

**Instituto de
Investigación
Pesquera**

**Av. Colón 2780,
Casilla 350
Talcahuano
Tel: +56-41-2920410
Fax: +56-41-2920411
inpesca@inpesca.cl
www.inpesca.cl**

INFORME FINAL

FIP N° 2014-35

**“Estimación de índices de
reclutamiento basado en variables y
modelos biofísicos de pelágicos
pequeños de la zona centro-sur de
Chile, Fase II”**

Talcahuano, Septiembre 2017

- TITULO DEL PROYECTO** : Estimación de índices de reclutamiento basado en variables y modelos biofísicos de pelágicos pequeños de la zona centro-sur de Chile, Fase II
- REQUIRENTE** : Consejo de Investigación Pesquera, CIP
Fondo de Investigación Pesquera
Presidente CIP: Pablo Berazaluce Maturana
- UNIDAD EJECUTORA** Departamento de Pesquerías
Instituto de Investigación Pesquera
Director: Aquiles Sepúlveda Oróstica
- JEFE PROYECTO** : Sebastián Vásquez Pastene
Biólogo Marino
Instituto de Investigación Pesquera
Casilla 350, Talcahuano, Chile
Tel.: 56-41-2920410
Fax: 56-41-2920411
E-mail: svasquez@inpesca.cl
-

FIP N° 2014-35

**“ESTIMACIÓN DE ÍNDICES DE RECLUTAMIENTO BASADO EN
VARIABLES Y MODELOS BIOFÍSICOS DE PELÁGICOS
PEQUEÑOS DE LA ZONA CENTRO-SUR DE CHILE, FASE II”**

Jefe Proyecto

Sebastián Vásquez Pastene

AUTORES

Sebastián Vásquez Pastene

Cristian Salas Domínguez

Sergio Núñez Elías

Luis Soto Mardones

Jaime Letelier Pino

Marcos Arteaga Vásquez

Claudio Gatica Molina

Aquiles Sepúlveda Oróstica

Lilian Cisterna Aguayo

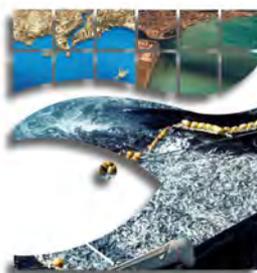
Alexander Gretchina

Nicolás Alegría Landeros

Patric Contreras Acevedo

Andrés Ospina-Álvarez

Talcahuano (Chile), 2017



**Instituto de
Investigación
Pesquera
Octava Región**

INDICE DE CONTENIDOS

INDICE DE CONTENIDOS	1
INDICE DE TABLAS	6
INDICE DE FIGURAS	8
1.- RESUMEN EJECUTIVO	17
2.- DESCRIPCION DE ACTIVIDADES DEL EQUIPO DE TRABAJO	23
3. OBJETIVOS DEL PROYECTO	27
4.- ANTECEDENTES	29
4.1. Antecedentes biológicos y pesqueros de la anchoveta en la zona centro-sur de Chile	29
4.2. Principales procesos oceanográficos asociados a la zona centro-sur de Chile 31	
4.2.1. Antecedentes de los principales procesos oceanográficos asociados a la zona centro-sur de Chile	31
4.2.1.1. Forzamiento atmosférico	32
4.2.1.2. Proceso de surgencia costera	33
4.2.1.3. Variabilidad interanual (eventos ENOS).....	38
4.2.1.4. Estructuras de meso y sub-mesoescala.....	42
4.4. Poblaciones de anchoveta y sardina común como objeto de estudio mediante modelación biofísica	49
5. METODOLOGÍA DE TRABAJO	51
5.1. Esquema de modelación y herramientas utilizadas	51
5.2. Modelo Hidrodinámico	52
5.2.1. <i>Configuración del modelo hidrodinámico ROMS</i>	52
5.2.2. Configuración del MH padre	53
5.2.3. Configuración del MH hijo	56
5.2.4. Descripción de las variables de salida	60
5.2.5. Validación del modelo hidrodinámico	61
5.2.5.1. <i>Validación basada en información satelital</i>	62
5.2.5.2. <i>Validación basada en datos hidrográficos</i>	63
5.2.6. Plataforma computacional para la implementación del modelo ROMS	65

5.3. Modelo de acoplamiento biofísico	67
5.3.1. <i>Variables de estado del modelo biofísico</i>	69
5.3.2. <i>Acoplamiento modelo hidrodinámico a modelo biofísico</i>	69
5.3.3. <i>Compartimentos biológicos y submodelos</i>	69
5.3.3.1. <i>Modelo conceptual y revisión histórica</i>	70
5.3.3.2. <i>Submodelo de movimiento por estadio</i>	71
5.3.3.3. <i>Submodelo de distribución espacial del desove</i>	73
5.3.3.4. <i>Submodelo de sincronización temporal del desove</i>	78
5.3.3.5. <i>Submodelo de crecimiento</i>	81
5.3.3.5.1. <i>Muestreo biológico</i>	83
5.3.3.5.2. <i>Análisis de otolitos</i>	84
5.3.3.5.3. <i>Ajuste modelos de crecimiento</i>	87
5.3.3.6. <i>Submodelo de mortalidad y superindividuo</i>	89
5.3.3.7. <i>Procesos estocásticos</i>	90
5.3.4. <i>Simulaciones y experimentos de simulación</i>	90
5.3.5. <i>Variables de salida y procesos modelados</i>	91
5.3.6. <i>Plataforma computacional para la implementación del modelo biofísico</i>	91
5.4. Índices de reclutamiento a partir de modelación biofísica comparados con índices de reclutamiento provenientes de la evaluación de stock	92
5.4.1 <i>Indicadores de reclutamiento, definición de criterios</i>	92
5.4.2. <i>Indicadores de reclutamiento obtenidos de la modelación biofísica</i>	92
5.4.3. <i>Índices de transporte-advención</i>	94
5.4.4. <i>Índices de sobrevivencia por estadio</i>	94
5.4.5. <i>Piezas de información para contrastar los resultados biofísicos</i>	95
5.4.5.1. <i>Índices de reclutamiento provenientes de la evaluación de stock de anchoveta</i>	95
5.4.5.2. <i>Estimación de un indicador de reclutamiento mensual desde información de las capturas</i>	101
5.4.5.2.1. <i>Descripción del muestreo de frecuencia de tallas</i>	102
5.4.5.3. <i>Índice de reclutamiento obtenido desde cruceros acústicos</i>	110
5.5. Identificación de forzantes biofísicos hacia el transporte y el reclutamiento	110
5.5.1. <i>Datos satelitales</i>	110

5.5.1.1. Temperatura superficial del mar.....	111
5.5.1.2. Viento satelital.....	112
5.5.1.3. Corrientes geostróficas y energía cinética.....	113
5.5.1.4. Clorofila superficial del mar.....	114
5.5.2. Datos de campo	114
5.5.3. Análisis de series de tiempo y frecuencia.....	115
5.5.4. Análisis de los procesos de crecimiento, sobrevivencia y transporte de huevos y larvas.....	116
5.6. Identificación de zonas de crianza obtenidas de la modelación biofísica y comparación con información acústica	119
5.6.1. Información acústica	119
5.6.2. Ordenamiento de la data acústica.....	120
5.6.3. Análisis de la información acústica: obtención de áreas de reclutamiento	120
5.6.4. Comparación de los indicadores de reclutamiento espacial de modelos biofísicos y acústica	122
5.7. Comparación de los Resultados de la fase I y II del proyecto (sardina común y anchoveta)	122
5.7.1. Comparación de las áreas de crianza-reclutamiento	123
5.7.2. Comparación de los patrones de conectividad biofísicos.....	123
5.7.3. Comparación de los índices de reclutamientos temporal biofísicos.....	123
5.8. Modelo conceptual de la historia de vida de anchoveta y sardina común en la zona centro-sur de Chile	124
6.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	125
6.1. Estructura y validación del modelo hidrodinámico	125
6.1.1. Validación interanual por medio del uso de información satelital	125
6.1.2. Validación de la estructura vertical a través del uso de datos in situ	131
6.2. Síntesis de la información biológica que sustenta el sistema de modelación biofísica: Sub-modelos.....	136
6.2.1. <i>Sub-modelo de distribución espacial del desove, generación de drifters</i>	<i>136</i>
6.2.2. <i>Submodelo de sincronización temporal del desove</i>	<i>143</i>
6.2.3. <i>Submodelo de crecimiento.....</i>	<i>145</i>

6.2.3.1. Submodelo de crecimiento temperatura-dependiente	145
6.2.3.2. Submodelo de crecimiento diario basado en el análisis de microincrementos	148
6.2.4. Submodelo de movimiento por estadio	151
6.3. Índices de reclutamiento a partir de la modelación biofísica comparados con índices de reclutamiento provenientes de otras fuentes de información	153
6.3.1. Índices de pre-reclutamiento temporal desde modelación biofísica.....	156
6.3.2. Extensión temporal del pre-reclutamiento desde modelación biofísica	159
6.3.3. Índice de reclutamiento proveniente de la evaluación de stock de anchoveta	160
6.3.4. Índice de reclutamiento proveniente de información de las capturas.....	163
6.3.5. Índice de reclutamiento proveniente de cruceros de evaluación directa	164
6.3.6. Contrastación de índices de reclutamiento biofísico respecto a otros indicadores relevantes.	165
6.4. Identificación de forzantes físicos hacia el reclutamiento de anchoveta	172
6.4.1. Análisis integrado: Síntesis de los principales forzantes relacionados al transporte y dinámica de estadios tempranos de desarrollo de anchoveta en la región costera del centro-sur de Chile.	172
6.4.2. Procesos oceanográficos vinculados a la sobrevivencia de estadios tempranos de anchoveta	175
6.5. Identificación de zonas de crianza/reclutamiento.....	183
6.5.1. Índice de pre-reclutamiento espacial y patrón de transporte	184
6.5.2. Índice de reclutamiento espacial obtenido desde información acústica	190
6.5.3. Análisis comparativo	196
6.6. Comparación de los resultados del presente estudio (anchoveta) respecto a la Fase I (sardina común).....	197
6.7. Modelo conceptual para anchoveta basado en modelación biofísica.....	204
6.7.1. Revisión de metodologías para la modelación de sistemas ecológicos.....	205
6.7.2. Tipos de Modelos aplicables a la población de anchoveta.....	207
6.7.3. Propuesta metodológica para la reducción de incertidumbre en la dinámica poblacional de anchoveta	210
6.7.4. Validación de índices	213
6.7.5. Consideraciones ambientales.....	216

6.7.6. Aplicación del índice biofísico en la evaluación de stock y manejo de recursos	217
6.7.6.1. Sobre la evaluación de stock	217
6.7.6.2. Manejo Pesquero y proyecciones.	218
6.7.7. Modelo conceptual para pequeños pelágicos	219
7. CONCLUSIONES	225
7.1. Modelación Hidrodinámica	225
7.2. Aspectos Oceanográficos	225
7.3. Modelación biofísica	226
8. TALLERES Y REUNIONES	229
9. REFERENCIAS	232
ANEXO I. Variabilidad espacio temporal de las principales variables oceanográficas en la zona de estudio	256
A.1. Climatología mensual de la velocidad del viento satelital	257
A.2. Climatología de Imágenes Satelitales de la Deriva de Ekman	263
A.3. Variabilidad meridional del esfuerzo del viento	269
A.4. Turbulencia estimada de viento satelital	272
A.5. Climatología satelital de la velocidad geostrófica	276
A.6. Climatología de la Energía cinética	279
A.7. Climatología de la TSM satelital	282
A.8. Variabilidad interanual de TSM y clorofila	287
A.9. Frentes costeros de origen térmico y concentración de clorofila	289
A.10. Hidrografía a lo largo de la costa	292
A.10.1. Distribución horizontal en los primeros 50 metros de profundidad	292
A.10.2. Distribución vertical (secciones perpendiculares y paralelas a la costa)	295
Anexo II. Análisis comparativo entre experimentos de transporte pasivo (ETP) y experimentos con comportamiento biológico (ECB) para la distribución espacial de individuos 75 días posterior al desove.	302
ANEXO III. Taller de Difusión y Discusión de resultados, Valparaíso	308
Lista de Participantes en Taller de Difusión FIP 2014-35. Valparaíso	310
ANEXO IV. Taller de Difusión y Discusión de resultados, Talcahuano	311
Lista de Participantes en Taller de Difusión FIP 2014-35. Talcahuano	313

INDICE DE TABLAS

Tabla I. Variabilidad física en Chile centro-sur. Principales forzantes, procesos y escalas.....	48
Tabla II. Herramientas utilizadas en el proceso de modelación biofísica para la obtención de de índices de reclutamiento.....	51
Tabla III. Listado de proyectos que cuentan con datos respecto a la distribución espacial del desove de anchoveta.....	75
Tabla IV. Descripción de los cruceros efectuados para evaluar la zona de desove de anchoveta en el periodo 2002 – 2013 (el proyecto 2014 se encuentra aun en ejecución).....	78
Tabla V. Frecuencias a la talla de individuos juveniles de <i>E. ringens</i> disponibles para este estudio en el Instituto de Investigación Pesquera Talcahuano (n=168).....	84
Tabla VI. Símbolos y definiciones utilizadas para el modelo de evaluación de anchoveta y sardina común.....	97
Tabla VII. Variables y ecuaciones que describen la implementación de modelo de evaluación para sardina común y anchoveta.....	98
Tabla VIII. Especificación función objetivo a ser minimizada sobre la base de las verosimilitudes parciales.....	100
Tabla IX. Resumen semanal desde 1992 a 2012 de muestreos de frecuencia de tallas. Flota artesanal.....	105
Tabla X. Resumen de muestreos semanal desde 1992 a 2012 de frecuencia de tallas. Flota industrial.....	106
Tabla XI. Cobertura temporal de la información de los desembarques por nave y viaje de pesca (para la flota artesanal, no se cuenta con información de los viajes sin pesca).....	109
Tabla XII. Disponibilidad de información climática-oceanográfica para la región centro-sur de Chile.....	110

Tabla XIII. Resumen del GAM que predice la densidad espacio-temporal de huevos de anchoveta en todo el dominio espacial del área de estudio.....138

Tabla XIV. Resultados de la estimación de temporada reproductiva de anchoveta: a , b y c son los parámetros de la función sigmoidea; 25% y 75% representan el inicio y termino de la actividad reproductiva en año biológico (agregar 3 meses para convertir a año calendario). Las columnas en rojo indican los estimados de inicio y término de la modelación biofísica.....144

Tabla XV: Parámetros de crecimiento en longitud para *Engraulis ringens* estimados para 5 modelos diferentes. AIC= índice de Akaike.....150

Tabla XVI. Estadísticas para el modelo lineal generalizado parsimonioso aplicado a los resultados de la modelación biofísica para la variable dependiente reclutamiento respecto a las condiciones iniciales de desove.....180

Tabla XVII. Efecto de la flotabilidad de huevos y la migración vertical de larvas en el transporte horizontal. Modelo GLM parsimonioso, varianza explicada y estadísticos desde una NOVA aplicada a los resultados de modelación biofísica para la variable dependiente distancia de transporte.....183

Tabla XVIII. Efecto de la flotabilidad de huevos y la migración vertical de larvas en el transporte horizontal. Modelo GLM parsimonioso, varianza explicada y estadísticos desde una NOVA aplicada a los resultados de modelación biofísica para la variable dependiente advección costa afuera.....183

Tabla XIX. Análisis comparativo entre los esquemas de modelación de la Fases I y II del presente proyecto.....200

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de trabajo para el estudio de la historia de vida temprana de anchoveta orientado a la dinámica del reclutamiento en la zona centro-sur. e Chile bajo un enfoque de modelación biofísica.....	52
Figura 2. Dominio abarcado por el modelo ROMS. Recuadro color rojo representa el dominio padre con resolución espacial de 10 km, el recuadro azul corresponde al dominio hijo con resolución espacial de ~3 km.....	54
Figura 3. Metodología para generar archivos de entrada en MH “hijo”.....	59
Figura 4. Gráfica del Caudal medio mensual para los ríos presente en dominio “hijo”.....	60
Figura 5: Ubicación de las estaciones oceanográficas asociadas a los diferentes cruceros históricos realizados en Invierno y Verano en la zona costera del centro-sur de Chile.....	65
Figura 6. Diagrama de Cluster INPESCA, 128 procesadores y 48 TB de almacenamiento.....	67
Figura 7. ICHTHYOP, modelo para configurar modelos biofísicos acoplados a modelos hidrodinámicos, http://www.ICHTHYOP.org/). En este sitio se encuentra disponible la documentación y descarga de archivos.....	68
Figura 8. Modelo conceptual del ciclo de vida de pequeños pelágicos en Chile centro sur, desarrollado para sardina común por Cubillos (2000) y utilizado para anchoveta en este estudio.....	71
Figura 9. Otolito izquierdo de anchoveta fijado en portaobjeto con medio montaje Crystal Bond.....	85
Figura 10. Otolito de <i>E. ringens</i> de 9 cm LT, izquierda otolito entero visto a 40x, derecha borde del otolito visto a 400x, se logra identificar claramente los anillos de crecimiento diario.....	86
Figura 11. Otolito de un ejemplar de <i>E. ringens</i> de 5 cm LT y 113 días, otolito entero visto a 40x, se logra identificar claramente los anillos de crecimiento diario.....	86
Figura 12. Otolito de <i>E. ringens</i> de 9 cm LT. Izquierda otolito entero a 40x, derecha centro del otolito visto a 400x, logrando identificar el primordio y los primeros anillos de crecimiento diario.....	87
Figura 13. Ciclo estacional de la anomalía de la temperatura superficial del mar para datos de satélite: a) Pathfinder (panel izquierdo) y modelo ROMS (panel derecho); b) Modis-Aqua (panel izquierdo) y modelo ROMS (panel derecho). Note diferentes barras de color	

para cada panel. La estaciones desde arriba hacia abajo: verano, otoño, invierno, primavera.....126

Figure 14. Varianza explicada para los primeros veinte modos de variabilidad de los componentes principales de la TSM para datos de satélite: a) Pathfinder (rojo) y ROMS (azul); b) Modis-Aqua (rojo) y ROMS (azul).....127

Figura 15. EOF del primer modo de variabilidad de la TSM. Dominio espacial para a) Datos satélite Pathfinder y b) ROMS, c) serie de tiempo 1994 – 2012 para datos de satélite y ROMS, d) significancia de la correlación entre series de tiempo basada en la función de densidad de probabilidad de los coeficientes de correlación cruzada.....128

Figura 16. EOF del primer modo de variabilidad de la TSM. Dominio espacial para a) Datos satélite Modis-Aqua y b) ROMS, c) serie de tiempo 2002 – 2013 para datos de satélite y ROMS, d) significancia de la correlación entre series de tiempo basada en la función de densidad de probabilidad de los coeficientes de correlación cruzada.....129

Figura 17. EOF del segundo modo de variabilidad de la TSM. Dominio espacial para a) Datos satélite Pathfinder y b) ROMS, c) serie de tiempo 1993 – 2012 para datos de satélite y ROMS, d) significancia de la correlación entre series de tiempo basada en la función de densidad de probabilidad de los coeficientes de correlación cruzada.....130

Figura 18. EOF del segundo modo de variabilidad de la TSM. Dominio espacial para a) Datos satélite Modis-Aqua y b) ROMS, c) serie de tiempo 2002 – 2013 para datos de satélite y ROMS, d) significancia de la correlación entre series de tiempo basada en la función de densidad de probabilidad de los coeficientes de correlación cruzada.....130

Figura 19. Diagrama de Taylor para la variable temperatura en invierno a 1, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400 y 500 metros de profundidad. En rojo los valores a diferentes profundidades del modelo ROMS dominio hijo.....131

Figura 20. Diagrama de Taylor para la variable temperatura en verano a 1, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400 y 500 metros de profundidad. En rojo los valores a diferentes profundidades del modelo ROMS dominio hijo.....132

Figura 21. Diagrama de Taylor para la variable salinidad en invierno a 1, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400 y 500 metros de profundidad. En rojo los valores a diferentes profundidades del modelo ROMS dominio hijo.....133

Figura 22. Diagrama de Taylor para la variable salinidad en verano a 1, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400 y 500 metros de profundidad. En rojo los valores a diferentes profundidades del modelo ROMS dominio hijo.....134

Figura 23. Diagrama TS obtenido desde datos oceanográficos CTD (izquierda) y modelo ROMS (derecha) en el área costera centro-sur de Chile, temporada de verano (Enero)....135

Figura 24. Diagrama TS obtenido desde datos oceanográficos CTD (izquierda) y modelo ROMS (derecha) en el área costera centro-sur de Chile, temporada de invierno (Julio Agosto).....	135
Figura 25. Distribución espacial de los desoves de anchoveta en la zona centro-sur de Chile identificados a través de los cruceros MPDH realizados por medio de proyectos del Fondo de Investigación Pesquera.	136
Figura 26. Densidad de huevos de anchoveta observados (verde) y modelado mediante modelos aditivos generalizados (GAM; rojo).	139
Figura 27. Predicción espacial del desove de anchoveta utilizando la temperatura y salinidad como variables predictoras.....	139
Figura 28. Desove observado de anchoveta año 2002 (panel izquierdo); desove modelado de anchoveta año 2002, cada punto corresponde a individuos simulados para la liberación en ICHTHYOP, en colores la batimetría del modelo hidrodinámico.....	141
Figura 29. Distribución latitudinal de los desoves modelados de anchoveta en el periodo 1994-2014 las cajas indican la media (valor central), la desviación estándar (caja), el rango (barras) y los valores atípicos (cruces rojas).....	142
Figura 30. a)Comienzo, máximo y fin de la temporada reproductiva de anchoveta en la zona centro-sur de Chile y regresión lineal para cada serie de tiempo; b) duración de la temporada de desove de la anchoveta calculada como el tiempo transcurrido entre el inicio y el termino estimado.....	145
Figura 31. a)Desarrollo de huevos de anchoveta bajo distinto regímenes de temperatura (modificado de Sepúlveda <i>et al.</i> , 2000); b) curvas de crecimiento temperatura-dependiente para larvas y juveniles de anchoveta (modificado de Llanos-Rivera, 2005).	146
Figura 32. Ejemplo de crecimiento individual temperatura-dependiente para un pulso de desove biofísico de anchoveta realizado el 27/08/1994.....	148
Figura 33. Relación entre longitud horquilla (cm) y el radio del otolito (μm) de <i>E. ringens</i> colectados en la VIII región.	149
Figura 34: Edad en días observadas en larvas y juveniles de <i>E. ringens</i> , individuos de talla inferior a los 3 cm corresponden a datos reportados por Hernández y Castro (2000), y ajuste de cinco modelos probados para describir su crecimiento.....	149
Figura 35. Distribución vertical de larvas de anchoveta desde datos observados (puntos grises) y esquema de migración diurno-nocturna usada en el modelo biofísico (línea roja) para: a) larvas bajo 10 mm de longitud total y b) larvas sobre 10 mm de longitud total....	152

Figura 36. Esquema de movimiento vertical de larvas de anchoveta como resultado de la modelación biofísica. Incluye flotabilidad de huevos y migración diferenciada por edad para larvas y juveniles. El último patrón mostrado se extendió hasta los 20 mm de talla.....	153
Figura 37. Ejemplo de simulación del transporte de individuos desde el 39°S y 73°30'. Los paneles corresponden a resultados rescatados cada 5 días (t). En rojo se observa la posición de cada uno de los 5000 individuos liberados.....	154
Figura 38. Diagrama de distancias de dispersión de estadios tempranos de anchoveta hasta la talla de reclutamiento biofísico (20 mm) obtenidos a través de modelación en el período 1994-2014.....	155
Figura 39. Diagrama de duración larval pelágica para anchoveta en la zona centro-sur de Chile obtenidos a través de modelación biofísica en el período 1994-2014.....	156
Figura 40. Serie temporal de la sobrevivencia de estadios tempranos de anchoveta hasta la talla de 20 mm obtenida mediante un esquema de modelación biofísica en el periodo 1994-2014.....	157
Figura 41. Serie temporal del índice de reclutamiento biofísico proveniente de las temporadas de desove del periodo 2002-2014 (a excepción de 2003 y 2006).....	159
Figura 42. Línea de tiempo de la extensión temporal de los pulsos de pre-reclutas (20 mm) de anchoveta obtenidos desde modelación biofísica periodo 1994-2014.....	160
Figura 43. Información de entrada asociada a la evaluación de stock de anchoveta: a) crucero RECLAS, b) crucero PELACES, c) Captura (ton) y; d) rendimientos (CPUE (t/vcp)).	161
Figura 44. Estimaciones de reclutamiento estimado entre 1991 y 2015 en anchoveta (superior; representa el reclutamiento desde un año calendario), (medio; representa estimación desde año biológico comenzando en Julio a Junio) y (inferior; representa la estimación de reclutas desde año biológico comenzando en Septiembre a Agosto). Línea verde indica el reclutamiento promedio de la serie total. La zona coloreada equivale al intervalo de confianza asintótico, la línea continua representa el estimador central.....	162
Figura 45. Comparación de reclutamientos bajo tres hipótesis de configuración de información de entrada entre 1991 y 2015 anchoveta.....	163
Figura 46. Estimaciones de reclutamiento mensual en anchoveta entre los años 1991 y 2015.....	164
Figura 47. Serie de reclutamiento obtenida por los cruceros acústicos estivales RECLAS en el periodo 2000 - 2015.....	165

- Figura 48. Serie de tiempo de sobrevivencia biofísica (línea sólida negra) contrastada con estimaciones de reclutamiento provenientes de la evaluación de stock de anchoveta (línea sólida gris) bajo las configuraciones: a) año calendario; año biológico Julio-Junio; b) año biológico Agosto-Septiembre.....167
- Figura 49. Serie de tiempo de índice de reclutamiento biofísico (línea sólida negra) contrastada con estimaciones de reclutamiento provenientes de la evaluación de stock de anchoveta (línea sólida gris) bajo las configuraciones: a) año calendario; b) año biológico Julio-Junio; c) año biológico Agosto-Septiembre; además del d) reclutamiento observado por los cruceros de evaluación acústica estival RECLAS y. e) estimación de reclutamiento con información proveniente de las capturas.....169
- Figura 50. Relación entre los procesos advectivos meridionales e interanuales y la sobrevivencia de estadíos tempranos de anchoveta: a) anomalía de la magnitud de biomasa desovante anual; b) serie de tiempo de la sobrevivencia biofísica hacia el reclutamiento, y c) proporción de individuos advectados por año y por celda latitudinal.....177
- Figura 51. Relación entre la retención meridional e interanual y la sobrevivencia de estadíos tempranos de anchoveta: a) señal ecuatorial El Niño 3-4; b) serie de tiempo de la sobrevivencia biofísica hacia el reclutamiento, y c) proporción de individuos retenidos por año y por celda latitudinal.....179
- Figura 52. Efecto de los factores que constituyen condiciones iniciales sobre el éxito del reclutamiento individual. Se muestran los factores estadísticamente significativos.....181
- Figura 53. Distribución espacial de anchovetas de 20 mm de longitud total simulada mediante modelación biofísica para el periodo 1994-2014. La barra de colores inferior corresponde a los años 1998, 2009, 2010, 2011 y 2012, la superior al resto de los años modelados.....185
- Figura 54. Matrices de dispersión (conectividad) obtenidas desde el modelo biofísico para anchoveta en la zona centro sur de Chile, periodo 1994-2014.....189
- Figura 55. Distribución espacial promedio de anchovetas de 20 mm de longitud total simulada mediante modelación biofísica para: a) el periodo 1994-2014; b) años con anomalías El Niño 3.4 positivas sobre 1°C (1997, 2002, 2008, 2013 y 2014) y; c) años sin eventos El Niño.....190
- Figura 56. Distribución espacial de reclutas de anchoveta desde información obtenida por cruceros de evaluación acústica, serie 2000 a 2012.....191
- Figura 57. Distribución espacial de los reclutas de anchoveta registrados por cruceros acústicos: a) distribución espacial de reclutas; b) tallas promedio de reclutas de anchoveta y; c) profundidad media de reclutas de anchoveta.....195

Figura 58. Profundidad de reclutas de anchoveta desde cruceros acústicos por: a) año de evaluación; b) porcentaje de reclutas; c) longitud y; d) latitud.....	196
Figura 59. Patrón promedio de distribución espacial de pre-reclutas de anchoveta (20 mm de longitud total) modelada biofísicamente en el periodo 1994-2014.....	197
Figura 60. Series de sobrevivencia biofísica obtenidas para sardina común y anchoveta en la Fase I y II del proyecto respectivamente.....	202
Figura 61. Índice de reclutamiento biofísico espacial obtenido para sardina común en la Fase I del proyecto.....	204
Figura 62. Diagrama modificado y actualizado a partir de Hollowed <i>et al.</i> , (2000).....	211
Figura 63. Diagrama del esquema metodológico para incorporar variables ambientales que afectan significativamente al reclutamiento (ejemplo para pequeños pelágicos) y para el establecimiento de modelos de evaluación de recursos con/sin variables biofísicas incluidas en procesos poblacionales.....	213
Figura 64. Modelo conceptual de la historia de vida temprana de pequeños pelágicos en la zona centro-sur de Chile con énfasis en procesos biofísicos relevantes para el control de la sobrevivencia. En negro de muestran los procesos abordado en el presente estudio, en gris procesos no abordados y que constituyen focos de estudio hacia el futuro.....	224
Figura 65. Esquema del transporte de estadíos tempranos de anchoveta y de los patrones de conectividad bajo escenarios extremos tipo El Niño y bajo condiciones No Niño.....	225
Figura A1. Climatología del viento satelital QuikSCAT (Serie Julio-1999/Noviembre-2009). Se muestra los contornos del esfuerzo cero zonal (línea verde) y meridional (línea celeste). Las líneas negras determinan un corredor de mínimas magnitud del viento.....	260
Figura A2. Climatología del viento satelital ASCAT (Serie Mayo-2007/Enero-2015). Se muestra los contornos del esfuerzo cero zonal (línea verde) y meridional (línea celeste). Las líneas negras determinan un corredor de mínimas magnitud del viento.....	261
Figura A3. Variabilidad de los contornos de las magnitudes mínimas de velocidad del viento satelital QuikSCAT desde Enero a Diciembre (Serie Julio-1999/Noviembre-2009).....	262
Figura A4. Funciones Empíricas Ortogonales Complejas del viento satelital QuikSCAT (Serie Julio-1999/Noviembre-2009). Las estructuras espaciales de (a) Primer modo y (b) Segundo modo. Las estructuras temporales de (c) Primer modo y (d) Segundo modo.....	253

Figura A5. Funciones Empíricas Ortogonales Complejas del viento satelital ASCAT (Serie Mayo-2007/Enero-2015). Las estructuras espaciales de: (a) Primer, (b) Segundo . Las estructuras temporales de (c) Primer, (d) Segundo Modo.....263

Figura A6. Climatología satelital QuikSCAT de la deriva de Ekman en el estrato superficial ($z=0$ m) (Serie Julio-1999/Noviembre-2009). Las líneas negras determinan un corredor de mínimas magnitud de la deriva de Ekman.....265

Figura A7. Climatología satelital ASCAT de la deriva de Ekman en el estrato superficial ($z= 0$ m) (Serie Mayo-2007/Enero-2015). Las líneas negras determinan un corredor de mínimas magnitud de la deriva de Ekman.....265

Figura A8. Funciones Empíricas Ortogonales Complejas de la deriva de Ekman proveniente de datos QuikScat (Serie Julio-1999/Noviembre-2009). Las estructuras espaciales de (a) Primer y (b) Segundo modo. Las estructuras temporales de (c) Primer y (d) Segundo modo.....267

Figura A9. Climatología satelital QuikSCAT de la deriva de Ekman zonal (panel superior) y meridional (panel inferior) en la vertical en la longitud de $75^{\circ}W$ (Serie Julio-1999/Noviembre-2009). Valores positivos hacia mar afuera y valores negativos hacia la costa.....268

Figura A10. Funciones Empíricas Ortogonales Complejas de la deriva de Ekman zonal y meridional de los datos QuikSCAT (Serie Julio-1999/Noviembre-2009). Las estructuras espaciales de (a) Primer y (b) Segundo modo. Las estructuras temporales de (c) Primer y Segundo modo.....269

Figura A11. Diagrama Hovmöller del Esfuerzo del viento meridional. Panel superior datos de vientos QuikSCAT a lo largo de la costa. (Serie Julio-1999/Noviembre-2009). Panel inferior datos de viento ASCAT a lo largo de la costa (Serie Mayo-2007/Enero-2015). Contorno sólido negro: esfuerzo del viento meridional cero.....271

Figura A12. Serie temporal del Esfuerzo Cero del viento meridional. Panel superior datos de vientos QuikSCAT a lo largo de la costa. (Serie Julio-1999/Noviembre-2009). Panel inferior datos de viento ASCAT a lo largo de la costa (Serie Mayo-2007/Enero-2015). Los puntos negros corresponden al mes de Agosto.....272

Figura A13. Variabilidad meridional del Transporte de Ekman ($m^3 s^{-1}$) por metro de costa, entre los años 1991 y 1999.....273

Figura A14. Climatología de la Turbulencia proveniente de datos QuikSCAT (Serie Enero-1993/Junio-2015).....274

Figura A15. Climatología de la Turbulencia de la serie ASCAT (Mayo-2007/Enero-2015).....275

Figura A16. Funciones Empíricas Ortogonales de la Turbulencia proveniente de datos QuikSCAT (Serie Enero-1993/Junio-2015). Las estructuras espaciales de (a) Primer, (b) Segundo y (c) Tercer modo. Las estructuras temporales de (d) Primer, (e) Segundo y (f) Tercer modo.....276

Figura A17. Funciones Empíricas Ortogonales de la Turbulencia proveniente de datos ASCAT (Serie Mayo-2007/Enero-2015). Las estructuras espaciales de (a) Primer, (b) Segundo y (c) Tercer modo. Las estructuras temporales de (d) Primer, (e) Segundo y (f) Tercer modo.....277

Figura A18. Climatología de la velocidad geostrófica proveniente del programa AVISO (Serie Enero-1993/Junio-2015).....278

Figura A19. Funciones Empíricas Ortogonales de la velocidad geostrófica proveniente del programa AVISO (Serie Enero-1993/Junio-2015). Las estructuras espaciales de (a) Primer, (b) Segundo, y (c) Tercer modo. Las estructuras temporales de (d) Primer, (e) Segundo y (f) Tercer modo.....279

Figura A20. Climatología Mensual de las velocidades geostróficas en la zona centro sur de Chile, derivada de datos diarios de velocidad del programa AVISO.....280

Figura A21. Climatología de la Energía Cinética proveniente del programa AVISO (Serie Enero-1995/Junio-2015).....282

Figura A22. Funciones Empíricas Ortogonales de la Energía Cinética proveniente del programa AVISO (Serie Enero-1995/Junio-2015). Las estructuras espaciales de (a) Primer y (b) Segundo modo. Las estructuras temporales de (c) Primer y (d) Segundo modo.....283

Figura A23. Climatología de la temperatura superficial del mar proveniente del programa Pathfinder. Serie Septiembre-1981/Diciembre-2008).....285

Figura A24. Climatología de la temperatura superficial del mar proveniente del programa ModisAqua (Serie Julio-2002/Diciembre-2015).....286

Figura A25. Funciones Empíricas Ortogonales de la temperatura superficial del mar proveniente del programa Pathfinder. Serie Septiembre-1981/Diciembre-2008). Las estructuras espaciales de (a) Primer y (b) Segundo modo. Las estructuras temporales de (c) Primer y (d) Segundo modo.....287

Figura A26. Funciones Empíricas Ortogonales de la temperatura superficial del mar proveniente del programa ModisAqua (Serie Julio-2002/Diciembre-2015). Las estructuras espaciales de (a) Primer y (b) Segundo. Las estructuras temporales de (c) Primer y (d) Segundo modo.....287

Figura A27. a) Serie temporal del Índice de Oscilación del Sur. b) Variabilidad interanual de la anomalía de la temperatura superficial del mar en la región costera del centro-sur. TSM de la Serie PathFinder.....	288
Figura A28. Diagramas de Hovmöller (Latitud-tiempo) para la TSM satelital (panel superior) y para la clorofila (color satelital) (panel inferior) para la serie 2002-2016), para una franja situada a los 74°S en la región de estudio (35-41°S).....	289
Figura A29. Panel superior: Distribución superficial promedio de temperatura (°C). Panel intermedio: Distribución superficial promedio de clorofila (mg·m ⁻³). Panel inferior: Bandas formadas por zonas frontales de origen térmico (°C/km) en el sector costero de la región centro-sur de Chile.....	291
Figura A30. Climatología Mensual de las frentes de origen térmico en la zona centro sur de Chile. Climatología derivada de información satelital de TSM de MODIS-A.....	292
Figura A31. Distribución promedio de la temperatura del mar (°C), salinidad (psu) y densidad (Kg m ⁻³), al norte y al sur de punta Lavapié. Panel superior (A) Estrato superficial. Panel intermedio (B) estrato de 10 m de profundidad. Panel inferior (C) estrato de 50 m de profundidad.....	293
Figura A32. Distribución promedio de la temperatura (°C), salinidad y densidad (kg·m ⁻³) en una transecta perpendicular a la costa ubicada.....	295
Figura A33. Muestreo hidrográfico (Temperatura, °C) a lo largo de la costa realizado en agosto de cada año, desde 1997 hasta el 2015.....	299
Figura A34. Muestreo hidrográfico (Salinidad, psu) a lo largo de la costa realizado en agosto de cada año, desde 1997 hasta el 2015.....	300
Figura A35. Muestreo hidrográfico (Oxígeno disuelto, mL L ⁻¹) a lo largo de la costa realizado en agosto de cada año, desde 1997 hasta el 2015.....	302

1.- RESUMEN EJECUTIVO

En el presente informe se entregan los resultados obtenidos en el contexto del proyecto FIP 2014-35 “Estimación de índices de reclutamiento basado en variables y modelos biofísicos de pelágicos pequeños de la zona centro-sur de Chile, Fase II”. Los principales focos de este informe son la implementación de un modelo hidrodinámico de alta resolución para la zona centro-sur de Chile, el esquema de acoplamiento físico-biológico para modelar la historia de vida temprana de la anchoveta, el establecimiento de sub-modelos biológicos iniciales para la modelación, la descripción de aspectos oceanográficos asociados a zona de desove y reclutamiento y la descripción de información asociada a la dinámica del reclutamiento desde un modelo de dinámica poblacional y desde información acústica que se utilizó como contraste de los resultados de la modelación biofísica.

El modelo hidrodinámico tridimensional ROMS, de resolución horizontal ~ 3 km para la zona centro-sur de Chile, demostró un buen desempeño reproduciendo los rasgos oceanográficos más importantes de la zona de estudio tanto espacial como temporal (estacional e interanualmente), además de reproducir la influencia de eventos extremos ecuatoriales de tipo El Niño y manifestar la influencia terrestre en el sector costero a través de la inclusión de agua dulce desde ríos. Estos aspectos permitieron proceder con confianza hacia el acoplamiento con el modelo biofísico.

Se presenta un completo análisis descriptivo y cuantitativo de los principales procesos oceanográficos asociados al desove y transporte de estadíos tempranos de anchoveta. Los principales hallazgos asociados a este punto indican que existen diferencias significativas espaciales y temporales (especialmente estacionales) en la dinámica de la región costera situadas al norte (34° - 37° S) y sur (37° - 40° S) del área de estudio. Al norte de punta Lavapié ($37^{\circ}20'S$) la intensidad y dirección del viento favorecen la surgencia costera y el transporte de Ekman, en tanto que al sur de dicha latitud la deriva de Ekman alcanza su valor más bajo por estar en la zona de divergencia de los vientos, verificando un mínimo transporte hacia la zona oceánica. Al término de invierno-inicios de primavera la dirección del viento en este sector favorece el transporte hacia la costa. Además, la corriente geostrófica mostró

una corriente pegada a la costa entre el límite austral de estudio y punta Lavapié, lo que contribuye por una parte a mantener partículas retenidas en el sector costero, y por otra al transporte hacia el norte. Estas zonas de retención se repiten en el Golfo de Arauco, Bahía Concepción y desembocadura del Itata asociadas a características topográficas particulares. Desde el punto de vista interanual, se muestra que durante eventos tipo El Niño existe una modificación del patrón de vientos, lo que impacta en el sistema de corrientes y la dirección del transporte de estadíos tempranos de anchoveta, aumentando su retención costera y sus niveles de sobrevivencia y modulando la expresión espacial del reclutamiento.

Además, se presentan los resultados asociados a un complejo esquema de modelación que incluyó la simulación del desove y del transporte de huevos, larvas y juveniles desde las zonas de desove (1994-2014). Este modelo identificó que la zona de desove de la anchoveta muestra mayor actividad en torno a los 39°S donde se observa un sistema de menos dinámica de vientos y un importante gradiente salino promovido por el aporte fluvial, lo que contribuye a la retención costera. Por otra parte se demuestra que, la temporada reproductiva de anchoveta manifiesta variabilidad interanual en la sincronización del desove. Este aspecto demográfico puede causar (des)acoplamiento con las condiciones propicias para la retención y el éxito reproductivo. En cuanto al proceso transporte, dispersión, conectividad, se reporta que la escala de dispersión analizada para anchoveta, está dentro de los márgenes previamente establecidos para peces de estas características, sin embargo el sistema muestra rasgos dinámicos altamente dispersivos.

Uno de los principales objetivos de este proyecto es la generación de indicadores de reclutamiento, en este contexto se concluye que la tasa de sobrevivencia basada en modelación biofísica muestra una alta correlación con los procesos de acoplamiento desove-advención, sugiriendo a las pérdidas advectivas como un modulador principal de la dinámica del reclutamiento. Además, la manifestación espacial del índice de sobrevivencia muestra un área de pre-reclutamiento centrada en los 39°S y una dinámica meridional altamente variable y asociada a procesos oceanográficos regionales. El índice de (pre) reclutamiento biofísico mostró correspondencia respecto a índices de reclutamiento provenientes de modelos estadísticos edad-estructurados y de cruceros de observación

acústica. Esta correspondencia entre indicadores sugieren al indicador biofísico como una nueva pieza de información basada en el ecosistema para sintonizar la estimación del reclutamiento. Finalmente, se presenta una discusión asociada a la utilidad de los índices generados en este proyecto en el contexto del ciclo de manejo del stock centro-sur de anchoveta.

EXECUTIVE SUMMARY

This report provides the results obtained in the project FIP 2014-35 "Estimation of recruitment indices based on biophysical modeling of small pelagics in central-southern Chile, Phase II". The main objectives of this report are: i) the implementation of a high resolution hydrodynamic model for central-southern Chile; ii) the implementation of a biophysical coupling model for the anchovy early life history; iii) the generation of spawning sub-models to initialize the simulation process; iv) description of oceanographic processes associated with spawning and recruitment areas and; v) analysis of recruitment from an age-structured population dynamics model and from acoustic surveys, which were used to compare the results of biophysical modeling.

The three-dimensional ROMS hydrodynamic model, with horizontal resolution ~ 3 km for central-southern Chile, showed a good performance reproducing the most important oceanographic features of the study area both spatial and temporal (seasonal and interannual), as well as reproducing the influence of extreme equatorial El Niño events and to manifest terrestrial influence in the coastal sector through the inclusion of fresh water from rivers. These aspects allowed us to proceed with confidence towards the generation of a biophysical coupling model.

A descriptive and quantitative analysis of the main oceanographic processes associated with spawning and transport of early anchovy stages is presented. The main findings associated with this objective indicate that there are significant spatial and temporal (especially seasonal) differences in the oceanographic dynamics of the northern (34° - 37° S) and southern (37° - 40° S) regions of the study area. To the north of Punta Lavapié ($37^{\circ}20'S$) the intensity and direction of the wind promotes coastal upwelling and Ekman transport, whereas to the south of this latitude the Ekman drift reaches its lowest value because it is in the zone of divergence of the winds, verifying a minimum transport towards the oceanic zone. On the other hand, at the end of winter and beginning of spring the direction of the wind in this sector favors the transport towards the coast. In addition, the geostrophic current showed a current near the coast to the south of Punta Lavapié, which

contributes on the one hand to maintain particles retained in the coastal sector, and on the other to the transport towards the north. These retention areas are also recorded in the Gulf of Arauco, Concepción Bay and the mouth of the Itata associated with particular topographic features. From the interannual point of view, it is shown that during El Niño events there is a modification of the wind pattern, which impacts on the current system and the transport direction of early stages of anchovy, increasing its coastal retention, increasing survival and modulating the spatial expression of recruitment.

In addition, we present the results associated to a complex modeling scheme that included the simulation of spawning and transport of eggs, larvae and juveniles from spawning grounds (1994-2014). This model identified that the anchoveta spawning area shows greater activity around 39°S where the wind pattern promotes coastal convergence during winter, when the reproduction of the anchoveta occurs. In addition this area is characterized by a marked density gradient promoted by river runoff, which contributes to coastal retention. On the other hand, it is demonstrated that, the anchoveta reproductive season manifests interannual variability in the synchronization of the spawning. This demographic aspect could cause (mis)coupling with favorable conditions for coastal retention and reproductive success. With respect to the transport, dispersion and connectivity processes, it is reported that the scatter scale of early stages analyzed for anchoveta is within the ranges previously identified for small pelagic fish of upwelling systems, however the study area shows oceanographic features highly dispersive characteristics of the areas of coastal upwelling.

One of the main objectives of this project is the generation of recruitment indicators. In this context, it is concluded that the survival rate based on biophysical modeling shows a high correlation with spawning-advection coupling processes, suggesting the advective losses as a main modulator of the recruitment dynamics. In addition, the spatial expression of the survival index shows a pre-recruitment area centered at 39 ° S and a latitudinal dynamic with high interannual variability, which is mainly associated with regional oceanographic processes. The biophysical recruitment index showed high levels of correlation to recruitment indices from age-structured statistical models and acoustic-observation cruises.

This correspondence between indicators suggests the biophysical indicator as a new piece of information, based on the ecosystem, useful to tune the estimation of recruitment in the stock assessment process. Finally, we present a discussion associated with the usefulness of the indices generated in this project in the context of the management cycle of the south-central anchoveta stock.

2.- DESCRIPCION DE ACTIVIDADES DEL EQUIPO DE TRABAJO

A continuación se define la composición del equipo de trabajo y sus principales funciones durante la ejecución del proyecto.

Personal profesional	Título académico	Función
Sebastián Vásquez P.	Magíster en Pesquerías	Jefe Proyecto, coordinación general del proyecto. Reuniones consultivas con FIPA. Desarrollo e implementación del modelo biofísico para anchoveta. Validación del modelo hidrodinámico. Asistencia logística en todos los talleres. Confección informes. Redacción de publicación.
Aquiles Sepúlveda O.	PhD Oceanography	Discusión del modelo conceptual de la historia de anchoveta en Chile centro-sur. Inclusión de resultados provenientes de la modelación biofísica en el ordenamiento pesquero nacional. Modelo conceptual de la historia de vida de sardina común y anchoveta.
Alexander Gretchina	PhD Zoology	Discusión del modelo conceptual de la historia de anchoveta en Chile centro-sur. Inclusión de resultados provenientes de la modelación biofísica en el ordenamiento pesquero nacional. Modelo conceptual de la historia de vida de sardina común y anchoveta.
Cristian Salas D.	Dr. en Ciencias Físicas	Análisis de los forzantes físicos asociados al proceso de transporte y conectividad de la población de anchoveta. Descripción, análisis y validación del modelo hidrodinámico. Corridas de modelos y la generación de las variables de salidas. Presentación en talleres. Confección de Informes

Sergio Núñez E.	Magíster en Oceanografía	Oceanografía física e identificación de forzantes para el transporte y conectividad de la población de anchoveta. Coordinación logística del grupo de trabajo asociado al objetivo específico 4. Presentación en talleres. Confección de Informes.
Claudio Gatica M.	Magíster en Pesquerías	Descripción de modelos de evaluación de stock y discusión de la interacción con modelos biofísicos. Revisión bibliográfica. Elaboración de un modelo conceptual que permita la inclusión de resultados provenientes de la modelación biofísica en el ordenamiento pesquero. Participación en la elaboración del modelo conceptual de la historia de vida de sardina común y anchoveta en la zona centro sur de Chile. Elaboración de informes.
Marcos Arteaga V	Magíster en Pesquerías	Implementación de modelos de evaluación de stock y discusión de la interacción con modelos biofísicos. Participación en la elaboración del modelo conceptual de la historia de vida de sardina común y anchoveta en la zona centro sur de Chile. Generación de indicadores de reclutamiento basado en capturas. Elaboración de informes. Presentación en talleres.
Lilian Cisterna A.	Magíster (c) en Pesquerías	Edad y crecimiento de anchoveta. Lectura de microincrementos en otolitos. Ajuste de modelos y estimación de parámetros de crecimiento en escala inferior al año para alimentar el modulo de crecimiento del modelo biofísico. Elaboración de informes
Evelin Sanhueza A.	Biólogo Marino	Edad y crecimiento de anchoveta. Lectura de microincrementos en otolitos. Ajuste de modelos y estimación de parámetros de crecimiento en escala inferior al año para alimentar el modulo de crecimiento del modelo biofísico.

Nicolás Alegría L.	Biólogo Marino	Análisis de la estructura espacial del desove y distribución de reclutas de anchoveta. Geoestadística. Generación de índices espaciales de reclutamiento basado en información acústica. Elaboración de informes.
Patric Contreras A.	Técnico en Administración de redes y soporte computacional	Implementación, mantenimiento y funcionamiento de las unidades computacionales necesarias para cumplir los distintos objetivos del proyecto asociados a la modelación hidrodinámica y modelación biofísica
Rubén Luna A.	Biólogo Marino	Recopilación y ordenamiento de bases de datos asociadas a cruceros oceanográficos para la descripción de forzante físicos hacia el transporte de huevos y larvas de anchoveta

Composición del equipo de trabajo y sus principales funciones durante la ejecución del proyecto. Expertos consultores independientes.

Personal profesional	Título académico	Función
Jaime Letelier	Dr. en Oceanografía	Oceanografía física y análisis satelital. Análisis integrado de forzantes oceanográficos en Chile centro-sur. Identificación de estructuras oceanográficas involucradas en el proceso de transporte de estadios tempranos de anchoveta. Redacción de informes.
Luis Soto	Dr. en Oceanografía Física	Participación como experto especialista en modelación hidrodinámica y experto en el modelo ROMS. Revisión de desempeño de la configuración y validación del modelo.
Andrés Ospina-Álvarez	Ph.D. en ciencias marinas	Participación como experto especialista en modelación biofísica y en dinámica poblacional en el Taller de Difusión y Discusión de Resultados.

3. OBJETIVOS DEL PROYECTO

El Objetivo General del proyecto es “Implementar un modelo biofísico espacialmente explícito de alta resolución costera que permita obtener índices de reclutamiento, para anchoveta y evaluar diferencias con sardina común en la zona centro-sur de Chile”.

Para el cumplimiento del objetivo general, se aborda la problemática con un enfoque multidisciplinario que incluye la modelación hidrodinámica, biofísica y de dinámica poblacional, la oceanografía física, ecología larval, evaluación de stock, estadística y análisis espacial; lo que permite abordar la problemática de forma integral en términos de generación de indicadores de reclutamiento independientes de la pesquería para anchoveta en la zona centro-sur de Chile.

Para satisfacer las necesidades del proyecto, los Objetivos Específicos son los siguientes:

3.1. Desarrollar e implementar un sistema de modelación biofísica para la población de anchoveta, que acople modelos biológicos y un modelo hidrodinámico de alta resolución costera validado para la región centro-sur de Chile que integre los forzantes físicos de alta frecuencia (marea, vientos, entrada de agua dulce), en escalas adecuadas que reproduzcan las condiciones oceanográficas de la distribución de pequeños pelágicos en la región desde al menos 1994-2014.

3.2. Modelar el proceso de mortalidad, crecimiento, transporte de anchoveta, y su efecto sobre la variabilidad del reclutamiento desde huevos a juveniles de anchoveta, identificando regiones fuente y sumidero de juveniles y reclutas de anchoveta en la zona centro-sur de Chile.

3.3. Obtener índices de reclutamiento de la anchoveta, independientes de la estimación acústica, para la región centro-sur de Chile, y comparar con índices de reclutamiento provenientes de la evaluación de stock para anchoveta

3.4. Identificar los principales forzantes biofísicos que modulan el proceso de crecimiento, sobrevivencia, transporte de huevos y larvas de anchoveta y la variabilidad del reclutamiento.

3.5. Identificar las principales zonas de crianza-reclutamiento de anchoveta y contrastarlas con la información/conocimiento disponibles.

3.6. Realizar una comparación de los resultados biofísicos de zonas de crianza, conectividad, índices de reclutamiento biofísicos, transporte de anchoveta con los de sardina común del proyecto “Estimación de índices de reclutamiento basado en variables y modelos biofísicos de PP de la ZCS de Chile, fase I”.

3.7. Proponer un modelo conceptual de la historia de vida de la anchoveta y sardina común en la zona centro sur de Chile, dando énfasis a procesos biofísicos relevantes y a la historia temprana de estas especies

4.- ANTECEDENTES

4.1. Antecedentes biológicos y pesqueros de la anchoveta en la zona centro-sur de Chile

El desembarque de recursos pesqueros en Chile está sustentado principalmente por las especies pelágicas, cuyos niveles de desembarque han estado dominados históricamente por el jurel *Trachurus murphyi*, el cual en la década de los años 90 reportó un máximo de más de cuatro millones de toneladas anuales (Arcos *et al.*, 2001). Secundariamente, la explotación de pequeños pelágicos constituidos por la sardina común *Strangomera bentincki* y la anchoveta *Engraulis ringens* han redituado importantes niveles de desembarque para el país con alrededor de 400 mil toneladas en promedio anual por especie (Gatica *et al.*, 2007), concentrando una importante actividad pesquera artesanal e industrial en la zona centro-sur de Chile (33°S - 41°S). Específicamente, en la zona centro-sur de Chile, ambas pesquerías (jurel y pelágicos pequeños) se extienden desde la V hasta la X regiones, constituyéndose como los principales puertos de desembarque, San Antonio en la V Región, en la VIII Región los puertos de Coronel, San Vicente y Talcahuano, además de los puertos de Corral, Calbuco y Puerto Montt en la X Región.

De acuerdo con Serra (1978) y Serra *et al.* (1979), la anchoveta presenta un amplio rango distribucional, encontrándose desde el norte de Perú hasta el sur de Chile (Serra, 1983). En la zona centro sur esta especie se distribuye en zonas cercanas a la costa hasta 30 millas náuticas, asociándose a sectores de mayor productividad biológica, generalmente vinculados a centros de surgencia, principalmente entre los meses de septiembre a marzo (Arcos *et al.*, 1987; Daneri *et al.*, 2000; Cubillos *et al.*, 2001; Cubillos *et al.*, 2002). Cabe señalar que el stock de anchoveta de la zona centro sur es considerado unitario en su rango de distribución. En este sentido, desde el punto de vista de estudios genéticos, se ha determinado a la fracción de la zona centro sur de Chile como autosustentable (Ferrada *et al.*, 2002). No obstante, esta especie está presente tanto en la costa del Perú como en la zona norte y centro sur de Chile.

La anchoveta se caracteriza por presentar un ciclo de vida corto, con cinco años de longevidad (Cubillos *et al.*, 2001), rápido crecimiento (Cubillos & Arancibia 1993, Cubillos *et al.*, 2001), una alta tasa de mortalidad natural (Cubillos *et al.*, 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, cabe señalar que junto a la sardina común, 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). Desde el punto de vista de la distribución espacial estas especies se congregan de manera costera. Lo anterior es corroborado al analizar la expresión espacial del desove (huevos y larvas, Cubillos *et al.*, 2011) y distribución de juveniles/adultos (Castillo *et al.*, 2001). Se conoce además que 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. Desde el punto de vista reproductivo, estas especies son consideradas desovantes parciales pudiendo desovar durante todo el año, con una mayor actividad reproductiva entre julio y agosto, pudiendo extenderse hasta enero en el caso de la anchoveta (Cubillos *et al.*, 1999; Castillo-Jordán *et al.*, 2007; Cubillos *et al.*, 2003). 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 un desove secundario de verano (Castillo *et al.*, 2010).

Desde la década de los 90' la pesquería de anchoveta en Chile centro-sur comienzan a experimentar importantes volúmenes de desembarque que promedian las 300 mil toneladas anuales. La pesquería se desarrolla de manera estacional en los meses de marzo a julio por la flota artesanal de cerco en las regiones VIII, IX y XIV, 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 anchoveta son variables y altamente dependientes de los pulsos de reclutamiento anual (Cubillos, 1999), el cual ocurre mayormente en enero de cada año y está caracterizado por peces de menos de un semestre

de edad (Cubillos *et al.*, 1998). 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 anchoveta en la región centro-sur de Chile se ha realizado desde 1999 mediante métodos hidroacústicos por medio de dos cruceros llevados a cabo en los meses de enero y mayo (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), 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 anchoveta 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).

A partir de las prospecciones acústicas realizadas entre 2000-2014 en la época del reclutamiento, Castillo *et al.* (2010) establecen evidencias de una homogeneidad en la estructura espacial de las tallas de anchoveta 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).

4.2. Principales procesos oceanográficos asociados a la zona centro-sur de Chile

4.2.1. Antecedentes de los principales procesos oceanográficos asociados a la zona centro-sur de Chile

El océano Pacífico sur presenta diversos procesos que actúan modificando las condiciones oceanográficas y meteorológicas en múltiples escalas espaciales (local, mesoescala, regional y oceánica) y temporales (intra-estacional, anual, inter-anual y decadal). La variabilidad ambiental física en latitudes intermedias del Pacífico suroriental puede ser explicada principalmente por las fluctuaciones intra-anales asociadas a la estacionalidad

del proceso de surgencia costera (Strub *et al.*, 1998; Leth & Shaffer 2001; Rutllant & Montecino, 2002; Rutllant *et al.*, 2004b), y la variabilidad interanual relacionada con la alternancia de eventos climático-oceanográficos cálidos-fríos (El Niño/La Niña) (Enfield, 1989; Glantz, 1996; McPhaden, 2001; Shaffer *et al.*, 1999; Hormazábal *et al.*, 2001; Escribano *et al.*, 2004), incluyendo ondas Kelvin ecuatoriales, ondas atrapadas a la costa y ondas de Rossby (Strub *et al.*, 1998; Fuenzalida *et al.*, 2008; Montecino *et al.*, 2013). Se ha sugerido también que estructuras de meso-escala y sub-mesoescala (remolinos, meandros filamentos, frentes) pueden jugar un rol importante en la abundancia y distribución de cardúmenes de peces pelágicos (Nakata *et al.*, 2000; Hormazábal *et al.*, 2004; Núñez *et al.* 2006; Correa-Ramírez *et al.*, 2007; Montecino *et al.*, 2013; Parada *et al.*, 2013).

4.2.1.1. Forzamiento atmosférico

El sistema atmosférico de la región suroriental del océano Pacífico, es el resultante de la interacción entre el sistema atmosférico de gran escala y efectos regionales y locales presentes a lo largo de la costa de Chile y Perú. El sistema meteorológico que más influye en el Pacífico sureste es el Anticiclón Subtropical del Pacífico (Anticiclón del Pacífico Sur), que modula los vientos a lo largo de la costa de Perú y Chile (Strub *et al.*, 1998; Chaigneau & Pizarro 2005; Rutllant *et al.*, 2004a), donde masas de aire descienden en una celda de circulación atmosférica haciendo que los vientos predominantes en el período estival sean hacia el Ecuador, y que se debiliten o inviertan su dirección durante otoño e invierno (Saavedra, 1980).

El viento a lo largo de la costa es, a su vez, modificado por efectos regionales como la baroclinicidad, la línea de la costa y las pendientes montañosas, a lo que se adicionan efectos locales que influyen la circulación regional a través de la topografía local y la orientación de la costa, especialmente bahías y promontorios. Estos factores atmosféricos afectan los flujos superficiales de *momentum* (estrés) y boyantes (precipitación, descarga de aguas continentales y flujo superficial de calor) sobre el océano costero. En el océano Pacífico suroriental, la variabilidad estacional del viento está principalmente relacionada con los cambios en la extensión y la posición del anticiclón subtropical. Dicho anticiclón presenta su posición más austral durante el verano, periodo en que el esfuerzo del viento (τ)

es mínimo frente a Perú y el norte de Chile. Conjuntamente, en la zona de transición costera frente a Chile central, el núcleo con máximos valores de τ se intensifica y localiza entre ~ 30 - 38°S , asociado a una mayor frecuencia y extensión hacia el sur de los eventos de jet costero (Garreaud & Muñoz, 2005). La posición más septentrional y oceánica del anticiclón se observa en invierno, periodo en que se registran las máximas magnitudes de τ frente a Perú y el norte de Chile. Frente a Chile central, la celda anticiclónica presenta un núcleo con altas intensidades de τ , vinculado a la ocurrencia de un jet costero (Garreaud & Muñoz, 2005), cuyo eje principal se ubica aproximadamente a ~ 200 km de la costa (Letelier *et al.*, 2012).

Entre los $33^\circ 30'$ y 36°S la plataforma incrementa ligeramente y los vientos aumentan su intensidad especialmente en primavera. La plataforma continental se hace más amplia entre los 36° - 40°S , revelando fuertes vientos hacia el Ecuador en el verano, y una mayor descarga de ríos y vientos desde el norte en el invierno (Montecino *et al.*, 2013). Entre los 30 - 40°S , cambios estacionales en el patrón de vientos incluye un máximo de vientos hacia el Ecuador en primavera-verano y un mínimo en invierno, así como hacia el sur un incremento en las precipitaciones y una disminución en el flujo de calor en el invierno.

Durante el verano, los vientos hacia el ecuador generan frentes de densidad moderados a fuertes en el océano costero (Moraga, 1996) y jets superficiales a lo largo de los frentes, los que a su vez pueden desarrollar inestabilidades (Leth & Shaffer 2001, Hormazábal *et al.*, 2004) y meandros llevan filamentos de aguas frías, fito- y zooplancton lejos de la costa, evidenciando una banda costera de aguas frías que se expande/contrae hacia la costa durante las fluctuaciones sinópticas de los vientos hacia el Ecuador.

4.2.1.2. Proceso de surgencia costera

En sistemas de borde oriental, como lo es el situado frente a las costas de Chile, el proceso de surgencia costera cumple un rol cardinal en el incremento de la producción biológica. El sistema de corrientes de Perú-Chile es parte del giro subtropical del Pacífico sur que es forzado por el anticiclón del Pacífico Sur. En esta región se desarrollan intensos y frecuentes procesos de surgencia costera (Barber & Smith 1981; Strub *et al.*, 1998).

El anticiclón del Pacífico sur es responsable desde el punto de vista estacional de la persistencia de la surgencia costera a una escala espacial suficientemente extensa. Esta persistencia tienen variaciones asociadas al movimiento estacional del anticiclón del Pacífico sur (Bakun & Nelson 1991), ya que en esta región el viento hacia el Ecuador tiene una señal anual donde los máximos se observan típicamente entre primavera y verano (Bakun & Nelson 1991; Soto-Mardones *et al.*, 2004).

El proceso se origina por la persistencia de los vientos paralelos a la costa provenientes desde el sur y sur-oeste durante la primavera y verano austral (Saavedra, 1980; Bakun & Nelson, 1991), cuya coacción sobre los estratos superficiales del océano produce el ascenso hacia la capa fótica de aguas frías, salinas, poco oxigenadas y con alto contenido de nutrientes, promoviendo el incremento de fitoplancton (producción primaria) y zooplancton (producción secundaria) y su disponibilidad para la trama trófica, modulando, en último término, la estructura de estos sistemas y la distribución espacial y temporal de las especies que en ellos habitan.

En la región central de Chile el proceso de surgencia costera evidencia una marcada fluctuación estacional, verificándose principalmente en el período primaveral-estival, entre inicios de la primavera (septiembre) y fines del verano (marzo) con una máxima expresión en los meses de diciembre y enero (Arcos & Navarro 1986; Peterson *et al.*, 1988; Leth, 2000; Blanco *et al.*, 2001; Rutllant *et al.*, 2004b). Este sistema de surgencia tiende a concentrar la productividad en una pequeña banda costera trayendo como consecuencia la formación de una de las zonas más productivas del océano posiblemente limitada por el frente de surgencia (Bakun, 1996).

La circulación costera en estos sistemas de surgencia se ha enfocado principalmente desde el punto de vista de la variabilidad asociada a factores forzantes, locales y remotos. Los forzantes locales incluyen principalmente la boyantes y el estrés del viento integrado sobre cientos de kilómetros, la topografía costera y la disposición de la línea de costa (Figueroa & Moffat 2000; Rutllant *et al.*, 2002), en tanto que los forzantes remotos están referidos a corrientes de gran escala y señales ambientales que se propagan desde el Ecuador hacia el

polo, afectando el océano costero desde fuera de la influencia del campo local del viento (Pizarro *et al.*, 1994; Hormazábal *et al.*, 2001; Vega *et al.*, 2003). La inter-relación entre los principales forzantes locales y remotos en sistemas de surgencia, puede aplicarse al análisis de la variabilidad interanual en el campo físico y biológico, al intercambio costa-océano y a la comprensión de la dinámica del flujo hacia el polo, que típicamente se ubica en el talud continental con un ancho entre 20-100 km y velocidades del orden de $0,1 \text{ m s}^{-1}$ (Marín *et al.*, 2003; Navarro *et al.*, 2004).

Además de la variabilidad espacial y temporal que introducen la variación estacional del viento, la surgencia costera está asociada a puntos topográficos particulares (puntas, penínsulas, cabos y bahías) donde se desarrollan focos de surgencia los cuales están distribuidos heterogéneamente a lo largo de la costa. En el Sistema de Corrientes Perú-Chile (SCPC) se desarrollan dos importantes áreas de surgencia -en términos de extensión e intensidad- las que se ubican en el centro de Perú ($\sim 14^{\circ}30' \text{ S}$) y centro-sur de Chile ($\sim 36^{\circ}30' \text{ S}$) (Strub *et al.*, 1998).

A escala local, la surgencia es producida por la divergencia que genera el transporte hacia el oeste de las aguas superficiales, siendo el resultado de la componente del viento a lo largo de la costa y de la rotación terrestre (Gill & Clarke 1974). El ascenso de aguas de menor temperatura y mayor densidad y su posterior desplazamiento hacia el oeste, promueve la formación de un frente de surgencia lo que ha sido discutido por Letelier (2010), frente que puede alcanzar cientos de kilómetros a lo largo de la costa involucrando solo unas pocas decenas de kilómetros en la dirección transversal, y que están comúnmente asociados a una corriente de chorro hacia el Ecuador (Fedorov & Kuzmina, 1977; Mooers *et al.*, 1977; Smith, 1995).

Los frentes de surgencia pueden ser interpretados como una expresión superficial de la pycnoclina, aunque los gradientes horizontales son modificados significativamente por advección, mezcla, transporte de Ekman, flujos de calor y boyantes (Bowman & Esaias 1978; Peliz *et al.*, 2002). La dinámica interna del frente es casi desconocida desde un punto de vista de la información *in situ* (Letelier, 2010), aunque un común denominador de esta

dinámica en sistemas de borde oriental, parece ser en que la corriente a lo largo del frente es generada por la diferencia de densidad entre ambos lados de esta estructura (Fedorov, 1985; Peliz *et al.*, 2002), por lo que es dependiente de la intensidad del viento y la naturaleza de las aguas involucradas en el afloramiento en cada lugar (Fedorov, 1985; Brink, 1987).

Modelos implementados en zonas de surgencia costera, indican que corrientes en chorro, adyacentes a las zonas de surgencia, son intrínsecamente inestables debido a los gradientes horizontales y verticales de velocidad, como también por la interacción con la topografía submarina y línea de costa (Letelier, 2010), inestabilidades que deforman el flujo principal y el frente, generando meandros que dan lugar a lenguas de surgencia, filamentos y eventualmente remolinos de mesoescala (Strub *et al.*, 1991, Cushman-Roison, 1994; Batteen *et al.*, 1995; Leth & Shaffer, 2001; Gan & Allen, 2002; Stevens & Johnson, 2003).

La manifestación superficial de eventos activos de surgencia se traduce en la presencia de frentes y filamentos, identificados como estructuras recurrentes en la zona costera del Pacífico Suroriental (Cáceres, 1992; Thomas *et al.*, 2001b; Sobarzo & Figueroa, 2001; Marín *et al.*, 2003; Grob *et al.*, 2003; Yuras *et al.*, 2005; Letelier *et al.*, 2009; Letelier, 2010; Montecino *et al.*, 2013). Se ha demostrado que las lenguas de surgencia y los filamentos no están restringidos solo a la capa superficial, sino que serían la expresión superficial de los meandros que forman la corriente en chorro (Brink & Cowles, 1991; Strub *et al.*, 1991; Sobarzo & Figueroa, 2001); y al mismo tiempo se ha evidenciado a través de modelos numéricos que inestabilidades baroclínicas asociadas al frente estarían promoviendo la conversión de la energía potencial del flujo promedio en energía cinética o turbulenta, pasando a ser la principal explicación del potencial de generar giros de mesoescala que se propagan hacia el oeste sirviendo como un mecanismo de exportación de masa y energía (Cushman-Roison 1994; Batteen *et al.*, 1995; Marchesiello, 2004). Estos filamentos de surgencia, en conjunto con otras estructuras como son los anillos o remolinos de mesoescala y las corrientes de meandros, cuyo origen está relacionado con los cambios de vorticidad asociados a irregularidades fisiográficas y/o batimétricas, inestabilidades baroclínicas de las corrientes costeras y variabilidad del viento, se han establecido como los principales responsables de la alta variabilidad encontrada entre la zona costera y la

oceánica frente a las costas chilenas (Strub *et al.* 1998; Leth & Shaffer, 2001; Hormazábal *et al.*, 2004; Letelier, 2010; Parada *et al.*, 2013; Montecino *et al.*, 2013).

A lo largo de la costa de Chile diferentes centros de surgencia han sido descritos en base a observaciones satelitales de temperatura superficial del mar (Fonseca & Farías, 1987). La variabilidad de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) asociada al ascenso de aguas a las capas superficiales, hace que en las zonas donde ocurre continuamente surgencia, la amplitud anual de la señal de TSM sea menor que la zona adyacente, por lo que la varianza de la TSM ha sido tomada como un indicador espacial de la zona de influencia de la surgencia (Letelier, 2010). Asimismo, en las últimas décadas se ha usado sistemáticamente información de color del mar y altimetría satelital para describir la evolución de estos eventos, como también la presencia de frentes, filamentos y remolinos de mesoescala (Cáceres, 1992; Barbieri *et al.*, 1995; Hormazábal *et al.*, 2004; Thomas *et al.*, 2004; Yuras *et al.*, 2004; Letelier *et al.*, 2009; Letelier, 2010).

En la zona centro-sur (30°-42°S) de Chile, especialmente frente a la VIII región, donde la plataforma continental es más ancha y la variabilidad anual de los vientos es mayor, la extensión espacial de la surgencia, lenguas de surgencia y filamentos pueden alcanzar centenas de kilómetros (Fuenzalida, 1990; Cáceres, 1992; Montecinos & Balbontin 1993; Thomas, 1999). En esta zona, especialmente entre 34°S y 37°30'S, se ubica una de las principales áreas de surgencia costera, donde se distinguen varios focos asociados a las puntas Topocalma (34°10'S), Nugurne (35°57'S) y Lavapié (37°15'S) (Fonseca & Farías 1987; Sobarzo, 1994), dando origen a una macro región de surgencia muy activa la cual está muy bien reflejada en la distribución espacial promedio de la energía cinética asociada a remolinos (Hormazábal *et al.*, 2004). Estos procesos de surgencia generan la formación de frentes a lo largo de la costa que pueden extenderse cientos de kilómetros, aunque perpendicular a la costa abarquen decenas de kilómetros y que están vinculados espacialmente con la presencia de lenguas y filamentos de surgencia.

Topográficamente la zona de estudio muestra un quiebre asociado a la presencia de punta Lavapié (37°20'S), que separa la zona norte del área de desove situada en la región al sur de

los 37°20'S. Esta punta representa un cambio en la orientación de la costa y en el ancho de la plataforma continental. Hacia el sur, la línea costera presenta una orientación aproximadamente norte-sur y la plataforma tiene en promedio un ancho de 10 a 50 km, en tanto al norte de punta Lavapié, la línea de costa tiende hacia al noreste, la plataforma se ensancha más de 70 km la que es interrumpida por los cañones submarinos del Itata y Bío Bío, con la presencia de una línea de costa caracterizada por un sistema de bahías y golfos (golfo de Arauco, bahías de Concepción y Coliumo). Punta Lavapié (foco de surgencia) representa la zona de menor ancho de plataforma a partir de la cual se desprende el jet costero y la lengua de surgencia hacia el noroeste dejando la zona de la plataforma de Concepción y golfo de Arauco como adyacente al flujo principal, formando potencialmente una zona de sombra de surgencia (Valle-Levinson *et al.*, 2003, Letelier *et al.*, 2009).

La variabilidad espacial y temporal de las corrientes, el viento y la surgencia, el aporte de agua dulce proveniente de ríos principales y fiordos junto con la estructura de la plataforma continental y la forma de la costa definen las condiciones ambientales de la zona de desove de la anchoveta en el centro sur de Chile (Letelier-Pino *et al.*, 2015).

4.2.1.3. Variabilidad interanual (eventos ENOS)

El borde oriental del Pacífico se ve asimismo afectado por eventos El Niño y La Niña los cuales fluctúan en una escala interanual. El Niño y La Niña son fases extremas de un ciclo natural de interacción océano-atmósfera que están asociados a cambios de gran escala de la temperatura a lo largo de Pacífico ecuatorial. Durante El Niño se produce una disminución de los vientos Alisios y un incremento anómalo de la temperatura en el Pacífico oriental, condiciones que generan cambios en el clima a escala regional y global. Por otro lado, durante La Niña los vientos Alisios se presentan reforzados y la temperatura en el Pacífico oriental se observa anómalamente fría, a la cual están asociados periodos de sequía a lo largo de la costa Pacífico del continente americano (Wyrтки, 1975; Maturana *et al.*, 2004).

Durante el desarrollo de eventos El Niño, el borde oriental del Pacífico se ve afectado por perturbaciones de baja frecuencia de origen ecuatorial que modifican las características de las masas de agua presentes a lo largo de la costa (Huyer *et al.*, 1987) y generan un incremento anómalo en el campo de temperatura superficial (Hormazábal *et al.*, 2001).

Estas perturbaciones se propagan hacia los polos en forma de ondas atrapadas a la costa (OAC), produciendo el ascenso y el descenso de la piconclina decenas de metros y modificando el campo de corrientes (Pizarro *et al.*, 1994; Shaffer *et al.*, 1999; Hormazábal *et al.*, 2002). No obstante los estudios realizados, el impacto de estos fenómenos sobre la surgencia costera y la formación de estructuras de mesoescala y en especial sobre la formación de remolinos de mesoescala, no ha sido determinado claramente (Barbieri *et al.*, 1995; Letelier, 1998; Thomas *et al.*, 2001a; Ulloa *et al.*, 2001)

En general, el paso de ondas ecuatoriales inducen perturbaciones a lo largo del borde suroriental del océano Pacífico. En la dinámica atmosférica, las Oscilaciones Madden-Julian, perturbaciones intra-estacionales (30-60 días) de gran extensión en la atmósfera tropical, combinan la circulación atmosférica zonal con los centros de convección profunda en la franja ecuatorial (Madden & Julian, 1972; Zhang, 2005). Las oscilaciones de Madden-Julian son la fuente principal de la generación de ondas de Kelvin intra-estacionales (30-90 días; Zhang, 2005).

Durante El Niño, las fluctuaciones de los vientos Alisios, asociadas a las Madden-Julian, fuerzan ondas Kelvin oceánicas que viajan por el ecuador hacia la costa de Sudamérica. Una vez que estas ondas llegan a la costa, parte de su energía se propaga hacia el polo como ondas atrapadas a la costa y otra parte se refleja hacia el oeste como ondas de Rossby. Las ondas atrapadas a la costa son oscilaciones híbridas de baja frecuencia ($\omega < f$), que se propagan unidireccionalmente a lo largo de un borde oriental, descritas como un efecto combinado de la topografía y la estratificación (Allen, 1975). Para un fondo plano, ellas se comportan como ondas de Kelvin (Gill & Clarke, 1974), en cambio, para un fondo con gradiente topográfico y un océano homogéneo, se convierten en ondas de la plataforma continental (Gill & Schumann, 1974).

