|      |            | s(lon-lat) | 5.574      | 20.78    | -       | -              | < 2e-16  |          |
|      |            | s(E)       | 1.967      | 32.24    | -       | -              | < 2e-16  |          |
| s(V) |            | 4.462      | 10.67      | -        | -       | 4.05e-12       |          |          |
| s(T) |            | 5.885      | 2.19       | -        | -       | 0.0348         |          |          |
|      |            |            |            |          |         |                |          |          |

Continuación

| Año  | Zona       | Modelo     | Parámetros | Estimado | Valor F | Error standard | Valor t  | p-valor   |
|------|------------|------------|------------|----------|---------|----------------|----------|-----------|
| 2003 | Centro     | 1          | Intercepto | -288,90  | -       | 67,47          | -4,282   | 3,62e-0   |
|      |            |            | s(lon-lat) | 26,65    | 11,34   | -              | -        | <2e-16    |
|      |            | 2          | Intercepto | -13,064  | -       | 5,927          | -2,204   | 0,0292    |
|      |            |            | s(lon-lat) | 10,891   | 3,171   | -              | -        | 0,000745  |
|      |            |            | s(E)       | 6,115    | 2,020   | -              | -        | 0,030791  |
|      |            | 3          | Intercepto | -127,08  | -       | 23,94          | -5,309   | 8,05e-07  |
|      |            |            | s(lon-lat) | 7,847    | 6,566   | -              | -        | 1,04e-06  |
|      |            |            | s(V)       | 7,206    | 4,253   | -              | -        | 0,00043   |
|      |            | 4          | Intercepto | -11,297  | -       | 3,717          | -3,039   | 0,00285   |
|      |            |            | s(lon-lat) | 10,639   | 6,997   | -              | -        | 2,60e-09  |
|      |            |            | s(T)       | 6,827    | 5,074   | -              | -        | 1,27e-06  |
|      |            | 5          | Intercepto | -318,44  | -       | 56,42          | -5,644   | 2,08e-07  |
|      | s(lon-lat) |            | 5,816      | 8,983    | -       | -              | 1,28e-07 |           |
|      | s(E)       |            | 6,000      | 8,534    | -       | -              | 1,35e-06 |           |
|      | s(V)       |            | 6,000      | 5,723    | -       | -              | 4,79e-05 |           |
|      | 6          | Intercepto | -236,65    | -        | 45,63   | -5,186         | 1,43e-06 |           |
|      |            | s(lon-lat) | 5,905      | 18,98    | -       | -              | 6,60e-14 |           |
|      |            | s(E)       | 5,985      | 16,01    | -       | -              | 4,25e-11 |           |
|      |            | s(V)       | 5,991      | 13,36    | -       | -              | 1,31e-10 |           |
|      |            | s(T)       | 1,000      | 48,97    | -       | -              | 5,57e-10 |           |
|      | Sur        | 1          | Intercepto | -18,97   | -       | 11,10          | -1,709   | 0,089     |
|      |            |            | s(lon-lat) | 18,58    | 5,22    | -              | -        | 1,99e-06  |
|      |            | 2          | Intercepto | -108,07  | -       | 72,09          | -1,499   | 0,135     |
|      |            |            | s(lon-lat) | 20,388   | 5,683   | -              | -        | 1,57e-06  |
| s(E) |            |            | 8,248      | 4,320    | -       | -              | 2,87e-07 |           |
| 3    |            | Intercepto | 0,2237     | -        | 2,0278  | 0,11           | 0,912    |           |
|      |            | s(lon-lat) | 9,978      | 6,099    | -       | -              | 3,78e-09 |           |
|      |            | s(V)       | 4,319      | 2,201    | -       | -              | 0,0232   |           |
| 4    |            | Intercepto | -10,295    | -        | 2,479   | -4,152         | 4,84e-05 |           |
|      |            | s(lon-lat) | 17,87      | 6,687    | -       | -              | 1,38e-12 |           |
|      |            | s(T)       | 13,06      | 8,311    | -       | -              | 7,45e-16 |           |
| 5    |            | Intercepto | -1,481     | -        | 2,884   | -0,513         | 0,608    |           |
|      | s(lon-lat) | 8,562      | 4,708      | -        | -       | 4,60e-06       |          |           |
|      | s(E)       | 4,879      | 4,923      | -        | -       | 5,47e-06       |          |           |
|      | s(V)       | 4,413      | 3,046      | -        | -       | 0,00192        |          |           |
| 6    | Intercepto | -5,794     | -          | 3,476    | -1,667  | 0,097          |          |           |
|      | s(lon-lat) | 4,661      | 5,034      | -        | -       | 1,02e-05       |          |           |
|      | s(E)       | 4,909      | 3,261      | -        | -       | 0,001609       |          |           |
|      | s(V)       | 4,614      | 2,018      | -        | -       | 0,045916       |          |           |
|      | s(T)       | 3,878      | 3,495      | -        | -       | 0,000832       |          |           |
| 2004 | Centro     | 1          | Intercepto | -56,16   | -       | 10,08          | -5,571   | 1,80e-07  |
|      |            |            | s(lon-lat) | 21,31    | 7,35    | -              | -        | 2,91e-15  |
|      |            | 2          | Intercepto | -4,79    | -       | 2,102          | -2,246   | 0,0268    |
|      |            |            | s(lon-lat) | 9,999    | 6,294   | -              | -        | 4,80e-09  |
|      |            |            | s(E)       | 11,893   | 6,242   | -              | -        | 1,26e-08  |
|      |            | 3          | Intercepto | -193,06  | -       | 73,98          | -2,61    | 0,0104    |
|      |            |            | s(lon-lat) | 12,80    | 4,812   | -              | -        | 4,81e-05  |
|      |            |            | s(V)       | 11,02    | 7,037   | -              | -        | 1,44e-09  |
|      |            | 4          | Intercepto | -148,15  | -       | 21,78          | -6,802   | 6,33e-10  |
|      |            |            | s(lon-lat) | 12,98    | 11,01   | -              | -        | 3,32e-11  |
|      |            |            | s(T)       | 12,95    | 14,21   | -              | -        | < 2,0e-16 |
|      |            | 5          | Intercepto | -3,84    | -       | 5,15           | -0,746   | 0,457     |
|      | s(lon-lat) |            | 8,408      | 7,903    | -       | -              | 4,35e-10 |           |
|      | s(S)       |            | 8,962      | 4,336    | -       | -              | 2,07e-05 |           |
|      | 6          | Intercepto | 0,3440     | -        | 0,8143  | 0,422          | 0,673    |           |
|      |            | s(lon-lat) | 5,290      | 6,623    | -       | -              | 1,3e-06  |           |
|      |            | s(O)       | 6,175      | 2,630    | -       | -              | 0,0146   |           |
|      | 7          | Intercepto | -3,975     | -        | 2,277   | -1,746         | 0,0838   |           |
|      |            | s(lon-lat) | 7,322      | 10,160   | -       | -              | 2,32e-10 |           |
|      |            | s(E)       | 7,158      | 8,244    | -       | -              | 1,43e-08 |           |
|      |            | s(V)       | 7,654      | 8,294    | -       | -              | 1,28e-08 |           |
|      | 8          | Intercepto | -4,660     | -        | 1,174   | -3,968         | 0,000133 |           |
|      |            | s(lon-lat) | 5,971      | 19,92    | -       | -              | 2,13e-15 |           |
|      |            | s(E)       | 5,781      | 24,12    | -       | -              | < 2e-16  |           |
| s(V) |            | 2,897      | 10,92      | -        | -       | 2,06e-09       |          |           |
| s(T) |            | 5,895      | 15,62      | -        | -       | 1,00e-12       |          |           |

Continuación

| Año        | Zona       | Modelo   | Parámetros | Estimado | Valor F | Error standard | Valor t  | p-valor  |
|------------|------------|----------|------------|----------|---------|----------------|----------|----------|
| 2004       | Centro     | 9        | Intercepto | -5.725   | -       | 1.236          | -4.632   | 1.05e-05 |
|            |            |          | s(lon-lat) | 5.986    | 20.076  | -              | -        | 1.82e-15 |
|            |            |          | s(E)       | 5.930    | 28.636  | -              | -        | < 2e-16  |
|            |            |          | s(V)       | 2.202    | 7.724   | -              | -        | 3.29e-06 |
|            |            |          | s(T)       | 5.984    | 18.390  | -              | -        | 1.85e-14 |
|            |            |          | s(S)       | 1.000    | 13.944  | -              | -        | 0.000308 |
|            |            | 10       | Intercepto | -4.760   | -       | 1.239          | -3.841   | 0.000222 |
|            |            |          | s(lon-lat) | 6.000    | 15.312  | -              | -        | 3.53e-12 |
|            |            |          | s(E)       | 5.530    | 12.574  | -              | -        | 2.26e-10 |
|            |            |          | s(V)       | 4.585    | 5.254   | -              | -        | 0.000104 |
|            | s(T)       |          | 6.000      | 11.014   | -       | -              | 2.84e-09 |          |
|            | s(S)       |          | 1.000      | 7.980    | -       | -              | 0.005771 |          |
|            | Sur        | 1        | Intercepto | -164.09  | -       | 45.75          | -3.587   | 0.000471 |
|            |            |          | S(lon-lat) | 7.581    | 3.632   | -              | -        | 0.00130  |
|            |            | 2        | Intercepto | -36.401  | -       | 9.254          | -3.933   | 0.000138 |
|            |            |          | s(lon-lat) | 7.490    | 6.00    | -              | -        | 4.87e-06 |
|            |            |          | s(E)       | 2.491    | 15.41   | -              | -        | 8.68e-12 |
|            |            | 3        | Intercepto | -39.630  | -       | 9.678          | -4.095   | 7.69e-05 |
|            |            |          | s(lon-lat) | 11.102   | 31.82   | -              | -        | <2e-16   |
|            |            |          | s(V)       | 6.595    | 19.57   | -              | -        | <2e-16   |
|            |            | 4        | Intercepto | -61.28   | -       | 18.21          | -3.365   | 0.00101  |
|            |            |          | s(lon-lat) | 8.874    | 8.988   | -              | -        | 1.06e-09 |
|            |            |          | s(T)       | 4.140    | 4.823   | -              | -        | 1.54e-05 |
|            |            | 5        | Intercepto | -82.87   | -       | 19.89          | -4.166   | 5.87e-05 |
|            |            |          | s(lon-lat) | 12.40    | 34.02   | -              | -        | <2e-16   |
|            |            |          | s(S)       | 6.19     | 18.72   | -              | -        | <2e-16   |
|            |            | 6        | Intercepto | -173.78  | -       | 45.28          | -3.838   | 0.000192 |
|            |            |          | s(lon-lat) | 5.971    | 5.148   | -              | -        | 0.000240 |
|            |            |          | s(O)       | 1.710    | 1.188   | -              | -        | 0.308088 |
|            |            | 7        | Intercepto | -9.489   | -       | 3.354          | -2.829   | 0.00546  |
| s(lon-lat) |            |          | 4.508      | 9.697    | -       | -              | 1.53e-09 |          |
| s(E)       |            |          | 2.302      | 29.541   | -       | -              | < 2e-16  |          |
| s(V)       | 6.228      |          | 21.656     | -        | -       | < 2e-16        |          |          |
| 8          | Intercepto | -51.600  | -          | 6.831    | -7.554  | 7.78e-12       |          |          |
|            | s(lon-lat) | 2.000    | 15.15      | -        | -       | 1.28e-06       |          |          |
|            | s(E)       | 1.963    | 26.52      | -        | -       | 2.41e-13       |          |          |
|            | s(V)       | 2.697    | 16.84      | -        | -       | 3.00e-09       |          |          |
|            | s(T)       | 2.353    | 13.86      | -        | -       | 7.34e-08       |          |          |
| 9          | Intercepto | -56.699  | -          | 7.915    | -7.163  | 6.15e-11       |          |          |
|            | s(lon-lat) | 2.000    | 15.172     | -        | -       | 1.28e-06       |          |          |
|            | s(E)       | 1.966    | 26.866     | -        | -       | 1.86e-13       |          |          |
|            | s(V)       | 2.825    | 16.834     | -        | -       | 3.10e-09       |          |          |
|            | s(T)       | 2.209    | 9.425      | -        | -       | 1.17e-05       |          |          |
|            | s(S)       | 1.000    | 4.930      | -        | -       | 0.0282         |          |          |
| 10         | Intercepto | -122.816 | -          | 8.094    | -15.17  | <2e-16         |          |          |
|            | s(lon-lat) | 2.993    | 33.79      | -        | -       | 6.05e-16       |          |          |
|            | s(E)       | 1.991    | 88.31      | -        | -       | < 2e-16        |          |          |
|            | s(V)       | 2.000    | 110.93     | -        | -       | < 2e-16        |          |          |
|            | s(T)       | 2.000    | 55.68      | -        | -       | < 2e-16        |          |          |
|            | s(S)       | 1.928    | 18.02      | -        | -       | 1.41e-07       |          |          |

ESTIMACIÓN DE ÍNDICES DE RECLUTAMIENTO BASADOS EN VARIABLES Y MODELOS BIOFÍSICOS DE PELÁGICOS PEQUEÑOS DE LA ZONA CENTRO-SUR DE CHILE: FASE I

|      |     |   |            |         |       |       |        |          |
|------|-----|---|------------|---------|-------|-------|--------|----------|
|      |     |   | s(O)       | 1.850   | 18.54 | -     | -      | 9.43e-08 |
| 2005 | Sur | 1 | Intercepto | -20.122 | -     | 3.532 | -5.697 | 9.3e-08  |
|      |     |   | s(lon-lat) | 22.26   | 12.11 | -     | -      | <2e-16   |
|      |     |   |            |         |       |       |        |          |
|      |     | 2 | Intercepto | -112.34 | -     | 31.65 | -3.549 | 0.000553 |
|      |     |   | s(lon-lat) | 9.311   | 17.76 | -     | -      | < 2e-16  |
|      |     |   | s(E)       | 7.996   | 13.95 | -     | -      | 4.61e-16 |
|      |     | 3 | Intercepto | -44.81  | -     | 18.79 | -2.384 | 0.0187   |
|      |     |   | s(lon-lat) | 12.975  | 14.49 | -     | -      | < 2e-16  |
|      |     |   | s(V)       | 9.463   | 10.18 | -     | -      | 1.99e-13 |
|      |     | 4 | Intercepto | -70.72  | -     | 28.64 | -2.469 | 0.0150   |
|      |     |   | s(lon-lat) | 12.838  | 7.586 | -     | -      | 8.63e-10 |
|      |     |   | s(T)       | 7.004   | 3.295 | -     | -      | 0.000266 |
|      |     | 5 | Intercepto | -29.376 | -     | 8.087 | -3.633 | 0.000429 |
|      |     |   | s(lon-lat) | 14.81   | 9.501 | -     | -      | 6.83e-14 |
|      |     |   | s(S)       | 14.94   | 4.772 | -     | -      | 9.19e-07 |
|      |     | 6 | Intercepto | -7.612  | -     | 2.887 | -2.637 | 0.0095   |
|      |     |   | s(lon-lat) | 10.91   | 8.780 | -     | -      | 3.23e-11 |
|      |     |   | s(O)       | 10.58   | 5.951 | -     | -      | 1.21e-07 |

Continuación

| Año  | Zona       | Modelo | Parámetros | Estimado | Valor F    | Error standard | Valor t | p-valor  |        |          |
|------|------------|--------|------------|----------|------------|----------------|---------|----------|--------|----------|
| 2005 | Sur        | 7      | Intercepto | -15.00   | -          | 4.31           | -3.48   | 0.000723 |        |          |
|      |            |        | s(lon-lat) | 11.00    | 16.76      | -              | -       | <2e-16   |        |          |
|      |            |        | s(E)       | 8.128    | 29.45      | -              | -       | <2e-16   |        |          |
|      |            |        | s(V)       | 8.925    | 20.27      | -              | -       | <2e-16   |        |          |
|      |            | 8      | Intercepto | -111.04  | -          | 22.76          | -4.879  | 3.39e-06 |        |          |
|      |            |        | s(lon-lat) | 5.882    | 10.27      | -              | -       | 4.01e-09 |        |          |
|      |            |        | s(E)       | 4.988    | 22.85      | -              | -       | 5.92e-16 |        |          |
|      |            |        | s(V)       | 4.058    | 14.62      | -              | -       | 2.07e-12 |        |          |
|      |            |        | s(T)       | 4.800    | 6.84       | -              | -       | 3.05e-06 |        |          |
|      |            | 9      | Intercepto | -3.472   | -          | 2.458          | -1.413  | 0.160    |        |          |
|      |            |        | s(lon-lat) | 4.938    | 10.541     | -              | -       | 2.36e-08 |        |          |
|      |            |        | s(E)       | 3.455    | 26.469     | -              | -       | < 2e-16  |        |          |
|      |            |        | s(V)       | 4.943    | 21.658     | -              | -       | 3.05e-15 |        |          |
|      |            |        | s(T)       | 4.028    | 5.101      | -              | -       | 0.00029  |        |          |
|      |            |        | s(S)       | 4.193    | 5.365      | -              | -       | 0.000180 |        |          |
|      |            | 10     | Intercepto | -15.659  | -          | 2.907          | -5.387  | 3.52e-07 |        |          |
|      |            |        | s(lon-lat) | 2.999    | 15.298     | -              | -       | 1.62e-08 |        |          |
|      |            |        | s(E)       | 2.990    | 20.783     | -              | -       | 5.93e-11 |        |          |
|      |            |        | s(V)       | 2.934    | 9.095      | -              | -       | 1.75e-05 |        |          |
|      |            |        | s(T)       | 2.919    | 8.118      | -              | -       | 5.64e-05 |        |          |
|      |            |        | s(S)       | 1.000    | 3.763      | -              | -       | 0.054681 |        |          |
|      |            |        | s(O)       | 1.494    | 7.177      | -              | -       | 0.000177 |        |          |
|      |            | 2007   | Centro     | 1        | Intercepto | -912.8         | -       | 290.8    | -3.139 | 0.00209  |
|      |            |        |            |          | s(lon-lat) | 48.88          | 4.724   | -        | -      | 2.15e-06 |
|      |            |        |            | 2        | Intercepto | -10.957        | -       | 6.726    | -1.629 | 0.105    |
|      |            |        |            |          | s(lon-lat) | 16.83          | 11.138  | -        | -      | < 2e-16  |
|      |            |        |            |          | s(E)       | 17.48          | 4.077   | -        | -      | 2.10e-06 |
|      |            |        |            | 3        | Intercepto | -3.310         | -       | 1.854    | -1.786 | 0.076    |
|      |            |        |            |          | s(lon-lat) | 14.228         | 7.647   | -        | -      | 8.52e-13 |
|      |            |        |            |          | s(V)       | 2.591          | 2.190   | -        | -      | 0.0464   |
| 4    | Intercepto |        |            | -150.04  | -          | 32.19          | -4.661  | 7.49e-06 |        |          |
|      | s(lon-lat) |        |            | 23.99    | 7.228      | -              | -       | 6.03e-08 |        |          |
|      | s(T)       |        |            | 23.79    | 11.586     | -              | -       | < 2e-16  |        |          |
| 5    | Intercepto |        |            | -76.79   | -          | 21.07          | -3.645  | 0.000378 |        |          |
|      | s(lon-lat) |        |            | 21.77    | 4.737      | -              | -       | 3.84e-06 |        |          |
|      |            |        |            |          | s(S)       | 20.94          | 4.972   | -        | -      | 2.01e-07 |