Una onda de Kelvin es una fluctuación de gran escala definida como una onda de gravedad, afectada por la rotación y que se propaga atrapada al ecuador o a un borde vertical. Viaja en una sola dirección, por lo que es una onda no dispersiva. En los bordes orientales se dirige hacia los polos y se establecen como ondas Kelvin barotrópicas con una estructura vertical independiente de la profundidad, o como ondas baroclínicas (también llamadas ondas

internas de Kelvin) que se verifican como estructuras verticales sinusoidales, evidenciando su influencia en escalas verticales reducidas, propagándose con una velocidad de fase mucho menor al caso barotrópico (1-3 v/s 200 m/s). Su influencia fuera de la costa está determinada por el radio de deformación de Rossby interno y es del orden de 50 km para latitudes medias (25°S).

La expresión de eventos ENOS constituye una de las principales fuentes de variabilidad interanual en el Pacífico Sureste, que se verifica a nivel de macroescala y deriva de variaciones en el gradiente de presión atmosférica sobre el océano Pacífico que provocan una relajación de los vientos Alisios sobre el Pacífico occidental. Lo anterior, genera la propagación hacia el Este de ondas atrapadas al Ecuador (ondas Kelvin) que chocan y se propagan a lo largo de la costa de América (Maturana *et al.*, 2004). Estas perturbaciones se intensifican considerablemente durante los periodos de El Niño, y producen una serie de anomalías bio-físicas en los sistemas de borde oriental (Pizarro *et al.*, 1994; Shaffer *et al.*, 1999; Hormazábal *et al.*, 2001; Blanco *et al.*, 2001; Soto-Mardones *et al.*, 2004; Pizarro & Montecinos, 2004; Maturana *et al.*, 2004), a saber:

- (a) un incremento anormal de la temperatura superficial del mar en el océano Pacífico ecuatorial central y oriental (del orden de 5 °C).
- (b) una elevación del nivel de mar en la costa (de aproximadamente 0,5 metros en promedio).
- (c) el ascenso y descenso de la termoclina y picnoclina.
- (d) la intensificación de la corriente sub-superficial hacia el polo.
- (e) la variación hacia el sur de la zona de convergencia inter-tropical.
- (f) el debilitamiento del anticiclón subtropical.
- (g) un incremento en el transporte hacia la costa, así como
- (h) un hundimiento de la termoclina (y nutriclina) entre 50 y 100 metros.

Esta depresión de la nutriclina implica un ascenso de aguas pobres en nutrientes en eventos activos de surgencia costera, provocando un decremento en la producción primaria y secundaria con el consecuente impacto sobre la trama trófica en estos sistemas (Arntz *et al.*, 1985; Arntz *et al.*, 1991; Tarazona *et al.*, 1996; Arntz *et al.* 2006).

Mediante observaciones directas y resultados de modelos numéricos se ha mostrado que las corrientes, nivel del mar e isothermas bajo la termoclina muestran oscilaciones en la escala intra-estacional hasta los 33°S (Shaffer *et al.*, 1997; Hormazábal *et al.*, 2002). Al sur de los 33°S, el viento a lo largo de la costa aparece contribuyendo en forma significativa al forzamiento de ondas intraestacionales atrapadas a la costa (Hormazábal *et al.*, 2002; Leth & Middleton, 2004). Por otra parte, se han observado oscilaciones semianuales e interanuales asociadas a ondas de Rossby forzadas por ondas de Kelvin ecuatoriales (Pizarro *et al.*, 2002; Vega *et al.*, 2003; Hormazábal *et al.*, 2004).

Por otra parte, Parada *et al.* (2013) han señalado que para latitudes altas, el modo de variabilidad climática más prominente corresponde a la Oscilación Antártica, la cual presenta fluctuaciones en escalas interanual e interdecadal que, a su vez generan fluctuaciones en la presión atmosférica, campo de viento, temperatura del mar, además de generar perturbaciones sobre los vientos de superficie en latitudes medias (Fyfe, 2003). El efecto de la Oscilación Antártica sobre la variabilidad climática en latitudes medias, particularmente en el Pacífico suroriental, ha sido menos estudiada que para ENSO, aunque han habido avances en su relación con la precipitación (Quintana, 2004; Gillet *et al.*, 2006; Garreaud *et al.*, 2008). Todos estos modos de variabilidad climática son reconocidos por sus impactos en el sistema climático del Pacífico suroriental.

A pesar de la vasta información sobre los efectos deletéreos de la manifestación de eventos ENOS sobre las comunidades marinas costeras y la producción biológica, se ha sugerido consecuencias no tan catastróficas a través del efecto modulador del evento sobre el favorecimiento en el crecimiento y reproducción de especies dominantes en el zooplancton del norte de Chile (Hidalgo & Escribano 2001; Ulloa *et al.*, 2001). Para la fase cálida del evento, se ha descrito el dominio de fitoplancton de pequeño tamaño y concentraciones variables pero consistentemente altas de clorofila-a, así como ensamblajes zooplanctónicos compuestos por especies pequeñas. De igual manera, se ha sugerido escasa variabilidad en la biomasa zooplanctónica, así como también en la producción primaria y el flujo vertical de carbono (Escribano *et al.*, 2004), lo que implica el re-analizar el impacto negativo de eventos ENOS sobre la estructura comunitaria y producción del sistema, en función de la

rápida recuperación de la capacidad productiva global del sistema de surgencia de Chile (Escribano *et al.*, 2004).

Asociados al ENOS, en la zona centro-sur de Chile, se han observado patrones de teleconexión atmosféricos que afectan el período de inicio y final de la estación de surgencia (Montecinos & Gómez, 2010) y, a través de éste, la concentración de clorofila y el reclutamiento de pequeños pelágicos (Gómez *et al.*, 2012).

4.2.1.4. Estructuras de meso y sub-mesoescala

La región de transición costera de Chile revela, como otras regiones de surgencia del mundo, una corriente en chorro (jet costero) íntimamente asociada a estructuras de meso-escala como frentes de surgencia, filamentos, meandros altamente energéticos y remolinos (Strub *et al.*, 1991; Letelier *et al.*, 2009). Estas estructuras de mesoescala tienen una relevante importancia física y bio-ecológica debido al transporte mar afuera de calor, *momentum*, nutrientes y las propiedades del agua proveniente de la región de surgencia costera. Remolinos ciclónicos y anticiclónicos pueden tener diferentes implicancias biológicas y físicas y su variabilidad podría tener un fuerte impacto en el ecosistema de surgencia (Bakun, 2006).

Letelier (2010) ha discutido diversos mecanismos involucrados en la generación de remolinos de mesoescala desde datos observacionales y resultado de modelos matemáticos, los que incluyen inestabilidades barotrópicas y baroclínicas, convergencias (divergencias) generadas por el transporte de Ekman superficiales, e interacciones de los flujos con la topografía del fondo e islas (Batteen *et al.*, 1995; Leth & Middleton 2004; Sangrà *et al.*, 2005). En latitudes intermedias los remolinos de meso-escala están principalmente asociados con inestabilidades baroclínicas (Smith & Vallis, 2001). En regiones de surgencia como en Chile o California, las inestabilidades baroclínicas parecen ser el principal mecanismo generador de remolinos de mesoescala (Marchesiello *et al.*, 2003; Leth & Middleton, 2004). Considerando la variabilidad estacional, el sistema de surgencia de Chile-Perú experimenta grandes cambios interanuales relacionados a ENOS (Shaffer *et al.*, 1999; Hormazábal, *et al.*, 2004); sin embargo, el cómo los cambios estacionales e

interanuales en la estratificación y circulación costera afectan las características de los remolinos de mesoescala no está claramente dilucidado.

Los remolinos de mesoescala tienen escalas horizontales entre 20 y 400 km de diámetro y pueden extenderse fácilmente hasta los 1500 m de profundidad (Brown *et al.*, 1989; Sangrá, 2010), mientras que las amplitudes en el nivel del mar asociadas a estas estructuras fluctúan de unos pocos centímetros en zonas de baja energía a 20 cm cerca de zonas de intensas corrientes (Chelton *et al.*, 2007). Las observaciones han mostrado que estos remolinos se desplazan hacia el oeste con valores de 1 a 3 cm/s al sur de los 25°S. Estas estructuras de mesoescala tienen una estructura vertical coherente por sobre los ~600 metros de profundidad, y generan un transporte de $2 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ hacia el océano interior, lo cual extiende aguas ricas en nutrientes más allá de la zona directamente afectada por la surgencia costera (Correa-Ramírez *et al.*, 2007).

En el sistema de surgencia de Perú-Chile, los remolinos de mesoescala son comúnmente generados cerca de la costa y propagados hacia el oeste y noroeste, con una velocidad variable que decrece hacia el polo desde ~ 6 cm s^{-1} cerca de los 15°S hasta los ~3 cm s^{-1} cerca de los 30°S. Presentan un diámetro típico de ~30 km, menor al radio de deformación de Rossby (Chaigneau & Pizarro 2005; Chaigneau *et al.*, 2008, 2009). Por otra parte, el campo de la energía cinética asociada a remolinos (Eddy kinetic energy, EKE) muestra la mayor variabilidad de mesoescala vinculada con remolinos y corrientes de meandro altamente energéticas, exhibiendo altos valores de EKE ($>70 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2}$) entre la costa de Chile central y ~600 km, intensa actividad de mesoescala que define la Zona de Transición Costera (CTZ; Hormazábal *et al.* 2004).

Entre los 30° y 42°S la Zona de Transición Costera se extiende más allá de los 500-600 kilómetros desde la costa (Hormazábal *et al.*, 2004). Estos autores han examinado la propagación de remolinos de mesoescala al interior de esta zona de transición mostrando la existencia de una importante variabilidad meridional en el campo de la energía cinética, con mayores valores situados entre los 29° y 38°S. La variabilidad de mesoescala en esta región está asociada con inestabilidades baroclínicas de las corrientes costeras y con la

propagación hacia el oeste de ondas de Rossby, fuertemente moduladas por la señal interanual de El Niño/La Niña (Hormazábal *et al.*, 2004; Ramos *et al.*, 2006).

En el análisis de la dinámica de los sistemas de margen oriental, se ha otorgado cada vez mayor importancia al intercambio entre la costa y el océano, reflejado a través del transporte, la mezcla y la exportación de producción generada en la costa, especialmente por el desarrollo de filamentos superficiales que se proyectan hasta 50-300 kilómetros mar adentro (Hill *et al.*, 1998). La asociación entre las estructuras de mesoescala y la variabilidad de la surgencia es aun limitado ya que es dependiente de las condiciones locales a escalas espaciales extensas y periodos de tiempo de horas a meses. Letelier (2010) discute sobre la poco conocida estructura y dinámica interna de los frentes, meandros, lenguas, filamentos y giros de mesoescala. A pesar de lo anterior, se ha reconocido que estas estructuras son uno de los principales mecanismos de intercambio de energía y materia entre la zona costera y la zona oceánica. Esta conexión podría estar influyendo y determinando aspectos ecológicos e incluso climáticos (Bakun, 1990; Mann & Lazier 1996).

Una síntesis de la importancia físico-biológica de estructuras de mesoescala en regiones de surgencia es discutido por Letelier (2010), estableciendo ejemplos de distribución espacial de clorofila coherente con la extensión de la banda costera y la presencia de filamentos (Thomas *et al.*, 1994; Thomas *et al.*, 2001b; Thomas *et al.*, 2004; Nieto 2009). La presencia de frentes de surgencia podría definir los patrones de retención y enriquecimiento de estas zonas (Bakun, 2006), mientras que el desarrollo de los remolinos de mesoescala se puede asociar a una expansión de zonas de surgencia (Correa-Ramírez *et al.*, 2007; Morales *et al.*, 2007). El ascenso de nutrientes a la capas superiores, al interior o en la periferia de los remolinos, es otro aspecto que es actualmente motivo de investigación ya que resultados recientes muestran que esto puede suceder en los giros ciclónicos como anticiclónicos (Sangrà *et al.* 2005; Benítez-Nelson *et al.* 2007; Sangrà, 2010).

Desde esta perspectiva, en el área costera y oceánica frente a Chile central, Morales *et al.* (2012) muestran la presencia de filamentos ricos en clorofila-a que alcanzan hasta los 300-

400 kilómetros desde la costa, remolinos ciclónicos y anticiclónicos, así como también la distribución de micro- y mesozooplankton y material orgánico particulado hacia el sector oceánico, lo que sugiere una exportación significativa desde la zona costera de surgencia a ambientes oligotróficos situados hacia el océano interior, realizada a través de estas estructuras de mesoescala. De igual manera, un trabajo reciente revela evidencias de un acoplamiento físico-biológico entre estos anillos y corrientes de meandro con la distribución de zonas de pesca de peces pelágicos al interior de la ZTC frente a la región central de Chile (Hormazábal *et al.*, 2012)

4.3. Principales forzantes que modulan el crecimiento, sobrevivencia y transporte de estadios tempranos de anchoveta

Las relaciones entre la distribución y abundancia de recursos pesqueros y la variabilidad biofísica del hábitat en que se desarrollan, especialmente en las etapas tempranas de la historia de vida de los recursos, se establece como un tópico crucial en la asesoría hacia el manejo pesquero. Estas relaciones actúan a diferentes escalas de variabilidad, actuando sobre procesos como la alimentación, el transporte pasivo y comportamiento migratorio, la reproducción y el desove, el crecimiento, reclutamiento, entre otros. Recientemente, Parada *et al.* (2013) realizaron una detallada revisión de las relaciones ambiente-recursos en especies pelágicas, demersales y bentónicas de Chile.

Se ha señalado que el acoplamiento entre el océano y la atmósfera determinan las principales características oceanográficas y dinámicas del Pacífico Suroriental. A su vez, esta variabilidad oceanográfica, afectada por el modo climático incide en las poblaciones marinas (Yáñez *et al.*, 2001; Hormazábal *et al.*, 2004; Yáñez *et al.*, 2008; Vásquez, 2012; Parada *et al.*, 2013). Los ciclos de vida de los recursos pesqueros se encuentran a menudo acoplados al ciclo anual del ambiente biofísico (especialmente el latitudes intermedias con fuerte componente estacional), por lo que las escalas intra-estacional, estacional e interanual son las que más se han estudiado en el análisis de las relaciones ambiente-recurso.

Perturbaciones forzadas tanto local como remotamente, en conjunto con la dinámica de estructuras de mesoescala y sub-mesoescala (Thomas *et al.*, 2001a, 2004; Nieto, 2009; Hormazábal *et al.*, 2004; Letelier, 2010), pueden verificar cambios significativos en la producción biológica del océano costera y de regiones oceánicas (Correa-Ramírez *et al.*, 2007; Morales *et al.*, 2007) pudiendo afectar la distribución y abundancia de recursos pesqueros pelágicos y demersales.

Estos modos de variabilidad climática son reconocidos por sus impactos en el Pacífico suroriental; sin embargo, en la revisión sobre relaciones ambiente-recurso realizada recientemente por Parada *et al.* (2013) se señala la existencia de aún muchas interrogantes sobre los mecanismos responsables de la variabilidad climática y el impacto de estos procesos sobre los recursos marinos en esta región. No obstante existen distintos factores ambientales que inciden o modulan procesos biológicos, en escalas de variabilidad distintas, durante todo el ciclo de vida de los recursos (Bailey, 1989; Quiñones *et al.*, 1997; Hormazábal *et al.*, 2004; Arcos *et al.*, 2004; Yáñez *et al.*, 2008; Montecinos & Gómez, 2010), la gran mayoría de las investigaciones destaca el impacto de la variabilidad ambiental sobre los estados tempranos de los individuos y en el proceso de reclutamiento (Vargas *et al.*, 1996; Llanos & Castro, 2006; Cubillos *et al.*, 2007; Castro *et al.*, 2009; Parada *et al.*, 2012; Soto-Mendoza *et al.*, 2012; Vásquez *et al.*, 2013).

Al margen del número de estudios desarrollados en las últimas dos décadas orientados a establecer relaciones entre ambiente y recursos pesqueros, que los mecanismos involucrados en la fluctuación interanual del reclutamiento, sigue siendo incierto en la mayor parte de los recursos, por lo que señalan la necesidad de incorporar explícitamente factores ambientales en el proceso de asesoría para el manejo (evaluación pesquera), el cual debe considerar, por una parte, la síntesis o integración del conocimiento multidisciplinario empírico para vincular los procesos físicos con las respuestas biológicas, y por otra, desarrollar modelos numéricos o estadísticos e implementar modelos operativos capaces de evaluar alternativas de manejo en un ambiente variable, destacando algunos estudios en esta línea ya sea a través de modelos de producción, modelos que usan redes neuronales y

asociados a escenarios de cambio climático (Freón & Yáñez 1995; Gutiérrez-Estrada *et al.*, 2007; Yáñez *et al.*, 2014).

Los procesos climático-oceanográficos que operan en las escalas intra-anual (estacional) e interanual y que modulan la variabilidad oceanográfica de la región costera del sistema de surgencia de Chile central, tienen efecto sobre diferentes procesos en la historia de vida de peces pelágicos pequeños en esta región (Cubillos, 1999; Cubillos *et al.*, 2009; Castillo *et al.*, 2010). Diversos estudios han sugerido el acoplamiento del período de desove durante el término del invierno e inicios de primavera con la alternancia entre convergencias/divergencias en la región centro-sur de Chile, que permite aminorar las pérdidas larvales por el transporte mar afuera, y establecer un enriquecimiento primaveral que posibilite a juveniles crecer a altas tasas y reclutar a la pesquería al término del verano (Cubillos, 1999). Por otra parte, se ha establecido una asociación positiva de anchoveta con anomalías positivas de la TSM en el centro-sur de Chile (Arteaga *et al.*, 2013), y una buena asociación entre el reclutamiento de anchoveta y teleconexiones accionadas durante El Niño que modulan interanualmente el inicio de la estación de surgencia (Gómez *et al.*, 2012, Gómez, 2008) afectando reclutamiento debido a la reducción en la disponibilidad de alimento a pre-reclutas.

La Tabla I muestra los principales forzantes físicos que modulan la dinámica del sector costero de Chile centro-sur, sus escalas de variabilidad y los procesos asociados, así como también la identificación de las variables ambientales que impactan sobre el proceso de reclutamiento de anchoveta en la región de estudio. Se ha considerado especialmente las escalas intra-estacionales, estacionales e interanuales como las escalas de variabilidad que han demostrado mayor influencia en los procesos físicos y su modulación sobre los procesos biológicos en la región costera de Chile centro-sur.

Tabla I. Variabilidad física en Chile centro-sur. Principales forzantes, procesos y escalas.

Escala	Forzantes locales y remotos	Procesos	Respuesta física	Respuesta biológica	Referencia
Intra-estacional	- Ondas de Kelvin intraestacionales (30-60 días) - Ondas atrapadas a la costa - Ondas de plataforma		- Estructuras de submesoescala (<50km) - Frentes	- Filamentos - Incremento producción local	-Zhang 2005 - Xu <i>et al.</i> 2005 - Pizarro, 1999 -
Estacional	- Viento paralelo a la costa - Inestabilidades baroclinas - Topografía costera y batimetría - Ondas atrapadas a la costa	Surgencia costera	- Circulación de Ekman (divergencia) - Retención a la costa (convergencia) - Frente costero - Ascenso nutriclina - Ascenso oxiclina - Contracorriente pegada a la costa - Remolinos de meso-escala - Filamentos y meandros	- Incremento producción local - Pérdidas advectivas mar afuera (huevos/larvas) - Retención de estados larvales - Poblaciones locales de zooplancton - Exportación producción costera a océano interior - Estrategias reproductivas de pequeños pelágicos - Reclutamiento	- Yuras <i>et al.</i> 2005, - Letelier <i>et al.</i> 2009 - Letelier 2010 - Strub <i>et al.</i> 1998 - Leth & Shaffer 2001 - Hormazábal <i>et al.</i> 2004 - Gómez <i>et al.</i> 2012 - Morales <i>et al.</i> 2012 - Parada <i>et al.</i> 2013 - Montecinos <i>et al.</i> 2013 - Hormazábal <i>et al.</i> 2002 - Leth & Middleton, 2006 - Strub <i>et al.</i> 1998 - Leth & Shaffer 2001 - Rutllant <i>et al.</i> 2004a
Interanual	- Oscilaciones de Maden-Julian - Ondas de Kelvin ecuatoriales - Ondas de Kelvin atrapadas a la costa - Ondas de Rossby - Patrón de vientos	- El Niño-Oscilación del Sur	- Incremento TSM - Intensificación de la corriente hacia el polo - Profundización de termoclina, nutriclina, oxiclina - Incremento nivel del mar - Debilitamiento de vientos Norte (fines invierno) - Debilitamiento de vientos Sur (primavera)	- Decremento de la producción primaria - Inhibición del efecto de surgencia costera - Dominio fitoplancton de pequeño tamaño -	- Shaffer <i>et al.</i> 1999 - Hormazábal <i>et al.</i> 2001 - Pizarro 1991, 1999 - Strub <i>et al.</i> 1998 - Fuenzalida <i>et al.</i> 2008 - Soto-Mardones <i>et al.</i> 2004 - Pizarro & Montecinos 2004 - Escribano <i>et al.</i> 2004

4.4. Poblaciones de anchoveta y sardina común como objeto de estudio mediante modelación biofísica

Los procesos climático-oceanográficos que operan en las escalas intra-anual (estacional) e interanual y que modulan la variabilidad oceanográfica de la región costera del sistema de surgencia de Chile central, tienen efecto sobre diferentes procesos en la historia de vida de peces pelágicos pequeños en esta región (Cubillos, 1999; Cubillos *et al.*, 2009; Castillo *et al.*, 2010). Diversos estudios han sugerido el acoplamiento del período de desove durante el término del invierno e inicios de primavera con la alternancia entre convergencias/divergencias en la región centro-sur de Chile, que permite aminorar las pérdidas larvales por el transporte mar afuera, y establecer un enriquecimiento primaveral que posibilite a juveniles crecer a altas tasas y reclutar a la pesquería al término del verano (Cubillos, 1999). Por otra parte, se ha establecido una asociación positiva de anchoveta con anomalías positivas de la TSM en el centro-sur de Chile (Arteaga *et al.*, 2013), y una buena asociación entre el reclutamiento de anchoveta y teleconexiones accionadas durante El Niño que modulan interanualmente el inicio de la estación de surgencia (Montecinos & Gómez, 2010; Gómez, 2008) afectando reclutamiento debido a la reducción en la disponibilidad de alimento a pre-reclutas.

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 anchoveta 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 el proceso de transporte y mortalidad de huevos y larvas con saco vitelino de anchoveta bajo un escenario climatológico. No

obstante estas aproximaciones han sido un avance significativo en el desarrollo de la línea de investigación biofísica en pesquerías, carecen de la extensión temporal y la variabilidad interanual para ser utilizadas en la exploración de medidas de manejo que apoyen de manera eficiente a la administración de estos recursos en Chile. Sin embargo, abren la posibilidad de nuevas hipótesis para explicar la relevancia de zonas de crianza asociadas con la región sur de Chile y sus implicancias para el reclutamiento.

En este contexto, en el presente proyecto tiene como objetivo central el implementar un sistema de modelación biofísica para anchoveta que posibilite la generación de estimaciones de reclutamiento independientes, que incorporen de manera explícita el efecto de señales ambientales y su variabilidad intra e interanual y generar un escenario comprensivo en comparación a los procesos biofísicos relevantes en la historia de vida temprana de la anchoveta.

5. METODOLOGÍA DE TRABAJO

5.1. Esquema de modelación y herramientas utilizadas

La implementación de un modelo biofísico espacialmente explícito que permita obtener índices de reclutamiento y probar hipótesis relacionadas con la historia de vida de la anchoveta requiere de la implementación de un sistema de modelación complejo (Figura 1). Un sistema biofísico comprende un modelo hidrodinámico (que debe ser validado) que se acopla a un modelo biológico que necesariamente debe contener información realista y continua asociada a la población de anchoveta. Este modelo acoplado permite conocer la historia de vida de cada uno de los individuos modelados (desde huevo a pre-recluta) y en conjunto generar índices de reclutamiento a nivel poblacional. Posteriormente, estas estimaciones serán contrastadas con otras piezas de información asociadas al reclutamiento (e.g. estimaciones desde modelos de dinámica edad estructurados, mediciones acústicas, proporción de juveniles presentes en la captura, etc) y en conjunto permitirán generar lineamientos hacia el sistema de administración pesquera. Las herramientas computacionales que se han utilizado en la modelación se enumeran en la Tabla II.

Tabla II. Herramientas utilizadas en el proceso de modelación biofísica para la obtención de índices de reclutamiento.

Herramienta	Función	Sitio web	Referencia
ROMS agrif	Modelación hidrodinámica	http://romsagrif.org	Penven <i>et al.</i> , 2006; Shchepetkin & McWilliams, 2005
ICHTHYOP	Modelación biofísica	http://www.ICHTHYOP.org	Lett <i>et al.</i> , 2008
AD Model Builder	Modelación no lineal para estimación de parámetros en modelos de dinámica poblacional y evaluación de stock	http://admb-project.org	Fournier <i>et al.</i> , 2012
R	Lenguaje y ambiente de programación que será utilizado en el análisis estadístico de los resultados de la modelación	http://www.r-project.org	Dalgaard, 2008
Matlab	Lenguaje y ambiente de programación que será utilizado en el análisis estadístico de los resultados de la modelación y en la graficación de resultados biofísicos y oceanográficos	http://www.mathworks.com	Moler, 1984

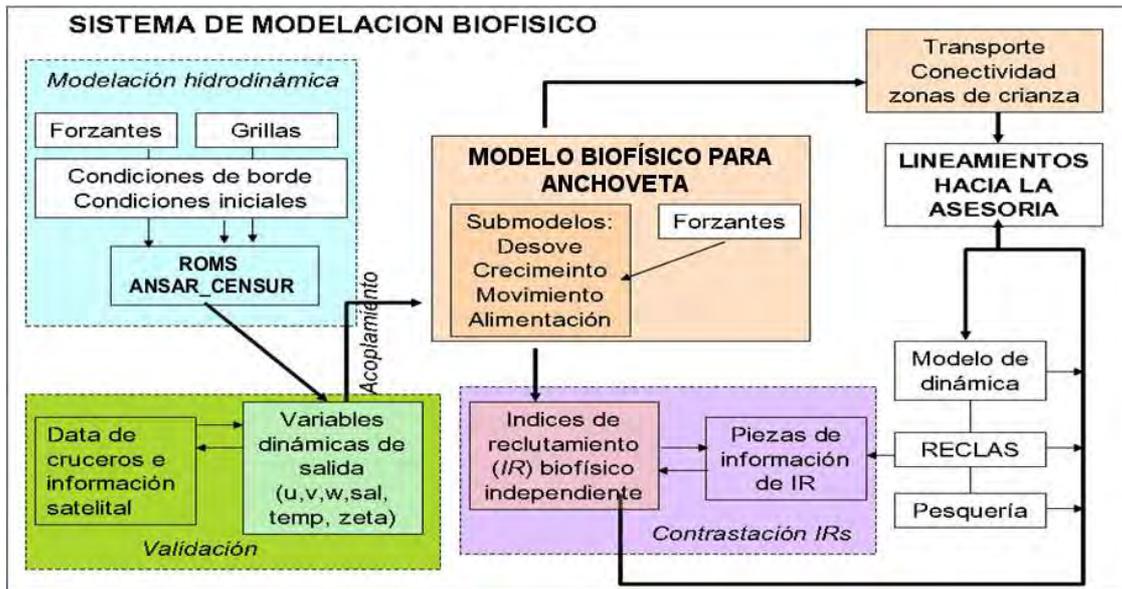


Figura 1. Esquema de trabajo para el estudio de la historia de vida temprana de anchoveta orientado a la dinámica del reclutamiento en la zona centro-sur e Chile bajo un enfoque de modelación biofísica.

El trabajo está organizado en función de un equipo de trabajo conformado por 4 grupos de trabajo: modelación hidrodinámica, modelación biofísica, forzantes físicos, oceanográficos y climáticos, y dinámica poblacional. Este trabajo ha sido apoyado por expertos de vasta experiencia, los que contribuyeron de manera significativa en diferentes etapas de la investigación para el logro de los objetivos.

5.2. Modelo Hidrodinámico

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 anchoveta en la zona centro-sur de Chile. A continuación se describe el modelo hidrodinámico que en la ejecución del presente proyecto.

5.2.1. Configuración del modelo hidrodinámico ROMS

El modelo hidrodinámico utilizado en la modelación biofísica constituye un componente esencial, pues las condiciones que experimentan los individuos modelados en cada paso de

tiempo (ubicación espacial, condiciones físicas del ambiente, etc) son producto de la interacción del comportamiento individual (movimiento, natación) con el modelo hidrodinámico que simula el ambiente oceánico donde habita, en este caso, la anchoveta. En consecuencia es altamente necesario contar con un modelo validado que represente los principales rasgos del sistema oceanográfico donde se desarrolla la población de anchoveta.

En el presente estudio se ha utilizado el modelo regional ROMS (Regional Ocean Model System) detalles del modelo en Shchepetkin & McWilliams (2003) y Shchepetkin & McWilliams (2005). Específicamente se utilizó la versión ROMS_AGRIF v3.0 desarrollada por el IRD en Francia (www.romsagrif.org) e implementado por expertos nacionales en el marco de el presente proyecto para la zona costera del centro sur de Chile, el cual ha sido validado por medio de diversas aplicaciones metodológicas. El modelo ROMS resuelve las ecuaciones primitivas de la hidrodinámica numéricamente, almacenando la información de las variables requeridas, para cada paso de tiempo y durante todo el periodo que se desea modelar. El algoritmo ROMS está paralelizado, por lo que permitió correrlo en varios procesadores por medio de su memoria compartida o memoria distribuida. El modelo ROMS es ampliamente utilizado por la comunidad científica para realizar estudios de circulación del océano. El modelo resuelve la circulación asociada al hábitat de los lugares de desove y desarrollo temprano de la anchoveta utilizado un modelo ROMS. La modelación mediante ROMS tuvo varias etapas en su desarrollo, destacando en este proyecto la realización de un anidamiento *off-line* de dominios mediante el método *roms2roms* (Mason *et al.*, 2010), el cual permite obtener a partir de un dominio amplio (llamado dominio padre) un dominio acotado de mayor resolución espacial (llamado dominio hijo). A continuación se presentan las configuraciones del modelo hidrodinámico dominio padre (MH padre) y el modelo hidrodinámico dominio hijo (MH hijo).

5.2.2. Configuración del MH padre

Para realizar la modelación, se comenzó con la configuración del dominio padre, se creó la grilla y máscara de la zona a modelar (tamaño de las celdas de la grilla), se incorporó la batimetría del fondo marino, los forzantes atmosféricos (esfuerzo del viento) y superficiales (por ejemplo: flujo y transporte superficial del calor, flujo de agua dulce), y por último las

condiciones iniciales y las condiciones de bordes laterales, tales como temperatura, salinidad, corrientes y elevación de la superficie del mar. Esta modelación desarrollada mediante ROMS es del tipo interanual, abarcando 2 décadas (1993-2015) que corresponden al periodo con disponibilidad de forzantes, condiciones de borde e iniciales ininterrumpidas provenientes de un mismo producto.

La grilla de modelación hidrodinámica utilizada para este estudio involucra la escala espacial que describe la costa centro sur de Chile, de tal manera de incorporar todas las posibles áreas de desove de anchoveta y sus trayectorias de transporte. El dominio padre de 10 km de resolución espacial, comprende desde los 25°S hasta los 50°S y desde los 70°W hasta los 85°W (Figura 2). Este dominio tiene 149 x 320 puntos de grilla. La configuración del MH padre comprende 32 niveles verticales, niveles que se distribuyen de manera más densa en la superficie. Cabe destacar que el procesamiento de los archivos de entrada se realizó mediante la herramienta MATLAB ROMSTOOLS (Penven *et al.*, 2006).

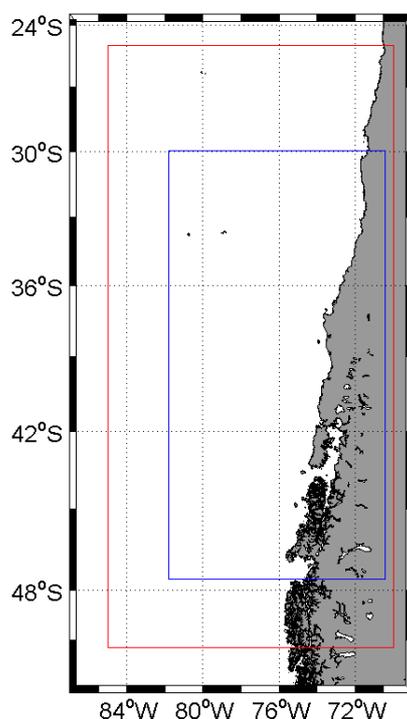


Figura 2. Dominio abarcado por el modelo ROMS. Recuadro color rojo representa el dominio padre con resolución espacial de 10 km, el recuadro azul corresponde al dominio hijo con resolución espacial de ~3 km.

Las condiciones iniciales y de borde que utilizó el MH padre corresponden al producto global ECCO Kalman Filter (kf080), que consiste de un sistema de asimilación de datos oceánicos global, ECCO está basado en el modelo de circulación general del MIT (MITgcm). Este modelo global incorpora datos altimétricos, tales como altura superficial del mar del modelo TOPEX/Poseidon y altimetría del modelo ERS-1/2. Por otro lado ECCO utiliza forzantes hidrográficos obtenidos de diferentes métodos observacionales, tales como datos CTD de temperatura y salinidad provenientes de secciones del proyecto The World Ocean Circulation Experiment (WOCE), Batitermógrafos reemplazables (XBT) para perfiles verticales de temperatura, temperatura superficial del océano y salinidad superficial del océano del análisis de Reynolds (Reynolds, 1998), boyas ARGO para temperatura y salinidad, campos de temperatura y salinidad de Levitus. La resolución temporal de estos datos es de 10 días, la resolución espacial es de 1° con 46 niveles de resolución vertical.

Por otro lado, los forzantes atmosféricos utilizados por MH padre provinieron del producto NCEP2, el cual utiliza un sistema de análisis/pronóstico para realizar asimilación de datos usando datos del pasado a partir de 1979 hasta el año 2016. Estos datos fueron proporcionados por el PSD (Physical Sciences Division) NOAA/OAR/ESRL, ubicada en Boulder, Colorado, EE.UU. desde su sitio web: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>. Los datos tienen una resolución temporal de 6 horas y resolución espacial de 1.9° aproximadamente. La información que contiene estos forzantes corresponden a la temperatura a 2 metros de la superficie del mar, el flujo medio de radiación de onda larga ascendente y descendente en la superficie, el flujo medio de radiación solar ascendente y descendente en superficie, la tasa de precipitación en superficie, la humedad específica a 2 metros de la superficie, la temperatura superficial del mar, las componentes del viento U y V a 10 metros de altura. Cabe mencionar que el MH padre no incorporó el forzante marea. Por otro lado, la resolución temporal de las salidas del MH padre es diaria, lo cual es suficiente para resolver los fenómenos oceanográficos que modulan la dinámica del transporte de estadios tempranos de la anchoveta. La batimetría del fondo marino que se utilizó en este modelo proviene del producto ETOPO2 con una resolución espacial de 4 km.

El MH padre se corrió íntegramente en el clúster que posee el Instituto de Investigación Pesquera. El tiempo de modelación, para el dominio padre, por mes fue aproximadamente de 4 horas, por lo tanto para el periodo completo de modelación de este dominio se necesitaron un mes y 10 días aproximadamente de modelación continua e ininterrumpida. La configuración del MH padre contempló seleccionar algunas opciones en el archivo cppdefs.h, las cuales se presentan a continuación:

- Paralelización: OPENMP.
- Bordes abierto: OBC_WEST, OBC_NORTH, OBC_SOUTH.
- Configuración de la grilla: CURVGRID, SPHERICAL, MASKING.
- Dinámica del modelo: SOLVE3D, UV_COR, UV_ADV.
- Advección de trazadores laterales: TS_HADV_RSUP3.
- Nudging: ZNUDGING, M2NUDGING, M3NUDGING, TNUDGING, FRC_BRY, Z_FRC_BRY, M2_FRC_BRY, M3_FRC_BRY, T_FRC_BRY
- Mezcla vertical: LMD_MIXING, LMD_SKPP, LMD_BKPP, LMD_RIMIX, LMD_CONVEC, LMD_NONLOCAL.
- Ecuaciones de estado: SALINITY, NONLIN_EOS, SPLIT_EOS.
- Forzante superficial: BULK_FLUX, BULK_FAIRALL, BULK_LW, BULK_EP, BULK_SMFLUX.
- Capa esponja: SPONGE, SPONGE_GRID.
- Forzante fondo: ANA_BSFLUX, ANA_BTFLUX.
- Condiciones de borde: OBC_M2FLATHER, OBC_M3ORLANSKI, OBC_TORLANSKI.

Las corridas del MH padre son mensuales, es decir se tiene un archivo de salida para cada mes que contiene la información diaria de las salidas hidrodinámicas.

5.2.3. Configuración del MH hijo

El proceso de configuración del modelo hijo se describe en la Figura 3. Una vez que se compiló y lanzó el MH padre, se comenzaron a obtener las respectivas salidas que se

utilizaron en el MH hijo. Se realizó la configuración del MH hijo, se crearon la grillas y se incorporó la respectiva batimetría heredada de MH padre. Luego, se utilizaron las salidas del MH padre, para generar las condiciones de borde e iniciales que requiere el MH hijo, los forzantes atmosféricos se obtuvieron de una interpolación de los forzantes del utilizados por el MH padre. El MH hijo es de tipo interanual, abarcó 2 décadas (1993-2015) que corresponden al periodo con disponibilidad de forzantes, condiciones de borde e iniciales ininterrumpidas provenientes de un mismo producto. La resolución temporal de las salidas del MH hijo es diaria, lo cual es suficiente para resolver los fenómenos oceanográficos que modulan la dinámica del transporte de estadios tempranos de la anchoveta.

El MH hijo tiene ~3 km de resolución espacial, y resolución temporal diaria, comprende desde los 30°S hasta los 47°S y desde los 70°W hasta los 81°W (Figura 2). El dominio hijo tiene 339 x 684 puntos de grilla. La configuración del MH hijo comprende 32 niveles verticales, niveles que se distribuyen de manera más densa en la superficie. El MH hijo utilizó forzantes atmosféricos provenientes del producto NCEP2, el cual utiliza un sistema de análisis/pronóstico para realizar asimilación de datos usando datos del pasado a partir de 1979 hasta el año 2016. Estos datos fueron proporcionados por el PSD (Physical Sciences Division) NOAA/OAR/ESRL, ubicada en Boulder, Colorado, EE.UU. desde su sitio web: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>. Los datos tienen una resolución temporal de 6 horas y resolución espacial de 1.9° aproximadamente. La información que contiene estos forzantes corresponden a la temperatura a 2 metros de la superficie del mar, el flujo medio de radiación de onda larga ascendente y descendente en la superficie, el flujo medio de radiación solar ascendente y descendente en superficie, la tasa de precipitación en superficie, la humedad específica a 2 metros de la superficie, la temperatura superficial del mar, las componentes del viento U y V a 10 metros de altura.

A diferencia del MH padre, el MH hijo incluyó las mareas provenientes del modelo global TPXO7, el cual a su vez asimila datos de anomalías del nivel del mar provenientes del modelo TOPEX/Poseidon, estos modelos de marea proporcionan amplitudes complejas de la elevación de la superficie del mar para los 8 armónicos constituyentes primarios (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1), así mismo incorpora los armónicos de periodo largo (Mf, Mm) y

los no lineales (M4, MS4, MN4), estos datos tienen resolución de $1/4^\circ$. El MH hijo utilizó las componentes de marea: M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1, Mf y Mm.

Como se ha descrito, el MH padre utilizó condiciones de borde e iniciales provenientes del producto ECCO, sin embargo el MH hijo utilizó condiciones de borde e iniciales provenientes del proceso de anidamiento off-line ROMS2ROMS explicado anteriormente. Las variables que utiliza el MH hijo para generar las condiciones de borde e iniciales son salinidad, temperatura, velocidad zonal y meridional, velocidad vertical y nivel del mar. Además, el MH hijo incluyó las descargas mensuales de agua dulce, provenientes de los 8 ríos más importantes dentro del dominio estudiado, estos son el río Mataquito, Maule, Itata, Biobío, Imperial, Toltén, Valdivia y Bueno. En la Figura 4 se muestra el Caudal medio mensual para estos ríos a lo largo del periodo de modelación (1993-2015), se aprecia la variabilidad interanual, presentando un incremento de sus caudales en la estación de invierno y una disminución en el periodo de verano. Para generar las series temporales de los caudales medios mensuales en la desembocadura de los ríos, se trabajó con datos de la Dirección General de Aguas (DGA) de Chile, sin embargo para las series faltantes se realizaron regresiones lineales simples entre estaciones. El procesamiento de los archivos de entrada, al igual que en MH padre, se realizó mediante la herramienta MATLAB ROMSTOOLS (Penven *et al*, 2007). En general, esta herramienta permite interpolar espacialmente los forzantes a la grilla del modelo ROMS, suavizar la batimetría y seleccionar las zonas de descarga de ríos.

El tiempo de modelación por mes para el MH hijo fue aproximadamente de 12 horas, por lo tanto para el periodo completo de modelación (1993-2015) se necesitaron 4 meses de modelación continua e ininterrumpida. La configuración del MH hijo contempló seleccionar algunas opciones en el archivo `cppdefs.h`, las cuales se presentan a continuación:

- Paralelización: OPENMP.
- Bordes abierto: OBC_WEST, OBC_NORTH, OBC_SOUTH.
- Mareas: SSH_TIDES, UV_TIDES, TIDERAMP.

- Configuración de la grilla: CURVGRID, SPHERICAL, MASKING.
- Dinámica del modelo: SOLVE3D, UV_COR, UV_ADV.
- Advección de trazadores laterales: TS_HADV_RSUP3.
- Nudging: ZNUDGING, M2NUDGING, M3NUDGING, TNUDGING, FRC_BRY, Z_FRC_BRY, M2_FRC_BRY, M3_FRC_BRY, T_FRC_BRY
- Mezcla vertical: LMD_MIXING, LMD_SKPP, LMD_BKPP, LMD_RIMIX, LMD_CONVEC, LMD_NONLOCAL.
- Ecuaciones de estado: SALINITY, NONLIN_EOS, SPLIT_EOS.
- Forzante superficial: BULK_FLUX, BULK_FAIRALL, BULK_LW, BULK_EP, BULK_SMFLUX.
- Capa esponja: SPONGE, SPONGE_GRID.
- Forzante fondo: ANA_BSFLUX, ANA_BTFLUX.
- Condiciones de borde: OBC_M2FLATHER, OBC_M3ORLANSKI, OBC_TORLANSKI.

Para el proceso anidamiento *off-line*, primero se lanzó el MH padre y a medida que se fueron obteniendo sus salidas se fueron utilizando para generar las condiciones de bordes e iniciales del MH hijo, no fue necesario esperar que terminara de correr el MH padre. Debido a las capacidades de cómputo del clúster de INPESCA se pudo correr simultáneamente el MH padre e hijo. Los archivos forzantes para el MH hijo (“roms_frc”) tienen un tamaño cada uno 731 Mb, los forzantes de volumen (“roms_blk”) 3.3 Gb, para el periodo total de modelación se necesitó 1.9 Tb de almacenamiento, disponible en el sistema de almacenamiento de INPESCA.

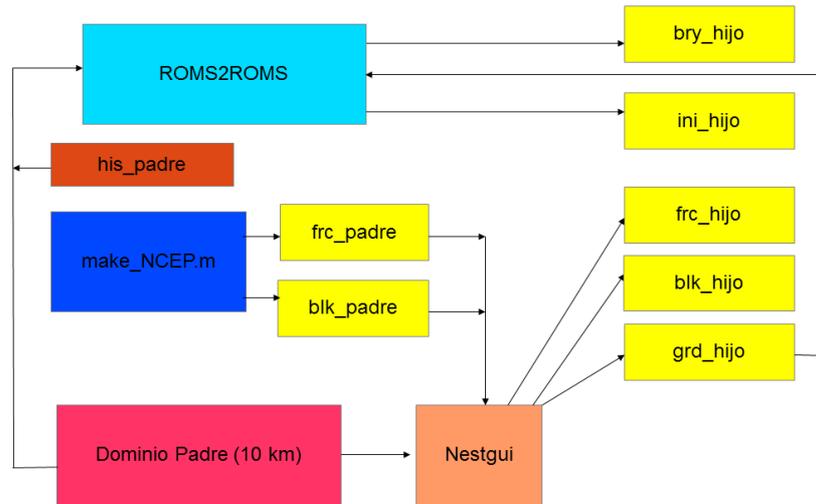


Figura 3. Metodología para generar archivos de entrada en MH “hijo”.

5.2.4. Descripción de las variables de salida

Finalmente, los archivos de salida tanto del MH padre como MH hijo han sido almacenados en formato NetCDF. Estos resultados fueron procesados para el análisis correspondiente que permiten hacer el diagnóstico del modelo. Al término del proceso se realizó la validación, comparando los resultados del modelo con los datos empíricos. Las salidas del MH padre se utilizaron para generar las condiciones de borde del MH hijo mediante el método de anidamiento *off-line* ROMS2ROMS. Luego, las salidas del MH hijo fueron utilizadas en la modelación biofísica. Las variables de las salidas del MH hijo corresponden a dos tipos, las salidas “his” (históricas) las cuales tienen resolución diaria, estas son: Temperatura, Salinidad, Corrientes U y V a diferentes profundidades y Nivel del mar, cada una de estas salidas mensuales pesa 4.2 Gb. Por otro lado existen las variables “avg” (promedios) que corresponden a un promedio mensual para cada una de las variables anteriores, cada una de estas salidas tiene un tamaño de 214 Mb aproximadamente. Por lo tanto, para todo el periodo de modelación se necesitó un almacenamiento aproximadamente de 1.5 Tb.

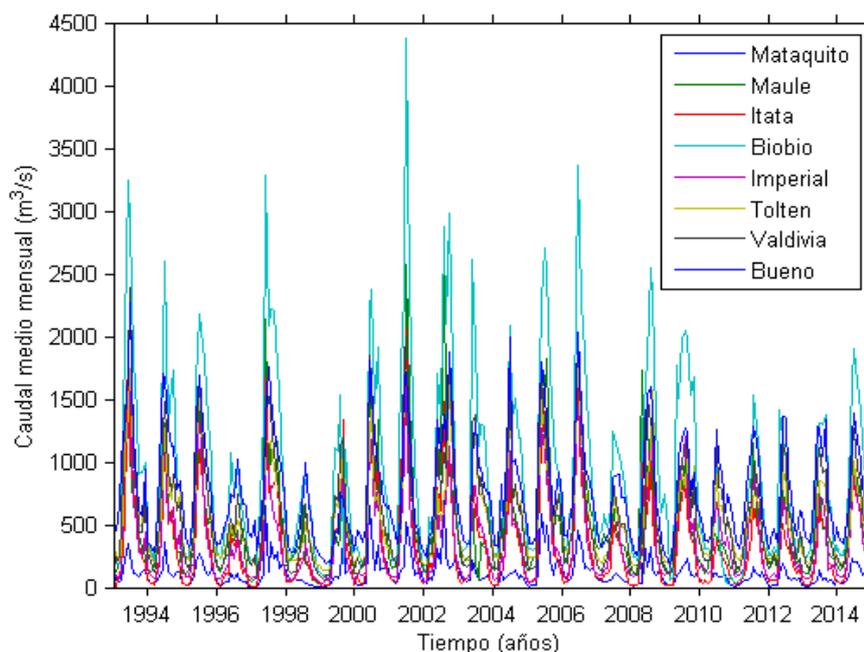


Figura 4. Caudal medio mensual para los ríos mataquito, Maule, Itata, BíoBío, Imperial, Tolten, valdivia y Bueno, los cuales fueron incorporados en el dominio “hijo” del modelo ROMS.

5.2.5. Validación del modelo hidrodinámico

Los modelos de circulación reproducen procesos oceanográficos en distintas escalas, pero generalmente no reproducen eventos específicos. En este contexto, es altamente necesario realizar un proceso insesgado que contraste datos de campo con resultados de los modelos para evaluar el desempeño de los modelos e identificar posibles falencias que podrían afectar el resultado final de la modelación biofísica y las estimaciones de reclutamiento. Debido al amplio dominio espacial requerido en el presente estudio y la alta periodicidad de las mediciones, datos satelitales resultan apropiados para ser utilizados como información de referencia. No obstante, es recomendable analizar la estructura vertical del modelo, en relación a datos observados *in situ*. En el presente estudio se realizó una validación del modelo hidrodinámico ROMS dominio hijo desde i) una perspectiva satelital interanual y ii) un análisis comparativo mediante el muestreo del modelo ROMS en la misma escala temporal y espacial que cruceros oceanográficos realizados al interior del dominio hijo anidado.

5.2.5.1. Validación basada en información satelital

La primera etapa para evaluar el desempeño del modelo hidrodinámico respecto a observaciones realizadas por satélites involucra el análisis de las señales estacionales, las cuales están definidas como la anomalía desde la señal media a lo largo de todo el dominio analizado. Se analizó comparativamente el patrón espacial estacional y la correspondencia entre ambas fuentes se verificó a través del nivel y significancia de la correlación entre ambas señales. Para explorar el desempeño del modelo ROMS en la escala interanual se removió la media climatológica mensual desde los datos observados modelados de Temperatura Superficial del Mar (TSM). Así, con el objeto de analizar el ciclo anual y la variabilidad interanual del modelo respecto a información observada se obtuvo información de la TSM desde el programa internacional PATHFINDER (1/10° de resolución espacial) (www.pathfinder.nodc.noaa.gov; periodo 1994-2012). Además, con el fin de indagar en diferencias del proceso de validación respecto a la resolución espacial del producto observado, se obtuvo información de la TSM desde el programa internacional Modis-Aqua (<https://modis.gsfc.nasa.gov/>) el cual, no obstante cubre un periodo de tiempo inferior (07/2002 - 12/2013), posee una resolución espacial más cercana al ROMS generado en este estudio (4 km). La validación y contraste de modelos hidrodinámicos se ha hecho siguiendo la metodología propuesta por Keister *et al.* (2011) y Vásquez (2012), el cual se basa en el uso de Funciones Ortogonales Empíricas (EOF) que permiten cuantificar el desempeño de los modelos en reproducir la variabilidad oceánica en tiempo y espacio. La metodología además permite probar la significancia de la correlación entre los componentes principales del modelo y de los datos observados por medio de una aproximación Montecarlo que permite cuantificar la autocorrelación en las series de tiempo.

Para aplicar la metodología de validación basada en EOF, la información original proveniente del satélite y de las salidas del modelo dominio hijo deben ser reorganizadas en matrices tiempo-espacio, de esta forma se obtiene la matriz de datos modelada (simulada) S ($m \times n$) y la observada por satélites O ($m \times n$), donde n es la longitud de la serie de tiempo en cada localidad m las matrices S y O pueden tener distinta resolución espacial y temporal, sin embargo es altamente recomendable que estas matrices estén construidas con datos observados y modelados sobre la misma región geográfica y el mismo periodo de tiempo.

La media, la desviación estándar y la tendencia son removidas desde ambas matrices (S y O). Subsecuentemente, las matrices son desglosadas en un número limitado de funciones ortogonales (*nofes*), cuya magnitud depende de la capacidad de procesamiento disponible, a través de:

$$(S * S') * ES = ES * \lambda S \quad (1)$$

$$AS = ES' * S \quad (2)$$

donde ES son las matrices de vectores propios (*eigenfunctions*) o funciones ortogonales desde la información modelada, λS son los valores propios (*eigenvalues*), AS son los componentes principales de las variables modeladas, $*$ denota un producto matricial y $'$ es la matriz transpuesta.

Para testear la significancia de la correlación entre los componentes principales observados y modelados se utiliza una aproximación Montecarlo, la cual permite cuantificar la autocorrelación en las series de tiempo. Para cada uno de los componentes principales se calculó la autocorrelación, la que se utilizó en un modelo auto-regresivo de orden 1 para generar 10.000 realizaciones de series de tiempo de ruido rojo que tienen la misma pendiente espectral y los mismos grados de confianza que la serie original. Posteriormente se calculó la correlación para cada una de las 10.000 realizaciones y se construyó una distribución de probabilidad de la correlación cruzada entre los componentes principales. Desde dicha distribución se estimó la significancia de la correlación. Si la correlación sobrepasa del 95% de ocurrencias se considera la correlación estadísticamente significativa.

5.2.5.2. Validación basada en datos hidrográficos

Con el fin de analizar localmente la estructura vertical del modelo ROMS respecto a mediciones realizadas *in situ*, se generó un método de análisis que permite replicar un crucero oceanográfico virtualmente al interior del modelo ROMS tridimensional por lo que la información tiene la misma resolución temporal y espacial, permitiendo establecer el nivel de certeza del modelo ROMS respecto a las masas de aguas predominantes. Para esto

se utilizó información proveniente de muestreos realizados en el crucero de evaluación acústica de merluza común correspondientes a los meses julio y agosto durante los años 1997-2015 y el crucero de evaluación acústica de pequeños pelágicos (RECLAS) correspondiente al mes de enero durante el periodo 1999-2008, que a través del uso de perfiladores CTDO, han registrado la temperatura y salinidad del océano en una dinámica tridimensional. Dichas bases de datos han sido proporcionadas por el FIPA, el cual ha entregado formalmente la autorización para el uso de la información en el desarrollo de este proyecto. Las estaciones oceanográficas desplegadas en los cruceros se ubicaron principalmente en la zona costera centro-sur de Chile, Figura 5. El método desarrollado involucró la toma de datos desde el ROMS de forma análoga a lo realizado por el crucero en el campo, de esta manera se obtuvo el valor de temperatura y salinidad desde el ROMS en el mismo día, misma ubicación espacial (longitud, latitud) y mismas profundidades que lo registrado por el crucero con el fin de obtener sets de datos comparables en la misma escala.

El análisis del desempeño del modelo ROMS dominio hijo a diferentes profundidades se resumió en diagramas de Taylor (Taylor, 2001). El diagrama de Taylor permite de manera gráfica resumir la similitud o cercanía entre modelo y datos, lo cual se cuantifica mediante la correlación, la raíz cuadrática media (RCM) y la desviación estándar. La correlación nos permitió determinar si dos conjuntos de valores tienen una relación lineal y proporcional, valores cercanos a 1 indican alto grado de correlación, valores cercanos a 0 señalan bajo grado de correlación. La raíz cuadrática media corresponde a la raíz cuadrada de la media, y es una medida de la magnitud de un conjunto de valores que tengan signos positivos y negativos. La desviación estándar es una medida de la dispersión de los valores respecto al valor medio de la distribución, y se calcula como la raíz cuadrática de la varianza, valores pequeños para la desviación estándar indican una alta concentración de datos alrededor de la media. Posteriormente, los datos hidrográficos se utilizaron para generar diagramas TS y al mismo tiempo se hizo lo mismo desde las salidas ROMS para evaluar si el modelo reproduce la variabilidad espacial de estas variables y si consigue rescatar la dinámica vertical de las principales masas de agua predominantes en el sector nerítico de Chile centro-sur.

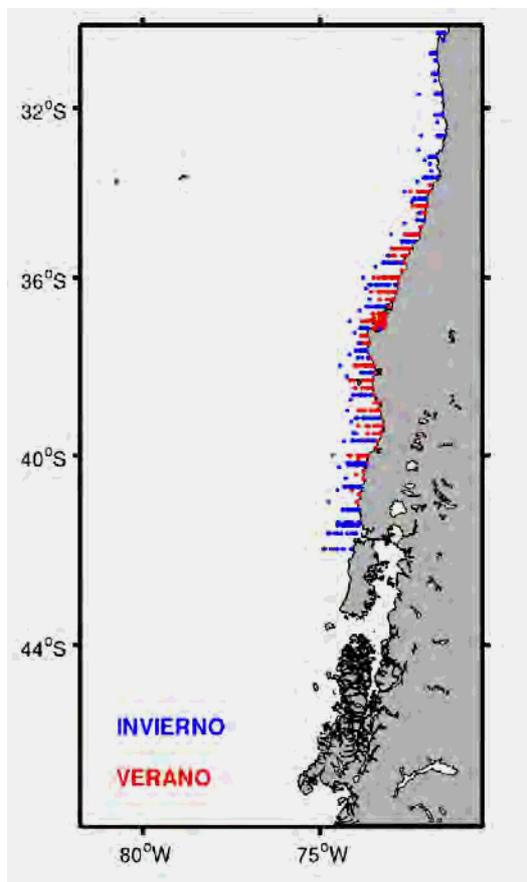


Figura 5. Ubicación de las estaciones oceanográficas asociadas a los diferentes cruces históricos realizados en Invierno y Verano en la zona costera del centro-sur de Chile.

5.2.6. Plataforma computacional para la implementación del modelo ROMS

Uno de los aspectos claves en este tipo de estudio es la plataforma computacional, la cual debe tener los recursos necesarios para ejecutar modelos de alta complejidad como lo son los modelos hidrodinámicos y biofísicos. En este contexto, INPESCA cuenta con un nodo de cálculo de última generación para dar cumplimiento a las demandas de estos modelos, el cual se puso a disposición del proyecto. El nodo de cálculo cuenta con:

- 4 Procesadores AMD Opteron 6376 de 16 núcleos de 2.3GHz/16MB (64 núcleos)
- 128GB de Memoria RAM (16x 8GB Dual Rank Registered)
- 1x Discos Duros SAS de 1TB en 7.2K rpm
- Dispositivo DVD/RW Interno
- Incluye dos puertos Gigabit Ethernet e interfaz IPMI

- Fuente de Poder Redundante
- Tarjeta PCIe Infiniband Mellanox ConnectX-2 QDR, 1 puerto, HCA Gen 2
- Sistema Operativo CentOS 6

Por otro lado INPESCA cuenta con un sistema de almacenamiento expandible hasta 24 discos, el cual cuenta actualmente con:

- 2 procesadores Intel Xeon E5-2603 de 4 núcleos de 1.8GHz/10MB (8 núcleos)
- 32GB de Memoria RAM (8x 4GB Dual Rank Registered)
- 12x Discos Duros SATA de 1TB en 7.2K rpm (RAID 0, 1, 5, 6, 10, 50, 60)
- Incluye dos puertos Gigabit Ethernet e interfaz IPMI
- Tarjeta PCIe Infiniband Mellanox ConnectX-2 QDR, 2 puertos, HCA Gen 2 (Incluye 1 Cable IB)
-

En el marco del presente proyecto se ha adquirido un nuevo nodo de cálculo, el cual se ha sumado al descrito anteriormente para generar un sistema de *clúster* para mejorar la eficiencia en el cálculo numérico (Figura 6). El nuevo nodo de cálculo cuenta con los siguientes componentes:

Nuevo nodo de cálculo, Servidor Supermicro Modelo AS-2042G-72RF4:

- 4 Procesadores AMD Opteron 6376 de 16 núcleos de 2.3GHz/16MB (64 núcleos)
- 128GB de Memoria RAM (16x 8GB)
- 2 Discos Duros 3.5'' 1TB SAS 6Gb/s 7.2K RPM 128M

Servidor de Almacenamiento

- 2 procesadores Intel Xeon E5-2603V2 de 4 núcleos de 1.8GHz/10MB (8 núcleos)
- 32GB de Memoria RAM (8x 4GB)
- 24x Discos Duros SATA de 1TB en 7.2K RPM 64M.
- Tarjeta PCI controladora de discos RAID con capacidad de niveles: 0, 1, 10, 5.

Kit Infiniband:

- 1 Switch Infiniband Mellanox InfiniScale IV QDR (8 puertos)
- 2 Tarjetas PCIe IB Mellanox ConnectX-2 (1 puerto)
- 3 Cables IB Mellanox de cobre

Expansión para el antiguo Sistema de almacenamiento:

- Kit de upgrade de 12 discos Seagate 2.5" 1TB SATA 6Gb/s 7.2K RPM 64M

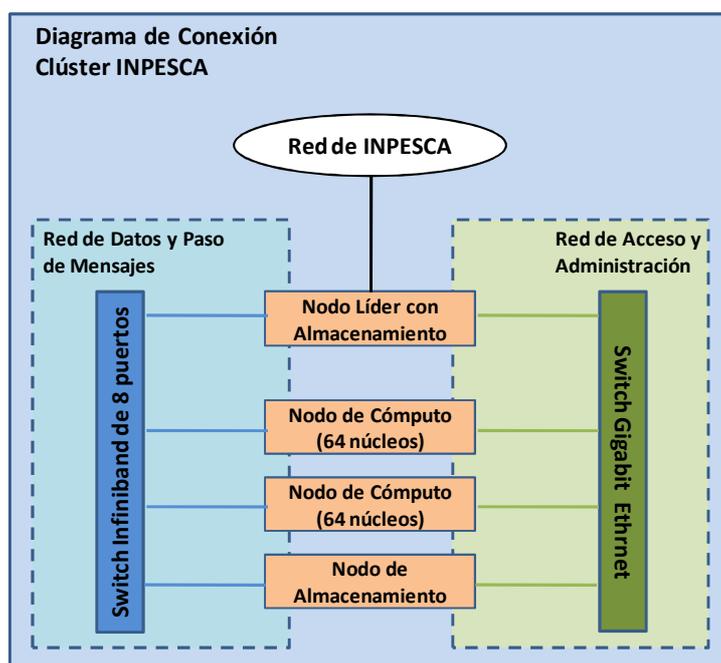


Figura 6. Diagrama de Cluster INPESCA, 128 procesadores y 48 TB de almacenamiento.

5.3. Modelo de acoplamiento biofísico

La modelación de la historia de vida temprana de pequeños pelágicos y su efecto en la dinámica del reclutamiento es altamente dependiente del modelo conceptual de la historia de vida de la especie, incluyendo una etapa crítica que es el proceso de transporte de huevos y larvas. El modelo biofísico se ha implementado en una versión personalizada de la plataforma de acoplamiento ICHTHYOP versión 3.2 (Lett *et al.*, 2008, <http://www.ICHTHYOP.org/>) que es un software libre desarrollado para el estudio de transporte de estados tempranos de peces y el estudio del efecto de factores físicos (temperatura, densidad, corrientes) y biológicos (boyantes, crecimiento, movimiento, etc)

en la historia de vida de estos organismos con foco hacia la dinámica del reclutamiento (Figura 7). El modelo biofísico implementado permite simular la historia de vida temprana de anchoveta a través de una modelación basada en el individuo (IBM) que incorpora la historia de vida de cada organismo a través del concepto de programación objeto orientado, donde el ambiente físico experimentado por cada individuo está caracterizado por las variables físicas heredadas desde el modelo hidrodinámico. Los individuos modelados están caracterizados por variables de estado a nivel del individuo. Estas variables de estado corresponden a edad (días), estado (huevo, larva con saco vitelino, larva en estado de alimentación), posición (latitud, longitud, profundidad), y estatus de sobrevivencia, entre otras.

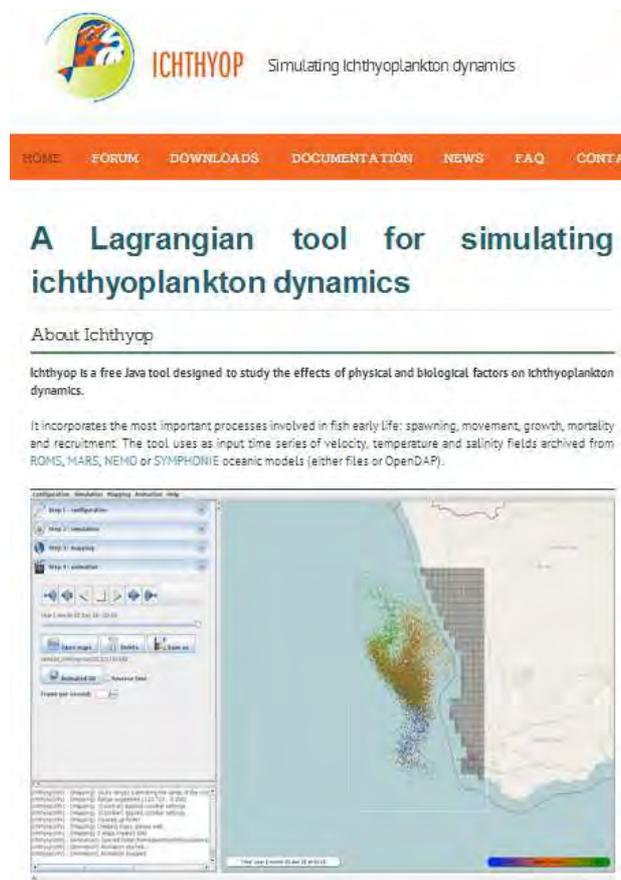


Figura 7. ICHTHYOP, modelo para configurar modelos biofísicos acoplados a modelos hidrodinámicos, <http://www.ICHTHYOP.org/>). En este sitio se encuentra disponible la documentación y descarga de archivos.

5.3.1. Variables de estado del modelo biofísico

El modelo biofísico implementado permitió simular la historia de vida temprana de pequeños pelágicos a través de una modelación basada en el individuo (IBM) que incorpora la historia de vida de cada organismo a través del concepto de programación objeto orientado, donde el ambiente físico experimentado por cada individuo está caracterizado por las variables físicas heredadas desde el modelo hidrodinámico. Los individuos modelados estuvieron caracterizados por variables de estado a nivel del individuo. Estas variables de estado corresponden a edad (días), estado (huevo, larva con saco vitelino, larva en estado de alimentación, pre-recluta), posición (latitud, longitud, profundidad), y estatus de sobrevivencia, entre otras.

5.3.2. Acoplamiento modelo hidrodinámico a modelo biofísico

Las variables de estado oceanográficas y físicas (variables de entrada: temperatura, salinidad, velocidad de corriente horizontal u y v , velocidad de corriente vertical w , altura del nivel del mar $zeta$) provinieron de una grilla discreta de modelación hidrodinámica ROMS (descrito anteriormente). De tal manera, el modelo biofísico heredó la estructura de espacial de la grilla del modelo hidrodinámico, y fue 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 fue capaz de generar trayectorias de movimiento de partículas y su evolución en el tiempo. Considerando los objetivos del presente proyecto, se requirió abordar la problemática con un esquema de modelación biofísica basada en condiciones realistas para hacer emerger patrones que expliquen la variabilidad del reclutamiento. No obstante, para llevar a cabo este esquema fue necesario identificar los compartimentos biológicos (también llamados sub-modelos) y las piezas de información necesarias para probar las hipótesis planteadas.

5.3.3. Compartimentos biológicos y submodelos

ICHTHYOP posee compartimentos biológicos genéricos. Estos compartimentos fueron modificados o re-estructurados para los requerimientos asociados a los compartimentos

biológicos específicos (detallados más adelante) que se requiere utilizar en la modelación, para seguir en el tiempo y espacio el transporte de huevos, larvas y juveniles de pequeños pelágicos. A continuación se definen los submodelos y configuración del modelo biofísico utilizados, que han sido clave para poder recrear las condiciones biológicas de las distintas etapas de desarrollo de anchoveta. También se describen en detalle las variables biológicas que fueron utilizadas como datos de entrada para el modelo biológico que necesariamente debe inicializarse con datos realistas para reproducir la dinámica del reclutamiento (Bartsch *et al.*, 2004; Vásquez, 2012; Ospina-Álvarez *et al.*, 2015).

5.3.3.1. Modelo conceptual y revisión histórica

El modelo biofísico para pequeños pelágicos se ha basado en el modelo conceptual de la historia de vida de pequeños pelágicos, el cual fue esquematizado por Cubillos (1999) para sardina común a través del diagrama mostrado en la Figura 8 y adaptado para anchoveta en el presente proyecto. El máximo de desove de anchoveta ocurre entre septiembre y octubre de cada año, pero ha mostrado signos de variabilidad interanual (Claramunt *et al.*, 2014) la cual se evaluó en el presente proyecto. La expresión espacial del desove ha sido registrada por los cruceros de evaluación de la biomasa desovante (MPDH), evidenciando persistencia en las zonas de desove, no obstante estas pueden variar en el tiempo producto de cambios ambientales. Este aspecto es fundamental para establecer las condiciones iniciales de un modelo biofísico. En este estudio se utilizó la información de distribución de huevos de anchoveta para establecer un marco metodológico para la determinación de zonas de desove dependientes de actores abióticos. Posteriormente alrededor 4 meses después ocurre el reclutamiento (individuos entre 3 y 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 anchoveta alcanzan sus condiciones de reproductivas (talla ~11,5 cm de longitud; Cubillos, 1999; Arteaga & Cubillos, 2008).

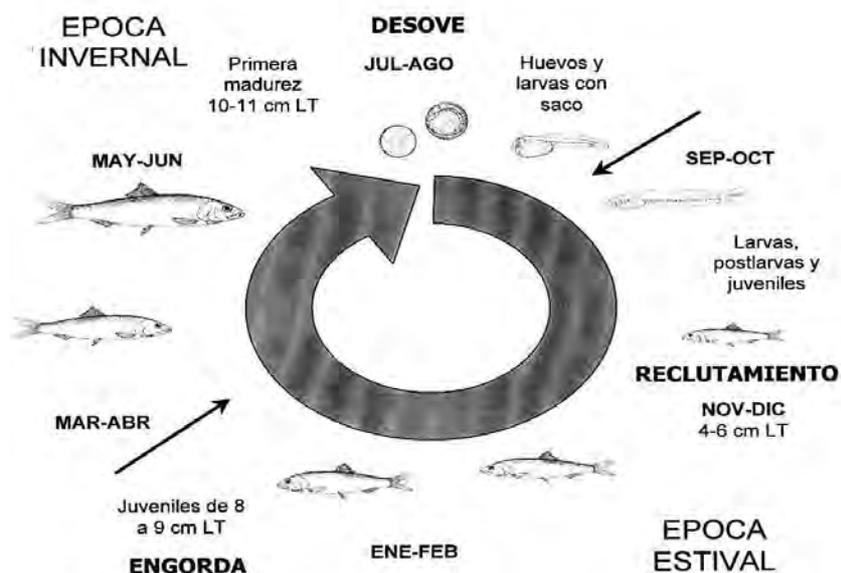


Figura 8. Modelo conceptual del ciclo de vida de pequeños pelágicos en Chile centro sur, desarrollado para sardina común por Cubillos (1999) y utilizado para anchoveta en este estudio.

Basado en el modelo conceptual, el modelo biofísico de pequeños pelágicos incluye los submodelos biológicos que se enlistan 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 III). La ejecución de este proyecto ha considerado la solicitud formal de las bases de datos de distribución de huevos y larvas de anchoveta al FIP (para cada uno de los proyectos enumerados). Además, ha sido de gran utilidad para la validación del modelo hidrodinámico contar con las bases de datos hidrográficas (CTDO) asociadas a dichos proyectos.

5.3.3.2. Submodelo de movimiento por estadio

Un punto relevante en la modelación biofísica basada en IBM's es el movimiento y comportamiento de los individuos. Estudios realizados recientemente han demostrado que la inclusión de aspectos como la boyantes de huevos (Parada *et al.*, 2008, Ospina-Álvarez *et al.*, 2012), migración vertical diurno/nocturna (Vikebø *et al.*, 2007; Ospina-Álvarez *et*

al., 2012) y el movimiento horizontal orientado (Staaterman *et al.*, 2012) pueden cambiar la trayectoria de deriva, el ambiente físico que experimentan larvas y juveniles y el consecuente destino final de los individuos. Hasta la fecha estos aspectos no han sido incorporados en las experiencias desarrolladas en anchoveta, pero han sido identificadas como un punto relevante a ser incorporado (Parada *et al.*, 2012; Soto *et al.*, 2012). El movimiento horizontal (lagrangiano) de huevos y larvas de pequeños pelágicos se estimó en el modelo biofísico usando una aproximación Runge Kutta de 4to orden 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 el presente estudio se ha recopilado evidencia para sostener, además, un esquema de flotabilidad en huevos y movimiento vertical (migración diurno-nocturna) de larvas y pre-reclutas de anchoveta para ser incorporados en el esquema de modelación biofísica. De esta manera en esta versión del modelo biofísico, el movimiento dejó de ser puramente lagrangiano (pasivo, en donde el movimiento vertical y horizontal dependen exclusivamente del modelo hidrodinámico) y se incluyó boyantes para huevos y un esquema de movimiento vertical para larvas y pre-reclutas.

La boyantes para los huevos fue calculada como una función de la densidad del huevo y la densidad del agua de mar, esta última calculada como una función de la temperatura y la salinidad (ver Parada *et al.*, 2008 para detalles). La posición vertical de los huevos es determinada por la velocidad terminal, la cual es una función de la fuerza gravitacional y la velocidad vertical de la corriente producida por el modelo hidrodinámico en cada paso de tiempo t . El esquema de boyantes solo será aplicado antes de la eclosión, esto es, entre 3,4 y 4,7 días posterior al desove (entre 9 y 13°C respectivamente; ver detalles en submodelo de crecimiento). Considerando que a la fecha se desconocen los cambios en la densidad específica de los huevos de *E. ringens* a medida que se desarrollan, en el presente estudio se consideró que la densidad disminuye ligeramente con el desarrollo y los huevos ascienden ligeramente hacia la superficie de manera que asegure que los huevos de anchoveta se distribuyan sobre la termoclina (no obstante velocidades verticales intensas puedan transportarlos a estratos más profundos de la columna de agua), de acuerdo a lo observado en campo (ver sección distribución vertical del desove) siguiendo a Ospina-Álvarez *et al.*

(2012). El comportamiento de movimiento vertical para larvas y juveniles de anchoveta en la modelación biofísica consistió de un esquema migración diurno – nocturna dependiente de la talla. Para indagar en evidencias de migración diurno-nocturna en *E. ringens*, se utilizó información reportada por Landaeta & Castro (2013), quienes a través del estudio de la funcionalidad de la vejiga gaseosa determinaron los cambios en la distribución vertical de larvas de anchoveta a lo largo del día en distintos estratos de tamaño. De esta manera, se caracterizó la máxima extensión de dispersión vertical de larvas de acuerdo a tres grupos de tamaño: 2,78 (talla de eclosión)-10 mm, 10-16 mm y >16 mm. La existencia de migración vertical se probó calculando la probabilidad de encontrar larvas de estos tamaños a distintas fracciones del día esto es: 0-4, 4-8, 8-12, 12-16, 16-20 y 20-24 hrs. Finalmente, y con el fin de generar un esquema continuo de movimiento, se ajustó un modelo sinusoidal apropiado para describir el patrón de movimiento vertical, el cual fue incorporado en la sección de migración vertical de ICHTHYOP materializando un esquema de migración vertical tamaño dependiente para larvas y pre-reclutas de anchoveta.

De esta manera, el movimiento de los individuos está definido por:

$$x(t + \Delta t) = x(t) + V_u * \Delta t$$

$$y(t + \Delta t) = y(t) + V_v * \Delta t$$

$$z(t + \Delta t) = z(t) + (V_z + V_{buoy}(a) + B(a)) * \Delta t$$

donde,

(x,y,z) = posición de los individuos; a = edad de los individuos (días desde el desove); t = tiempo; $V_{u,v,z}$ = velocidad de la corriente a lo largo de los ejes u , v o z ; $V_{buoy}(a)$ = velocidad de boyantes dependiente de la densidad del huevo y el agua de mar; B = comportamiento de migración vertical dependiente de la hora, la profundidad y la edad.

5.3.3.3. Submodelo de distribución espacial del desove

De acuerdo al esquema planteado, el proceso de modelación comienza con el desove de anchoveta, el que debe ser definido de forma espacialmente explícita en el modelo biofísico

para todas las zonas donde se ha reportado presencia de actividad reproductiva. En este sentido, la simulación espacial del desove de anchoveta en el contexto de un modelo biofísico busca ser definida de la forma más realista posible en función de la disponibilidad de información de campo. En el compartimento de desove de ICHTHYOP las áreas de desove son definidas como agregaciones de huevos virtuales cuya ubicación espacial dependerá de la disponibilidad de información respecto de la distribución de huevos de anchoveta para cada temporada reproductiva anual modelada o por medio de una aproximación metodológica. La abundancia y distribución espacial de huevos de anchoveta en la zona centro-sur de Chile, ha sido estudiada ampliamente a través de proyectos del Fondo de Investigación Pesquera y Acuicultura (FIPA) destinados a evaluar la biomasa desovante de pequeños pelágicos por medio del método de producción diaria de huevos (MPDH). La Tabla III resume los proyectos del FIP donde se ha determinado el área de desove anual de la especie durante la temporada de máxima actividad reproductiva. Muestreos planctónicos sistemáticos han sido realizados en una escala temporal de observación variable abarcando una vasta área que permite describir el área de desove de anchoveta. Detalles sobre los cruceros realizados se entregan en la Tabla IV.

Tabla III. Listado de proyectos que cuentan con datos respecto a la distribución espacial del desove de anchoveta.

Año	Proyecto	Código	Unidad ejecutora
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
2012	Ev. del stock desovante de anchoveta y sardina común en la zona centro-sur, Año 2012	FIP 12-09	UDEC
2013	Ev. del stock desovante de anchoveta y sardina común en la zona centro-sur, Año 2013	FIP 13-07	UDEC
2014	Ev. del stock desovante de anchoveta y sardina común en la zona centro-sur, Año 2014	-	IFOP

No obstante a la existencia de los citados cruceros que describen la distribución de huevos de anchoveta, el esquema de modelación biofísica ha debido abordar varias problemáticas asociadas a la distribución del desove, para satisfacer los objetivos planteados en el proyecto: i) debido a la amplitud del área de evaluación y a la duración de la temporada reproductiva, la cobertura espacial y temporal de los cruceros es inevitablemente discontinua; ii) los cambios en la distribución espacial del desove a lo largo de la temporada reproductiva no son capturados por los cruceros de evaluación directa, que entregan una visión general del proceso espacial de la reproducción; iii) el periodo de

evaluación biofísica planteado es 1994-2015, sin embargo en solo un 52% de los años existe crucero de evaluación. Por todo lo anterior, ha sido necesario recurrir a supuestos y metodologías adecuadas para describir la distribución del desove y sus cambios intra e interanuales, lo que constituyó un desafío mayor en la ejecución del presente proyecto. Uno de los desafíos relacionados con la descripción de las potenciales áreas de desove para pequeños pelágicos es la parametrización de las condiciones ambientales bajo las cuales este proceso ocurre. La dificultad en definir estas relaciones radica en que la asociación de la densidad de huevos de anchoveta respecto a variables abióticas se ha indagado comparando datos obtenidos para cada estación planctónica durante el período del crucero, lo que entrega un rango extremadamente restringido para las variables predictoras. Una de las ventajas de la modelación hidrodinámica es proveer de condiciones oceanográficas tridimensionales y continuas para el área de estudio seleccionada. Para establecer un modelo que asocie condiciones del hábitat, se registró la temperatura y salinidad superficial (5 metros de profundidad) desde el modelo hidrodinámico para cada estación de muestreo de huevos de anchoveta desde cada crucero MPDH, además se registraron estas variables para todos los puntos de grilla mas allá de las áreas registradas por los cruceros y para los meses donde no existe reproducción de la anchoveta los cuales fueron asociados a una densidad de huevos cero ("ceros falsos, pseudo-ausencias") para permitir una adecuada parametrización de las condiciones abióticas asociadas al desove de anchoveta.

Posteriormente, para la obtención de un modelo espacio-temporal predictivo del desove de anchoveta se utilizaron métodos de interpolación utilizando un modelo aditivo generalizado (GAM de su sigla en inglés). Un GAM es un método estadístico, análogo a una regresión, con la deferencia que no asume normalidad o linealidad para relacionar la variable respuesta, en este caso abundancia de huevos, con las variables predictoras, en este caso tiempo y espacio. Previo al desarrollo del modelo es requerida la preparación de una densa grilla para predecir la variable ambiental y la densidad de huevos en todos los posible puntos del área de estudio. Para evitar que la grilla se extienda mas allá de los límites observados por los cruceros, se realizó una estimación de los límites observados usando las librerías de R *spatstat* y *shachar* (Bernal *et al.*, 2007). Una vez realizado este procedimiento, se aplicaron GAM's para predecir la distribución de huevos de anchoveta

bajo condiciones ambientales. Los GAMs (Hastie & Tibshirani, 1986) son una generalización de los modelos lineales (GLM), en el cual la variable respuesta está relacionada con uno a varios "suavizadores" (funciones de suavizamiento no-lineal) de una o más covariables (Wood, 2008). La principal ventaja de los GAMs es su capacidad de modelar datos no lineales usando suavizadores no-paramétricos (Hastie & Tibshirani 1986; Wood 2008). La selección los predictores suavizados siguió el método propuesto por Wood & Augustin (2002), usando la librería de R *mgcv*. Modelos de abundancia fueron ajustados a los datos de cada crucero para predecir la probabilidad de observar huevos de anchoveta en una muestra dada como una función de las variables espaciales y ambientales. La metodología seguida fue similar a la utilizada por Bernal *et al.*, (2007) para desarrollar un modelo de desove para la sardina en las costas del Atlántico Europeo.

Un total de 12 GAM's fueron probados. El modelo final seleccionado correspondió a la siguiente ecuación:

$$egg.prod = s(Longitud, Latitud) + s(Temp) + s(Sal), family = quasipoisson$$

donde

egg.prod = densidad de huevos por m²

Longitud = coordenada espacial longitudinal de la grilla ROMS

Latitud = coordenada espacial latitudinal de la grilla ROMS

Temp = temperatura del mar a 5 metros de profundidad

Sal = salinidad del mar a 5 metros de profundidad

De esta manera, una vez obtenido el modelo más verosímil y parsimonioso se generaron distribuciones espaciales de huevos de anchoveta para cada pulso de desove de las temporadas reproductivas correspondientes al periodo 1994-2014 (ver submodelo de sincronización del desove, más adelante) con el set de condiciones ambientales ROMS del periodo correspondiente. Finalmente, se implementaron liberaciones realistas y continuas en el modulo del ICHTHYOP siguiendo lo propuesto por Ospina-Álvarez *et al.* (2013).

Tabla IV. Descripción de los cruceros efectuados para evaluar la zona de desove de anchoveta en el periodo 2002 – 2013.

Año	Periodo	Rango Latitudinal	Tipo de muestreo	Distancia inter-transecta	Número de estaciones
2002	15/08 - 09/09	33°00' - 40°00'	Sistemático	5 mn	761
2003	23/08 - 24/10	33°10' - 41°20'	Sistemático	5 mn	429
2004	21/08 - 26/09	33°00' - 40°35'	Sistemático	8 mn	295
2005	24/08 - 11/09	33°00' - 40°19'	Sistemático	8 mn	288
2007	28/08 - 22/09	33°00' - 40°28'	Sistemático	5 mn	400
2008	04/09 - 10/10	33°00' - 40°50'	Sistemático	5 mn	377
2009	02/09 - 10/10	33°00' - 41°20'	Sistemático	5 mn	381
2010	10/09 - 26/10	33°00' - 41°20'	Sistemático	5 mn	396
2011	28/09 – 15/10	34°50' – 41°20'	Sistemático	5 mn	357
2012	06/10-09/11	33°00' - 41°20'	Sistemático	5 mn	392
2013	13/10-20/10	33°00' - 41°20'	Sistemático	5 mn	352
2014	10/09 - 22/10	33°00' - 41°20'	Sistemático	5 mn	418

5.3.3.4. Submodelo de sincronización temporal del desove

La anchoveta 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; Arteaga & Cubillos, 2008). Para evaluar la duración y comportamiento de la temporada reproductiva dentro del año y sincronizar el desove virtual en el modelo biofísico se utilizó la metodología propuesta por Claramunt *et al.* (2014), la cual está en sintonía con lo determinado por el Comité Científico de pequeños pelágicos. Una vez definido el patrón de desove, se incorporó al compartimento de sincronización de desove al interior de ICHTHYOP y cada proceso de simulación anual se inició y finalizó de acuerdo a estas condiciones observadas en la población. Además, se consideró la frecuencia de desove observada para definir el intervalo entre liberaciones sucesivas de partículas en el modelo biofísico siguiendo a Alarcón (2013) quién describe una alta variabilidad interanual en este parámetro poblacional, por lo que se consideró el valor más conservador de la serie definido como 5 días entre tandas de desove. De esta manera se busca incorporar la variabilidad interanual

del comportamiento reproductivo para incrementar la certeza en la estimación del patrón espacio/temporal de reclutamiento biofísico.

El potencial reproductivo de una especie puede ser estimado por algún índice que considere aspectos fundamentales de la biología reproductiva de la especie en cuestión. En términos generales, los peces se categorizan por tener un desove total y aquellos que presentan varios desoves, correspondiendo en este último caso a desovantes múltiples (ej. anchoveta, jurel). Con el objeto de estimar el número de desoves es necesario contar con resultados del análisis histológico de los ovarios (folículos post-ovulatorios) a lo largo de la estación reproductiva, para la estimación de la fracción diaria de hembras desovantes (Proporción de la población de hembras que desova al día). Si se cuenta con estimaciones mensuales o semanales de la fracción desovante, el área bajo la curva representa el número de desoves anuales, esto es:

$$D_t = \sum_{i=1}^{12} S_i \cdot d_i$$

donde:

D_t = Número de desoves del año t

S_i = Fracción diaria de hembras desovantes del mes i

d_i = Número de días del mes i

Lamentablemente, debido a los requerimientos de muestreo y análisis de laboratorio (histología), la aplicación de esta metodología se realiza solo para períodos cortos de tiempo, generalmente para el mes máximo de desove, como en el caso de la aplicación del Método de Producción Diaria de Huevos en que se estima para el período del crucero en cuestión. Sin embargo, se han postulado *proxies* de la fracción diaria de hembras desovantes que pueden ser útiles (Claramunt *et al.*, 2002), los cuales siguen la misma tendencia temporal que la fracción desovante. Claramunt & Herrera (1994) y Claramunt & Roa (2001) proponen que un índice del número de desoves es el área bajo la evolución temporal del IGS, esto es la utilización de:

$$G_t = \sum_{j=1}^n \overline{M}_{j,t} \cdot d_j$$

G_t = Índice del número de desoves o área bajo la evolución temporal del Índice Gonadosomático (IGS) a lo largo de las semanas n o Proporción de Hembras Activas (PHA) en el año t .

\bar{M} = Índice macroscópico medio mensual (IGS y PHA) de la semana j en el año t .

d_j = Número de días de la semana j .

Lo anterior en base mensual se traduce:

$$G_t = \sum_{j=1}^{12} \bar{M}_{j,t}$$

El principal supuesto es que el área acumulada bajo la curva del índice en función del tiempo sigue una tendencia sigmoidea, a la cual se le puede ajustar un modelo entre el tiempo acumulado y el área bajo G , del tipo:

$$G_t = \frac{a}{1 + e^{-b-c \cdot t}}$$

Siendo G_t el área bajo G al tiempo t , el cual es un *proxy* del número de desoves. Los parámetros quedan representados por a , b y c :

k : nivel de asíntota (= área total)

b : parámetro de posición, tal que b/c es el tiempo en que se alcanza la mitad de la asíntota y que corresponde al tiempo en que se alcanza el máximo (= máximo reproductivo)

c : relacionado a la velocidad con que se alcanza la asíntota

Luego el ajuste a los datos observados se realiza por mínimos cuadrados, esto es por máximo verosimilitud con distribución de probabilidad normal. Desde este método se puede inferir acerca de:

- La definición del máximo reproductivo, esto es el tiempo en que se alcanza la mitad de la asíntota.
- La asíntota representa la magnitud del período reproductivo del año (potencial reproductivo), el cual es un *proxy* del número total de desoves.

- Se pueden definir cuantitativamente los criterios para definir la protección del período de desove que se pretende lograr. (i.e.: veda). Si se pretende proteger el 50% del total del período, es decir un 25% antes y después del pico de desove, este estará definido por:

$$t_x = \frac{b - \ln(\frac{1}{X} - 1)}{c}$$

donde X es 0,25 o 0,75 (Tiempo en que se alcanza el 25 o el 75% de la asíntota)

- Así, se puede definir objetivamente la duración del período reproductivo como el tiempo transcurrido en relación al acumulado expresado en la asíntota.

Estos parámetros utilizados como *proxies* de la sincronía y duración de la temporada reproductiva en especies pelágicas fueron calculados desde datos sinópticos provenientes del muestreo biológico regular realizado por el laboratorio del departamento de pesquerías de INPESCA tomando al Índice Gónado Somático (IGS) como fuente de información para los cálculos descritos anteriormente.

Considerando estos parámetros de inicio, máximo y término de la temporada reproductiva estimados para cada temporada del periodo 1994-2014, la modelación biofísica se centró en el máximo reproductivo, esto es el 50% máximo de la curva reproductiva. De esta manera, la temporada reproductiva fue variable en sincronía y extensión de acuerdo a lo observado en la población de anchoveta.

5.3.3.5. Submodelo de crecimiento

El modelo de crecimiento de huevos, larvas y juveniles de anchoveta se ha abordado desde dos perspectivas en el presente proyecto: i) un análisis temperatura-dependiente del crecimiento temprano de anchoveta, y ii) un análisis del crecimiento diario de anchoveta basado en el análisis de microincrementos diarios para establecer una curva de crecimiento para individuos de hasta un año de edad. La primera aproximación permitirá establecer un crecimiento diferencial de los individuos en el modelo biofísico de forma de establecer una relación con variables abióticas (temperatura en este caso) y generar un modelo basado en la talla, en donde los individuos tendrán una tasa de incremento por paso de tiempo basado

en las condiciones que experimenten en el espacio tridimensional del modelo hidrodinámico. Esto generará una 'duración larval pelágica' (hasta 20 mm en este caso) diferente para cada individuo, generando un mayor tiempo de transporte y una edad diferencial a la cual se considera pre-reclutado. Para esto son necesarias curvas de crecimiento empíricas bajo distintos umbrales de temperatura para establecer una relación continua de incremento en talla dependiente de la temperatura. En este estudio se utilizaron las curvas de crecimiento reportadas por Llanos-Rivera (2005) quién a partir de huevos desovados en el ambiente natural desarrolló experimentos de cultivo de larvas de anchoveta hasta que alcanzaron los 16-18 mm de longitud en ambiente controlado a temperaturas de 10, 12, 15 y 18°C. Considerando un esquema de crecimiento lineal y con los parámetros ajustados para cada desarrollo experimental se generó un esquema lineal de crecimiento temperatura-dependiente derivado de Regner (1985). Así, para una temperatura ambiental $T_{ind} = T(x_{ind}, y_{ind}, z_{ind}, t)$, los cambios en el tamaño individual (l_{ind}) a lo largo del paso de tiempo Δt fue calculado de acuerdo a:

$$\Delta G = l_{ind}(t + \Delta t) - l_{ind}(t) + g_{ind}(T_{ind})\Delta t$$

donde la tasa de crecimiento individual g es definida por la relación entre la temperatura y las tasas de crecimiento obtenida bajo condiciones experimentales de desarrollo larval y el PLD_{ind} es definido por el tiempo requerido para crecer desde el tamaño a la eclosión $l_{ind}(t_{inicial}) = 2,78$ mm, a $l_{ind}(t_{terminal}) = 20$ mm.

Al mismo tiempo, la duración del desarrollo embrionario de peces pelágicos es variable y dependiente de la exposición a la temperatura (además de otros factores endógenos), por lo que la modelación de la duración de la etapa de huevo fue desarrollada de manera temperatura-dependiente al igual que las larvas y juveniles. La tasa de desarrollo de huevos se basó en el modelo exponencial de asignación de edad por estadio de Lo (1985) desarrollado para la anchoveta de California *Engraulis mordax*. Este modelo incluye 11 estadios de desarrollo en donde $y_{i,t}$ es la edad (en horas) del estadio i de huevos de anchoveta a la temperatura T bajo la relación:

$$y_{i,T} = a_i e^{b_i T}$$

donde

a y b son parámetros del modelo.

Este modelo fue ajustado a los datos experimentales de incubación de huevos de anchoveta a diferentes temperaturas (9, 10, 11, 12 y 13°C) reportados por Sepúlveda *et al.* (2000) e incorporado en el módulo de crecimiento de ICHTHYOP.

La segunda aproximación al crecimiento temprano de anchoveta es basada en el estudio de la microestructura de los otolitos para analizar crecimiento diario. La obtención de una función de crecimiento diario es de suma relevancia para el estudio de la historia de vida temprana en peces pelágicos. La metodología utilizada en este punto se detalla a continuación.

5.3.3.5.1. Muestreo biológico

Para asegurar los requerimientos de muestreo, en términos de temporalidad, el periodo de estudio se extendió durante los primeros 10 meses de ejecución del proyecto. De acuerdo a la experiencia de este grupo de trabajo en estudios de edad y crecimiento en diferentes especies de peces, y considerando los costos de analizar las muestras, para la determinación de los parámetros de crecimiento se muestreó ejemplares del rango de tallas desde los 6,5 a 12,5 cm LT para *E. ringens* (Tabla V), estas longitudes coinciden con la formación del primer anillo de crecimiento anual (Hernández & Castro, 2000) y mayor longitud descrita como talla media de primera madurez sexual por Canales & Leal (2009).

Tabla V. Frecuencias a la talla de individuos juveniles de *E. ringens* disponibles para este estudio en el Instituto de Investigación Pesquera Talcahuano (n=168).

Clase	Frecuencia	Frecuencia (%)
6,5	5	3,0
7,0	8	4,8
7,5	21	12,5
8,0	26	15,5
8,5	24	14,3
9,0	22	13,1
9,5	13	7,7
10,0	12	7,1
10,5	11	6,5
11,0	6	3,6
11,5	5	3,0
12,0	6	3,6
12,5	9	5,4

5.3.3.5.2. Análisis de otolitos

Para análisis de los otolitos de individuos juveniles, fueron observados y medido el diámetro de cada uno bajo estereomicroscopio, marca Zeiss modelo Stemi DV4, con reglilla de 100 divisiones. El tratamiento aplicado para la preparación de incrementos de crecimiento diario en los otolitos ha seguido la técnica propuesta por Morales-Nin (1992), actualizada por Green *et al.* (2009). Para la preparación de otolitos con el propósito de observar de microincrementos, los que fueron adheridos a un portaobjeto mediante un medio de montaje completamente transparente (Crystal Bond™ 509) el que permite la posterior observación de la muestra (Figura 9). Para gastar el otolito se utilizó dos tipos de abrasivos comerciales (lijas) de diferente grano (2000 y 2500). El abrasivo más grueso (2000) se utilizó en primer lugar, una vez se obtuvo una lámina de 0,3 mm de espesor, se procedió a aplicar una pasta de pulir de 0,05µm a fin de eliminar las rallas dejadas en la muestra por los abrasivos comerciales.



Figura 9. Otolito izquierdo de anchoveta fijado en portaobjeto con medio montaje Crystal Bond.

Los incrementos de crecimiento diario aparecieron bajo el microscopio óptico como anillos concéntricos alternadamente claros y oscuros (Figura 10). Cada par de estas unidades forma un incremento de crecimiento (Pannella, 1974). Para la observación de los incrementos de crecimiento se utilizó un microscopio marca Nikon modelo Eclipse E200, con aumentos de 40x y 100x para identificar el centro del otolito, y 400x y 1000x para identificar los anillos de crecimiento diario. El recuento de incrementos se realiza desde el centro del otolito (primordio) (Figura 11, Figura 12) hasta el borde postrostral (radio previamente establecido) y a lo largo de todo el eje de crecimiento del otolito con ayuda de un retículo o reglilla ocular de 100 divisiones. Las características estructurales del otolito (discontinuidades e incrementos más anchos) son usadas como marcadores, facilitando localizar hasta donde se ha realizado el recuento.

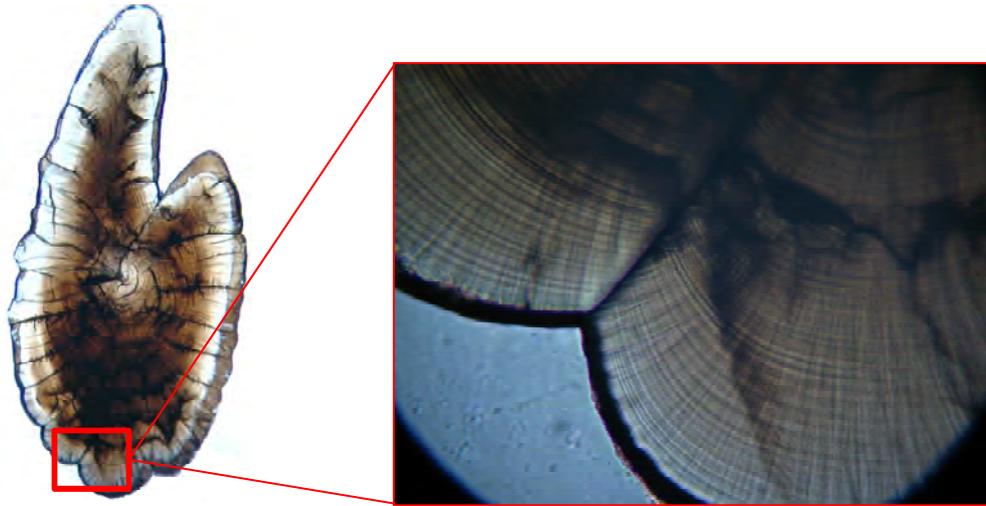


Figura 10. Otolito de *E. ringens* de 9 cm LT, izquierda otolito entero visto a 40x, derecha borde del otolito visto a 400x, se logra identificar claramente los anillos de crecimiento diario.



Figura 11. Otolito de un ejemplar de *E. ringens* de 5 cm LT y 113 días, otolito entero visto a 40x, se logra identificar claramente los anillos de crecimiento diario.

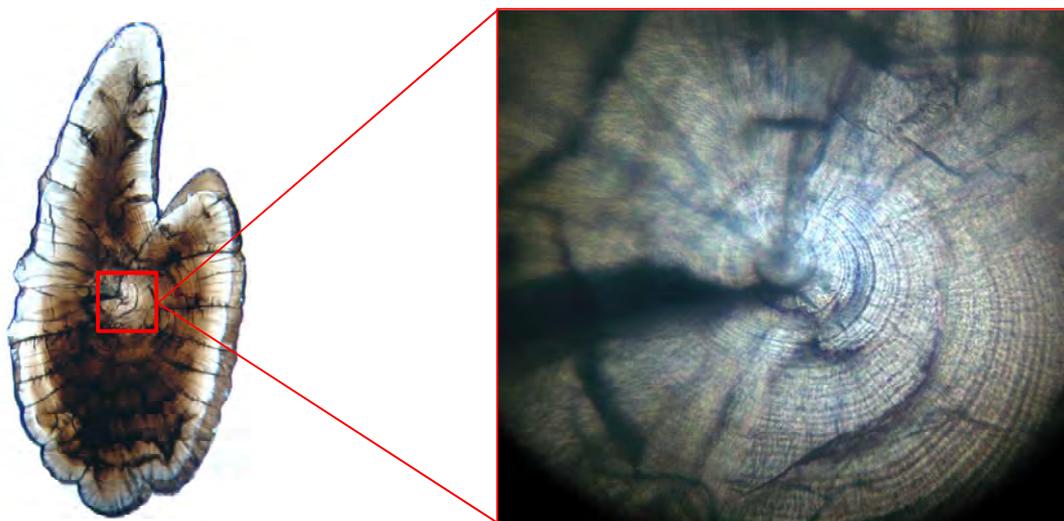


Figura 12. Otolito de *E. ringens* de 9 cm LT. Izquierda otolito entero a 40x, derecha centro del otolito visto a 400x, logrando identificar el primordio y los primeros anillos de crecimiento diario.

5.3.3.5.3. Ajuste modelos de crecimiento

Una vez terminadas las lecturas de anillos de crecimiento diario se procedió a estimar la edad de los individuos en días y ajustar un modelo de que describa mejor el crecimiento individual de estas dos especies, para ello se probaron los cinco modelos descritos a continuación:

Lineal	$Y = a + bX$
Exponencial	$Y = ae^{bx}$
Logístico	$Y = Y_{\infty} (1 - e^{-G(X-X_0)})^{-1}$
von Bertalanffy longitud	$Y = Y_{\infty} (1 - e^{-K(x-t_0)})$
Gompertz	$Y = Y_{\infty} e^{(1-e^{-G(X-Xt_0)})}$

donde: Y: Longitud (mm); X: número de microincrementos; a y b parámetros a estimar; Y_{∞} : longitud asintótica; G: tasa instantánea de crecimiento en el origen de la curva; X_0 : edad (en días) en el punto de inflexión de la curva; K: coeficiente instantáneo de crecimiento individual (días⁻¹); t_0 : edad teórica cuando la longitud es cero.

Los modelos serán ajustados mediante el método de ajuste no lineal, excepto el modelo lineal. El ajuste lineal es un método adecuado de aproximación para estimar los parámetros de modelos que no son lineales en sus parámetros. El ajuste consiste en minimizar la suma de cuadrado del error, según:

$$SCE = \sum (y - \hat{y})^2$$

Donde y es el valor observado de la variable dependiente, \hat{y} es el valor estimado. El método no lineal de mínimos cuadrados tiene los siguientes supuestos: especificación correcta del modelo, independencia de las observaciones, homocedasticidad, errores distribuidos normalmente con media cero y conocimiento de la variable independiente sin error.

Para seleccionar el modelo que explique mejor el crecimiento de *E. ringens* se utilizó el método basado en verosimilitud (Buckland *et al.*, 1997; Burnham & Anderson, 2002). El propósito del método es evaluar la fuerza relativa de las evidencias que soportan un determinado tipo de modelo. Este soporte relativo de los modelos puede ser evaluado usando la teoría de la verosimilitud combinada con el criterio de información de Akaike (AIC) (Burnham & Anderson, 2002). Un solo valor del AIC permite evaluar el soporte relativo de los datos para dos o más modelos. AIC penaliza la complejidad del modelo, dado por el número de parámetros, para alcanzar un óptimo entre exactitud y parsimonia del modelo, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$AIC = n \ln(\hat{\sigma}^2) + 2p$$

donde p : es el número de parámetros a estimar; n : tamaño de muestra; y

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum \hat{\epsilon}_i^2}{n}$$

$\hat{\epsilon}_i^2$ son residuos estimados para un modelo particular. El modelo con el menor valor de AIC es el modelo más probablemente correcto.

5.3.3.6. Submodelo de mortalidad y superindividuo

El esquema de mortalidad estuvo basada en esquemas de superindividuos (Scheffer *et al.*, 1995; Megrey & Hinckley, 2001; Bartsch & Coombs, 2004; Ospina-Álvarez *et al.*, 2013). Esta aproximación permite el uso de tasas de mortalidad realistas, incrementando el número de individuos representados por cada partícula simulada. Al comienzo de la simulación, cada superindividuo se le asigna una abundancia inicial, “número del superindividuo”, indicando a cuantos huevos/larvas el superindividuo representa. Este “número del superindividuo” disminuye al aplicar a desviación aleatoria a la tasa de mortalidad diaria para cada uno de los estadios de anchoveta representados. En cada paso de tiempo, el número total de individuos (huevos/larvas) es la suma de la variable “número del superindividuo”. El valor del “número del superindividuo” S en cada paso de tiempo $t+1$ depende el número del superindividuo en el tiempo t , la tasa de mortalidad r , y el paso de tiempo t .

$$S_{t+1} = S_t e^{-rt}$$

Las fuentes de mortalidad fueron aplicadas en el modelo utilizando la aproximación del superindividuo. Las fuentes de mortalidad que han sido incorporadas en el presente estudio estuvieron asociadas a causas conocidas de mortalidad natural: advección fuera de zonas de crianza y efecto letal de temperatura. La mortalidad por advección fue considerada siguiendo el perfil batimétrico a lo largo del área de estudio, de esta manera los individuos que al alcanzar los 20 mm de longitud total se encontraban en zonas con una batimetría más profunda que 1.000 metros (límite de la plataforma continental) fueron considerados pérdidas advectivas desde el *batch* de desove que los originaron. Además, la mortalidad por rangos de tolerancia críticos de temperatura fue incorporada siguiendo niveles obtenidos empíricamente desde experiencias de laboratorio. De esta manera, los individuos que se encontraron en etapa de huevo que alcanzaron temperaturas por debajo de los 9°C fueron considerado muertos y removidos de la simulación, al igual que individuos que estaban en etapa de larva y alcanzaron niveles por debajo de los 10° y por sobre los 20°C (ver Llanos-Rivera, 2005 para detalles experimentales).

5.3.3.7. *Procesos estocásticos*

Considerando que el desarrollo de condiciones realistas para la mayoría de los componentes de liberación basados en conocimiento empírico, los procesos estocásticos en el modelo biofísico se restringieron a los componentes de dispersión vertical y horizontal del movimiento. Por otra parte, para establecer el número apropiado de partículas (individuos) en los experimentos de transporte (simulaciones), se realizaron repetidos ensayos en que se aumentó el número de partículas a liberar (1.000, 5.000, 10.000, 15.000, 20.000, 25.000 y 30.000) determinando el promedio grupal y la desviación estándar y determinando el punto en la cual estos estadísticos se estabilizan. Se determinó que 20.000 partículas representan un punto de equilibrio y fue la cantidad de individuos simulados por cada pulso de liberación a lo largo de la temporada reproductiva. Así, se asume que no es necesario repetir las corridas y que sólo una simulación era necesario para cada conjunto de parámetros y para cada día de liberación (Ospina-Álvarez *et al.*, 2013).

5.3.4. *Simulaciones y experimentos de simulación*

Las simulaciones consistieron en el seguimiento de las posiciones y propiedades (variables de estado) de las partículas simuladas (huevos, larvas en saco vitelino, larvas en alimentación y juveniles de anchoveta) a pasos de tiempo discretos (subdiarios) y durante toda la simulación. Se inicializó el modelo, dada las condiciones de los submodelos temporales y espaciales de desove (para cada pulso de desove a lo largo de toda la temporada reproductiva y bajo el patrón espacial específico). En cada paso de tiempo cada individuo se mueve, crece de acuerdo a la temperatura (y en concordancia, experimenta en el tiempo una serie de estadios), evalúa su estado de mortalidad y finalmente de (pre) reclutamiento, de acuerdo a los submodelos propuestos. Las variables ambientales acopladas al modelo biofísico son actualizadas cada paso de tiempo para el modelo en función de la frecuencia a la que las salidas de las configuraciones del modelo hidrodinámico son almacenadas. En este estudio la frecuencia de almacenamiento fue cada 3 horas para analizar procesos subdiarios (e.g. migración vertical diurno-nocturna).

5.3.5. Variables de salida y procesos modelados

Las simulaciones y experimentos realizados generan una gran cantidad de información de salida. Estas salidas estarán caracterizadas por las variables de estado de cada uno de los individuos modelados y sus condiciones ambientales. Para cada paso de tiempo es evaluada la edad, estadio de desarrollo, longitud en milímetros, estado de sobrevivencia, número del superindividuo, longitud geográfica, latitud geográfica, profundidad, áreas geográficas (en zona de desove, de reclutamiento, bahías específicas, zonas de advección, etc.). En base a las simulaciones, se modelarán procesos de transporte, advección fuera de la costa, conectividad entre zonas de desove y potenciales áreas de crianza, movimiento individual en escala subdiaria, sobrevivencia, crecimiento 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 tridimensional (información desde los modelos hidrodinámicos). Esto entrega 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 la historia de vida de los individuos, con sus procesos claves en el espacio y en el tiempo, lo que permite generar información útil en escalas apropiadas a la especie, la cual es independiente a la actividad pesquera y constituye una fuente de información basada en el ecosistema de acuerdo a los lineamientos y recomendaciones internacionales para el manejo de las pesquerías.

5.3.6. Plataforma computacional para la implementación del modelo biofísico

La implementación de un modelo biofísico tiene altos requerimientos computacionales, pues involucra la lectura de un modelo hidrodinámico de alta resolución, el cálculo numérico de los procesos modelados y la escritura de los archivos de salida ya descritos anteriormente. Para satisfacer estos requerimientos se contó con un nodo de cálculo de última generación implementado en INPESCA, el cual es descrito en detalle en el punto 7.2.6.

5.4. Índices de reclutamiento a partir de modelación biofísica comparados con índices de reclutamiento provenientes de la evaluación de stock.

En base a cada experimento (asociado a condiciones iniciales particulares) propuesto se generaron simulaciones multidecadales (salidas de variables respuesta del modelo biofísico para la serie 1994-2014) las cuales modelaron procesos de transporte, advección fuera de la costa, conectividad entre zonas de desove y crianza, sobrevivencia, crecimiento y reclutamiento. Además una serie de índices fueron extraídos en base a estos procesos modelados, generando una serie de índices interanuales para cada proceso modelado.

5.4.1 Indicadores de reclutamiento, definición de criterios

Este criterio está relacionado con dos aspectos fundamentales, la edad-/talla de los individuos y la región en que se encuentren una vez alcanzada dicha edad/talla. De esta manera, los individuos que logran cumplir con dicho criterio han sido considerados pre-reclutados y en conjunto hicieron emerger el indicador de reclutamiento para cada año. Para el caso de anchoveta, y considerando la incorporación del proceso de crecimiento individual diferencial temperatura-dependiente el modelo biofísico fue basado en la talla y el criterio de éxito consistió en individuos que alcanzaron los 20 mm de longitud total (talla en la cual terminan la etapa planctónica y los individuos adquieren características de comportamiento similares a la de los adultos; Claramunt, 2011), y que permanecieron circunscritos a la región ubicada entre la isobata de 1000 m y la costa a lo largo de toda el área de distribución (límite del ambiente nerítico en Chile centro-sur). El índice de sobrevivencia biofísica (reclutamiento larval) correspondió a la proporción de individuos que cumplieron con el “criterio de reclutamiento”.

5.4.2. Indicadores de reclutamiento obtenidos de la modelación biofísica

Una de las características esenciales de este esquema de modelación es la capacidad de obtener indicadores espaciales y temporales en distintas escalas. De esta manera, el índice de reclutamiento larval (pre-reclutamiento poblacional) se basó en las condiciones iniciales espaciales y temporales de desove; y posterior al proceso de transporte donde actúan los procesos de crecimiento, mortalidad y la consecuente sobrevivencia se manifiesta en componentes de variabilidad temporal y espacial. El índice de sobrevivencia biofísica fue

calculado en forma continua para todos los pulsos de desove modelados, donde se cuantifican todos los individuos que cumplan con el criterio de reclutamiento. Temporalmente, esta proporción de éxito fue integrada, primero, en escala mensual para reconstruir el proceso de reclutamiento y estimar épocas con máximos pulsos de individuos juveniles (información relevante para la toma de decisiones respecto a cautelar la fracción recluta de la población de anchoveta) y luego en escala anual para analizar la capacidad del modelo en reproducir el reclutamiento del año siguiente a la modelación ($t+1$). Por otra parte, se calculó la expresión espacial del índice de sobrevivencia biofísica en base al proceso de dispersión que cada uno de los individuos desovados experimenta durante el transcurso de su historia de vida y hasta que alcanzan el criterio de reclutamiento. Esto se realizó discretizando el área distribucional del recurso y cuantificando todos aquellos individuos que cumplen con el criterio de reclutamiento en el espacio. Al provenir de la asociación de un modelo hidrodinámico con submodelos biológicos, ambos índices implícitamente integran el efecto intranual de la variabilidad de las condiciones oceanográficas y de aspectos demográficos asociados al proceso reproductivo y entregan señales claras cuando existen variaciones en las condiciones oceanográficas (transporte-dispersión-advección fuera de la costa) asociadas al proceso de retención y transporte en bahías y golfos en la región de distribución de los reclutas.

Para la obtención de un índice de (pre) reclutamiento biofísico es preciso contar con información que dé cuenta de las condiciones iniciales de abundancia del desove anual (relacionadas con el potencial reproductivo del stock desovante) y la sobrevivencia hasta alcanzar la talla objetivo (20 mm en el presente estudio). La sobrevivencia es explícitamente obtenida en el modelo biofísico, sin embargo, la magnitud del desove anual debe ser proporcionada mediante información auxiliar. En Chile centro-sur se realiza cada año desde 2002 (a excepción de los años 2003 y 2006) el crucero destinado a la estimación de la biomasa desovante mediante el método de producción diaria de huevos. Uno de los principales productos generados del análisis de la información provista por este crucero, es la producción diaria de huevos por unidad de área, además del área efectiva de desove para la especie (ver Cubillos *et al.*, 2010 para detalles), lo que permite estimar la producción total de huevos en toda el área de desove por día a lo largo de la temporada principal de

desove. Luego, considerando que en presente estudio se ha estimado la duración (en días) de la temporada de desove es posible obtener un estimado de la abundancia total del desove anual el cual puede ser utilizado para el cálculo de un índice de reclutamiento biofísico. De esta manera el índice de reclutamiento biofísico fue calculado de acuerdo a:

$$IRB = P_0 * A * TD * S_{bf}$$

donde,

IRB = Índice de Reclutamiento biofísico

P₀ = Producción diaria de huevos

A = Área efectiva de desove

TD = Duración de la temporada de desove (en días)

S_{bf} = Índice de sobrevivencia del modelo biofísico

5.4.3. Índices de transporte-advención

Se calcularon índices de transporte-advención, el cual se basa en la identificación-cuantificación de individuos que sean transportados fuera del área considerada como área de reclutamiento (fuera de la costa) que en este estudio corresponde al área comprendida entre la costa y la isobata de 1000 metros. Este índice, de la misma manera que el índice de reclutamiento, tiene una expresión temporal y espacial. Este índice permite identificar zonas que presenten consistentemente patrones de advención (fuentes de pérdida hacia la población) y su variabilidad interanual. El complemento del índice de advención es el índice de retención, el cual describe las zonas de mayor probabilidad de éxito del proceso reproductivo, asociadas a bajos niveles de advención y permanencia en sectores con condiciones apropiadas para el crecimiento y la sobrevivencia (áreas productivas y protegidas).

5.4.4. Índices de sobrevivencia por estadio

Considerando que la modelación biofísica es temporalmente continua desde el desove hasta alcanzar el criterio de reclutamiento (20 mm en este estudio) y que han sido identificados los límites de tamaño para pasar de un estadio a otro, es posible obtener indicadores de

sobrevivencia por estadio de desarrollo. En este estudio se consideran los siguientes límites de tamaño para el paso de un estadio a otro: i) estadio de huevo: es el estadio inicial y se considera durará hasta que el huevo se haya desarrollado de acuerdo al modelo temperatura dependiente descrito en el submodelo de crecimiento; ii) larvas con saco vitelino: se considera esta etapa desde la eclosión (2,78 mm) hasta los 4,42 mm; iii) larvas en primera alimentación: desde los 4,42 mm hasta los 16 mm; iv) larva en metamorfosis: entre los 16 mm y los 20 mm desde donde es considerada la etapa juvenil o pre-recluta.

5.4.5. Piezas de información para contrastar los resultados biofísicos

Uno de los desafíos de este estudio es que el modelo biofísico simule el proceso de sobrevivencia entre el desove y la etapa previa al reclutamiento. El entendimiento o identificación de los principales factores que modulan el éxito/fracaso de una clase anual resulta de interés principal para el estudio de la dinámica poblacional y para el manejo pesquero. En este contexto, es esencial el análisis comparativo de los resultados del proceso de simulación respecto de otras piezas de información que incorporen observaciones directas de la población de anchoveta. A continuación se describen algunas piezas de información con las que se compararán los resultados del modelo biofísico.

5.4.5.1. Índices de reclutamiento provenientes de la evaluación de stock de anchoveta

El Instituto de Investigación Pesquera desarrolla evaluaciones de stock anuales para los recursos sardina común y la anchoveta, utilizando para ello información proveniente del monitoreo biológico y pesquero desarrollado sobre la flota industrial y artesanal. La evaluación de stock es del tipo mono-específica y cubre información de la actividad entre la V y X Regiones, y considera un stock para la especie y donde la dinámica poblacional es dominada por los procesos mortalidad, crecimiento y reclutamiento.

Los modelos integran los siguientes elementos:

- Modelo de dinámica poblacional estructurada por edad.
- Modelos de las observaciones y penalizaciones.
- Estructura del error a través de funciones de log-verosimilitud negativas
- Proceso de estimación de los parámetros desconocidos

El presente informe de avance muestra los principales resultados referidos a la estimación de reclutamiento anual para la anchoveta sobre la base de información actualizada.

La actualización del modelo de evaluación de stock entre 1991-2014, genera estimaciones de reclutamiento para su comparación con los índices de reclutamiento provenientes de modelación biofísica, la contrastación será realizada en la escala de modelo de evaluación (anual), y se realizará de forma gráfica y por análisis de correlación entre las series disponibles. La información que alimenta la evaluación de stock de ambas especies corresponde a:

1. Series de Captura por Unidad de Esfuerzo estandariza, ($CPUE_s$)
2. Desembarques anuales (toneladas)(Y_t)
3. Biomasa total crucero RECLAS (toneladas)(B_t^R)
4. Abundancia total cruceros RECLAS (número)(N_t^R)
5. Biomasa total crucero PELACES (toneladas) (B_t^P)
6. Abundancia total cruceros PELACES (número)(N_t^P)
7. Peso medio a la edad en kilos ($w_{t,a}$)
8. Peso medio a la edad en kilos crucero RECLAS($w_{t,a}^R$)
9. Peso medio a la edad en kilos crucero PELACES($w_{t,a}^P$)
10. Matriz de captura a la edad crucero RECLAS ($CAA_{t,a}^R$)
11. Matriz de captura a la edad crucero PELACES ($CAA_{t,a}^P$)
12. Vector de madurez (μ_a)

La descripción del modelo de dinámica para ambos recursos, se describe en las Tablas VI a VIII, comenzando con la definición de símbolos y definiciones. En general, se describe un modelo con estructura de edad del tipo estadístico donde se asume de error de observación con procesos poblacionales que tiene como ecuación principal relacionando observaciones con la población la ecuación de Baranov (Tabla VIII). El detalle de funciones de verosimilitud se presenta en la Tabla IX.

Tabla VI. Símbolos y definiciones utilizadas para el modelo de evaluación de anchoveta y sardina común

Definición general	Símbolo/valor	Utilización en el modelo de captura a la edad
Identificación de especie	<i>sa; an</i>	<i>sa</i> (sardina común); <i>an</i> (anchoveta)
Máxima edad	<i>m</i>	<i>sa</i> (<i>m</i> =2); <i>an</i> (<i>m</i> =3)
Índice año: $i=\{1991,\dots,2014\}$	<i>i</i>	
Índice edad: $j=\{0,1,\dots,Ma\}$	<i>j</i>	
Mortalidad natural instantánea	<i>M</i>	fija $M=0.69 \text{ año}^{-1}$ (<i>sa</i>) y $M=0.96 \text{ año}^{-1}$
Proporción hembras maduras a la edad	α_{50}, α_{95}	Función de selectividad
Tamaño de muestra de la proporción en el año <i>i</i>	n_i	Supuesto de escala multinomial sobre la estimación de proporción a la edad
Coefficiente capturabilidad crucero	q^s	Distribución prior=lognormal(μ_q^s, σ_q^2)

Tabla VII. Variables y ecuaciones que describen la implementación de modelo de evaluación para sardina común y anchoveta

Nº	Descripción	símbolo	Ecuación
1)	Índice abundancia crucero(s) por año	$B_{t,a}^{Reclas}$	$B_{t,a}^{Reclas} = q^R S_a^R \sum_{a=1}^m N_{t,a} w_{t,a} \exp(-0,08Z_{t,a})$
2)	Índice abundancia crucero(s) por año	$B_{t,a}^{Pelaces}$	$B_{t,a}^{Pelaces} = q^P S_a^P \sum_{a=1}^m N_{t,a} w_{t,a} \exp(-0,41Z_{t,a})$
3)	Selectividad crucero RECLAS	S_a^R	$S_a^R = \left[1 + \exp(-\ln(19) \times (\alpha^R - \alpha_{50}^R) / (\alpha_{95}^R - \alpha_{50}^R)) \right]^{-1}$
4)	Selectividad crucero PELACES	S_a^P	
2)	Captura en biomasa por año y edad/longitud	$C_{t,a}$	$C_{t,a} = F_{t,a} \times N_{t,a} (1 - \exp(-Z_{t,a})) / Z_{t,a}$
3)	Proporción a la edad j , en el año i	$p_{t,a}$	$p_{t,a} = \frac{C_{t,a}}{\sum_{i=1} C_{t,i}}$
4)	Abundancia en número a la edad	$a = 1$	$N_{t,a} = N_{t,0}$
		$a = 1 - 2(sc);$ $a = 1 - 3(an)$	$N_{t,a} = N_{t-1,a-1} \exp^{-Z_{t-1,a-1}}$

		$m = 3(sc),$ $m = 4(an)$	$N_{t,a} = N_{t-1,m-1} \exp^{-Z_{t-1,m-1}} + N_{t,m} \exp^{-Z_{t,m}}$
5	Mortalidad total	$a=0-3(sc);$ $a=0-4(an)$	$Z_{t,a} = F_{t,a} + M$
6	Mortalidad por pesca	$a=0-3(sc);$ $a=0-4(an)$	$F_{t,a} = F_t * S_{t,a}$
7	Biomasa total	B_a^T	$B_a^T = \sum_{a=1}^m N_{t,a} w_a$
8	Biomasa adulta	$B_a^A =$	$B_a^A = \sum_{a=1}^m N_{t,a} w_a \mu_a$
9	Biomasa desovante	B_a^D	$B_a^D = \sum_{a=1}^m N_{t,a} w_a \mu_a \exp(-0,583Z_{t,a})$
10	Patrón de explotación	$v_{t+k,a} = v_{i,j} \times \exp(\gamma_{t,a})$	$v_{t+k,a} = v_{i,j} \times \exp(\gamma_{t,a})$ con $v_{t,a} \approx N(0, \sigma_v^2)$ y k, años consecutivos con igual patrón de explotación
11	Reclutamiento anual	$N_{t,0} = \bar{R} \times \exp(\eta_t)$	Con \bar{R} reclutamiento medio y η_t desviación anual en escala logarítmica y $\eta_t \approx N(0, \sigma^R)$
12	Abundancias año inicial por edades a=1-3(sc); a=1-4(an)	$N_{t,a} = \bar{R} \exp(\eta_{t-a+1}) \prod_a \exp(-M)$	Con M específico para sardina común y anchoveta

Tabla VIII. Especificación función objetivo a ser minimizada sobre la base de las verosimilitudes parciales.

Verosimilitud/ Componentes de penalización		Descripción y notas
Distribución multi-nomial en la pesquería	$\ell_1 = -n_{t,a} \sum_{i=1} \sum_{a=0} p_{t,a} \ln \hat{p}_{t,a}$	Con $n_{t,a}$ tamaño de muestra efectivo, $p_{t,a}$ proporción observada y $\hat{p}_{t,a}$ proporción estimada
Distribución multi-nomial crucero RECLAS	$\ell_{2,recclas} = -n_{a,t,recclas} \sum_{i=1} \sum_{a=1} p_{t,a} \ln \hat{p}_{t,a}$	Con $n_{t,a,recclas}$ tamaño de muestra efectivo, $p_{t,a}$ proporción observada y $\hat{p}_{t,a}$ proporción estimada
Distribución multi-nomial crucero PELACES	$\ell_{3,pelaces} = -n_{i,t,pelaces} \sum_{i=1} \sum_{l=1} p_{t,l} \ln \hat{p}_{t,l}$	Con $n_{t,a,pelaces}$ tamaño de muestra efectivo, $p_{t,a}$ proporción observada y $\hat{p}_{t,a}$ proporción estimada
Función verosimilitud acústico RECLAS	$\ell_4 = \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^n (\ln(B_i^h) - \ln(\hat{B}_i^{Est Re clas}))^2$	Con B_i^h la biomasa observada y $\hat{B}_i^{Est Re clas}$ estimada y σ^2 conocida
Función verosimilitud acústico PELACES	$\ell_5 = \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^n (\ln(B_i^h) - \ln(\hat{B}_i^{Est Pelaces}))^2$	Con B_i^h la biomasa observada y $\hat{B}_i^{Est Pelaces}$ estimada y σ^2 conocida
Función verosimilitud capturas	$\ell_6 = \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^n (\ln(C_i) - \ln(\hat{C}_i))^2$	Con C_i captura observada y \hat{C}_i estimada y σ^2 conocida
Función verosimilitud	$\ell_7 = \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^n (\ln(CPUE_i) - \ln(\hat{CPUE}_i))^2$	Donde $CPUE_i$ rendimiento observado y \hat{CPUE}_i estimada y σ^2 conocida
Verosimilitud patrón de explotación	$\ell_{v,1} = \lambda_{v,1}^\theta \sum_a (\eta_{a+1}^\theta + \eta_a^\theta - 2\eta_{a+1}^\theta)^2$	Doble diferenciación de suavizamiento
	$\ell_{v,2} = \lambda_{v,2}^\theta \sum_a (\eta_a^\theta < \eta_{a-1}^\theta) (\exp(\eta_a^\theta) - \exp(\eta_{a+1}^\theta))^2$	Declinación con la edad donde θ patrón de explotación bajo análisis $\lambda_{v,1}^\theta$ y $\lambda_{v,2}^\theta$ constante no informativas

Optimización no lineal

La función objetivo a ser minimizada corresponde a la suma de funciones de log-verosimilitud previamente establecidas. En el proceso de estimación de ambos modelos y en cada recurso se utilizó el algoritmo de estimación AD Model Builder© de la Otter Research Ltd (otter@island.net). AD Model Builder© que permite una estimación eficiente, estable y rápida, otorgando gran flexibilidad para modificar el modelo y analizar variantes. Además las salidas graficas de esta evaluación fueron creadas a partir de R (www.r-project.org).

5.4.5.2. Estimación de un indicador de reclutamiento mensual desde información de las capturas

Se determinó un índice de reclutamiento auxiliar para anchoveta en una escala temporal mensual. Este índice representa un elemento informativo que posteriormente fue contrastado con los índices emanados de la modelación biofísica. Este indicador fue usado para estimar el patrón anual del pulso de reclutamiento de anchoveta.

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:

$$R_{\text{año}} = \sum_{\text{mes}} P_{\text{mes}} \frac{\sum_{\text{puerto}} C_{\text{puerto,mes}}}{\sum_{\text{puerto}} E_{\text{puerto,mes}} W_{t_{\text{mes}}}}$$

Donde $R_{\text{año}}$ es el índice de reclutamiento, P_{mes} la proporción mensual de reclutas en las capturas mensuales del puerto seleccionado, E_{mes} representa el esfuerzo de pesca 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, $W_{t_{\text{mes}}}$ representa el peso promedio mensual de anchoveta, el cual fue obtenido desde la relación potencial $P = aL^b$ (P: peso, L: longitud). La información de las capturas mensuales corresponde a los años 1991 a 2014.

A continuación, se detalla del proceso de obtención de muestras desde el seguimiento biológico y operacional, método de muestreo y escalas temporales de observación. Esta información constituyó la base para la generación de índices de reclutamiento de anchoveta desde la actividad de pesca en Chile centro-sur.

5.4.5.2.1. Descripción del muestreo de frecuencia de tallas

La obtención de muestras de sardina común y anchoveta en los sitios de descarga se realiza de forma aleatoria, utilizando directamente un balde de 10 litros con lo que se obtiene una muestra aproximada de 5 a 8 kilogramos. En caso que se requiera una muestra dirigida a ciertos grupos de tallas, éstos podrán ser seleccionados directamente o a través de la recolección de una muestra extra. Cada uno de los muestreos consigna la siguiente información:

- Fecha de obtención de la muestra
- Lugar de descarga (geográfico: pesquera, puerto)
- Nombre de la embarcación (nave industrial o lancha artesanal)
- Captura anunciada (toneladas)

- N° de lance o de bodega (si fuera posible)
- Zona de pesca (coordenadas o sector)

Una vez recepcionada la muestra en el laboratorio, el encargado(a) del análisis registra los antecedentes requeridos en el formulario de frecuencia de tamaño en específico, el muestreo considera el número y peso totales de cada especie objetivo, además información de la fauna acompañante (especie, número y peso) y peso total de la muestra.

Para realizar el procedimiento de medición de los ejemplares, se toma una sub-muestra al azar de 200 ejemplares en la cual pueden estar presentes ambos recursos, además de fauna acompañante (en especial mote o cochinilla). En caso que no se alcance a medir 200 ejemplares de la especie predominante, el muestreo se complementa con otra sub-muestra también al azar, la cual se analiza en su totalidad. A cada ejemplar (sardina común y anchoveta) se le determina la longitud total (LT) mediante un ictiómetro de precisión 0,5 cm, al límite inferior más cercano, medida que se establece desde la punta del hocico del pez hasta el extremo posterior de la aleta caudal

Una vez finalizadas las mediciones, los especímenes se pesan en conjunto para cada especie mediante una balanza electrónica, registrándose dichos pesos en el formulario precitado. Asimismo, la fauna acompañante presente en el muestreo de frecuencia de tallas es identificada y cuantificada, registrando en la planilla de muestreo el número y peso de estas especies. Posteriormente, se realiza el muestreo de número de individuos por litro, donde se extraen individuos al azar completando un recipiente de 1 Litro para luego cuantificarlos, anotando en la planilla de muestreo el número y peso de los ejemplares en un litro. Se reporta semanalmente una matriz que resume la siguiente información proveniente del muestreo de frecuencia de tallas de ambos recursos, a saber:

- Identificación de la nave.
- Zona de pesca.
- Tiempo-referencia (DDMMAA).
- Puerto de desembarque.

- Desembarque (ton).
- Proporción de especies en la muestra.
- Nro. de individuos por litro.
- Rango de tallas (cm LT).
- Moda principal (cm, LT).
- Longitud promedio (cm, LT).
- Peso promedio (g).
- Porcentaje bajo talla primera madurez (%)

La información disponible de muestreos de frecuencia de tallas del Instituto de Investigación Pesquera para el período 1991 - 2015, se resumen semanalmente en las Tablas IX y X, para la flota artesanal e industrial, respectivamente.

Tabla IX. Resumen semanal desde 1992 a 2012 de muestreos de frecuencia de tallas. Flota artesanal.

SEM	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
1					11	7															
2			1	1	9	8	10			7											
3	3	4	1		7	6	3	10		26											
4	3		3	3	3	4	5	10	3	17	20										
5	1	1	1	3	2	2	4	8	13	8	10	10									
6	1	1	1		12	6	1	5	11	6	13	7	17			2					
7	1	1	4	2	13	3	4	2	6	10	9	12	10	10	1	12	8	5			3
8	2		1	5		3	4	6	7	11	12	10	11	14	1	18	20	5			11
9		1		3	1	5	10	6	5	14	4	11	3	9	30	27	15	22	15	13	13
10				3	14	4	5	6	2	11		8	4	7	19	11	16	15		8	9
11		1		2	8	4	2	4	1	14	10	7	12	7	13	8	2	44		20	20
12	1	3	2	3	5	3	8	3	3	11	13	5	3	6	21	2	7	25	5	27	21
13	3		1	4	3	2	5	4	3	13		6	7	3	26	1	17	8	20	26	25
14	2		1	7	5	2	3	2		8		9		2	14	3	14	43	9	26	12
15	2		1	3	6	1	5	2		6	8	5	2		16	1	10	30	21	26	
16	2		1	3	2	3	8		5	8	4	2	11	5	5	2	12	28	5	8	26
17	2	4		7	2	2	3	5	6	8	1	1	10	9	7	9	5	15	9	24	28
18	1	1		3	5	6	7	2		4		2	8	9	13		8	16	7	10	39
19	2			8	2	5	3	1	3	3	1	11	6	4	4	16	7	15	11	6	14
20		1		9	4	2	6	3	2				4		8	6	1	8	12	4	18
21	1			11	3	1	1						1		3	2		4	5	16	1
22	1	2		9		2		1		1	1	5	1		1		5	4	11	4	2
23					4	3	2		1	4		5	1	5	7		2	4	1	9	3
24		2		5	3					5	1		1	6		1	8	4	5		5
25			1	1	5			1			1			1	1		6			7	
26	1			1	2		1				3	3					1	1	9	2	7
27	2		4	2		3						2				2	3	1			2
28	3	5	5	6			2				7		2	4	8	1		2		10	4
29	3		2	9	2	4			4			4						4	3		10
30	2			9	10	1								1				18	2	10	5
31	1	1			1	6												7	3	11	16
32	1	3		10	6	5												3	8	13	23
33	2	2	1	7	5		2	8										4	2		21
34			5	1	3		1	5											6	1	
35		2	1		2		3	10		1			3							1	
36	1	3	2		9	1	1	4	3			3	9					3	1	4	
37			1		4	2		3	2	4		3	5	2	13	3					1
38			2	2	1			6	4			2	10							1	
39	2	4		18	1	2	2	5	2	4		7	7	16						1	1
40		2		11			2	7	2	1		9	12	20	3	8					11
41	1	1	1	9	3			1		3			2	6	29	2	7	11	2		
42			3	5	3	1		5	1						12		2	17			
43			1	8	5	5	3	9	1	2	2	2		8	10	5	1	2	14	1	
44	2	3	2		3	4	6	3	3					8	8	6	1	1	16	26	
45		2		1		10			1		5			3	8			5	9	14	
46	2	1		12	1	2			4	1	1	1		6	2		1	7	8	19	
47		3				1	5	2	2		1	2		1	7	5	10	2	13	14	
48	4		2			4		3	1		4	3	4	2	24	17	7		14	26	
49	1	1						4	3	1	7	2	2	5	1	7	5	4	15	13	
50	1	2		19			3	3				4	3				2		13	8	
51			4	4	6			2												7	
52	2		3	6	11															1	
53	1		3	3															4		
TOT	60	57	61	238	207	135	130	161	104	212	138	154	168	171	334	176	209	394	272	424	357

Tabla X. Resumen de muestreos semanal desde 1992 a 2012 de frecuencia de tallas. Flota industrial.

SEM	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
1	1				9																
2	5		2	7	4	6	4														
3	1	1	4		6	4	3	6													
4	3		2	1	1	3	7	5													
5	3	2	2		1	4	9	5	12												
6	4	1			4	5	4	7	12												
7	2		1		7	4	8	4	23			2	1				3				1
8	6		1		4	4	10	5	18			1	1	1			4		3		5
9	3	3	1	1	1	1	3	8	13					3		1	6		6		2
10	3	1		2	5	2	6	6	6				5	5		5	2	4		1	6
11	2	1	1	4	1	3	6	10	9			1	1	3	1	5	14	5		1	1
12	3	1	1	2	4	6	3	5	5					1		3	18	6		3	3
13	5	1		6	4	1	7	5	11				1	5	1	6	17	5	1	1	5
14	1	3		3	2	1	8	4	8			1		2	1	4	27	6		4	1
15	2			9	1	5	3	7	7		2	1			4	6	14	5		3	
16		2	1		4	5	6	9	4		1	3	5	5	2	9	22	7	2	5	14
17			2	2	6	1	8	5	5			4	9	4	2	4	3	9	1		6
18	1	1		1	3		4	9	2		1	1	5	4	6	5	26	4	3	3	7
19	2	1			2	4		6	2		8	1	2		4	3	26	4	4	4	8
20	1		1	1	5	4		12	7		1		7		2	3	17	1	4	4	3
21	1		4	2	2	3	10	10	5					2	1	1	7		4	2	3
22	2	2		2	4	2	5	5	4				1		2		17		1	4	6
23			1	1	7	1	4	8	2						1		2		6	2	8
24			1		1	2	1	5						1	2	1	17	3	5	2	1
25				3	4	6	5	8							1		19		6	4	
26					3	4	4	10						2		2	7	4	3	1	
27					2							1		3		1	9	7	2	3	2
28			2		3	2	3	9						1		1	5	10	2	2	
29			1		6	4		2									1	3		4	1
30	2			5	3	3		2						2			4	2	3	5	3
31	1				2													4	3	8	7
32					3	1												7	8	10	12
33						2										1		4	6	5	8
34			2			5	8								1			11	6		
35			1		7	1	6														
36	1	1			3	5	7					1				1					
37					5	5	11				3	3			1	3					
38			1	5	2	4	9		4						2						
39				1	4	3	6				5	3		1	1	6					
40			2	2	5	2	5			2	3	4		4	1	7	7				
41		1	1	7	3		4	8		2			2	6	6	17	15	12			
42			1	5	4	2	3	5	2	6			1	1	8	15	18	3			
43		3	4	4	4	3	2	2	3	1	4		3	3	7	16	24	13	1		
44	1		1	3	2	3	1	3		3	1		2	3	10	2	7	10	11	9	
45		1	2	4	6	3	4	3					3		8	5	13	7	6	6	
46	1	1		8	2		10	4		2			1		7	4	5	18	7	10	
47	1	2	4			8	2	10						2	1	2	4	5	9	10	
48	1		4			2	4	4		1			2		6	3	2	9	17	12	
49	1		1				3	1		3			2		4		3	10	9	1	
50		1		5			3							1	2			7	15	1	
51			3	12	4																1
52		4	1	1	3																2
53	1		1	7	2																
TOT	61	34	57	116	170	139	219	217	160	24	29	27	54	63	97	142	385	205	154	133	113

En el análisis se consideró la construcción de un banco de datos que compile la información proveniente de los formularios de distribución de tallas. Este banco de datos incorpora todas las variables propias de la embarcación muestreada, además de anexarle la estadística oficial de captura en base a su fecha de operación. Lo anterior, permitió expandir la estructura de tamaños registrada para cada muestreo, a la captura total de la embarcación, identificando el número total de individuos capturados por talla. A su vez, la expansión de cada embarcación fue agrupada por periodos, siendo la unidad temporal mínima de orden semanal. Para aquellas semanas donde no se realizaron muestreos, pero si hubo desembarques, la expansión es calculada vinculando la captura de la semana a la estructura de tallas de semanas contiguas. Todas las variables incorporadas fueron codificadas numéricamente. Finalmente la revisión, corrección, codificación y compilación de la información original, permitió procesar y analizar la información de estructura de tallas en un banco de datos de escala semanal, desde el año 1991 al 2015.

El registro diario de la operación de las naves industriales, derivado de los contactos telefónicos con las empresas pesqueras se establece en una ficha diaria de pesca. El objetivo consistió en realizar un seguimiento permanente y regular de los zarpes y recaladas, con dos finalidades: primero, reunir antecedentes diarios para coordinar los muestreos, considerando para esto los puertos con recaladas y zonas de pesca si hubiera más de una, y en segundo término, incrementar la base de información histórica que mantiene el Instituto de Investigación Pesquera sobre la operación diaria de la flota cerquera industrial, ya sea de las naves que actualmente tienen puerto base en la VIII Región, o de las que en años anteriores operaron en la zona centro-sur del país y/o que ya no están operando.

Este registro tiene identificada a cada nave con su pesquera base y su capacidad de bodega (CB) y diariamente se va complementando con antecedentes de su operación, esto es: a) día y hora de zarpe, b) especie objetivo (tipo de red: ej: A= anchovetera) c) área de operación (QTH), d) día, hora y puerto de recalada y/o desembarque (Coronel, Talcahuano, Corral, Coquimbo, San Vicente, Lota, San Antonio, Caldera, Calbuco u otro), e) captura anunciada y f) especies informadas.

Para la flota artesanal que permanente o temporalmente opera con red de cerco sobre los recursos sardina común y anchoveta, no se realiza un seguimiento diario individual debido a que el número de embarcaciones en operación de pesca puede llegar a ser muy numeroso en las temporadas de máxima actividad. Esto conlleva a que los parámetros operacionales diarios se compilen con una frecuencia semanal o quincenal, considerando la siguiente información: a) día y hora de zarpe, b) especie objetivo (tipo de red: ej: A= anchovetera) c) área de operación (informada por tripulación), d) día, hora y puerto de recalada y/o desembarque (Coronel, Talcahuano, Corral, San Vicente, Lota), e) captura estimada y f) proporción de especies.

Lo anterior, dado el gran número de recaladas, generalmente no dificulta la coordinación de visitas para la obtención de muestras biológicas en los diferentes puertos o puntos de desembarques de la región. En los períodos de baja actividad sí es posible obtener antecedentes y hacer seguimiento de las embarcaciones que han zarpado a zonas de pesca y sus recaladas y poder coordinar la obtención de muestras.

La data operacional existente se encuentra en escala diaria. Estos antecedentes fueron almacenados en una matriz general para conformar un banco de datos históricos que permitirá al usuario, una búsqueda más rápida de la información según requerimientos específicos. La cobertura temporal de la información de desembarques se encuentra detallada en la Tabla XI.

Tabla XI. Cobertura temporal de la información de los desembarques por nave y viaje de pesca (para la flota artesanal, no se cuenta con información de los viajes sin pesca).

Región	Período	
	Artesanal	Industrial
VIII Región (Thno -San Vicente-Coronel-Lota)	1991 al 2015	1991 al 2015
XIV Región (Valdivia Corral)	2001 al 2015	1991 al 2015
V Región (San Antonio)	2001 al 2015	1991 al 2015

En el marco del presente proyecto, se construyó un banco de datos con el propósito de compilar la información contenida en la ficha diaria de pesca y la obtenida desde las diferentes empresas pesqueras correspondiente a la flota industrial y/o con entidades gubernamentales (Sernapesca) en relación a la obtención de desembarques oficiales. Las variables compiladas en el seguimiento operacional de la flota pesquera de sardina común y anchoveta son las siguientes:

- Tipificación de la flota.
- Año, Mes, Semana.
- Región de operación.
- Embarcación.
- Tipificación embarcación (Eslora, manga, puntal, TRG, otros).
- Capacidad de bodega.
- Fecha, Hora de zarpe.
- Fecha, Hora de recalada.
- Puerto de recalada.
- Captura anunciada.
- Sitio de desembarque.
- Coordenadas de zona de pesca.
- Zona de pesca (Sernapesca).
- Zona de pesca (referencial).
- Desembarque oficial sardina común y anchoveta.
- Desembarque oficial otros

5.4.5.3. Índice de reclutamiento obtenido desde cruceros acústicos

Un indicador basado en evaluación directa del stock de anchoveta mediante métodos acústicos fue utilizado para contrastar el índice de reclutamiento obtenido desde modelación biofísica. El crucero estival RECLAS ("reclutamiento de anchoveta y sardina común") provee de una estimación de la abundancia de reclutamiento anual para la anchoveta. Este indicador fue solicitado al Instituto de Fomento Pesquero, institución ejecutora del proyecto, para ser utilizado como pieza informativa de la variabilidad interanual del reclutamiento. Este crucero ha sido ejecutado desde el año 2002 hasta la actualidad.

5.5. Identificación de forzantes biofísicos hacia el transporte y el reclutamiento

Para el establecimiento de la variabilidad espacial y temporal de forzantes y variables físicas de interés que tuvieran relevancia ambiental en la caracterización de las regiones principales de desove y reclutamiento, y en la dinámica del transporte de estadios tempranos de desarrollo de anchoveta en la región costero-nerítica del centro-sur de Chile, se utilizaron tanto datos satelitales como información hidrográfica levantada en terreno proveniente de cruceros bio-oceanográficos.

5.5.1. Datos satelitales

Para la caracterización de los forzantes principales relacionados con el transporte de productos de desove y del proceso de reclutamiento de anchoveta en el sector costero del centro-sur de Chile, se utilizó la información satelital detallada en la Tabla XII.

Tabla XII. Disponibilidad de información climática-oceanográfica para la región centro-sur de Chile.

Variables	Resolución	Período	Fuente	Referencia
TSM	4 km - diaria	1985-2009	Pathfinder del Physical Oceanography Distributed Active Archive Center	PODAAC; http://podaac-ftp.jpl.nasa.gov .
TSM	4 km - diaria	2002-2015	MODIS-Aqua. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)	http://oceancolor.gsfc.nasa.gov
Viento superficial	0,25°x0,25°	1999-2009	QuikSCAT	ftp://podaac-ftp.jpl.nasa.gov/OceanWinds
Viento superficial	~12.5 km - diario	2007-2015	ASCAT	ftp://podaac-ftp.jpl.nasa.gov/OceanWinds
Corrientes geostróficas	~25 km - semanal	1993-2015	Programa AVISO	http://aviso.oceanobs.com
Altura del nivel del mar	~25 km - semanal	1993-2015	Programa AVISO	http://aviso.oceanobs.com
Energía cinética	~25 km - semanal	1993-2015	Programa AVISO	http://aviso.oceanobs.com
Clorofila	4 km - diaria	2002-2015	MODIS Aqua Level-3 globales	http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/ftp.html

5.5.1.1. Temperatura superficial del mar

Se utilizó información de temperatura superficial del mar (TSM) con una resolución espacial de 4 km fueron adquiridos por del sensor MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) a bordo de satélite Aqua (EOS-PM 1) abarcando desde 2002 a 2015 obtenidos del sistema de distribución de datos Ocean Color Web (oceancolor.gsfc.nasa.gov), y los provenientes del programa Pathfinder (1985-2009) obtenidos del Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (<http://podaac-ftp.jpl.nasa.gov>). El procesamiento de la información, incluyó, en primer lugar la extracción de la zona de interés (30°-40°S y 95°W-costa), desde imágenes de TSM globales. Los datos mensuales de día (ascendente) y noche (descendente) fueron promediados aritméticamente. Posteriormente se construyó la señal anual o climatología mensual a partir de los promedios de todos los meses correspondientes.

5.5.1.2. Viento satelital

La información satelital de la magnitud (m s^{-1}) y dirección del viento fue obtenida desde dos fuentes, a saber: a) escaterómetro QuikSCAT con resolución de $0,25 \times 0,25^\circ$ para la serie 1999-2009 (<ftp://podaac-ftp.jpl.nasa.gov/OceanWinds>), y b) escaterómetro ASCAT para el viento superficial con una resolución espacial de $12,5 \times 12,5$ km para la serie 2007-2015 (<ftp://podaac-ftp.jpl.nasa.gov/OceanWinds>).

Se calculó la climatología de la magnitud (m s^{-1}) y dirección del viento utilizando imágenes mensuales QuikSCAT y ASCAT por separado debido las diferencias en las observaciones entre ambos satélites. Especialmente la década de datos de QuikSCAT aseguran la presencia de la distribución predominante durante la época de primavera. Para la secuencia de imágenes satelitales de velocidad del viento de las series QuikSCAT y ASCAT mensuales se calculó el esfuerzo de viento, que corresponde al forzante físico más importante en la transferencia de *momentum* desde la atmósfera hacia la superficie del mar, proceso de transferencia que se traduce en generación de corrientes y procesos turbulentos.

El esfuerzo del viento se determinó como función de las velocidades del viento (Sverdrup, 1947), siguiendo la siguiente ecuación:

$$\tau = C_D \rho_a \vec{U} |U|$$

Donde: C_D : Coeficiente de arrastre, ρ_a : Densidad del aire en la interface océano – atmósfera, \vec{U} : Vector de la velocidad del viento a 10 metros. Siguiendo a Large & Pond (1981), el esfuerzo de viento se definió de acuerdo a los rangos de velocidad del viento, cambiando el coeficiente de arrastre (adimensional).

U_{10} : Velocidad del viento a 10 metros sobre la superficie

$$\rho_a = 1.22 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

El esfuerzo del viento meridional (τ_x) y zonal (τ_y) se determinó mediante:

$$\tau^x = \rho_a C_D u |U_{10}| \left[\frac{N}{m^2} \right]$$

$$\tau^y = \rho_a C_D v |U_{10}| \left[\frac{N}{m^2} \right]$$

A la secuencia de imágenes se le extrajeron los valores nulos de los esfuerzos zonales y meridionales y se graficó la media con su respectiva desviación estándar, cuyos resultados fueron incorporados en climatologías mensuales, como contornos del esfuerzo del viento zonal y meridional con magnitud igual a cero ($\tau_x = \tau_y = 0$).

La velocidad (U_{Ek} , V_{Ek}) de Ekman medida en cm/s separa las ecuaciones de Ekman (bajo supuesto de linealidad). El esfuerzo del viento está en balance con la fuerza de Coriolis, y está calculado de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} -fV_{Ek} &= \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_x}{\partial z} \\ +fU_{Ek} &= \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_y}{\partial z} \end{aligned}$$

Paralelamente se calculó la turbulencia como el cubo de la magnitud del viento ($m^3 s^{-3}$).

Además, se obtuvo la climatología de la turbulencia proveniente de las dos series de vientos ensayadas en este informe, esto es: a) proveniente de datos QuikSCAT (Serie Enero-1993/Junio-2015), y b) provenientes de la serie ASCAT (Mayo-2007/Enero-2015).

5.5.1.3. Corrientes geostróficas y energía cinética

Se utilizaron datos de altimetría satelital, específicamente de la anomalía del nivel del mar (ANM) y la velocidad geostrófica global distribuida por el programa AVISO (Archiving Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data), con un intervalo temporal diario en una malla global de proyección Mercator de $1/4^\circ \times 1/4^\circ$ (<http://www.aviso.altimetry.fr/duacs/>). Utilizando esta base histórica de velocidades

geostróficas del programa AVISO, se construyó una climatología en la escala mensual que representa el promedio de las componentes u y v de la velocidad geostrófica referida a la región de interés para el presente estudio.

La energía cinética (EKE, eddy kinetic energy), definida como la energía turbulenta potencial disponible para la formación de remolinos de mesoescala, fue calculada siguiendo a Hormazábal *et al.* (2004), según la siguiente ecuación:

$$EKE = 1/2 ((Ug - (Ug))^2 + (Vg - (Vg))^2)$$

Donde Ug y Vg corresponden a la anomalía de la velocidad geostrófica zonal y meridional como promedio temporal.

5.5.1.4. Clorofila superficial del mar

La climatología de la clorofila-a se calculó utilizando información satelital mensual, entre el año 2002 al 2015 proveniente del centro de distribución de datos Ocean Color Web (<http://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/>).

5.5.2. Datos de campo

La información hidrográfica utilizada corresponde a la obtenida en cruceros de investigación realizados en la región de estudio (información proveniente del despliegue de CTDO). La data corresponde a información espacio-temporal de temperatura, salinidad, densidad y concentración de oxígeno. La información incluye datos hidrográficos asociados a cruceros costeros de estimación de la biomasa desovante de sardina común y anchoveta en el centro-sur de Chile desarrollados al inicio de la primavera (agosto-octubre) desde 2002 a 2014; así como a cruceros anuales realizados en la región costera del centro-sur de Chile enmarcados en la evaluación acústica de merluza común realizados entre agosto-septiembre para la serie 1997-2014.

Para el primer caso se utilizaron estaciones oceanográficas provenientes de 11 cruceros realizados durante la primavera austral entre los años 2003 al 2014 (2006 no se realizó) correspondientes a la evaluación del stock desovante de sardina común y anchoveta en la región centro-sur de Chile, abarcando el área entre 34°30' S y 41°30' S. Para el segundo caso se analizó 17 cruceros realizados entre Agosto-Septiembre de 1997-2014, abarcando el área entre los 30°S y aproximadamente los 41°20'S. Toda la información oceanográfica fue comparada respecto de la climatología de la zona del Atlas Oceanográfico de Chile Volumen I, considerando los datos de crucero como válidos dentro de 4 desviaciones estándar respecto de la climatología (Alvarado, 2015).

Posteriormente, y para cada crucero, se construyeron grillas interpoladas en la dirección horizontal y vertical (latitud, longitud, profundidad) utilizando el método de Kriging ajustado por el variograma direccional promedio de cada crucero (Petitgas, 2001). El promedio de las grillas permitió construir un campo hidrográfico promedio que representa la climatología de la zona donde aparecen las estructuras oceanográficas predominantes del periodo de primavera en el área de estudio. Desde esta climatología se extrajeron capas horizontales representativas de la superficie, 10 y 50 metros de profundidad y tres transectas perpendiculares a la costa ubicadas en los 36°30' S - 38°30' S y 39°30' S.