ESTIMACIÓN DE ÍNDICES DE RECLUTAMIENTO BASADOS EN VARIABLES Y MODELOS BIOFÍSICOS DE PELÁGICOS PEQUEÑOS DE LA ZONA CENTRO-SUR DE CHILE: FASE I

|    |            |        |        |       |        |          |
|----|------------|--------|--------|-------|--------|----------|
| 6  | Intercepto | -580.7 | -      | 227.0 | -2.559 | 0.0117   |
|    | s(lon-lat) | 26.69  | 7.831  | -     | -      | 3.06e-12 |
|    | s(O)       | 26.85  | 7.426  | -     | -      | 0.000887 |
| 7  | Intercepto | -2.015 | -      | 1.427 | -1.412 | 0.16     |
|    | s(lon-lat) | 14.304 | 11.994 | -     | -      | < 2e-16  |
|    | s(E)       | 7.126  | 9.808  | -     | -      | 6.28e-16 |
|    | s(V)       | 7.133  | 5.018  | -     | -      | 5.97e-08 |
| 8  | Intercepto | -89.43 | -      | 28.39 | -3.15  | 0.00204  |
|    | s(lon-lat) | 15.00  | 9.032  | -     | -      | 7.03e-14 |
|    | s(E)       | 14.88  | 3.726  | -     | -      | 0.00672  |
|    | s(V)       | 12.26  | 2.560  | -     | -      | 0.00590  |
|    | s(T)       | 13.26  | 12.435 | -     | -      | < 2e-16  |
| 9  | Intercepto | -6.899 | -      | 1.884 | -3.662 | 0.000368 |
|    | s(lon-lat) | 11.343 | 6.820  | -     | -      | 2.43e-09 |
|    | s(E)       | 11.044 | 7.387  | -     | -      | 4.06e-10 |
|    | s(V)       | 9.355  | 2.998  | -     | -      | 0.00103  |
|    | s(T)       | 12.000 | 12.976 | -     | -      | 2.69e-15 |
|    | s(S)       | 10.076 | 5.945  | -     | -      | 4.18e-08 |
| 10 | Intercepto | -7.718 | -      | 1.748 | -4.416 | 2.11e-05 |
|    | s(lon-lat) | 11.780 | 11.050 | -     | -      | 6.68e-15 |
|    | s(E)       | 10.903 | 12.187 | -     | -      | 3.17e-16 |
|    | s(V)       | 2.409  | 9.576  | -     | -      | 8.66e-08 |
|    | s(T)       | 11.306 | 12.628 | -     | -      | < 2e-16  |
|    | s(S)       | 1.000  | 1.000  | -     | -      | 0.196    |
|    | s(O)       | 11.753 | 11.753 | -     | -      | 1.38e-11 |

Continuación

| Año  | Zona       | Modelo | Parámetros | Estimado | Valor F | Error standard | Valor t | p-valor  |
|------|------------|--------|------------|----------|---------|----------------|---------|----------|
| 2007 | Sur        | 1      | Intercepto | 0.3102   | -       | 2.1412         | 0.145   | 0.885    |
|      |            |        | S(lon-lat) | 36.33    | 5.569   | -              | -       | 1.33e-15 |
|      |            | 2      | Intercepto | -42.58   | -       | 17.43          | -2.443  | 0.0159   |
|      |            |        | s(lon-lat) | 39.98    | 4.641   | -              | -       | 1.94e-08 |
|      |            |        | s(E)       | 32.07    | 9.951   | -              | -       | < 2e-16  |
|      |            | 3      | Intercepto | 4.070    | -       | 1.189          | 3.424   | 0.000755 |
|      |            |        | s(lon-lat) | 7.642    | 3.933   | -              | -       | 0.00025  |
|      |            |        | s(V)       | 2.025    | 1.373   | -              | -       | 0.23617  |
|      |            | 4      | Intercepto | -111.21  | -       | 49.75          | -2.235  | 0.0274   |
|      |            |        | s(lon-lat) | 51.00    | 6.601   | -              | -       | 8.75e-09 |
|      |            |        | s(T)       | 40.75    | 5.552   | -              | -       | 2.99e-10 |
|      |            | 5      | Intercepto | -1.948   | -       | 1.359          | -1.434  | 0.155    |
|      |            |        | s(lon-lat) | 51.87    | 16.63   | -              | -       | <2e-16   |
|      |            |        | s(S)       | 45.97    | 11.05   | -              | -       | <2e-16   |
|      |            | 6      | Intercepto | -11.96   | -       | 17.03          | -0.702  | 0.484    |
|      |            |        | s(lon-lat) | 52.57    | 8.450   | -              | -       | <2e-16   |
| s(O) | 50.97      |        | 1.284      | -        | -       | 0.255          |         |          |
| 7    | Intercepto | 4.6545 | -          | 0.5438   | 8.559   | 3.92e-15       |         |          |
|      | s(lon-lat) | 7.553  | 6.897      | -        | -       | 5.95e-08       |         |          |
|      | s(E)       | 4.097  | 7.347      | -        | -       | 1.72e-08       |         |          |
|      | s(V)       | 1.680  | 3.020      | -        | -       | 0.0191         |         |          |
| 8    | Intercepto | 3.3957 | -          | 0.8426   | 4.03    | 8.14e-05       |         |          |
|      | s(lon-lat) | 7.951  | 4.263      | -        | -       | 0.000102       |         |          |

ESTIMACIÓN DE ÍNDICES DE RECLUTAMIENTO BASADOS EN VARIABLES Y MODELOS BIOFÍSICOS DE PELÁGICOS PEQUEÑOS  
DE LA ZONA CENTRO-SUR DE CHILE: FASE I

|      |     |            |            |         |        |        |          |          |
|------|-----|------------|------------|---------|--------|--------|----------|----------|
|      |     | s(E)       | 4.316      | 8.762   | -      | -      | 3.99e-10 |          |
|      |     | s(V)       | 1.808      | 4.393   | -      | -      | 0.002045 |          |
|      |     | s(T)       | 3.600      | 8.032   | -      | -      | 2.83e-09 |          |
|      | 9   | Intercepto | 2.350      | -       | 1.191  | 1.973  | 0.05     |          |
|      |     | s(lon-lat) | 7.820      | 7.766   | -      | -      | 6.75e-09 |          |
|      |     | s(E)       | 4.778      | 10.292  | -      | -      | 9.37e-12 |          |
|      |     | s(V)       | 1.000      | 3.095   | -      | -      | 0.0478   |          |
|      |     | s(T)       | 5.799      | 7.240   | -      | -      | 2.79e-08 |          |
|      |     | s(S)       | 7.662      | 7.268   | -      | -      | 3.29e-06 |          |
|      | 10  | Intercepto | 3.234      | -       | 1.115  | 2.901  | 0.00422  |          |
|      |     | s(lon-lat) | 7.476      | 7.947   | -      | -      | 4.76e-09 |          |
|      |     | s(E)       | 4.610      | 9.379   | -      | -      | 1.16e-10 |          |
|      |     | s(V)       | 2.835      | 0.616   | -      | -      | 0.71741  |          |
|      |     | s(T)       | 5.056      | 8.348   | -      | -      | 1.66e-09 |          |
|      |     | s(S)       | 7.680      | 7.119   | -      | -      | 4.60e-06 |          |
|      |     | s(O)       | 4.890      | 2.628   | -      | -      | 0.00975  |          |
| 2008 | Sur | 1          | Intercepto | -110.59 | -      | 12.56  | -8.806   | 1.36e-15 |
|      |     |            | S(lon-lat) | 10.97   | 20.07  | -      | -        | <2e-16   |
|      |     | 2          | Intercepto | -26.66  | -      | 11.31  | -2.357   | 0.0196   |
|      |     |            | s(lon-lat) | 14.960  | 13.992 | -      | -        | < 2e-16  |
|      |     |            | s(E)       | 9.119   | 4.753  | -      | -        | 3.08e-07 |
|      |     | 3          | Intercepto | -123.20 | -      | 14.38  | -8.567   | 2.21e-14 |
|      |     |            | s(lon-lat) | 10.814  | 24.310 | -      | -        | <2e-16   |
|      |     |            | s(V)       | 5.884   | 3.283  | -      | -        | 0.0048   |
|      |     | 4          | Intercepto | -147.98 | -      | 28.78  | -5.141   | 7.5e-07  |
|      |     |            | s(lon-lat) | 7.967   | 13.260 | -      | -        | 1.43e-13 |
|      |     |            | s(T)       | 6.325   | 7.785  | -      | -        | 2.10e-07 |
|      |     | 5          | Intercepto | -36.52  | -      | 4.8    | -7.497   | 5.25e-12 |
|      |     |            | s(lon-lat) | 17.37   | 55.39  | -      | -        | <2e-16   |
|      |     |            | s(S)       | 15.45   | 25.34  | -      | -        | <2e-16   |
|      |     | 6          | Intercepto | -       | -      | -      | -        | -        |
|      |     |            | s(lon-lat) | -       | -      | -      | -        | -        |
|      |     |            | s(O)       | -       | -      | -      | -        | -        |
|      |     | 7          | Intercepto | -14.551 | -      | 3.407  | -4.27    | 3.57e-05 |
|      |     |            | s(lon-lat) | 6.909   | 9.353  | -      | -        | 1.74e-09 |
|      |     |            | s(E)       | 2.644   | 10.707 | -      | -        | 8.77e-10 |
|      |     | s(V)       | 1.000      | 36.552  | -      | -      | 1.27e-08 |          |
|      | 8   | Intercepto | -48.01     | -       | 10.06  | -4.773 | 4.85e-06 |          |
|      |     | s(lon-lat) | 5.684      | 13.44   | -      | -      | 6.02e-13 |          |
|      |     | s(E)       | 5.049      | 17.25   | -      | -      | 5.87e-16 |          |
|      |     | s(V)       | 5.801      | 10.86   | -      | -      | 1.02e-10 |          |
|      |     | s(T)       | 5.810      | 11.11   | -      | -      | 6.16e-11 |          |

Continuación

| Año  | Zona       | Modelo     | Parámetros | Estimado   | Valor F | Error standard | Valor t  | p-valor  |
|------|------------|------------|------------|------------|---------|----------------|----------|----------|
| 2008 | Sur        | 9          | Intercepto | -75.38     | -       | 18.28          | -4.123   | 6.79e-05 |
|      |            |            | s(lon-lat) | 6.000      | 19.429  | -              | -        | 6.74e-16 |
|      |            |            | s(E)       | 4.036      | 23.422  | -              | -        | < 2e-16  |
|      |            |            | s(V)       | 4.995      | 8.187   | -              | -        | 5.12e-05 |
|      |            |            | s(T)       | 5.622      | 23.666  | -              | -        | < 2e-16  |
|      |            |            | s(S)       | 5.893      | 9.545   | -              | -        | 1.01e-05 |
|      |            | 10         | Intercepto | -          | -       | -              | -        | -        |
|      |            |            | s(lon-lat) | -          | -       | -              | -        | -        |
|      |            |            | s(E)       | -          | -       | -              | -        | -        |
|      |            |            | s(V)       | -          | -       | -              | -        | -        |
|      |            |            | s(T)       | -          | -       | -              | -        | -        |
|      |            |            | s(S)       | -          | -       | -              | -        | -        |
|      |            |            | s(O)       | -          | -       | -              | -        | -        |
| 2009 | Centro     | 1          | Intercepto | -93.75     | -       | 44.56          | -2.104   | 0.0371   |
|      |            |            |            | S(lon-lat) | 18.71   | 4.866          | -        | -        |
|      |            | 2          | Intercepto | -18.26     | -       | 11.62          | -1.572   | 0.118    |
|      |            |            |            | s(lon-lat) | 12.542  | 23.49          | -        | -        |
|      |            |            | s(E)       | 6.086      | 10.33   | -              | -        | 6.33e-13 |
|      |            | 3          | Intercepto | -171.50    | -       | 33.91          | -5.058   | 1.33e-06 |
|      |            |            |            | s(lon-lat) | 14.00   | 11.544         | -        | -        |
|      |            |            | s(V)       | 11.23      | 5.304   | -              | -        | 1.17e-07 |
| 4    | Intercepto | -2096.0    | -          | 205.7      | -10.19  | <2e-16         |          |          |
|      |            | s(lon-lat) | 15.00      | 21.7       | -       | -              | 6.36e-16 |          |

ESTIMACIÓN DE ÍNDICES DE RECLUTAMIENTO BASADOS EN VARIABLES Y MODELOS BIOFÍSICOS DE PELÁGICOS PEQUEÑOS  
DE LA ZONA CENTRO-SUR DE CHILE: FASE I

|     |    |            |         |        |       |        |          |
|-----|----|------------|---------|--------|-------|--------|----------|
|     |    | s(T)       | 12.18   | 25.81  | -     | -      | < 2e-16  |
|     | 5  | Intercepto | -118.80 | -      | 48.01 | -2.475 | 0.0145   |
|     |    | s(lon-lat) | 15.82   | 9.202  | -     | -      | 3.36e-10 |
|     |    | s(S)       | 1.00    | 0.985  | -     | -      | 0.323    |
|     | 6  | Intercepto | -89.74  | -      | 37.41 | -2.399 | 0.0178   |
|     |    | s(lon-lat) | 11.90   | 7.887  | -     | -      | 5.28e-08 |
|     |    | s(O)       | 11.83   | 4.987  | -     | -      | 3.78e-06 |
|     | 7  | Intercepto | -87.07  | -      | 44.90 | -1.939 | 0.0546   |
|     |    | s(lon-lat) | 10.372  | 15.094 | -     | -      | < 2e-16  |
|     |    | s(E)       | 4.111   | 16.80  | -     | -      | < 2e-16  |
|     |    | s(V)       | 11.894  | 6.858  | -     | -      | 4.76e-05 |
|     | 8  | Intercepto | -201.38 | -      | 67.21 | -2.996 | 0.00326  |
|     |    | s(lon-lat) | 10.087  | 16.725 | -     | -      | < 2e-16  |
|     |    | s(E)       | 3.957   | 18.717 | -     | -      | < 2e-16  |
|     |    | s(V)       | 11.999  | 9.536  | -     | -      | 8.37e-07 |
|     |    | s(T)       | 1.00    | 14.478 | -     | -      | 0.000216 |
|     | 9  | Intercepto | -1538.1 | -      | 512.3 | -3.002 | 0.00326  |
|     |    | s(lon-lat) | 7.818   | 9.029  | -     | -      | 2.37e-10 |
|     |    | s(E)       | 5.111   | 10.127 | -     | -      | 4.03e-08 |
|     |    | s(V)       | 9.000   | 8.474  | -     | -      | 2.04e-08 |
|     |    | s(T)       | 6.947   | 14.931 | -     | -      | 4.37e-16 |
|     |    | s(S)       | 7.983   | 11.431 | -     | -      | 7.98e-13 |
|     | 10 | Intercepto | -16.543 | -      | 2.513 | -6.584 | 1.04e-09 |
|     |    | s(lon-lat) | 4.521   | 24.084 | -     | -      | < 2e-16  |
|     |    | s(E)       | 2.165   | 28.168 | -     | -      | < 2e-16  |
|     |    | s(V)       | 4.999   | 15.102 | -     | -      | 1.13e-11 |
|     |    | s(T)       | 3.489   | 11.840 | -     | -      | 1.93e-09 |
|     |    | s(S)       | 5.000   | 19.510 | -     | -      | 1.38e-12 |
|     |    | s(O)       | 4.284   | 5.612  | -     | -      | 0.000103 |
| Sur | 1  | Intercepto | -47.61  | -      | 37.69 | -1.263 | 0.208    |
|     |    | S(lon-lat) | 21.34   | 9.956  | -     | -      | <2e-16   |
|     | 2  | Intercepto | -173.9  | -      | 34.16 | -5.091 | 8.7e-07  |
|     |    | s(lon-lat) | 12.230  | 22.18  | -     | -      | <2e-16   |
|     |    | s(E)       | 4.589   | 24.33  | -     | -      | <2e-16   |
|     | 3  | Intercepto | -       | -      | -     | -      | -        |
|     |    | s(lon-lat) | -       | -      | -     | -      | -        |
|     |    | s(V)       | -       | -      | -     | -      | -        |
|     | 4  | Intercepto | -366.24 | -      | 47.04 | -7.786 | 5.24e-13 |
|     |    | s(lon-lat) | 10.96   | 17.10  | -     | -      | < 2e-16  |
|     |    | s(T)       | 10.94   | 6.23   | -     | -      | 0.000102 |
|     | 5  | Intercepto | -264.30 | -      | 37.11 | -7.123 | 2.31e-11 |
|     |    | s(lon-lat) | 10.97   | 15.313 | -     | -      | < 2e-16  |
|     |    | s(S)       | 7.03    | 5.399  | -     | -      | 2.05e-07 |

Continuación

| Año  | Zona   | Modelo     | Parámetros | Estimado | Valor F | Error standard | Valor t  | p-valor  |   |
|------|--------|------------|------------|----------|---------|----------------|----------|----------|---|
| 2009 | Sur    | 6          | Intercepto | -400.30  | -       | 54.05          | -7.406   | 1.23e-11 |   |
|      |        |            | s(lon-lat) | 10.957   | 14.226  | -              | -        | 6.26e-15 |   |
|      |        |            | s(O)       | 8.972    | 5.997   | -              | -        | 6.30e-08 |   |
|      |        | 7          | Intercepto | -        | -       | -              | -        | -        | - |
|      |        |            | s(lon-lat) | -        | -       | -              | -        | -        | - |
|      |        |            | s(E)       | -        | -       | -              | -        | -        | - |
|      |        |            | s(V)       | -        | -       | -              | -        | -        | - |
|      |        | 8          | Intercepto | -7.079   | -       | 1.554          | -4.557   | 9.28e-06 |   |
|      |        |            | s(lon-lat) | 4.989    | 30.226  | -              | -        | < 2e-16  |   |
|      |        |            | s(E)       | 2.134    | 20.021  | -              | -        | 5.13e-16 |   |
|      | s(T)   |            | 4.875      | 6.321    | -       | -              | 1.88e-05 |          |   |
|      | 9      | Intercepto | -42.038    | -        | 9.817   | -4.282         | 3.02e-05 |          |   |
|      |        | s(lon-lat) | 7.934      | 21.609   | -       | -              | < 2e-16  |          |   |
|      |        | s(E)       | 2.778      | 20.183   | -       | -              | < 2e-16  |          |   |
|      |        | s(T)       | 7.961      | 1.997    | -       | -              | 0.097    |          |   |
|      |        | s(S)       | 5.402      | 5.900    | -       | -              | 1.07e-06 |          |   |
|      | 10     | Intercepto | -41.927    | -        | 7.677   | -5.461         | 2.2e-07  |          |   |
|      |        | s(lon-lat) | 4.966      | 55.72    | -       | -              | < 2e-16  |          |   |
|      |        | s(E)       | 2.958      | 17.16    | -       | -              | 4.08e-13 |          |   |
|      |        | s(T)       | 4.121      | 17.86    | -       | -              | 1.44e-13 |          |   |
| s(S) |        | 4.930      | 16.31      | -        | -       | 1.44e-12       |          |          |   |
| s(O) |        | 3.987      | 21.02      | -        | -       | 1.67e-15       |          |          |   |
| 2010 | Centro | 1          | Intercepto | -114.8   | -       | 23.2           | -4.951   | 2.37e-06 |   |
|      |        |            | s(lon-lat) | 48.35    | 24.34   | -              | -        | <2e-16   |   |