5.5.3. Análisis de series de tiempo y frecuencia

Para el desarrollo de este objetivo específico, se usó la técnica de Funciones Ortogonales Empíricas (FOE) y Funciones Ortogonales Empíricas Complejas (FOEC) sobre la dinámica asociada al esfuerzo del viento y las corrientes geostroficas, en su distribución horizontal y vertical (para las componentes meridional y zonal). El análisis de Funciones Ortogonales Empíricas (FOE) es una técnica estándar para eliminar la información redundante con la mínima pérdida de variabilidad, proyectando el conjunto de datos en un nuevo espacio de menor dimensión que el original, donde las nuevas variables (dimensiones) representan aquellas direcciones del espacio donde los datos tienen mayor varianza (Preisendorfer, 1988). La técnica reduce la dimensión del espacio preservando el máximo de varianza de la muestra, y donde los primeros vectores del nuevo espacio son aquellos que pueden

corresponder a patrones dominantes (en el sentido de la variabilidad de la muestra que representan).

Esta metodología permitió extraer la estructura espacial y la variabilidad temporal, tanto de forzantes asociados a la dinámica del sistema (velocidad y esfuerzo del viento, deriva de Ekman, corrientes geostroficas, energía cinética), como de variables vinculadas a procesos biológicos (temperatura, turbulencia, etc) en el sector costero del centro-sur de Chile, cuya aplicación sólo dependió de consideraciones estadísticas (Barnett & Patzert, 1980; Kelly, 1985). Las FOE permitieron cuantificar la varianza total de las series temporales (en las componentes zonal y meridional) en modos ortogonales o independientes entre sí. De esta manera se obtienen modos o estructuras que contienen el mayor porcentaje de la varianza, que representen a las señales dominantes.

5.5.4. Análisis de los procesos de crecimiento, sobrevivencia y transporte de huevos y larvas

Las características del esquema de modelación planteado en este estudio permiten el análisis de la historia de vida de cada individuo modelado, y que en conjunto, hacen emerger rasgos poblacionales de importancia. Uno de los aspectos relevantes es la Duración Larval Pelágica (DLP) que corresponde al tiempo que transcurre entre el desove y la edad en que el individuo alcanza la talla en que comienza la natación activa (20 mm en este estudio). Este parámetro está directamente relacionado con el patrón de crecimiento individual, el cual en este estudio es variable y dependiente de la temperatura, por lo que puede ser evaluado en su contexto intra e interanual. Las consecuencias ecológicas de este parámetro están asociadas a la duración de los individuos en el plancton donde son más vulnerables a la mortalidad por advección y predación (entre otros aspectos). Se calculó la DLP para cada uno de los individuos reclutados en cada año y en cada pulso de desove, calculando el tiempo transcurrido entre el desove (fecha de liberación) y la edad a los 20 mm (fecha de reclutamiento). Se analizó la variabilidad intra e interanual en este parámetro poblacional a través de graficas boxplot.

Las fuentes de mortalidad incluidas en este modelo están asociadas a condiciones extremas de temperatura y a la advección producto de las condiciones oceanográficas. Para analizar el efecto de estas variables en una escala espacial y relacionarlo con los procesos oceanográficos que caracterizan a la región de estudio en una perspectiva interanual, se discretizó esta información por año y por banda latitudinal. De esta manera, se calculó la proporción de individuos muertos por advección y temperatura en cada celda latitudinal e relación a la abundancia del desove (liberación) en esa misma banda. Al mismo tiempo, se analizó la capacidad de retención de cada celda, para entender los patrones de éxito/fracaso reproductivo, respecto a los procesos oceanográficos.

Las vías de transporte, el nivel de dispersión y finalmente la conectividad poblacional son productos generados en la modelación biofísica. Para entender la relación espacio-temporal entre el desove y el reclutamiento larval, se establecieron matrices de dispersión espacial que permite establecer las relaciones "fuente - sumidero". A su vez, a partir de la DLP y las fechas de desove se estableció el patrón temporal de los pulsos de reclutamiento larval anual, lo que puede ser utilizado para la discusión respecto al establecimiento de ventanas temporales de veda para el resguardo de reclutas.

5.5.4. Análisis de sensibilidad para la identificación de forzantes biofísicos

Como se ha descrito previamente, el esquema de modelación biofísica planteado incluyó condiciones iniciales realistas a través de los distintos submodelos establecidos, así como también un esquema de movimiento biológico que incluyó flotabilidad de huevos y un esquema de migración vertical para larvas y juveniles de anchoveta. El éxito individual del reclutamiento biofísico es una respuesta binomial que representa el "éxito" o "fracaso" de alcanzar o permanecer en el área de crianza/reclutamiento para cada individuo modelado. Esta respuesta fue evaluada en función del "criterio de reclutamiento" definido previamente (ver punto 5.4.1). El objetivo del análisis de sensibilidad fue evaluar la respuesta media de los experimentos de simulación biofísica interanual respecto a una variable dependiente (en este caso el éxito del reclutamiento). El análisis de sensibilidad se realizó usando un análisis de varianza multi-factor mediante el módulo GLM (modelos lineales generalizados) de R (R Core Team, 2012). Las variables independientes seleccionadas para

el análisis fueron: año de liberación, mes de desove, zona de desove, profundidad de desove, distancia de la costa del desove y temperatura inicial. Regresiones logísticas fueron usadas para evaluar si el éxito del reclutamiento individual difiere significativamente de acuerdo a las condiciones iniciales. Las zonas de desove fueron definidas de forma similar a lo dispuesto en el proyecto de evaluación de biomasa desovante MPDH, a saber: i) area norte (31°S a 35°S), ii) zona central (35°S a 37°30'S) y, iii) zona sur (37°30'S a 40°30'S).

Un aspecto relevante en términos ecológicos y de modelación es la inclusión de un esquema biológico de movimiento en anchoveta. Investigaciones previas han concluido que las larvas de anchoveta parecen tener un patrón de movimiento distintivo a medida que crecen, sugiriendo que despliegan un migraciones verticales caracterizadas por una profundidad maxima y una minima que alcanzan durante día y noche respectivamente (Hunter, 1977; Matsuura & Kitahara, 1995; Ospina-Alvarez *et al.*, 2012). Una serie de experimentos fueron diseñados para analizar la influencia de este factor en el patrón de transporte, conectividad y finalmente reclutamiento de la anchoveta. En paralelo a los experimentos descritos de simulación del transporte con modulos de movimiento biológicos, se realizaron experimentos puramente lagrangianos (transporte pasivo) siguiendo la misma estructura espacial para la liberación, pero sin incluir esquema de movimiento biológico (transporte 100% dependiente de la dinamica de corrientes) para los años 1994, 1996, 1998, 2000, 2002, 2004, 2006, 2008, 2010, 2012 y 2014 con un total de 152 liberaciones para cada tipo de experimento. Para el contraste entre los dos tipos de experimentos no se utilizó el criterio de reclutamiento, sino que se detuvo al día 75 de modelación.

Para evaluar las diferencias en el transporte horizontal entre tipos de experimentos se seleccionaron las distancias ortodrómicas (la distancia más corta entre dos puntos en la superficie de una esfera) y la distancia costa afuera (distancia lineal respecto al punto más cercano de la línea de costa), la primera como indicadora de transporte y la segunda de advección, las que fueron calculadas para cada individuo y para cada pulso de desove modelado en los años previamente descritos (n=3.020.000 individuos). Como los datos no se distribuyeron normalmente, se realizaron análisis no paramétricos. El transporte y la

advección desde experimentos de transporte pasivo y comportamiento biológico fueron comparados usando el test de Mann-Whitney-Wilcoxon (MWW, *unpaired and two-sides*) basados en el código desarrollado en R v.2.13.1 (R Core Team, 2012) y siguiendo a Ospina-Alvarez *et al.*, 2012). Además, las diferencias entre experimentos fueron analizadas a través de GLM con el tipo de experimento como factor. Además, para evaluar hipótesis de estructura espacial se analizó el nivel de agregación espacial de las partículas liberadas por cada experimento a través del índice de agregación de Lloyd (Lloyd, 1976), el cual se calculó agrupando la posición final de las partículas (75 días) en cuadrículas de $0,05^\circ \times 0,05^\circ$ (longitud, latitud), el grupo de larvas por cuadrícula fue la considerada como la densidad modelada. Finalmente, la hipótesis nula de no existencia de relación entre la distribución espacial de las partículas 75 días posterior al desove entre experimentos de transporte pasivo y comportamiento biológico fueron evaluados mediante el test de Mantel (Mantel, 1967). La distancia geográfica fue usada como medida de disimilitud y el valor p-crítico fue estimado mediante test de Montecarlo con 9999 permutaciones usando el paquete "ape" en R v.2.13.1 (R Core Team, 2012).

5.6. Identificación de zonas de crianza obtenidas de la modelación biofísica y comparación con información acústica

5.6.1. Información acústica

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. Bajo este contexto, y para cumplir con este objetivo, se obtuvo información acústica discretizada a la misma escala que las salidas del modelo biofísico, utilizando la integración de la información obtenida para generar indicadores de densidad acústica (NASC) espacial y batimétrica en función de la talla y el tiempo. Para realizar este objetivo, se solicitó formalmente datos provenientes de estudios acústicos de pelágicos pequeños financiados por el Fondo de Investigación Pesquera y Acuicultura (FIPA) en Chile.

En relación a este objetivo, se espera abordar la problemática utilizando 2 piezas de información:

1. La obtenida de bibliografía referente a estimaciones de reclutamiento mediante métodos hidroacústicos provenientes de los cruceros realizados por IFOP en Chile.
2. La información acústica obtenida de las bases de datos proporcionados por el FIPA de los cruceros que cuenten con información de pelágicos pequeños realizados en Chile, con principal interés en la zona centro y sur.

El análisis de la información acústica se ha restringido a aquellos años en los que se contó con información completa desde las bases de datos del FIPA.

5.6.2. Ordenamiento de la data acústica

Se realizó un ordenamiento y estandarización de la base de datos proporcionada por el FIPA de los cruceros de evaluación hidroacústica de pelágicos pequeños realizados en Chile, posteriormente seleccionando solo los atribuibles a anchoveta.

Este análisis exploratorio respecto a la información necesaria que sustentase el análisis acústico buscó contar con las siguientes piezas de información: datos de densidad acústica (NASC; m^2/mn^2) geo-referencia, hora y batimetría de los cardúmenes o unidades básicas de muestreo, además de datos biológicos como la estructura de tallas y longitud-peso de anchoveta para cada año o crucero. Posteriormente, se realizó un segundo ordenamiento de los datos, en el cual se acoplaron las matrices de geo-referenciación y densidad acústica, que además incluía profundidad media (en algunos casos, cuando se tuvo información) de los cardúmenes de anchoveta, obteniendo una matriz única para cada año analizado.

5.6.3. Análisis de la información acústica: obtención de áreas de reclutamiento

Luego del ordenamiento de la base de datos, se generó una matriz global con toda la data obtenida para anchoveta a partir de los datos ordenados para cada año, teniendo como componentes principales: latitud, longitud, valores de densidad acústica (NASC), profundidad media de los cardúmenes y proporción de reclutas de anchoveta. Para el análisis de la data se utilizó el software estadístico “R (3.3.0)” y el software para análisis de

datos oceanográficos “Ocean Data View”, obteniendo valores de densidad geo-referenciada por UBM, porcentaje de reclutas y su distribución (espacial y batimétrica), y generar mapas que permitieron observar de mejor manera los índices obtenidos para cada año. De esta manera, la distribución espacial de las proporciones de reclutas en los registros acústicos permitió el análisis de zonas de reclutamiento, su variabilidad interanual y su patrón espacial histórico. La densidad acústica de anchoveta es obtenida a través de NASC o S_A , cuya unidad de medida es m^2/mn^2 , y está interpretada por la fórmula,

$$s_A = 4\pi (1852)^2 s_a$$

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

$$s_a = \int_{z1}^{z2} S_v dz$$

En la que, S_v es el coeficiente volumétrico de dispersión (m^{-1}), z_2 , z_1 son los límites superior e inferior de la eco-integración o de los estratos programados (m).

Para observar los cambios interanuales de la densidad del recurso por sector, se propuso inicialmente subdividir el área evaluada por los cruceros acústicos en sectores discretizados, lo cual no fue necesario, debido a que el recurso presentó un claro patrón de distribución en el área de estudio, se decidió trabajar con el porcentaje de reclutas de anchoveta por año espacialmente. Esto se realizó considerando la información de los lances de pesca realizados durante los cruceros de evaluación proporcionados en las bases de datos del FIPA y en los casos en que no se contó con esta información, se obtuvo de los informes de los proyectos correspondientes. Además, se utilizaron datos de profundidad media de los cardúmenes de anchoveta en los años en que se contó con la información.

Finalmente, se integró la información para todos y cada uno de los años, obteniendo figuras y mapas de distribución espacial que permitieron observar de mejor manera la variación interanual que presenta este recurso en una serie de tiempo de una década (2000 - 2012) en la zona de interés. A continuación se detallan las fuentes de información utilizadas para la estandarización de los registros acústicos.

- Bitácora del crucero: Geo-referencia e información de lances de pesca de identificación.
- Información acústica: Latitud, longitud, Fecha, Hora, densidad acústica (NASC) y profundidad media de los cardúmenes por UBM.
- Información biológica: Estructura de tallas y longitud peso geo-referenciada para cada crucero.

5.6.4. Comparación de los indicadores de reclutamiento espacial de modelos biofísicos y acústica

El análisis comparativo espacial entre los resultados de la modelación biofísica se realizó desde dos perspectivas: i) una perspectiva interanual donde se analizó comparativamente la distribución por banda latitudinal de reclutas desde la evaluación acústica en relación al pre-reclutamiento obtenido en la modelación biofísica y; ii) un análisis integrado de la información acústica y biofísica para todo el periodo de estudio para la identificación de zonas recurrentes de reclutamiento acústico y biofísico.

5.7. Comparación de los Resultados de la fase I y II del proyecto (sardina común y anchoveta)

Una primera etapa imperativa en el análisis comparativo de los resultados de los modelos orientados a sardina común y anchoveta, correspondió a la contrastación de los esquemas de modelación, la configuración del modelo acoplado, los submodelos incluidos, las fuentes de información utilizadas, las aproximaciones metodológicas empleadas, el modelo hidrodinámico utilizado (y sus forzantes asociados) y finalmente los supuestos incluidos en cada una de las fases de la modelación. Este primer paso permite la identificación *a priori* de posibles causas de explicación para las diferencias en los indicadores de salida del modelo. Además, este paso permite la identificación de avances en los esquemas de modelación entre fases del proyecto, las posibles falencias de información y los desafíos hacia una modelación conjunta.

5.7.1. Comparación de las áreas de crianza-reclutamiento

Una vez identificadas las diferencias entre las configuraciones de los modelos de ambas fases del proyecto, se compararon las áreas de crianza y/o reclutamiento planteadas para ambas especies con el objetivo de indagar en posibles diferencias espaciales en la expresión del reclutamiento posterior al proceso de transporte. Este aspecto resulta de particular interés para la discusión de posibles áreas diferenciadas de acceso a la pesquería para cada especie al inicio de la temporada de pesca cuando se expresa el reclutamiento anual de ambas especies. El análisis comparativo se llevó a cabo mediante la contrastación gráfica de los patrones espaciales reportados por año en el presente estudio respecto de aquellos indicados para sardina común.

5.7.2. Comparación de los patrones de conectividad biofísicos

Uno de los resultados relevantes de este tipo de estudios está relacionado con los patrones de conectividad entre el/las área(s) de desove y las potenciales áreas de crianza y/o reclutamiento. Este análisis contempló la comparación de los submodelos de desove planteados, los patrones de distribución de reclutas obtenidos por el modelo biofísico y los esquemas espaciales de conectividad propuestos en ambos estudios. Además, se discutió la factibilidad de comparar ambos patrones bajo los esquemas utilizados en los proyectos de sardina común y anchoveta.

5.7.3. Comparación de los índices de reclutamientos temporal biofísicos

Uno de los aspectos que más destacan en el proceso de modelación biofísica es aquel relacionado con la generación de índices de reclutamiento independientes de la pesquería y que además, tienen la potencialidad de, bajo un esquema operativo, actuar como predictores o indicadores tempranos de la fuerza del reclutamiento anual para pequeños pelágicos. Por otra parte, se ha postulado que la sardina común y la anchoveta podrían presentar ciclos alternantes de abundancia asociados a periodos más o menos favorables para el éxito reproductivo (Arteaga *et al.*, 2013). De esta manera, en este punto se compararon las series de tiempo del indicador de reclutamiento biofísico de sardina común respecto a la generada en este estudio para anchoveta. Además, se incluyó un análisis comparativo de estas señales

respecto a las obtenidas desde los modelos estadísticos edad estructurados usados para la evaluación de stock de ambas especies.

5.8. Modelo conceptual de la historia de vida de anchoveta y sardina común en la zona centro-sur de Chile

Las especies pelágicas pequeñas se caracterizan por alta variabilidad asociada a cambios de abundancia, y estacionalidad de la explotación pesquera, marcada por una alta dependencia de los pulsos anuales de reclutamiento. A nivel mundial, la principal herramienta utilizada para el asesoramiento y determinación del estado de las poblaciones corresponde a modelos de evaluación de stock que estiman niveles de biomasa totales, vulnerables, reclutamientos y mortalidad por pesca), los cuales corresponden a modelos del tipo estadísticos edad y tallas estructurados y que asumen error de observación. Este tipo de modelos genera información para la administración de diferentes recursos, y constantemente presentan alta incertidumbre en la estimación del “reclutamiento”. Por lo tanto, la posibilidad de disponer de indicadores de reclutamiento independientes a la pesquería, genera una fuente de información complementaria para el establecimiento del estatus de la población con probable mejoramiento del modelo, reducción de incertidumbre y mejor predicción y realismo en las proyecciones poblacionales y por ende en la evaluación de estrategias de explotación. En un esquema similar, la incorporación de covariables es una aproximación que permite identificar variables que afectan diferentes procesos poblacionales, siendo caracterizadas estas covariables como críticas (Deriso *et al.*, 2008). En este esquema en primer lugar se debe identificar (seleccionar) las covariables para luego integrar y testear las variables en el modelo de evaluación de stock.

En este capítulo se realizó 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, así como covariables asociadas con procesos poblacionales (i.e. reclutamiento). Finalmente, se plantea un modelo conceptual soportado para la población de anchoveta, analizado en el contexto de los resultados de la modelación biofísica de la población.

6.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Estructura y validación del modelo hidrodinámico

La primera etapa de evaluación de resultados de este proyecto está vinculada al modelo hidrodinámico que proporciona el sistema físico-oceanográfico en el cual se basa la modelación biofísica y que, junto con el sistema de reglas empíricas detallado en cada submodelo, determinará el destino final de los individuos modelados y hará emerger los rasgos poblacionales para la anchoveta en la zona centro-sur de Chile. De esta manera, el modelo hidrodinámico deberá reproducir los principales rasgos del sistema, evitando que el modelo biofísico herede inconsistencias relacionadas con el sistema oceanográfico. A continuación se presenta un proceso de validación del modelo hidrodinámico generado para la zona centro-sur de Chile.

6.1.1. Validación interanual por medio del uso de información satelital

La primera etapa para evaluar el desempeño del modelo hidrodinámico respecto a observaciones realizadas por satélites involucra el análisis de las señales estacionales. Primero, el modelo ROMS dominio hijo, evidenció un buen desempeño reproduciendo los principales rasgos estacionales a lo largo de todo el dominio modelado en el Pacífico suroriental, lo que fue válido respecto a la comparación con el producto satelital Pathfinder (periodo 1994-2012, resolución espacial 1/10°; Figura 13a), como para el producto Modis-Aqua (periodo 2002-2013, resolución espacial 4 km; Figura 13b). Durante el verano el modelo reproduce correctamente el aumento de temperatura en la parte central de dominio y el enfriamiento del agua costera en zonas de surgencia activada por el viento sur predominante en verano, lo cual fue válido para los dos productos utilizados ($r=0,78$; $r=0,69$ Pathfinder y Modis-Aqua respectivamente; $p>0.05$ dominio global). En las estaciones de transición (otoño y primavera) el modelo ROMS dominio hijo describe adecuadamente los patrones generales que presenta la información satelital en ambas resoluciones ($r=0,67$; $r=0,68$; $p>0.05$ respectivamente para otoño y $r=0,79$; $r=0,77$; $p>0.05$ respectivamente en primavera). En invierno, donde ocurre preferentemente el desove de anchoveta, el modelo también describe la disminución de temperatura superficial desde el

océano hacia la costa ($r=0,77$; $r=0,78$; $p>0.05$ para Pathfinder y Modis-Aqua respectivamente).

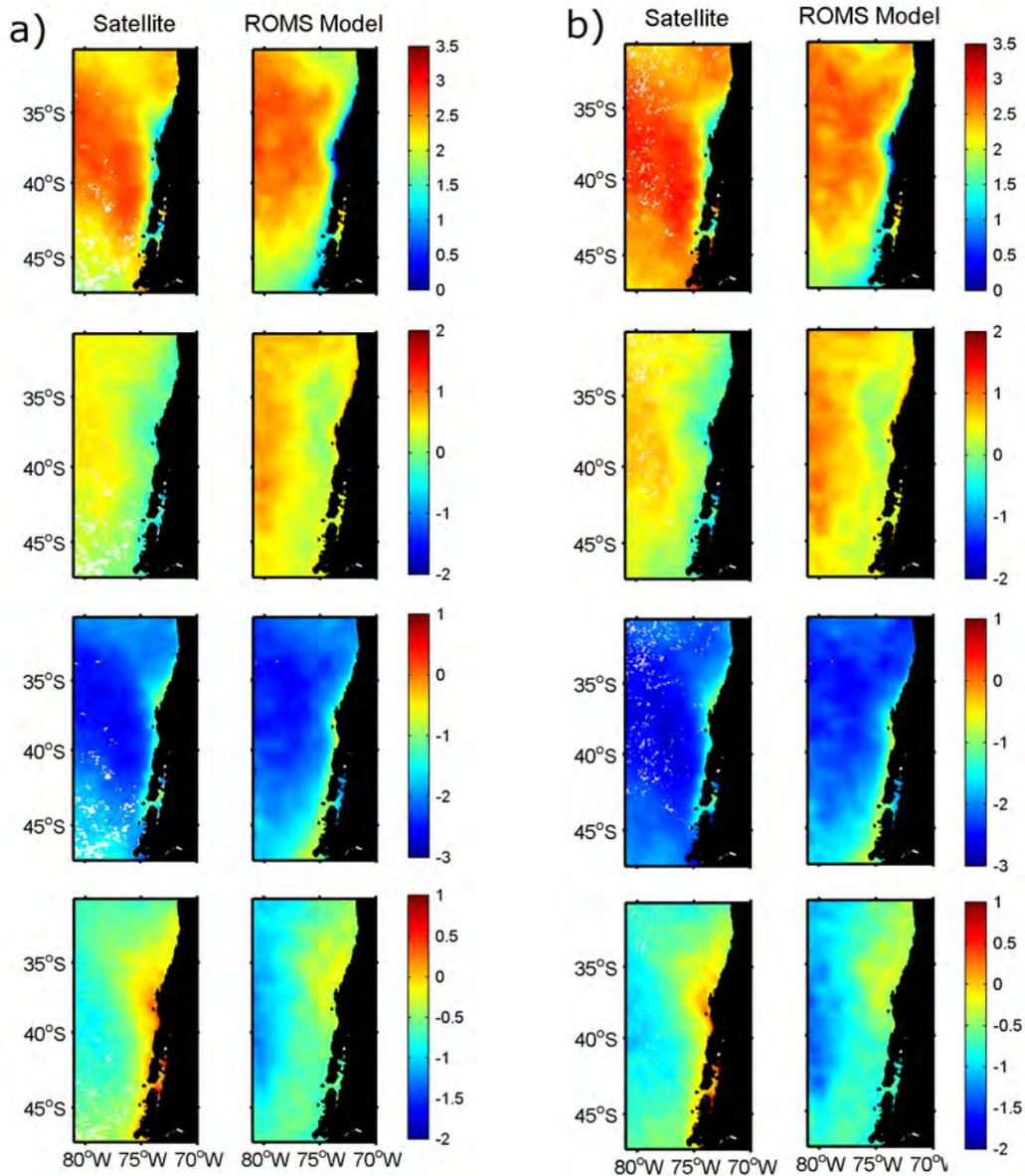


Figura 13. Ciclo estacional de la anomalía de la temperatura superficial del mar para datos de satélite: a) Pathfinder (panel izquierdo) y modelo ROMS (panel derecho); b) Modis-Aqua (panel izquierdo) y modelo ROMS (panel derecho). Note diferentes barras de color para cada panel. La estaciones desde arriba hacia abajo: verano, otoño, invierno, primavera.

Los modos de variabilidad espacial y temporal de la TSM fueron calculados en base a funciones ortogonales empíricas (EOFs) para modelo ROMS y datos de satélite Pathfinder

periodo 1994-2012 y Modis-Aqua periodo 2002-2013, los cuales fueron comparados posteriormente para cuantificar el desempeño del modelo reproduciendo las principales señales de variabilidad de esta variable a lo largo del dominio modelado. Los dos primeros modos de variabilidad para las componentes principales de la TSM explicaron un gran porcentaje de la varianza por el producto Pathfinder (34% y 42% para datos observados y modelados respectivamente; Figura 14a) y el producto Modis-Aqua (55% y 53% para datos observados y modelados respectivamente; Figura 14a) . En todos los casos estos dos modos representan rasgos independientes, a diferencia de los siguientes modos de variabilidad que están ligados a estos modos superiores.

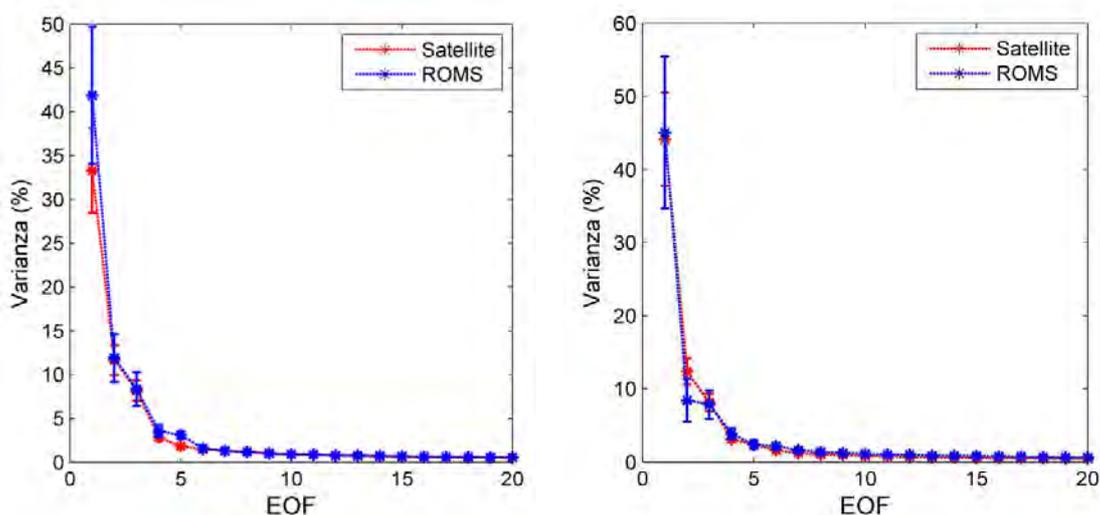


Figure 14. Varianza explicada para los primeros veinte modos de variabilidad de los componentes principales de la TSM para datos de satélite: a) Pathfinder (rojo) y ROMS (azul); b) Modis-Aqua (rojo) y ROMS (azul).

Los dos primeros componentes principales para la TSM en el modelo ROMS fueron consistentes con las observaciones en su patrón espacial y comparten una significativa correlación en su evolución temporal tanto para el periodo evaluado con el producto Pathfinder como con el producto Modis-Aqua. De esta manera, respecto al producto Pathfinder el primer modo de variabilidad del componente principal temporal de la TSM mostró un alto y significativo nivel de correlación entre los datos modelados y observados ($R^2 = 0,75$; Figura 15c, d). La expresión espacial de los datos modelados y observados

mostraron una alta coherencia, reproduciendo los principales rasgos térmicos del dominio analizado (Figura 15a, b). En relación al producto Modis-Aqua (periodo 2002-2013), el primer modo de variabilidad evidenció una mayor y significativa correlación temporal entre datos observados y modelados para el mismo periodo ($R^2 = 0,92$; Figura 16c, d). Así mismo, la expresión espacial del primer modo de variabilidad mostró un patrón altamente coherente, reproduciendo las estructuras y rasgos del sistema modelado (Figura 15a, b).

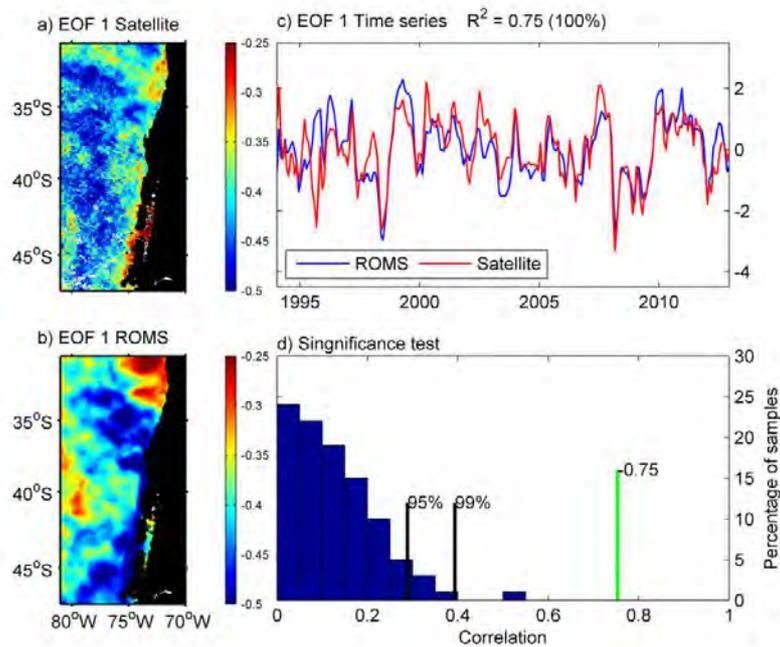


Figura 15. EOF del primer modo de variabilidad de la TSM. Dominio espacial para a) Datos satélite Pathfinder y b) ROMS, c) serie de tiempo 1994 – 2012 para datos de satélite y ROMS, d) significancia de la correlación entre series de tiempo basada en la función de densidad de probabilidad de los coeficientes de correlación cruzada.

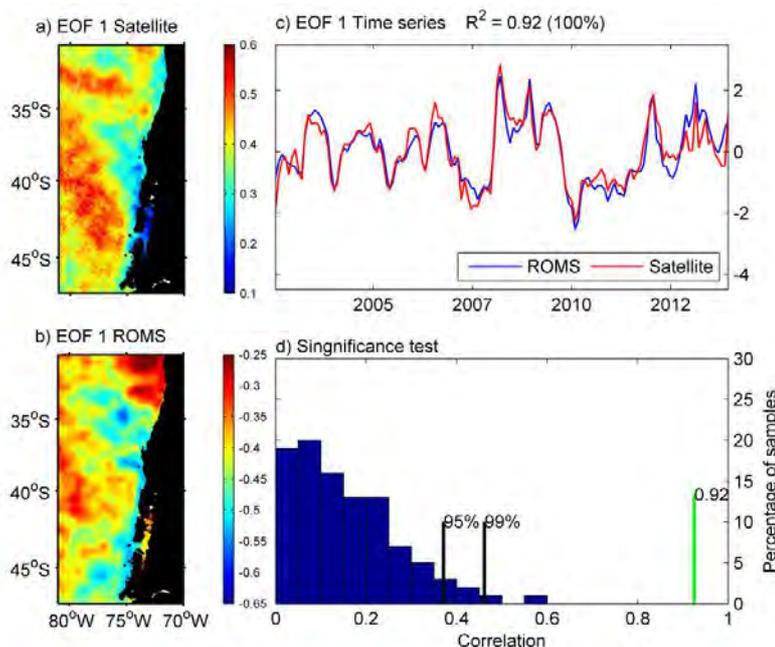


Figura 16. EOF del primer modo de variabilidad de la TSM. Dominio espacial para a) Datos satélite Modis-Aqua y b) ROMS, c) serie de tiempo 2002 – 2013 para datos de satélite y ROMS, d) significancia de la correlación entre series de tiempo basada en la función de densidad de probabilidad de los coeficientes de correlación cruzada.

Las series de tiempo para el segundo componente principal de la TSM Pathfinder y ROMS mostraron consistencia interanual entre satélite y modelo, con un nivel significativo de correlación ($R^2 = 0,42$; Figura 17c, d). Espacialmente, modelo y observaciones evidenciaron una alta correlación en la zona de estudio revelando algunas diferencias respecto al patrón latitudinal de la señal en el dominio oceánico que entrega el modelo ROMS respecto al satélite, sin embargo en costa tienen un comportamiento similar (Figura 17a, b). En el caso del segundo modo de variabilidad respecto al producto Modis-Aqua, la correlación espacial tuvo nivel similar y significativo ($R^2 = 0,43$; Figura 18c, d). Sin embargo, en el patrón espacial el ROMS mostró mayor coherencia respecto a las observaciones, evidenciando un buen comportamiento en este modo de variabilidad (Figura 18a, b). Estos resultados evidencian buena reproducción del modelo en la capa superficial (capa de mezcla), además de sugerir un mejor desempeño del proceso de validación respecto de productos observados que tienen una resolución espacial similar al ROMS generado, reproduciendo estructuras oceanográficas en las mismas escalas. No obstante para el patrón temporal es recomendable usar la serie de mayor extensión temporal.

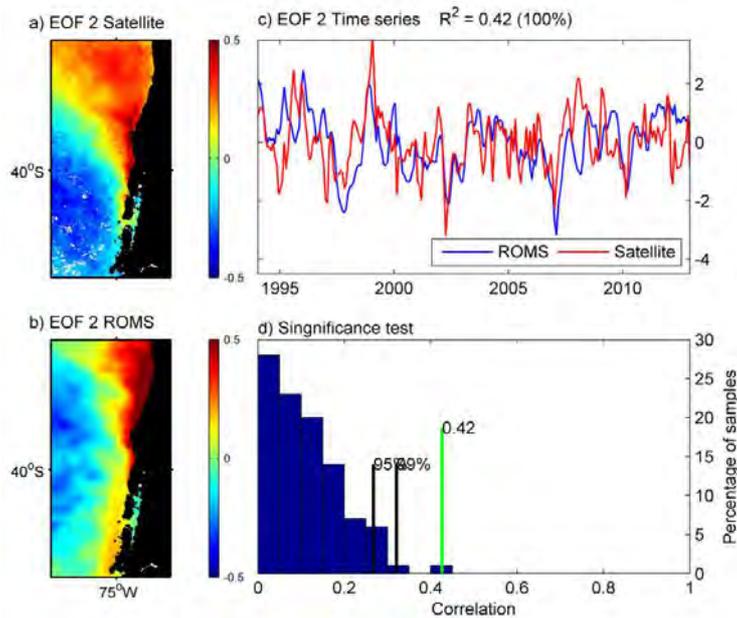


Figura 17. EOF del segundo modo de variabilidad de la TSM. Dominio espacial para a) Datos satélite Pathfinder y b) ROMS, c) serie de tiempo 1993 – 2012 para datos de satélite y ROMS, d) significancia de la correlación entre series de tiempo basada en la función de densidad de probabilidad de los coeficientes de correlación cruzada.

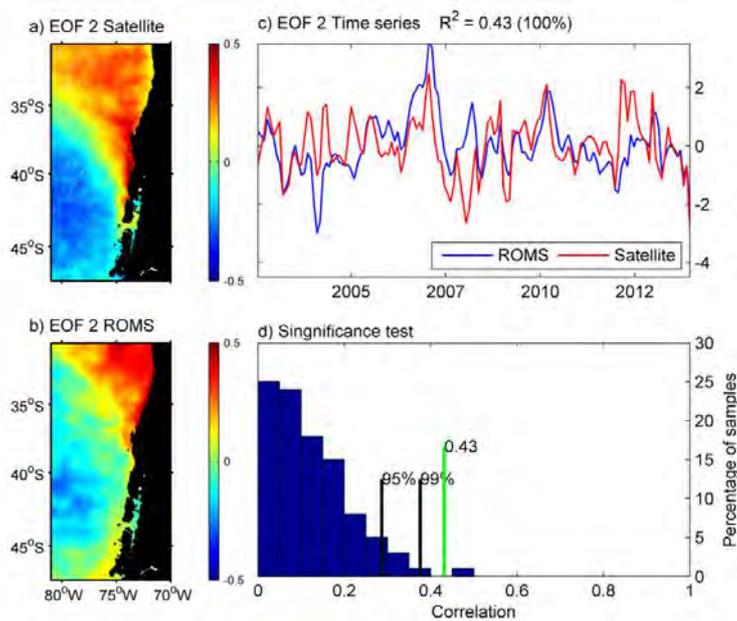


Figura 18. EOF del segundo modo de variabilidad de la TSM. Dominio espacial para a) Datos satélite Modis-Aqua y b) ROMS, c) serie de tiempo 2002 – 2013 para datos de satélite y ROMS, d) significancia de la correlación entre series de tiempo basada en la función de densidad de probabilidad de los coeficientes de correlación cruzada.

6.1.2. Validación de la estructura vertical a través del uso de datos *in situ*

La Figura 19 muestra el diagrama de Taylor que compara los datos de temperatura proveniente de los cruceros de inviernos (julio y agosto) y las salidas de modelo ROMS dominio hijo (utilizado para la modelación biofísica). Los puntos en rojos corresponden a las diferentes profundidades a las cuales se compararon los datos del modelo y CTD: 1, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400 y 500 metros de profundidad. La posición de cada punto sobre el gráfico cuantifica cuán cerca las salidas del modelo (a diferentes profundidades) está de los datos observados. El patrón de correlación entre el modelo ROMS y las mediciones está dado por la coordenada acimutal, en general el modelo muestra altos valores de correlación (0,7 - 0,8) para profundidades entre 1-50 metros. Por otro lado, la distancia de cualquier punto rojo (modelo) al origen del Diagrama de Taylor corresponde a la desviación estándar, el grupo de puntos superficiales tienen un desviación estándar entre 0,8 y 0,9. Mientras que la RCM está representada por las líneas grises segmentadas centradas en cero, sobre el lado derecho de la figura, estas profundidades están alrededor de 0,6 de RCM

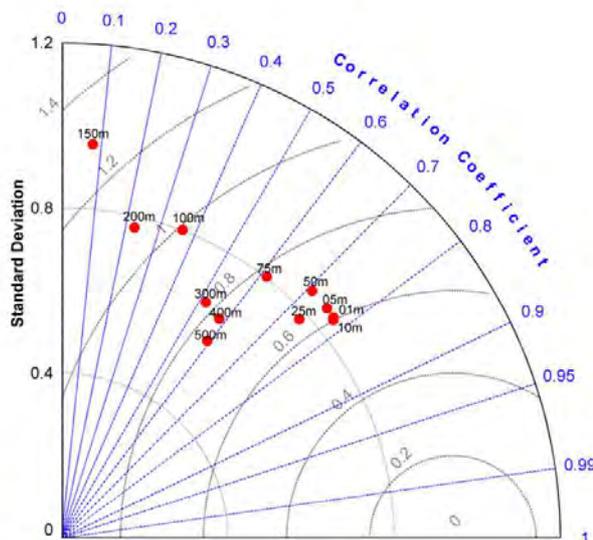


Figura 19. Diagrama de Taylor para la variable temperatura en invierno a 1, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400 y 500 metros de profundidad. En rojo los valores a diferentes profundidades del modelo ROMS dominio hijo.

En la Figura 20 se muestra el diagrama de Taylor que compara los datos de temperatura proveniente de los cruceros de verano (Enero) y las salidas de modelo ROMS dominio hijo. Los puntos en rojos corresponden a las valores a diferentes profundidades a las cuales se compararon los datos del modelo y CTD: 1, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400 y 500 metros de profundidad. El patrón de correlación entre el modelo ROMS y las mediciones está dado por la coordenada acimutal, en general el modelo ROMS dominio hijo para el mes de Enero la mayoría de los puntos de modelo a diferentes profundidades tiene una correlación entre 0,4 - 0,6. Por otro lado, los valores más grandes para la desviación estándar correspondió a las profundidades menores: 1, 5, 10, 25 metros, donde sus valores están entre los valores 1,5 y 2,0. Mientras que la RCM está representada por las líneas grises segmentadas centradas en cero, sobre el lado derecho de la figura, para la mayoría de las profundidades están alrededor de 1,5 y 2,0 de RCM.

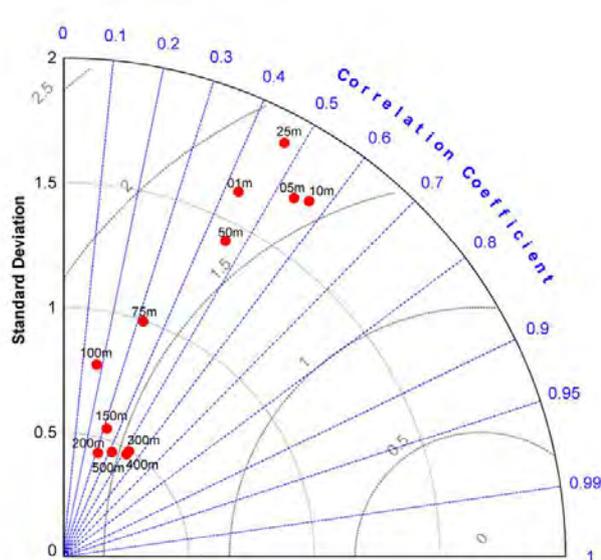


Figura 20. Diagrama de Taylor para la variable temperatura en verano a 1, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400 y 500 metros de profundidad. En rojo los valores a diferentes profundidades del modelo ROMS dominio hijo.

En la Figura 21 se muestra el diagrama de Taylor que compara los datos de salinidad proveniente de los cruceros de invierno (Julio y Agosto) y las salidas de modelo ROMS dominio hijo. Los puntos en rojos corresponden a las valores a diferentes profundidades a las cuales se compararon los datos del modelo y CTD: 1, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 150, 200, 300,

400 y 500 metros de profundidad. En general el modelo ROMS dominio hijo, para el mes de Enero presenta una buena correlación (0,6 – 0,8) para la salinidad en los diferentes estratos de profundidades seleccionados. Por otro lado, los valores más grandes para la desviación estándar correspondieron a las profundidades entre 1 y 50 metros, donde sus valores están entre los valores 0,4 y 0,6. Mientras que la RCM para el grupo de puntos del modelo pertenecientes a los primeros 100 metros de profundidad está entre 0,6 y 0,8.

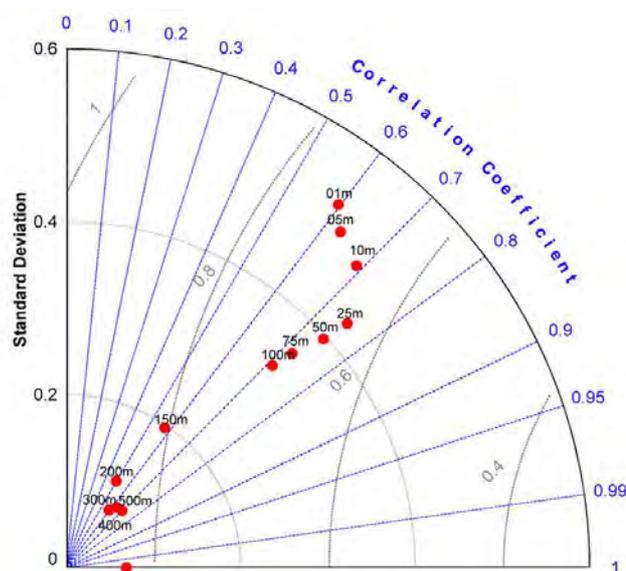


Figura 21. Diagrama de Taylor para la variable salinidad en invierno a 1, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400 y 500 metros de profundidad. En rojo los valores a diferentes profundidades del modelo ROMS dominio hijo.

En la Figura 20 muestra el diagrama de Taylor que compara los datos de salinidad proveniente de los cruceros de verano (Enero) y las salidas de modelo ROMS dominio hijo. Los puntos en rojos corresponden a las valores a diferentes profundidad a las cuales se compararon los datos del modelo y CTD: 1, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400 y 500 metros de profundidad. El patrón de correlación entre el modelo ROMS y las mediciones muestran una correlación que está entre 0,5 y 0,6 para las distintas profundidades evaluadas. Por otro lado, los valores más grandes de desviación estándar correspondió a las profundidades menores: 1, 5, 10, 25 metros, donde sus valores están en torno a 0,4. Mientras que la RCM está representada por las líneas grises segmentadas centradas en cero,

sobre el lado derecho de la figura, para la mayoría de las profundidades están alrededor de 0,4 y 0,5 de RCM.

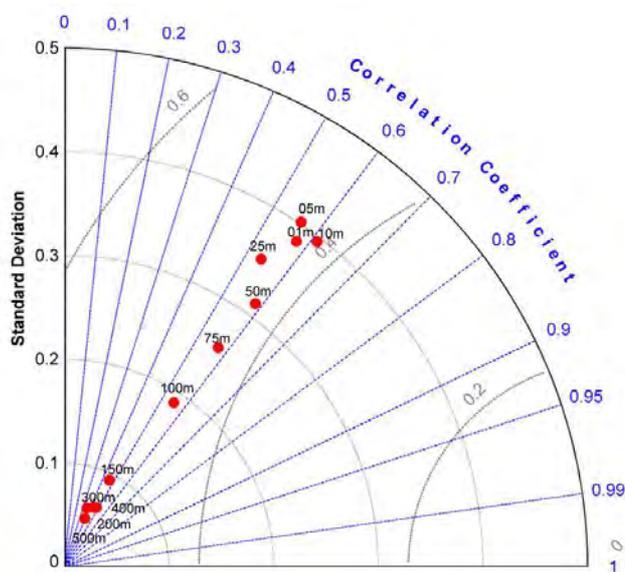


Figura 22. Diagrama de Taylor para la variable salinidad en verano a 1, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400 y 500 metros de profundidad. En rojo los valores a diferentes profundidades del modelo ROMS dominio hijo.

A partir de los mismos datos utilizados en los diagramas de Taylor, se analizó la distribución vertical de las masas de agua estacionalmente a través de diagramas TS. La Figura 23 muestra el resultado de este análisis para la estación de verano. Los resultados muestran una correcta reproducción de todas las masas de agua presentes en el sistema costero centro-sur de Chile, por parte del modelo hidrodinámico. En los primeros 100 metros predominan las Aguas SubAntárticas (ASAA) las que son bien rescatadas por el ROMS, luego entre 150 y 300 metros se encuentran las Aguas Ecuatoriales SubSuperficiales (AESS), las cuales se reprodujeron correctamente en el ROMS, finalmente bajo los 400 metros tanto el CTD como el ROMS registraron a las Aguas Intermedias Antárticas (AIS). Además se observa la reproducción de aguas superficiales modificadas de bajas salinidad, las que responden a sistemas locales y que fueron recogidas por el modelo. La Figura 24 muestra el resultado del diagrama TS para la estación de invierno. Los resultados muestran una correcta reproducción de todas las masas de agua

presentes en el sistema costero centro-sur de Chile, por parte del modelo hidrodinámico, no obstante existe una leve tendencia a sobreestimar las temperaturas ($\sim 0.7^{\circ}\text{C}$). Destaca que en el estrato superficial el modelo recoge la presencia de aguas poco salinas relacionadas con el fortalecimiento de las aguas continentales y pluviales, lo que es altamente relevante para la determinación de las áreas de desove de anchoveta.

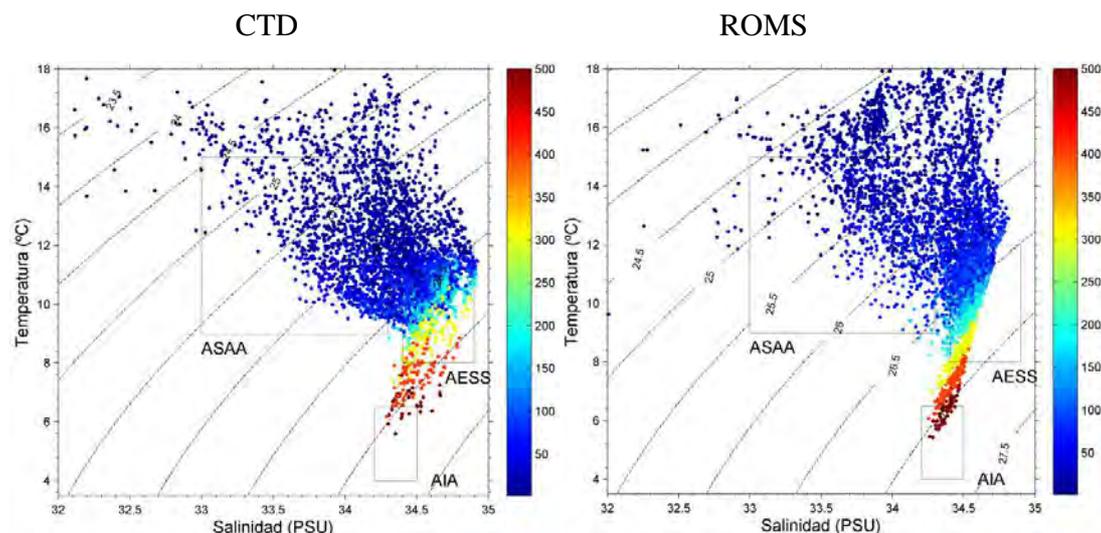


Figura 23. Diagrama TS obtenido desde datos oceanográficos CTD (izquierda) y modelo ROMS (derecha) en el área costera centro-sur de Chile, temporada de verano (Enero).

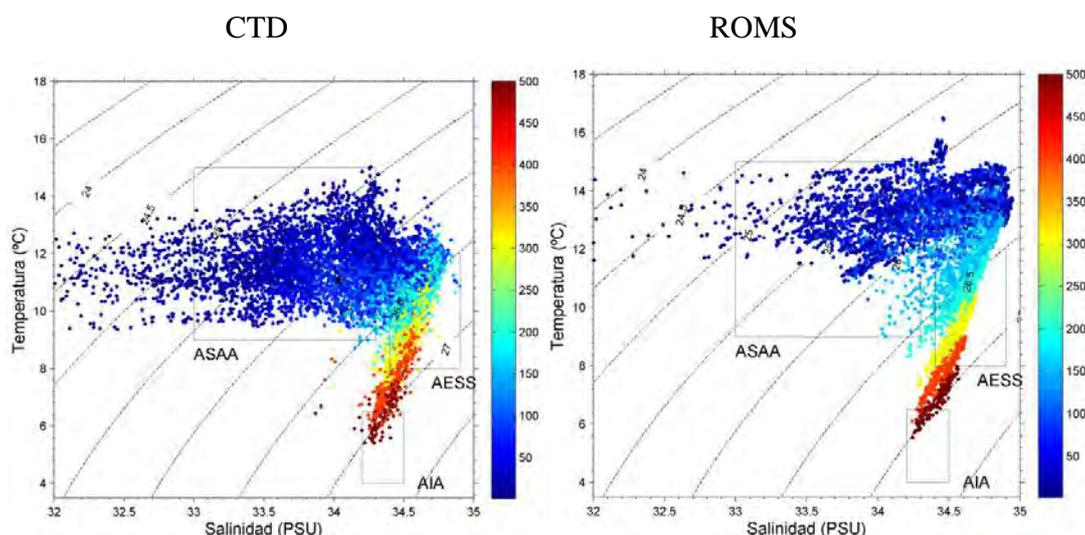


Figura 24. Diagrama TS obtenido desde datos oceanográficos CTD (izquierda) y modelo ROMS (derecha) en el área costera centro-sur de Chile, temporada de invierno (Julio Agosto).

6.2. Síntesis de la información biológica que sustenta el sistema de modelación biofísica: *Sub-modelos*

6.2.1. Sub-modelo de distribución espacial del desove, generación de drifters

Un aspecto clave de la modelación biofísica es la inicialización, la que debe realizarse incorporando la mejor información disponible respecto a observaciones de campo. En este contexto, el presente estudio recopiló información respecto a la distribución espacial de desoves de anchoveta, los cuales han sido registrados en los cruceros destinados a la evaluación de la biomasa desovante de pequeños pelágicos mediante el método de producción diaria de huevos (MPDH). Los resultados de estos cruceros han mostrado evidencia de desove de anchoveta entre los 33° y 31°S con focos de mayor abundancia en el sector costero de las regiones del Bío-Bío y principalmente de Los Ríos donde, según esta información, se encontraría la mayor y más recurrente área de desove de la zona centro-sur de Chile, con sobre el 50% de los desoves observados en todos los años (alcanzando incluso el 90%) entre los 38° y 40°S (Figura 25; Cubillos *et al.*, 2013). Además, existe variabilidad interanual en los focos de desove lo que está vinculado con aspectos demográficos como el tamaño poblacional, como también podría estar asociado a condiciones ambientales que propicien la actividad reproductivas del stock desovante.

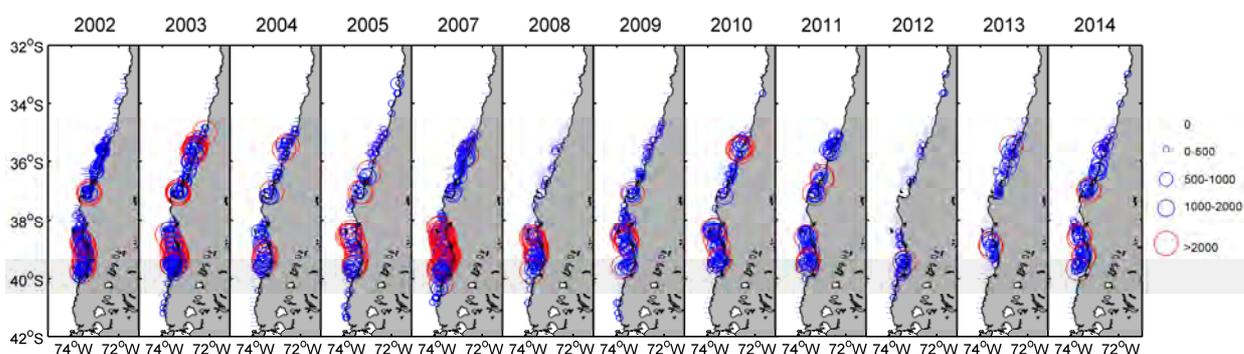


Figura 25. Distribución espacial de los desoves de anchoveta en la zona centro-sur de Chile identificados a través de los cruceros MPDH realizados por medio de proyectos del Fondo de Investigación Pesquera.

Como ha quedado establecido en este estudio y en experiencias previas de modelación (Bartsch *et al.*, 2004; Ospina-Álvarez *et al.*, 2015; Vásquez *et al.*, 2016), la inclusión de condiciones iniciales realistas para el estudio de la conectividad es un tópico relevante. Sin

embargo, a pesar de que la información provista por los cruceros de MPDH posee una buena cobertura espacial para la época del crucero (ver Figura 25), esta evaluación sólo ha sido desarrollada entre los años 2002 y 2015 (con excepción del año 2006), lo que involucra una cobertura temporal que no soporta al periodo propuesto en este estudio (1994-2014). Además, uno de los aspectos que recientemente ha tomado relevancia en modelación biofísica es la inclusión de la variabilidad intra-anual en la distribución espacial del desove (Ospina-Álvarez *et al.*, 2013, lo cual por las características de la información de campo (amplia extensión temporal, sólo un crucero) es imposible de soportar observacionalmente. Considerando que el modelo hidrodinámico validado para la región de estudio provee de condiciones oceanográficas continuas en el espacio y tiempo, es posible obtener variables abióticas para cada observación de huevos de anchoveta (considerando el día y el punto geográfico particular de muestreo). De esta manera, se obtuvo una matriz año, latitud, longitud, densidad de huevos de anchoveta, temperatura y salinidad la cual fue utilizada para el establecimiento de modelos aditivos generalizados (GAM) predictivos del desove de anchoveta. Luego, de un análisis exploratorio de posibles modelos predictivos el modelo que explicó mayor porcentaje de varianza correspondió a aquel que incluyó la interacción entre las variables espaciales (latitud y longitud) y la inclusión de las variables temperatura y salinidad como variables predictivas. Además, esta versión del modelo incluyó la extensión de la grilla de muestreo de variables abióticas hasta los 80°W a cuyos registros se les asignó el valor 0 ("ceros falsos") de densidad de huevos para mejorar la parametrización del modelo GAM. La Tabla XIII muestra el resumen del modelo predictivo para el desove espacio-temporal de anchoveta el cual utilizó la distribución de probabilidades de la familia quasipoisson para evitar la sobre-dispersión producto de la alta ocurrencia de datos cero.

Tabla XIII. Resumen del GAM que predice la densidad espacio-temporal de huevos de anchoveta en todo el dominio espacial del área de estudio.

```

Family: quasipoisson
Link function: log

Formula:
egg.prod.m2 ~ s(Long, Lat) + s(SST) + s(SSS)

Parametric coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  -7.9587     0.6661  -11.95  <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Approximate significance of smooth terms:
              edf Ref.df      F p-value
s(Long,Lat) 28.890 28.996 117.68 <2e-16 ***
s(SST)       8.988  9.000 148.83 <2e-16 ***
s(SSS)       8.766  8.983  90.05 <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

R-sq. (adj) = 0.223  Deviance explained = 58.5%
GCV = 419.12  Scale est. = 311.8      n = 8634

```

La Figura 26 muestra la relación entre las tendencias interanuales observada y modelada, no obstante todas las variables predictoras mostraron una significancia estadística alta ($p < 0,01$), el nivel estadístico de ajuste fue bajo ($R^2 = 0,223$), sin embargo el modelo reprodujo de buena manera la tendencia de lo observado en el campo, permitiendo reconstruir temporalmente la variabilidad de la densidad de huevos de anchoveta. Un ejemplo de predicción espacial bajo un set de datos ambientales se muestra en la Figura 27, incluyendo la generación de posiciones individuales para inicializar el modelo biofísico.

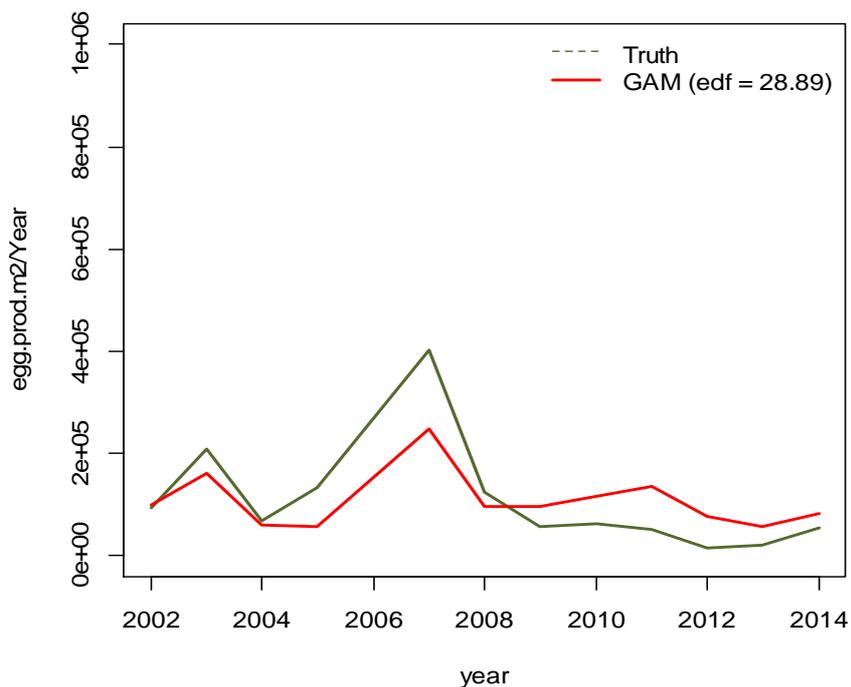


Figura 26. Densidad de huevos de anchoveta observados (verde) y modelado mediante modelos aditivos generalizados (GAM; rojo).

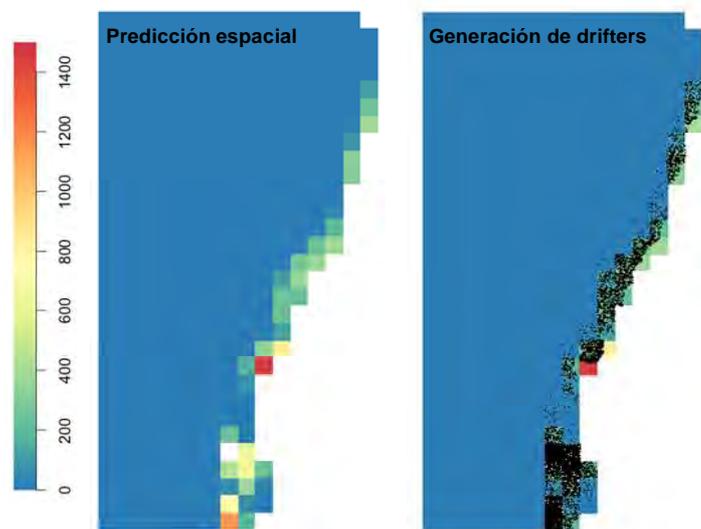


Figura 27. Predicción espacial del desove de anchoveta utilizando la temperatura y salinidad como variables predictoras.

Uno de los aspectos destacados en el esquema de modelación biofísica planteado en este estudio es la precisión en la inicialización del modelo, donde la ubicación espacial de la liberación de los individuos modelados es clave. En este contexto, experiencia previas de

modelación incluían grillas de liberación en donde se distribuían aleatoriamente fracciones del total desovado (ver Vásquez, 2012 para detalles). En el presente estudio utilizando la predicción espacial del GAM se generaron distribuciones independientes para cada pulso de desove (ver sección 6.2.2. Submodelo de sincronización del desove). Este procedimiento consideró las condiciones de temperatura y salinidad del modelo ROMS a 10 metros de profundidad para la fecha de las liberaciones, las cuales se contrataron con el modelo predictivo espacial. Este análisis que permite la generación de individuos (*drifters*) los cuales tendrán una ubicación espacial propia y que en conjunto replicarán la densidad espacial de huevos de anchoveta registrados por los cruceros de evaluación en función de las condiciones abióticas imperantes a lo largo de la temporada reproductiva. Esto último, además de permitir una variabilidad intra-anual en las condiciones espaciales de desove, permitió la generación de individuos en años donde no hubo observación espacial desde crucero. La Figura 28 muestra la generación de un set de *drifters* a partir del modelo espacio-temporal GAM que simula el desove de anchoveta y que rescata los rasgos espaciales observados bajo un esquema de modelación basado en el hábitat. A partir de la producción de huevos en el espacio se obtuvo la distribución espacial de 20.000 individuos, los cuales ingresan al módulo de liberación espacial de ICHTHYOP dando un inicio realista a la modelación.

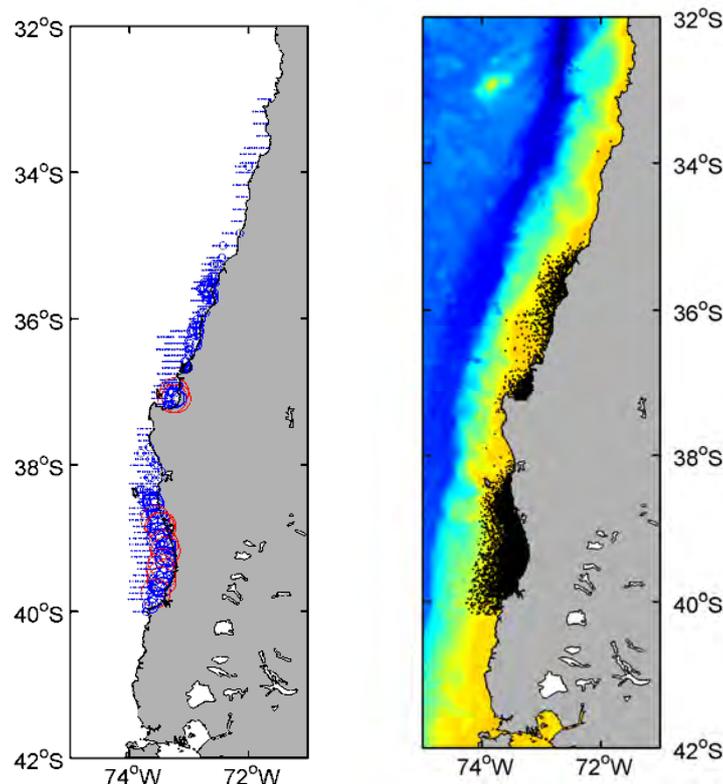


Figura 28. Desove observado de anchoveta año 2002 (panel izquierdo); desove modelado de anchoveta año 2002, cada punto corresponde a individuos simulados para la liberación en ICHTHYOP, en colores la batimetría del modelo hidrodinámico.

De esta manera, se generaron tantos sets de condiciones de desove como pulsos estimados en la duración de la temporada reproductiva (ver sección 6.2.2. Submodelo de sincronización del desove), lo que permitió evaluar la amplitud latitudinal del proceso reproductivo modelado desde una perspectiva interanual. La Figura 29 muestra la variabilidad interanual en la manifestación espacial del desove. Los desoves de anchoveta mostraron cierta consistencia en su centro de gravedad, el cual estuvo en torno a los 39°S, no obstante los límites latitudinales mostraron rasgos de variabilidad interanual. El año 1997 destaca por no manifestar desove al norte de los 35°S probablemente asociado a condiciones extremas generadas por El Niño lo que redundó en una manifestación más al sur de las condiciones propicias para el desove. Una situación similar se observó en los años 2005, 2007, 2009, 2010, 2012, 2013 y 2014, aunque con una intensidad menor que no limitó la expresión de desoves de menor intensidad al norte de los 37°S. Por otra parte los años que presentaron una mayor extensión hacia el norte fueron correspondieron al periodo

1998-2004, además del 2006 y 2008. No obstante esta aproximación solo incluye dos variables de interés para describir las condiciones del hábitat de desove de la anchoveta, resultó ser explicativa y con un buen nivel predictivo de las zonas de desove. La extensión costa-afuera de la grilla de observación ("ceros falsos") permitió delimitar de mejor manera las condiciones bajo las cuales se observa el desove. Aunque explícitamente este proceso no se asoció con la dinámica de estructuras de mesoescala, la aproximación utilizada está fuertemente ligada con la presencia de frentes de densidad presentes en el sector costero, los cuales son representados por las variables temperatura y salinidad. En particular, la zona entre 38° y 40°S, donde se observa preferentemente el desove de anchoveta, se caracterizan por la presencia de un marcado frente costero producto del aporte de aguas continentales que se maximiza en invierno, cuando ocurre la reproducción de esta especie (más información en Anexo I). La inclusión detallada del aporte de agua dulce a través de ríos en el modelo hidrodinámico, permitió la correcta definición del ambiente de desove de anchoveta (frentes costero de mesoescala) y la obtención de un modelo de predicción de la distribución de huevos. No obstante, el nivel explicatorio de este modelo podría incrementar mediante la identificación e inclusión de otras variables y/o procesos (meso y submesoescala) críticos para el desove, lo que constituye un desafío hacia futuras versiones del modelo biofísico.

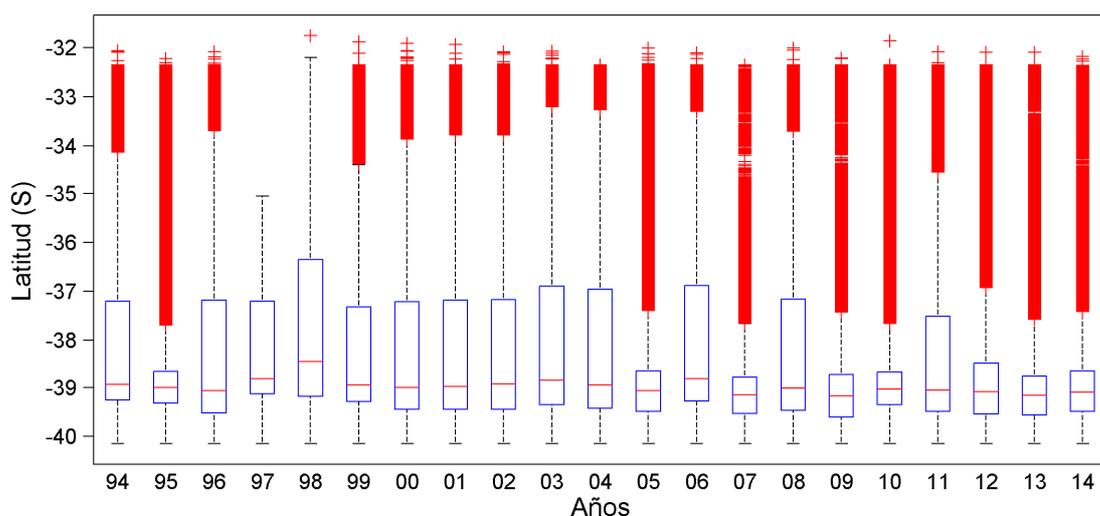


Figura 29. Distribución latitudinal de los desoves modelados de anchoveta en el periodo 1994-2014 las cajas indican la media (valor central), la desviación estándar (caja), el rango (barras) y los valores atípicos (cruces rojas).

6.2.2. *Submodelo de sincronización temporal del desove*

Un punto relevante asociado al esquema de modelación biofísica es la definición del comienzo y el fin de la temporada reproductiva en un ciclo anual de modelación. El esquema propuesto en este proyecto incluyó una liberación proporcional a la actividad reproductiva de las hembras de anchoveta en la secuencia inicio, máximo y fin del desove, los cuales deben estar definidos por un método adecuado que dé cuenta de estos procesos biológicos en la escala intra e interanual. La estimación de temporada reproductiva se llevó a cabo a partir de una serie de tiempo mensual de IGS proveniente del muestreo regular sobre las flotas artesanal e industrial llevado a cabo por INPESCA. De acuerdo a la metodología propuesta, para cada año del periodo 1994-2014 se consideró un año biológico para rescatar el ciclo anual del desove (abril-marzo en anchoveta), considerando hembras maduras (11-18 cm en anchoveta). Una vez definidos estos parámetros poblacionales, la modelación se enfocó en el máximo reproductivo definido como los percentiles de 25 y 75% en torno al máximo estimado por el modelo sigmoideo. La Tabla XIV muestra el resultado de la estimación del inicio, máximo y término de la temporada reproductiva para anchoveta y las fechas de inicio y término de la modelación biofísica. La variabilidad interanual en estos parámetros se observa en la Figura 30a. En general, la temporada reproductiva de anchoveta se encuentra centrada entre los meses de agosto y octubre, donde alcanza su máximo, con cierta variabilidad interanual que arroja una leve tendencia a desplazarse hacia finales del año desde el año 2005 hasta el 2011, donde los resultados sugieren que la temporada reproductiva retorna a una sincronización similar a lo observado durante la década de 1990. En cuanto a la duración de la temporada reproductiva, está muestra fuertes signos de variabilidad temporal (Figura 30b) con una duración en torno a los 4,5 meses durante el periodo 1994-2004, para luego disminuir bajo los 4 meses entre 2005 y 2010 (incluso acercándose a los 3 meses de duración) desde cuando retorna a la situación previa en torno a los 4,5 meses. Estas estimaciones indicaron el inicio y término del proceso de modelación biofísica en anchoveta y las liberaciones se realizaron cada 5 días en este periodo estimado. Consistentemente, la modelación biofísica incorporó estas variaciones demográficas manifestadas por la anchoveta en la zona centro-sur de Chile, por lo que los indicadores de sobrevivencia y reclutamiento emanados de este estudio

incorporarán intrínsecamente estos aspectos relacionados con el stock desovante de anchoveta.

Tabla XIV. Resultados de la estimación de temporada reproductiva de anchoveta: *a*, *b* y *c* son los parámetros de la función sigmoidea; 25% y 75% representan el inicio y termino de la actividad reproductiva en año biológico (agregar 3 meses para convertir a año calendario). Las columnas en rojo indican los estimados de inicio y término de la modelación biofísica.

Año	a	b	c	25%	50%	75%	Duración	Fecha inicio	Fecha máximo	Fecha termino	Inicio máximo	Fin máximo
1994	56.16	3.27	0.52	4.17	6.27	8.38	4.21	05/07/1994	08/09/1994	11/11/1994	07/08/1994	10/10/1994
1995	54.95	2.55	0.46	3.14	5.53	7.91	4.77	04/06/1995	16/08/1995	28/10/1995	11/07/1995	22/09/1995
1996	46.00	2.88	0.43	4.10	6.64	9.18	5.08	03/07/1996	19/09/1996	06/12/1996	11/08/1996	28/10/1996
1997	43.90	3.17	0.51	4.08	6.25	8.42	4.34	02/07/1997	07/09/1997	12/11/1997	05/08/1997	10/10/1997
1998	61.33	3.20	0.54	3.92	5.96	8.01	4.09	28/06/1998	30/08/1998	01/11/1998	30/07/1998	01/10/1998
1999	54.05	3.30	0.49	4.50	6.75	9.00	4.50	16/07/1999	23/09/1999	01/12/1999	20/08/1999	28/10/1999
2000	71.04	3.62	0.49	5.14	7.38	9.63	4.49	04/08/2000	12/10/2000	19/12/2000	08/09/2000	15/11/2000
2001	67.71	2.95	0.43	4.32	6.89	9.46	5.14	10/07/2001	27/09/2001	14/12/2001	19/08/2001	05/11/2001
2002	66.75	3.17	0.44	4.68	7.17	9.65	4.97	21/07/2002	05/10/2002	20/12/2002	28/08/2002	12/11/2002
2003	60.74	2.98	0.43	4.33	6.86	9.38	5.05	10/07/2003	26/09/2003	12/12/2003	19/08/2003	04/11/2003
2004	70.95	3.23	0.49	4.36	6.61	8.86	4.50	11/07/2004	18/09/2004	26/11/2004	15/08/2004	23/10/2004
2005	53.58	3.70	0.58	4.53	6.44	8.35	3.82	16/07/2005	13/09/2005	10/11/2005	15/08/2005	12/10/2005
2006	49.49	3.79	0.52	5.15	7.25	9.35	4.20	05/08/2006	08/10/2006	11/12/2006	06/09/2006	09/11/2006
2007	42.16	4.31	0.71	4.56	6.12	7.68	3.12	17/07/2007	04/09/2007	20/10/2007	12/08/2007	27/09/2007
2008	39.44	4.35	0.67	4.86	6.50	8.15	3.28	27/07/2008	15/09/2008	04/11/2008	21/08/2008	10/10/2008
2009	41.82	4.58	0.66	5.28	6.94	8.61	3.33	08/08/2009	28/09/2009	18/11/2009	03/09/2009	24/10/2009
2010	59.08	4.12	0.56	5.40	7.36	9.32	3.93	12/08/2010	11/10/2010	10/12/2010	11/09/2010	10/11/2010
2011	74.41	4.05	0.49	5.98	8.21	10.43	4.45	29/08/2011	06/11/2011	12/01/2012	04/10/2011	10/12/2011
2012	74.20	3.45	0.48	4.94	7.25	9.56	4.62	29/07/2012	08/10/2012	17/12/2012	03/09/2012	12/11/2012
2013	71.09	3.10	0.49	4.06	6.30	8.53	4.46	02/07/2013	09/09/2013	16/11/2013	06/08/2013	13/10/2013
2014	75.66	3.20	0.55	3.81	5.80	7.79	3.98	24/06/2014	24/08/2014	24/10/2014	25/07/2014	24/09/2014

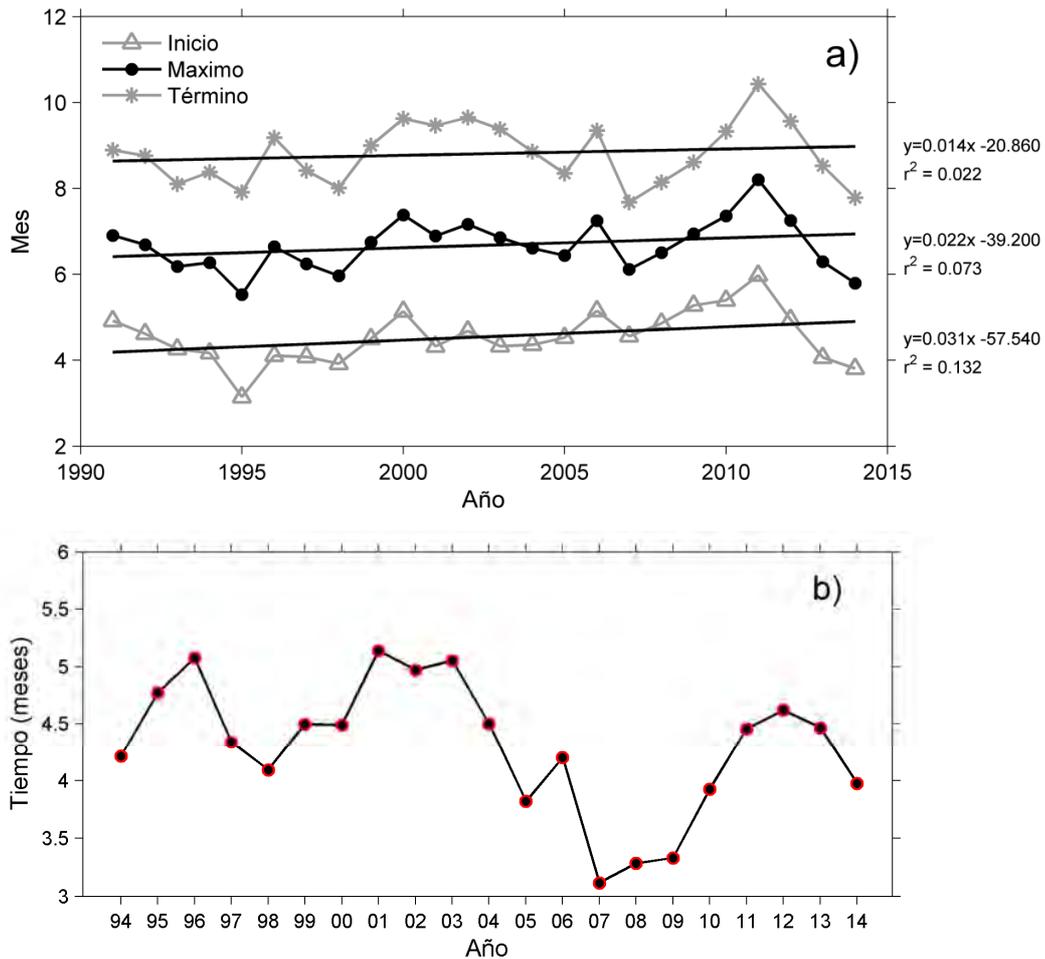


Figura 30. a) Comienzo, máximo y fin de la temporada reproductiva de anchoveta en la zona centro-sur de Chile y regresión lineal para cada serie de tiempo; b) duración de la temporada de desove de la anchoveta calculada como el tiempo transcurrido entre el inicio y el término estimado.

6.2.3. Submodelo de crecimiento

El modelo de crecimiento de huevos, larvas y juveniles de anchoveta se abordó desde dos perspectivas en el presente proyecto: i) un análisis temperatura-dependiente del crecimiento temprano de anchoveta, y ii) un análisis del crecimiento diario de anchoveta basado en el análisis de microincrementos diarios para establecer una curva de crecimiento para individuos de hasta un año de edad

6.2.3.1. Submodelo de crecimiento temperatura-dependiente

Uno de los principios de la modelación basada en el individuo indica que la dinámica de una población emerge de la historia de vida de los individuos, pero el ciclo de vida de los

individuos y su comportamiento está completamente representado por reglas empíricas que describen los procesos biológicos (Grimm *et al.*, 2005). Una de esos aspectos clave es el patrón del crecimiento, el cual es variable entre individuos y altamente influenciado por la temperatura del medio (Jobling, 1994). En este estudio la temperatura se incorporó como un modulador, tanto el desarrollo de huevos, como el crecimiento de larvas y juveniles de anchoveta.

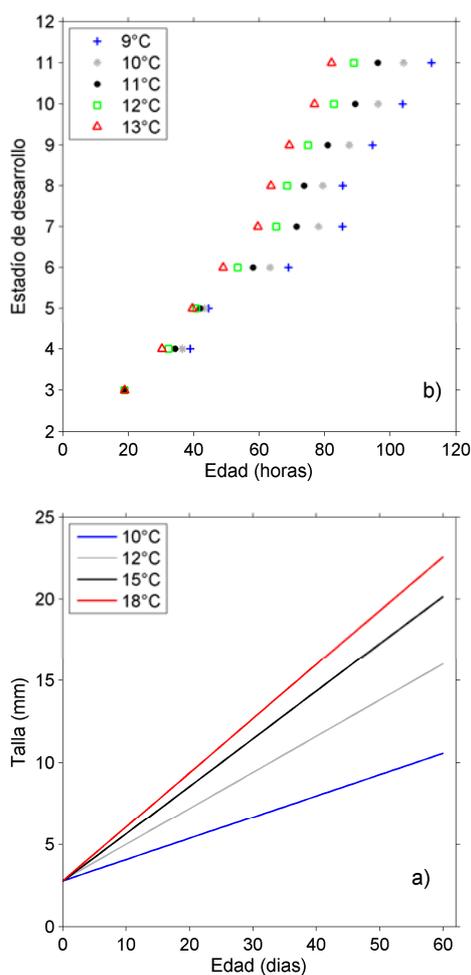


Figura 31. a) Desarrollo de huevos de anchoveta bajo distintos regímenes de temperatura (modificado de Sepúlveda *et al.*, 2000); b) curvas de crecimiento temperatura-dependiente para larvas y juveniles de anchoveta (modificado de Llanos-Rivera, 2005).

La Figura 31a muestra las curvas de desarrollo de huevos de anchoveta cultivados a distintas temperaturas evidenciando la sensibilidad respecto a esta variable. El tiempo

transcurrido entre el desove y la eclosión de larvas con saco vitelino fue de 112,6, 104,0, 96,1, 88,8 y 82,1 para temperaturas de 9°, 10°, 11°, 12° y 13° respectivamente mostrando una variación de 27% en el tiempo de desarrollo como respuesta a un cambio de 5°C. Por otra parte, la Figura 31b muestra las curvas de crecimiento larval obtenidas desde datos experimentales para anchovetas mantenidas en distintas temperaturas. Las tasas de crecimiento promedio fueron de 0,13, 0,22, 0,29 y 0,33 mm d⁻¹ para individuos mantenidos en condiciones controladas a 10°, 12°, 15° y 18°C respectivamente. Lo anterior considera que el tiempo transcurrido entre la eclosión y los 20 mm (talla de reclutamiento en este estudio) es de 133, 79, 60 y 53 días respectivamente. De acuerdo a estos criterios realistas, el crecimiento en el módulo de ICHTHYOP consideró que el crecimiento entre un paso de tiempo y el siguiente es dependiente de las condiciones térmicas que experimente en su cambio de ubicación tridimensional provistas por el modelo hidrodinámico ROMS. La Figura 32 muestra el resultado del crecimiento biofísico y evidencia las diferencias en la historia de vida temprana de individuos desovados el mismo día (desove del 27/08/1994), pero en distintos sitios de desove a lo largo del hábitat utilizado para la reproducción de anchoveta. Este ejemplo muestra que para un mismo realista de anchoveta puede haber aproximadamente 20 días de rango de duración de la fase pelágica, variando entre 69 y 95 días transcurridos hasta alcanzar los 20 mm de longitud total, lo que tiene un impacto en el tiempo de transporte en el cual los individuos están vulnerables a diversas causas de mortalidad (e.g. advección costa afuera).

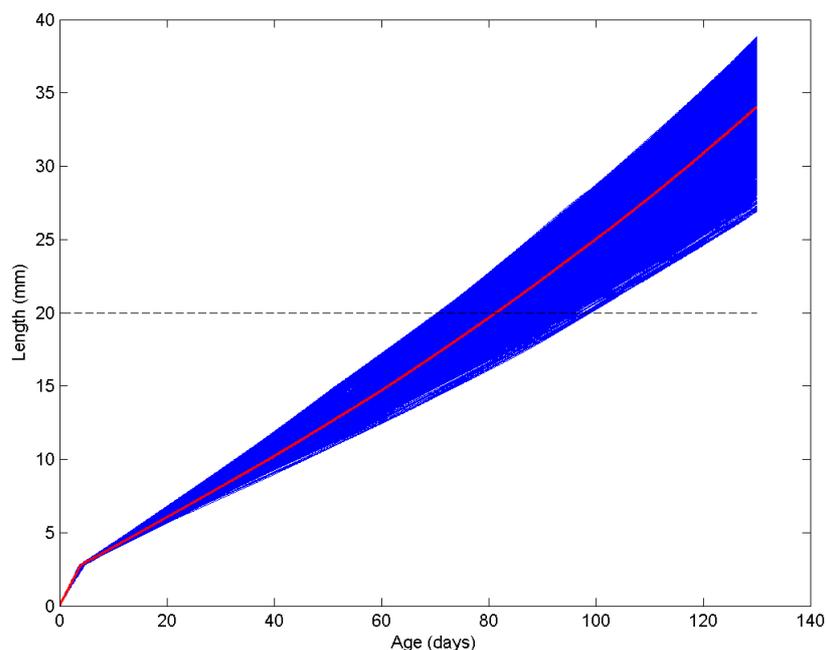


Figura 32. Ejemplo de crecimiento individual temperatura-dependiente para un pulso de desove biofísico de anchoveta realizado el 27/08/1994

6.2.3.2. Submodelo de crecimiento diario basado en el análisis de microincrementos

Una segunda aproximación hacia el crecimiento temprano de anchoveta fue aquella abordada mediante el análisis de la microestructura de otolitos de individuos bajo la talla de madurez sexual. Los otolitos de *E. ringens* presentan una microestructura clara en peces reclutas y juveniles, siendo posible contabilizar la totalidad de sus incrementos de crecimiento diario, incluso en los individuos de 12 cm LT (mayor talla analizada para esta especie en este proyecto). Se determinó una alta correlación entre el radio máximo del otolito y la longitud del pez ($R^2 = 0.85$; Figura 33), demostrando que el crecimiento somático y otolitario se encuentran altamente acoplados en estas etapas de la ontogenia.

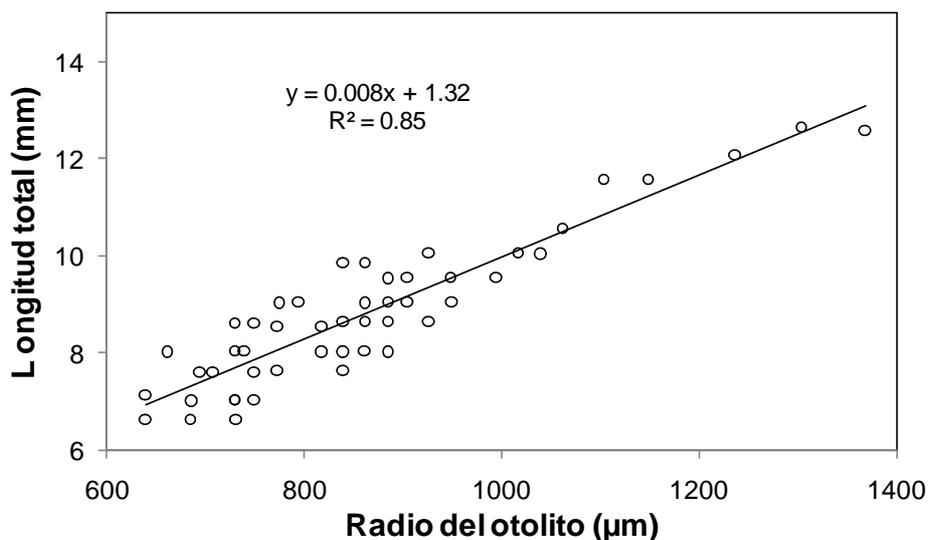


Figura 33. Relación entre longitud horquilla (cm) y el radio del otolito (μm) de *E. ringens* colectados en la VIII región.

La relación edad (días) y longitud total de *E. ringens* en larvas y juveniles presenta un buen ajuste para todos los modelos estudiados, exceptuando el modelo exponencial (Figura 34), ninguno de los individuos analizados alcanzó el año de vida, según el análisis de incrementos diarios. El modelo de von Bertalanffy general es el que presenta un mejor ajuste según el criterio de AIC (Tabla XV).

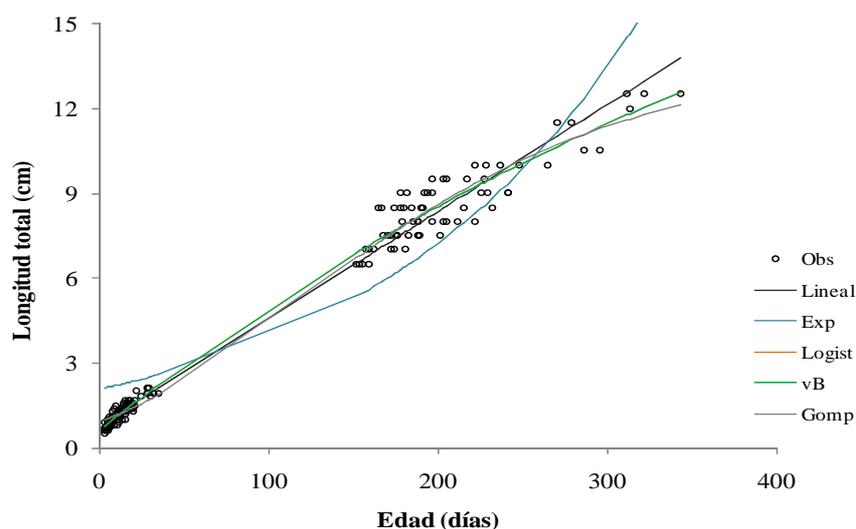


Figura 34. Edad en días observadas en larvas y juveniles de *E. ringens*, individuos de talla inferior a los 3 cm corresponden a datos reportados por Hernández y Castro (2000), y ajuste de cinco modelos probados para describir su crecimiento.

Tabla XV. Parámetros de crecimiento en longitud para *Engraulis ringens* estimados para 5 modelos diferentes. AIC= índice de Akaike.

Modelo	Parámetro	Estimado	Error est.	Valor t	Pr(> t)	AIC
Lineal	a	0,79	0,06	14,25	<2e-16	225,3
	b	0,04	0,00	94,13	<2e-16	
Exponencial	a	2,07	0,11	18,51	<2e-16	533,7
	b	0.01	0,00	27,18	<2e-16	
Logístico	L_{∞}	25,14	3,22	7,81	9,3E-13	189,2
	G	0,002	0,0003	6,01	1,4E-08	
	E_0	-1.3E+01	1,52	-8,48	2,0E-14	
von Bertalanffy	L_{∞}	25,14	3,22	7,81	9,3E-13	189,2
	K	0,71	0,12	6,01	1,4E-08	
	t_0	-0.04	0,00	-8,48	2,0E-14	
Gompertz	$L_{h_{\infty}}$	0,92	0,05	19,80	<2e-16	207,2
	G	2,71	0,05	53,84	<2e-16	
	g	0,009	0,00	25,54	<2e-16	

La relación entre el radio del otolito y la longitud total para anchoveta ($R^2= 0.85$) fue lineal con un coeficiente de correlación alto, lo cual demuestra lo apropiado del uso de esta estructura para analizar el crecimiento somático y la edad de estas especies. El crecimiento de anchoveta estimado a través de la relación talla edad estimada al momento de la captura mostró una tendencia lineal para el rango de longitudes y edades estudiadas. Ante este escenario se ajustó el crecimiento aplicando modelos de crecimiento lineal, exponencial, logístico, von Bertalanffy y Laird-Gompertz, aunque todos modelos, excepto el exponencial, ajustan bien con coeficientes de determinación altos, el modelo von Bertalanffy es aquel que mejor representa la relación talla edad de anchoveta juvenil, seguido por el modelo Gompertz, según el criterio AIC. Para anchoveta la proyección de la curva de crecimiento von Bertalanffy hacia la fase adulta (peces > 12 cm LT) permitió estimar una talla media al año de vida de 15 cm LT, estos resultados coinciden con lo descrito por Cerna y Plaza (2015) para la zona centro sur de Chile.

6.2.4. Submodelo de movimiento por estadío

Un esquema de boyantes positiva fue implementado para huevos de anchoveta con el propósito de reproducir la distribución de este estadío, el cual en esta especie tiene una alta flotabilidad producto del alto contenido acuoso y bioquímico de los huevos (Krautz *et al.*, 2010) lo que genera una ubicación recurrente sobre la picnoclina. Además, se implementó un modelo de migración diurno-nocturna para larvas y juveniles de anchoveta en función de las observaciones de campo. Desde datos observados de distribución vertical de larvas de anchoveta en relación a la funcionalidad de la vejiga gaseosa (obtenidos de Landaeta & Castro, 2013) se estimó la probabilidad de encuentro de larvas de anchoveta para dos estratos de talla: <10mm y >10mm desde los que se ajustó un modelo de migración diurno-nocturna que puede calcular la posición de las larvas a cualquier hora del día. La Figura 35 muestra los resultados de esta aproximación, destacando que en larvas pequeñas, no se observó un patrón marcado de migración vertical, con mayor probabilidad de encuentro sobre los 50 m de profundidad (Figura 35a). Para larvas sobre 10 mm la migración vertical resultó más evidente con máxima probabilidad de encuentro en superficie durante la noche (entre las 20 y 6 h) y profundización hasta los 80 m durante el día (Figura 35b). Para este último estrato de tamaño se ajustó un modelo sinusoidal para la descripción del movimiento individual de anchovetas durante su historia de vida temprana.

De esta manera, el movimiento vertical de huevos, larvas y juveniles de anchoveta incluyó que la densidad de huevos disminuye ligeramente con el desarrollo y los huevos ascienden ligeramente hacia la superficie con el objeto que permanecieran sobre la picnoclina y esquema de migración diurna nocturna diferenciado por talla fue incluido en la modelación biofísica resultando en una extensión vertical creciente a medida que aumenta la talla (Figura 36). Así, cuando ocurre la eclosión las larvas miden 2,78 mm, y hasta los 10 mm de longitud total realizan movimientos verticales aleatorios a lo largo del día, la profundidad máxima que alcanzan son los 30 metros, mientras que los individuos mayores a 10 mm realizan cada día una migración vertical alcanzando una profundidad máxima de 50 m durante las horas y retornando a la superficie en durante la noche. Este comportamiento lo realizaron hasta el final de la simulación (Figura 36).

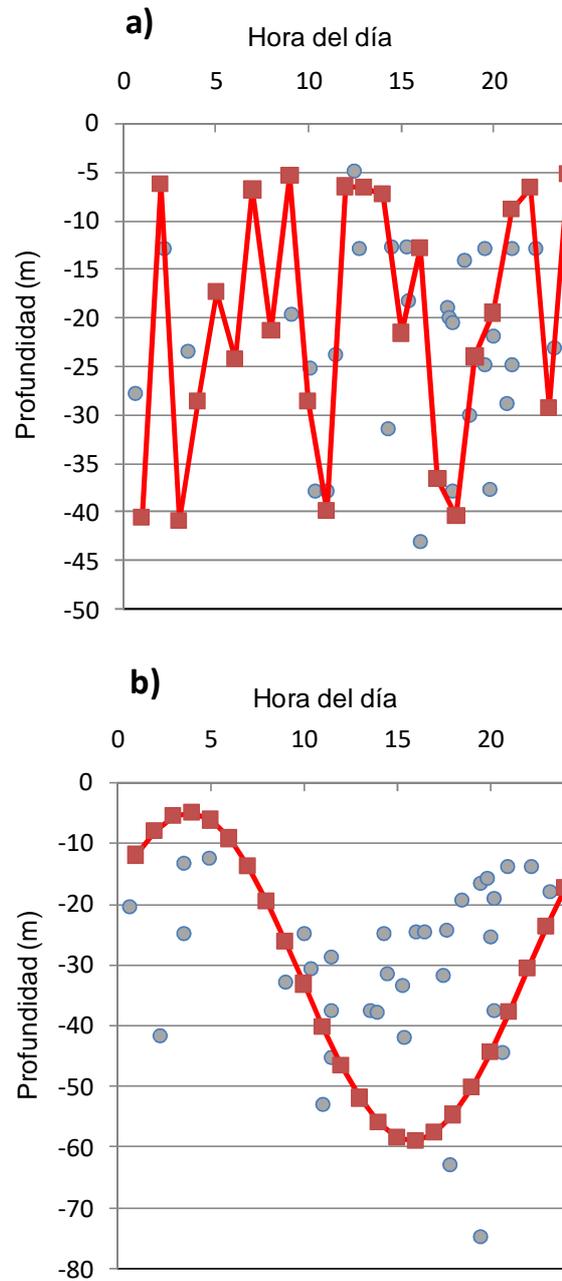


Figura 35. Distribución vertical de larvas de anchoveta desde datos observados (puntos grises) y esquema de migración diurno-nocturna usada en el modelo biofísico (línea roja) para: a) larvas bajo 10 mm de longitud total y b) larvas sobre 10 mm de longitud total.

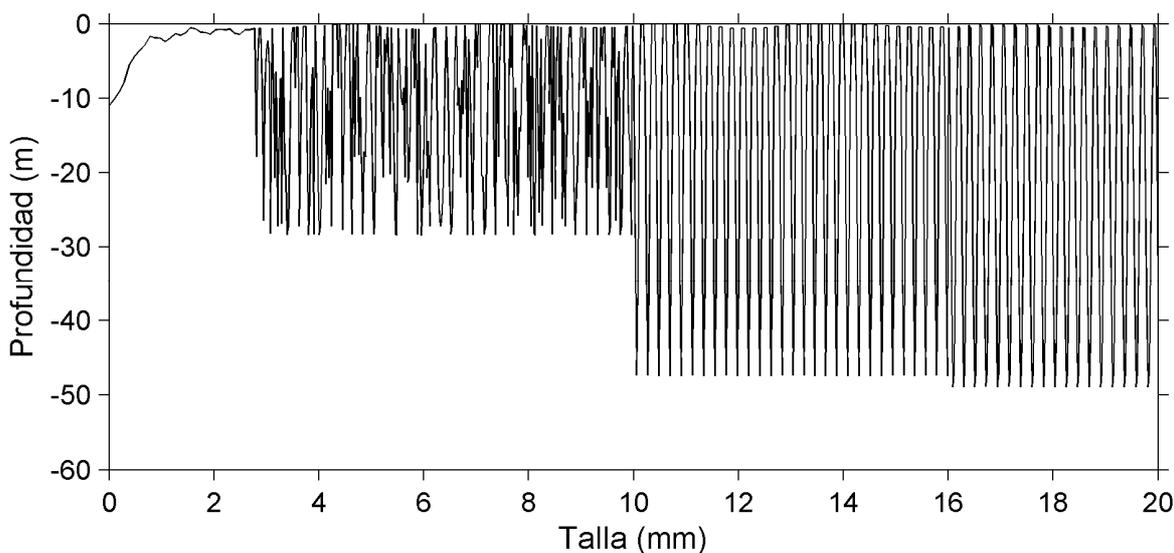


Figura 36. Esquema de movimiento vertical de larvas de anchoveta como resultado de la modelación biofísica. Incluye flotabilidad de huevos y migración diferenciada por edad para larvas y juveniles. El último patrón mostrado se extendió hasta los 20 mm de talla.

6.3. Índices de reclutamiento a partir de la modelación biofísica comparados con índices de reclutamiento provenientes de otras fuentes de información

La modelación biofísica utilizada en el presente estudio, involucra el acoplamiento de un modelo basado en el individuo con un modelo hidrodinámico. En este esquema de modelación las características poblacionales emergen de las propiedades individuales de los individuos modelados y su interacción, tanto con el medio como con otros agentes (Grimm *et al.*, 2005). En el caso del presente estudio, la modelación se inició con el proceso de desove de anchoveta el cual involucra una dimensión temporal (*timing* del desove) y espacial (área de desove) y continuó con la modelación del transporte de huevos, larvas y juveniles hasta que alcanzaron una talla de 20 mm. Durante este tiempo se contabilizan todos los individuos que alcanzaron el criterio de reclutamiento y la integración de todos estos individuos entregará información respecto a la conectividad y el reclutamiento de la anchoveta desde los sitios de desove. Una de las características principales de esta modelación es el criterio espacialmente explícito que posee, en donde en cada paso de tiempo es posible obtener las variables que experimenta cada individuo entre ellas la posición espacial. De esta manera, las trayectorias de los individuos que han reclutado exitosamente pueden ser trazadas en función de la edad/talla que experimentan y en

conjunto entregar índices espaciales y temporales hacia el reclutamiento (ver Figura 37 para ejemplo)

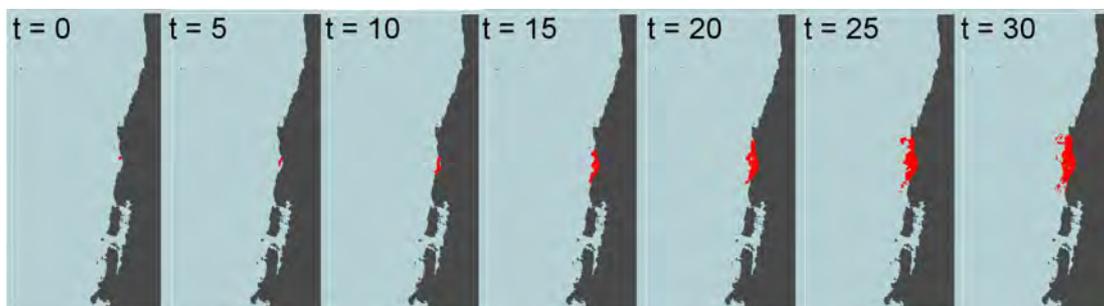


Figura 37. Ejemplo de simulación del transporte de individuos desde el 39°S y 73°30'. Los paneles corresponden a resultados rescatados cada 5 días (t). En rojo se observa la posición de cada uno de los 5000 individuos liberados

Los resultados de las trayectorias de transporte hasta la etapa de previa al reclutamiento, permiten evaluar las distancias de transporte que es equivalente a la distancia lineal (en km) entre el punto geográfico donde se realiza el desove y el punto geográfico donde el individuo recluta (alcanza los 20 mm). Este análisis permite clasificar desde un punto de vista teórico a las poblaciones de acuerdo a su nivel de dispersión en "poblaciones con retención local" (cerradas) o "poblaciones ampliamente dispersas" (abiertas) (Cowen *et al.*, 2007). La Figura 38 muestra el diagrama de dispersión desde una perspectiva interanual. Las magnitudes del transporte de anchoveta oscilaron entre 5 y hasta 1000 km desde su punto de origen con un promedio de dispersión en torno a los 180 km. Estas escalas de desplazamiento varían entre años, donde las mayores distancias se obtuvieron para los años 1997, 1998 y 2014 con un transporte medio en torno a los 400 km, mientras que los años con menor expansión desde las zonas de desove fueron 2003, 2004, 2009, 2010 y 2011 con magnitudes de transporte medio cercanas a 100 km. Estos resultados ubican a la anchoveta de la zona centro-sur de Chile dentro de las poblaciones con dispersión ligeramente sobre la media para peces teleósteos, sin embargo lejos de las poblaciones más dispersivas para peces marinos (Pineda *et al.*, 2007). El proceso de transporte y dispersión de peces con huevos pelágicos depende de las escalas de los procesos físicos involucrados (descritos anteriormente) y de la duración de la etapa larval pelágica de las especies, donde el movimiento horizontal está fuertemente ligado a los procesos físicos.

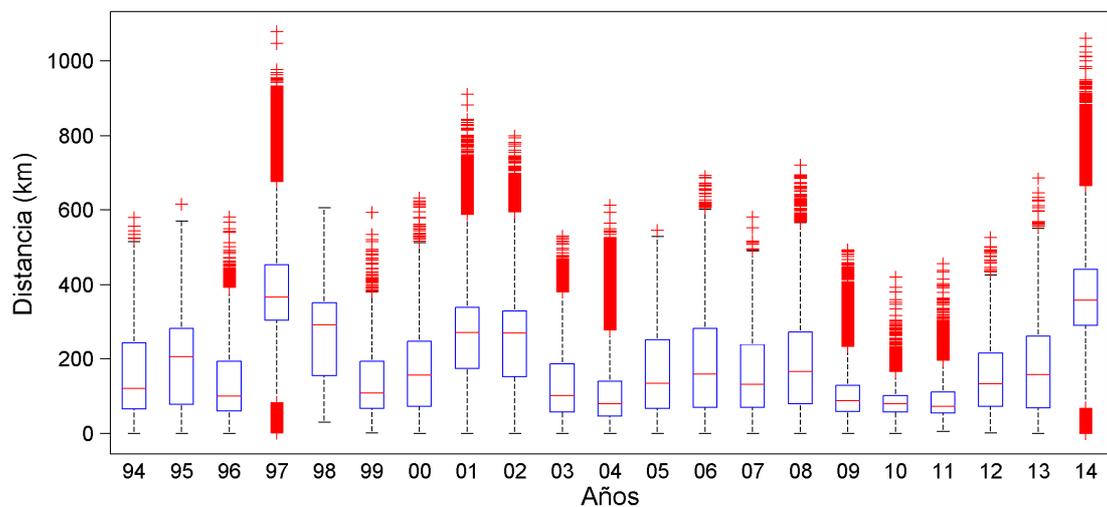


Figura 38. Diagrama de distancias de dispersión de estadios tempranos de anchoveta hasta la talla de reclutamiento biofísico (20 mm) obtenidos a través de modelación en el período 1994-2014.

Un aspecto relevante de considerar desarrollo y crecimiento basado en variables ambientales (e.g. temperatura, alimentación) es aproximarse a los tiempos de duración de la fase larval pelágica (DLP) que determina el tiempo en que los individuos carecen de capacidad natatoria activa y son vulnerables al transporte por corrientes y mortalidad por advección (y predación, no evaluada en este proyecto). En este estudio, se consideró el desarrollo de huevos y crecimiento de larvas y juveniles de anchoveta dependiente de la temperatura (provista por el modelo hidrodinámico) que determina el *delta* de crecimiento entre un paso de tiempo y el siguiente. La Figura 39 muestra los resultados de la evaluación de la DLP desde una perspectiva interanual. En general, los resultados señalan que la DLP para anchoveta se ubica en torno a los 80 días, periodo en el cual alcanzarían los 20 mm y comenzarían con el proceso de natación activa y consolidación de cardúmenes. Además, se observan señales de (baja) variabilidad interanual en este indicador que está relacionado con los niveles térmicos de las zonas hacia donde los individuos son transportados. Los años de mayor DLP fueron 1994, 1995, 2007 y 2014 con DLP máximos por sobre los 90 días de duración, mientras que los años con menor DLP fueron el 2000 y 2011 con DLP mínimos por debajo de los 70 días.

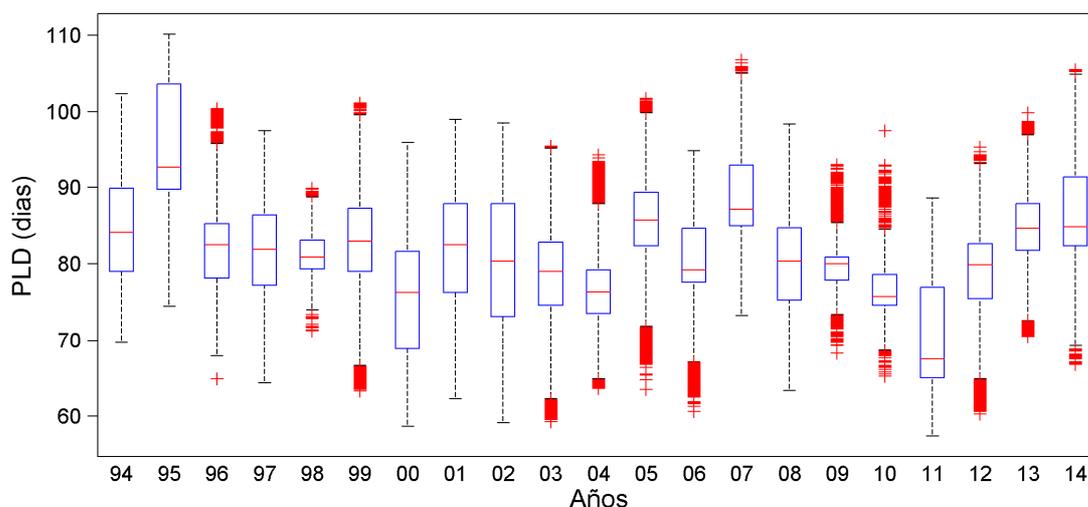


Figura 39. Diagrama de duración larval pelágica para anchoveta en la zona centro-sur de Chile obtenidos a través de modelación biofísica en el período 1994-2014.

6.3.1. Índices de pre-reclutamiento temporal desde modelación biofísica

Uno de los objetivos principales de este estudio es "obtener índices de reclutamiento de la anchoveta, independientes de la estimación acústica, para la región centro-sur de Chile.". Bajo el esquema de modelación planteado, el índice de reclutamiento biofísico contrastó dos etapas clave de la historia de vida temprana de peces pelágicos que tienen directa incidencia en la dinámica del reclutamiento: primero, la magnitud del desove anual, la cual se consideró relacionada con el potencial reproductivo de la biomasa desovante; segundo, la retención de huevos, larvas y juveniles de anchoveta en potenciales áreas de crianza/reclutamiento, la cual estuvo relacionada con la sobrevivencia de esta etapa de la historia de vida que considera un alto nivel de pérdidas para la población. La obtención de este indicador de reclutamiento, además de ser de alta utilidad en el entendimiento del modelo conceptual de la dinámica del ingreso de las clases anuales, tiene como característica el ser independiente de la información proveniente de la actividad pesquera y puede ser utilizado como información de referencia para la estimación del reclutamiento en los modelos de dinámica poblacional. Además, considerando que el reclutamiento es considerado como la magnitud de individuos que ingresan a la población como grupo de edad 0, el indicador de reclutamiento biofísico es considerado de alta utilidad como predictor (meses antes) de la intensidad del reclutamiento futuro.

El primer indicador temporal que se obtiene de la modelación biofísica es el índice de sobrevivencia, el cual está relacionado con la proporción de individuos que alcanzó el "criterio de reclutamiento". La Figura 40 muestra la serie temporal de sobrevivencia asociada a la modelación de la historia de vida temprana de la anchoveta, que refleja una alta variabilidad a lo largo de las dos décadas modeladas. El período 1994-1996 estuvo caracterizada por tasas de sobrevivencia por debajo del 20% alcanzando el 6,6% este último año. Posteriormente, el año 1997 registró uno de los puntos más altos de la serie con una tasa de sobrevivencia que alcanzó el 57,4%, para luego caer al mínimo histórico el año 1998 donde registró un 0,7%. A partir del año 1998 se observa un alza sostenida hasta el año 2002 (7,3%, 16,7%, 20,7% para el periodo 1999-2001) donde se obtuvo un 40,4% de éxito reproductivo. El periodo 2003-2006 estuvo caracterizado por una caída en las tasas de sobrevivencia anual con 30,8%, 27,6%, 12,7% y 12,0% secuencialmente. Posteriormente, se obtuvo un alza a 18,9% el 2007, y 26,7% el 2008, para luego caer fuertemente a 17,1% el 2009 y a 1,6% y 1,8% para 2010 y 2011 respectivamente. Finalmente, a partir del año 2012 se observa un ascenso abrupto de la sobrevivencia con niveles de 6,2%, 34,4% y 71,7% para 2012, 2013 y 2014 respectivamente, convirtiéndose este último año en el máximo de la serie. Estos resultados sugieren que los aspectos biofísicos incluidos en el presente estudio de modelación, generan periodos alternantes de condiciones favorables y desfavorables para la sobrevivencia de estadíos tempranos de anchoveta.

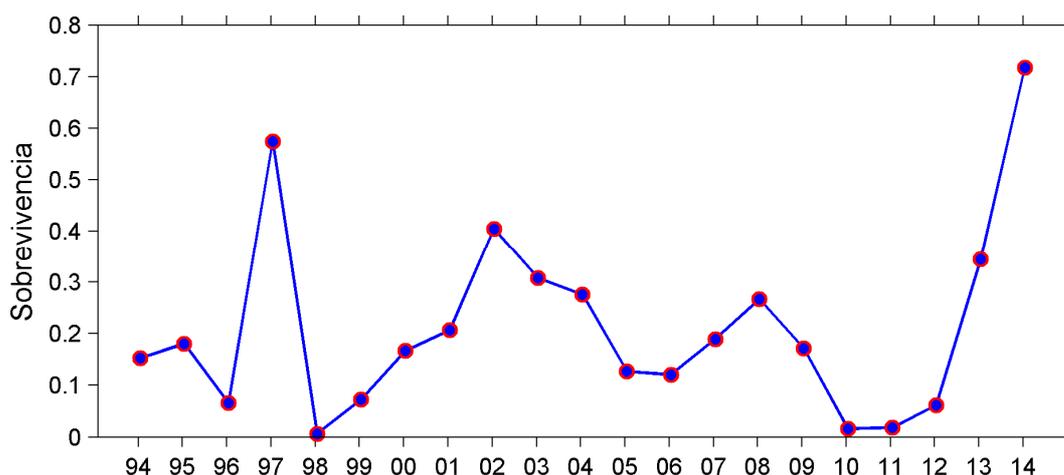


Figura 40. Serie temporal de la sobrevivencia de estadíos tempranos de anchoveta hasta la talla de 20 mm obtenida mediante un esquema de modelación biofísica en el periodo 1994-2014.

La incorporación de información asociada a la dinámica reproductiva de pequeños pelágicos en conjunto con modelos que simulen los procesos de sobrevivencia temprana contribuyen a la obtención de indicadores de reclutamiento temprano, altamente útiles para la administración de estos recursos. La Figura 41 muestra la serie de estimación de reclutamiento biofísico, la cual integra información relacionada con el stock desovante generada en la evaluación mediante método producción de huevos diaria, y mediante el seguimiento pesquero hacia determinar la duración de la temporada reproductiva además de la sobrevivencia de estadíos tempranos obtenida desde modelación biofísica. La extensión de esta serie temporal se restringe a los años donde se ha realizado el MPDH pues toma insumos de abundancia del desove desde ese método. Esta serie tiene como características: i) no correlacionado *a priori* con el modelo estadístico de evaluación de stock, ii) es espacialmente explícito, iii) integrador de características demográficas de la población y variabilidad ambiental en distintas escalas, iv) índice absoluto para el pre-reclutamiento (abundancia de individuos de talla 20 mm), v) posee poder de pronóstico del reclutamiento en el año siguiente al modelado (hacia un modelo biofísico operacional) y; vi) indicador ecológico basado en el ecosistema, altamente recomendado internacionalmente. El indicador de reclutamiento biofísico muestra un periodo de mayor abundancia de pre-reclutas de anchoveta en el periodo 2002-2008 (hacia el reclutamiento 2003-2009), luego un periodo de bajos niveles de pre-reclutas en el periodo 2009-2012 (hacia el reclutamiento 2010-2013) y un incremento de los pulsos de pre-reclutas en los dos últimos años evaluados 2013 y 2014 (hacia el reclutamiento 2014-2015), sugiriendo una recuperación del reclutamiento de anchoveta en los años recientes.

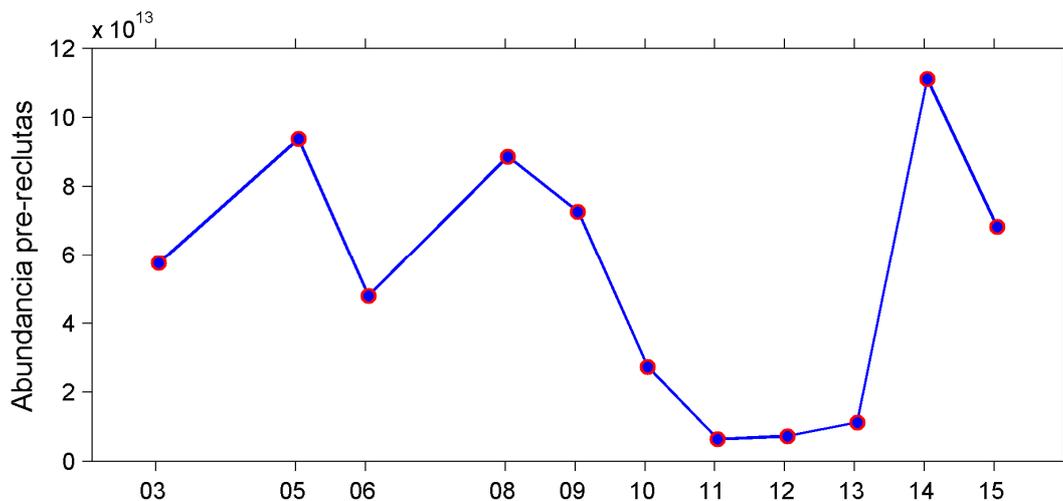


Figura 41. Serie temporal del índice de reclutamiento biofísico proveniente de las temporadas de desove del periodo 2002-2014 (a excepción de 2003 y 2006).

6.3.2. Extensión temporal del pre-reclutamiento desde modelación biofísica

Considerando que el modelo biofísico incluye condiciones de inicialización realistas respecto a la sincronización del desove y una duración larval pelágica vinculada al patrón de crecimiento temperatura-dependiente, el pulso de pre-reclutamiento será variable en una escala intra e interanual. Considerando, que estas señales tendrán correspondencia con el patrón de reclutamiento, el análisis temporal del pulso de reclutamiento biofísico es útil para proyectar su variabilidad. La Figura 42 muestra el patrón de reclutamiento biofísico para el periodo 1994-2014 (hacia el reclutamiento 1994-2015), en donde destaca un periodo de pulsos más tempranos y extensos entre 1994 y 1999, los cuales se expresaron entre comienzos de octubre y comienzos de enero del año siguiente. Luego un periodo más acotado y tardío entre 2000 y 2012 donde los pulsos modelados de individuos de 20 mm se manifestaron entre comienzos de noviembre e incluso febrero del año siguiente. Y finalmente un periodo 2013-2014 similar al obtenido para el comienzo de la modelación entre octubre y enero del año siguiente. Esta información es de utilidad para colaborar en establecer vedas de resguardo de la fracción recluta, además de planificar cruceros de evaluación del reclutamiento el cual es variable entre años y probablemente no sea del todo observado por cruceros realizados en fechas fijas.

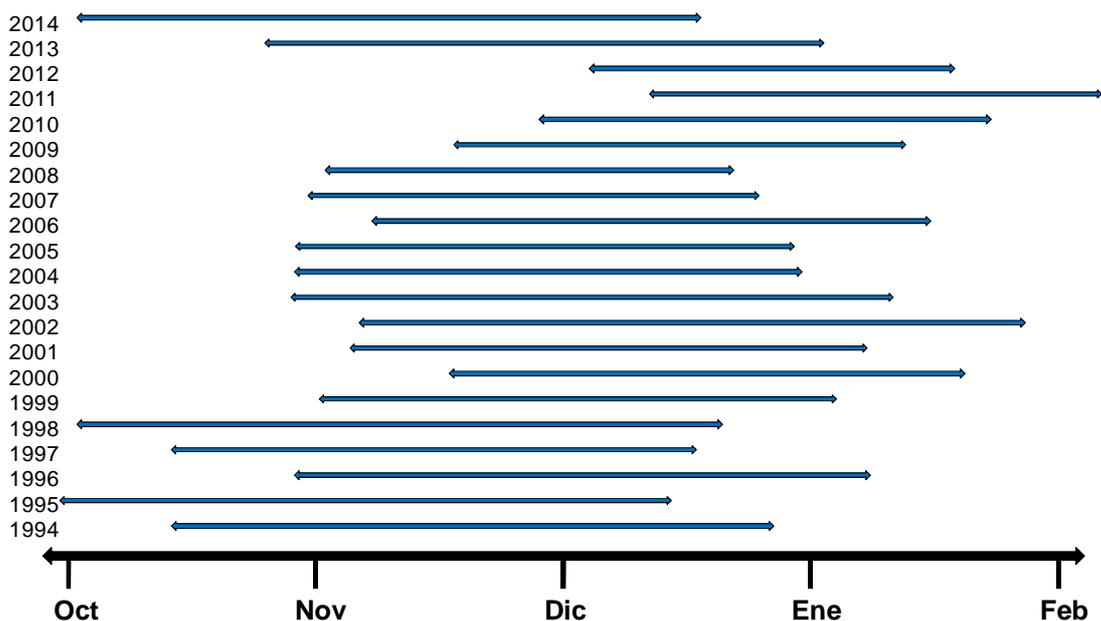


Figura 42. Línea de tiempo de la extensión temporal de los pulsos de pre-reclutas (20 mm) de anchoveta obtenidos desde modelación biofísica periodo 1994-2014.

6.3.3. Índice de reclutamiento proveniente de la evaluación de stock de anchoveta

Las principales fuentes de información utilizadas en ambos modelos de evaluación de stock, corresponden a las capturas provenientes de los registros del Servicio Nacional de Pesca (Sernapesca), Captura por Unidad de Esfuerzo (CPUE) y las biomásas estimadas por métodos acústicos de los cruceros de verano y otoño (Figura 43). Se evidencia en la mayoría de los indicadores una tendencia negativa hacia los últimos años, específicamente la captura promedia históricamente 300 mil ton, y para los últimos cuatro años esta se encuentra en 75 mil ton, llegando al año 2014 con 46 mil ton (al mes de junio) según lo publicado por el informe sectorial de la Subsecretaría de Pesca (Subpesca). No obstante, esta captura de anchoveta representa una fracción del verdadero nivel de desembarque (~80%), estableciendo así el desembarque en 77 mil ton. Los rendimientos de pesca basados en el indicador de abundancia relativa (CPUE) son utilizados para el período (1991-2000), dejando de utilizar la serie completa por motivo de que desde el año 2001 las cuotas de captura repercutieron en una distribución de la cuota en términos temporales y espaciales, afectando el indicador de abundancia debido a que las capturas comienzan a ser reflejo de la administración y no de la abundancia de la especie en la macrozona. Los

índices de biomasa acústica de verano y otoño tienden hacia un bajo nivel en relación a los promedios históricos situándose para el último año en 116 mil t y 138 mil t respectivamente. Se observa un incremento en la biomasa de verano respecto del año 2013, los incrementos progresivos se denotan desde el 2010, año en que se encontró en nivel de biomasa más bajo de la serie. En cuanto al crucero de otoño de 2014 se produjo un incremento de 61% respecto del año 2013, sin embargo, este nivel está por debajo de la media histórica de este indicador.

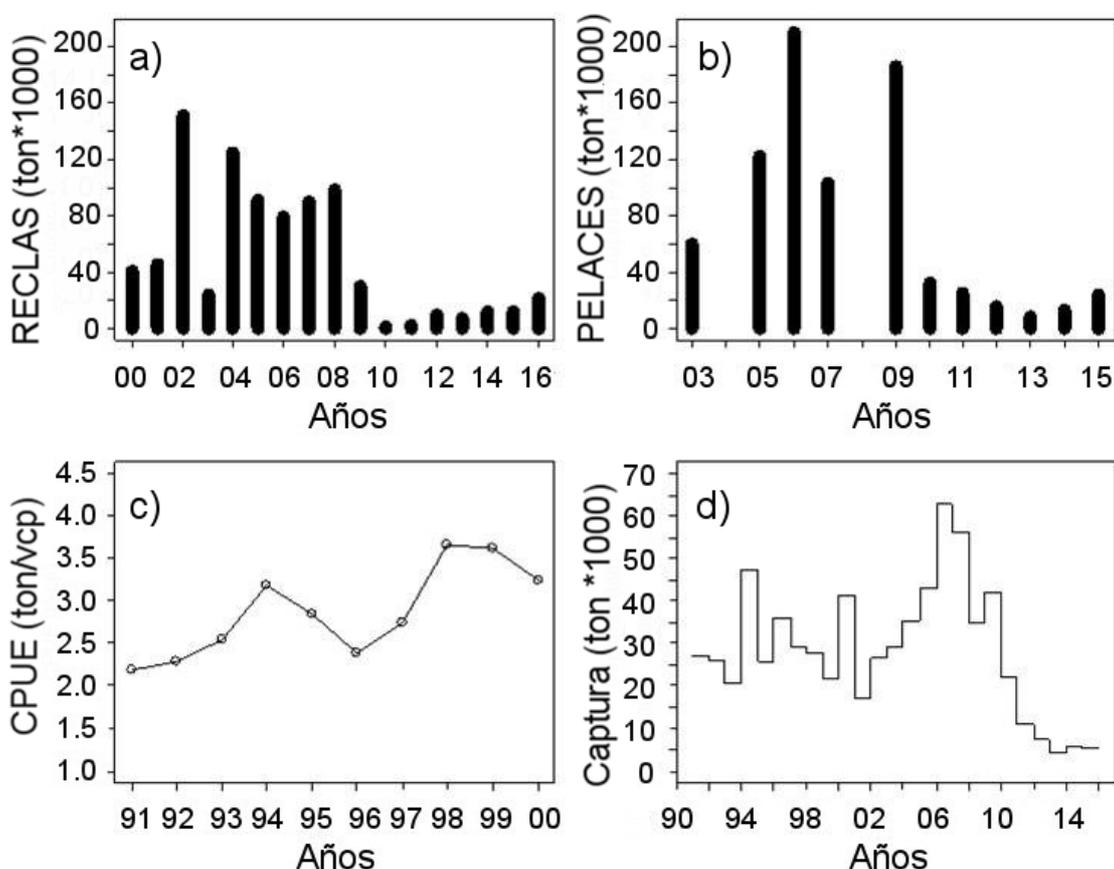


Figura 43. Información de entrada asociada a la evaluación de stock de anchoveta: a) crucero RECLAS, b) crucero PELACES, c) Captura (ton) y; d) rendimientos (CPUE (t/vcp)).

El reclutamiento estimado en número para anchoveta, muestra una disminución sostenida de estos en la serie de tiempo analizada. Esta baja comienza a ser notoria a partir del año 2016, situándose los reclutamientos anuales bajo los reclutamientos promedio estimados

entre 1991-2007 y del 2008-2014. Este estimado se relaciona a su vez con la deprimida condición de la población al 2015 (Figura 44). Se han probado tres configuraciones para el modelo de evaluación de stock: i) años calendario, ii) año Julio a Junio y iii) año Septiembre a Agosto. La Figura 45 muestra un análisis comparativos de las estimaciones de reclutamiento bajo estas tres hipótesis.

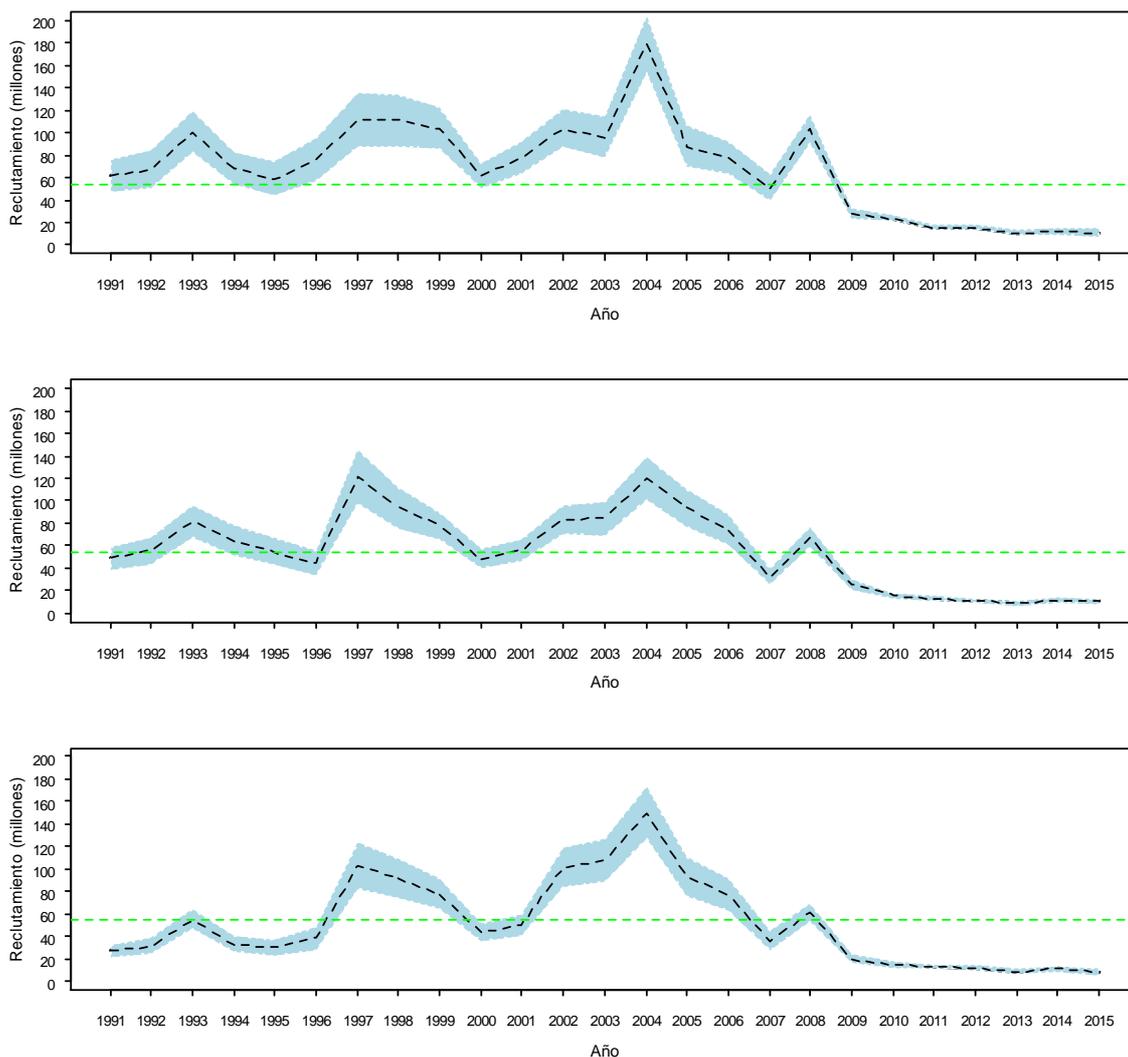


Figura 44. Estimaciones de reclutamiento estimado entre 1991 y 2015 en anchoveta (superior; representa el reclutamiento desde un año calendario), (medio; representa estimación desde año biológico comenzando en Julio a Junio) y (inferior; representa la estimación de reclutas desde año biológico comenzando en Septiembre a Agosto). Línea verde indica el reclutamiento promedio de la serie total. La zona coloreada equivale al intervalo de confianza asintótico, la línea continua representa el estimador central.

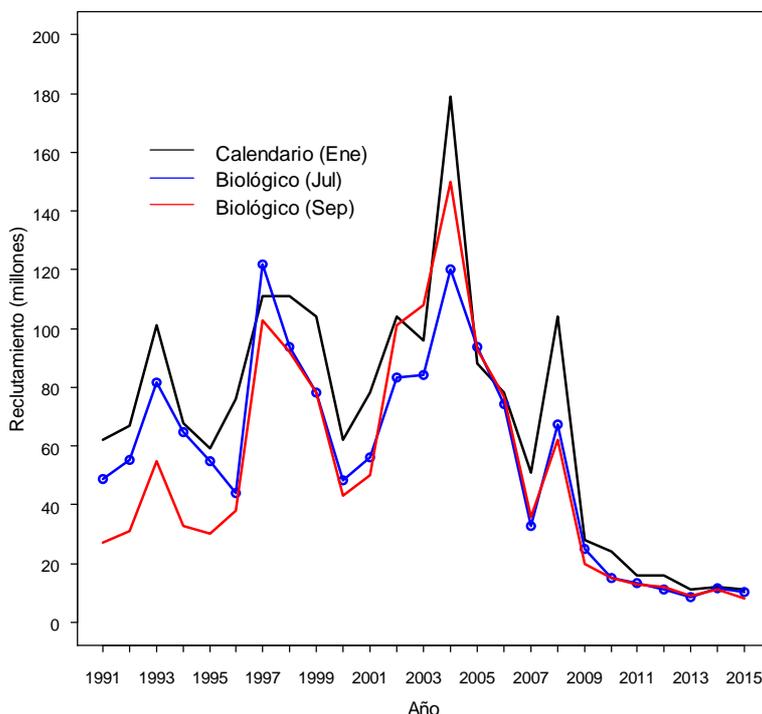


Figura 45. Comparación de reclutamientos bajo tres hipótesis de configuración de información de entrada entre 1991 y 2015 anchoveta.

6.3.4. Índice de reclutamiento proveniente de información de las capturas

Desde la perspectiva de los reclutamientos, en anchoveta se conoce preferentemente estimaciones anuales que están relacionadas con la generación de pulsos de individuos principalmente en la temporada estival. Existe vasta documentación científica que señala a las condiciones ambientales que configuran una surgencia estacional en la zona centro sur de Chile, como la principal causante de la variabilidad en la magnitud de estos pulsos de abundancia de anchoveta. 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 de ambientales son mayormente favorables a los estados tempranos de vida de la especie. En el contexto anterior la Figura 46 muestra el reclutamiento mensual de anchoveta en Chile centro-sur, donde se observa la condición declinante desde el año 2008 para llegar a los últimos años de la serie con los niveles más bajos de reclutamiento con un alza en el último año evaluado.

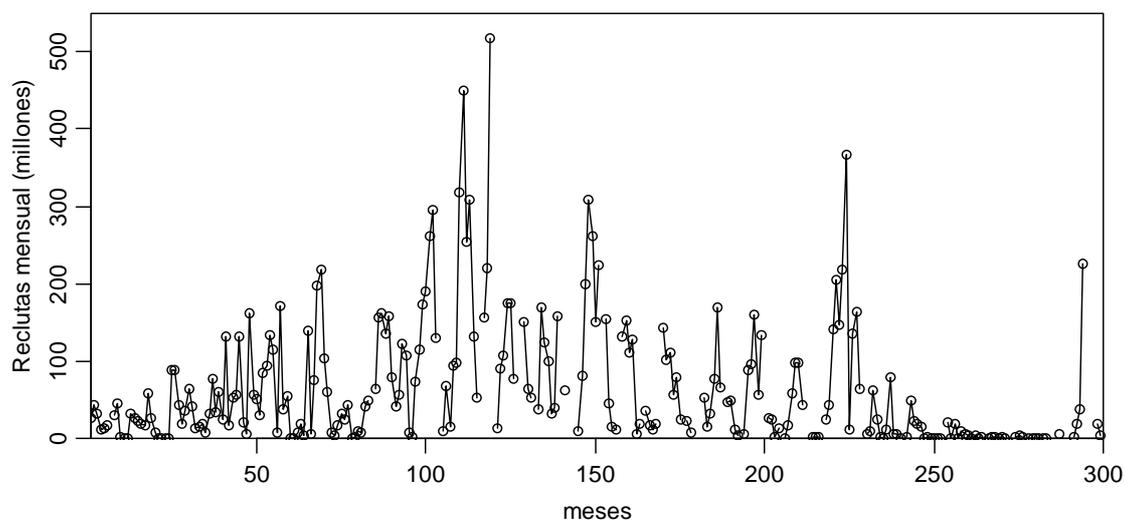


Figura 46. Estimaciones de reclutamiento mensual en anchoveta entre los años 1991 y 2015.

6.3.5. Índice de reclutamiento proveniente de cruceros de evaluación directa

A partir de la información obtenida desde las evaluaciones directas del reclutamiento mediante cruceros acústicos, se obtuvo una serie de la abundancia del reclutamiento anual de anchoveta, el cual es definido por la cantidad de individuos registrados con una talla menor a 12 cm de longitud total. La Figura 47 muestra la serie de abundancia recluta observada acústicamente. La serie muestra dos periodos claramente identificables, el primero entre el año 2000 y el 2008, donde los reclutamientos estuvieron por sobre la media histórica (49.8030 millones de individuos) para luego caer abruptamente dando paso a un periodo de bajos niveles de reclutamiento el cual ha repercutido en bajos tamaños poblacionales en la zona centro sur de Chile.

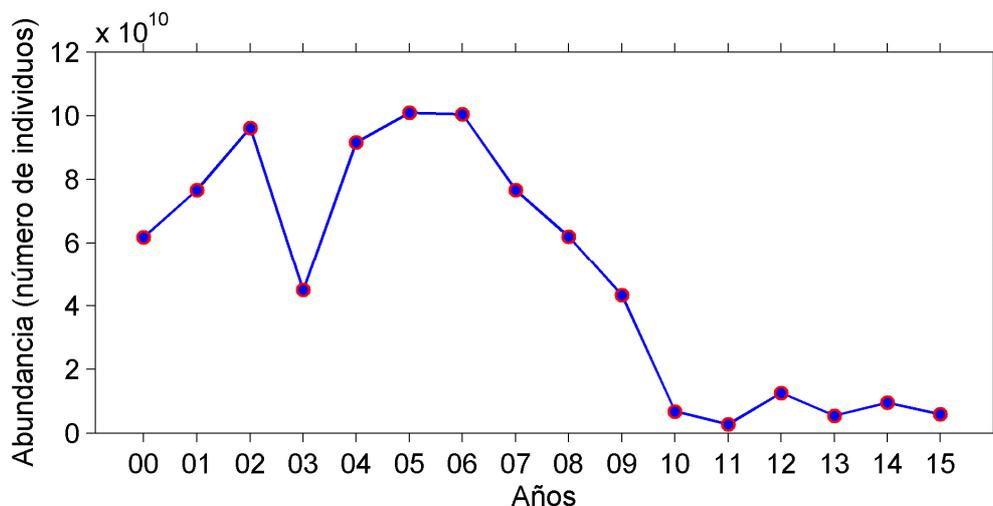


Figura 47. Serie de reclutamiento obtenida por los cruceros acústicos estivales RECLAS en el periodo 2000 - 2015.

6.3.6. Contrastación de índices de reclutamiento biofísico respecto a otros indicadores relevantes.

En consecuencia a los objetivos de este estudio, tanto la serie de sobrevivencia biofísica como el indicador de reclutamiento fueron contrastado con piezas de información relevantes respecto al reclutamiento: i) reclutamiento estimado por el modelo de evaluación de stock y, ii) reclutamiento observado por el crucero de evaluación estival RECLAS. Este procedimiento se realizó contrastando los indicadores de modelación biofísica con los obtenidos el año inmediatamente posterior por las otras piezas de información (siguiendo el ciclo de vida de la especie), asociando así el reclutamiento en un tiempo $t+1$ al proceso reproductivo, se sobrevivencia y conectividad ocurrido en el año t . La Figura 48 muestra el contraste entre la serie de sobrevivencia biofísica y las estimaciones provenientes de la evaluación de stock edad estructurada de anchoveta como series estandarizadas para fines comparativos. En general, bajo las tres hipótesis se observa una correspondencia en las trayectorias de las series de tiempo, evidenciando que el esquema de modelación biofísica reproduce en gran medida el proceso de sobrevivencia de estadíos tempranos que modula la expresión del reclutamiento meses posterior a la temporada reproductiva, no obstante estadísticamente el poder predictivo no adquiere alta relevancia ($R^2 > 0,4$ en todos los casos). Las series de tiempo bajo las hipótesis de la evaluación de stock basadas en el ciclo

biológico de la especie mostraron un mejor acople con la señal de sobrevivencia biofísica. El mayor alejamiento entre las series evaluadas se genera en los dos últimos años, en donde la señal de sobrevivencia biofísica muestra los niveles más altos de la serie sugiriendo una recuperación de los niveles de reclutamiento de la especie, lo que sin embargo, no se refleja en las estimaciones del modelo de evaluación de stock lo que puede también estar influenciado por la mayor incertidumbre de los modelos estadísticos en la estimación del reclutamiento en los últimos años evaluados.

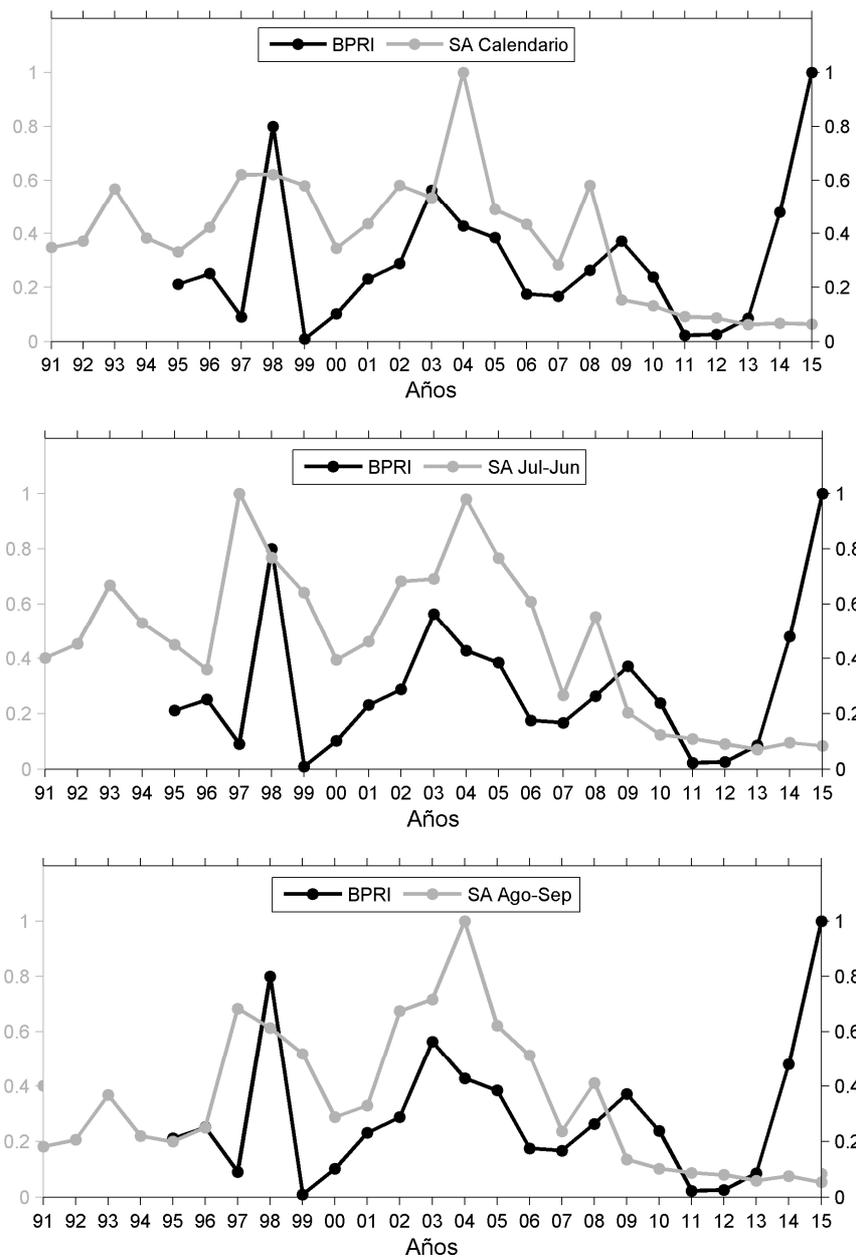


Figura 48. Serie de tiempo de sobrevivencia biofísica (línea sólida negra) contrastada con estimaciones de reclutamiento provenientes de la evaluación de stock de anchoveta (línea sólida gris) bajo las configuraciones: a) año calendario; año biológico Julio-Junio; b) año biológico Agosto-Septiembre.

La obtención de un indicador biofísico de la abundancia del reclutamiento es uno de los desafíos mayores de este estudio, el cual se llevó a cabo incorporando información del stock desovante (desove espacio-temporal, magnitud del desove) y de la sobrevivencia de

estadios tempranos (modelación biofísica). La Figura 49 muestra la contrastación de este índice de reclutamiento respecto a los otros indicadores ya mencionados anteriormente. El indicador de reclutamiento biofísico, siguió una trayectoria interanual similar a la reportada para el indicador de sobrevivencia biofísica, no obstante la incorporación de la abundancia del desove disminuyó la magnitud de los últimos dos años evaluados (reclutamientos 2014 y 2015), donde se registran los mayores niveles de la serie. De esta manera, el indicador de reclutamiento biofísico mostró mayores niveles entre el año 2003 y 2009, disminuyendo abruptamente en el periodo 2010-2013 que mostró una trayectoria similar a lo reportado por la serie de estimación desde el modelo de evaluación de stock en escala calendario (Figura 49a) y en escalas biológicas (Figura 49 b y c), no obstante se mantiene el desacople en los últimos dos años evaluados.

Otra pieza de información relevante, utilizada en este estudio fue la reportada por las prospecciones acústicas. La Figura 49d muestra la relación entre la serie de tiempo observada por el crucero RECLAS que se realiza en la temporada estival (2-3 meses posterior al término de la modelación biofísica). Esta relación mostró un buen nivel de acoplamiento (predicción) por parte del modelo biofísico respecto a lo observado con posterioridad por el modelo biofísico, sin embargo al igual que lo obtenido para el modelo de evaluación se mantiene el desacople en los últimos años, lo que puede deberse a que estas dos piezas de información no son del todo independientes pues el modelo de evaluación de stock utiliza la observación acústica como calibrador de la estimación del reclutamiento. Finalmente, se contrastó el reclutamiento biofísico con cálculo de reclutamiento con información proveniente de las capturas de anchoveta Santojanni *et al* (2003), cuyo resultado se muestra en la Figura 49d. Este indicador muestra un mayor desacople al comienzo de la serie producto de un máximo obtenido para el año 2009, sin embargo reproduce la tendencia a la baja en el largo plazo. Un aspecto que resalta de este último indicador es el alza en el último año el cual, respalda parcialmente a los resultados del modelo biofísico que indica una recuperación en los reclutamientos de anchoveta para los años 2014 y 2015.

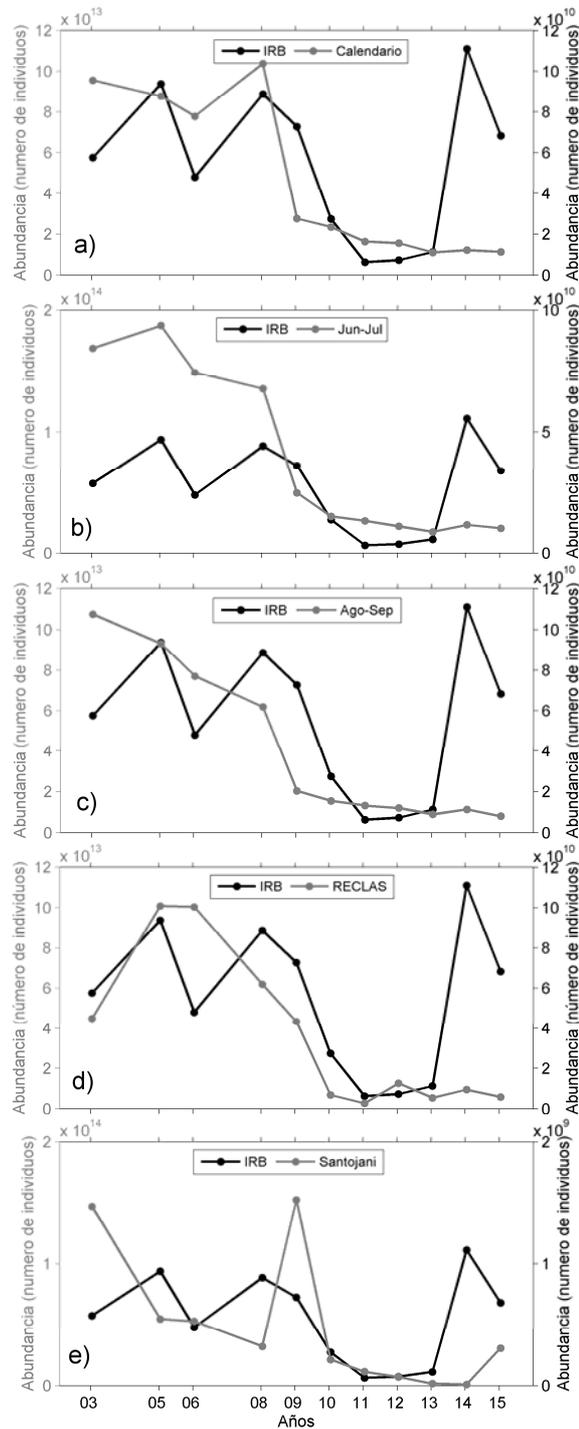


Figura 49. Serie de tiempo de índice de reclutamiento biofísico (línea sólida negra) contrastada con estimaciones de reclutamiento provenientes de la evaluación de stock de anchoveta (línea sólida gris) bajo las configuraciones: a) año calendario; b) año biológico Julio-Junio; c) año biológico Agosto-Septiembre; además del d) reclutamiento observado por los cruceros de evaluación acústica estival RECLAS y. e) estimación de reclutamiento con información proveniente de las capturas.

La versión actual del modelo biofísico incorporó información detallada y realista respecto a la dinámica reproductiva de la especie, así como una aproximación al movimiento vertical de la especie y una metodología mecanística para simular las trayectorias de transporte de huevos y larvas de anchoveta. Toda esta información fue integrada en el índice de reclutamiento que se ha descrito. El índice de reclutamiento biofísico mostró la habilidad de reproducir patrones temporales del reclutamiento de anchoveta de forma similar a lo generado por modelos de evaluación de stock, a lo obtenido por indicadores desde capturas y a lo observado por cruceros de evaluación directa. Sin embargo, existen periodos en que esta serie se desacoplaron de manera importante, principalmente en los dos últimos años de evaluación biofísica donde se obtuvieron altos niveles de sobrevivencia larval asociados a importantes niveles de retención costera y coincidiendo con periodos de influencia de eventos El Niño.

Las diferencias encontradas entre el índice de reclutamiento biofísico y las otras fuentes de información pueden ser discutidas desde varias perspectivas:

i) las fuentes de mortalidad incorporadas en el modelo biofísico, las cuales en la actual versión se encuentran limitadas a la presencia de temperaturas letales y, principalmente, a mortalidad por advección. Estas dos fuentes de mortalidad parecen ser altamente explicativas de la dinámica del éxito de las clases anuales en gran parte de la serie, sin embargo los periodos de desacople pueden estar vinculados a procesos de mortalidad no incluidos en la actual versión del modelo, como lo son procesos bioenergéticos (e.g. alimentación, natación), predación, enfermedades, efecto maternal, etc.. La incorporación de estos aspectos constituyen un desafío hacia futuras versiones del modelo, pudiendo aumentando su capacidad de reproducir la historia de vida temprana y la habilidad de estimar el reclutamiento (DeAngelis & Grimm, 2014).

ii) la estimación certera de la fuerza del desove anual, que constituye uno de los componentes principales del cálculo del índice de reclutamiento biofísico. La precisión estimación de este parámetro poblacional por parte de la evaluación directa mediante el método de producción diaria de huevos, es un aspecto que constituye una discusión actual

en la investigación pesquera (Cubillos *et al.*, 2013), sesgos en la estimación de la abundancia del desove pueden ser heredados hacia el índice de reclutamiento biofísico, disminuyendo su precisión.

iii) Las estimaciones de reclutamiento generadas por los modelos estadísticos de evaluación de stock edad-estructurados, por su naturaleza recursiva, tienden a generar estimados con mayor nivel de incerteza en los últimos años de evaluación (Quinn & Deriso, 1999). En particular los modelos realizados para pequeños pelágicos incluyen información de entrada incompleta para el último año de evaluación. De esta manera, las diferencias encontradas entre ambos modelos podrían estar vinculadas con estas limitaciones. Es válido señalar que la información proveniente de las capturas muestra un alza en el reclutamiento del último año, no observado por el modelo de evaluación de stock ni por los cruceros. El estudio detallado de la comparación entre índices, y la posibilidad de incorporación del índice de reclutamiento biofísico dentro del procedimiento de evaluación de stock constituyen desafíos hacia futuras investigaciones en esta línea.

iv) Finalmente, y como ha sido detallado anteriormente, la aproximación biofísica que sustenta este estudio se ha basado en el ciclo de vida de la especie, abordando la historia de vida temprana y simulando el proceso de sobrevivencia hasta la etapa previa al reclutamiento (20 mm de talla). De esta manera, existe una etapa del ciclo de vida no cubierta hasta ahora que corresponde al periodo entre el pre-reclutamiento (simulado por la modelación biofísica) y el reclutamiento estimado por el modelo de evaluación de stock y observado por los cruceros. Escenarios de mortalidad altos en esta etapa de la historia de vida podrían dar pie a diferencias entre las piezas de información contrastadas. Hasta la fecha no existen estimaciones de la mortalidad natural asociada al proceso de reclutamiento y formación de cardúmenes, lo que constituye una brecha de conocimiento en el estudio de pequeños peces pelágicos.