ESTIMACIÓN DE ÍNDICES DE RECLUTAMIENTO BASADOS EN VARIABLES Y MODELOS BIOFÍSICOS DE PELÁGICOS PEQUEÑOS  
DE LA ZONA CENTRO-SUR DE CHILE: FASE I

|    |            |         |        |       |        |          |
|----|------------|---------|--------|-------|--------|----------|
| 2  | Intercepto | -1710.0 | -      | 423.8 | -4.035 | 9.8e-05  |
|    | s(lon-lat) | 34.74   | 4.192  | -     | -      | 4.48e-08 |
|    | s(E)       | 18.61   | 10.942 | -     | -      | < 2e-16  |
| 3  | Intercepto | -10.419 | -      | 2.407 | -4.329 | 2.71e-05 |
|    | s(lon-lat) | 11.945  | 15.17  | -     | -      | < 2e-16  |
|    | s(V)       | 8.357   | 13.64  | -     | -      | 8.46e-15 |
| 4  | Intercepto | -11.654 | -      | 2.058 | -5.663 | 9e-08    |
|    | s(lon-lat) | 23.72   | 9.229  | -     | -      | <2e-16   |
|    | s(T)       | 17.17   | 9.223  | -     | -      | <2e-16   |
| 5  | Intercepto | -1.437  | -      | 2.990 | -0.481 | 0.632    |
|    | s(lon-lat) | 16.42   | 4.165  | -     | -      | 1.13e-07 |
|    | s(S)       | 18.72   | 3.761  | -     | -      | 1.56e-05 |
| 6  | Intercepto | -38.583 | -      | 8.582 | -4.496 | 1.52e-05 |
|    | s(lon-lat) | 21.30   | 9.703  | -     | -      | <2e-16   |
|    | s(O)       | 21.14   | 10.534 | -     | -      | <2e-16   |
| 7  | Intercepto | -20.588 | -      | 3.15  | -6.525 | 1.06e-09 |
|    | s(lon-lat) | 12.000  | 15.270 | -     | -      | < 2e-16  |
|    | s(E)       | 4.504   | 6.271  | -     | -      | 1.82e-07 |
|    | s(V)       | 8.414   | 20.334 | -     | -      | < 2e-16  |
| 8  | Intercepto | -420.18 | -      | 46.97 | -8.946 | 2.53e-15 |
|    | s(lon-lat) | 11.000  | 10.767 | -     | -      | 4.80e-14 |
|    | s(E)       | 6.387   | 4.178  | -     | -      | 8.92e-05 |
|    | s(V)       | 6.893   | 7.499  | -     | -      | 2.05e-09 |
|    | s(T)       | 11.000  | 41.061 | -     | -      | 1.19e-14 |
| 9  | Intercepto | -189.0  | -      | 70.1  | -2.696 | 0.00794  |
|    | s(lon-lat) | 8.934   | 17.557 | -     | -      | < 2e-16  |
|    | s(E)       | 5.787   | 17.557 | -     | -      | 1.64e-05 |
|    | s(V)       | 6.170   | 17.268 | -     | -      | < 2e-16  |
|    | s(T)       | 8.667   | 21.147 | -     | -      | < 2e-16  |
|    | s(S)       | 8.760   | 3.784  | -     | -      | 0.0539   |
| 10 | Intercepto | -78.44  | -      | 19.74 | -3.974 | 0.000116 |
|    | s(lon-lat) | 6.155   | 7.999  | -     | -      | 4.50e-08 |
|    | s(E)       | 4.898   | 13.122 | -     | -      | 9.83e-13 |
|    | s(V)       | 4.871   | 13.795 | -     | -      | 2.68e-13 |
|    | s(T)       | 7.000   | 12.852 | -     | -      | 3.58e-10 |
|    | s(S)       | 6.994   | 11.824 | -     | -      | 1.90e-09 |
|    | s(O)       | 7.000   | 10.107 | -     | -      | 4.52e-10 |

Continuación

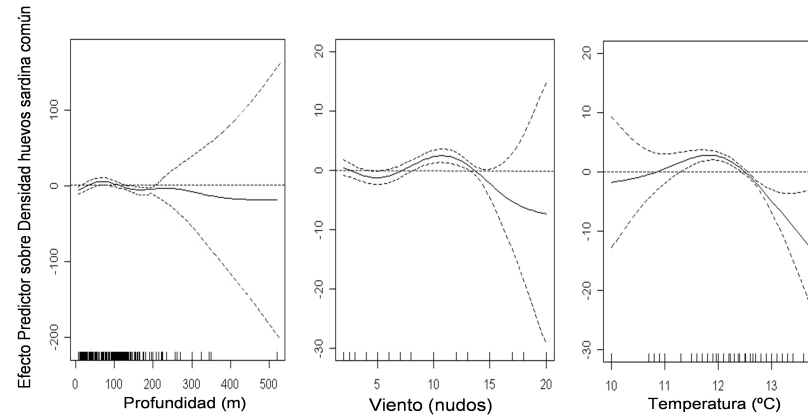
| Año  | Zona | Modelo | Parámetros | Estimado | Valor F | Error standard | Valor t | p-valor  |
|------|------|--------|------------|----------|---------|----------------|---------|----------|
| 2010 | Sur  | 1      | Intercepto | -6.538   | -       | 3.165          | -2.066  | 0.0403   |
|      |      |        | S(lon-lat) | 31.99    | 11.56   | -              | -       | <2e-16   |
|      |      | 2      | Intercepto | -159.0   | -       | 28.5           | -5.577  | 1.23e-07 |
|      |      |        | s(lon-lat) | 40.9     | 5.732   | -              | -       | 1.88e-12 |
|      |      |        | s(E)       | 24.4     | 5.799   | -              | -       | 4.19e-14 |
|      |      | 3      | Intercepto | -        | -       | -              | -       | -        |
|      |      |        | s(lon-lat) | -        | -       | -              | -       | -        |
|      |      |        | s(V)       | -        | -       | -              | -       | -        |
|      |      | 4      | Intercepto | -113.3   | -       | 34.8           | -3.254  | 0.00139  |
|      |      |        | s(lon-lat) | 25.73    | 17.649  | -              | -       | <2e-16   |
|      |      |        | s(T)       | 21.59    | 7.938   | -              | -       | <2e-16   |
|      |      | 5      | Intercepto | -3.44    | -       | 2.928          | -1.176  | 0.241    |
|      |      |        | s(lon-lat) | 22.00    | 13.418  | -              | -       | < 2e-16  |
|      |      |        | s(S)       | 28.31    | 6.183   | -              | -       | 1.33e-12 |
|      |      | 6      | Intercepto | -1.974   | -       | 2.894          | -0.682  | 0.496    |
|      |      |        | s(lon-lat) | 21.77    | 13.855  | -              | -       | < 2e-16  |
|      |      |        | s(O)       | 24.83    | 4.581   | -              | -       | 4.55e-1  |
|      |      | 7      | Intercepto | -        | -       | -              | -       | -        |
|      |      |        | s(lon-lat) | -        | -       | -              | -       | -        |
|      |      |        | s(E)       | -        | -       | -              | -       | -        |
|      |      |        | s(V)       | -        | -       | -              | -       | -        |
|      |      | 8      | Intercepto | -263.77  | -       | 64.97          | -4.06   | 8.15e-05 |
|      |      |        | s(lon-lat) | 26.04    | 8.37    | -              | -       | 2.18e-13 |
|      |      |        | s(E)       | 17.88    | 5.229   | -              | -       | 4.12e-10 |
|      |      |        | s(T)       | 21.54    | 5.229   | -              | -       | < 2e-16  |
|      |      | 9      | Intercepto | -99.45   | -       | 21.54          | -4.618  | 8.36e-06 |
|      |      |        | s(lon-lat) | 17.857   | 16.859  | -              | -       | < 2e-16  |
|      |      |        | s(E)       | 9.824    | 5.830   | -              | -       | 5.45e-09 |
|      |      |        | s(T)       | 14.480   | 7.819   | -              | -       | 4.33e-14 |
|      |      |        | s(S)       | 15.142   | 9.851   | -              | -       | < 2e-16  |
|      |      | 10     | Intercepto | -8.110   | -       | 1.528          | -5.306  | 3.7e-07  |
|      |      |        | s(lon-lat) | 10.53    | 11.734  | -              | -       | 6.83e-16 |
|      |      |        | s(E)       | 5.28     | 3.871   | -              | -       | 0.000103 |
|      |      |        | s(T)       | 8.27     | 11.007  | -              | -       | 5.48e-15 |
|      |      |        | s(S)       | 10.82    | 9.108   | -              | -       | 4.65e-11 |
|      |      |        | s(O)       | 10.86    | 5.304   | -              | -       | 4.02e-07 |

Los rangos óptimos de las variables evaluadas en relación a las mayores densidades de huevos de sardina común se muestran en las Figuras 4.28 – 4.41 y Tabla 4.5, donde se observa que los núcleos de las diferentes zonas y años, se asocian a nivel costero y somero (< 140m) y, con vientos de baja intensidad (< 25n). El efecto de la temperatura entre los 10,4° a 12,8°C muestra una relación positiva en la densidad de huevos, donde las bajas temperaturas (<11°C) se asocian a la desembocadura de ríos y a la zona sur del área de estudio. La salinidad entre los 27,74 a 34,85 presentó un efecto positivo en la presencia de huevos. El oxígeno disuelto mostró una consecuencia positiva en la densidad de huevos de sardina común (3,6 a 6,56 ml/L). A través de la Figura 4.42, se observa el efecto de las variables predictoras (profundidad, viento, temperatura, salinidad, oxígeno) sobre la densidad de huevos, presentándose una asociación positiva (+) a un similar rango de las variables predictoras entre la zona centro y sur.

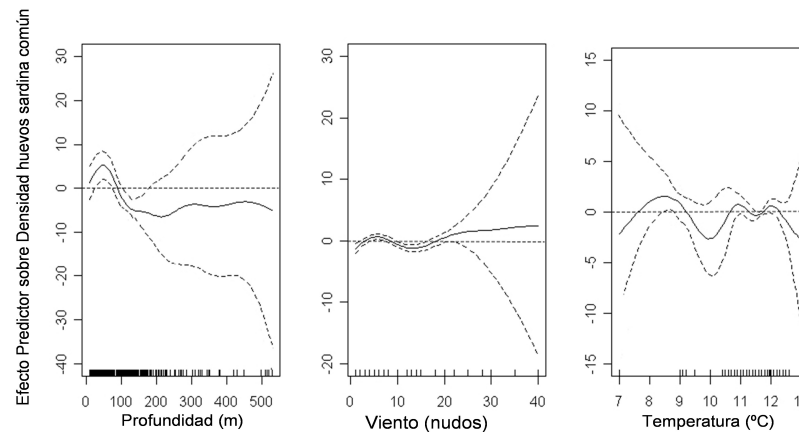
**Tabla 4.5.** Rango óptimo de las variables predictoras asociados a la densidad de huevos de sardina común (variables respuesta) por zonas y años.

| Año  | Zona   | Profundidad (m) | Viento (n)                  | Temperatura (°C)                     | Salinidad (PSU)                         | Oxígeno Disuelto (ml/L)            |
|------|--------|-----------------|-----------------------------|--------------------------------------|---|------------------------------------|
| 2002 | Centro | <b>10-95</b>    | <b>7-14</b>                 | <b>11,2-12,6</b>                     | -                                       | -                                  |
|      | Sur    | <b>10-93</b>    | <b>2-9</b>                  | <b>10,8-11,2</b><br><b>11,7-12,3</b> | -                                       | -                                  |
| 2003 | Centro | <b>10-70</b>    | <b>5-9,3</b>                | <b>12-12,5</b>                       | -                                       | -                                  |
|      | Sur    | <b>14-60</b>    | <b>2-4</b><br><b>8-11</b>   | <b>12,13</b>                         | -                                       | -                                  |
| 2004 | Centro | <b>11-98</b>    | <b>11-19</b>                | <b>12,5-12,7</b>                     | <b>33,25-33,35</b>                      | <b>3,66-4,11</b>                   |
|      | Sur    | <b>10-130</b>   | <b>7-19</b>                 | <b>12-12,8</b>                       | <b>32-34</b>                            | <b>3,6-4,0</b>                     |
| 2005 | Sur    | <b>10-100</b>   | <b>10-15</b>                | <b>11,2-11,8</b>                     | <b>32-32,4</b>                          | <b>4-4,3</b>                       |
| 2007 | Centro | <b>16-96</b>    | <b>3-11</b>                 | <b>10,66-11,0</b>                    | <b>34,0-34,54</b>                       | <b>4,0-6,0</b>                     |
|      | Sur    | <b>45-140</b>   | <b>4-25</b>                 | <b>10,7-11,50</b>                    | <b>32,5-33,2</b><br><b>34,1-34,85</b>   | <b>4,2-4,8</b>                     |
| 2008 | Sur    | <b>10-130</b>   | <b>12-14</b>                | <b>12,1-12,4</b>                     | 29-33                                   | -                                  |
| 2009 | Centro | <b>10-130</b>   | <b>5-12</b><br><b>19-21</b> | <b>11,8-12,3</b>                     | <b>28-30,2</b><br><b>30,9-33</b>        | <b>3,5-4,0</b>                     |
|      | Sur    | <b>10-110</b>   | -                           | <b>11,5-11,7</b>                     | <b>31,7-31,9</b><br><b>33-33,8</b>      | <b>4,2-4,4</b>                     |
| 2010 | Centro | <b>10-140</b>   | <b>1-5</b><br><b>9-12,5</b> | <b>11,3-12,2</b>                     | <b>27,74-28,4</b><br><b>32,01-33,10</b> | <b>3,7-6,0</b>                     |
|      | Sur    | <b>15-95</b>    | -                           | <b>10,4-10,5</b><br><b>11,2-12,0</b> | <b>32-32,2</b><br><b>32,5-33,8</b>      | <b>5,0-5,46</b><br><b>6,0-6,56</b> |

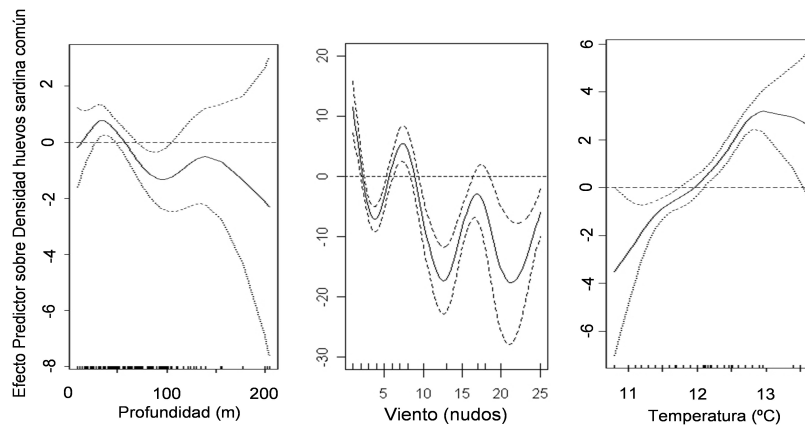
\* En negrilla son los rangos de las variables que contienen la menor desviación estándar.



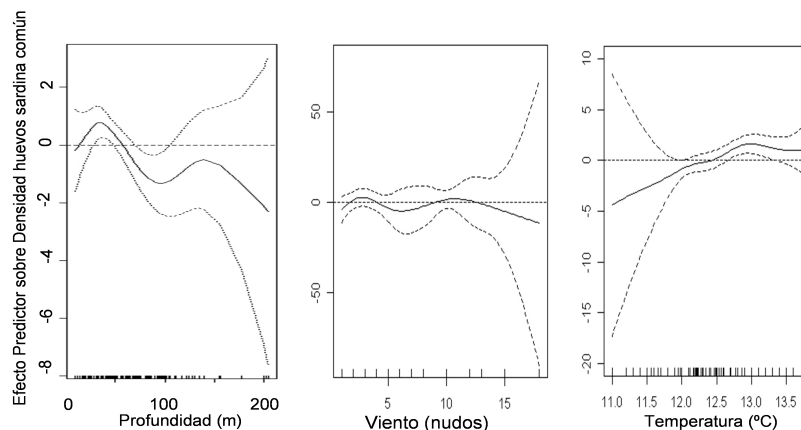
**Figura 4.28.** Relaciones predictoras (profundidad, viento, temperatura) sobre la densidad de huevos de sardina común en la zona centro durante el 2002.



**Figura 4.29.** Relaciones predictoras (profundidad, viento, temperatura) sobre la densidad de huevos de sardina común en la zona sur durante el 2002.

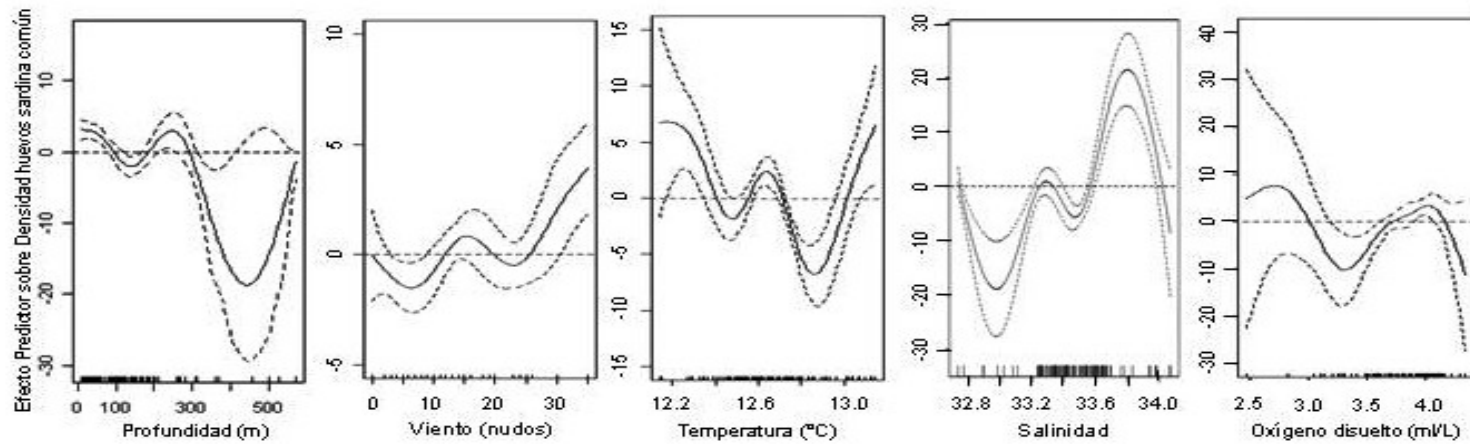


**Figura 4.30.** Relaciones predictoras (profundidad, viento, temperatura) sobre la densidad de huevos de sardina común en la zona centro durante el 2003.

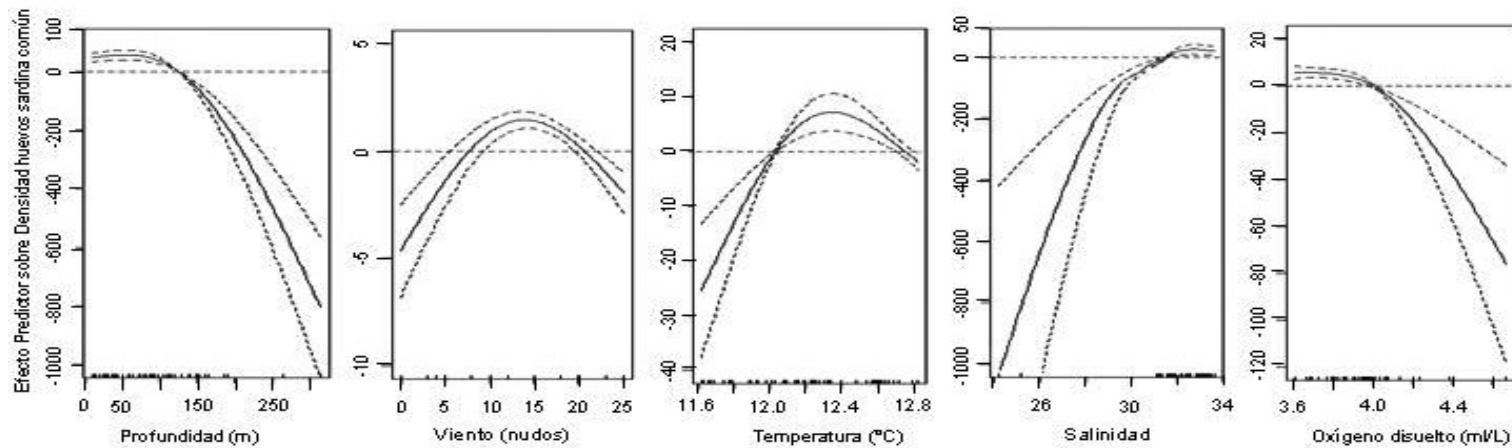


**Figura 4.31.** Relaciones predictoras (profundidad, viento, temperatura) sobre la densidad de huevos de sardina común en la zona sur durante el 2003.