6.4. Identificación de forzantes físicos hacia el reclutamiento de anchoveta

6.4.1. Análisis integrado: Síntesis de los principales forzantes relacionados al transporte y dinámica de estadíos tempranos de desarrollo de anchoveta en la región costera del centro-sur de Chile.

El análisis de la variabilidad espacial y temporal de factores considerados forzantes y variables oceanográficas de interés, para explicar la dinámica de estadíos tempranos de anchoveta y conectividad entre zonas de desove y reclutamiento en la región costera de Chile centro-sur, realizado a través del análisis de información satelital y datos hidrográficos (cruceos costeros, CTDO), y por medio de análisis de climatologías y FOEc principalmente de deriva de Ekman, corrientes geostroficadas, TSM y turbulencia, establece lo siguiente:

- Los resultados provenientes de datos hidrográficos y la distribución promedio de las variables satelitales mostraron que la zona de estudio se caracteriza por una banda costera de menores temperaturas y mayores concentraciones de clorofila respecto de las aguas oceánicas adyacentes, revelando asimismo diferencias meridionales significativas entre el sector al norte (34,5°S - 37,2°S) y sur de punta Lavapié (37,2°S - 41,5°S) asociadas a la distribución de salinidad, viento, turbulencia e influencia de la desembocadura de ríos.
- Al norte de punta Lavapié, las mayores temperaturas promedio en toda la columna de agua se concentraron entre el golfo de Arauco y la Terraza del Itata. Al norte de esta zona la banda costera de menor temperatura, mayor salinidad y mayor densidad se encuentra asociada a los continuos procesos de surgencia costera que ocurren en primavera-verano, y que prevalecen en la climatología (Sobarzo 1994; Strub *et al.*, 1998; Letelier *et al.*, 2009). La surgencia de punta Nugurne (35°54' S) produce una disminución de la temperatura y aumento de la salinidad de la zona, explicando la disminución de la temperatura y el incremento de la densidad hacia el norte de Bahía Coliumo (Arcos & Salamanca 1984; Kelly & Blanco 1984; Sobarzo, 1994). Por otro lado, la lengua de surgencia que se proyecta desde punta Lavapié hacia el noroeste junto

con el chorro costero (Leth & Shaffer 2001; Mesias *et al.*, 2001, 2003) genera celdas de circulación sobre la plataforma y vinculadas con el golfo y las bahías en un efecto de sombra de surgencia (Graham & Largier 1997; Escribano & Hidalgo 2001; Marín *et al.*, 2003).

- La transecta ubicada en los 36°30' S mostró el ascenso costero de las isolíneas confirmando la surgencia en la zona, como también la presencia de una estructura frontal cercana a la costa que fue más intensa al sur de los 36°S. La presencia de esta zona frontal es coherente con la banda frontal de origen térmico derivada de TSM satelital (concordante con lo reportado por Letelier *et al.*, 2009). La posición promedio de estos frentes fueron también coherentes con el límite que marca el decaimiento de la temperatura hacia la costa y el decaimiento de las mayores concentraciones de clorofila hacia el Oeste.
- Al sur de punta Lavapié (37°12' S - 41°30' S), el incremento de la temperatura hacia el sur (del orden de 0,8°C en 200 km), así como el aumento de salinidad y densidad sobre los 10 metros de profundidad, verifican el descenso de la temperatura, salinidad y densidad superficial desde Valdivia hacia el norte, producto de un flujo de agua salobre al que contribuyen diversos ríos de la zona. Evidencia de lo anterior, es que las distribuciones de densidad y salinidad superficiales revelaron una banda de agua salobre que se proyectó desde la salida del río Valdivia hacia el norte encerrando un cuerpo de agua en la curvatura interna de la costa de Queule. Las transectas ubicadas en los 38°30' S y 39°30' S mostraron claramente un flujo de agua salobre (<33) que se alejó de la costa en la medida que se desplazó al norte y que tiene una influencia hasta los 20 metros de profundidad en la salinidad, pero que asimismo genera una perturbación en toda la columna de agua en la temperatura y la densidad.
- Los frentes situados al sur de punta Lavapié, se encontraron dominados por gradientes salinos por lo que no aparecieron en la información satelital. No obstante lo anterior, formaron una zona frontal paralela a la costa con un frente interno y externo a la pluma de agua salobre cuya influencia se extendió a más de 20 metros de profundidad, como lo

revelan las secciones de salinidad y densidad perpendiculares a la costa en los 38°30' S y 39°30' S.

- A la singular distribución hidrográfica que caracteriza ambas regiones (al norte y sur de los 37°S, punta Lavapié), y que parece más bien similar, los vientos revelan una significativa diferencia, ya que al norte de punta Lavapié el viento en promedio es más intenso y favorece el transporte hacia fuera de la costa con continuos procesos de surgencia (Brandhorst, 1971), en tanto que en la región sur la intensidad del viento promedio es menor con una componente más importante hacia la costa. La turbulencia asociada a ambas zonas junto la distribución latitudinal de las corrientes sugiere que el área preferente de desove, entre los 38°S y los 40°S (entre isla Mocha y Corral), que además se encuentra asociada a intensos frentes salinos, se verifica como un área favorable a procesos de retención, enriquecimiento y concentración (Bakun, 1996; Bakun, 2006; Parada *et al.*, 2013).
- Para el caso de la deriva de Ekman, ésta revela en superficie una corriente de mínimas magnitudes apegadas a la costa desde punta Lavapie hacia el sur, es decir, retiene las partículas hacia la región costera. La deriva de Ekman alcanza su valor más bajo por estar en la zona de divergencia de los vientos, permitiendo que haya muy poco transporte hacia la zona oceánica.
- Para el caso de la geostrofia se verifica una corriente geostrofica muy costera pegada a la costa (no es una banda ancha que pueda promover la dispersión de partículas hacia el océano), donde alcanza su máxima magnitud, lo que contribuye, por una parte a mantener las partículas pegadas a la costa, y por otra a transportar partículas hacia el norte.
- La intensificación de las corrientes hacia el norte en primavera y verano coincide con el aumento de los vientos desde el sur-suroeste producto del desplazamiento hacia el sur del anticiclón del Pacífico, que al mismo tiempo favorece la surgencia en punta Lavapié y a lo largo de la costa. El afloramiento de agua más fría en la costa intensifica el

gradiente térmico costa-océano y por lo tanto el gradiente horizontal de densidad el que refuerza las corrientes hacia el norte conducidas por el viento (corriente de chorro). Es decir, la combinación entre el viento hacia el norte y el gradiente de densidad producto de la formación de los frentes favorecen el transporte hacia el norte en primavera y verano. Por otro lado en otoño/invierno, el desplazamiento del Anticiclón hacia el norte debilita los vientos provenientes del sur y la surgencia costera, lo que permite la entrada de frentes atmosféricos ciclónicos que favorecen las corrientes y el transporte hacia el sur.

- La corriente asociada al forzante viento (deriva de Ekman) se verifica como una componente zonal hacia la costa, en tanto la corriente asociada a la rotación terrestre (corriente geostrófica) se verifica en la dimensión meridional hacia el norte, y la resultante de ambas tiene un sentido NE. Lo anterior establece, desde el punto de vista de los forzantes asociados al transporte de productos del desove de anchoveta en la región costera del centro-sur de Chile, un ambiente propicio para el desove en el sector situado entre los 37°S y los 40°S debido al menor transporte de Ekman mar afuera que hace que esta zona sea de mayor retención; así como también se reporta un ambiente que puede transportar dichos productos de desove y pre-reclutas desde esta área de desove hacia el área de reclutamiento situada más al norte (35°S a los 37°S), por efecto del flujo geostrófico pegado a la costa.

6.4.2. Procesos oceanográficos vinculados a la sobrevivencia de estadios tempranos de anchoveta

En la sección 6.3. se ha descrito en detalle la dinámica estacional e interanual de los principales forzantes físicos que pueden estar asociados al transporte de estadios tempranos de desarrollo de pequeños pelágicos en la zona centro-sur de Chile. La incertidumbre asociada a los niveles de reclutamiento futuro de pequeños pelágicos está relacionada a la vulnerabilidad a los cambios ambientales. En este estudio se ha observado una dinámica meridional altamente variable con los 37°S como límite geográfico de importancia. Además, se ha identificado una fuerte variabilidad interanual vinculada tanto a procesos locales, como a procesos de mayor escala como aquellos vinculados con procesos ecuatoriales (El Niño - La Niña) y aquellos asociados con el fortalecimiento del sistema

sub-antártico. La Figura 50 muestra el resultado de la evaluación de la dinámica advectiva meridional e interanual calculada como la proporción de individuos exportado fuera de los límites de la plataforma continental por cada grado de latitud. Se indican con asterisco blanco las celdas año/latitud donde el nivel advectivo superó el 90%. Uno de los rasgos biofísicos más relevantes que emergen de esta modelación son los bajos niveles de pérdidas generados al sur de los 37°S en gran parte de los años evaluados (niveles por debajo del 50%) y la alta correlación entre la mayor ocurrencia de celdas con bajos niveles advectivos y el incremento de la sobrevivencia hacia el reclutamiento (Figura 50c). Por otra parte, el análisis demuestra que la sobrevivencia biofísica anual estuvo fuertemente vinculada a condiciones de baja advección costa afuera y que bajo escenarios que propiciaron la retención en todo el dominio modelado los niveles de sobrevivencia fueron máximos (Figura 50 b y c).

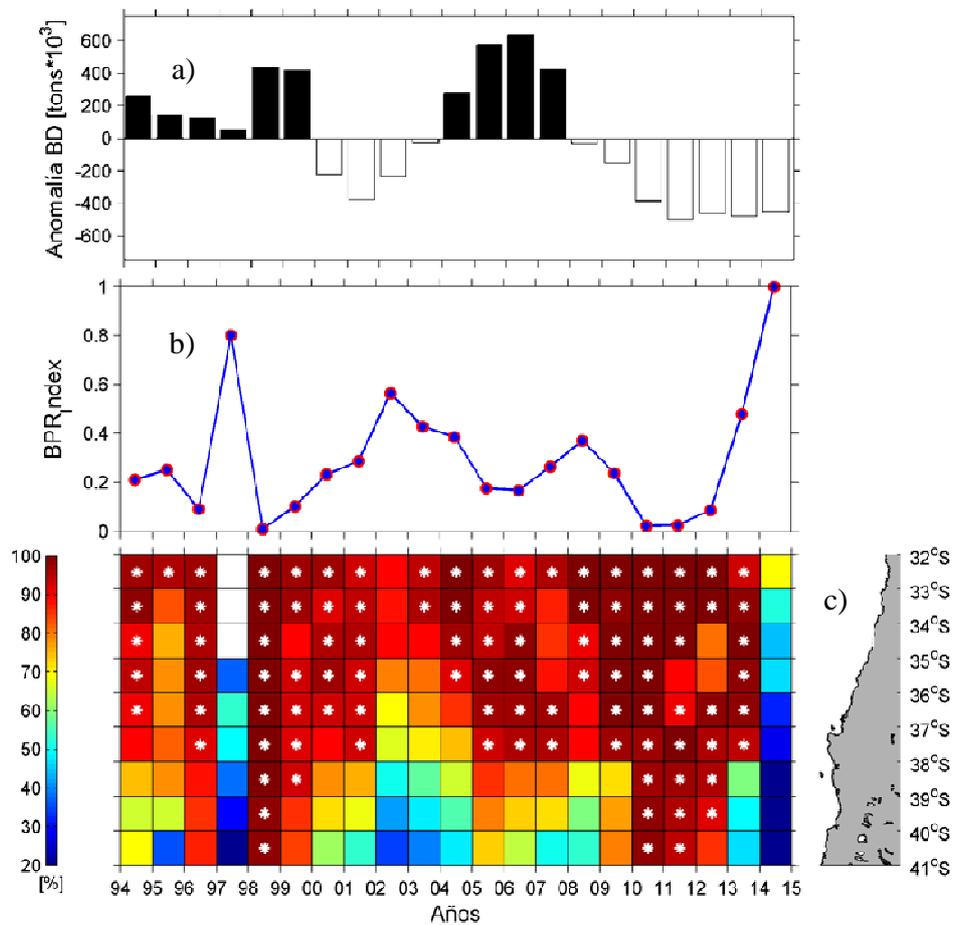


Figura 50. Relación entre los procesos advectivos meridionales e interanuales y la sobrevivencia de estadios tempranos de anchoveta: a) anomalía de la magnitud de biomasa desovante anual; b) serie de tiempo de la sobrevivencia biofísica hacia el reclutamiento, y c) proporción de individuos advectados por año y por celda latitudinal.

Esta relación bajo niveles de advección latitudinal y sobrevivencia temprana se vio reflejada con máximos niveles en 1997, 2002, 2013 y 2014 donde la retención se maximizó y la mortalidad por advección fue baja. Por el contrario, los años 1998, 2010, 2011 y 2012 mostraron altos niveles de advección en todo el rango geográfico lo que se reflejó en bajos niveles de sobrevivencia. Además, este análisis incorporó la comparación respecto a los niveles de biomasa desovante de anchoveta, los cuales no mostraron relación con los procesos oceanográficos predominantes sugiriendo que no se establece una relación entre la magnitud del stock desovante y el reclutamiento, el cual es más bien controlado por condiciones ambientales (Figura 50a). Esto último fue analizado en un contexto regional, comparando los resultados de la modelación biofísica respecto a indicadores de la dinámica

ecuatorial, la cual afecta remotamente al sistema centro-sur de Chile. La Figura 50c muestra los niveles de retención asociados a la modelación biofísica, donde se recalcan los mayores niveles al sur de los 37°S y la asociación entre retención y éxito hacia el reclutamiento (Figura 50b).

Los procesos de asociación biofísica hacia la sobrevivencia de estadíos tempranos estuvieron altamente relacionados con los eventos extremos vinculados a la dinámica ecuatorial. Así, durante eventos El Niño los niveles de retención y sobrevivencia alcanzaron niveles máximos (e.g. 1997, 2002, 2014), mientras que durante eventos de anomalías ecuatoriales negativas tipo La Niña, los niveles de advección fueron mayores y la sobrevivencia biofísica cayó a niveles bajo la media histórica (e.g. 1998, 1999, 2010, 2011, 2012). Estos cambios interanuales parecen estar vinculados a asociaciones atmósfera-oceano que son alteradas en eventos extremos regionales. Durante episodios El Niño los vientos desde el sur se ven atenuados producto de desplazamientos en los centros de presión lo que impacta la dinámica de surgencia y las magnitudes de las corrientes derivadas del viento (ver Figura A13), aumentando los niveles de retención costera y la sobrevivencia larval. Además, la expresión meridional del transporte señala que la disminución del forzante viento durante estos periodos propicia un menor transporte hacia el norte y se expresa en una mayor ocurrencia de anchoveta al sur del área de distribución, pudiendo generar una eventual expansión del hábitat favorable a esta especie, lo que pudiese estar a su vez acentuado por el fortalecimiento de la corriente subsuperficial del ecuador hacia el polo. Por otra parte, los niveles de mortalidad por temperaturas extremas fueron considerablemente menores a aquellos generados por la advección, debido a la plasticidad de la especie (alta cobertura geográfica), lo que sugiere que esta última causa es uno de los principales moduladores del éxito reproductivo de la anchoveta en la zona centro-sur de Chile.

Los hallazgos de las asociaciones biofísicas hacia los procesos de transporte, retención, crecimiento y sobrevivencia de estadíos tempranos de desarrollo de anchoveta identificaron las principales fuentes de variabilidad espacio-temporal de los forzantes atmosférico-oceanográficos involucrados. Además, estos resultados mostraron asociaciones con

procesos de teleconexión ecuatorial, a través de cambios en la escala de El Niño. Los resultados también abren una línea de investigación vinculada a procesos de mesoescala (y eventualmente submesoescala) como remolinos, filamentos y frentes, los cuales podrían influir en la historia de vida temprana de pequeños pelágicos, los cuales deben ser abordados mecanísticamente en futuras investigaciones para el mejor entendimiento de los procesos críticos hacia el reclutamiento.

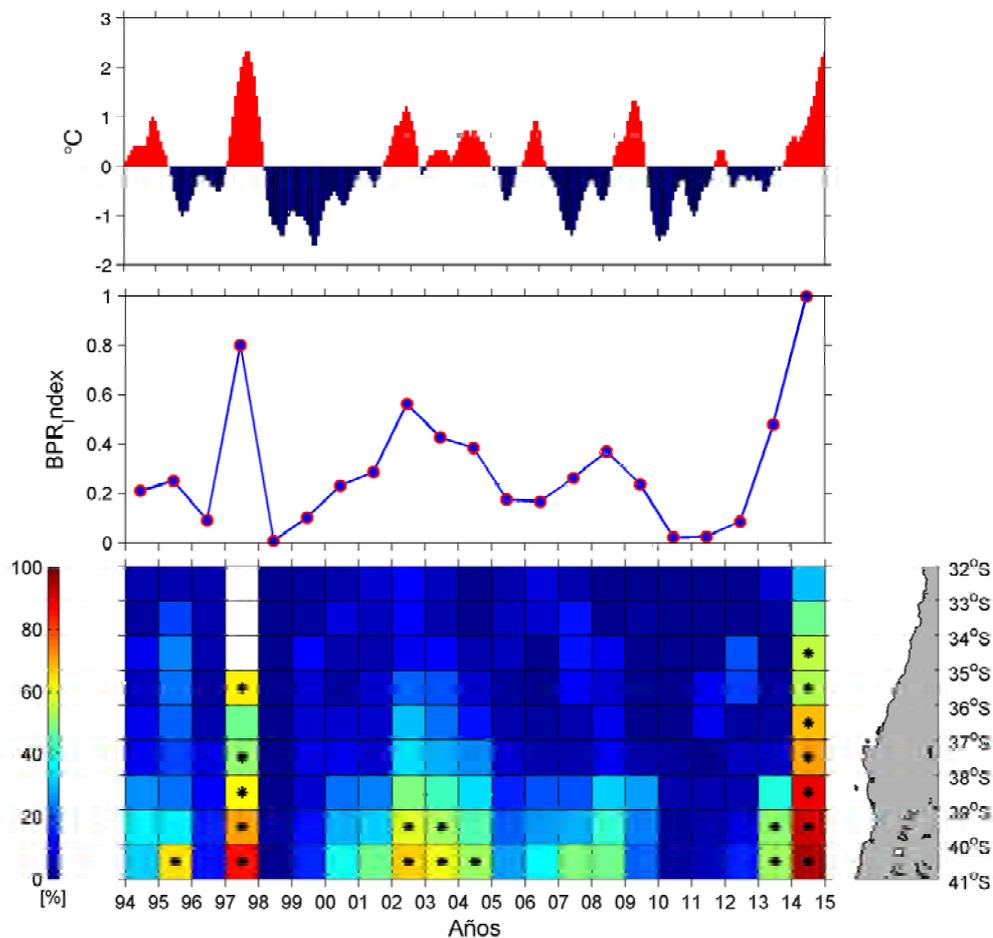


Figura 51. Relación entre la retención meridional e interanual y la sobrevivencia de estadíos tempranos de anchoveta: a) señal ecuatorial El Niño 3-4; b) serie de tiempo de la sobrevivencia biofísica hacia el reclutamiento, y c) proporción de individuos retenidos por año y por celda latitudinal.

6.4.3. Análisis de sensibilidad para la identificación de forzantes biofísicos

El análisis de sensibilidad realizado mediante GLM que fue utilizado para evaluar los efectos de factores independientes en el éxito del pre-reclutamiento de anchoveta en el modelo biofísico resultó estadísticamente significativo ($p\text{-value} < 0,001$) para la mayoría de los factores analizados (a excepción de la profundidad de liberación), sin embargo evidenció que las condiciones iniciales (año de liberación, zona de liberación, mes de liberación, distancia de la costa de liberación y temperatura inicial) solo pudieron explicar aproximadamente el 33% del éxito individual del reclutamiento (Tabla XVI). El año y mes de liberación tuvieron un efecto importante en el éxito individual del reclutamiento, seguido por la zona de liberación y la distancia de la costa en la que se genera el desove. El efecto año respaldó el patrón temporal ya descrito anteriormente, el cual muestra que el éxito del reclutamiento tiene una alta variabilidad interanual altamente dependiente del ambiente y poco predecible de acuerdo a las condiciones del desove.

Tabla XVI. Estadísticas para el modelo lineal generalizado parsimonioso aplicado a los resultados de la modelación biofísica para la variable dependiente reclutamiento respecto a las condiciones iniciales de desove.

Model GLM: Reclutamiento ~ Año + Zona + Mes + Profundidad + Temperatura + Dist.Costa, family = binomial(link = "logit") Model deviance explained: 33.12%							
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr (>F)	Exp. Var.	
Año liberación	10	129526	12953	1.15E+05	<2e-16	25.51	***
Zona liberación	2	18553	9277	8.25E+04	<2e-16	3.65	***
Mes liberación	4	19431	4858	4.32E+04	<2e-16	3.83	***
Profundidad de liberación	10	2	0	1.57E+00	0.108	0.00	
Distancia de la costa liberación	5	611	122	1.09E+03	<2e-16	0.12	***
Temperatura liberación	8	78	10	8.71E+01	<2e-16	0.02	***
Residuals	3019960	339624	0			33.12	

Sign. Codes: *** $p < 0.001$

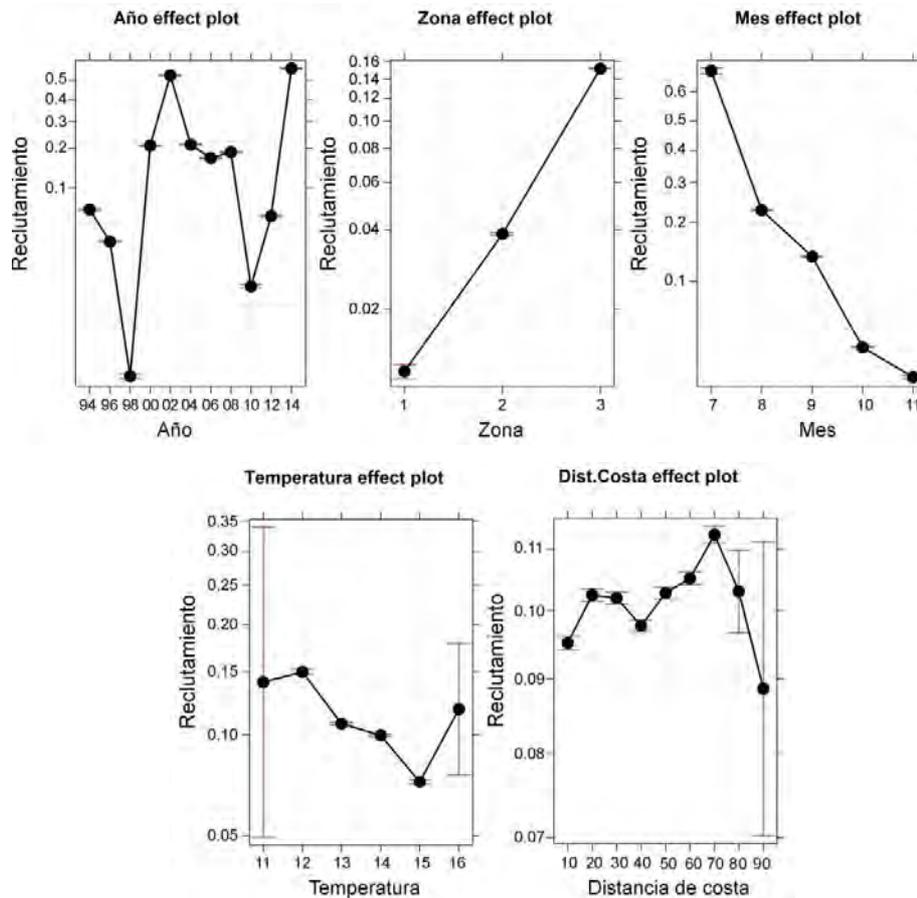


Figura 52. Efecto de los factores que constituyen condiciones iniciales sobre el éxito del reclutamiento individual. Se muestran los factores estadísticamente significativos.

La Figura 52 muestra el efecto sobre el reclutamiento individual de todos los factores estadísticamente significativos. El efecto zona resultó significativo e informativo, revelando que desoves que ocurren en la zona sur del área estudiada (zona 3) tuvieron un efecto mayor sobre el éxito de reclutamiento seguida por la zona central (zona 2) y en menor medida por la zona norte (zona 1), situando a la región sur como la principal fuente hacia el reclutamiento. El factor mes evidenció importantes diferencias entre los estratos evaluados, con una tendencia decayente a medida que los desoves se realizaron hacia finales del año. De esta manera, desoves efectuados en época invernal (julio-agosto) tienen una mayor probabilidad de aportar al reclutamiento individual respecto a los que se realizan hacia finales de año, lo que resulta interesante pues la sincronización el desove es un rasgo que muestra importantes niveles de variabilidad interanual, como ha sido demostrado en este estudio (ver punto 6.2.2.). La distancia de la costa en la que se realizaron los desoves y las

condiciones térmicas al momento del desove no evidenciaron un patrón explicatorio respecto del éxito del reclutamiento individual.

Para cuantificar el efecto del comportamiento biológico en los resultados de la modelación biofísica, se generaron experimentos de transporte pasivo en paralelo al modelo biofísico con componentes biológicas (flotabilidad de huevos y migración vertical para larvas). Los resultados se presentan en el Anexo II, los cuales evidenciaron que existen diferencias significativas entre los dos tipos de experimentos cuando se comparan transporte y advección en todos los experimentos realizados ($p\text{-value} < 0.001$, test Mann-Whitney-Wilcoxon; Tabla AI). La distancia media del transporte y de la advección costa-afuera fueron significativamente menores en los experimentos con comportamiento biológico respecto a los experimentos lagrangianos en el 83% y 67% de los experimentos realizados respectivamente (Tabla AI) evidenciando una menor dispersión y mayor retención en los experimentos de comportamiento biológico. Por medio del test de Mantel se evaluaron diferencias en la ubicación espacial de individuos 75 días posterior a la liberación entre experimentos de transporte pasivo y comportamiento biológico evidenciando que en todos los casos la hipótesis de similitud espacial entre ambos experimentos fue rechazada (Tabla AI). Al mismo tiempo el test de agregación de Lloyd mostró resultados consistentes con patrones agregados. En el caso de los experimentos con comportamiento biológico el índice varió entre 1,2 y 39,9 mientras que en los experimentos lagrangianos o de transporte pasivo, el índice mostró un rango estrecho entre 1,1 y 1,6, siendo en todos los casos inferior (Tabla AI). De acuerdo a estos resultados el comportamiento migratorio vertical de larvas y juveniles de anchoveta genera mayores niveles de agregación, vinculada a una mayor asociación con estructuras oceanográficas que promueven la estructuración espacial. Finalmente, al analizar estadísticamente la influencia del comportamiento biológico respecto al transporte y la advección costa afuera los resultados de los GLM realizados, confirmaron las diferencias establecidas previamente. La varianza explicada por el efecto tipo de experimento en el transporte de los individuos fue de 6,04% (Tabla XVII), mientras que en el caso de la advección costa afuera fue de 5,49% (Tabla XVIII) siendo en ambos casos estadísticamente significativos, confirmando que el comportamiento biológico tiene una influencia directa en el destino final de los individuos modelados.

Tabla XVII. Efecto de la flotabilidad de huevos y la migración vertical de larvas en el transporte horizontal. Modelo GLM parsimonioso, varianza explicada y estadísticos desde una NOVA aplicada a los resultados de modelación biofísica para la variable dependiente distancia de transporte.

Model GLM: Distancia ~ Tipo Experimento + Mes + Zona, family = gaussian Model deviance explained: 20.42%							
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr (>F)	Exp. Var.	
Tipo experimento	1	1.2E+10	6.7E+09	2.63E+05	<2e-16	6.04	***
Mes liberación	4	1.8E+10	5.2E+08	2.04E+04	<2e-16	9.34	***
Zona liberación	2	9.8E+09	4.9E+09	1.91E+05	<2e-16	5.04	***
Residuals	6039992	1.5E+11	25490			79.58	

Sign. Codes: *** p<0.001

Tabla XVIII. Efecto de la flotabilidad de huevos y la migración vertical de larvas en el transporte horizontal. Modelo GLM parsimonioso, varianza explicada y estadísticos desde una NOVA aplicada a los resultados de modelación biofísica para la variable dependiente advección costa afuera.

Model GLM: Advección ~ Tipo Experimento + Mes + Zona, family = gaussian Model deviance explained: 20.42%							
	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr (>F)	Exp. Var.	
Tipo experimento	1	1E+10	7.6E+09	2.64E+05	<2e-16	5.49	***
Mes liberación	4	3E+10	2.1E+09	7.27E+04	<2e-16	12.34	***
Zona liberación	2	1E+10	5E+09	1.73E+05	<2e-16	6.50	***
Residuals	6039992	2E+11	28810			75.67	

Sign. Codes: *** p<0.001

6.5. Identificación de zonas de crianza/reclutamiento

Una de las características principales del esquema de modelación biofísica que sustenta a este estudio, es la capacidad de generación de indicadores espacialmente explícitos hacia el reclutamiento. Estos indicadores espaciales permiten analizar cambios en los patrones

dependiendo de las condiciones oceanográficas así como generan una herramienta de contraste respecto a observaciones directas de la estructura espacial de la fracción recluta.

6.5.1. Índice de pre-reclutamiento espacial y patrón de transporte

Una vez realizadas simulaciones del proceso de transporte y sobrevivencia de estadios tempranos de desarrollo de anchoveta originados a partir de zonas y pulsos realistas de desove, se cuantificó espacialmente la distribución de individuos que alcanzaron una talla de 20 mm y que estuvieron restringidos en la plataforma continental. La Figura 53 muestra los indicadores espaciales de pre-reclutamiento biofísico para cada año modelado a partir de las temporadas de desove del periodo 1994-1997. No obstante existe un alto nivel de variabilidad interanual, un rasgo característico y repetitivo es la mayor densidad de individuos conectados y retenidos entre los 38° y 40°S (Isla Mocha y Corral), lo que se ve acentuado en los años 1994, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2007, 2008 y 2013. La extensión zonal de estas concentraciones resultó también variable, mientras que en los años 2002, 2003, 2004 y 2008 las mayores densidades se encontraron en la primera franja de mar desde la costa, en los años restantes se encontraron en la zona media o exterior de la plataforma continental.

Luego, existe un proceso de retención/conectividad con la región costera comprendida entre el Golfo de Arauco y Constitución, el cual en algunos años se convierte en principal sector de agregación de individuos pre-reclutas (e.g. año 1998) y en otros como una extensión del área principal situada más al sur (años 1994, 1995, 1999, 2003, 2004, 2011 y 2012). Además, los resultados evidencia que existen vías de transporte de las zonas de desove hacia el sur, estableciendo un ingreso de individuos hacia el mar interior de Chiloé a través del canal de Chacao, reteniéndose en esta zona y constituyendo una probable extensión de las áreas de crianza de la anchoveta. Esta última situación se vio particularmente fortalecida en los años 1997, 2002, 2013 y 2014.

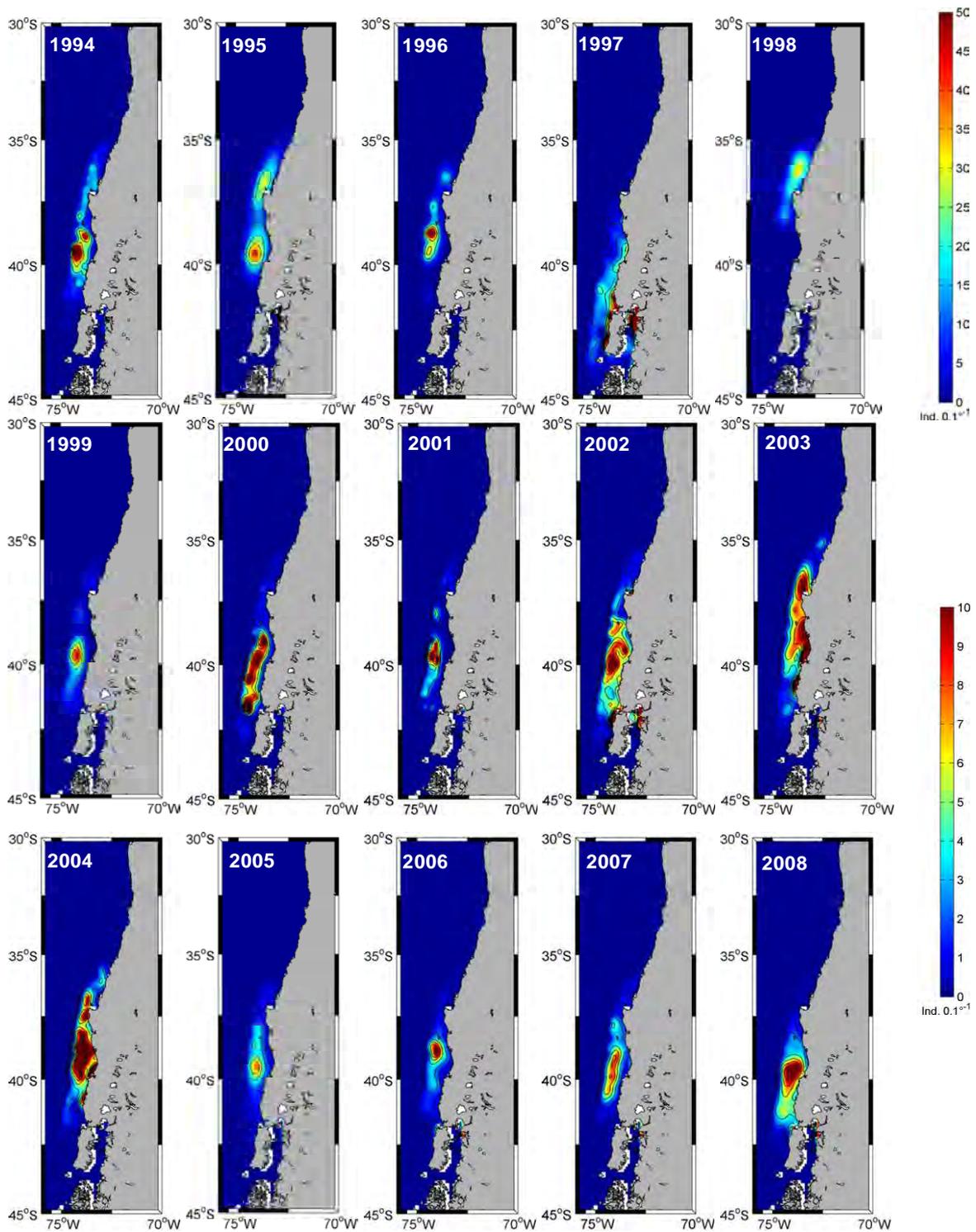


Figura 53. Distribución espacial de anchovetas de 20 mm de longitud total simulada mediante modelación biofísica para el periodo 1994-2014. La barra de colores inferior corresponde a los años 1998, 2009, 2010, 2011 y 2012, la superior al resto de los años modelados.

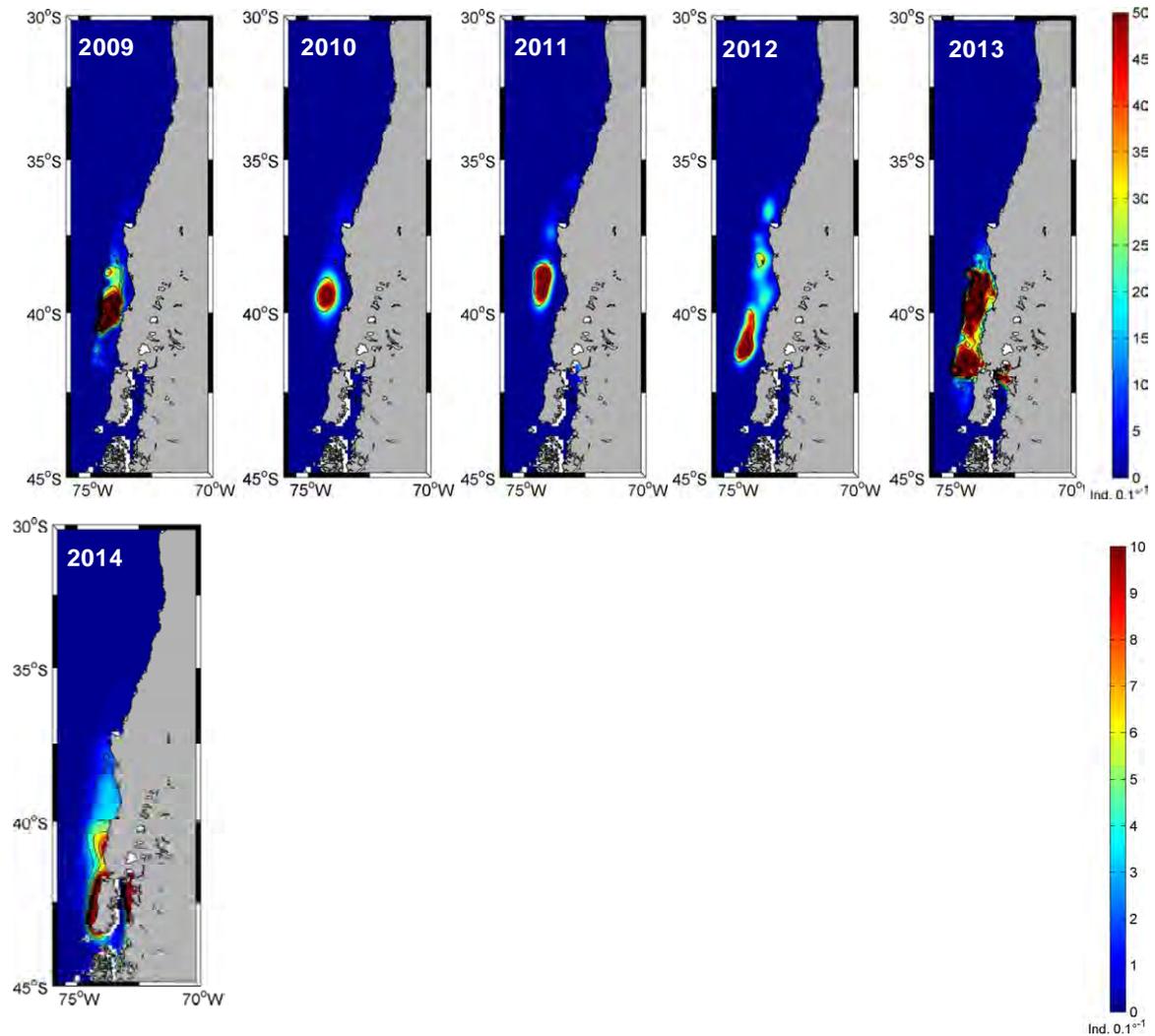


Figura 53 (continuación). Distribución espacial de anchovetas de 20 mm de longitud total simulada mediante modelación biofísica para el periodo 1994-2014. La barra de colores inferior corresponde a los años 1998, 2009, 2010, 2011 y 2012, la superior al resto de los años modelados.

Considerando la extensión latitudinal de la expresión del desove (ver Figura 29) y la expresión espacial del pre-reclutamiento (Figura 53), uno de los aspectos relevantes es conocer los patrones de conectividad entre las distintas localidades donde existe desove y las potenciales áreas de crianza de anchoveta. La Figura 54 muestra el resultado de las matrices de dispersión (conectividad) que muestra la densidad de organismos reclutados por banda latitudinal respecto a su área de liberación. Para un mejor entendimiento de estos diagramas, es válido señalar que la diagonal trazada indica la zona de liberación (un

individuo ubicado sobre la diagonal recluta en el mismo lugar en que fue desovado), mientras que la ubicación hacia arriba de la diagonal muestra transporte hacia el sur y abajo de la diagonal transporte hacia el norte del área de liberación.

Los patrones de conectividad mostraron variabilidad entre años, lo que explica las diferencias en la distribución espacial modelada de pre-reclutas de anchoveta. En el año 1994 el área principal de desove (entre 38° y 40°S) generó individuos que fueron reclutados en la misma área de desove y también individuos que fueron transportados hacia el sur y mayormente al norte alcanzando los 33°S, mientras que las otras áreas de desove mostraron una mayor actividad de transporte hacia el sur. Esta situación es similar a lo obtenido para los años 1995 y 1996. En el año 1997 (donde los desoves se restringieron al sur) se observa un escenario diferente, en donde el patrón de conectividad se inclina hacia el sur en casi todas las zonas de liberación, mostrando niveles muy bajos de densidad al sur de las áreas de liberación. En el año 1998 se revirtió el transporte al sur, predominando un transporte preferente al norte en todas las áreas de desove manifestándose los pulsos de reclutamiento del 38°S al norte. Los años 1999 y 2000 evidenciaron niveles importantes de retención en el área principal de desove y transportes predominantes hacia el sur, mientras que en el año 2001 y 2002 las rutas de transporte estuvieron preferentemente orientadas al sur.

Los años 2003 y 2004 mostraron niveles de auto-reclutamiento en todas las zonas de desove con transportes menores al sur y norte. El periodo 2005-2008 mostró un transporte preferente hacia el sur desde todas las zonas de desove acentuándose en la zona principal de desove. El año 2009 evidenció mayor retención en torno a las áreas de desove y dispersión equilibrada entre norte y sur. El año 2010 mostró mayores niveles de dispersión hacia el norte, evidenciando transferencias desde la zona principal de desove hacia el norte, alcanzando los 33°S. Los años 2011 y 2012 mostraron un área de desove más restringida espacialmente y niveles menores de dispersión desde las distintas zonas de desove. Finalmente, el año 2013 y mucho más acentuadamente el año 2014 se registraron niveles importantes de transporte hacia el sur desde todas las latitudes donde se expresó el desove de anchoveta. El año 2013 mostró conexiones con el extremo sur del área estudiada, donde los individuos en talla de reclutamiento biofísico alcanzaron incluso zonas al sur de los

43°S. Para esquematizar estos resultados, en el contexto de los cambios oceanográficos en la escala de los eventos El Niño, la Figura 55 muestra la distribución promedio de individuos de anchoveta que alcanzaron el criterio de reclutamiento para todos los años modelados (Figura 55a) en comparación con la distribución promedio en años con anomalía positivas de El Niño 3.4 por sobre $+1^{\circ}\text{C}$ (años 1997, 2002, 2008, 2013 y 2014; Figura 55b) y respecto a los años restantes en los cuales no se registraron eventos El Niño (Figura 55c). Estos resultados evidencian los rasgos variables del sistema oceanográfico en que se desarrolla la historia de vida temprana de anchoveta, además de la dinámica demográfica respecto al desove que varía año tras año, que en conjunto puede tener un impacto en la dinámica espacio-temporal del reclutamiento y sus consecuencias en la actividad pesquera.

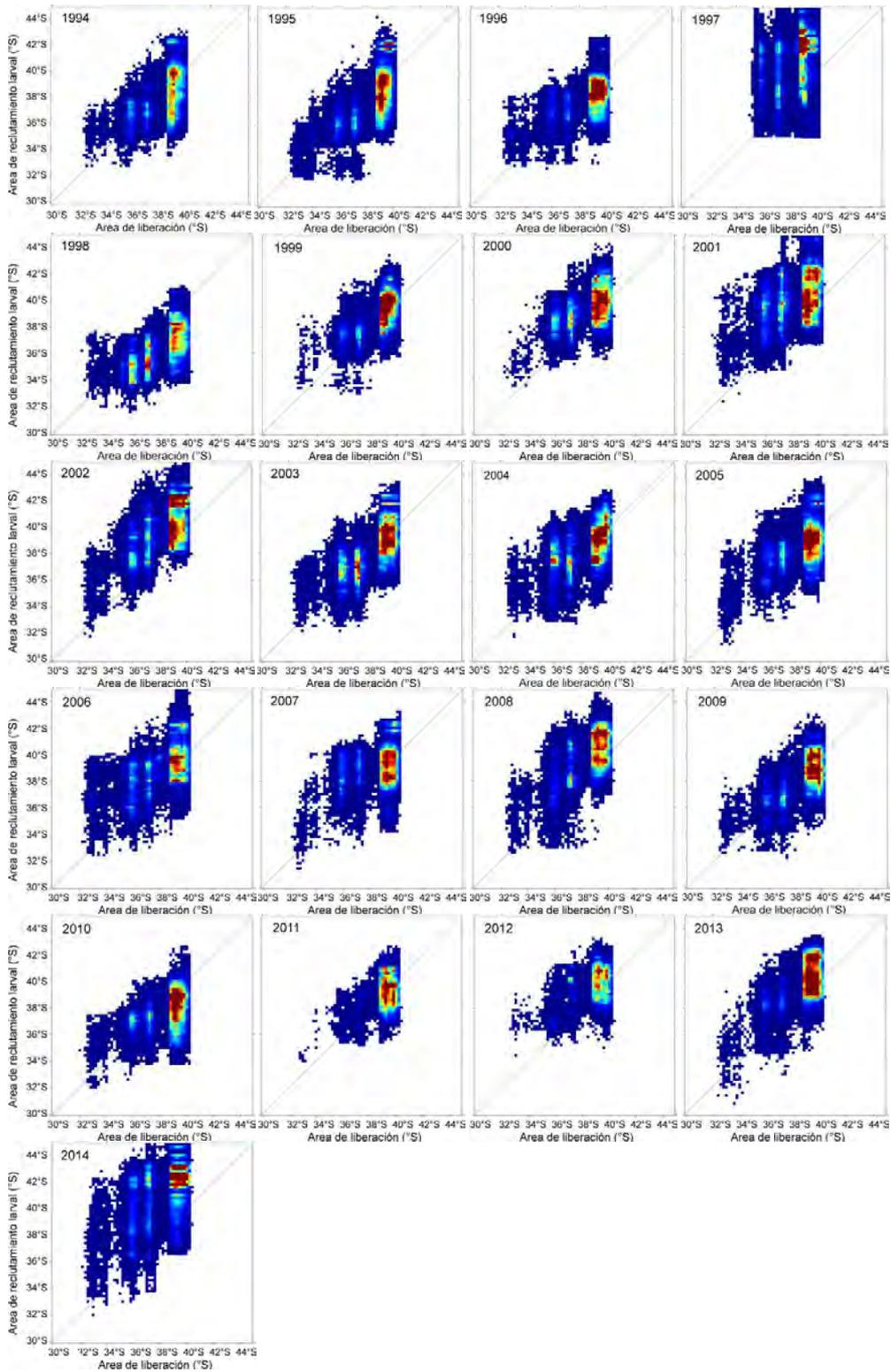


Figura 54. Matrices de dispersión (conectividad) obtenidas desde el modelo biofísico para anchoveta en la zona centro sur de Chile, periodo 1994-2014.

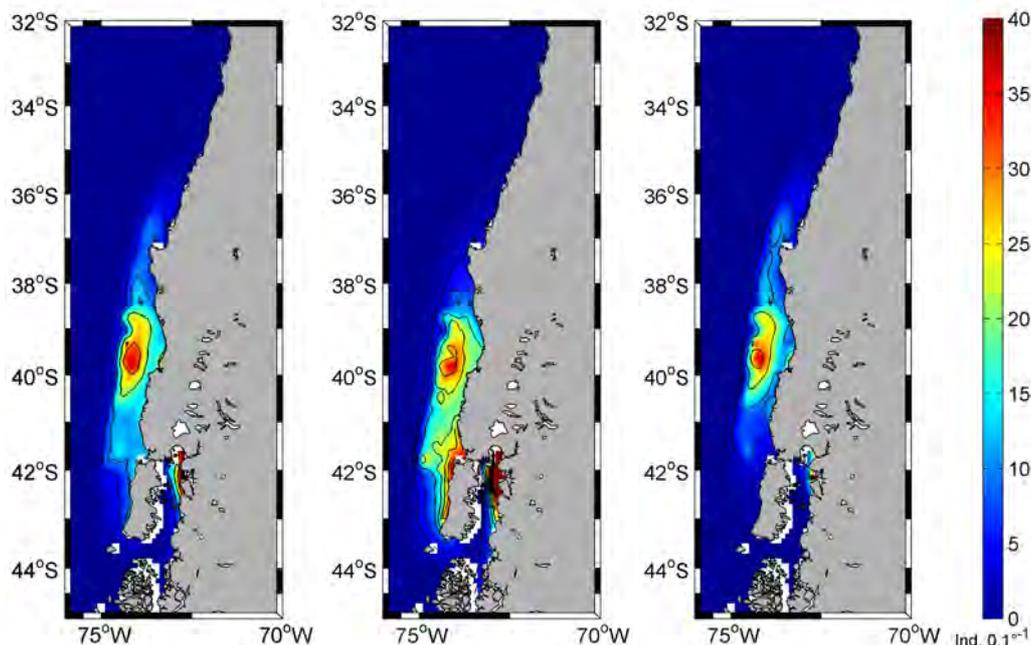


Figura 55. Distribución espacial promedio de anchovetas de 20 mm de longitud total simulada mediante modelación biofísica para: a) el periodo 1994-2014; b) años con anomalías El Niño 3.4 positivas sobre 1°C (1997, 2002, 2008, 2013 y 2014) y; c) años sin eventos El Niño.

6.5.2. Índice de reclutamiento espacial obtenido desde información acústica

Con el objeto de analizar los resultados espaciales de la modelación biofísica respecto a información observada, se re-analizó la información acústica orientada a la evaluación acústica de pequeños pelágicos para obtener la distribución espacial de reclutas de anchoveta observados durante la época estival (mes de enero). La Figura 56 muestra la distribución de reclutas de anchoveta registrados por los cruceros de evaluación acústica en el periodo 2000-2012. La distribución espacial de reclutas de anchoveta los cuales manifiestan presencia de individuos desde San Antonio (33°50' S) hasta Pucotrihue (cerca de Osorno; 40°50' S) que es el límite sur de las prospecciones acústicas.

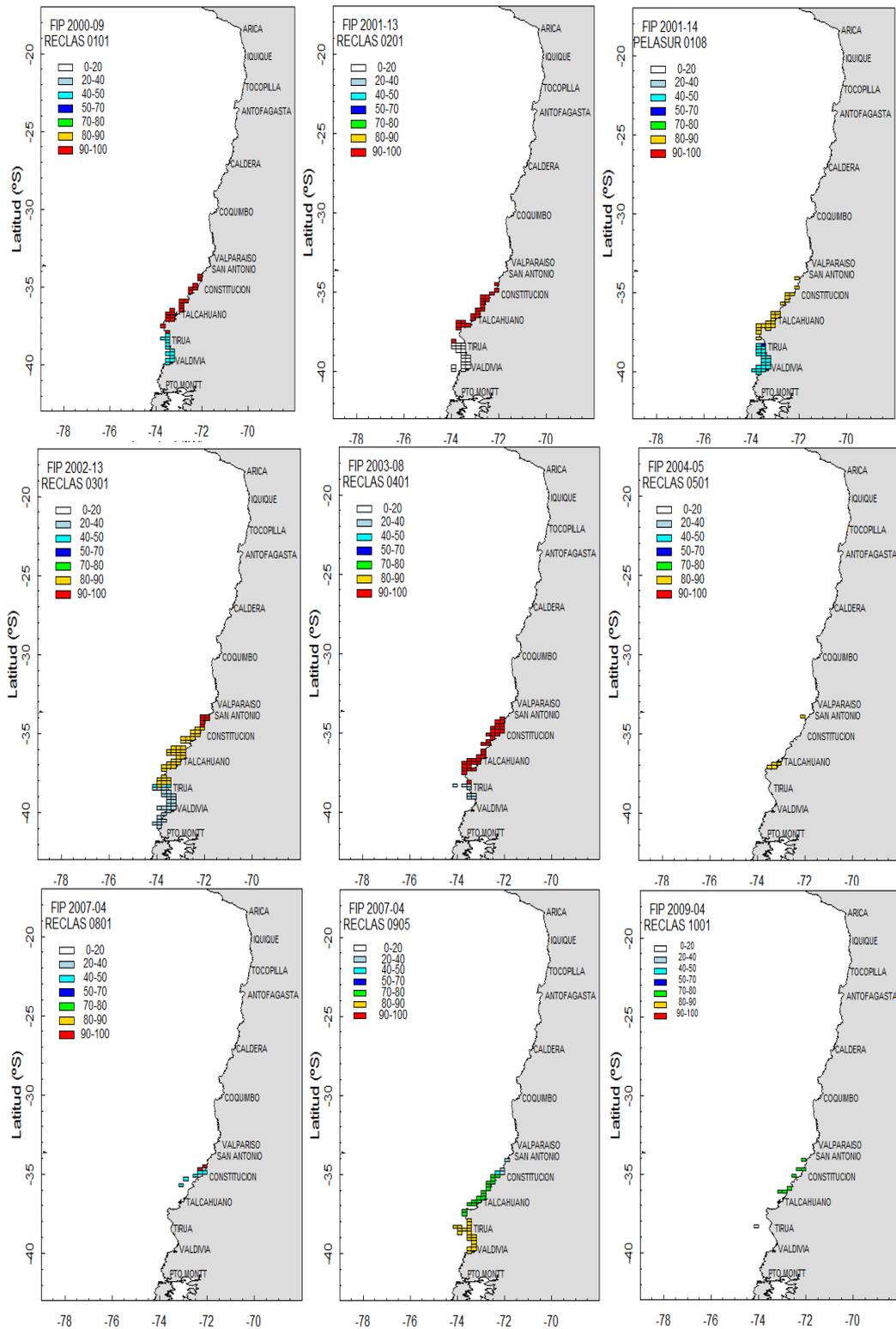


Figura 56. Distribución espacial de reclutas de anchoveta desde información obtenida por cruceros de evaluación acústica, serie 2000 a 2012.

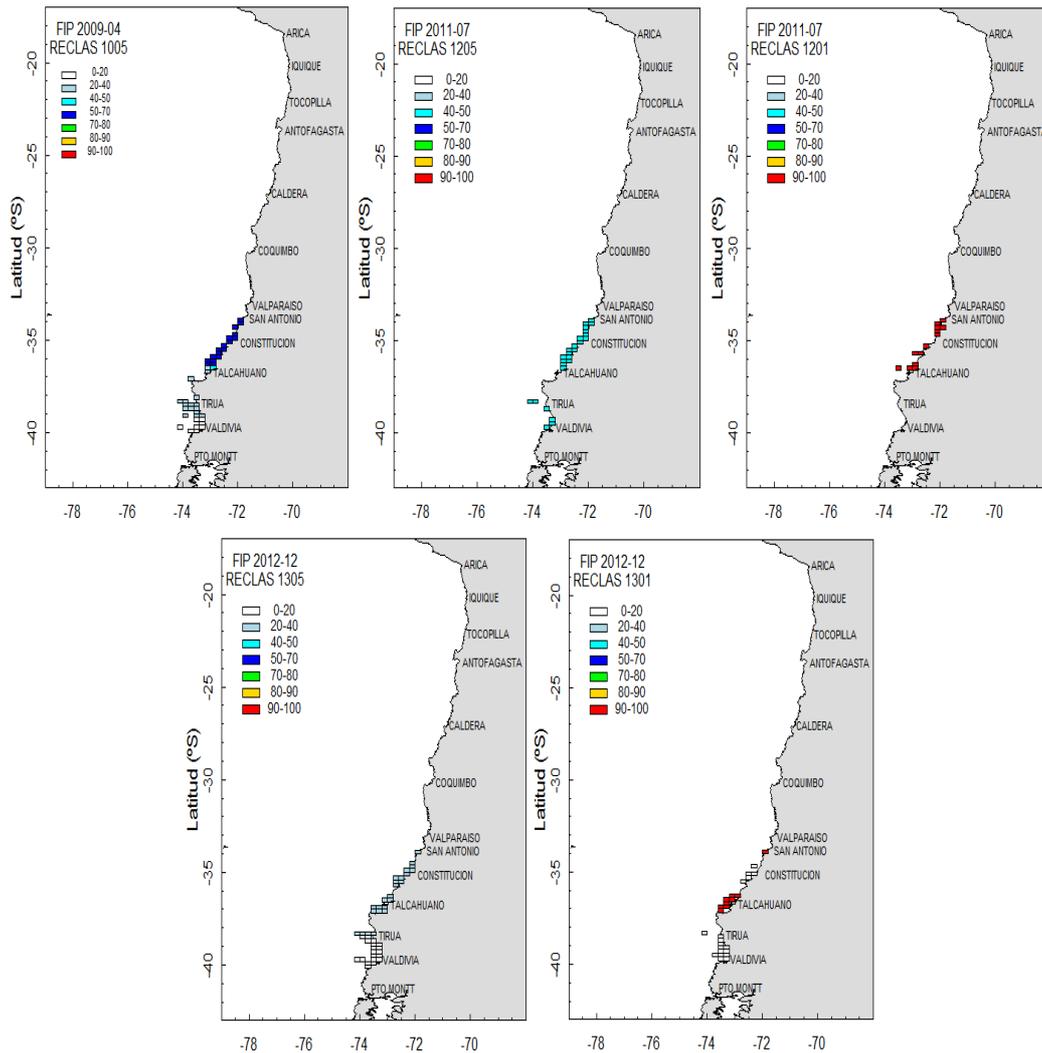


Figura 56 (continuación). Distribución espacial de reclutas de anchoveta desde información obtenida por cruceros de evaluación acústica, serie 2000 a 2012.

A partir de toda la información recopilada de los cruceros acústicos se obtuvo un patrón general de distribución espacial de reclutas de anchoveta, los cuales presentaron una distribución preferente entre San Antonio (paralelo 33°50' S) y Tirúa (38°30' S), donde su concentración varía entre un 70 - 100% de reclutas, asociados principalmente a zonas costeras (Figura 57a). A su vez, en esta área, se encuentran reclutas con tallas promedio menores a 10 cm (Figura 57b). Desde Tirúa hacia el sur de la zona de estudio, se observa una menor distribución de parches de reclutas, asociados a tallas promedio más grandes que en la sub-zona anterior, variando entre 10 – 12 cm, sin presentar un claro patrón de distribución. Además, se observó que la profundidad media de los cardúmenes de

anchoveta, presentan una distribución asociada preferentemente a los primeros 25 metros de profundidad, tanto en la costa como en las zonas más oceánicas, con excepción de algunas zonas frente a Valdivia y Arauco que alcanzaron profundidades hasta 50 metros (Figura 57c). Estos resultados son parcialmente concordantes con lo obtenido a través de modelación biofísica, donde el centro de gravedad de la distribución modelada de pre-reclutas se manifiesta más al sur que lo observado por los cruceros acústicos. No obstante, el transporte hacia el norte obtenido por el modelo en varios años se acopla con esta distribución observada de reclutas por los cruceros 2 a 3 meses posterior. Esto, puede estar asociado al proceso de inicio de la actividad natatoria, donde los individuos que fueron transportados comienzan a formar cardúmenes activos y la probabilidad de incorporarse hacia sectores costeros de mayor actividad biológica (con fines alimentarios) incrementa.

La profundidad media de los cardúmenes de anchoveta muestra una característica principalmente somera, asociada a los primeros 25 m, con un rango de profundidad que varió entre los 2 y 50 metros, éstos máximos y mínimos se observan en el año 2001, sin embargo los años siguientes (2002-2004) presentan una profundidad media mínima y máxima que varía entre 2.5 y 36 metros respectivamente, con una clara preferencia a la capa de profundidad más somera, esto pudiendo adjudicarse a los eventos El Niño declarados en los años 2002/2003 y 2004/2005 (Figura 58a).

En la Figura 58b se observa que las agregaciones de anchoveta con un porcentaje de reclutas mayor al 87% tienden a ser más someros, lo que indicaría una posible diferenciación batimétrica entre cardúmenes de adultos respecto a los reclutas. Por su parte en la Figura 58c da cuenta que los cardúmenes de anchoveta se distribuyen de forma homogénea, sin embargo se observa una leve tendencia a profundizarse a medida que la longitud aumenta. En cuanto a la latitud, se observa un patrón de distribución similar a la longitud, solo que en este caso los cardúmenes se profundizan levemente a medida que se avanza hacia el sur (Figura 58d).

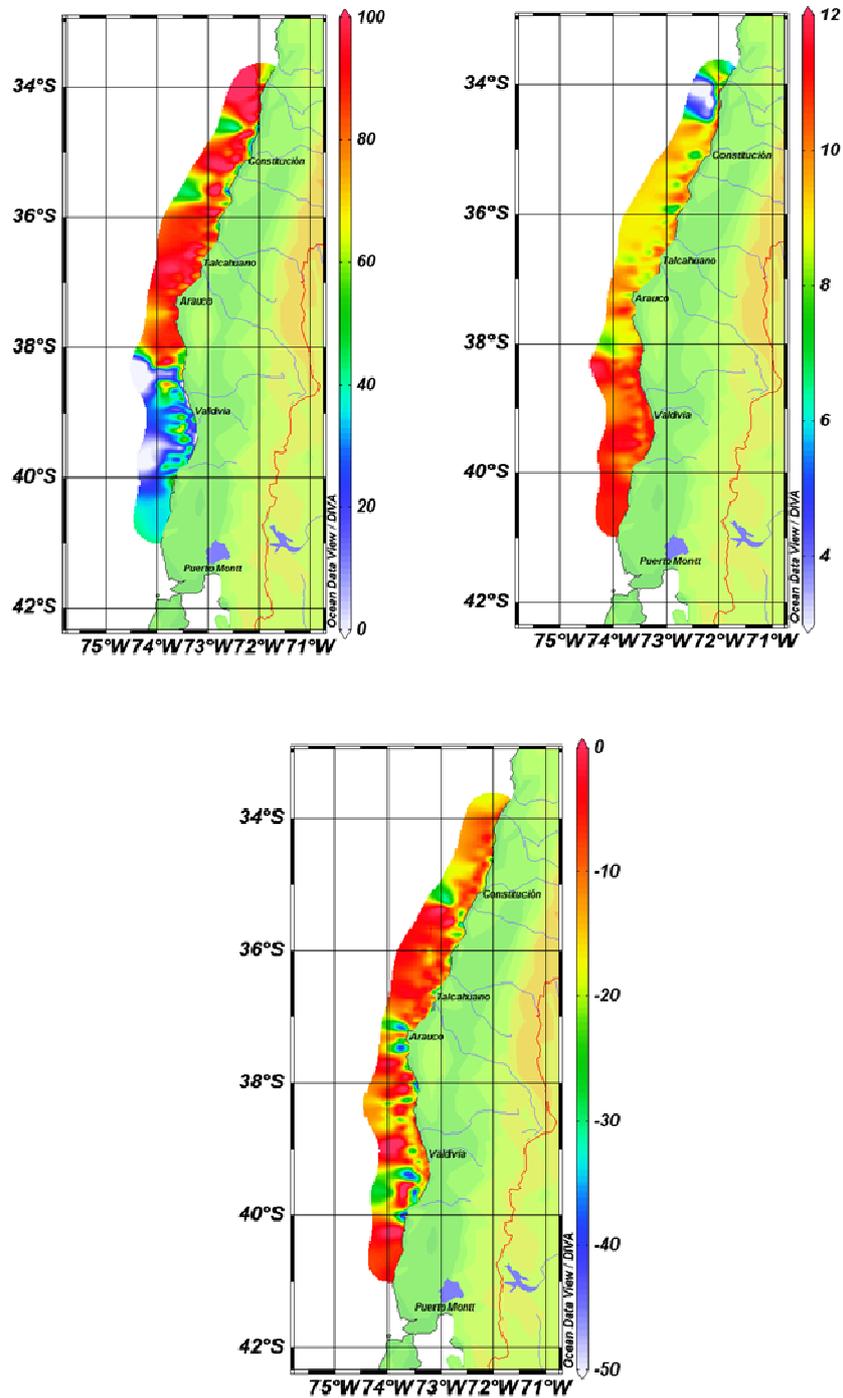


Figura 57. Distribución espacial de los reclutas de anchoveta registrados por cruceros acústicos: a) distribución espacial de reclutas; b) tallas promedio de reclutas de anchoveta y; c) profundidad media de reclutas de anchoveta.

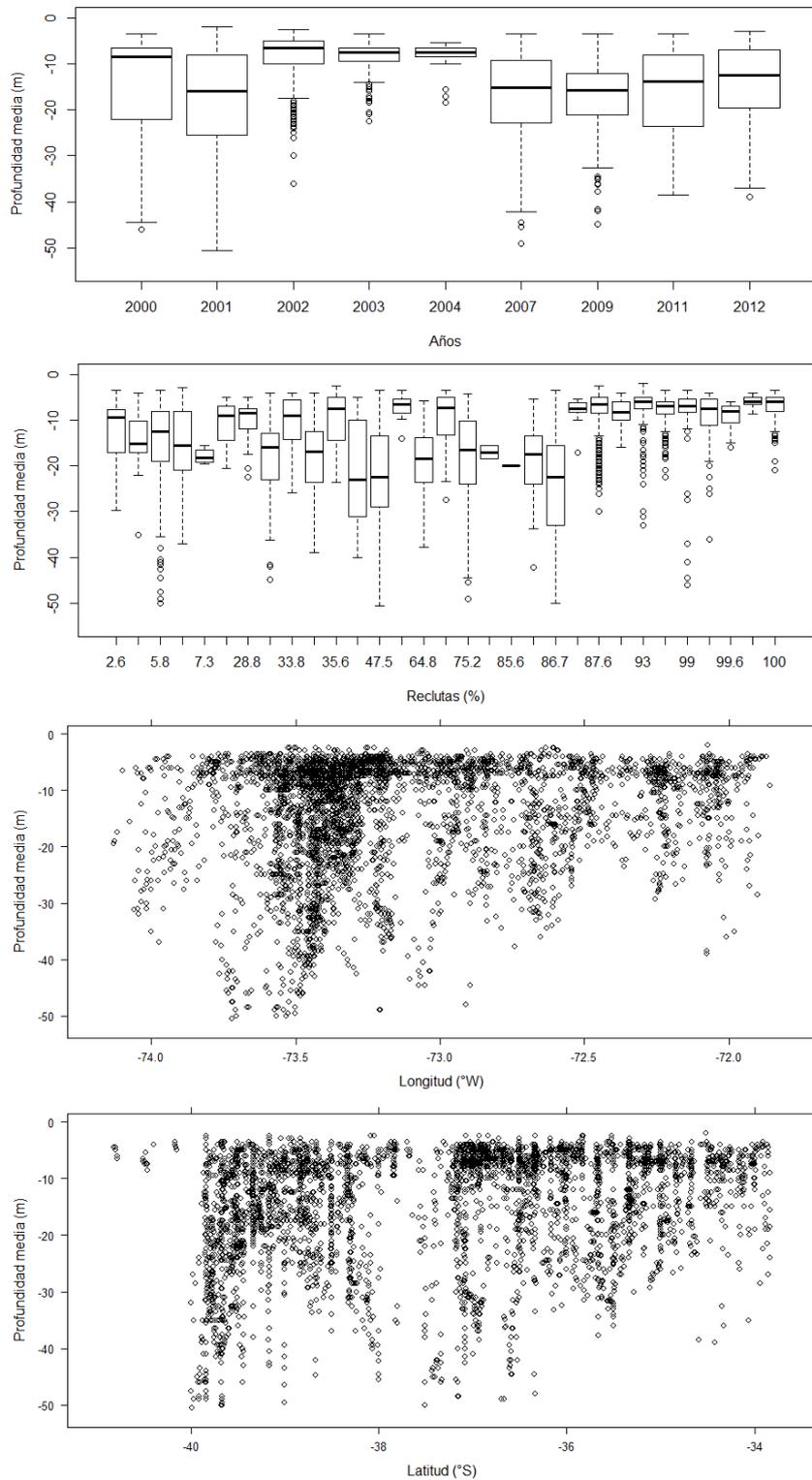


Figura 58. Profundidad de reclutas de anchoveta desde cruceros acústicos por: a) año de evaluación; b) porcentaje de reclutas; c) longitud y; d) latitud.

6.5.3. Análisis comparativo

Los registros acústicos respecto a la distribución espacial de la fracción recluta de anchoveta (Figura 58a) revelan una mayor frecuencia de reclutas al norte de los 38°S, no obstante pueden ser registrados hasta los 41°S. A partir de las distribuciones anuales de pre-reclutas modeladas (Figura 53) se obtuvo el patrón general de distribución modelado, de forma análoga a lo obtenido para los registros acústicos (Figura 57a). La Figura 59 muestra el patrón promedio de distribución de pre-reclutas obtenido mediante modelación biofísica. El patrón modelado sugiere una mayor probabilidad de encuentro de pre-reclutas de 20 mm de longitud en torno a los 39°S, pero extendiéndose al norte hasta los 35°S y al sur hasta los 43°S, pudiendo incluso ser transportados hacia el mar interior de Chiloé. Las diferencias registradas entre estas dos etapas de la historia de vida pueden estar relacionadas con la capacidad natatoria desarrollada por los individuos posterior a los 20 mm de longitud, donde comienzan su comportamiento gregario, pudiendo remontar la velocidad de las corrientes y una fracción importante desplazarse hacia el norte, incorporándose hacia bahías y golfos donde encuentran áreas protegidas y de mayor producción biológica.

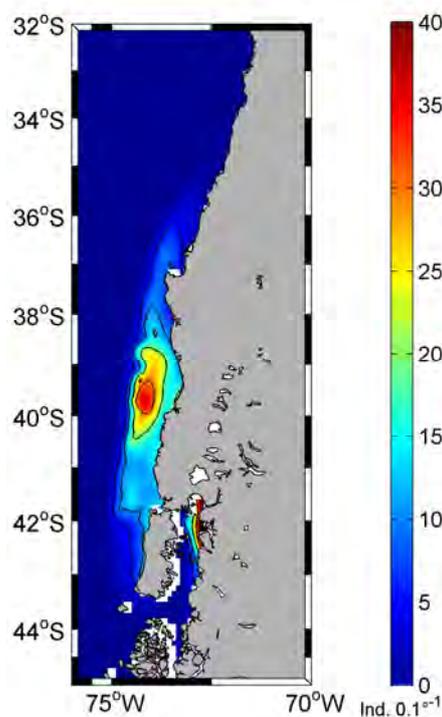


Figura 59. Patrón promedio de distribución espacial de pre-reclutas de anchoveta (20 mm de longitud total) modelada biofísicamente en el periodo 1994-2014.

6.6. Comparación de los resultados del presente estudio (anchoveta) respecto a la Fase I (sardina común)

Uno de los primeros aspectos a considerar al realizar una comparación entre modelos biofísicos, es la evaluación de la configuración de los modelos hidrodinámicos además de las condiciones iniciales del modelo biofísico. La Tabla XIX muestra un análisis comparativos de estos aspectos entre las dos fases del proyecto destinados a sardina común y anchoveta respectivamente. Los indicadores biofísicos espacio-temporales son altamente dependientes del modelo hidrodinámico, de la configuración de los submodelos y del criterio de reclutamiento utilizado. En las dos aproximaciones utilizadas destacan las diferencias en la escala espacial de los modelos hidrodinámicos utilizados, mientras que en la Fase I el modelo utilizado fue de 10 km de resolución espacial, la segunda Fase incluyó un modelo anidado que alcanzó los ~3km de resolución horizontal, verticalmente no hubo diferencias en los modelos utilizados lo que puede afectar a los procesos de transporte a través de estructuras inferiores a 10 km que nos están representadas en el primer modelo.

Otro aspecto relevante a comparar, es la inclusión de batimetría observada en la Fase I del modelo que ayuda a corregir la batimetría base global, lo cual no se realizó en la Fase II y es un punto a mejorar en futuras versiones del modelo. Luego, la Fase II del proyecto incluyó mejoras sustanciales en los submodelos biológicos utilizados incluyendo la incorporación de modelos espaciales que incluyeron condiciones físicas para la descripción del área de desove, los cuales permitieron incorporar distintas configuraciones espaciales del desove al interior de la temporada reproductiva, además de permitir simular la localización del desove en años sin crucero de observación directa. La sincronización temporal de la Fase II incluyó una metodología cuantitativa e insesgada para la estimación del inicio, máximo y término de la temporada reproductiva a partir de información desde el seguimiento de la población de anchoveta, el cual está en línea con lo propuesto por el comité científico de pequeños pelágicos. Además, la modelación de anchoveta incluyó múltiples liberaciones al interior de la temporada reproductiva en el periodo estimado, las cuales se realizaron cada 5 días de acuerdo a la frecuencia de desove estimada. Lo anterior difiere de la Fase I, donde una simulación fue representativa del proceso de transporte, sobrevivencia y conectividad anual. Estos dos últimos aspectos, permitieron incorporar de

mejor manera aspectos demográficos de la población necesarios para aproximarse a la variabilidad del reclutamiento.

Otro aspecto clave que destaca en la Fase II es la inclusión de crecimiento temperatura dependiente de manera explícita dentro del modelo biofísico lo que permite que la historia de vida de cada individuo sea distinta en término del tiempo que es transportado y permite estimar índices basado en tallas críticas. La primera Fase de este proyecto no incluyó un submodelo de movimiento vertical, por lo que el transporte de los individuos fue puramente lagrangiano, lo que fue resuelto en la segunda Fase del proyecto a través de la inclusión de un esquema de migración vertical para larvas y juveniles de anchoveta. La no inclusión de desarrollo y crecimiento explícito en la primera Fase, redundó en que el criterio de reclutamiento se basará en un tiempo fijo de un mes para todos los individuos, lo que corresponde a etapas tempranas del desarrollo y puede no estar necesariamente vinculado con el proceso de reclutamiento. Finalmente, se destaca la obtención de un índice de reclutamiento absoluto desde la modelación biofísica, el cual reporta la abundancia numérica de individuos de 20 mm sobrevivientes al proceso de transporte y permite ser incorporado en el proceso de evaluación de stock de la población de anchoveta en la zona centro-sur de Chile, a diferencia de la Fase I donde solo se reporta el índice de sobrevivencia larval (también reportado en la Fase II).

Tabla XIX. Análisis comparativo entre los esquemas de modelación de la Fases I y II del presente proyecto.

Aspecto de interés	Ítems de modelación	Fase I (sardina común)	Fase II (anchoveta)
Modelo Hidrodinámico	Resolución espacial	~10 km en modelo padre utilizado para modelación biofísica	~3 km en modelo hijo anidado utilizado para modelación biofísica
	Numero de celdas anidadas	Una	Dos
	Resolución temporal	Modelo ROMS con variabilidad interanual, resolución temporal diaria	Modelo ROMS con variabilidad interanual, resolución temporal diaria
	Batimetría utilizada	ETOPO + datos observados	ETOPO
	Inclusión de Ríos	Si, 8 ríos	Si, 8 ríos
	Modo de computo	Discontinua, 4 nodos de calculo	Continua, 1 nodo de cálculo
	Validación	Si, hidrográfica y satelital	Si, hidrográfica y satelital
	Forzante atmosférico	NCEP2	NCEP2
Condición de de borde	ECCO	ECCO	
Modelo Biofísico	Submodelo de distribución espacial del desove	Basada en condiciones observadas y condiciones promedio. Discretizada en celdas de 5 x 5 km. Sin variabilidad intra-anual	Basada en condiciones observadas y condiciones ambientales propicias al desove. Distribución continua dada por el modelo espacial. Variable dentro de la temporada reproductiva.
	Submodelo de sincronización temporal del desove	Basado en serie observada de IGS para detectar el máximo (sobre IGS70%). Se realiza una simulación en el máximo reproductivo representativa de la dinámica reproductiva anual.	Basado en método cuantitativo para estimar temporada reproductiva (Claramunt <i>et al.</i> , 2014). Multi-simulaciones definidas por la duración estimada de la temporada reproductiva y realizadas cada 5 días.

	Submodelo de crecimiento	No incorporado	Modelo de crecimiento temperatura-dependiente basado en condiciones experimentales (Llanos-Rivera, 2005)
	Movimiento horizontal	Rungue Kata de 4to orden	Rungue Kata de 4to orden
	Submodelo de movimiento vertical	No incorporado	Modelo de migración diurno-nocturna basado en información observada de funcionalidad de vejiga gaseosa por talla (Landita & Castro, 2013)
	Criterio de reclutamiento	Basado en edad. Individuos que estén dentro de la plataforma continental al mes de edad	Basado en talla. Individuos que estén dentro de la plataforma continental y que alcancen 20 mm de longitud (Claramente <i>et al.</i> , 2011)
	Índice de reclutamiento	Índice de sobrevivencia hasta el mes de edad	Índice de sobrevivencia e índice absoluto de abundancia de individuos de 20 mm.

Una vez realizado el análisis comparativo de la configuración de los modelos y considerando que los índices emanados para cada caso no representan las mismas etapas de la historia de vida de los pequeños pelágicos, se compararon los índices de sobrevivencia biofísica hacia el reclutamiento obtenidos para sardina común y anchoveta en la Fase I y II del proyecto respectivamente. La Figura 60 muestra ambas series de tiempo donde se observa cierta alternancia en los niveles de sobrevivencia para una y otra especie, mientras en el periodo 1994-1996 la sobrevivencia de anchoveta fue baja (menos de 20%) los niveles

de sardina común se registraron en torno al 60% para luego caer al 30% en 1997 cuando la anchoveta subió a cerca del 80%. Entre 1998 y 2003 la sardina común mostró una tendencia a la baja alcanzando el mínimo histórico en 2003, mientras que la anchoveta fue al alza hasta el 2002. Entre 2004 y 2009 ambas especies mostraron alzas y bajas (con la sardina común por sobre la anchoveta) para luego mostrar escenarios diferentes entre 2010 y 2012 cuando la anchoveta mostró niveles muy bajos (menor a 10%) y la sardina mostró un escenario favorable sobre el 50% de sobrevivencia.

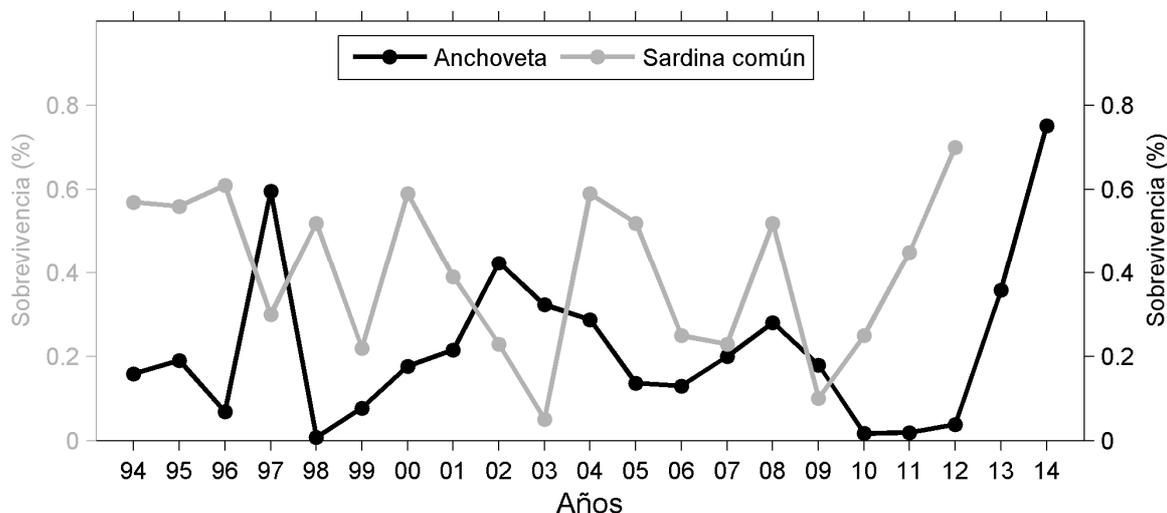


Figura 60. Series de sobrevivencia biofísica obtenidas para sardina común y anchoveta en la Fase I y II del proyecto respectivamente.

Por otra parte, la Figura 61 muestra la señal espacial del reclutamiento biofísico (áreas de crianza-reclutamiento) obtenido en la Fase I para sardina común el cual es contrastable (considerando las diferencias descritas en la Tabla XIX) al reportado en este estudio para anchoveta en la Figura 53. Las áreas reportadas para la ocurrencia espacial de juveniles de ambas especies es coincidente, principalmente en lo que concierne a las máximas densidades, las cuales se registran preferentemente entre $37^{\circ}30'S$ y el $39^{\circ}S$ que constituirían áreas de crianza para juveniles y pre-reclutas de anchoveta y sardina común. Sin embargo, la extensión temporal del proceso de transporte fue más restringida en la Fase I (1 mes) en comparación al esquema basado en el ciclo de vida de la Fase II que proyectó duración del transporte en torno a los 80 días lo que impacta en la extensión espacial del reclutamiento modelado. En la Fase I se reporta una mayor ocurrencia de individuos

reclutados en el sector costero al norte de los 37° respecto a anchoveta, lo cual puede estar relacionado con un proceso menos advectivo por el desove más invernal de la sardina común o por la menor duración del transporte, lo que aumenta la probabilidad de sobrevivencia (menos tiempo de mortalidad advectiva acumulada). Además, los procesos de extensión hacia el sur bajo escenarios extremos como El Niño 1997 se ven menos representados en sardina común debido al mismo proceso. Otro aspecto a considerar en la extensión espacial del reclutamiento modelado es la inclusión de un esquema de movimiento vertical activo, que solo se incluyó en la segunda Fase, lo que impacta en la interacción físico-biológica de los individuos con las corrientes y determina su ubicación final.

No obstante, lo anterior en las modelaciones realizadas para ambos recursos se reconocen patrones de transporte y conectividad generales que responden a i) un forzamiento ambiental común, con zonas de desoves asociadas a regiones de marcados gradientes de densidad, mayor extensión de la plataforma continental y menor advección costa-afuera; ii) transporte hacia el norte generando una relación "fuente-sumidero" entre las regiones IX-XIV y VII - VII; iii) transporte menos común hacia el sur generando conectividad con el mar interior de Chiloé; iv) marcada variabilidad interanual en la magnitud de la retención costera en distintas bandas latitudinales. Las respuestas frente a escenarios ambientalmente anómalos tipo El Niño se han identificado para anchoveta, pero deben ser probados en el futuro en un esquema de modelación conjunta para analizar las diferencias respecto a sardina común.

Al realizar una comparación entre ambas Fases del proyecto, se concluye que es altamente necesario el establecimiento de esquemas de modelación equivalentes para ambas especies para el establecimiento de un modelo biofísico conjunto para pequeños pelágicos, el cual incorpore información biológica para activar todos los módulos de modelación o submodelos y permita obtener resultados comparables en escala espacial y temporal respecto al pre-reclutamiento de ambas especies. Además, es necesario que ambas modelaciones se realicen de acuerdo al ciclo de vida e incluyendo funciones de crecimiento para obtener los indicadores para una misma clase de talla crítica para la modelación. Por

otra parte, la utilización de un modelo hidrodinámico de la misma resolución espacial bajo los mismos forzantes es primordial para establecer un modelo conjunto para ambas especies de pequeños pelágicos.

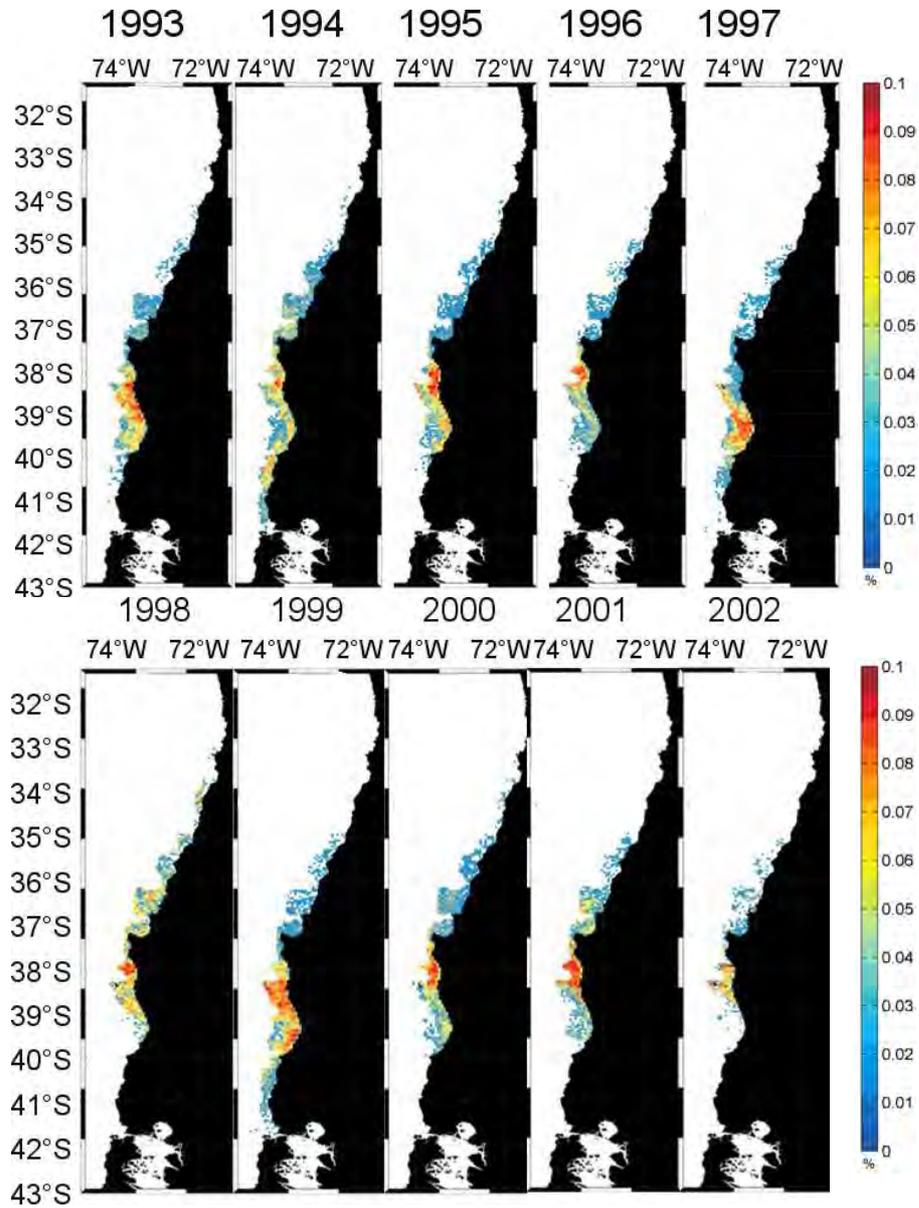


Figura 61. Índice de reclutamiento biofísico espacial obtenido para sardina común en la Fase I del proyecto.

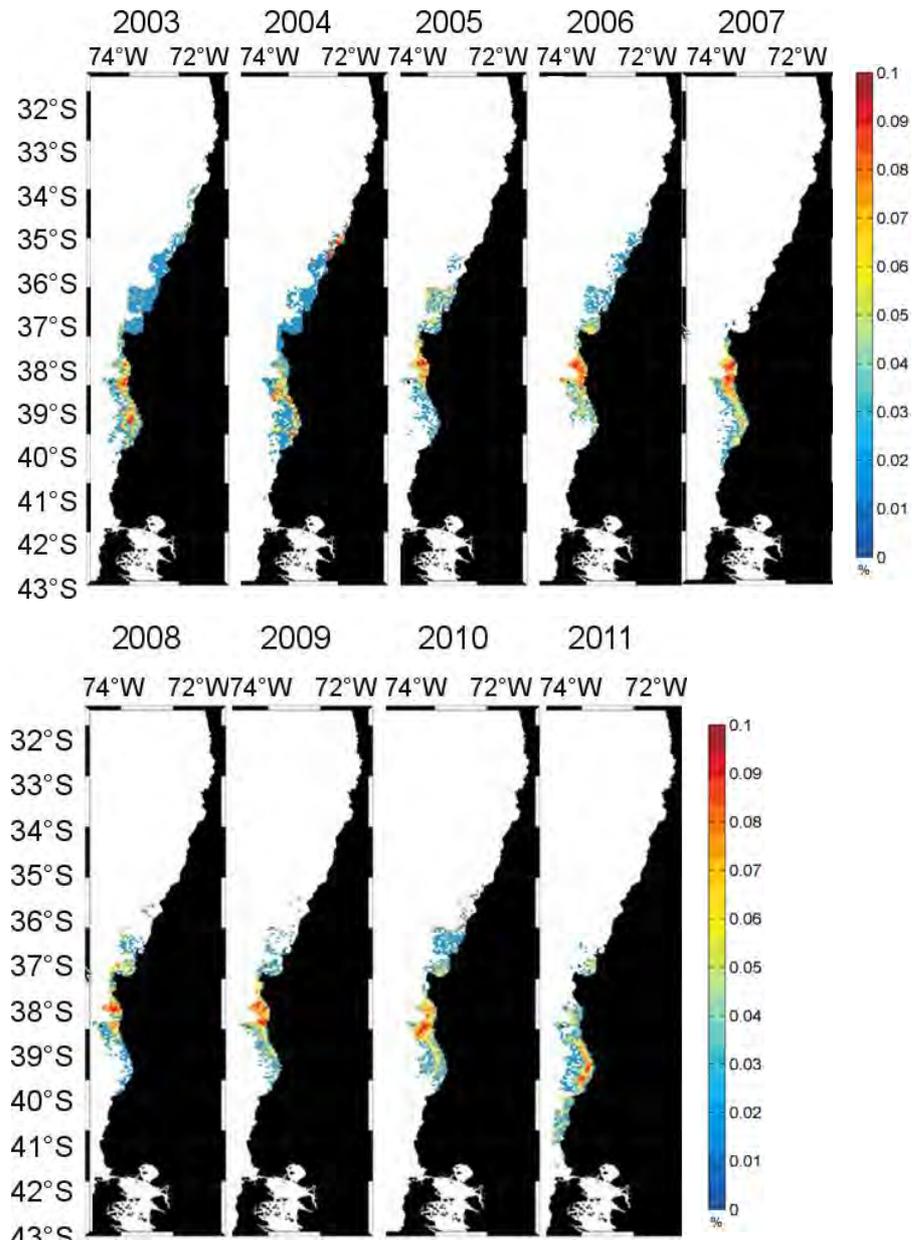


Figura 61 (continuación). Índice de reclutamiento biofísico espacial obtenido para sardina común en la Fase I del proyecto.

6.7. Modelo conceptual para anchoveta basado en modelación biofísica

En el presente capítulo, se presentan los resultado de una acabada 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, así como covariables asociadas con procesos poblacionales (i.e. reclutamiento), lo cual resulta de interés hacia el manejo de pesquería con un enfoque en el ecosistema que incluya indicadores hacia el reclutamiento que incorporen la variabilidad ambiental en una ventana de tiempo amplia, como es el caso del presente estudio. Finalmente, se plantea un modelo conceptual soportado para la población de anchoveta, analizado en el contexto de los resultados de la modelación biofísica de la población.

6.7.1. 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 del recurso 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). Número 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), realizó 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 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 de modelos tipo Cushing, Ricker y Beverton-Holt (Quinn & Deriso, 1999), 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.*, 1994).

La principal proxy ambiental utilizada en la modelación de sistema ha sido la temperatura (MacCall, 2002; Koster *et al.* 2003., Mueter *et al.*, 2011), no obstante surge la pregunta referida a cuáles son las variables biofísicas que permitirían mejorar las predicciones realizadas por los modelos de evaluación de stock (Brander, 2003), esto considerando que son variados los procesos que afectan el reclutamiento y abundancia de los recursos pesqueros, existiendo procesos de naturaleza biológica (i.e. alimentación, predación, enfermedades) como otros de tipo físicos. Por ejemplo, la depredación contribuye significativamente a la mortalidad natural de los individuos juveniles y presenta una alta variabilidad interanual (Pope, 1991; Jurado-Molina *et al.*, 2006), 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).

En la evaluación de pesquerías se reconoce la influencia de múltiples factores en la abundancia del stock, siendo necesario testarlos de forma independiente para evaluar el impacto de estos de forma independiente (Deriso *et al.*, 2008). Las evaluaciones de stock modernas, permiten variaciones inter-anales en el reclutamiento (Maunder & Deriso, 2003; Mueter *et al.*, 2011). Al mismo tiempo, la evaluación de factores de manera independiente puede impedir la habilidad de una evaluación integral para la evaluación de como las interacciones conducen a un determinado impacto (Deriso *et al.*, 2008).

6.7.2. Tipos de Modelos aplicables a la población de anchoveta

La problemática relacionada con los cambios de abundancia y fuerza de los reclutamientos en anchoveta, 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 62).

Clasificación de Modelos

I. 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

II. Modelos basado en Plancton (“Plankton focus (NPZ-fish)”)

Modelo	Nombre
ERSEM II	European Regional Seas Ecosystem Model
SSEM	Shallow Seas Ecological Model

III. 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 Simplified version is AGGMULT which is also connected to a ECONMULT - a model describing the economies of the fishing fleet
MSVPA y MSFOR (y modelos derivados)	Multi-species Virtual Population Analysis; Multi-species Forecasting Model
MSM	Multi-species Statistical Model
IBM	Individual-Based Models
Bioenergetic/allometric	e.g. Koen-Alonso & Yodzis 2005

IV. 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

V. Modelos de sistemas dinámicos (“Dynamic System Models”)

MODEL	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

VI. Modelos monoespecíficos extendidos (“Extended Single-Species Models”)

Modelo	Nombre
ESAM	Extended Single-Species Models e.g. Livingston & Methot 1998; Hollowed <i>et al.</i> , 2000; Tjelmeland & Lindstrøm, 2005

SEASTAR	Stock Estimation with Adjustable Survey observation model and Tag-Return data
---------	---

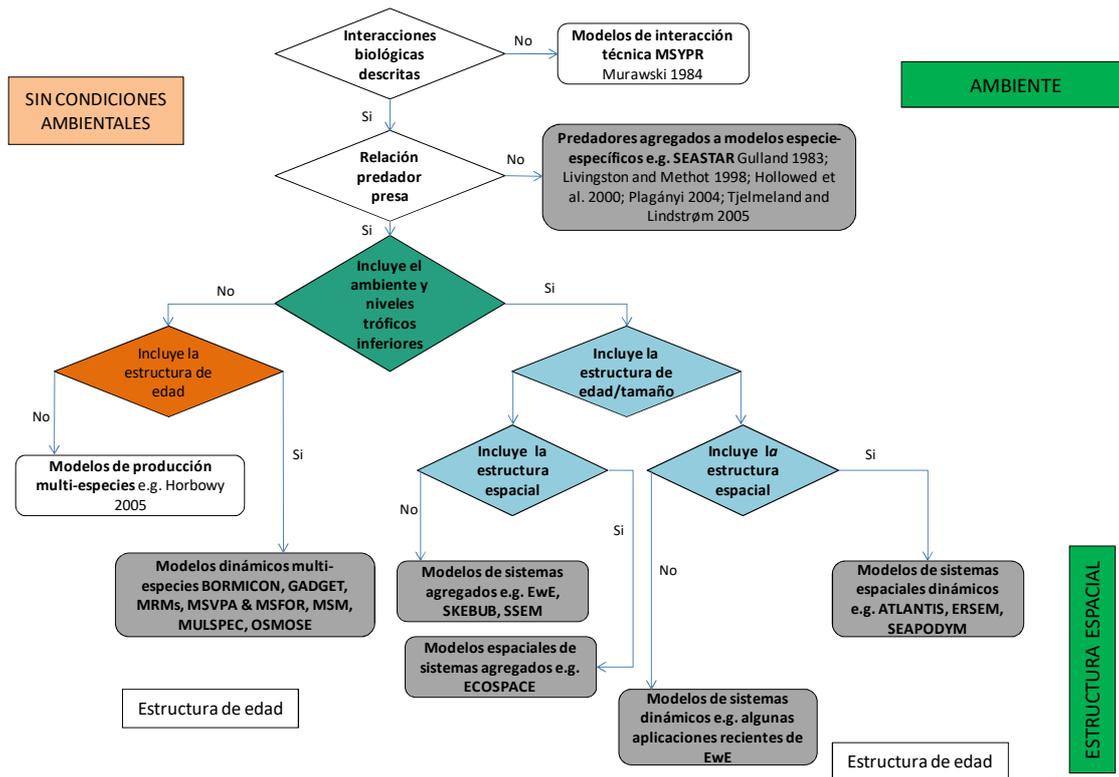


Figura 62. Diagrama modificado y actualizado a partir de Hollowed *et al.*, (2000).

6.7.3. Propuesta metodológica para la reducción de incertidumbre en la dinámica poblacional de anchoveta

En Chile la pesquería basada en especies pelágicas como *Engraulis ringens* constituye un importante fuente de recursos, generando desde años una considerable actividad económica. En términos poblacionales, la explotación se concentra básicamente en el ingreso anual de individuos a la población (“reclutas”) (Arteaga *et al.*, 2013). 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 anchoveta para reducir incertezas en las estimaciones de variables de flujo y estado, reconociéndose como relevantes: reclutamiento, biomasa vulnerable y biomasa desovante. 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, incorporándose métodos estadísticos robustos 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 realizar así, la integración de series ambientales al modelo de evaluación de stock (Maunder & Walters, 2003).

En el esquema señalado anteriormente, es posible reconocer dos tipos de aproximaciones para la incorporación de variables; i) la primera corresponde a incorporar la variable en el proceso de estimación del modelo, siendo por ejemplo el reclutamiento proporcional a la variable ambiental, ii) mientras que en la segunda aproximación denominada tradicional se correlacionan las estimaciones del modelo con las variables fuera del proceso de estimación de forma externa (Figura 63). En el trabajo de Deriso *et al.* (2008) se presenta un método para la incorporación de covariables en la evaluación de stock de acuerdo a varias componentes. En primer lugar, el factor a ser considerado debe ser identificado. Luego, se debe desarrollar un modelo para la inclusión de estos factores y su ajuste a la información. Finalmente, se debe realizar un test de hipótesis para evaluar cuales factores son importantes en orden para proveer asesoría para el manejo e impacto de los factores en las salidas de interés.

En el caso de las especies pelágicas pequeñas de la región del Pacífico Sur oriental, una alternativa es analizar la relación stock-recluta, incorporando información ambiental que

sea sensible al reclutamiento (i.e. 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 realiza la inclusión de variables biofísicas exploradas que resulten significativas como determinantes del reclutamiento (etapa de exploración previa con series independientes). Luego, se implementa un modelo(s) con relación stock-recluta especie específico, que incorporen de forma 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).

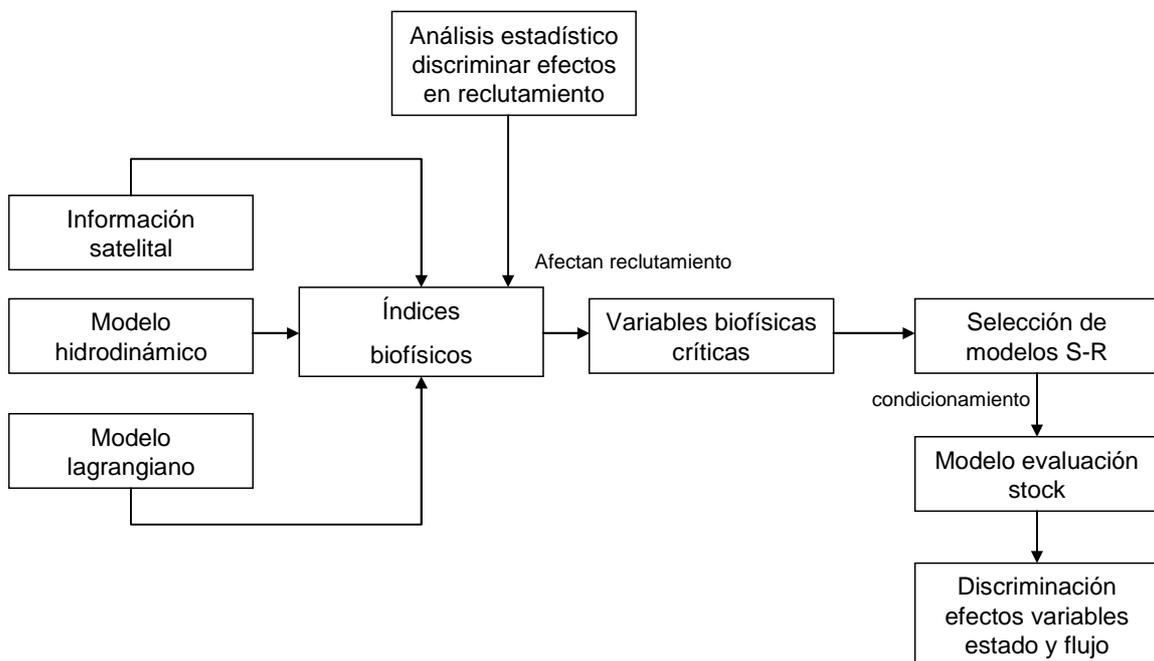


Figura 63. Diagrama del esquema metodológico para incorporar variables ambientales que afectan significativamente al reclutamiento (ejemplo para pequeños pelágicos) y para el establecimiento de modelos de evaluación de recursos con/sin variables biofísicas incluidas en procesos poblacionales.

6.7.4. 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. A saber, el trabajo de Zwolinski & Demer (2014) primero explora la correlación entre el logaritmo del reclutamiento ($\log(R/S)$) y la variable ambiental seleccionada utilizando el análisis de correlación de Pearson. Este análisis exploratorio cuantifica la covariabilidad entre múltiples variables entregando una guía para el ajuste posterior del modelo. Luego, ajustan una versión linealizada del modelo de Ricker R-S (Quinn & Deriso, 1999), he implementado por Hill *et al.*, (2011), pero con la inclusión de variables ambientales potencialmente relacionadas con el reclutamiento. Por ejemplo en el caso de Jacobson & MacCall (1995), los datos fueron ajustados a un modelo lineal generalizado.

$$\log(\bar{R}) = \text{offset}(\log(S)) + \beta_0 + \beta_1 S + \sum_{j=1}^J \beta_{j+1} I_j$$

Donde \bar{R} es el valor esperado de reclutamiento en millones de ejemplares, $\text{Offset}(\log(S))$ el logaritmo de la edad-1+biomasa con un coeficiente fijo de 1, β_0 el intercepto, β_1 el parámetro de pendiente para la biomasa desovante (S), y el j esimo índice ambiental I_j con un respectivo coeficiente β_{j+1} .

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 (μ), desviación temporal (ϵ_t), un parámetro que relaciona la serie ambiental (β) y un parámetro de escala (α).

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

Donde t = tiempo, y

I_t = el valor de la variable ambiental al tiempo t .

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

$$a = \ln \left(\frac{n}{\sum \exp(\varepsilon_t + \beta I_t)} \right)$$

Donde n es el número de períodos de tiempo.

Por su parte, Deriso *et al.*, 2008 siguiendo lo planteado en Maunder & Walters, 2003, indican que la incorporación de covariables en la evaluación de stock se realiza en un marco metodológico donde se representa el modelo de los procesos utilizando parámetros que son función de las covariables incorporadas. Para un caso general donde la covariable (I_y) da cuenta de alguna desviación anual (y) en el proceso representado por el parámetro θ , descrito por:

$$\theta_y = \theta_0 \exp(\beta I_y + \varepsilon_y - 0.5\sigma^2)$$

En el cual β controla la influencia de la covariable en el proceso, las desviaciones anuales ε_y , se asumen normalmente distribuidas de la forma $N(0, \sigma^2)$, y θ_0 es el parámetro a ser estimado.

El método puede ser extendido a k índices.

$$\theta_y = \theta_0 \exp\left(\sum_k \beta_k I_{k,y} + \varepsilon_y - 0.5\sigma^2\right)$$

Esquemas metodológicos como el señalado, forman parte de los métodos para la incorporación de variables a los modelos de evaluación de stock, siendo estos los que serán

revisados y discutidos para la fase de desarrollo de un “modelo conceptual”, donde se realice la incorporación de proxy desde modelos biofísicos a la evaluación de stock.

En el trabajo de Maunder & Walters (2003), detallan el esquema de dinámica poblacional aplicado a un modelo de simulación de la forma:

Descriptor del simulador y estimador

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

Dinámica

$$(1.1) \quad N_{y,1} = R_0 \exp(\beta I_y + \varepsilon_y^R + \alpha)$$

$$(2.1) \quad \alpha = \ln \left(\frac{n}{\sum \exp(\varepsilon_y^R + \beta I_y)} \right)$$

$$(3.1) \quad N_{y,a} = (N_{y-1,a-1} (1 - \mu_{y-1} s_{a-1})) \exp^{-M_{a-1}} \quad \text{para } a < A$$

$$(4.1) \quad N_{y,A} = (N_{y-1,A-1} (1 - \mu_{y-1} s_{A-1})) \exp^{-M_{A-1}} + (N_{y-1,A} (1 - \mu_{y-1} s_A)) \exp^{-M_A}$$

$$(5.1) \quad \mu = \frac{C_y}{B_y}$$

$$(6.1) \quad B_y = \sum_a N_{y,a} s_a w_a$$

Donde:

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

R_0 = reclutamiento promedio;

ε_y^R = anomalía del reclutamiento para el año y ;

σ_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;

μ_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

$$(2.1) \quad N_{1,a} = R_0 \exp\left(-\sum_{i=1}^{a-1} M_i\right) \quad \text{para } 1 < a < A$$

6.7.5. 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 más apropiado.

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

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.

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

Si I_{95} es sólo ligeramente mayor que I_{50} , el modelo tendrá dos regímenes. 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 (1998), 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.

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

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:

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

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

En el caso de estudio para la sardina del Pacífico (*Sardinops sagax*), se demuestra que el reclutamiento en la corriente de California, en las últimas décadas sigue aspectos del ambiente en el Pacífico Norte indicados por el índice de Oscilación Decadal del Pacífico (“Pacific Decadal Oscillation, PDO”). Los períodos de incremento y disminución siguen períodos consecutivos de valores positivos y negativos del valor del PDO. En períodos cálidos el número promedio de reclutas por biomasa fue más de tres veces mayor que el correspondiente al período frío (Zwolinski & Demer, 2014). 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

6.7.6. Aplicación del índice biofísico en la evaluación de stock y manejo de recursos

A partir de la discusión al interior del grupo de trabajo, se plantean algunas perspectivas del uso de los resultados emanados del modelo biofísico hacia la evaluación del estado de los stocks de pequeños pelágicos y hacia el manejo pesquero integrado.

6.7.6.1. Sobre la evaluación de stock

En la evaluación de stock de pequeños pelágicos, el tipo de modelos en actual uso para el manejo, corresponde a modelos con estructura de edad ajustados a información directa (i.e.

cruceros) e indirecta (i.e. CPUE, estructura de tamaños, desembarques). Estos modelos, responden a un modelo conceptual donde se incorporan procesos poblacionales como el crecimiento, la mortalidad y la madurez, entre otros. De esta forma, se consolida una representación de la población con el objeto de conocer parámetros poblacionales de interés como son el reclutamiento (abundancia inicial), mortalidades por pesca y natural, desde el modelo es posible obtener estimaciones de las observaciones a través del proceso de ajuste del modelo o calibración. Finalmente, se obtienen variables de estado de interés como son las abundancias y biomásas, y variables de flujo como la mortalidad por pesca, y en síntesis poder establecer la condición de la población o estatus.

Las estimaciones, incorporan error de observación y de procesos, a mayor conocimiento de los procesos que controlan o determinan los cambios en abundancia, y en disposición de datos informativos y representativos de la población, la incertidumbre tanto en los parámetros como en las variables estimadas, disminuye. Para ello, es posible analizar la bondad de ajuste a través de test de verosimilitud, análisis de residuales o DIC. En particular, en las evaluaciones de stock, el reclutamiento es uno de los parámetros más difíciles de estimar, y que presentan mayor incertidumbre, siendo modelados generalmente como un parámetros con desviaciones (i.e. proceso estocástico). En este punto, un índice informativo e independiente validado con un proceso como el reclutamiento, producto de una modelación bio-física puede ser utilizado en los modelos de evaluación de stock con el objeto de reducir incertidumbre y por lo tanto, disminuir el sesgo en las estimaciones poblacionales. Un modelo, que incorpore de manera eficiente un IB contendría mayor información que un modelo tradicional, la incorporación del índice debe ser evaluada, siendo posible que se incorpore directamente como: i) un calibrador al proceso de reclutamiento, o ii) como una covariable en la expresión de reclutamiento, siendo esto adicionado en el proceso estocástico a la forma de una covariable.

6.7.6.2. Manejo Pesquero y proyecciones.

La aplicación en el manejo de los índices biofísicos, viene dada por la posibilidad de condicionar las proyecciones a través de reclutamiento, dadas las características del IB que se asocia con el reclutamiento futuro, acercando de esta forma la proyección a una

condición de mayor realismo. En general, las proyecciones de corto o mediano plazo, proyectan condiciones promedio de toda la serie analizada, o bien de un promedio de los últimos años. Luego, un IB informativo, facilita la decisión del analista al condicionar el reclutamiento futuro, resultando en estimaciones proyectadas con menor incertidumbre al incluir el índice. Un condicionamiento, de mayor realismo evita por ejemplo que las proyecciones de capturas futuras y condición del stock estén, distantes de la condición más probable, con los beneficios que tiene para el manejo de recursos bajo explotación pesquera.

6.7.7. Modelo conceptual para pequeños pelágicos

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 anchoveta. Este modelo conceptual se esquematiza en la Figura 64, el cual se focaliza en el primer año de vida de las especies donde completan todas las fases de su desarrollo ontogenético (huevos hasta la madurez sexual) y donde el ambiente ejerce mayor control sobre la sobrevivencia.

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 reclutas.

Por su parte, los cruceros asociados al método de producción diaria de huevos aportan información relacionada al stock desovante, sobre la base de estos cruceros se ha planteado el siguiente patrón espacio y temporal:

- i) 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.

ii) Al sur de la Isla Mocha ($38^{\circ}20'S$) y hasta los $40^{\circ}S$, los ejemplares son de mayor tamaño corporal y constituyen la fracción adulta de la biomasa.

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

iv) 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).

Los resultados del presente estudio, en complemento con las propuestas generadas por Cubillos *et al.* (2008) permiten establecer el siguiente modelo conceptual espacial para la anchoveta en la zona centro-sur de Chile:

a) Durante la transición invierno-primavera (julio-septiembre), la fracción adulta ingresaría a la región más costera para reproducirse con mayor abundancia en la zona entre los $37^{\circ}30'S$ y $39^{\circ}30'S$. No obstante esta época es variable entre años y puede estar gatillada por cambios ambientales. 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 en conjunto con los frentes salinos generados en desembocaduras de ríos, 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.

b) Huevos y larvas de anchoveta son transportadas por la corriente de forma pasiva hasta alcanzar los 10 mm desde cuando comienzan a migrar verticalmente. El transporte por corrientes genera pérdidas advectivas en toda el área de distribución siendo máximas de punta Lavapié al norte, y conecta las áreas de desove con las áreas de crianza, las cuales pueden variar entre años dependiendo del régimen atmosférico-oceanográfico. Durante episodios El Niño se debilitan los vientos, disminuyendo el transporte costa-afuera, propiciando la retención costera y aumentando la sobrevivencia de estadíos tempranos de desarrollo de anchoveta. La Figura 65 resume esquemáticamente los patrones de transporte bajo distintos regímenes atmosféricos-oceanográficos.

c) El sistema de plataforma continental, en particular las zonas de bahías y golfos, constituyen zonas de crianza donde pre-reclutas menores a 3 meses de edad crecen, se desarrollan y comienzan la actividad natatoria gregaria. Las áreas de crianza más frecuentes se ubican entre Corral y el norte del Golfo de Arauco, sin embargo bajo eventos El Niño la expresión de estas áreas de crianza se mueven al sur pudiendo alcanzar la zona del mar interior de Chiloé.

d) En enero-marzo, los ejemplares han reclutado con una talla promedio de entre 6 y 7 cm, principalmente al norte del Golfo de Arauco hacia donde se incorporarían mediante natación activa desde las áreas de crianza ubicadas más al sur. 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 $38^{\circ}20'S$ (sur de la Isla Mocha a Corral).

e) 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.

f) 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, cuando se incorporarían

al primer desove de forma más tardía y breve que los peces más viejos, y dada su mayor abundancia, 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).

g) 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 ($38^{\circ}20'S-40^{\circ}S$), los individuos de mayor tamaño localizados en esta área eventualmente podrían desarrollar una migración hacia el norte y hacia la costa, para desovar en las áreas de desove durante la época de desove ("*homing behavior*", Cury, 1994). Durante el transcurso de esta migración, asociada al uso del hábitat, podrían ocurrir desoves importantes. Esta estrategia debería estar relacionada con periodos reproductivos de mayor duración e intensidad temporal, desovando antes que los ejemplares que se reproducen por primera vez (Parrish *et al.*, 1986).

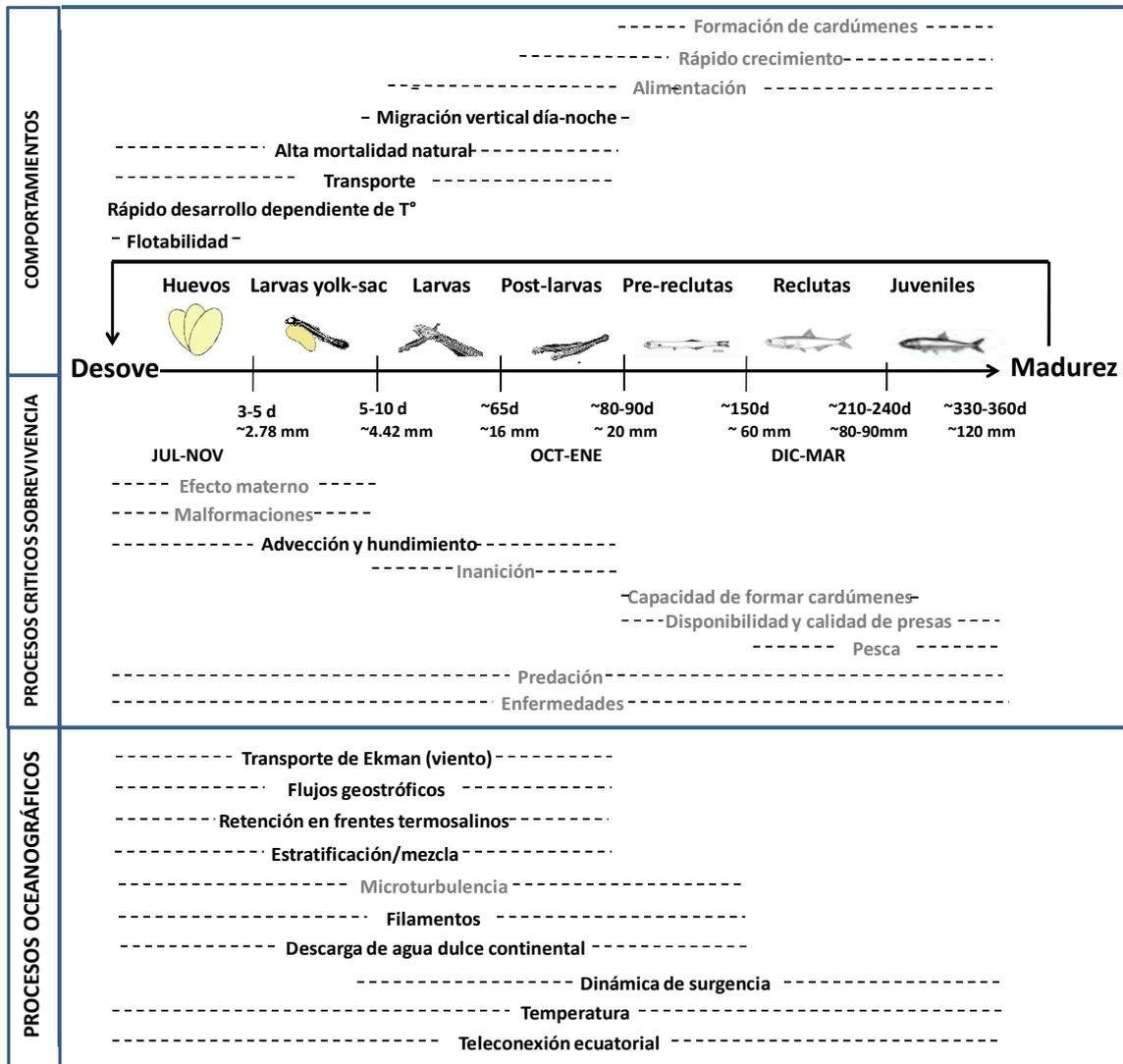


Figura 64. Modelo conceptual de la historia de vida temprana de pequeños pelágicos en la zona centro-sur de Chile con énfasis en procesos biofísicos relevantes para el control de la sobrevivencia. En negro se muestran los procesos abordados en el presente estudio, en gris procesos no abordados y que constituyen focos de estudio hacia el futuro.

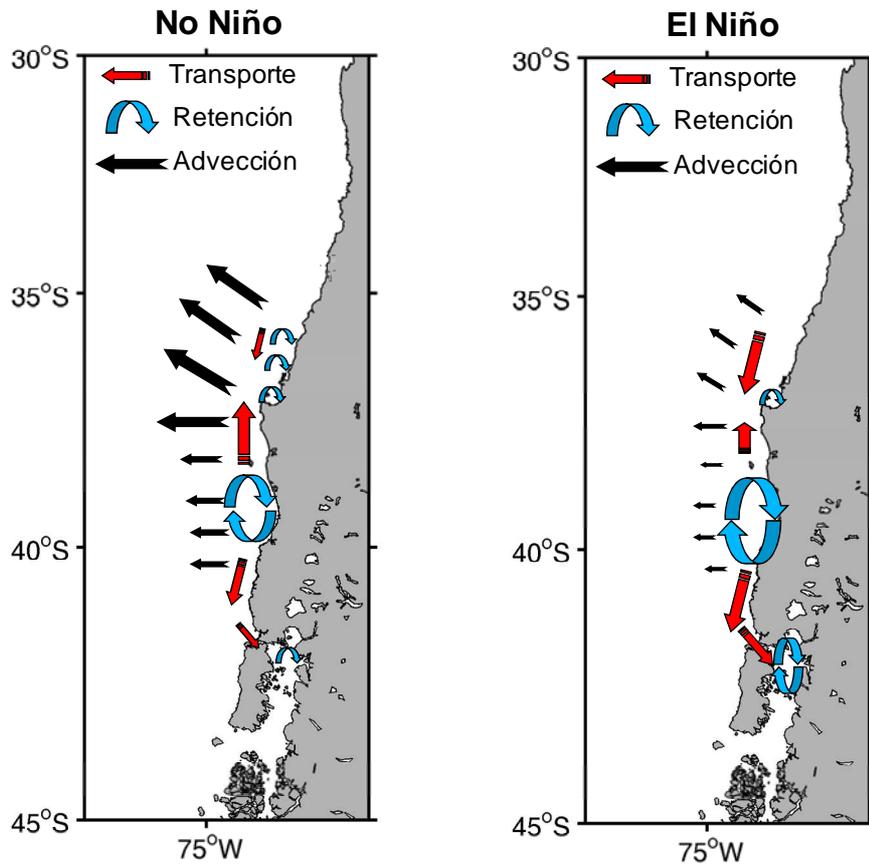


Figura 65. Esquema del transporte de estadios tempranos de anchoveta y de los patrones de conectividad bajo escenarios extremos tipo El Niño y bajo condiciones No Niño.

7. CONCLUSIONES

7.1. Modelación Hidrodinámica

- El modelo hidrodinámico ROMS de resolución espacial de 4 km y temporal diaria para el sector costero Chile centro-sur mostró un buen desempeño reproduciendo los rasgos oceanográficos más importantes del sistema, no obstante existen mejoras metodológicas que pueden ser implementadas en futuras versiones.
- La utilización de datos oceanográficos provenientes de cruceros de evaluación directa, para la validación del modelo ROMS resultó de alta utilidad y constituye un nuevo uso de esta información de campo.
- El modelo ROMS mostró un buen nivel de reproducción de la variabilidad interanual del sistema en términos de variables conservativas, no obstante es discutible la magnitud de los cambios durante eventos críticos ('El Niño').

7.2. Aspectos Oceanográficos

- Desde el punto de vista de los forzantes asociados al transporte de productos del desove de anchoveta en la región costera del centro-sur de Chile, existen diferencias espaciales y temporales (especialmente estacionales) en la dinámica de la región costera situadas al norte (34°-37°S) y sur (37°-40°S) del área de estudio.
- Al norte de punta Lavapié (37°20'S) la intensidad y dirección del viento favorecen la surgencia costera y el transporte de Ekman, en tanto que al sur de dicha latitud la deriva de Ekman alcanza su valor más bajo por estar en la zona de divergencia de los vientos, verificando un mínimo transporte hacia la zona oceánica. Al término de invierno-inicios de primavera la dirección del viento en este sector favorece el transporte hacia la costa.
- Los resultados del análisis de Frecuencias Ortogonales Empíricas de la corriente geostrofica mostró un flujo pegado a la costa entre el límite austral de estudio y punta Lavapié, lo que contribuye por una parte a incrementar la retención en el sector costero, y por otra al transporte hacia el norte por el borde costero. Zonas de retención se verifican asimismo en el Golfo de Arauco, Bahía Concepción y desembocadura del Itata asociadas a características topográficas particulares.
- La intensificación de las corrientes hacia el norte en primavera-verano coincide con al aumento de los vientos del S-SW que favorece la surgencia especialmente al norte de 37°S a lo largo de la costa. El afloramiento costero de aguas frías intensifica el gradiente térmico costa-océano y a su vez el gradiente horizontal de densidad, que refuerza las corrientes hacia el norte conducidas por el viento

(corriente de chorro). En otoño/invierno, el desplazamiento del Anticiclón al norte debilita los vientos S-SW y la surgencia costera, favoreciendo las corrientes y el transporte al sur.

- El sector situado entre los 37°S y los 40°S se verifica como una región de mayor retención (mucho menor deriva de Ekman) especialmente al término de invierno-inicio de primavera, así como también promueve un ambiente que favorece el transporte hacia el área de reclutamiento situada más al norte (35°S a los 37°S), por efecto del flujo geostrofico pegado a la costa especialmente en primavera-verano.
- Las zonas de mínimas turbulencia se localizan frente a la región costera al sur de los 38°S donde su variabilidad está modulada estacionalmente. La turbulencia y la circulación es menos intensa al sur de punta Lavapié, junto con la presencia de frentes salinos, favorecen la retención en la zona.
- En general, al norte de punta Lavapié, el gradiente latitudinal de las propiedades hidrográficas es explicado por la recirculación del agua, producto de la sombra de surgencia frente al golfo de Arauco y la surgencia de punta Nugurne. Al sur de los 37°S, este gradiente es explicado por el flujo superficial hacia el norte de agua dulce proveniente de la descarga de los ríos de la zona.

7.3. Modelación biofísica

- La zona de desove de la anchoveta muestra mayor actividad en torno a los 39°S donde se observa un sistema de menor dinámica de vientos y un importante gradiente salino promovido por el aporte fluvial, lo que contribuye a la retención costera.
- La temporada reproductiva de anchoveta muestra variabilidad interanual en la sincronización del desove. Este aspecto demográfico puede causar (des)acoplamiento con las condiciones propicias para la retención y el éxito reproductivo. Es necesario estudiar los desencadenantes del proceso de desove.
- El modelo productivo del desove de anchoveta explicó un 58% de la varianza del proceso, convirtiéndose en una herramienta útil para analizar la variabilidad espacio-temporal del desove (aspectos demográficos). Es recomendable identificar nuevas variables críticas.
- La escala de dispersión analizada para anchoveta, está dentro de los márgenes previamente establecidos para peces de estas características, sin embargo el sistema

muestra rasgos dinámicos altamente dispersivos.

- La tasa de sobrevivencia basada en modelación biofísica muestra correlación con los procesos de acoplamiento desove-advención, sugiriendo a las pérdidas advectivas como un modulador principal de la dinámica del reclutamiento.
- Las condiciones iniciales para la modelación biofísica explicaron un 33,12% del éxito del reclutamiento individual, estableciendo que un alto porcentaje del reclutamiento está vinculado a procesos de transporte asociados con los procesos oceanográficos que modulan el transporte de estadíos tempranos de anchoveta.
- Se obtuvieron diferencias significativas al comparar experimentos de transporte pasivo (lagrangiano) y experimentos con inclusión de comportamiento biológico (modelo con flotabilidad de huevos y migración vertical para larvas y juveniles). El comportamiento biológico de la anchoveta tiene un efecto directo en los patrones espaciales de transporte, agregación y advención.
- Los periodos de máxima sobrevivencia larval estuvieron asociadas a épocas con índices El Niño predominantemente positivos, las cuales a su vez, estuvieron asociadas a épocas con disminución del estrés del viento y el transporte costa afuera.
- La manifestación espacial del índice de sobrevivencia muestra un área de pre-reclutamiento centrada en los 39°S y una dinámica meridional altamente variable y asociada a procesos oceanográficos regionales.
- El índice de (pre) reclutamiento biofísico mostró correspondencia respecto a índices de reclutamiento provenientes de modelos estadísticos edad-estructurados.
- La correspondencia entre indicadores sugieren al indicador biofísico como una nueva pieza de información basada en el ecosistema para sintonizar la estimación del reclutamiento.
- El modelo biofísico parece rescatar señales de cambio de régimen en una escala mayor a otras fuentes de información hacia el reclutamiento.
- El alto nivel descriptivo del modelo biofísico respecto al reclutamiento del año siguiente al evaluado lo transforman en una poderosa herramienta para el manejo pesquero, permitiendo proyectar los niveles de captura futuro bajo un escenario de reclutamiento conocido.

- La incorporación de un índice de reclutamiento basado en modelos ecológicos y ecosistémicos hacia el proceso de toma de decisiones está en sintonía con las recomendaciones internacionales.
- La obtención de un índice de pre-reclutamiento independiente de la pesquería puede resultar de alta utilidad para el proceso de evaluación de stock, toma de decisiones de manejo y prueba de hipótesis respecto a la estructura del stock en la zona centro-sur de Chile.

8. TALLERES Y REUNIONES

En el marco del desarrollo de este proyecto se han realizado una serie de reuniones y talleres de trabajo, entre los que destacan:

Reunión de coordinación con Subsecretaría de Pesca. El día 13 de septiembre de 2015 se llevó a cabo la reunión de coordinación con la Subsecretaría de Pesca donde se presentó formalmente el proyecto y se coordinaron las principales actividades asociadas. En dicha reunión participaron el Sr. Luis Carroza, Director ejecutivo del FIP; la Srta. Silvia Hernández, Subsecretaría de pesca y acuicultura; Sr. Milton Pedraza, Subsecretaría de pesca y acuicultura; Srta. Malú Zavando, Subsecretaría de pesca y acuicultura, Sr. Aquiles Sepúlveda, Director de INPESCA y Sr. Sebastián Vásquez, jefe de proyecto.

Taller de diseño del modelo hidrodinámico. El día 25 de Mayo de 2015 se realizó una jornada de trabajo para analizar la configuración y alcances del modelo hidrodinámico ROMS de elaboración propia. De esta reunión emanaron las bases para el inicio de la implementación del ROMS para anchoveta. Se contó con la participación del Dr. Luis Soto Universidad del Bío Bío, Dr. Cristian Salas, INPESCA; Sergio Núñez, INPESCA y Sebastián Vásquez, INPESCA.

Sesión de discusión del grupo de trabajo de estructura poblacional. El día 24 de Julio de 2015 se realizó una jornada de discusión en dependencias de INPESCA para la discusión del modelo conceptual que delinearé la modelación biofísica, además de discutir aspectos asociados a la estructura poblacional de anchoveta en la zona centro-sur de Chile. En dicha reunión participaron los investigadores de INPESCA Aquiles Sepúlveda, Marcos Arteaga, Sergio Núñez, Claudio Gatica y Sebastián Vásquez.

Taller interno de coordinación grupo de Oceanografía. Realizado el día 28 de Agosto de 2015 con el propósito de compartir, discutir y consensuar diferentes aspectos asociados al desarrollo de la caracterización oceanográfica de las zonas de desove y reclutamiento de anchoveta en la zona centro-sur de Chile, se realizó un Taller interno de trabajo del grupo

de Oceanografía del proyecto, en dependencias del Instituto de Investigación Pesquera. En dicho taller participaron los profesionales: Sergio Núñez Elías, Instituto de Investigación Pesquera; Luis Soto Mardones, Universidad del Bío-bío, Cristián Salas Domínguez, Instituto de Investigación Pesquera y Sebastián Vásquez Pastene, Jefe de proyecto y el Dr. Jaime Letelier Pino (Instituto de Fomento Pesquero), vía remota.

Taller interno de revisión y validación del modelo hidrodinámico. Realizado el 11 de Marzo de 2016 con el propósito de analizar y discutir los resultados relacionados con las salidas del modelo hidrodinámico y su validación mediante datos observados. En dicho taller participaron los profesionales: Sergio Núñez Elías, Instituto de Investigación Pesquera; Luis Soto Mardones, Universidad del Bío-bío, Cristian Salas (Instituto de Investigación Pesquera) y Sebastián Vásquez (Instituto de Investigación pesquera), jefe de proyecto.

Sesión de trabajo del grupo de trabajo de dinámica poblacional. El día 28 de Julio de 2016 se realizó una jornada de discusión en dependencias de INPESCA para el análisis y discusión del modelo de evaluación de stock de anchoveta y los índices auxiliares asociados al reclutamiento, cuyos resultados serán parte de las piezas de información para contrastar las salidas del modelo hidrodinámico. En dicha reunión participaron los investigadores de INPESCA Marcos Arteaga, Claudio Gatica, Aquiles Sepúlveda y Sebastián Vásquez.

Taller interno de análisis de resultados grupo de Oceanografía. Realizado el día 04 de Septiembre de 2016 con el propósito de analizar y discutir resultados relacionados con la caracterización oceanográfica del área de estudio, en la ciudad de Valparaíso. En dicho taller participaron los profesionales: Sergio Núñez Elías, Instituto de Investigación Pesquera; Luis Soto Mardones, Universidad del Bío-bío, y el Dr. Jaime Letelier Pino (Instituto de Investigación Pesquera).

Sesiones de discusión del grupo de trabajo de modelación biofísica y estructura poblacional. Los días 16 de Octubre de 2015, 16 de Agosto de 2016 y 15 de Septiembre de

2016 se realizaron reuniones de discusión en dependencias de INPESCA para la discusión relativas a los resultados de la modelación biofísica y utilización de los indicadores hacia el manejo pesquero. En dichas reuniones participaron los investigadores de INPESCA Aquiles Sepúlveda, Sergio Núñez, Claudio Gatica, Marcos Arteaga y Sebastián Vásquez.

Taller de discusión y difusión de resultados I. El día miércoles 28 de Septiembre de 2016 se realizó con éxito el taller de discusión y difusión de resultados en dependencias del Hotel Diego de Almagro en la ciudad de Valparaíso. En dicha oportunidad participaron invitados de Subsecretaría de Pesca, institutos de investigación, Universidades, empresas pesqueras, etc. Además se contó con la presencia del experto internacional Dr. Andrés Ospina-Álvarez, quien además brindó una charla relativa al tema. Detalles del taller se entregan en el Anexo III.

Taller de discusión y difusión de resultados II. El día miércoles 12 de Octubre de 2016 se realizó con éxito una segunda versión del taller de discusión y difusión de resultados en dependencias del Instituto de Investigación Pesquera en Talcahuano. En dicha oportunidad participaron invitados de Subsecretaría de Pesca, institutos de investigación, Universidades, empresas pesqueras, etc. Además se contó con la presencia del experto internacional Dr. Andrés Ospina-Álvarez, quien además brindó una charla relativa al tema. Detalles del taller se entregan en el Anexo IV.

Presentación Comité Científico pequeños pelágicos. El día miércoles 11 de Enero el jefe de proyecto Sebastián Vásquez presentó los principales resultados y alcances del proyecto en el Comité Científico de Pequeños Pelágicos, a solicitud de la Subsecretaría de Pesca. Esta presentación se realizó en dependencias de Subpesca en la ciudad de Valparaíso.

9. 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.
- Alarcón, C. 2013. Efectos demográficos y ambientales en la estimación de la fracción desovante de peces pelágicos pequeños. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias con mención en Pesquerías. Universidad de Concepción, 95 páginas.
- Allen, J. S. 1975. Coastal Trapped Waves in a Stratified Ocean. *Journal of Physical Oceanography*, 5, 300–325.
- Arcos, D & M. Salamanca. 1984. Distribución de clorofila y condiciones oceanográficas superficiales frente a Chile central (Latitudes 32° S - 38° S, Febrero 1982). *Biología Pesquera*. 13: 5-14.
- Arcos, D. F. & N. Navarro. 1986. Análisis de un índice de surgencia para Talcahuano, Chile (Lat. 37° S). *Investigación Pesquera (Chile)*, 33: 91-98.
- Arcos, D.F., S.P. Núñez, L. Castro & N. Navarro. 1987. Variabilidad vertical de clorofila a en un área de surgencia frente a Chile central. *Invest. Pesq. (Chile)*, 34: 47-55.
- Arcos, D., Cubillos, L., Núñez, S. 2001. The jack mackerel fishery and El Niño 1997-1998 effects of Chile. *Progress in Oceanography*, Vol 49:597-617.
- 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.
- Arntz, W.E., A. Landa & J. Tarazona (eds). 1985. El Niño. Su impacto en la fauna marina. *Bol. Inst. Mar Perú*, 222 p.
- Arntz, W., Percy, W. G., Trillmich, F. 1991. Biological consequences of the 1982-83 El Niño in the eastern Pacific, Pinnipeds and El Niño responses to environmental stress (F Trillmich, K A Ono) *Ecological studies* 88, Springer, Berlin, 22-42 .
- Arntz, WE., Gallardo, V.A., Gutiérrez, D., Isla, E., Levin, L.A., Mendo. J., Neira, C., Rowe, G., Tarazona, J., Wolff, M. 2006. El Niño and similar perturbation effects on the benthos of the Humboldt California, and Benguela Current upwelling ecosystems. *Advances in Geosciences* 6, 243-265.
- Arrizaga, A. 1981. Nuevos antecedentes biológicos para la sardina común, *Clupea (Strangomera) bentincki* Norman 1936. *Bol. Soc. Biol. Concepción*, 52: 5-66.

Arteaga, M. & Cubillos, LA. 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.

Arteaga, M., B. Ernst, C. Gatica & S. Vásquez. 2013. Bases conceptuales para la aplicación de una evaluación de estrategias de manejo (EEM) en sardina común (*Strangomera bentincki*) y anchoveta (*Engraulis ringens*) en Chile centro sur. Latin American Journal of Aquatic Research.

Bailey, K. 1989. Interaction between the vertical distribution of juvenile walleye pollock *Theragra chalcogramma* in the eastern Bering Sea, and cannibalism. Mar. Ecol. Prog. Ser. 53:205-213.

Bakun, A. 1990. Global climate change and intensification of coastal upwelling. Science. 247: 198-201. Mann, KH & JRN Lazier 1996. Dynamics of marine ecosystem: Biological-Physical interactions in the oceans. Blackwell Science Ltd, Massachusetts, USA. 394 p.

Bakun, A. & C.S Nelson. 1991. The seasonal cycle of wind-stress curl in subtropical eastern boundary current regions. Journal of Physical Oceanography. 21 (12): 1815 - 1834.

Bakun, A. 1996. Patterns in the ocean. Ocean process and population dynamics. California Sea Grant College System, National Oceanic and Atmospheric Administration in cooperation with Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (1996), Roma, Italia. 323 p.

Bakun, A. 2006. Fronts and eddies as key structures in the habitat of marine fish larvae: opportunity, adaptive response and competitive advantage. Scientia Marina. 70 (S2): 105-122.

Barber, R.T. & R.L. Smith. 1981. Coastal upwelling ecosystem. En. Analysis of marine ecosystem A. R. Longhurst (Eds.). Academic Press, London pp. 31-68

Barbieri, M.A., Bravo, M., Farías, M., González, A., Pizarro, O. & E. Yañez. 1995. Fenómenos asociados a la estructura térmica superficial del mar observados a través de imágenes satelitales en la zona norte de Chile. Invest. Mar. 23: 99-122.

Barnett, T.P. & Patzert, W.C. 1980. Scales of thermal variability in the tropical Pacific. J. Geophys. Res., 10: 529-540

Bartsch, J. & S.H. Coombs. 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.

Bartsch, J., Reid, D., Coombs, S.H., 2004. Simulation of mackerel (*Scomber scombrus*) recruitment with an individual-based model and comparison with field data. Fish. Oceanogr. 13, 380-391.

Batteen, M., Hu, P., Bacon, J. & C. Nelson 1995. A numerical study of effects of wind forcing on the Chile counter current system. *J. Oceanogr. Soc. Jap.* 51: 585-614.

Bénitez-Nelson, C., R. Bidigare, T. Dickey, M. Landry, C. Leonard, S. Brown, F. Nencioli, Y. Rii, K. Maiti, J. Becker, T. Bibby, W. Black, W. Cai, C. Carlson, F. Chen, V. Kuwahara, C. Mahaffey, P. McAndrew, P. Quay, M. Rappé, K. Selph, M. Simmons & E. Yang. 2007. Mesoscale Eddies Drive Increased Silica Export in the Subtropical Pacific Ocean. *Science*. 316 (5827): 1017-1021.

Bernal, C., M. Canales, V. Catasti, A. Sepulveda, P. Ruiz, R. Alarcón, S. Núñez, C. Oyarzún, S. Gacitúa, G. Claramunt & G. Herrera 2004. Evaluación del stock desovante de anchoveta y sardina común entre la V y X Regiones, año 2003. Fip N° 2003-06. Instituto de Fomento Pesquero, Valparaíso, pp. 199.

Bernal, M., Stratoudakis, Y., Coombs, S., Angélico, M. M., Lago de Lanzós, A., Porteiro, C., Sagarminaga Y., *et al.* 2007. Sardine spawning off the European Atlantic coast: characterization of and spatio-temporal variability in spawning habitat. *Progress in Oceanography*; 74:210-227.

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.

Blanco, JL, A. Thomas, M. Carr & P. Strub. 2001. Seasonal climatology of hydrographic conditons in the upwelling region off northern Chile. *Journal of Geophysical Research*. 106 (C6): 11451-11467.

Bowman, M. & W. Esaias 1978. Oceanic fronts in coastal processes. En: *Proceedings of a Workshop Held at Marine Sciences Research Center. may 25-27, 1977.* pp. 113.

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.

Brandhorst, W 1971. Condiciones oceanográficas estivales frente a la costa de Chile. *Revista de Biología Marina*. 14 (3): 45-84.

Brink, K. 1987. Upwelling fronts: Implications and unknowns. *South African Journal of Marine Science*. 5: 3-9.

Brink, K & T Cowles 1991. The coastal transition zone program. *Journal of Geophysical Research*. 96 (C8): 14637-14647.

Brown, J., A. Colling, D. Park, J. Phillips, D. Rothery & J. Wright. 1989. *Ocean Circulation. asociation with Pergamon Press.*, 238 p.

- Sangrà, P 2010. Course: "Eddies in the Ocean: Biological Progress and Implications". Department of Geophysic, University of Concepción Concepción. June 7-11.
- Buckland, S.T., K.P. Burnham & N.H. Augustin. 1997. Model selection: An integral part of inference. *Biometrics* 53:603-618.
- Burnham, K.P. & D.R. Anderson. 2002. Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach. 2nd Ed., Springer-Verlag, New York, NY.
- Cáceres, M. 1992. Vórtices y Filamentos Observados en imágenes de satélite Frente al Área de surgencia de Talcahuano, Chile Central (33-38.5° S). *Invest. Pesq. (Chile)*, 37: 55-66
- Canales, T.M. & E. Leal. 2009. Parámetros de historia de vida de la anchoveta *Engraulis ringens* Jenys, 1842, en la zona centro norte de Chile. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 44(1):173-179.
- 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., Saavedra, A.G., Leiva, F., Reyes, H., Pizarro, M., Espindola, F., Lang, C., Catasti, V., San Martin, 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, LA, 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. Áreas 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, 115 p + Figs + Anexos.
- Castro. L, G. Claramunt, M.C. Krautz, A. Llanos-Rivera & P. Moreno. 2009. Egg trait variation in anchoveta *Engraulis ringens*: a maternal response to changing environmental conditions in contrasting spawning habitats. *Marine Ecology Progress Series* 381: 237-248.
- Cerna, J.F. & Plaza G. 2015. Caracterización de la historia de vida de anchoveta, sardina común y sardina austral en la zona centro sur. Informe Final Proyecto FIP 2013-19. Instituto de Fomento Pesquero, 160 p. +ANEXOS.

- Chaigneau, A. & O. Pizarro. 2005. Surface circulation and fronts of the South Pacific Ocean, east of 120°W. *Geophysical Research Letters*, 32, L08605 10.1029/2004GL022070.
- Chaigneau, A., A. Gizolme & C. Grados 2008. Mesoscale eddies off Peru in altimeter records: Identification algorithms and eddy spatio-temporal patterns *Progress in Oceanography*. 79: 106-119.
- Chaigneau, A., G. Eldin & B. Dewitte. 2009. Eddy activity in the four major upwelling systems from satellite altimetry (1992-2007). *Progress in Oceanography*. 83 (1-4): 117-123
- Chelton, D., M.G., Schlax, R.M. Samelson & R.A. deSzoeki. 2007. Global observations of large oceanic eddies. *Geophysical Research Letters*. 34 (L15606): doi:10.1029/2007GL030812.
- Claramunt, G. & Herrera, G. 1994. A new method to estimate the fraction of daily spawning females and the numbers of spawnings in *Sardinops sagax* in northern Chile. *Sci. Mar. (España)* 58 (3), 169–177.
- Claramunt, G. & Roa, R., 2001. An indirect approach of estimating spawning fraction applied to *Sardinops sagax* from northern Chile. *Sci. Mar.* 65, 87–94.
- Claramunt, G., Roa, R., Cubillos, L.A., 2002. Estimating daily spawning fraction using the gonadosomatic index: application to three stocks of small pelagic fish from Chile. In: Kjesbu, O., Hunter, J., Withames, P. (Eds.), *Modern Approaches to Assess Maturity and Fecundity of Warm- and Cold-Water Fish and Squids*, Bergen, Norway, 2001, vol. 12. *Fisken Og Havet*, pp. 43–49.
- Claramunt, G. 2011. Desarrollo de un sistema de cultivo masivo de postlarvas de anchoveta para exportación. Informe Final Proyecto FDI – CORFO. 127 pp.
- Claramunt, G., L.A. Cubillos, L. Castro, C. Hernández, M. Arteaga. 2014. Variation in the spawning periods of *Engraulis ringens* and *Strangomera bentincki* off the coasts of Chile: A quantitative analysis. *Fisheries Research* 160: 96–102.
- Correa-Ramírez, M., S. Hormazábal & G. Yuras. 2007. Mesoscale eddies and high chlorophyll concentrations off central Chile (29°-39°S). *Geophys. Res. Lett.* 34, L12604, doi: 10.1029/2007gl029541.
- Cowen R.K., Gawarkiewicz G, Pineda J, Thorrold SR, Werner FE. 2007. Population connectivity in marine systems. *Oceanography* 20:14–21
- 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., 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, 1999. Estrategia reproductiva, crecimiento y reclutamiento de *Strangomera bentincki* (Norman, 1936) en el sistema de surgencia de la zona centro-sur de Chile. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias con mención en Oceanografía. Escuela de Graduados, Universidad de Concepción, 180 p.

Cubillos, L., M. Canales, D. Bucarey, A. Rojas y R. Alarcón. 1999. Epoca 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., D. Arcos, D. Bucarey & M. Canales. 2001. Seasonal growth of *Strangomera bentincki* (Clupeidae) and *Engraulis ringens* (Engraulidae) off Talcahuano (37°S-73°W), Chile: a consequence of their reproductive strategy to seasonal upwelling?. Aquatic Living Resources, 14:115-124

Cubillos, L. & D. Arcos. 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: 87-94.

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., 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., L. Castro, G. Claramunt & C. Oyarzún. 2006. Evaluación del stock desovante de anchoveta y sardina común entre la V y X Regiones, año 2005. Fip N° 2005-02. Instituto de Fomento Pesquero, Valparaíso, pp. 153.

Cubillos, LA, 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., L. Castro & G. Claramunt. 2008. Evaluación del stock desovante de anchoveta y sardina común entre la V y X Regiones, año 2007. Fip N° 2007-06. Instituto de Fomento Pesquero, Valparaíso, pp. 126.

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.

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., L. Castro & G. Claramunt. 2011. Evaluación del stock desovante de anchoveta y sardina común en la zona centro-sur, año 2010. Fip N° 2010-02. Instituto de Fomento Pesquero, Valparaíso, pp. 125.

Cubillos, L., L. Castro, G. Claramunt & E. Navarro. 2013. Evaluación del stock desovante de anchoveta y sardina común entre la V y X Regiones, año 2012. Fip N° 2012-09. Instituto de Fomento Pesquero, Valparaíso, pp. 345.

Cury, P. 1994. Obstinate nature: an ecology of individuals. Thoughts on reproductive behavior and biodiversity. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 51(7): 1664–1673.

Cushing, D.H. 1975. *Marine ecology and fisheries*. Cambridge University Press.

Cushman-Roison, B. 1994. *Introduction to geophysical fluid dynamics*. Prentice-Hall, Inc., 320 p.

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.

Daneri, G., V. Dellarossa, R. Quiñones, B. Jacob, P. Montero & O. Ulloa. 2000. Primary production and community respiration in the Humboldt Current System off Chile and associated oceanic areas. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 197: 41-49

DeAngelis, D. & V. Grimm. 2014. Individual-based models in ecology after four decades. *Prime Reports* 6:39.

Deriso, R., Maunder, M., W. Pearson. 2008. Incorporating covariates into Fisheries Stock assessment models with application to Pacific Herring. *Ecological Applications*, 18(5), 1270-1286.

- Echevin, V., Colas, F., Chaigneau, A. and Penven, P. 2011. Sensitivity of the Northern Humboldt Current System nearshore modeled circulation to initial and boundary conditions. *Journal of Geophysical Research* 116: 0148-0227.
- Enfield, D. 1989. El Niño, past and present. *Reviews of Geophysics*, 27:159-187.
- Escribano, R. & P. Hidalgo 2001. Circulación inducida por el viento en Bahía de Antofagasta, norte de Chile (23°S). *Revista de Biología Marina y Oceanografía*. 36 (001): 43-60.
- Escribano, R., G. Daneri, L. Farías, V. A. Gallardo, H.E. González, D. Gutierrez, C. Lange, C. E. Morales, O. Pizarro, O. Ulloa & M. Braun. 2004. Biological and chemical consequences of the 1997–1998 El Niño in the Chilean coastal upwelling system: a synthesis. *Deep-Sea Research II* 51 (2004) 2389–2411.
- Fedorov, KN & NP Kuzmina 1977. Fronts in the ocean. En. *Mesoscale Variability of an Oceanic temperature Field*. IOAN (Eds.). Moscow pp. 33-53
- Fedorov, KN 1985. The physical nature and structure of oceanic fronts. Springer-Verlag, Berlin, New York, London, Paris, Tokyo. 333 p.
- Ferrada, S. Hernández, K. Montoya, R. & Galleguillos, R. 2002. Estudio poblacional del recurso anchoveta (*Engraulis ringens*, Jenyns 1842) (clupeiformes, engraulidae), mediante análisis de ADN. *Gayana (concepc.)*. 2002, vol. (66), n°2. pp: 243-248 .
- Figuroa, D. & C. Moffat. 2000. On the influence of topography in the induction of coastal upwelling along the Chilean coast. *Geophys. Res. Lett.* 27, 3905-3908.
- Fonseca, T. & M. Farías 1987. Estudio del proceso de surgencia en la costa chilena utilizando percepción remota. *Investigaciones Pesqueras*. 34: 33 - 46.
- Fournier, D., C.P. Archibald. 1982. A general theory for analyzing catch at age data. *Can.J.Fish. Aquat. Sci.* 39:1195-1207.
- Fournier *et al.*, 2012. AD Model Builder: using automatic differentiation for statistical inference of highly parameterized complex nonlinear models. *Optimization Methods and Software*. Volume 27, Issue 2, 2012
- Freón, P. & E. Yáñez. 1995. Influencia del medio ambiente en evaluación de stock: una aproximación con modelos globales de producción. *Invest. Mar., Valparaíso*, 23: 25-47.
- Fry, F.E.J., 1947. Effects of the environment on animal activity.-*Univ. Toronto Stud., Bioi. Ser.* 55: 1-62.
- Fuenzalida, R. 1990. Variabilidad temporal de un índice de surgencia para la zona de Iquique (Lat. 20°S). *Invest. Cient. y Tec., Serie Ciencias del Mar*, 1: 37-47.

Fuenzalida R., W. Schneider, J. Garcés-Vargas & L. Bravo. 2008. Satellite altimetry data reveal jet-like dynamics of the Humboldt Current. *J. Geophys. Res.*, 113, C07043, doi:10.1029/2007JC004684.

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.

Fyfe, J. 2003. Extratropical southern hemisphere cyclones: harbingers of climate change. *J. Climate*, 16: 2802-2805.

Gan, J. & J. Allen 2002. A modeling study of shelf circulation off northern California in the region of the Coastal Ocean Dynamics Experiment: Response to relaxation of upwelling winds. *Journal of Geophysical Research*. 107 (C9): 3123, doi:10.1029/2000JC000768.

Garreaud, R. & R. Muñoz. 2005. The low-level jet off the subtropical west coast of South America: Structure and variability, *Mon. Weather Rev.*, 133, 2246-2261, doi:10.1175/MWR2972.1.

Garreaud, R., M. Vuille, R. Compagnucci & J. Marengo. 2008. Present-day South American climate. *PALAEO3 Special Issue (LOTRED South America)*, 281: 180- 195, doi:10.1016/j.paleo.2007.10.032.

Gatica, C., M. Arteaga, J. Giacaman & P. Ruiz. 2007. Tendencias en la biomasa de sardina común (*Strangomera bentincki*) y anchoveta (*Engraulis ringens*) en la zona centro-sur de Chile, entre 1991 y 2005. *Invest. Mar. Valparaíso*, 35(1): 13-24.

Gill A.E. & Schumann, E.H. 1974. The generation of long shelf waves by the wind. *Journal of Physical Oceanography*, 4, 83-90.

Gill, A.E. & A.J. Clarke. 1974. Wind-induced upwelling, coastal currents and sea-level changes. *Deep Sea Research*. 21 (5): 325-345.

Gillet, N.P., T.D. Kell & P.D. Jones. 2006. Regional climate impacts of the southern Annular Mode, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L23704, doi:10.1029/2006 GL027721.

Glantz, M. 1996. *Corrientes de cambio: El impacto de El Niño sobre el clima y la sociedad*. Cambridge University Press, Cambridge, 141 pp.

Gómez, F. 2008. Variabilidad ambiental y pequeños pelágicos de la zona norte y centro-sur de Chile. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias con mención en Pesquerías. Universidad de Concepción, 113 páginas.