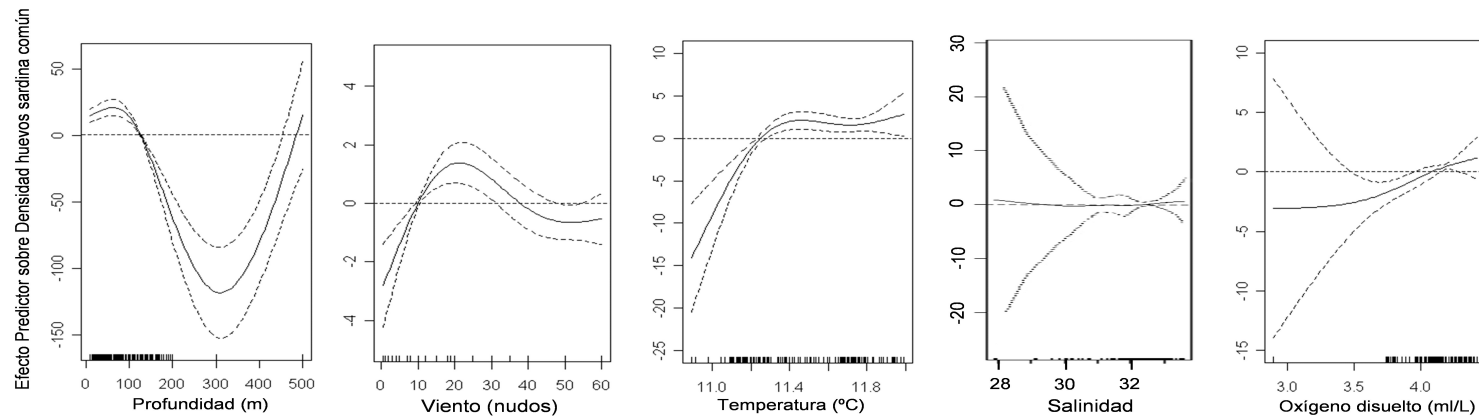




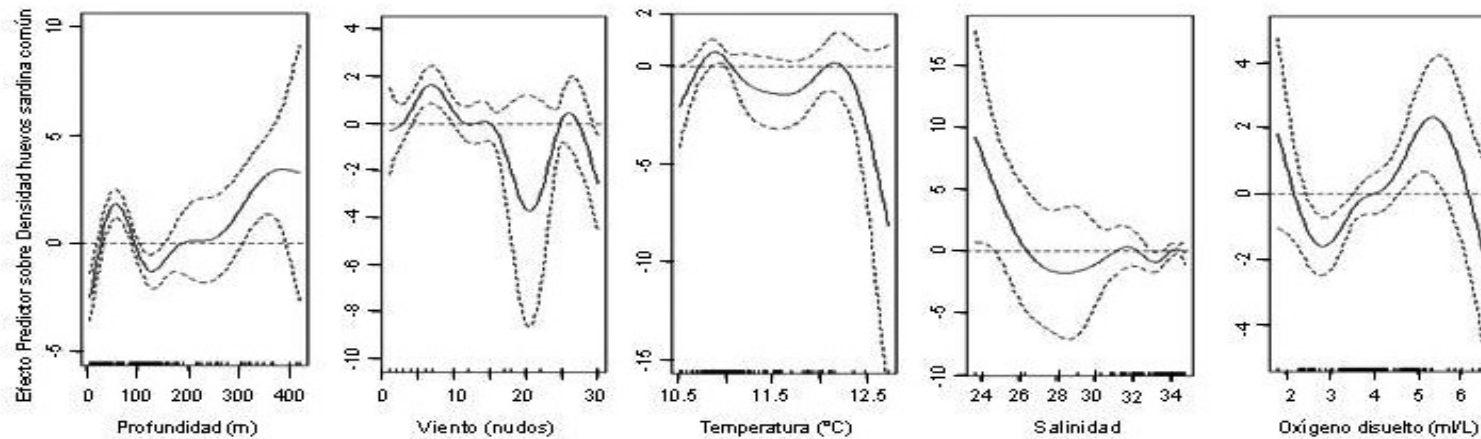
**Figura 4.32.** Relaciones predictoras (profundidad, viento, temperatura, salinidad, oxígeno disuelto) sobre la densidad de huevos de sardina común en la zona centro durante el 2004.



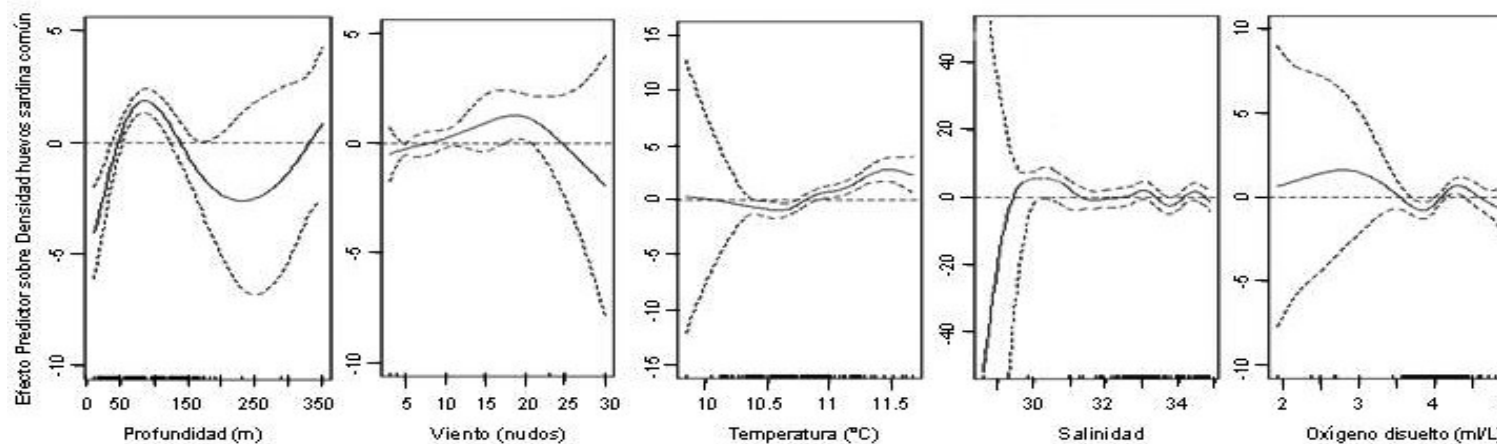
**Figura 4.33.** Relaciones predictoras (profundidad, viento, temperatura, salinidad, oxígeno disuelto) sobre la densidad de huevos de sardina común en la zona sur durante el 2004.



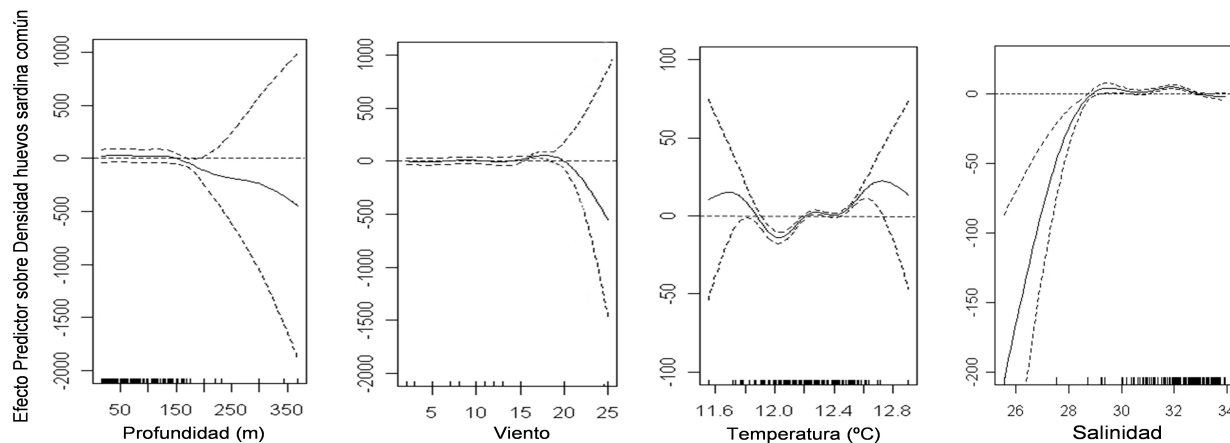
**Figura 4.34.** Relaciones predictoras (profundidad, viento, temperatura, salinidad, oxígeno disuelto) sobre la densidad de huevos de sardina común en la zona sur durante el 2005.



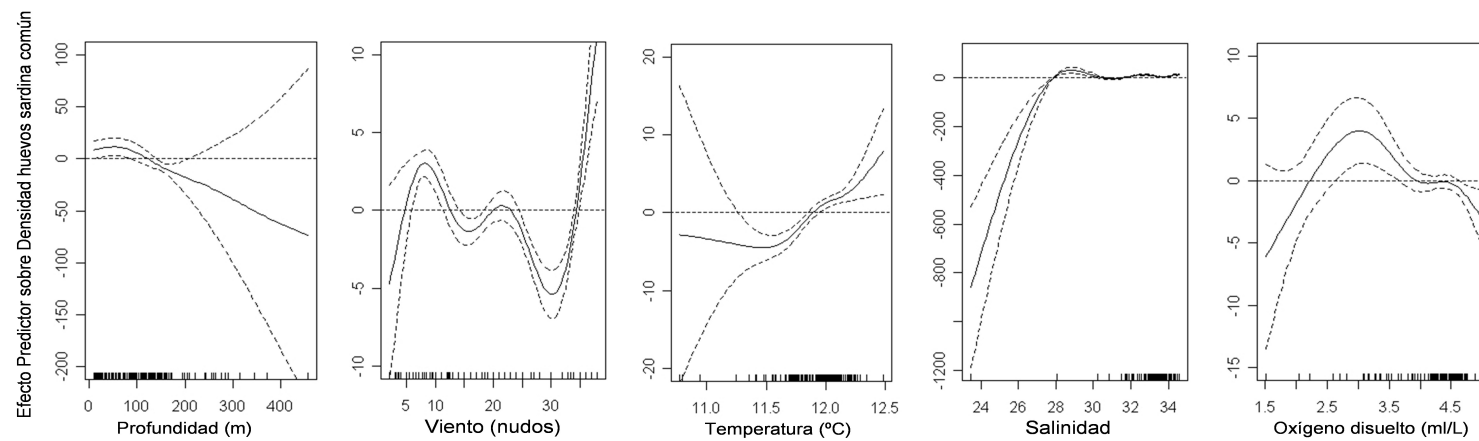
**Figura 4.35.** Relaciones predictoras (profundidad, viento, temperatura, salinidad, oxígeno disuelto) sobre la densidad de huevos de sardina común en la zona centro durante el 2007.



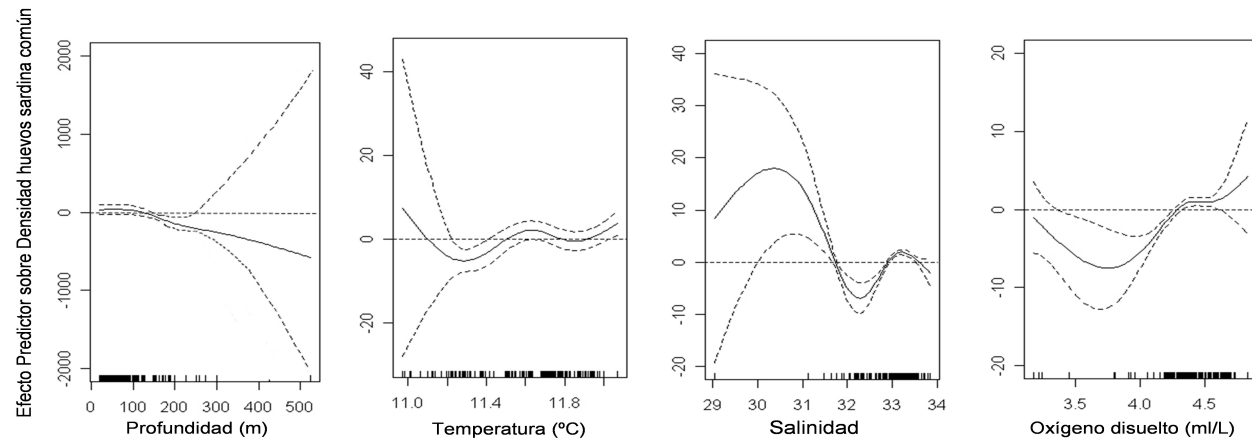
**Figura 4.36.** Relaciones predictoras (profundidad, viento, temperatura, salinidad, oxígeno disuelto) sobre la densidad de huevos de sardina común en la zona sur durante el 2007.



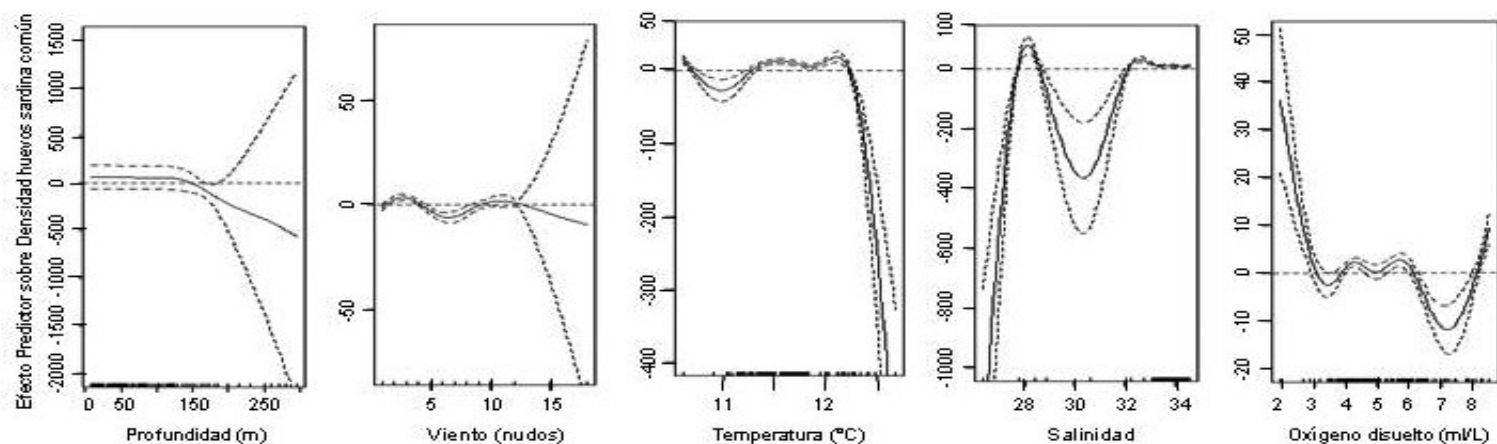
**Figura 4.37.** Relaciones predictoras (profundidad, viento, temperatura, salinidad) sobre la densidad de huevos de sardina común en la zona sur durante el 2008.



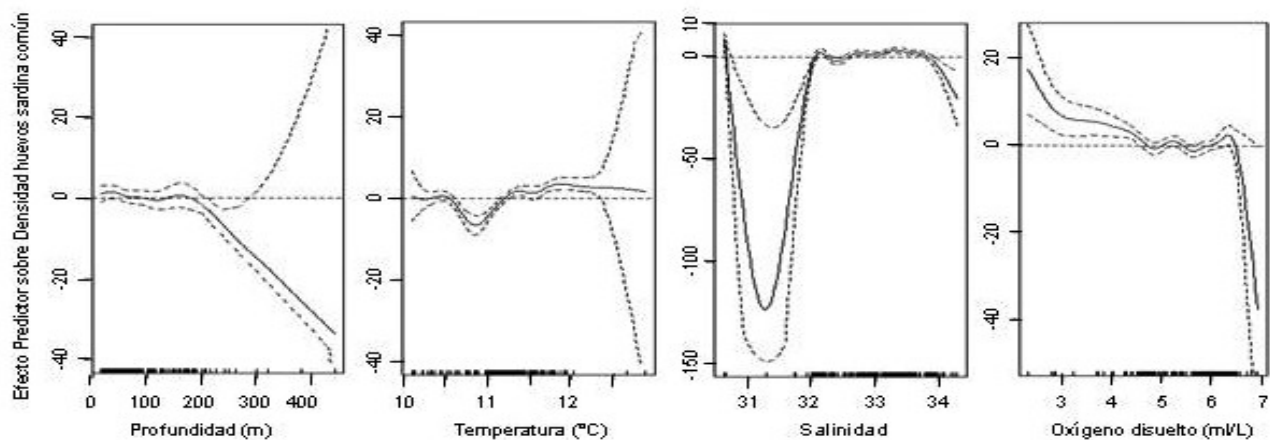
**Figura 4.38.** Relaciones predictoras (profundidad, viento, temperatura, salinidad, oxígeno disuelto) sobre la densidad de huevos de sardina común en la zona centro durante el 2009.



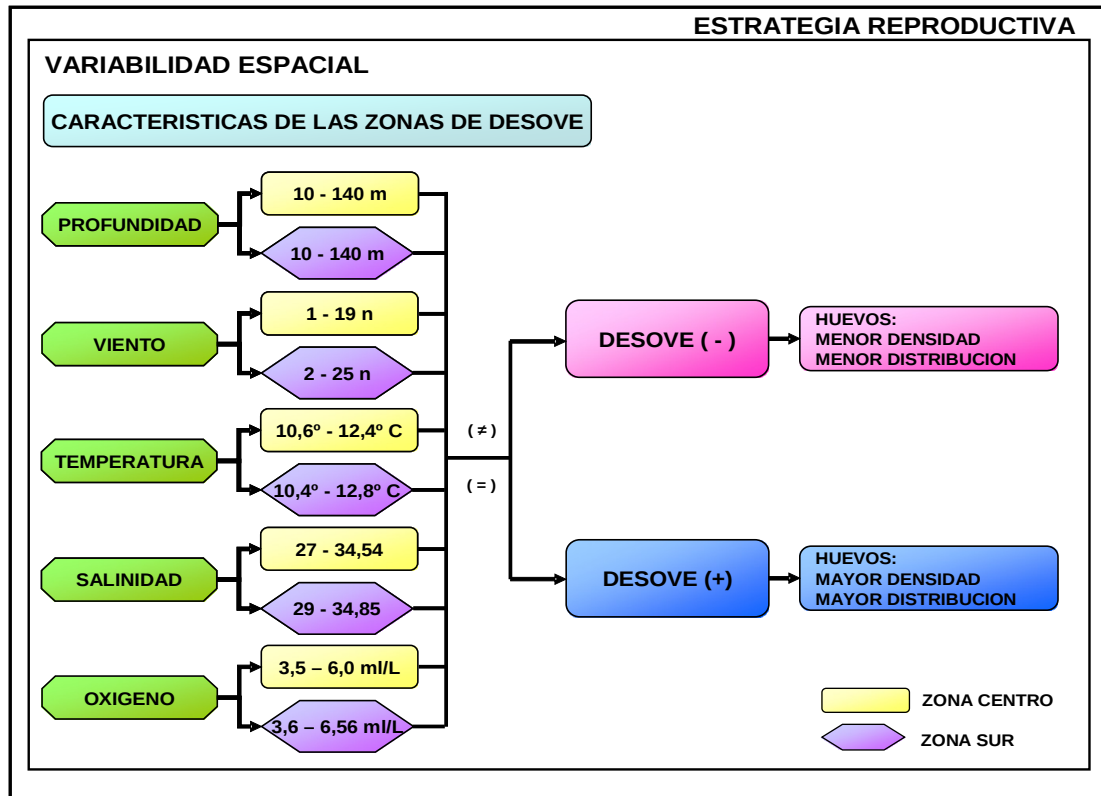
**Figura 4.39.** Relaciones predictoras (profundidad, temperatura, salinidad, oxígeno disuelto) sobre la densidad de huevos de sardina común en la zona sur durante el 2009.



**Figura 4. 40.** Relaciones predictoras (profundidad, viento, temperatura, salinidad, oxígeno disuelto) sobre la densidad de huevos de sardina común en la zona centro durante el 2010.



**Figura 4. 41.** Relaciones predictoras (profundidad, temperatura, salinidad, oxígeno disuelto) sobre la densidad de huevos de sardina común en la zona sur durante el 2010.



**Figura 4. 42.** Esquema del efecto de las variables predictoras sobre la densidad de huevos de sardina común en la zona centro-sur de Chile, mediante Modelos Aditivos Generalizados (GAMs).

#### 4.4. CONCLUSION Y DISCUSION

De acuerdo a la distribución latitudinal de la clo-a costera, la región de estudio puede ser subdividida en 3 zonas: una zona norte comprendida entre Valparaíso y Punta Lavapie (~33-37°S), una zona central comprendida entre Punta Lavapie y Corral (~37-40°S) y una zona sur comprendida entre Corral y Ancud (40-42°S). Entre estas, la zona norte presenta las mayores concentraciones de clorofila y una marcada variabilidad anual. La zona centro y sur presentan menores concentraciones de clorofila, una menor variabilidad anual y mayor variabilidad intraestacional que en la zona norte. La contribución del ciclo anual a la varianza de la clorofila es mayor al norte de los 37°S y disminuye al sur de los 37°S. De esta forma, la varianza explicada por el ciclo anual también da cuenta de la subdivisión de la región en 3 zonas (norte, centro, sur) observada en la clorofila.

Los vientos a lo largo de la costa se intensifican progresivamente de norte a sur entre primavera y verano. En la zona norte (norte de 37°S), la dirección del viento (SW) se conserva favorable a la surgencia todo el año. Al sur de los 37°S, la dirección del viento se invierte durante invierno (N) y se hace desfavorable a la surgencia. En la zona costera la divergencia de los vientos se mueve estacionalmente en dirección norte-sur, entre 37°S (invierno) y 42°S (verano). Este desplazamiento no afecta la dirección de los vientos en la zona norte (al norte de los 37°S), pero se asocia a la inversión estacional de los vientos observada al sur a de los 37°S (zonas centro y sur), donde pasa de vientos

favorables (verano) a desfavorables (invierno) a la surgencia costera. El cambio del ángulo de la línea de costa en Punta Lavapie (~37°S) y la ubicación de la zona de divergencia de los vientos, son posiblemente los factores que podrían estar determinando las diferencias observadas entre la zona norte y centro y las zona centro y sur, respectivamente.

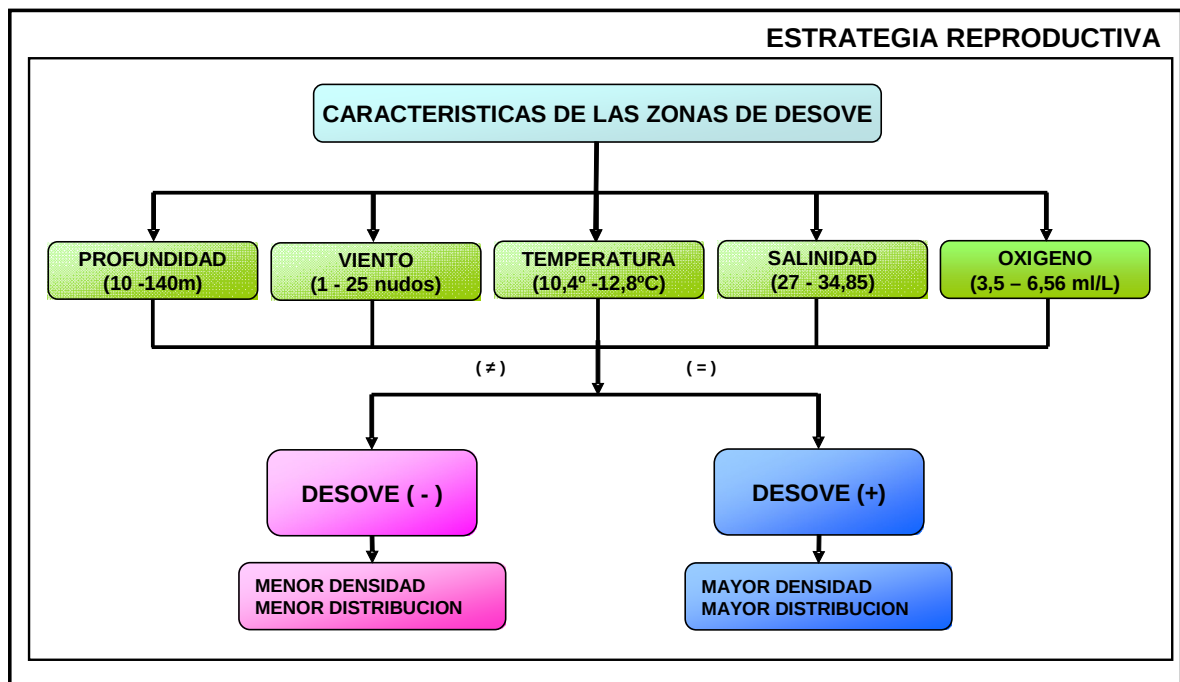
Aunque las mediciones de altimetría no son completamente confiables cerca de la costa, el campo de nivel del mar y corrientes geostróficas sugiere un el patrón de circulación ciclónico al norte de los 37°S, el cual se invierte (anticiclónico) durante el invierno. Al sur de los 37°S la circulación se mantiene ciclónica durante todo el año. Esta diferencia latitudinal puede ser importante para los procesos de advección - retención a nivel regional. Los campos del nivel del mar y la energía cinética, sugieren una importante propagación costa afuera de remolinos de mesoescala y ondas de Rossby dentro del ciclo anual. La variabilidad interanual observada en la generación de estas estructuras podría estar vinculada a patrones de teleconexión con la variabilidad en el Pacífico tropical y el ENOS. Periodos de mayor generación de remolinos podrían asociarse a periodos de mayor exportación de calor, nutrientes y sales desde la zona costera hacia la zona oceánica, además de una menor retención larval.

Las costa centro-sur de Chile, se caracteriza por presentar zonas de surgencia, donde, las poblaciones de pequeños pelágicos tal como la sardina común *Strangomera bentincki*, que habita en estos sistemas, ha sufrido grandes fluctuaciones en abundancia durante los últimos años ([Cubillos & Arcos, 2002](#); [Cubillos et al., 2002](#); [Cubillos et al., 2005](#)). Tales cambios se atribuyen a factores medioambientales en los estados tempranos de vida de los peces, lo cual puede verse reflejado, en una variedad de factores interrelacionados, como el tiempo y duración de la estación de desove y distribución geográfica de los adultos ([Fuiman & Werner, 2002](#); [Rodríguez-Graña & Castro, 2003](#); [Lloret et al., 2004](#)). Para describir estas potenciales asociaciones (habitat-abundancia/distribución) en las poblaciones de peces, se han utilizado ampliamente los modelos aditivos generalizados (GAMs) ([Augustin et al., 1998](#); [Borchers et al., 1999](#); [Cubillos et al., 2008, 2011](#), [Stratoudakis et al., 2006](#)).

Los resultados de los GAMs en lo referente a la ubicación de los principales núcleos de huevos de sardina común concuerdan con lo reportado por [Castro et al. \(1997\)](#), [SUBPESCA \(2002\)](#) y [Cubillos et al. \(2005, 2006, 2011\)](#), donde se describe una buena correspondencia entre la distribución de huevos de sardina común a nivel costero y a la vez, con mayor densidad asociada a golfos, bahías y zonas estuarinas de las regiones VIII, IX y X. Las relaciones entre la densidad de huevos con la temperatura para sardina común, concuerdan con lo citado por [Escribano et al. \(1996\)](#) y [Cubillos et al. \(2006, 2011\)](#), los cuales destacan que los desoves están asociados a bajas temperaturas. La sardina común, presenta una estrategia reproductiva que consiste en desovar al término del invierno (Julio-Agosto), cuando se presentan condiciones ambientales favorables de convergencia costera que logran concentrar y retener huevos en la costa y así, evitar el intenso transporte hacia el océano observado en la época estival. Lo anterior es concordante a lo resultados de esta investigación, es decir, una asociación positiva entre la densidad de huevos y vientos norte (2 a 25 nudos). Las diferencias de distribución y densidades de huevos encontradas en los distintos años pueden ser la consecuencia de que la sardina común es un especie endémica del sur de Chile, por lo tanto su estrategia reproductiva está limitada a un estrecho rango de temperatura (11° a 12° C) ([Cubillos et](#)

*al.*, 2005, 2008, 2011), y a una alta concentración de oxígeno disuelto; *Castro et al.*, 1997 y *Fuiman & Werner (2002)* reportan un similar patrón en otras especies de peces, donde cualquier modificación de su hábitat puede producir cambios en los parámetros reproductivos y demográficos, algunos por ejemplo, la edad de maduración, frecuencia de desove, fecundidad y supervivencia (evolución ecológica). Los resultados de la contrastación entre densidad de huevos de sardina común en la zona de estudio, obtenida a partir de los modelos GAMs y los datos reales (2002-2010), mostraron similitud en cuanto a la distribución de los principales núcleos (Constitución, desembocadura del río Itata, Golfo de Arauco y Lebú-Corral). En cambio, se presentaron diferencias en la densidad de huevos, siendo mayores en los modelos GAMs, estas diferencias se pueden atribuir a la estimación de los datos hidrográficos (temperatura, salinidad, oxígeno) a partir de los datos reales (bajo número de estaciones con este tipo de información).

Finalmente, las variaciones en la densidad de huevos de sardina común, son moduladas principalmente por factores medioambientales (Figura 4.43). Los modelos GAMs constituidos por las variables predictivas, demuestran que son una buena herramienta para explicar en gran parte la dinámica espacial y temporal de la densidad de huevos de sardina común durante el periodo reproductivo en la zona centro-sur de Chile. Para futuras investigaciones, se recomienda lo siguiente: Incrementar las estaciones hidrográficas (CTD), principalmente en los sectores donde hay ríos (generación de frentes), Generar una base de datos climatológicos más rigurosa y detallada (por ejemplo, presión atmosférica, dirección y velocidad del viento) y utilizar otras variables, tales como la concentración de clorofila e índice de surgencia, entre otras, con el fin de mejorar la comprensión de las estrategias reproductivas usadas por estas especies, a través de GAM. Utilizar la misma metodología (GAM) para las salidas de las simulaciones, como método de validación.



**Figura 4.43.** Esquema de las interacciones entre el hábitat y la densidad de huevos de sardina común.



#### 4.5 REFERENCIAS

- Alvera-Azcárate, A., A. Barth, J.M. Beckers & R.H. Weisberg. 2007. Multivariate reconstruction of missing data in sea surface temperature, chlorophyll, and wind satellite fields. *J. Geophys. Res.*, 112: 11 pp.
- Agenbag GJJ., A.J. Richardson, H. Demarcq, P. Fréon, S. Weeks & FA. Shillington. 2003. Estimating environmental preferences of South African pelagic fish species using catch size and remote sensing data. *Prog. Oceanog.* 59: 275 – 300
- Augustin, N., D. Borchers, E. Clarke, S. Buckland & M. Walsh. 1998. Spatio-temporal modelling for the annual egg production method of stock assessment using generalized additive models. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 55, 2608-2621.
- Barth, A., A. Alvera-Azcárate, C. Troupin, M. Ouberdous & J.M. Beckers. 2010. A web interface for gridding arbitrarily distributed in situ data based on Data-Interpolating Variational Analysis (DIVA). *Advances in Geosciences*. 28: 29-37. doi: 10.5194/adgeo-28-29-2010 <http://www.adv-geosci.net/28/29/2010/adgeo-28-29-2010.html>.
- Bernal, M. 1999. Preliminary results on a two stage modeling of sardine egg presence and abundance off the Spanish coast and its implication for stock assessment. WD ICES WGMHMSA, Copenhagen 9/1999.
- Borchers, D., S. Wood, Y. Stratoudakis, P. Lopes, M. Bernal, A. Lago de Lanzós & A. Uriarte. 1999. Using environmental variables with improved DEPM methods to consolidate the series of sardine and anchovy estimates. Final Report. EC Project No: 99/080.
- Castro, L., R. Quiñones, H. Arancibia, D. Figueroa, R. Roa, M. Sobrazo & M. Retamal. 1997. Áreas de desove de anchoveta y sardina común en la zona central. Informe Técnico FIP-IT/96-11, 115pp.
- Correa-Ramirez, M.A., S.E. Hormazabal & C.E. Morales. 2012. Spatial patterns of annual and interannual surface chlorophyll-a variability in the Peru-Chile system. *Prog. Oceanogr.*, 92-95: 8 17.
- Cubillos, L. & D. Arcos. 2002. Recruitment of common sardine (*Strangomera bentincki*) and anchovy (*Engraulis ringens*) of central-south Chile in the 1990s and the impact of the 1997-1998 El Niño. *Aquatic Living Resources*. 15: 87-94.
- Cubillos, L., D. Bucarey & M. Canales. 2002. Monthly abundante estimation for common sardine *Strangomera bentincki* and anchovy *Engraulis ringens* in the central-southern area off Chile (34-40°S). *Fisheries Research*. 57: 117-130.
- Cubillos, L., L. Castro & C. Oyarzún. 2005. Evaluación de stock desovante de anchoveta y sardina común entre la V y X Regiones, año 2004, Informe Técnico FIP-IT/2004-03, 130pp.
- Cubillos, L., L. Castro, G. Claramunt & C. Oyarzún C. 2006. Evaluación de stock desovante de anchoveta y sardina común entre la V y X Regiones, año 2005, Informe Técnico FIP-IT/2005-02, 147pp.
- Cubillos, L., L. Castro, G. Claramunt & C. Oyarzún. 2008. Evaluacion de stock desovante de anchoveta y sardina comun entre la V y X Regiones, ano 2007. Informe Final FIP2007-06.
- Cubillos, L., L. Castro & G. Claramunt. 2011. Evaluación de stock desovante de anchoveta y sardina común entre la V y X Regiones, año 2010. Informe Final FIP2010-02.
- Escribano, R., R. Venegas, J. Pizarro & G. Claramunt. 1996. Tasa de desarrollo temperatura-dependiente de huevos de “Anchoveta” *Engraulis ringens* en el norte de Chile, *Estud. Oceanol.* 15:39-46.

- Fuiman, L., & R. Werner. 2002. Fishery Science: The unique contributions of early life stages. First published by Blackwell Science Ltd.. USA. 326pp.
- Hormazábal, S., G. Shaffer & O. Leth. 2004. Coastal transition zone off Chile. *J. Geophys. Res.*, 109: 13 pp.
- Montecinos, A. & F. Gómez. 2010. ENSO modulation of the upwelling season off southern central Chile. *Geophys. Res. Lett.*, 37: 4 pp.
- Lloret, J., I. Palomera, J. Salat & I. Sole. 2004. Impact of freshwater input and wind on wind on landings of anchovy (*Engraulis encrasicolus*) and sardine (*Sardina pilchardus*) in shelf waters surrounding the Ebre (Ebro) River delta (north-western Mediterranean). *Fisheries Oceanography*, 13(2): 102-110.
- Perry, R.I., & S.J. Smith. 1994. Identifying habitat associations of marine fishes using survey data: an application to the Northwest Atlantic, *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 51: 589–602.
- Rodríguez-Graña, L. & L. Castro. 2003. Ichthyoplankton distribution off the Peninsula de Mejillones, Chile (23°S, 71°W), under variable hydrographic conditions during the austral summer and winter of the 1997 El Niño. *Hydrobiologia*. 501:59-73.
- Sepúlveda, A., P. Ruiz, R. Alarcón, S. Núñez, R. Bahamonde, J. Córdova, J. Chong, R. Rebolledo, M. Aguayo & L. Bustos. 2009. Condición biológica de jurel en alta mar, año 2006. Informe Técnico FIP 2006-05, 291pp.
- Soto-Mendoza, S., C. Parada, L. Castro, F. Colas, W. Schneider. 2012. Modeling transport and survival of anchoveta eggs and yolk-sac larvae in the coastal zone off central-southern Chile: Assessing spatial and temporal spawning parameters. *Progress in Oceanography*, 92- 95:178-191.
- Stratoudakis, Y., M. Bernal & M.F. Borchers. 2003. Changes in the distribution of sardine eggs and larvae off Portugal, 1985-2000. *Fisheries Oceanography*, 12:49-60.
- Stratoudakis, Y., M. Bernal, K. Ganas & A. Uriarte. 2006. The daily egg production method: recent advances, current applications and future challenges. *Fish Fisheries*. Volume 7 Page 35.
- SUBPESCA, 2002. Sardina Común (*Strangomera bentincki*) Ficha pesquera N°2. Sardina común – Noviembre 2002. 3pp
- Troupin, C., F. Machín, M. Ouberdous, D. Sirjacobs, A. Barth & J.-M. Beckers. 2010. High-resolution Climatology of the North-East Atlantic using Data-Interpolating Variational Analysis (Diva). *Journal of Geophysical Research*. 115: C08005. doi: 10.1029/2009JC005512. <http://www.agu.org/pubs/crossref/2010/2009JC005512.shtml>
- Tyberghein, L., H. Verbruggen, P. Klaas, C. Troupin, F. Mineur, & O.D. Clerck. 2011. ORACLE: a global environmental dataset for marine species distribution modeling *Global Ecology and Biogeography*. doi: 10.1111/j.1466-8238.2011.00656.x. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1466-8238.2011.00656.x/pdf>.
- Werdell, J. 2009. Global bio-optical algorithms for ocean color satellite applications: inherent optical properties algorithm workshop at ocean optics XIX; Barga, Italy, 3-4 October 2008. *Eos, Trans. Am. Geophys. Union*, 90(1): 4 pp.
- Wood, S.N. 2003. Thin plate regression splines. *Journal of the Royal Statistical Society (B)* 62: 95-114.

## CAPITULO 5. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y DESARROLLO DE MODELO CONCEPTUAL

### 5.1. INTRODUCCIÓN

El cuadro de alta incertidumbre en las biomásas y niveles de explotación permisible de especies pelágicas pequeñas en Chile, está determinado por la alta variabilidad en los cambios de abundancia y las características de la explotación de estos recursos, basados que en los pulsos de reclutamiento, y en capturas con un alto porcentaje de reclutas. Las herramientas de mayor aplicación para asesorar a los administradores de estas pesquerías se han basado en los resultados de modelos de evaluación de stock (biomásas totales, biomásas vulnerables, reclutamientos y mortalidad por pesca), los cuales corresponden a modelos del tipo estadísticos edad y tallas estructurados y que asumen error de observación. Estos esquemas entregan información fundamental para la administración y constantemente presentan su mayor fuente de incertidumbre en variables de estado como el “reclutamiento”. La posibilidad de disponer de indicadores de reclutamiento independiente a la pesquería, genera una fuente de información complementaria para el establecimiento del estatus de la población.

En el presente capítulo, se realiza una revisión bibliográfica enfocada a las diferentes formas modelación de sistemas complejos y la viabilidad de incorporar proxies ambientales o índices de reclutamiento en un esquema de evaluación de stock. Luego, se plantea un modelo conceptual soportado en las diferentes piezas de conocimiento disponibles para la población de sardina común, complementados y analizados en el contexto de los resultados de la modelación biofísica del proyecto.

### 5.2. REVISIÓN DE METODOLOGÍAS PARA LA MODELACIÓN DE SISTEMAS ECOLÓGICOS

El apoyo científico tradicional hacia el manejo involucra el entendimiento del estatus de los recursos y el desarrollo de acciones asumiendo que la evaluación de éste estatus es consistente con la condición de la población en la naturaleza, ignorando muchas veces niveles de incerteza asociados ([A'mar, 2009](#)). Existen numerosas fuentes de error e incerteza asociadas a nuestro conocimiento de la dinámica poblacional de una especie relacionada por ejemplo con la variabilidad ambiental, cambio de los ecosistemas y cambios de régimen ([MacCall, 2002](#)). Numerosos estudios han identificado que cambios en variables meteorológicas, climáticas, oceanográficas y biológicas asociados a la historia de vida temprana afectan el reclutamiento de peces ([Heath 1992](#); [Bakun 1996](#)). Sin embargo, ha existido una escasa aplicación de estas variables en forma operacional a las predicciones de reclutamiento y biomasa desovante generadas desde los modelos de evaluación de stock ([Planque et al., 2003](#), [Mackenzie et al., 2008](#)).

Un nivel de complejidad mayor, tanto en la estructura de los modelos como en la disponibilidad de información ha sido aplicada por ejemplo por [Fulton et al. \(2007\)](#) y [Smith et al. \(2007\)](#) en el sur de Australia. En este esquema de modelación de evaluación de estrategias de manejo, se evalúan componentes biofísicos, ecosistémicos, pesqueros y económicos a distintas escalas espaciales y temporales. [Plagányi \(2007\)](#), realiza una revisión de varios enfoques de modelación, resaltando las características particulares de estos modelos y su relevancia en relación al enfoque ecosistémico hacia las pesquerías (“Ecosystem Approach to Fisheries, EAF”), los modelos discutidos incluyen: modelos

dinámicos para todo el ecosistema, modelos realistas mínimos, modelos individuo-basados y modelos bioenergéticos. En el esquema de modelación inicial, la clasificación de las variables ambientales establece que estos afectan al reclutamiento en diversos niveles: individual, poblacional y a nivel comunitario. Fry (1947) califica los factores ambientales de acuerdo a sus efectos en el metabolismo, en efectos de control, letal, limitante, de enmascaramiento y directivos. Estudios basados en estos conceptos han conducido a evaluar la relación stock-recluta (S-R) de modelos tipo Cushing, Ricker y Beverton-Holt incorporando variables ambientales que conducen efectos de control, limitantes y de enmascaramiento, de manera de reducir la variabilidad inexplicada y mejorar la estimación de reclutamiento (Neil *et al.*, 2003). La principal proxy ambiental ha sido la temperatura (McCaan *et al.*, 2002; Koster *et al.*, 2003), no obstante surge la pregunta referida a cuales son las variables biofísicas que permitirían mejorar las predicciones provenientes de los modelos de evaluación de stock (Brander *et al.*, 2003), esto considerando que son variados los procesos que afectan el reclutamiento y abundancia de los recursos pesqueros, y se tiene tanto procesos biológicos (alimento y predación) como físicos. Por ejemplo, la predación contribuye significativamente a la mortalidad natural de los individuos juveniles y presenta una alta variabilidad interanual (Pope, 1991), otro proceso relevante es la alimentación de los individuos pre-reclutas considerados como un factor preponderante para el éxito de las clases anuales (Hjort, 1914), donde las estrategias reproductivas de las poblaciones pelágicas estarían sincronizadas temporalmente con el momento de máxima producción (Cushing, 1975). Otro factor importante es la regulación del reclutamiento por medio de forzantes físicas, que afectan a los primeros estados de desarrollo, y ha sido ampliamente discutida (Heath, 1992). Algunos autores proponen que los procesos físicos predominan por sobre los procesos trofodinámicos en la selección de la estrategia reproductiva que controla la biología de una población (Iles & Sinclair, 1982; Sinclair, 1988). Desde esta perspectiva, la mantención de la integridad espacial de cualquier población marina es considerada el factor más importante para su continuidad en el tiempo, así la temporada de desove debe coincidir con procesos físicos que aseguren el transporte hacia y la retención en zonas favorables para el desarrollo, más que a características de producción biológica. Sin embargo, existe evidencia en literatura que tanto procesos de dispersión, como procesos ligados al alimento pueden tener influencia en la sobrevivencia de las clases anuales (Heath, 1992).

### 5.2.1. Tipos de Modelos aplicables a la población de sardina común

La problemática relacionada con los cambios de abundancia y fuerza de los reclutamientos en sardina común, se aborda en este proyecto por medio de una modelación de tipo biofísica. Ahora, existen diferentes tipos de modelos con estas consideraciones y a continuación de listan los principales tipos de modelos y se presenta un diagrama donde se resumen las características y asociaciones entre las diferentes aproximaciones revisadas (Figura 5.1).

#### 5.2.1.1. Clasificación de Modelos

- Modelos Ecosistémicos amplios: modelos que intentan considerar todos los niveles tróficos del ecosistema (Tabla 5.1).
- Modelos Realistas Mínimos (MRM): limitado número de especies con importantes interacciones con la(s) especie(s) objetivo(s) de interés (Tabla 5.2).
- Modelos de Sistema Dinámico (Biophysical): representa ambos bottom-up (físicas) y top-down (biológicas) forzantes interactúan en el ecosistema (Tabla 5.3).
- Extensión de Modelos de Evaluación Mono-específicos (ESAM): corresponde a expansión de modelos mono-específicos y considera sólo una leve adicional interacción mono-específica (Tabla 5.4).

**Tabla 5.1.** Modelos ecosistémicos amplios (“Whole ecosystem models”).

| Modelo   | Nombre                                 |
|--|--|
| EwE and ECOSPACE   | Ecopath with Ecosim                    |
| ATLANTIS   | ATLANTIS                               |
| IGBEM  | Integrated Generic Bay Ecosystem Model |
| INVITRO  | INVITRO                                |
| GEEM   | General Equilibrium Ecosystem Model    |
| Modelos basado en Plankton (“Plankton focus (NPZ-fish)”) |  |
| Modelo   | Nombre                                 |
| ERSEM II   | European Regional Seas Ecosystem Model |
| SSEM   | Shallow Seas Ecological Model          |

**Tabla 5.2.** Modelos realistas mínimos (“Minimum Realistic Models “).

| Modelo                                  | Nombre   |
|---|--|
| MRM                                     | Minimally Realistic Models   |
| GADGET                                  | Globally applicable Area Disaggregated General Ecosystem Toolbox   |
| BORMICON                                | BOReal Migration and Consumption model   |
| MULTSPEC                                | Multi-species model for the Barents Sea<br>Simplified version is AGGMULT which is also connected to a ECONMULT - a model describing the economies of the fishing fleet |
| MSVPA and MSFOR<br>(and derivatives)    | Multi-species Virtual Population Analysis;<br>Multi-species Forecasting Model  |
| MSM                                     | Multi-species Statistical Model  |
| IBM                                     | Individual-Based Models  |
| Bioenergetic/allometric                 | e.g. <a href="#">Koen-Alonso &amp; Yodzis (2005)</a>   |
| Modelos Antárticos (“Antarctic Models”) |  |
| Modelo                                  | Nombre   |
| FOOSA                                   | Previously KPFM (Krill- Predator-Fishery Model)  |
| SMOM                                    | Spatial Multi-species Operating Model  |
| EPOC                                    | Ecosystem Productivity Ocean Climate model   |

**Tabla 5.3.** Modelos de sistemas dinámicos (“Dynamic System Models”)

| Modelo   | Nombre   |
|----------|--|
| SEAPODYM | Spatial Ecosystem and Population Dynamics Model            |
| OSMOSE   | Object-oriented Simulator of Marine ecOSystem Exploitation |
| SystMod  | System Model for the Norwegian and Barents Sea             |

**Tabla 5.4.** Modelos monoespecíficos extendidos (“Extended Single-Species Models”).

| Modelo  | Nombre  |
|---------|---|
| ESAM    | Extended Single-Species Models e.g. Livingston and Methot 1998; Hollowed et al. 2000; Tjelmeland and Lindstrøm 2005 |
| SEASTAR | Stock Estimation with Adjustable Survey observation model and TAg-Return data                                       |

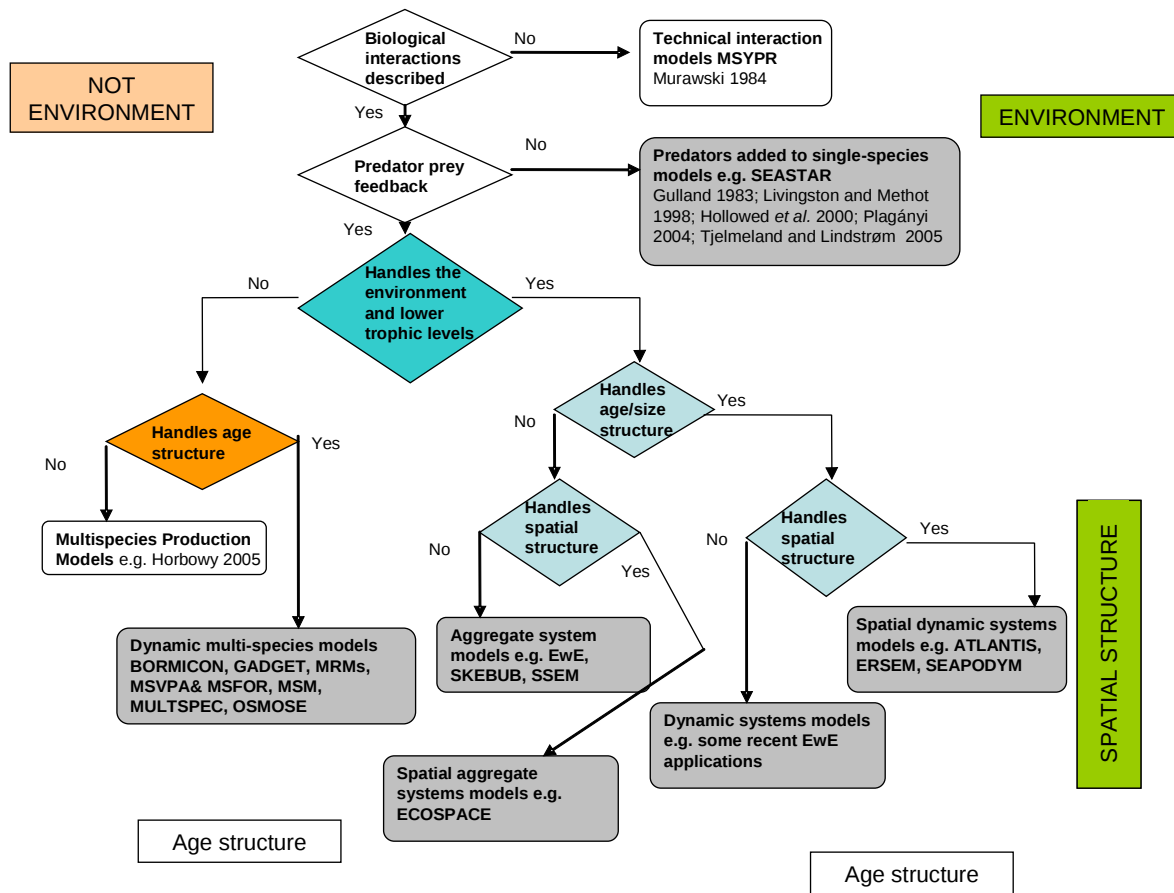


Figura 5.1. Diagrama modificado y actualizado a partir de [Hollowed et al. \(2000\)](#).

### 5.3. PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA REDUCCIÓN DE INCERTIDUMBRE EN LA DINÁMICA POBLACIONAL DE LA SARDINA COMÚN.

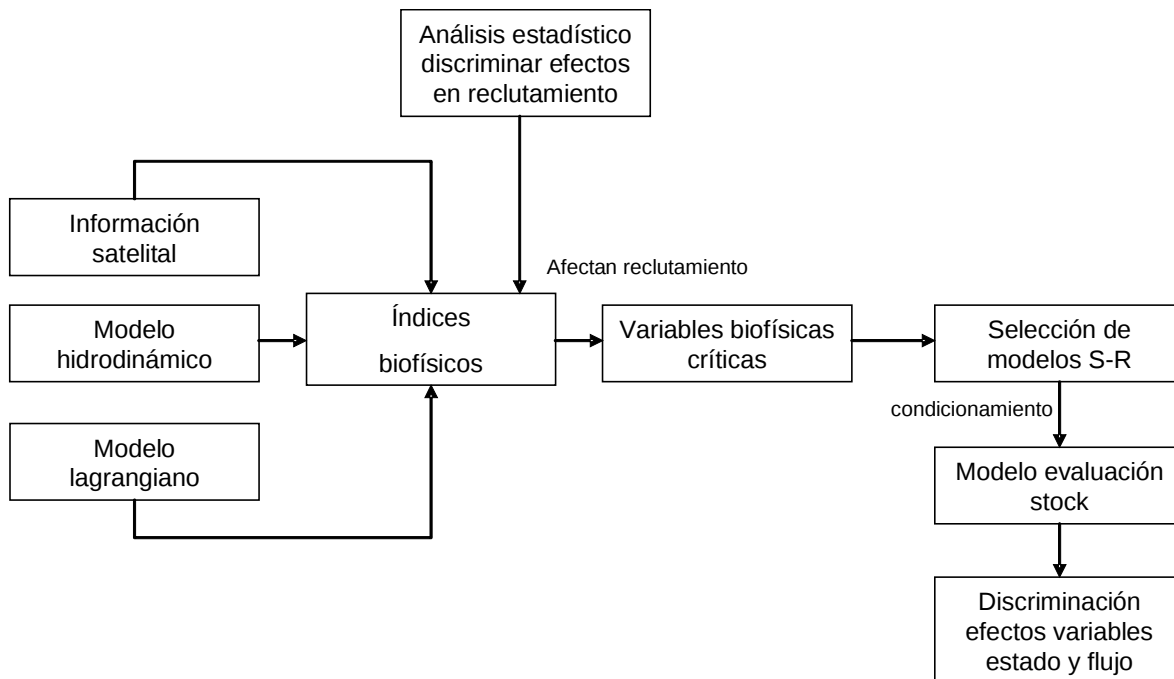
En Chile la pesquería basada en especie pelágicas como *Strangomera bentincki* y *Engraulis ringens* constituyen un importante recurso y generan desde años una considerable actividad económica, la cual se encuentra sostenida básicamente en el ingreso anual de individuos a la población (“reclutas”). La explotación de estas especies se regula por medio de la aplicación de cuotas anuales de captura las cuales se basan en la condición del stock y para lo cual se aplican modelos de evaluación de stock de diferente nivel de complejidad y sustentados en las fuentes de información y conocimiento de la dinámica de la población.

El objetivo general de la incorporación de proxies en los modelos de estimación de la dinámica poblacional de la sardina común para reducir incertezas en las estimaciones de variables de flujo y estado, reconociéndose como relevantes: i) reclutamiento, ii) biomasa vulnerable, iii) biomasa desovante entre otras. Un marco general para la integración de series de tiempos ambientales en un modelo de evaluación de stock, viene dado por [Maunder & Walters \(2003\)](#). En este estudio se indica que análisis del tipo estadístico de captura a la edad ([Fournier & Archibald, 1982](#); [Methot, 1990](#)) son más apropiados para incluir relaciones entre la variable ambiental y la dinámica de una población,

donde métodos estadísticos robustos (máxima verosimilitud) donde la estimación de parámetros es simultánea para obtener el mejor ajuste entre la información observada y predicha, condición que permite la incorporación de múltiples set de datos y la integración de series ambientales en el modelo de evaluación de stock ([Maunder & Walters, 2002](#)). En el esquema señalado se presentan dos aproximaciones, la primera corresponde a incorporar la variable en el proceso de estimación del modelo, siendo por ejemplo el reclutamiento proporcional a la variable ambiental, mientras que la segunda aproximación denominada tradicional se correlacionan las estimaciones del modelo con las variables fuera del proceso de estimación de forma externa (Figura 5.2).

Se analizarán casos de la relación stock-recluta de especies de pelágicos pequeños en la región del Pacífico Sur oriental, incorporando información ambiental que sea sensible al reclutamiento (exploración y búsqueda de patrones). Esta metodología debería permitir simultáneamente discriminar entre el efecto de la biomasa desovante y efectos ambientales (a la forma de indicadores biofísicos seleccionados, reduciendo la variabilidad no explicada y mejorando el entendimiento de la dinámica del reclutamiento). Básicamente, se realizará la inclusión de variables biofísicas exploradas que resulten significativas como determinantes del reclutamiento. Luego, implementarán modelos de relación stock-recluta especie específico, que incorporen de manera explícita la heterogeneidad ambiental, considerando relaciones causales ya identificadas entre los niveles de reclutamiento y factores ambientales.

El principal objetivo que se busca en la incorporación de variables es mejorar el desempeño en términos de precisión y utilidad, de las proyecciones de reclutamiento y la dinámica poblacional que determinan en el mediano-plazo ([Needle et al., 2003](#)).



**Figura 5.2.** Diagrama del esquema metodológico implementado para incorporar las variables ambientales que afectan significativamente al reclutamiento (ejemplo para pequeños pelágicos) y para establecer los modelos de evaluación de recursos con/sin variables biofísicas.



## 5.4. PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA INCORPORACIÓN Y VALIDACIÓN DE ÍNDICES.

El desarrollo de un modelo conceptual, además de basarse en literatura actualizada busca avanzar en un esquema de “validación” de los índices generados. El (los) índices biofísicos provenientes de la modelación biofísica (ver Capítulo 2, son contrastados para su validación con índices de reclutamiento disponibles para la sardina común. Los índices a utilizar son 3:

- a) Índice de las capturas (IC): Este índice es generado a partir de las estructura de tamaños proveniente de la actividad pesquera, y donde se cuantifica la proporción de reclutas en las capturas. Las escalas temporales generadas son de escala mensual y anual y son de fácil obtención.

Índice de reclutamiento ([Santojani et al., 2003](#)):

$$R_y = \sum_{mes} P_{mes} \frac{\sum_{puerto} C}{\sum_{puerto} f} \frac{1}{W_{mes}} \quad (1)$$

$R_y$  = Índice de reclutamiento anual.

$P_{mes}$  = Proporción mensual reclutas en las capturas.

$W_{mes}$  = Peso medio en las capturas.

- b) Índice reclutamiento desde la acústica (IA)

- c) Índice Indirecto de la evaluación de stock (IEA)

### 5.4.1. Validación de índices

La metodología sugerida se basa en el trabajo de [Maunder & Starr \(2001\)](#). Bajo este esquema se evalúa la significancia de la correlación entre el proceso poblacional y la serie de tiempo ambiental. Esta evaluación es realizada fuera del proceso de estimación de forma independiente.

Un enfoque es incluir una estructura adicional a cada parámetro del modelo de evaluación de stock ( $X$ ) para el cual trabaja como hipótesis la existencia de: 1) una variación temporal, 2) estar correlacionado con una serie (s) temporal de variable ambiental, y 3) poseer suficiente información para ser estimado en diferentes períodos.

La estructura incluye un valor medio para el parámetro del modelo de evaluación de stock ( $\mu$ ), desviación temporal ( $\varepsilon_t$ ), un parámetro que relaciona la serie ambiental ( $\beta$ ) y un parámetro de escala ( $\alpha$ ).

$$X_t = \mu \exp(\alpha + \beta I_t + \varepsilon_t) \quad (2)$$

Donde  $t$  = tiempo, y  $I_t$  = el valor de la variable ambiental al tiempo  $t$ .

De esta forma,  $\alpha$  remueve el sesgo log normal y el sesgo causado por un ambiente no normalizado y definido como:

$$\alpha = \ln \frac{n}{\sum_{t=1}^n \exp(\varepsilon_t + \beta I_t)} \quad (3)$$

Donde  $n$  es el número de períodos de tiempo.

Esquemas metodológicos como el señalado forman parte de los métodos para la incorporación de variables a los modelos de evaluación de stock, siendo esquemas como el señalado los que serán revisados y discutidos para la fase de desarrollar un “modelo conceptual” donde se haga incorporación de Proxy desde modelos biofísicos a la evaluación de stock.

En el mismo trabajo de [Maunder & Walters \(2002\)](#), se detallan el esquema de dinámica poblacional aplicado a un modelo de simulación. Esto es:

#### 5.4.2. Descriptor del simulador y estimador

Este modelo simulador y estimador es iniciado a partir de una condición sin explotación.

Dinámica

$$N_{y,1} = R_0 \exp(\beta I_y + \varepsilon_y^R + \alpha) \quad (4)$$

$$\alpha = \ln \left( \frac{n}{\sum_{y=1}^n \exp(\varepsilon_y^R + \beta I_y)} \right) \quad (5)$$

$$N_{y,a} = (N_{y-1,a-1} (1 - \mu_{y-1} s_{a-1})) \exp^{-M_{a-1}} \quad \text{para } a < A \quad (6)$$

$$N_{y,A} = (N_{y-1,A-1} (1 - \mu_{y-1} s_{A-1})) \exp^{-M_{A-1}} + (N_{y-1,A} (1 - \mu_{y-1} s_A)) \exp^{-M_A} \quad (7)$$

$$\mu = \frac{C_y}{B_y} \quad (8)$$

$$B_y = \sum_a N_{y,a} s_a w_a \quad (9)$$

Donde:

$N_{y,a}$  = el número en la clase de edad  $a$  al comienzo del año  $y$ ;

$R_0$  = reclutamiento promedio;

$\varepsilon_y^R$  = anomalía del reclutamiento para el año  $y$ ;

- $\sigma_R^2$  = la desviación estándar para la anomalía del reclutamiento;  
 $M_a$  = tasa de mortalidad natural edad específica;  
 $A$  = máxima edad utilizada en el análisis;  
 $\mu_y$  = tasa de explotación en el año  $y$  ;  
 $s_a$  = la selectividad para el arte de pesca del individuo de edad  $a$  ;  
 $C_y$  = captura total en peso para el año  $y$  ;  
 $B_y$  = la biomasa explotable para el año  $y$  ; y  
 $w_a$  = el peso del individuo a la edad  $a$  ;

Dinámica

$$N_{1,a} = R_0 \exp\left(-\sum_{i=1}^{a-1} M_i\right) \quad \text{para } 1 < a < A \quad (10)$$

### 5.4.3. Consideraciones ambientales

El submodelo de reclutamiento ambiental utilizado en el análisis es sencillo, y otros submodelos pueden mejorar el ajuste a los datos y la habilidad explicativa de las series de tiempo ambientales. Una relación tipo domo ha sido observada entre la abundancia de larvas de atunes y SST ([Forsberg, 1989](#)), indicando que un submodelo de polinomio de cuarto grado o superior puede ser mas apropiado.

$$N_{1,a} = \exp(\alpha + \beta_1 I_t + \beta_2 I_t^2 + \dots + \beta_n I_t^n + \varepsilon_t) \quad (11)$$

Modelo de cambio de régimen ([Granger, 1993](#)) que presentan la habilidad de favorecer dos niveles de valores que serian más apropiados para especies que son hipotetizadas que experimentan dos cambios de régimen.

$$X_t = \left\{ (ub - lb) \left[ 1 + \exp\left(-\ln(19) \frac{I_t - I_{50}}{I_{95} - I_{50}}\right) \right]^{-1} + lb \right\} \exp(\varepsilon_t) \quad (12)$$

Si  $I_{95}$  es sólo ligeramente mayor que  $I_{50}$ , el modelo tendrá dos regimenes. Por lo tanto, el modelo puede ser simplificado ajustando el  $I_{95}$  como un pequeños valor fijo sobre  $I_{50}$ , permitiendo el uso de un modelo de cambio de régimen que requiere solo la estimación del límite inferior, superior, y el valor de la serie de tiempo en el punto de cambio.

Por otra parte, el trabajo de [Maunder \(1998a\)](#) sugiere aplicar el método de la relación stock-recluta, y el modelo descrito por [Hilborn & Walters \(1992\)](#), el cual podría ser utilizado para integrar un modelo desovante-recluta y la serie ambiental en la evaluación de stock.

$$R_t = f(S_t) \exp(\beta I_t + \varepsilon_t + \alpha) \quad (13)$$

Donde  $f(S_t)$  = la función para la relación stock-recluta, y  $S_t$  = biomasa desovante al tiempo  $t$ .

De esta forma, la ecuación de [Ricker \(1954\)](#) y [Beverton and Holt \(1957\)](#) podría ser:

$$R_t = S_t \exp(a - bS_t) \exp(\beta I_t + \varepsilon_t + \alpha) \quad \text{Ricker} \quad (14)$$

$$R_t = \frac{aS_t}{b + S_t} \exp(\beta I_t + \varepsilon_t + \alpha) \quad \text{Beverton-Holt} \quad (15)$$

Un esquema similar al presentado es desarrollado por [Haltuch et al. \(2009\)](#), con énfasis en la estimación de Puntos Biológicos de Referencia en una ambiente variable, utilizándose simulación para la evaluación de estimadores alternativos, los cuales se diferencian en la forma que la relación S-R es modelada

#### 5.4.4. Modelo de Simulación con variable temporal con curva tipo seno

Un esquema de simulación para evaluar consistencia consiste de 4 pasos ([Punt, 2003a](#)). Primero, un modelo operacional es desarrollado para definir el “verdadero” estado del sistema para los propósitos de la simulación; el modelo operacional provee una población que puede ser muestreada análogamente para coleccionar datos.

### 5.5. MODELO CONCEPTUAL

El modelo conceptual tiene su origen en diferentes estudios previos, al cual se adicionan elementos provenientes de la modelación biofísica del actual proyecto consolidando elementos para la validación de un modelo conceptual para la población de sardina común.

Una de las principales fuentes de información empleada corresponde a los datos e información recopilada de los cruceros acústicos realizados en enero de cada año (crucero de verano), estos aportan información de carácter espacio temporal de indicadores como:

- a) abundancia y biomasa
- b) estructura poblacional
- c) proporción de juveniles.

Por su parte, los “cruceros de invierno-primavera” aportan información relacionada al stock desovante, sobre la base de estos cruceros se ha planteado el siguiente patrón espacio y temporal ([Cubillos et al., 2008](#)).

- a) En enero, la fracción recluta de sardina común y anchoveta tiende a ser más importante entre los 34°30’S (norte de Constitución) y los 37°10’S (Golfo de Arauco), incluyendo el sur de la Isla Mocha.
- b) Al sur de la Isla Mocha (38°20’S) y hasta los 40°S, los ejemplares son de mayor tamaño

corporal y constituyen la fracción adulta de la biomasa.

c) En invierno (agosto-septiembre), no se ha detectado desove en el área comprendida entre los 33°S (Valparaíso) y los 34°S. Las áreas de desove más importantes están localizadas en dos estratos geográficos en el área de estudio; a saber: 34°30'S-37°10'S y 38°S-39°S, siendo el último estrato geográfico el que demuestra una consistente mayor abundancia de huevos ([Castillo-Jordán et al., 2007](#); [Cubillos et al., 2007](#)).

d) En la estructura de tallas en las capturas de la flota del área de Corral no se ha detectado evidencia que la fracción recluta sea importante a lo largo del año, siendo más bien vulnerada la fracción adulta del stock. De esta manera, la longitud media y la fracción juvenil en las capturas sigue el patrón general identificado en los cruceros de evaluación. Esto es, las capturas de la zona norte sustentadas en juveniles y las de la zona sur en la fracción adulta del stock ([Cubillos et al., 2008](#)).

Sobre la base de [Cubillos \(1999\)](#) y [Sepúlveda et al. \(2003\)](#), se plantea el siguiente esquema conceptual para la estructura poblacional de sardina común objeto del presente estudio (Figura 5.3, extraído de [Cubillos et al., 2008](#)).

a) El sistema de bahías de la zona centro-sur al norte del Golfo de Arauco (37°10'S) constituyen áreas de crianza, donde prerreclutas y reclutas menores a seis meses de edad crecen y se desarrollan. Esto es, durante una ventana temporal que va entre el desove y el reclutamiento (Julio a Diciembre).

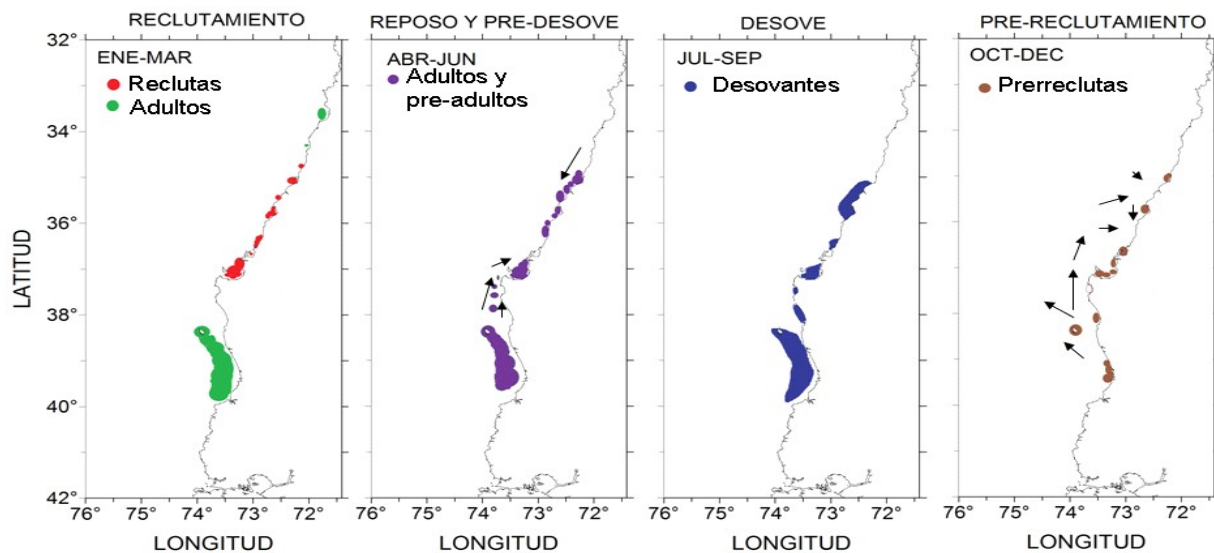
b) En enero, los ejemplares han reclutado con una talla promedio de entre 6 y 7 cm, principalmente al norte del Golfo de Arauco. En esta época, enero-marzo, los adultos (> 11 cm, y de más de un año de edad), tienden a distribuirse preferentemente hacia el norte (Carranza, desembocadura del Itata) y preferentemente al sur de los 38°20'S (sur de la Isla Mocha a Corral).

c) Entre abril y junio, los juveniles originados durante el desove del año anterior comienzan a ser pre-adultos y los adultos comienzan una migración activa para congregarse en agregaciones pre-reproductivas.

d) Durante la transición invierno-primavera (julio-septiembre), la fracción adulta ingresaría a la región más costera (sistemas de bahías) para reproducirse, particularmente porque el área de crianza pasaría a constituirse en un área de desove. De acuerdo con el régimen oceanográfico, durante la transición invierno-primavera (época de desove) ocurriría una alternancia entre convergencias costeras producidas por vientos norte que favorecerían la concentración y retención de huevos en la costa y vientos sur que promoverían el enriquecimiento de las aguas costeras con eventos de surgencia de moderada intensidad ([Cubillos et al., 2001](#)).

e) Bajo este esquema conceptual, el desarrollo de los individuos juveniles que han sido capaces de sobrevivir en las zonas protegidas, al crecer y alcanzar la madurez al término del primer año de vida, cerrarían el ciclo de vida en la época invernal (primer desove). A su vez, al ser más abundantes que los peces de más viejos, contribuirían al desove en las zonas costeras donde fueron criados, transformando la zona de crianza en una zona de desove (particularmente entre Constitución y el Golfo de Arauco).

f) Posteriormente, los individuos que han desovado por primera vez abandonarían las zonas protegidas para distribuirse hacia el norte y sur. En el sector sur, comprendido entre la Isla Mocha y Corral (38°20'S-40°S), los individuos de mayor tamaño localizados en esta área eventualmente podrían desarrollar una migración hacia el norte y hacia la costa.



**Figura 5.3.** Esquema temporal de la distribución de reclutas, adultos en diferentes estados de madurez, y probables zonas de prerreclutas. Las flechas indican probables grados de conectividad asociados con natación activa y ayudada por corrientes (extraído de [Cubillos et al. \(2008\)](#)).

### 5.5.1. Recomendaciones

Los diferentes resultados y herramientas de modelación dada por los modelos de circulación, y biofísico entre otros, plantean la necesidad de validar las hipótesis relativas a la conectividad espacial entre las fracciones de la población que hacen uso del hábitat de manera heterogénea. A saber, el planteamiento se la existencia de una corriente con dirección sur-norte no se sostiene con los diferentes análisis realizados, siendo el proceso de la población mayormente relacionado con una dinámica con interacción temporal del desove y la fracción presente en los ambientes señalados de a) reclutamiento, b) crecimiento/alimentación y d) desove.

Por su parte, se plantea que la zona de desove presenta menor intensidad de reclutamiento por efecto de una ventana temporal de menor extensión que aquellas áreas ubicadas al norte, por su parte la zonas reconocidas como de reclutamiento y crecimiento, no se consolidan con una expresión de adultos y desovantes por efecto de la pesca. Por lo tanto, se recomienda una segunda fase del proyecto que se enfoque directamente en evaluar las hipótesis que se plantean y hacer uso de las herramientas generadas en el proyecto.

En relación a la modelación, se requiere incorporar los indicadores producidos en el estudio en un esquema de dinámica poblacional, probándose formas alternativas para su incorporación. Esta tarea además de orientarse a mejorar en los aspectos de modelación en el sentido de la cuantificación, busca evaluar escenarios favorables o adversos a la especie dadas diferentes condiciones ambientales.

### 5.6. REFERENCIAS

A'mar, Z.T. 2009. A Management Strategy Evaluation of the harvest policies of the North Pacific

- Fishery Management Council used for the fishery for walleye pollock (*Theragra chalcogramma*) in the Gulf of Alaska. PhD dissertation, University of Washington.
- Atkinson, L.P., Valle-Levinson, A., Figueroa, D., De Pol-Holz, R., Gallardo, V.A., Schneider, W., Blanco, J.L., Schmidt, M. 2002. Oceanographic observations in Chilean coastal waters between Valdivia and Concepción. *Journal of Geophysical Research*, 107(C7), 10.1029/2001JC000991.
- Bakun, A. 1996. Patterns in the ocean: ocean processes and marine population dynamics. Cal. Sea Grant System, NOAA and Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, La Paz, BCS Mexico.
- Barría, P., G. Bhöm, A. Aranis, R. Pili, P. Donoso & G.S. Rosales. 1997. Evaluación indirecta y análisis de la variabilidad del crecimiento de sardina común y anchoveta en la zona centro-sur. Informe Final, FIPIT/ 97/10: 250 pp.
- Barría, P., A. Zuleta & R. Gili. 1998. Bases biológicas para prevenir la sobreexplotación de sardina común y anchoveta. Informe Final, FIP-IT/96/12: 84 pp.
- Beverton, R.J.H., S.J. Holt. 1957. On the dynamics of exploited fish populations. *Fish. Invest. Ser. II, Mar. Fish. G.B. Minist. Agric. Fish. Food* 19, 533 p.
- Brander, KM. 2003. What kinds of fish stock predictions do we need and what kinds of information do we need to help us make better predictions? *Scientia Marina*, 67(Supp.1): 21-33.
- Castillo, J., Barbieri, M.A., Espejo, M., Catasti, V., 2000. Evaluación de la biomasa y distribución espacial de anchoveta y sardina común. Primavera 1999. En: FIP 99-13 Evaluación acústica del reclutamiento de anchoveta y sardina común en la zona centro-sur de Chile. Informes Técnicos FIP – IT/99-13, 138 p.
- Castillo, J., Barbieri, M.A., Espejo, M., Catasti, V., 2001. Evaluación acústica del reclutamiento de anchoveta y sardina común en la zona centro-sur, año 2000. Informe Final FIP 2000-09. Informes Técnicos FIP – IT/2000-09, 151 p.
- Castillo, J., Barbieri, M.A., Espejo, M., Saavedra, A. Catasti, V., Núñez, S., Ortiz, J., Barría, P. Arraigada, G., Braun, M., Galindo, G. 2002a. Evaluación Hidroacústica del stock desovante de anchoveta y sardina común, Centro-Sur, 2001 Proyecto FIP N° 2001-14
- Castillo, J., Barbieri, M.A., Espejo, M., Saavedra, A. Catasti, V., Núñez, S., Ortiz, J., Barría, P. Arraigada, G., Braun, M., Galindo, G. 2002b. Evaluación acústica del reclutamiento de anchoveta y sardina común, centro-Sur, 2001-2002 Proyecto FIP N° 2001-13.
- Castillo, J., Saavedra, A., Gávez, P., Barría, P., Espejo, M., Barbieri, M.A.. 2004. Evaluación acústica biomasa, abundancia, distribución espacial y caracterización de cardúmenes. En: Evaluación hidroacústica del reclutamiento de anchoveta y sardina común entre la V y X Regiones, año 2003. Preinforme final FIP 2003-08.
- Castillo J., A. Saavedra, P. Gálvez, M. Espejo, M. Barbieri, S. Nuñez, J. Ortiz, S. Brito, R. Gili, H. Rebolledo, L. Cubillos y L. Bustos. 2005. Evaluación Hidroacústica Reclutamiento anchoveta y sardina común entre V y X Regiones, 2004. Informe Final Proyecto FIP 2004-05. IFOP. 481 pp. +Figuras y Anexos.
- Castillo J., A. Saavedra, Leiva F., S. Núñez, Torres P., Ortiz J., Navarro E., & Molina E. 2006. Evaluación hidroacústica del reclutamiento de anchoveta y sardina común entre la V y X Regiones. Informe de Final Proyecto BIP 30033991-0. 241 pp + Anexos. Inst. Fom. Pesq. Valparaíso, Chile.
- Castillo J., E. Molina, Navarro E., S. Núñez, Reyes M., & Vásquez, S. 2007. Investigación Evaluación hidroacústica reclutamiento de anchoveta y sardina común entre la V y X 2006 - 2007. Informe Final Proyecto BIP 300438961-0. 241 pp + Anexos. Inst. Fom. Pesq. Valparaíso, Chile.
- Castillo, J., E. Molina, F. Leiva, S. Núñez, S. Vásquez, E. Navarro. 2008. Evaluación hidroacústica

- del reclutamiento de anchoveta y sardina común entre la V y X Regiones, año 2008. Informe de Avance proyecto FIP 2007-04, 62 p+anexos Inst. Fom. Pesq. Valparaíso, Chile
- Cubillos, L., Bucarey, D., Canales, M., Sobarzo, M., Vilugrón, L. 1998. Evaluación indirecta del stock de anchoveta y sardina común en la zona centro-sur. Proyecto Fondo de Investigación Pesquera, FIP 1996-10. p 258.
- Cubillos, L. 1999. Estrategia reproductiva, crecimiento y reclutamiento de *Strangomera bentincki* (Normal, 1936) en el sistema de la zona centro-sur de Chile. Tesis Magister en Ciencias (Oceanografía), Escuela de Graduados, Universidad de Concepción, 180 p.
- Cubillos, L.A., Arcos, D.F., Bucarey, D.A., and Canales, M. 2001. Seasonal growth of small pelagic fish off Talcahuano (37°S-73°W), Chile: a consequence of their reproductive strategy to seasonal upwelling?. *Aquatic Living Resources* 14(2): 115-124.
- Cubillos, L.A., Bucarey, D.A., Canales, M., 2002. Monthly abundance estimation for common sardine *Strangomera bentincki* and anchovy *Engraulis ringens* in the central-southern area off Chile (34-40°S). *Fish. Res.* 57, 117-130.
- Cubillos, L., M. Pedraza., C. Gatica., C. Gonzales., P. Ruiz., J. Giacaman., M. Arteaga. 2009. Identificación de indicadores de dinámica poblacional y dinámica de flota que opera sobre sardina común y anchoveta entre la IX y X regiones. Informe Final. FIP 2007-25, 155 p.
- Cushing, D.H. 1975. *Marine ecology and fisheries*. Cambridge University Press.
- Forsbergh, E.D. 1989. The influence of some environmental variables on the apparent abundance of skipjack tuna, *Katsuwonus pelamis*, in the eastern Pacific Ocean. *Inter-Am. Trop. Tuna Comm. Bull.* 19:433-569.
- Fournier, D., C.P. Archibald. 1982. A general theory for analyzing catch at age data. *Can.J.Fish. Aquat. Sci.* 39:1195-1207.
- Fry, F.E.J., 1947. Effects of the environment on animal activity.-*Univ. Toronto Stud., Bioi. Ser.* 55: 1-62.
- Fulton, E.A., Smith, A.D.M., Smith., D.C. 2007. Alternative management strategies for southeast Australian commonwealth fisheries: Stage 2: Quantitative management strategy evaluation. Technical report, CSIRO Marine and Atmospheric Research, Hobart, Tasmania.
- Gulland, J.A. 1983. Species interactions. In J.A. Gulland (ed.). *Fish Stock Assessment: A manual of basic methods*, pp. 186-201. John Wiley and Sons, Chichester: 223 pp.
- Granger, C.W. J. 1993. Forecasting in economics. *In Time series prediction: forecasting the future and understanding the past* (A. E. Weigend and N.A. Gershenfeld, eds.), p. 529-538. SFI Studies in the Sciences of Complexity, Proc. Vol. XV. Addison-Wesley, Boston, MA.
- Haltuch, MA, AE Punt, MW Dorn. 2009. Evaluating the estimation of fishery management reference points in a variable environment. *Fish. Res.* 100:42-56.
- Heath MR. 1992. Field investigations of the early life history stages of marine fish. *Advances in Marine Biology.* 28: 1-174.
- Hollowed, A.B., Ianelli, J.N. and Livingston, P.A. 2000. Including predation mortality in stock assessments: a case study for Gulf of Alaska walleye pollock. *ICES J. Mar. Sci.*, 57: 279-293.
- Hjort, J. 1914. Fluctuations in the year classes of important food fishes. *J. Cons.*, 1: 5-38.
- Horbowy, J. 2005. The dynamics of Baltic fish stocks based on a multi-species stock production model. *J. Appl. Ichthyology*, 21: 198-204.
- Iles, T.D. & Sinclair, M. 1982. Atlantic Herring: Stock discreteness and Abundance. *Science*, 215: 627-633.
- Köster FW, Hinrichsen H-H, Schnack D, St. John MA, MacKenzie BR, Tomkiewicz J, Möllmann C, Kraus G, Plikshs M, Makarchouk A, Aro E. 2003. Recruitment of Baltic cod and sprat stocks:



- identification of critical life stages and incorporation of environmental variability into stock–recruitment relationships. *Scientia Marina*, 67(Supp.1): 129-154.
- Livingston, P.A. and Methot, R.D. 1998. Incorporation of predation into a population assessment model of eastern Bering Sea walleye pollock. *Fishery Stock Assessment Models*, Alaska Sea Grant College Program, AK-SG-98-01.
- MacCall, A. D. 2002. Fishery-management and stock-rebuilding prospects under conditions of low-frequency environmental variability and species interactions. *Bulletin of Marine Science*, 70(2):613–628.
- MacKenzie, B. R., Horbowy, J., Köster, F. W. 2008. Incorporating environmental variability in stock assessment - predicting recruitment, spawner biomass and landings of sprat (*Sprattus sprattus*) in the Baltic Sea. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 65: 1334-1341.
- Maunder, M. N. 1998a. Integration of tagging and population dynamics models in fisheries stock assessment . Ph. D. diss., 306 p. Univ. Washington, Seattle, WA.
- Maunder, M.N., P.J. Starr. 2001. Bayesian assessment of the SNA1 snapper (*Pagrus auratus*) stock of the northeast coast of New Zealand. *N. Z. J. Mar and Freshwater Res.* 35:87-110.
- Maunder, M.N., G.M. Watters. 2003. A general framework for integrating environmental time series into stock assessment models: model description, simulation testing, and example. *Fish. Bull.* 101:89-99.
- Methot, R. D. 1990. Synthesis model: an adaptable framework for analysis of diverse stock assessment data. *Inter. North Pacif. Fish. Comm. Bull.* 50:259-277.
- Murawski, S. A. 1984. Mixed-species yield per recruitment analyses accounting for technological interactions. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 41: 897–916.
- Neil, W.H., J.M. Miller, H.W. Van der Veer, and K.O. Winemiller. 1994. Ecophysiology of marine fish recruitment: A conceptual framework for understanding interannual variability. *Neth. J. Sea Res.* 32:135-152.
- Needle, C.L., C.M. O'Brien, C.D. Darby., M.T. Smith. 2003. Incorporating time-series structure in medium-term recruitment projections. *Sci. Mar.*, 67 (Suppl. 1): 201-209.
- Plagányi, É.E. Models for an ecosystem approach to fisheries. 2007. *FAO Fisheries Technical Paper*. No. 477. Rome, FAO. 108p.
- Plagányi, É.E. 2004. Walking the bridge from single- to multi-species approaches in southern African fisheries management. PhD thesis, University of Cape Town, Rondebosch, South Africa.
- Planque, B., Fox, C., Saunders, MA, Rockett, P. 2003. On the prediction of short term changes in the recruitment of North sea cod (*Gadus morhua*) using statistical temperature forecasts. *Scientia Marina*, 67(Supp.1):211-218.
- Pope, J. G. 1991. The ICES Multispecies Assessment Working Group: Evolution, Insights, and Future Problems. *ICES Marine Science Symposia*, 193: 22–33.
- Punt, A.E., 2003a. Evaluating the efficacy of managing west coast groundfish resources through simulations. *Fish. Bull.* 101:860-873.
- Ricker, W. E. 1954. Stock and recruitment. *J. Fish. Res. Board Can.* 11: 559-623.
- Santojanni, A., Cingolani, N., Arneri, E., Kirkwood, G., Belardinelli, A., Giannetti, G., Colella, S., Donato, F., Barry, C. 2005. Stock assessment of sardine (*Sardina pichardus*, Walb.) in the Adriatic Sea, with an estimate of discards\*. *SCI. MAR.*, 69(4):603-617.
- Sepúlveda, A., Cubillos, L., Arcos, D. 2003. Pesquerías pelágicas chilenas: una síntesis sobre la incertidumbre biológica. In: *Actividad Pesquera y de Acuicultura en Chile*, E. Yáñez (Ed.). Escuela de Ciencias del Mar, UCV, Valparaíso, p. 91 – 107.
- Sinclair, M. 1988. *Marine Populations: an essay on population regulation and speciation*. University of

Washington Press, Seattle, WA.

- Smith, A.D.M., Fulton, E.J., Hobday, A.J., Smith, D.C., Shoulder, P. 2007. Scientific tools to support the practical implementation of ecosystem-based fisheries management. *ICES Journal of Marine Science*, 64(4):633–639.
- Tjelmeland, S. and Lindstrøm, U. 2005. An ecosystem element added to the assessment of Norwegian spring spawning herring: implementing predation by minke whales. *ICES J. Mar. Sci.*, 62: 285-294.

## 6. TALLERES

Para efectos de retroalimentación entre los mandantes y oferentes, y hacia el interior de los grupos de trabajo y los revisores expertos participantes se realizaron 6 talleres:

### 6.1. Taller de coordinación con Subsecretaría de Pesca (SUBPESCA)

El 11 de Septiembre del 2012 a las 10:00 AM se realizó una reunión de coordinación en el marco del proyecto “Estimación de índices de reclutamiento basado en variables y modelos biofísicos de pelágicos pequeños de la zona centro-sur de Chile: Fase 1” organizada por el Sr. José Acevedo coordinador de la SUBPESCA de este proyecto. En ese contexto, se realizó una video conferencia en la sala del piso 14 de la Subsecretaría de Pesca y en la Dirección Zonal de Pesca de la VIII Región.

En esta reunión la Dra. Carolina Parada presentó los objetivos y la metodología a utilizar en el proyecto, el estado de avance de los objetivos hasta ese momento, las dificultades. Se acordaron y discutieron las fechas claves de entrega de informes, talleres y organización de reuniones acordadas.

Los participantes en esta reunión fueron:

- José Acevedo (Subsecretaría de pesca)
- Mario Acevedo (Subsecretaría de pesca)
- Alejandra Ordenes (Subsecretaría de pesca)
- Víctor Espejo (Subsecretaría de pesca)
- Nuria González (Dirección Zonal de Pesca, Concepción)
- Aquiles Sepúlveda (IIP)
- Sergio Núñez (IIP)
- Carolina Parada (IIP)

Los principales acuerdos fueron:

- El 30 de Octubre del 2012 se realizará un Taller de inducción de un día donde Dra. Parada entregarán información acerca de las bases necesarias para realizar modelación biofísica y generar índices biofísicos a partir de modelos hidrodinámicos y biológicos acoplados. Rol de data-monitoreo, de la validación de las herramientas numéricas utilizadas, y su utilización hacia la administración pesquera.
- El taller de difusión final se desarrollará la semana del 3-7 de Diciembre del 2012. Será especificada a la brevedad la fecha de ese taller dependiendo de compromisos previos que se deben definir en la Subsecretaría de Pesca.
- Problemas asociados a la data del FIP solicitada en el marco de este estudio, serán corregidas y obtenida la información faltante mediante la cooperación de profesionales de la Subsecretaría de Pesca.
- Se acordó que la entrega del Informe de Avance se realizaría directamente el día 1 de Octubre del 2012 en la Dirección Zonal de Pesca en Concepción. El profesional de contacto es Nuria González.

### **6.1.2. Taller de revisión y validación del modelo hidrodinámico.**

Este taller fue descrito en el marco del desarrollo de los resultados del Objetivo 1 y material complementario (presentación powerpoint mostrada por Dr. Andrés Sepúlveda) fue incorporado en el Anexo 1. Este objetivo fue alcanzado en esta fase del proyecto.

### **6.1.3. Taller Internacional de Modelación ecosistémica (MSE)**

Se realizó un taller internacional denominado Introduction to Atlantis Modelling: A Marine Ecosystem Model dictado por la Dra. Beth Fulton para ser realizado entre (CSIRO Marine and Atmospheric Research Tasmania, Australia) desde el 13-16 de Agosto de 2012 (incluido el día feriado) en Salón Auditorio- Instituto de Investigación Pesquera, Avda. Colón 2780, Talcahuano - Chile. El curso contó con un cupo limitado de participantes. Detalles de la descripción del curso y fotografías del evento se encuentran en carpeta Anexo 2. Para detalles ver página:<http://www.inpesca.cl/novedades/detalle.php?id=64>

### **6.1.4. Taller de discusión del grupo de trabajo de dinámica poblacional.**

Dada la visita de la Dra. Fulton (CSIRO) a Chile y el apoyo del Dr. Billy Ernst (UDEEC) se realizó un taller de discusión con el fin de abordar el tema de la elaboración de un modelo conceptual que permita la inclusión de resultados provenientes de la modelación biofísica en el ordenamiento pesquero nacional. Se resume los resultados del taller y se adjuntan fotos del desarrollo de la actividad en el Anexo 3.

### **6.1.5. Taller de Inducción de herramientas de modelación biofísica a la subsecretaría de pesca.**

Esta reunión de inducción se realizó en el Hotel Diego de Almagro en Valparaíso en el Salón Tunquen el día 12 de Noviembre desde las 9:30 a las 17:00 hrs. El taller consideró la asistencia de participantes de la subsecretaría de pesca y del Instituto de Fomento Pesquero. El taller estuvo coordinado por el Sr. José Acevedo de la Subsecretaría de Pesca (mandante) y por la Dra. Carolina Parada (oferente). Los expositores fueron el Dr. Andrés Sepúlveda y Carolina Parada. Ver detalle de la agenda y las presentaciones en Anexo 4.

### **6.1.6. Taller de difusión y discusión de resultados finales.**

Esta reunión se desarrolló el 12 febrero del 2013 en las dependencias de la Subsecretaría de pesca (SUBPESCA), Valparaíso, Chile. Se abordaron los resultados finales del proyecto “Estimación de índices de reclutamiento basado en variables y modelos biofísicos de pelágicos pequeños de la zona centro-sur de Chile: Fase 1”. Donde el Dr. Andrés Sepúlveda (UDEEC, anexo 5) presentó la estructura y validación del modelo hidrodinámico, por su parte la Dra. Carolina Parada (INPESCA, anexo 5) presentó los resultados del acoplamiento de los modelos y validación de los Índices de reclutamiento y finalmente el Msc Claudio Gática (INEPSCA, anexo 5) describió el modelo conceptual y aplicación de estos índices en la evaluación de stock.

## **6.2. TRABAJOS PRESENTADOS EN EL PROGRAMA South Pacific Integrated eCcosystem Studies (SPICES) asociados a este proyecto**

- Carolina Parada, Sebastián Vásquez, Héctor Sepúlveda, Samuel Soto, Claudio Gatica, Marcos Arteaga, Samuel Hormazábal. A biophysical model to study the transport of common sardine (*Strangomera bentincki*) off central Chile. Climate Variability and Change on Marine Resources and Fisheries: Toward a South Pacific Integrated Ecosystem Studies Program. Talcahuano, Chile. 7-10 January 2013.

- Héctor H. Sepúlveda, Osvaldo E. Artal Carolina Parada, Sebastián Vásquez, Gonzalo Olivares. Interannual variability of a high resolution ocean model of the south-central coast of Chile. Climate Variability and Change on Marine Resources and Fisheries: Toward a South Pacific Integrated Ecosystem Studies Program (SPICES). Talcahuano, Chile. 7-10 January 2013.

- Marcos Arteaga, Claudio Gatica, Billy Ernst, Sebastián Vásquez. Toward incorporating environmental indicators to the management of small pelagic fishery in central-southern Chile. Climate Variability and Change on Marine Resources and Fisheries: Toward a South Pacific Integrated Ecosystem Studies Program. Talcahuano, Chile. 7-10 January 2013.

- Samuel Soto-Mendoza, Carolina Parada. Characterizing common sardine eggs (*Strangomera bentincki*) habitat in the south-central Chile. Climate Variability and Change on Marine Resources and Fisheries: Toward a South Pacific Integrated Ecosystem Studies Program. Talcahuano, Chile. 7-10 January 2013.

## 7. CONCLUSIONES GENERALES Y RECOMENDACIONES

El presente estudio cumplió con todos los objetivos planteados en la propuesta. Se desarrolló un modelo validado para la región centro-sur de Chile, se acopló a un modelo biofísico de la sardina común. Se generaron índices de reclutamiento espacial y temporal de pre-reclutamiento los que se contrastaron con piezas de información provenientes de las capturas y la evaluación indirecta de la sardina común. Se generó un modelo conceptual que incorpora información acerca de zonas de retención, transporte diferencial hacia zonas sur y norte, identificación de patrones de dispersión fuera de la costa (pérdida de productos reproductivos), así como también se identificó el “atrapamiento” de partículas en remolinos y filamentos muy cercanos a la costa. Se elaboraron dos modelos conceptuales. Un modelo conceptual de la historia temprana de transporte de sardina común, así como un modelo operacional donde se integre la información biofísica en pro de mejorar las estimaciones de reclutamiento con la incorporación de proxies ambientales. Además, se discriminaron forzantes físicos a diferentes escalas y se establecieron relaciones ambiente recurso que potencialmente podrían ser útiles para inicializar los modelos biofísicos para condiciones donde se carece de información realista. Se cubrieron todos los objetivos del proyecto y cada capítulo corresponde a los productos que se generaron del desarrollo de éstos. Además se realizaron 5 talleres de difusión final, interacción con especialistas en modelación hidrodinámica, talleres de inducción de la temática biofísica hacia la subsecretaría de pesca, taller de discusión para la elaboración de un modelo operacional, y finalmente un taller de modelación ecosistémica.

Para efectos de retroalimentación entre los mandantes y oferentes, y hacia el interior de los grupos de trabajo y los revisores expertos participantes se realizó un taller final de discusión de resultados. Los mandantes solicitaron que al final de la propuesta se incorporaran recomendaciones. A continuación se detallan las principales recomendaciones que emanan de este estudio:

### **Bases de datos y accesibilidad de la información.**

Por un lado, el presente proyecto corresponde a un estudio con una alta componente multidisciplinaria. Por el otro, por ser un proyecto de modelación requiere mucha información tanto para validar como para inicializar y parametrizar los modelos. De tal manera, que es clave tener buen acceso a la información de manera oportuna. En este estudio se requirieron 5 bases de datos relacionadas con los cruceros RECLAS, y de MPDH, la data hidrográfica de cruceros de la sardina común y anchoveta como de merluza, así como también la información hidrográfica asociada a los cruceros de merluza. Así mismo, se solicitó la información indicada anteriormente. La información fue proveída eficientemente. Sin embargo, existen claras falencias en la información almacenada e inicialmente proporcionada, falta de datos, inconsistencias en las georeferenciaciones, años no disponibles, ect. Esta información fue solicitada nuevamente a los oferentes de otros proyectos (facilitado eficientemente por profesionales del FIP), pero ese proceso provocó una demora en el desarrollo de nuestro proyecto. Se recomienda que el proceso de revisión y chequeo de la calidad de la data debiera ser un proceso que se desarrolle por fuera de los proyectos de investigación como un protocolo normal y continuo. Idealmente debería estar la información revisada, corregida, disponible e incorporada la información nueva como un proceso regular con un sostenedor del sistema de planta. Data como caudales de ríos, la hidrografía y la

información acústica fue información que fue muy difícil procesar debido a la falta de registros y a los errores o falencias en la georeferenciación de la información. Además, en el marco de los proyectos, la generación de metadata y entrega de esta debería estar asociada a un período más largo de entrega (razonable, por ejemplo 1 mes) que la entrega de los informes finales, ya que la metadata es un producto más valioso que emana de los proyectos (que sirve como base a otras iniciativas), el cual requiere un tiempo considerable para su generación especialmente en el caso de los productos de los modelos.

### **Modelación hidrodinámica**

Se recomienda que se generen nuevas modificaciones a los productos donde se refinan las condiciones de borde del modelo hidrodinámico, y se mejoren los productos de ríos, implementado mejores algoritmos para representar la variabilidad estacional e interanual del caudal.

### **Modelación biofísica y entendimiento de las relaciones ambiente-recurso**

El modelo biofísico implementado es un modelo que incorpora condiciones realistas del desove. A pesar, de que los resultados del modelo biofísico proporcionaron información nueva acerca de patrones de transporte y dispersión que no habían sido documentados, en futuros estudios se requiere incorporar otros componentes biológicos relevantes (en el modelo) que podrían eventualmente mejorar nuestro entendimiento de la historia de vida temprana de sardina común en la región centro-sur. Se recomienda poner énfasis en el entendimiento de los patrones de boyantez de huevos, estudio de patrones verticales de movimiento para diferentes estadios (ejemplo: ecogramas), capacidad de natación, mejorar información de tasas de mortalidad para larvas y juveniles, estudio de la bioenergética de la sardina común, identificación de la dietas de larvas y juveniles, estado de condición a través de indicadores asociado longitud-peso, aminoácido, proteínas entre otros. Esto claramente, requiere un esfuerzo por realizar estudios de campo y toma de datos recurrente para mejorar nuestro entendimiento de la biología de éste recurso y su asociación al ambiente.

### **Modelos de dinámica poblacional e integración como herramienta de administración**

El capítulo de elaboración de un modelo conceptual identifica la necesidad de empujar los modelos de evaluación hacia herramientas que incorporen proxies ambientales. Esto requiere el desarrollo nacional de modelos o la incorporación de algoritmos desarrollados en colaboración con investigadores de centros donde ya se hayan elaborado. Claramente, este desafío constituye un proyecto de investigación por sí mismo que debiese priorizarse. Por otro lado, este estudio proporcionó información valiosa (especialmente explícita) que escapa a la capacidad de los modelos de evaluación para generar información en relación a la historia de vida de los recursos. Se recomienda que se utilice en paralelo (a la evaluación indirecta/directa) el uso de modelos biofísicos como una herramienta de prueba de hipótesis y apoyo en relación a la historia de vida de recursos (distribución, conectividad, dispersión, definición de zonas de crianza y pre-reclutamiento) en forma regular. Obviamente, la pertinencia de su uso se relaciona al alcance de las preguntas científicas. Si se asocian a la historia de vida y al modelo conceptual del recurso, la modelación biofísica constituye una herramienta útil que ciertamente permitiría responder esas preguntas y generar nuevas hipótesis. Como producto de éste estudio se generó un sistema de modelación que se

encuentra preparado para generar proyecciones para el siguiente año, dada la disponibilidad de forzantes del modelo hidrodinámico. De tal manera que sería posible generar una proyección del reclutamiento en Diciembre de cada año y refinarla desde Enero a Abril del año siguiente.

### **Extensión de los proyectos**

Claramente proyectos interdisciplinarios, como este (que involucran el desarrollo de herramientas), requieren un ciclo de financiamiento de más larga duración. Este proyecto que fue planeado en un ciclo de 6 meses claramente requirió una extensión de sus plazos. Al menos, para tener seguridad de lograr objetivos un proyecto de esta naturaleza requiere entre 12 y 18 meses para su ejecución.