- Gómez, F., A. Montecinos, S. Hormazábal, L.A. Cubillos, M. Correa-Ramírez & F.P. Chávez. 2012. Impact of spring upwelling variability off southerncentral Chile on common sardine (*Strangomera bentincki*) recruitment. *Fish. Oceanogr.*, 21(6): 405- 414.
- Graham, W.M. & J.L. Largier 1997. Upwelling shadows as nearshore retention sites: the example of northern Monterey Bay. *Continental Shelf Research*. 17 (5): 509-532.
- 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.
- Green, B., M. Mapstone, G. Carlos & G. Begg. 2009. *Tropical Fish Otoliths: Information for assessment, Management and Ecology*. 1th Ed., Springer, Australia, Vol. 11, 313p.
- Grimm, V., E. Revilla, U. Berger, F. Jeltsch, W.M. Mooij, S.F. Railsback, H.H. Thulke, J. Weiner, T. Wiegand, D.L. DeAngelis. 2005. Pattern-oriented modeling of agent-based complex systems: lessons from ecology *Science*, 310, pp. 987–991.
- Grob C., Quiñones, R. & D. Figueroa. 2003. Cuantificación del transporte de agua costero-oceano a través de filamentos y remolinos ricos en clorofila, en la zona centro-sur de Chile (35,5-37,5°S). *Gayana*, 2003, Vol. 67, N° 1, p. 55-67. Disponible en Internet: <http://www.scielo.cl/pdf/gayana/v67n1/art08.pdf>
- Gutiérrez-Estrada, J.C., C. Silva, E. Yáñez, N. Rodríguez & I. Pulido-Calvo. 2007. Monthly catch forecasting of anchovy *Engraulis ringens* in the north area of Chile. Non-linear univariate approach. *Fish. Res.*, 86: 188-200.
- Haltuch, M.A., A.E. Punt, M.W. Dorn. 2009. Evaluating the estimation of fishery management reference points in a variable environment. *Fish. Res.* 100:42-56.
- Hastie, T.J. & R.J. Tibshirani. 1986. Generalized Additive Models. *Stat. Sci.*, 1: 297-318.
- Heath, M.R. 1992. Field investigations of the early life history stages of marine fish. *Advances in Marine Biology*. 28: 1-174.
- Hernández, E.H. & L.R. Castro. 2000. Larval growth of the anchoveta *Engraulis ringens* during the Winter spawning season off central Chile. *Fishery Bulletin*. 98:704-710.
- Hidalgo, P. & R. Escibano, 2001. Succession of pelagic-copepod species during the period 1996-1998 in northern Chile: the influence of the 1997-98 El Niño. *Hydrobiologia*. 453:153-160.
- Hilborn, R., & Walters, C. J. 1992. Quantitative fisheries stock assessment, Choice, dynamics and uncertainty. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2: 177-186.

- Hill, A.E., B.M. Hickey, F.A. Shillington, P.T. Strub, K.H. Brink, E.D. Barton & A.C. Thomas. 1998. Eastern Ocean Boundaries Coastal Segment (E). The Sea. Vol. 11: 30-67. John Wiley & Sons, Inc.
- Hill, K., Crone, P.R., Lo, N.C.H., Macewicz, B.J., Dorval, E., McDaniel, J.D., Y. Gu. 2011. Environmental and parental control of Pacific sardine (*Sardinops sagax*) recruitment. ICES Journal of Marine Science, 71(8), 2198-2207.
- Hjort, J. 1914. Fluctuations in the year classes of important food fishes. J. Cons., 1: 5-38.
- 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.
- Hormazábal, S., G. Shaffer, J. Letelier & O. Ulloa 2001. Local and remote forcing of the sea temperature in the coastal upwelling system off Chile. Journal of Geophysical Research. 106 (C8): 16657-16671.
- Hormazábal, S., G. Shaffer & O. Pizarro. 2002. Tropical Pacific control of intraseasonal oscillations off Chile by way of oceanic and atmospheric pathways. Geophys. Res. Lett., 29(6), 10.1029/2001GL013481.
- Hormazábal, S., G. Shaffer & O. Leth 2004. The coastal transition zone off Chile. Journal of Geophysical Research. 109 (C01021): doi:10.1029/2003JC001956.
- Hunter, J. R. 1977. Behavior and survival of northern anchovy *Engraulis mordax* larvae. Technical report, La Jolla, USA.
- Huyer, A., R. Smith & T. Paluszkiwes. 1987. Coastal upwelling off Perú during normal and El Niño times, 1981-1984. J. Geophys. Res., 92(13): 14.297-14.307.
- Iles, T.D. & Sinclair, M. 1982. Atlantic Herring: Stock discreteness and Abundance. Science, 215: 627-633.
- Jacobson, L.D., & MacCall, A.D. 1995. Stock recruitment models for Pacific sardine (*Sardinops sagax*). Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 52:2062-2062.
- Jobling, M. 1994. Fish Bioenergetics. Chapman & Hall, London. 309 pp.
- Jurado-Molina, J., Gatica, C., L. Cubillos. 2006. Incorporating cannibalism into an age-structured model for the Chilean hake, Fisheries Research 82 (2006) 30–40.
- Keister, J. E., E. Di Lorenzo, C. A. Morgan, V. Combes, and W. T. Peterson .2011. Zooplankton species composition is linked to ocean transport in the northern California Current, Global Change Biol., doi:10.1111/

Kelly, R. & J.L. Blanco 1984. Proceso de surgencia en Punta Nugurme, Chile (Lat. 36° S), marzo 1983. *Investigaciones Pesqueras*. 31: 89 -94.

Kelly, K.A. 1985. The influence of winds and topography on the surface temperature patterns over the northern California slope. *J. Geophys. Res.*, 90: 11,783–11,798

Koen-Alonso, M. & Yodzis, P. 2005. Multi-species modelling of some components of northern and central Patagonia, Argentina. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 62: 1490-1512.

Köster F.W., Hinrichsen H-H, Schnack, D., St. John, M.A., MacKenzie, B.R., 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.

Krautz, MC., Vásquez, S., Castro, L., González, M., Llanos-Rivera, A. & S. Pantoja. 2010. Changes in metabolic substrates during early development in anchoveta *Engraulis ringens* (Jenyns 1842) in the Humboldt Current. *Mar. Biol.* 157: 1137-1149.

Landaeta, M. & L. Castro. 2013. Vertical distribution and gas bladder inflation/deflation in postlarval anchoveta *Engraulis ringens* during upwelling events. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, doi:10.1017/S0025315411001767

Large, W. G., & S. Pond. 1981. Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds. *J. Phys. Ocean.*, 11, 324-481.

Letelier, J. 1998. Estudio de variabilidad diaria de los eventos de surgencia, entre Arica y Tocopilla observada en imágenes de satélite durante febrero y marzo de 1991 y 1992. Tesis para optar al grado de Oceanógrafo. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, Chile. 68 p.

Letelier, J., O. Pizarro & S. Núñez. 2009. Seasonal variability of coastal upwelling and the upwelling front off central Chile. *Journal of Geophysical Research*. doi:10.1029/2008JC005171.

Letelier, J., O. Pizarro & S. Nuñez 2009. Seasonal variability of coastal upwelling and the upwelling front off central Chile. *Journal of Geophysical Research*. doi:10.1029/2008JC005171.

Letelier, J. 2010. Surgencia y estructuras de mesoescala frente a Chile (18°-42°S). Tesis para optar al grado de doctor. Universidad de Concepción. Escuela de post-grado. 99 p.

Letelier J, L. Soto-Mardones, S. Salinas, L. Vincenti, R. Pavez & M. Arriagada. 2012. Influencia de la península de Mejillones en la variabilidad oceanográfica anual e interanual frente al norte de Chile. *Revista de Biología Marina y Oceanografía* 47(3): 513-526.

Letelier-Pino, J., M. Cáceres, M. Alvarado-Niño, D. Alarcón, C. Hernández-Urbano, U. Hauser, R. Alarcón, V. Carrera & J. Contreras. 2015. Condiciones oceanográficas que definen la zona de desove de la anchoveta y sardina común en la zona centro sur de Chile. En. Evaluación del stock desovante de anchoveta y sardina común entre la V y X Regiones, 2014. R. Serra (Eds.). Instituto de Fomento Pesquero pp. 1-20.

Leth, O. 2000. Ocean Circulation In The Eastern South Pacific: An Observational And Numerical Modelling Study, Tesis para optar al grado de Ph. D. en Oceanografía University of Copenhagen.

Leth, O. & G. Shaffer. 2001. A Numerical Study of the Seasonal Variability in the Circulation off Central Chile. *J. Geophysical Res.*, vol. 106, no. C10, 22,229 – 22,248, October

Leth, O. & J. F. Middleton. 2004. A mechanism for enhanced upwelling off central Chile: Eddy advection, *J. Geophys. Res.*, 109, C12020, doi:10.1029/2003JC002129.

Leth, O. & Middleton, J.F. 2006. A numerical study of the upwelling circulation off central Chile: Effects of remote oceanic forcing. *Journal of Geophysical Research* 111: doi: 10.1029/2005JC003070. issn: 0148-0227.

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.

Livingston, P.A. & 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.

Llanos-Rivera, A. 2005. Variabilidad de las características de los estadíos tempranos de *Engraulis ringens* entre zonas de desove a lo largo de Chile. Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias Biológicas, Área Zoología. Universidad de Concepción, 154 páginas.

Llanos-Rivera, A. & L.R. Castro. 2006. Inter-population differences in temperature effects on *Engraulis ringens* yolk-sac larvae. *Marine Ecology Progress Series* 312: 245-253.

Lloyd, M. 1967. Mean crowding. 1. *Anim. Ecol.* 36:1-30.

Lo, N.C.H., 1985. A model for temperature – dependent Northern anchovy egg development and an automated procedure for the assignment of age to staged eggs. In: Lasker, R. (Ed.), *A Egg Production Method for Estimating Spawning Biomass of Pelagic Fish: Application to the Northern Anchovy, Engraulis mordax*. NOAA Technical Report NMFS 36, pp. 43–50.

- 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.
- Madden, R.A. & P.R. Julian. 1972. Description of Global-Scale Circulation Cells in the Tropics with a 40–50 Day Period. *J. Atmos. Sci.*, 29, 1109–1123.
- Mann, K.H. & J.R.N Lazier. 1996. Dynamics of marine ecosystem: Biological-Physical interactions in the oceans. Blackwell Science Ltd, Massachusetts, USA. 394 p.
- Marchesiello, P., J.C. McWilliams, & A. Shchepetkin, 2003. Equilibrium structure and dynamics of the California Current System, *J. Phys. Oceanogr.*, 33, 753-783.
- Marchesiello, P. 2004. Electronic Source: <http://www.cosis.net/abstracts/EGU04/02648/EGU04-A-02648.pdf>.
- Marin, V, L. Delgado & R. Escribano 2003. Upwelling shadows at Mejillones Bay (northern Chilean coast): a remote sensing in situ analysis. *Investigaciones Marinas*. 31(2): 47-55.
- Mason, E., J. Molemaker, A.F. Shchepetkin, F. Colas, J.C. McWilliams & P. Sangrà. 2010. Procedures for offline grid nesting in regional ocean models. *Ocean Model.*, 35(1):1–15.
- Maturana, J., M. Bello & M. Manley. 2004. Antecedentes históricos y descripción del fenómeno El Niño Oscilación del Sur. En: S. Avaria, J. Carrasco, J. Rutlland & E. Yáñez (eds.) *El Niño-La Niña 1997-2000. Sus efectos en Chile*. CONA, Chile, Valparaíso. Pp: 13-27.
- Matsuura, Y. & Kitahara, E. 1995. Horizontal and vertical distribution of anchovy *Engraulis anchoita* eggs and larvae off Cape Santa Marta Grande in southern Brazil. *Archive of Fishery and Marine Research*, 42(3):239-250.
- Maunder, M. N. 1998. 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.
- Maunder, M.N. & R.B. Deriso. 2003. Estimation of recruitment in catch-at-age models. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science* 60:1258-1265.
- McPhaden, M. 2001. El Niño and La Niña: causes and global consequences. In: M. Cracken & J. Perry (eds.). *Encyc. of global environmental change*, 1, John Wiley & Sons, New York, p: 353-370.
- 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.
- Mesias, J., R. Matano & T. Strub. 2001. A numerical study of the upwelling circulation off central Chile. *Journal of Geophysical Research*. 106 (C9): 19611-19623.
- Mesias, J., Matano, R., Strub, P.T. 2003. Dynamical analysis of the upwelling circulation off central Chile. *J. Geophys. Res.* 108 (3085).
- 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.
- Moler, 1984. MATLAB Version 1.0. Meeting of the IEEE Conference on Decision and Control, the CDC, Las Vegas, United States.
- Montecino, V., P.T. Strub, F. Chávez, A. Thomas, J. Tarazona, T. Baumgartner. 2013. Bio-Physical interactions off Western South America. Chapter 10. *The Sea*.
- Montecinos, A. & Balbontin, F. 1993. Índices de surgencia y circulación superficial del mar: implicancias biológicas en un área de desove de peces entre Los Vilos y Valparaíso, Chile. *Rev Biol Mar* 28:133–150.
- Montecinos, A. & F. Gómez. 2010. Interdecadal variability of the upwelling season off southerncentral Chile (37°S): impact on common sardine (*Strangomera bentincki*). http://www.dgf.uchile.cl/ACT19/COMUNICACIONES/Revistas/MG_PO07.p
- Mooers, C., C. Flagg & W. Boicourt. 1977. Prograde and retrograde fronts. Chapt. II. En: *Oceanic fronts in coastal process. Proceedings of a workshop held at the marine sciences research center. May 25-27, Marine Sciences Research Center, State University of New York, USA.* pp. 43-58.
- Moraga, J., 1996. Capa límite marina en la zona costera frente a Chile en los 29.5°S. *Estudios Oceanológicos*. 15:17-28.

- Morales, C.E., H. González, S. Hormazábal, G. Yuras, J. Letelier & L.R. Castro 2007. The distribution of chlorophyll-a and dominant planktonic components in the coastal transition zone off Concepción, central Chile, during different oceanographic conditions *Progress in Oceanography*. 75 (3): 452-469.
- Morales, C.E., S. Hormazábal, M. Correa-Ramírez, O. Pizarro, N. Silva, C. Fernández, V. Anabalón & M.L. Torreblanca. 2012. Mesoscale variability and nutrient-phytoplankton distributions off central-southern Chile during the upwelling season: the influence of mesoscale eddies. *Prog. Oceanogr.*, 104: 17-29.
- Morales-Nin, B. 1992. Determinación del crecimiento de peces óseos en base a la microestructura de los otolitos. FAO Documento Técnico de Pesca, Número 322, Roma, FAO, 58 p.
- Mueter, F., Nicholas, B., Ianelli, J., A. Hollowed. 2011. Expected declines in recruitment of walleye Pollock (*Theragra chalcogramma*) in the eastern Bering Sea under future climate change. *ICES Journal of Marine Science*, 68(6), 1284–1296.
- Nakata, H., S. Kimura, Y. Okazaki & A. Kasai. 2000. Implications of meso-scale eddies caused by frontal disturbances of the Kuroshio Current for anchovy recruitment. *ICES J. Mar. Sci.*, 57: 143-152.
- Navarro, E., W. Schneider & J. Letelier. 2004. Estimation of onshore-offshore transport off central Chile by means of maximum cross-correlation using satellite derived SST. *Gayana (Concepc.)*, vol.68, no.2, suppl. TIIProc, p.427-431. ISSN 0717-6538
- 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.
- 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.
- Nieto, K. 2009. Variabilidad oceánica de mesoescala en los ecosistemas de afloramiento de Chile y Canarias: una comparación a partir de datos satelitales. Tesis para optar al grado de Doctorado en Manejo y Conservación de Recursos Naturales. Aplicación a la Gestión Ambiental. Universidad de Salamanca, Salamanca, España. 173 p.
- Núñez, S., S. Hormazábal, F. Gómez, J. Letelier & A. Sepúlveda. 2006. Some evidences of physical-biological coupling between jack mackerel larvae and mesoscale structures off central Chile. *International Conference. The Humboldt Current System. Climate. Ocean dynamics, ecosystem processes and fisheries.* Nov 27th – Dec. 1st, 2006. Lima Perú
- Ospina-Álvarez, 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

Ospina-Alvarez, A., Bernal, M., Catalán, I.A., Roos, D., Bigot J.L., *et al.* . 2013. Modeling Fish Egg Production and Spatial Distribution from Acoustic Data: A Step Forward into the Analysis of Recruitment. *PLoS ONE* 8(9): e73687. doi:10.1371/journal.pone.0073687.

Ospina-Alvarez, Catalán, I., Bernal, M., Roos, D. & I. Palomera. 2015. From egg production to recruits: Connectivity and inter-annual variability in the recruitment patterns of European anchovy in the northwestern Mediterranean. *Progress in Oceanography* 138 (2015) 431–447.

Pannella, G. 1974. Otolith growth patterns: An aid in age determination in temperate and tropical fishes. *In* T.B. Bagenal (editor), *The ageing of fish*. Unwin Brothers LTD., Surrey, England, 12p.

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., 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.

Parada, C, B. Yannicelli, S. Hormazábal, S. Vásquez, J. Porobić, B. Ernst, C. Gatica, M. Arteaga, A. Montecinos, S. Núñez & A. Gretchina. 2013. Variabilidad ambiental y recursos pesqueros en el Pacífico suroriental: estado de la investigación y desafíos para el manejo pesquero. *Latin American Journal of Aquatic Research*. 41 (1): 1-28.

Parrish, R., Mallicoate, D. & R. Klingbeil. 1986. Age dependent fecundity, number of spawnings per year, sex ratio, and maturation stages in northern anchovy, *Engraulis mordax*. *Fishery Bull. Wash.* 84(3):

Peliz, A., T. Rosa, M. Santos & J. Pissarra. 2002. Fronts, jets, and counter-flows in the western Iberian upwelling system. *Journal of Marine System*. 35: 61-77.

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., P. Marchesiello, L. Debreu & J. Lefevre. 2007. Software tools for pre- and post processing of oceanic regional simulations. *Environ. Model. Softw.*, 23: 2007-2009.

Peterson, W.T., D.F. Arcos, G.B. McManus, H. Dam, D. Bellantoni, T. Johnson and P. Tiselius. 1988. The Nearshore zone during Coastal Upwelling: Daily Variability and

Coupling between primary and Secondary production off Central Chile. *Progress in Oceanography*. 20:1-40.

Petitgas, P. 2001. Geostatistics in Fisheries Survey Design and Stock Assessment: Models, Variances and Applications. *Fish and Fisheries*, 2,231-249.

Pineda, J., J. A. Hare, & S. Sponaugle. 2007. Larval transport and dispersal in the coastal ocean and consequences for population connectivity. *Oceanography* 20:22–39.

Pizarro, O. 1991. Propagación de fluctuaciones de baja frecuencia del nivel del mar a lo largo de la costa de Chile, Tesis de Oceanógrafo, Escuela de Ciencias del Mar, Univ. Católica de Valparaíso, 110 pp.

Pizarro, O., S. Hormazábal, A. González & E. Yáñez. 1994. Variabilidad del viento, nivel del mar y temperatura en la costa norte de Chile. *Invest. Mar.* 22: 83-101.

Pizarro, O., 1999. Low frequency fluctuations in the Eastern Boundary Current Circulation off South America: Remote and local forcing. Ph.D. Thesis, Department of Oceanography, University of Gothenburg, Sweden.

Pizarro, O., Shaffer, G., Dewitte, B. & Ramos, M. 2002. Dynamics of seasonal and interannual variability of the Peru-Chile undercurrent, *Geophys. Res. Lett.*, 29, 22-1–22-4.

Pizarro, O. & A. Montecinos. 2004. Interdecadal variability of the thermocline along the west coast of South America. *Geophysical Research Letters*. 31, L20307, doi: 10.1029/2004GL020998.

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.

Plagányi, É.E. Models for an ecosystem approach to fisheries. 2007. *FAO Fisheries Technical Paper*. No. 477. Rome, FAO. 108p.

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.

Preisendorfer, R. W. 1988. *Principal Component Analysis in Meteorology and Oceanography*, 425 pp., Elsevier Sci., New York.

Quinn, T., R. Deriso. 1999. *Quantitative Fish Dynamics*, Oxford University Press, 542 p.

Quintana, J. 2004. Estudio de los factores que explican la variabilidad de la precipitación en Chile en escalas de tiempo interdecadal. Tesis de Magíster en Geofísica, Universidad de Chile, Santiago, 63 pp.

Quiñones, R., R. Serra, S. Nuñez, H. Arancibia, J. Córdova & F. Bustos. 1997. Relación espacial entre el jurel y sus presas en la zona centro-sur de Chile. In: E. Tarifeño (ed.). Gestión de sistemas oceanográficos del Pacífico oriental. UNESCO COI/INF-1046, pp. 187-202.

R Development Core Team. 2008. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.

R Core Team. 2012. R: A Language and environment for statistical computing. Reference index v.2.15.1. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 84

Ramos, M., O. Pizarro, L. Bravo & B. Dewitte. 2006. Seasonal variability of the permanent thermocline off northern Chile. *Geophysical Research Letters*, 33, L09608, doi:10.1029/2006GL025882, 2006.

Regner, S. 1985. Ecology of planktonic stages of the anchovy, *Engraulis encrasicolus* (Linnaeus, 1758), in the central Adriatic. *Acta adriatic.* 26: 1–113

Reynolds, R. W., 1988: A real-time global sea surface temperature analysis. *J. Climate*, 1, 75–86.

Ricker, W. E. 1954. Stock and recruitment. *J. Fish. Res. Board Can.* 11: 559-623.

Rutllant, J. & V. Montecino, 2002. Multiscale upwelling forcing cycles and biological response off north-central Chile. *Revista Chilena de Historia Natural.* 75:217-231.

Saavedra, N. 1980, La Presión y la Dirección del Viento en Concepción, *Tralka*, Vol. (1), N° 2, 153–162.

Rutllant J., B. Rosenbluth & S. Hormazábal. 2004a. Intraseasonal Variability in the Local Wind Forcing of Coastal Upwelling off Central Chile (30°S). *Continental Shelf Research*, 24, 789-804, doi:10.1016/j.csr.2004.02.004.

Rutllant, J., I. Masotti, J. Calderon & S. Vega. 2004b. A comparison of spring coastal upwelling off central Chile at the extremes of the 1996 – 1997 ENSO cycle, *Cont. Shelf Res.*, 24, 773 – 787, doi:10.1016/j.csr.2004.02.005.

Saavedra, N. 1980. La presión y la dirección del viento en Concepción. *Tralka* 1(2): 153-162.

Sangrà, P 2010. Course: "Eddies in the Ocean: Biological Progress and Implications". Department of Geophysic, University of Concepción Concepción. June 7-11.

- Sangrà, P., J.L. Pelegrí, A. Hernández-Guerra, I. Arregi, J.M. Martín, A. Marrero-Díaz, A. Martínez, A.W. Ratsimandresy & A. Rodríguez. 2005. Life history of an anticyclonic eddy. *Journal of Geophysical Research*. 110 (C303021): doi:10.1029/2004JC002526
- Santojanni, A., Arneri, E., Barry, C., Belardinelli, A., Cingolani, N., Giannetti, G., & Kirkwood, G. 2003. Trends of anchovy (*Engraulis encrasicolus*, L.) biomass in the northern and central Adriatic, *Sci. Mar.*, 67(3), 327–340, 2003.
- 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.
- Scheffer, M., Bavoco, M.J., DeAngelis L.D., Rose, A.K., van Nes H. 1995. Super-individuals: a simple solution for modelling large populations on an individual basis. *Ecol Model* 80:161–170.
- Sepúlveda, A., L. Cubillos, S. Nuñez, T. Canales, D. Bucarey, A. Rojas, J. Oliva, P. Barria, E. Diaz, V. Baros & H. Miranda. 2000. Antecedentes biológicos del stock desovante de anchoveta y sardina común de la V a IX Regiones. Informe Final. Proyecto FIP-IT/97-04: 1-199.
- Serra, J.R. 1978. La pesquería de sardina común (*Clupea (Strangomera) bentincki*) y anchoveta (*Engraulis ringens*) de Talcahuano: análisis de su desarrollo y situación actual. *Invest. Pesq. (Chile)*, 29: 1-21.
- Serra, R., M. Aguayo, O. Rojas, J. Cañón y F. Inostroza. 1979. Anchoveta *Engraulis ringens* (Jenyns) Teleostomi Clupeiformes Engraulidae. In: «Estado actual de las principales pesquerías nacionales. Bases para un desarrollo pesquero: I Peces». CORFO-IFOP (AP-79/18), 52 pp.
- Serra, J.R. 1983. Changes in the abundance of pelagic resources along the Chilean coast. In: G. Sharp & J. Csirke (eds.). *Proceedings of the expert consultation to examine changes in abundance and species composition of neritic fish resources*. *FAO Fish. Rep.*, 291: 255-284.
- Shaffer G., O. Pizarro, L. Djurfeldt, S. Salinas, J. Rutllant. 1997. Circulation and low-frequency variability near the Chile coast: Remotely-forced fluctuations during the 1991-1992 El Niño. *J. Phys. Oceanogr.*, 27, 217-235.
- Shaffer, G., S. Hormazábal, O. Pizarro & S. Salinas. 1999. Seasonal and interannual variability of currents and temperature over the slope of central Chile. *Journal Geophysical Research*, 104, C12, 29,951-29,961.
- Shchepetkin, A.F. & J.C. McWilliams. 2003. A method for computing horizontal pressure-gradient force in an oceanic model with a nonaligned vertical coordinate, *J. Geophys. Res.*, 108 (C3), 3090, doi:10.1029/2001JC001047.

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.

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.

Smith, K.S. & G.K. Vallis. 2001. The scales and equilibration of midocean eddies: Freely evolving flow. *Journal of Physical Oceanography*. 31: 554-571.

Smith, R.L. 1995. The physical processes of coastal ocean upwelling system. En. *Upwelling in the ocean: Modern processes and ancient records* C. P. Summerhayes, K. Emeis, M.V. Angel, R. L. Smith, & B. Zeitzschel (Eds.). John Wiley & Sons Ltd., London pp. 39-64.

Sobarzo, M. 1994. Oceanografía física entre Punta Nugurne (35°57'S - 72°47'W) y Punta Manuel (38°30'S - 73°31'W), Chile: Una revisión histórica (1936 -1990). *Gayana Oceanologica*. 2 (1): 5 -17.

Sobarzo, M. & D. Figueroa. 2001. The physical structure of a cold filament in a Chilean upwelling zone (Península de Mejillones, Chile, 23°S). *Deep Sea Research I*. 48 (2001): 2699-2726. doi:10.1016/S0967-0637(01)00031-0.

Soto-Mardones, L., A. Pares-Sierra & R. Durazo. 2004. Ekman modulation of the sea-surface temperature on the eastern south Pacific. *Deep Sea Research II*. 51: 551-561.

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. *Prog. Oceanogr.*, 92(1): 178-191.

Staaterman E. R., Paris C. B., Helgers J. 2012. Orientation behavior in fish larvae: a missing piece to Hjort's critical period hypothesis. *Journal of Theoretical Biology*;304:188-196.

Stevens, I. & J. Johnson 2003. A numerical modelling study of upwelling filaments off the NW African coast. *Oceanologica Acta*. 26: 549 -564.

Strub, P., J. Mesías, V. Montecino, J. Rutlland & S. Salinas 1998. Coastal ocean circulation off western south America. Chapter 10. En. *The sea: The global coastal ocean*,

regional studies and synthesis. vol.11 A. R. Robinson, & K. H. Brink (Eds.). John Wiley and Sons, Inc., New York pp. 273-313

Strub, P., P. Kosro & A. Huyer. 1991. The nature of the cold filaments in the California current system. *Journal of Geophysical Research*. 96 (C8): 14743-14768.

Sverdrup, H.U. 1947. wind-driven currents in a baroclinic ocean, with applications to the equatorial currents of the eastern Pacific. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*. 33, 318-326.

Tarazona, J., W.E. Arntz & E. Canahuire. 1996. Impact of two El Niño events of different intensity on the hypoxic soft bottom macrobenthos off the central Peruvian Coast. *P. S. Z. N. I, Marine ecology-progress series*, 17/1-3, 425-446.

Taylor, K. E. 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research*. 106. 7183-7192.

Thomas, A.C., Huang, F., Strub, P. & C. James. 1994. Comparison of the seasonal and interannual variability of phytoplankton pigment concentrations in the Peru and California Current systems. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 99, 7355-7370

Thomas, A.C., 1999. Seasonal distributions of satellite-measured phytoplankton pigment concentration along the Chilean coast. *J. Geophys. Res.* 104, 25877 – 25890.

Thomas, A., J.L. Blanco, M. Carr, P. Strub & J. Osses. 2001a. Satellite-measured chlorophyll and temperature variability off northern Chile during the 1996-1998 La Niña y El Niño. *J. Geophys. Res.* 106 (Nº C1): 899-915.

Thomas, A. C., M. E. Carr & P. T. Strub. 2001b. Chlorophyll variability in eastern boundary currents, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 3421–3424.

Thomas, A.C., P. Strub, M.E. Carr & R. Weatherbee 2004. Comparisons of chlorophyll variability between the four major global eastern boundary currents. *International Journal of Remote Sensing*. 25 (7–8): 1443–1447. doi:10.1080/01431160310001592418.

Tjelmeland, S. & Lindstrøm, U. 2005. An ecosystem element added to the assessment of Norwegian spring-spawning herring: implementing predation by minke whales. *ICES Journal of Marine Science*, 62: 285–294

Ulloa, O., R. Escribano, S. Hormazábal, R. A. Quinones, R. R. Gonzalez & M. Ramos. 2001. Evolution and biological effects of the 1997– 98 El Niño in the upwelling ecosystem off northern Chile, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 1591–1594.

Valle-Levinson, A., L. Atkinson, D. Figueroa & L. Castro 2003. Flow induced by upwelling winds in an equatorward facing bay: Gulf of Arauco, Chile. *Journal of Geophysical Research*. 108 (C2): 3054, doi:10.1029/2001JC001272.

Vargas, C., G. Valenzuela, S. Núñez & D. Arcos. 1996. Mortalidad natural de larvas de merluza común (*Merluccius gayi gayi*) frente a Chile centro-sur en relación a su distribución espacial y grado de agregación. *Invest. Mar.*, Valparaíso, 24: 19-30.

Vásquez, S. 2012. Modelación de la historia de vida temprana del jurel (*Trachurus murphyi*) en el Pacífico suroriental: influencia de factores biofísicos en la conectividad de zonas de desove-crianza. Tesis de Magister en Pesquerías. Universidad de Concepción, Concepción, 144 pp.

Vásquez, S., M. Correa-Ramírez, C. Parada & A. Sepúlveda. 2013. The influence of oceanographic processes on jack mackerel (*Trachurus murphyi*) larval distribution and population structure in the southeastern Pacific Ocean. *ICES Journal of Marine Science*. 70(6): 1097-1107. doi: 10.1093/icesjms/fst065.

Vásquez, S., Sepúlveda, A., Salas, C., Núñez, S., Gretchina, A., Ospina-Álvarez, A. 2016. Biophysical modelling to assess population connectivity and inter-annual variability in the recruitment patterns of jack mackerel in the southeastern Pacific. 4th Meeting of the Scientific Committee. 28 September - 3 October 2015, La Haya, Netherlands.

Vega, A., Y. DuPenhoat, B. Dewitte & O. Pizarro. 2003. Equatorial forcing of interannual Rossby waves in the eastern South Pacific. *Geophysical Research Letters*, 30, 1197, 10.1029/2002GL015886.

Vikebø, F., Sundby, S., A° dlandsvik, B., and Ottera°, O. 2007. Impacts of a reduced THC on transport and growth of larvae and pelagic juveniles of Arcto-Norwegian cod. *Fisheries Oceanography*, 16: 216–228.

Wood, S.N. & N.H. Augustin. 2002. GAMs with integrated model selection using penalized regression splines and applications to environmental modelling. *Ecological Modelling*, 157 (2-3), pp. 157-177.

Wood, S. 2008. *Generalized Additive Models: An Introduction with R*. February 27, 2006 by Chapman and Hall/CRC Textbook - 410 Pages - 103 B/W Illustrations

Wyrtki, K. 1975. El Niño - the dynamic response of the equatorial Pacific ocean to atmospheric forcing. *Journal of Physical Oceanography*. 5: 572-584.

Xu, K.-M., M. Zhang, Z.A. Eitzen, S.J. Ghan, S.A. Klein, X. Wu, S. Xie, M. Mranson, A.D. Del Genio, S.F. Iacobellis, M. Khairoutdinov, W. Lin, Ü. Löhmann, D.A. Randall, R.C.J. Somerville, Y.C. Sud, G.K. Walker, A. Wolf, J.J. Yio, and J. Zhang, 2005: Modeling springtime shallow frontal clouds with cloud-resolving and single-column models. *J. Geophys. Res.*, 110, D15S04, doi:10.1029/2004JD005153.

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.

Yáñez, E., M.A. Barbieri, C. Silva, K. Nieto & F. Espíndola. 2001. Climate variability and pelagic fisheries in northern Chile. Prog. Oceanogr., 49: 581- 596.

Yáñez, E., S. Hormazábal, C. Silva, A. Montecinos, M.A. Barbieri, A. Valdenegro, A. Órdenes & F. Gómez. 2008. Coupling between the environment and the pelagic resources exploited off northern Chile: ecosystem indicators and a conceptual model. Lat. Am. J. Aquat. Res., 36(2): 159-181.

Yáñez, E., Barbieri M.A., Plaza F. & C. Silva. 2014. Climate Change and Fisheries in Chile. In: Mohamed Behnassi, Margaret Syomiti Muteng'e, Gopichandran Ramachandran & Kirit N. Shelat (Editors). Vulnerability of Agriculture, Water and Fisheries to Climate Change: Toward Sustainable Adaptation Strategies, Springer, Chapter 16, 259-270.

Yuras, G, O Ulloa, R Letelier & O Pizarro 2004. On the annual cycle of satellite chlorophyll off Chile (18°-40°S). Gayana. 68 (2): 611-614.

Yuras, G., O. Ulloa & S. Hormazábal. 2005. On the annual cycle of coastal and open ocean satellite chlorophyll of Chile (18°-40°S). Geophys. Res. Lett. 32, L23604. doi:10.1029/2005GL023946.

Zhang, C., 2005, Madden-Julian Oscillation, Rev. Geophys., 43, RG2003.

Zwolinski, J., D. Demer. 2014. Environmental and parental control of Pacific sardine (*Sardinops sagax*) recruitment. ICES Journal of Marine Science, 71(8): 2198-2207.

ANEXO I. Variabilidad espacio temporal de las principales variables oceanográficas en la zona de estudio

A.1. Climatología mensual de la velocidad del viento satelital

La climatología de la velocidad del viento consideró dos períodos que fueron analizados independientemente, esto es: a) información de viento satelital QuikScat para el periodo 1999-2009, y b) información de viento satelital Ascet para el período 2007-2015. La climatología del viento satelital QuikScat (1999-2009) reveló magnitudes máximas hacia el norte ($>2 \text{ m s}^{-1}$) en la región costera durante el período de primavera-verano, en tanto que las magnitudes mínimas se verificaron en el periodo de otoño e invierno, entre los meses de mayo y agosto (Figura A1). Una situación muy similar se reportó al analizar la climatología del viento satelital Ascet (2007-2015; Figura A2).

En términos dinámicos, la climatología mensual de los vientos destaca una zona de divergencia muy conspicua, es decir, una región costera en la que el viento se bifurca en dos ramas, una hacia el norte y la otra rama hacia el sur; resultando para la rama en dirección norte un transporte hacia la región nor-oceánica vinculada con la dinámica de Ekman, en cambio, la rama hacia el sur genera el proceso inverso, con un transporte hacia la costa. En ambas series (climatologías QuikScat y Ascet), destaca un corredor de mínimas magnitudes de vientos demarcado por contornos negros en las Figuras A1 y A2, corredor que alcanza magnitudes máximas en primavera-verano y magnitudes mínimas en invierno. La climatología de los vientos muestra para ambas series de datos los contornos del esfuerzo del viento igual a cero en la componente zonal (contorno verde) y en la componente meridional (contorno celeste). El contorno meridional cero está centrado en el

borde costero en el corredor de mínimas magnitudes, y ambos muestran un mayor desplazamiento hacia el norte desde Mayo a Septiembre. En este periodo, las amplitudes de la magnitud de la velocidad del viento alcanzan sus valores mínimos en la región costera como lo evidencia la Figura A3.

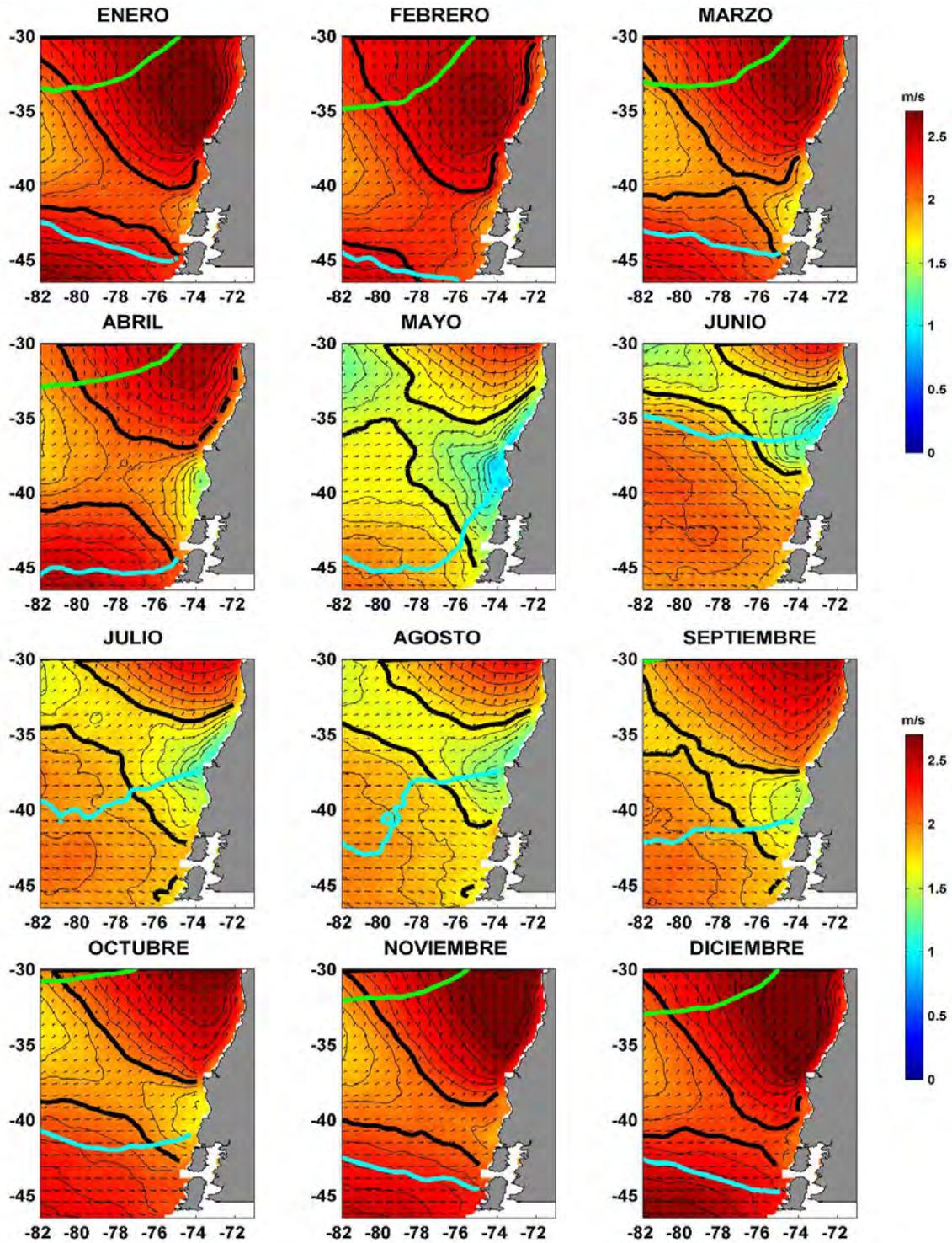


Figura A1. Climatología del viento satelital QuikSCAT (Serie Julio-1999/Noviembre-2009). Se muestra los contornos del esfuerzo cero zonal (línea verde) y meridional (línea celeste). Las líneas negras determinan un corredor de mínimas magnitud del viento.

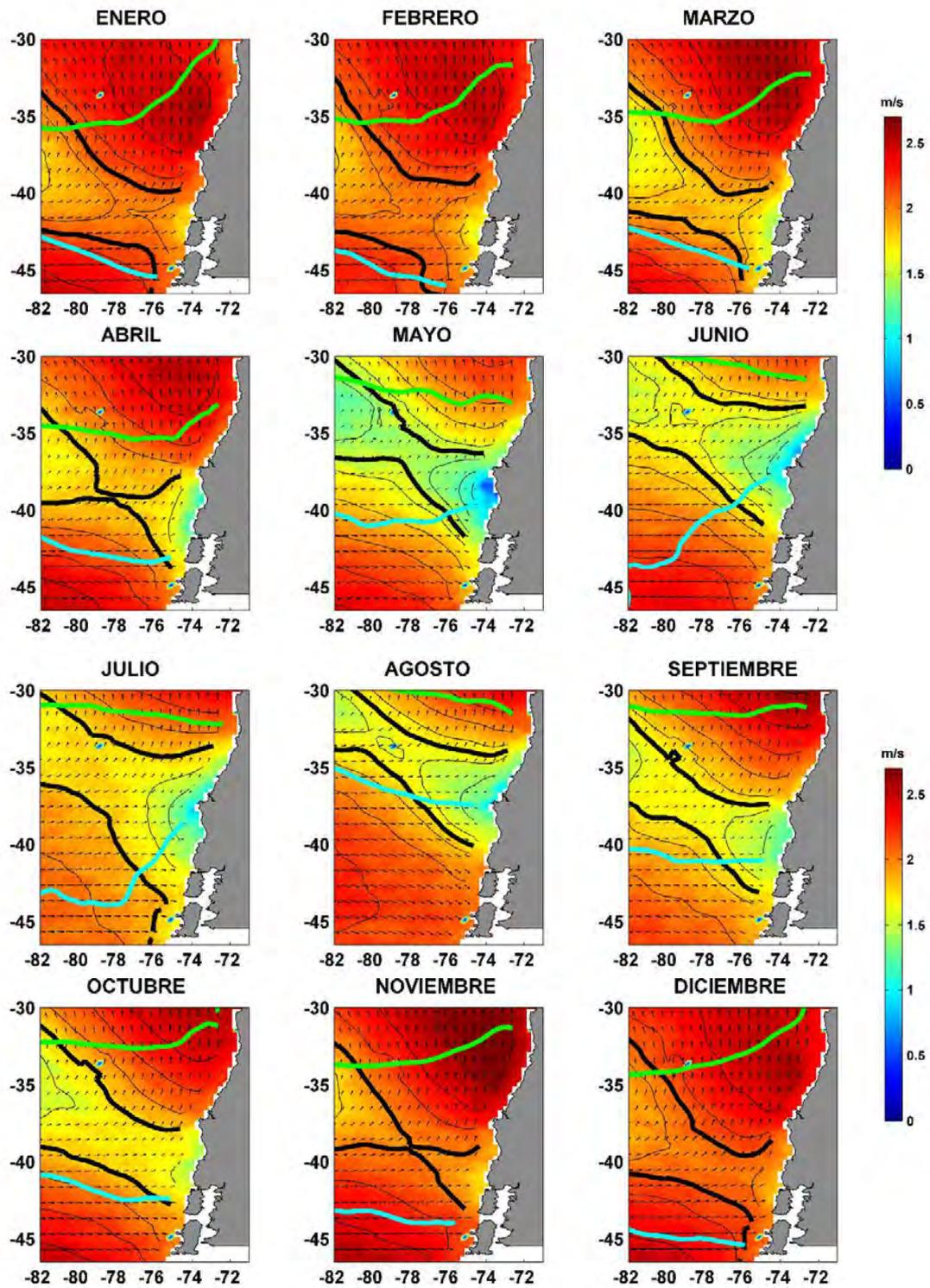


Figura A2. Climatología del viento satelital ASCAT (Serie Mayo-2007/Enero-2015). Se muestra los contornos del esfuerzo cero zonal (línea verde) y meridional (línea celeste). Las líneas negras determinan un corredor de mínimas magnitud del viento.

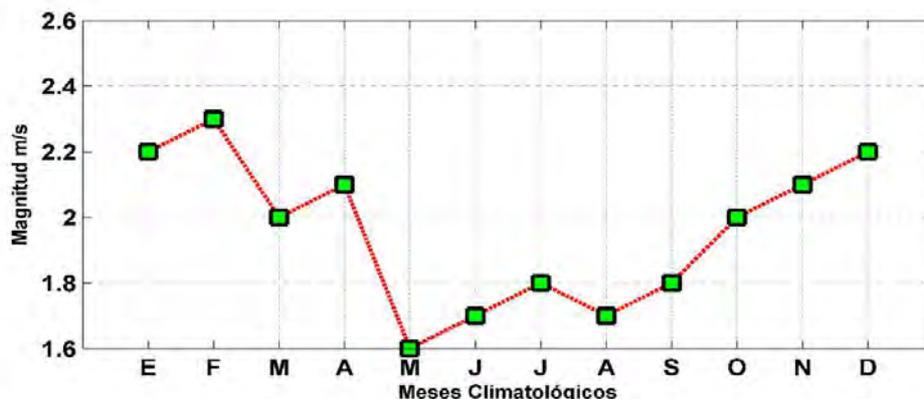


Figura A3. Variabilidad de los contornos de las magnitudes mínimas de velocidad del viento satelital QuikSCAT desde Enero a Diciembre (Serie Julio-1999/Noviembre-2009).

Las Figuras A4 y A5 muestran el resultado de la aplicación de Funciones Empíricas Ortogonales Complejas (FEOC) a las series de velocidad del viento satelital QuikScat y Ascet, respectivamente. En ambas figuras los dos primeros modos de variabilidad explican un 96% de la variabilidad de los vientos provenientes del Oeste. La estructura espacial del primer modo (Figura A6a) que explica el 87% del porcentaje de varianza total, rescata en general los patrones mostrados en la climatología (ver Figura A1), marcando claramente la zona de divergencia en los vectores de viento, y un corredor transversal (en sentido NW-SE) de mínimas amplitudes. Los vectores de viento evidencian una clara asimetría verificando que los mínimos costeros están orientados hacia el NW en forma diagonal, en tanto que los máximos aparecen en forma asimétrica con una lengua cercana a la costa en la región situada al norte de los 36°S, en tanto que en la región sur, se observan máximos valores expandidos hacia la región oceánica. La estructura espacial del segundo modo (Figura A5b) tiende a mostrar el mismo comportamiento, revelando en forma más marcada la zona del corredor de mínimas magnitudes del viento observadas en la climatología. La estructura temporal (Figuras A5c y d) revela la evolución en el tiempo de la estructura espacial en ambos modos. Para el primer modo, la estructura temporal que modula la estructura espacial, muestra un comportamiento estacional con la presencia de máximas amplitudes en primavera-verano; en tanto que para el segundo modo de variabilidad, la estructura temporal es más errática y no evidencia un comportamiento claro. Los resultados de la estructura espacial y temporal para los dos primeros modos de variabilidad

correspondientes al análisis de Funciones Empíricas Ortogonales Complejas, revelan un comportamiento similar para ambas series de datos (QuikScat y Ascet).

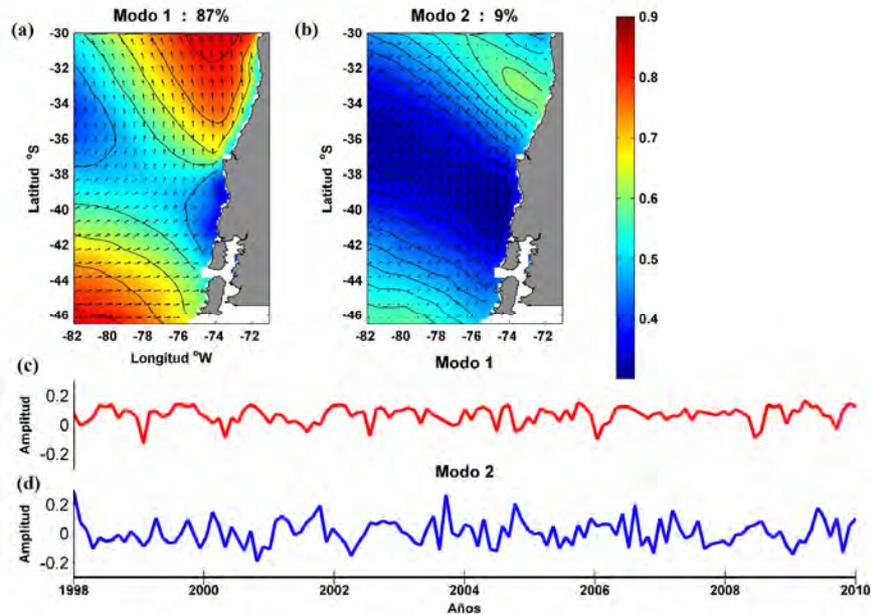


Figura A4. Funciones Empíricas Ortogonales Complejas del viento satelital QuikSCAT (Serie Julio-1999/Noviembre-2009). Las estructuras espaciales de (a) Primer modo y (b) Segundo modo. Las estructuras temporales de (c) Primer modo y (d) Segundo modo.

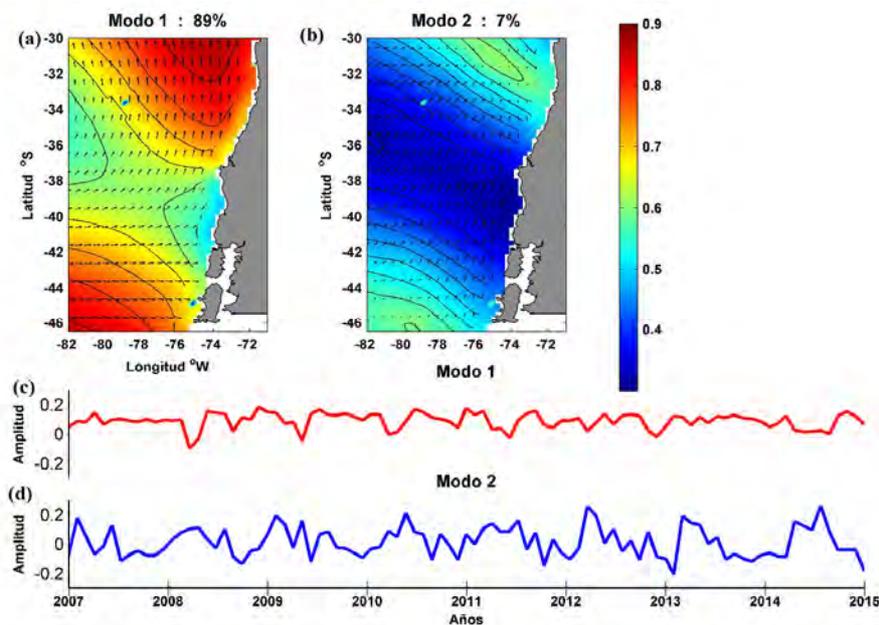


Figura A5. Funciones Empíricas Ortogonales Complejas del viento satelital ASCAT (Serie Mayo-2007/Enero-2015). Las estructuras espaciales de: (a) Primer, (b) Segundo . Las estructuras temporales de (c) Primer, (d) Segundo Modo.

A.2. Climatología de Imágenes Satelitales de la Deriva de Ekman

Las Figuras A6 y A7 muestran la deriva de la corriente, calculadas a partir del esfuerzo del viento en la capa superficial, analizada a la forma de la climatología mensual de la deriva de Ekman proveniente de la imágenes de QuikSCAT y ASCAT, respectivamente. En este estudio las corrientes costeras en el área de estudio se evaluaron a través de dos mecanismos físicos, a saber: por efecto del esfuerzo del viento (deriva de Ekman) y por efecto de la rotación terrestre (velocidad geostrofica). La climatología de la deriva de Ekman (Figuras A6 y A7) muestran una corriente hacia el NW, así como una región intermedia donde la deriva de Ekman es muy débil ($<0.015 \text{ m s}^{-1}$, delimitada en contornos negros). Esta zona de bajas magnitudes en la deriva de Ekman, que representa una región más retensiva hacia la costa, revela asimismo un desplazamiento estacional, mayor hacia el sur en primavera-verano y máximo hacia el norte en otoño-invierno. La estructura espacial del primer modo (Figura A8a) que explica el 87% del porcentaje de varianza total y rescata de buena forma los patrones mostrados en la climatología, evidenciando claramente una región de bajos valores de deriva de Ekman asociadas a la región costera entre los 38° y 42°S .

La estructura temporal (Figuras A7 c y d) revela la evolución en el tiempo de la estructura espacial en los modos 1 y 2, evidenciando una tendencia estacional para el primer modo, en tanto que para el segundo modo de variabilidad la estructura temporal es más errática y no evidencia un comportamiento claro. Los resultados asociados a las Figuras A6, A7 y A8, si bien fueron muy informativos en términos espaciales horizontales, fueron limitados dado que no muestra cómo se comporta la corriente de Ekman en profundidad. Para poder discernir lo anterior se realizó un corte longitudinal a los 75°S , determinándose una climatología para los componentes zonal y meridional de la deriva de Ekman en la dimensión vertical, las que se presentan en la Figuras A8 a y b.

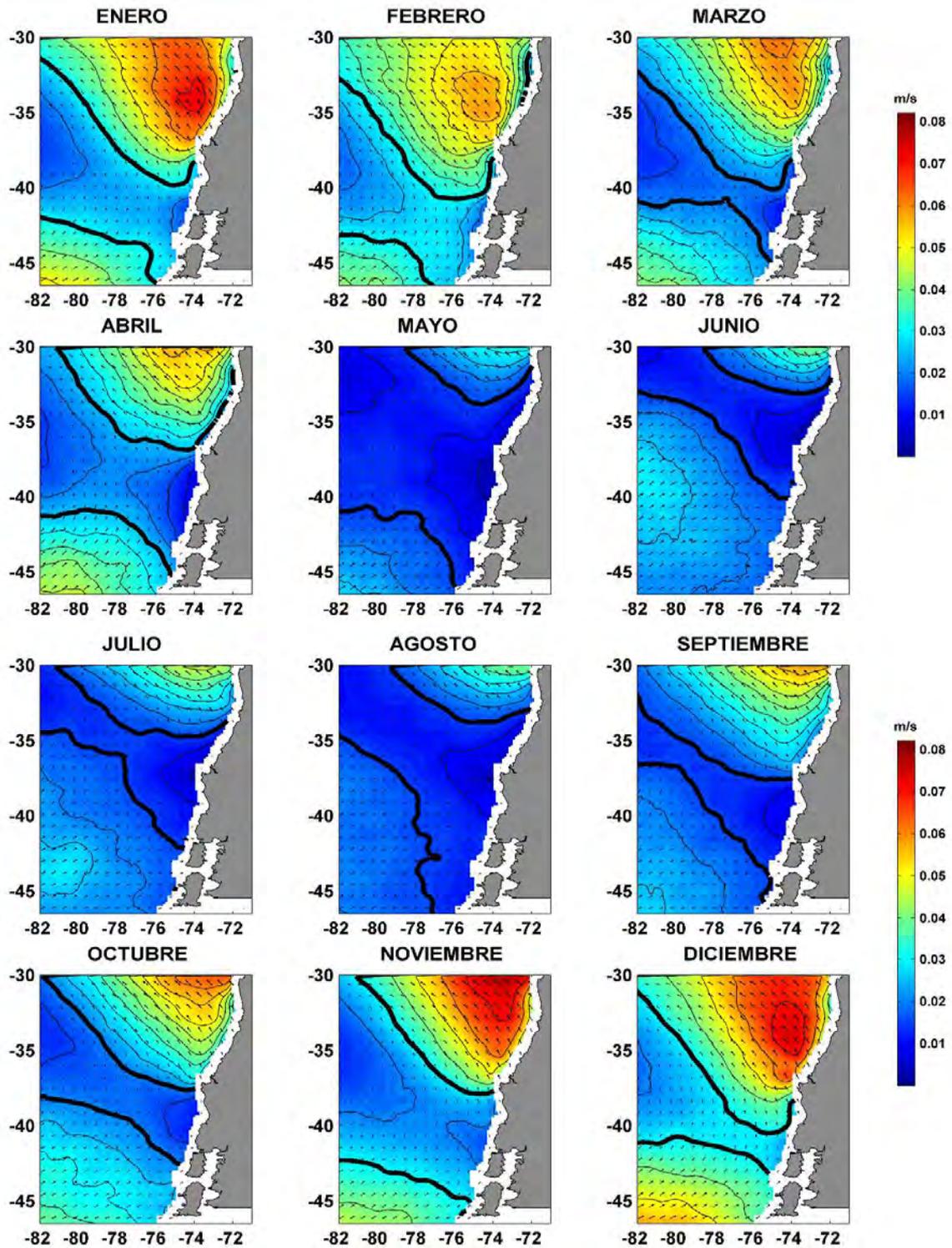


Figura A6. Climatología satelital QuikSCAT de la deriva de Ekman en el estrato superficial ($z=0$ m) (Serie Julio-1999/Noviembre-2009). Las líneas negras determinan un corredor de mínimas magnitud de la deriva de Ekman.

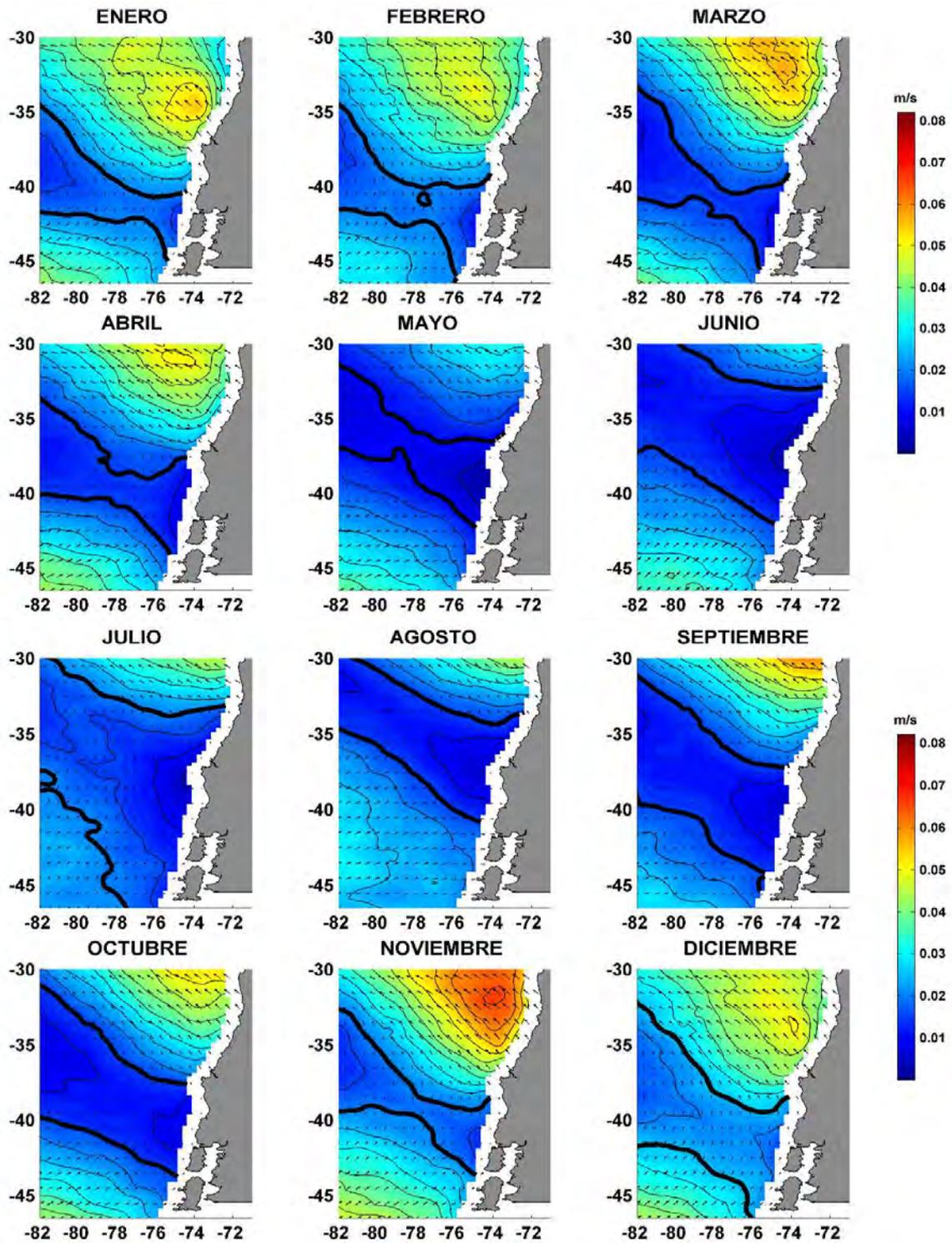


Figura A7. Climatología satelital ASCAT de la deriva de Ekman en el estrato superficial ($z=0$ m) (Serie Mayo-2007/Enero-2015). Las líneas negras determinan un corredor de mínimas magnitud de la deriva de Ekman.

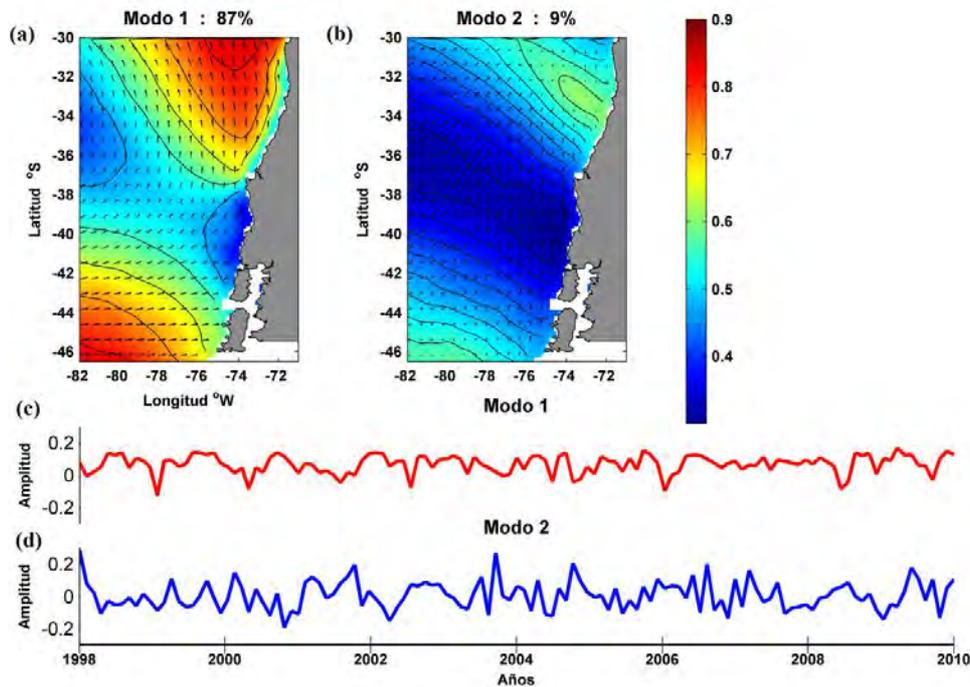


Figura A8. Funciones Empíricas Ortogonales Complejas de la deriva de Ekman proveniente de datos QuikScat (Serie Julio-1999/Noviembre-2009). Las estructuras espaciales de (a) Primer y (b) Segundo modo. Las estructuras temporales de (c) Primer y (d) Segundo modo.

La Figura A9a muestra la distribución vertical de la deriva zonal de Ekman (valores positivos hacia mar afuera y valores negativos hacia la costa), revelando un flujo de Ekman zonal hacia el oeste que comienza desde la zona norte del área estudiada, y profundiza y debilita hacia el sur. Este flujo es más intenso en primavera y verano. El flujo de Ekman hacia el Oeste se anula en la cercanía de los 50 metros de profundidad. Hacia sur ($>38^{\circ}\text{S}$) se encuentra un flujo zonal somero desplazándose hacia la costa (Este), flujo que en otoño e invierno se intensifica y profundiza, además de desplazarse hacia el norte. Por su parte, la Figura A9b muestra la climatología de la componente meridional de la deriva de Ekman en la dimensión vertical, revelando que el flujo de Ekman en primavera-verano muestra un intenso flujo somero hacia bajas latitudes que se profundiza hacia el sur; en cambio, en profundidad se observa un intenso flujo hacia el sur. Durante el período de otoño e invierno el flujo meridional hacia el norte se profundiza.

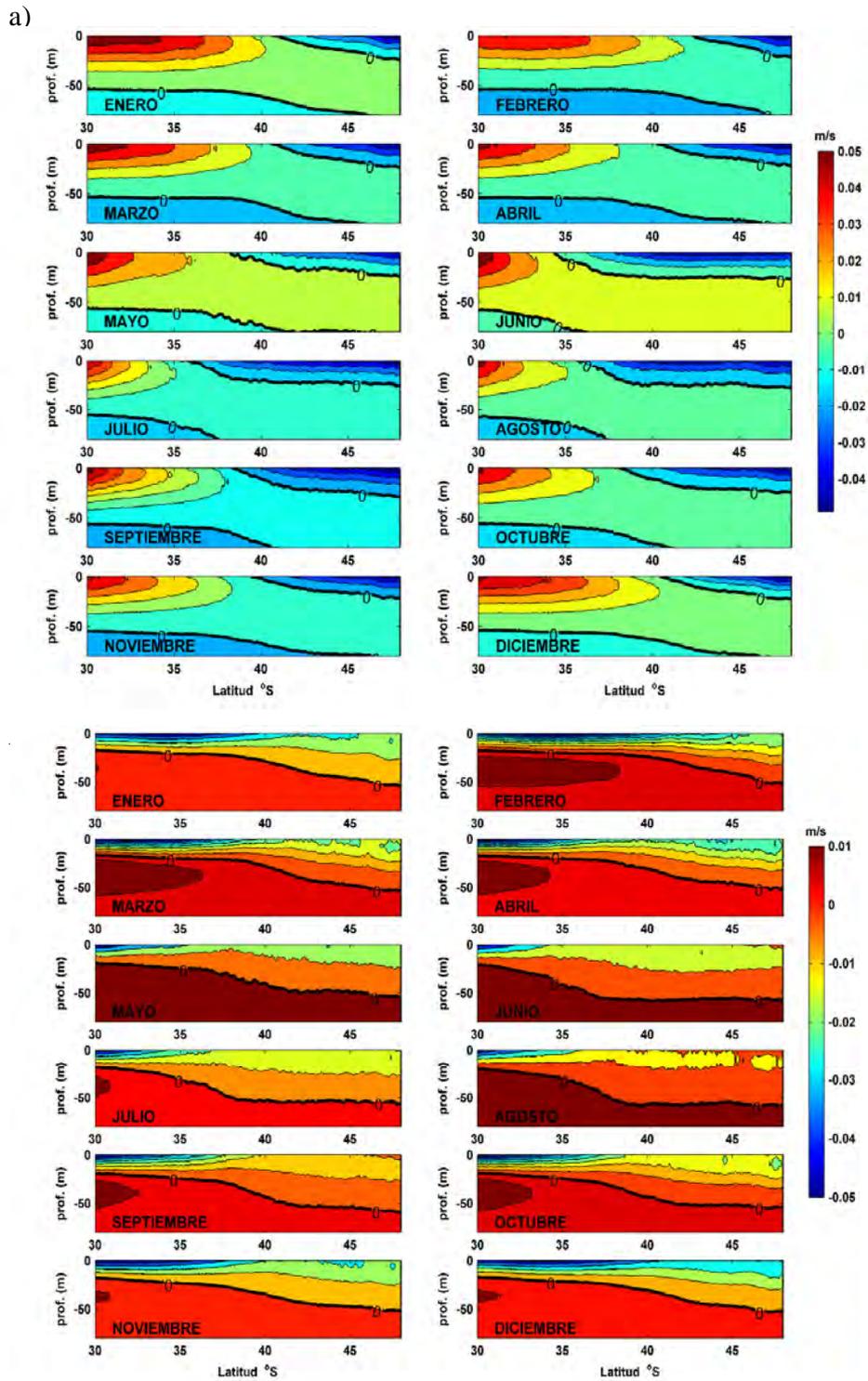


Figura A9. Climatología satelital QuikSCAT de la deriva de Ekman zonal (panel superior) y meridional (panel inferior) en la vertical en la longitud de 75°W (Serie Julio-1999/Noviembre-2009). Valores positivos hacia mar afuera y valores negativos hacia la costa.

Finalmente, la Figura A10 muestra la composición de las dos componentes de la velocidad de Ekman (zonal y meridional) a través de las Funciones Empíricas Ortogonales Complejas, observándose un flujo somero hacia el sureste que comienza en las cercanías de los 40°S, que posibilita menor advección hacia el NW estableciendo un sector costero más retensivo. La estructura espacial del segundo modo (Figura, A10b) que rescata el 9 % de la varianza total, muestra las máximas amplitudes en un flujo hacia el noroeste que comienza desde altas latitudes y se profundiza hacia el norte. La estructura temporal (Figuras A10 c) revela un comportamiento claramente estacional, especialmente asociado al primero modo de variabilidad temporal (color rojo).

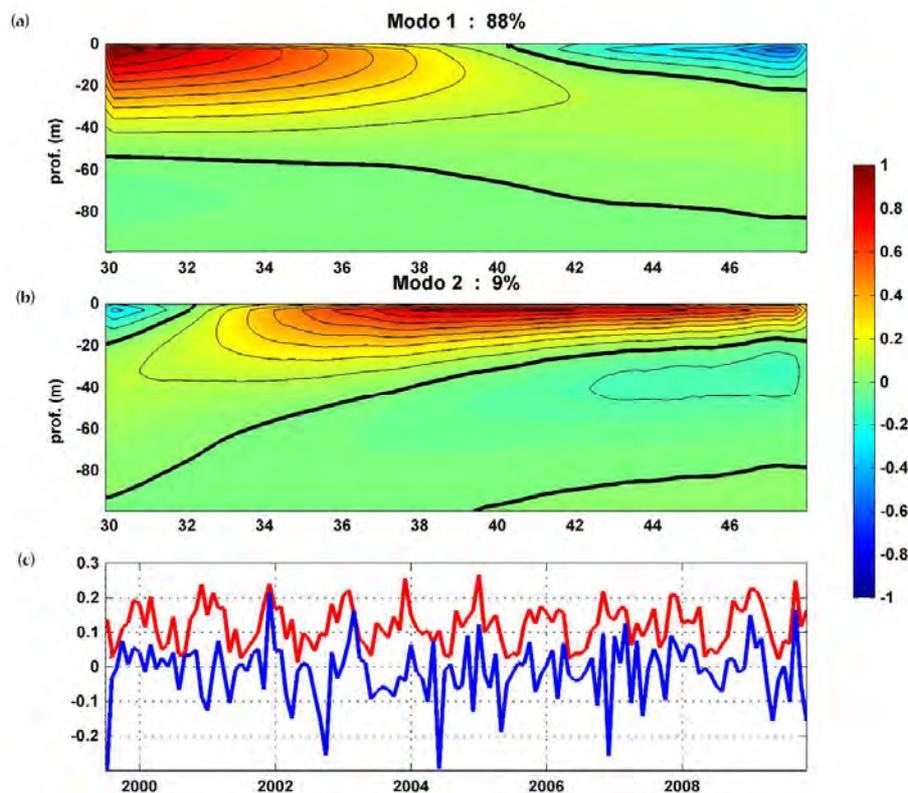


Figura A10. Funciones Empíricas Ortogonales Complejas de la deriva de Ekman zonal y meridional de los datos QuikSCAT (Serie Julio-1999/Noviembre-2009). Las estructuras espaciales de (a) Primer y (b) Segundo modo. Las estructuras temporales de (c) Primer y Segundo modo.

A.3. Variabilidad meridional del esfuerzo del viento

Con el propósito de analizar el grado de desplazamiento de la zona de divergencia del esfuerzo meridional del viento a lo largo de la costa, se realizó un diagrama de Hovmöller del esfuerzo de viento meridional para ambas series de datos (Figura A11). El esfuerzo del viento meridional a lo largo de la costa muestra que las máximas magnitudes del viento se desplazan hacia el sur durante primavera-verano abarcando todo el dominio entre los 30 y aproximadamente los 45°S, en tanto que en el período de otoño-invierno las magnitudes mínimas del esfuerzo del viento meridional se desplazan hacia el norte alcanzando los ~35°S como máximo (exceptuando años como 2007-2008 donde se alcanza sólo a los ~37°S). En este diagrama se destaca que los máximos valores del esfuerzo del viento se identifican frente a puntas o salientes topográficas importantes como por ejemplo: punta Lavapié (37°20'S) que exhibe las mayores magnitudes del esfuerzo del viento, punta Nugurne (36°S), punta Galera (40°S) y punta Lengua de Vaca (~30°S), regiones que presentan los mayores valores en el período de primavera-verano, y por el contrario exhiben los valores mínimos en el período de otoño-invierno. Los contornos negros son los límites de valor nulos de los esfuerzos meridionales y zonales.

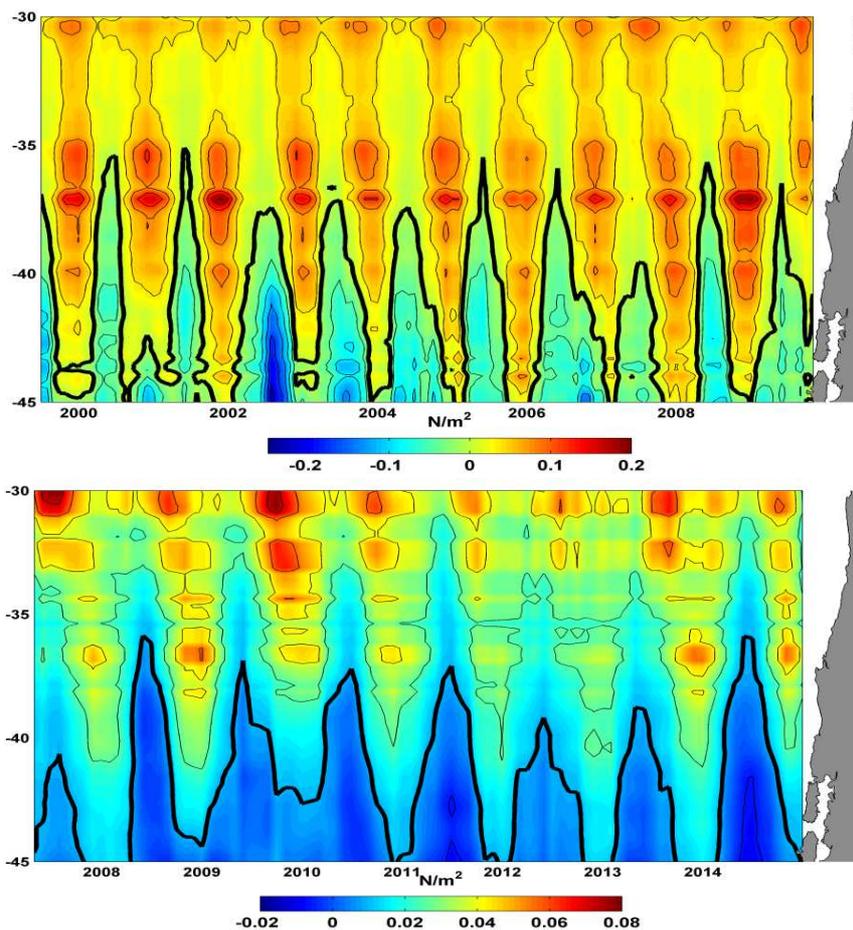


Figura A11. Diagrama Hovmöller del Esfuerzo del viento meridional. Panel superior datos de vientos QuikSCAT a lo largo de la costa. (Serie Julio-1999/Noviembre-2009). Panel inferior datos de viento ASCAT a lo largo de la costa (Serie Mayo-2007/Enero-2015). Contorno sólido negro: esfuerzo del viento meridional cero.

El desplazamiento del esfuerzo del viento cero en ambas series de datos se presenta en la Figura A12. La serie de vientos QuikSCAT muestra una media de $41,6^{\circ}\text{S}$ de latitud y una variabilidad de $\pm 4,2$, comportamiento similar al de la serie de imágenes ASCAT que evidencia una media de $-42,71^{\circ}$ de latitud y una desviación estándar $\pm 4,1$. La zona de divergencia muestra un desplazamiento latitudinal estacional de aproximadamente 8° , lo que equivale a ~ 900 km, generando cambios importantes en ese dominio costero.

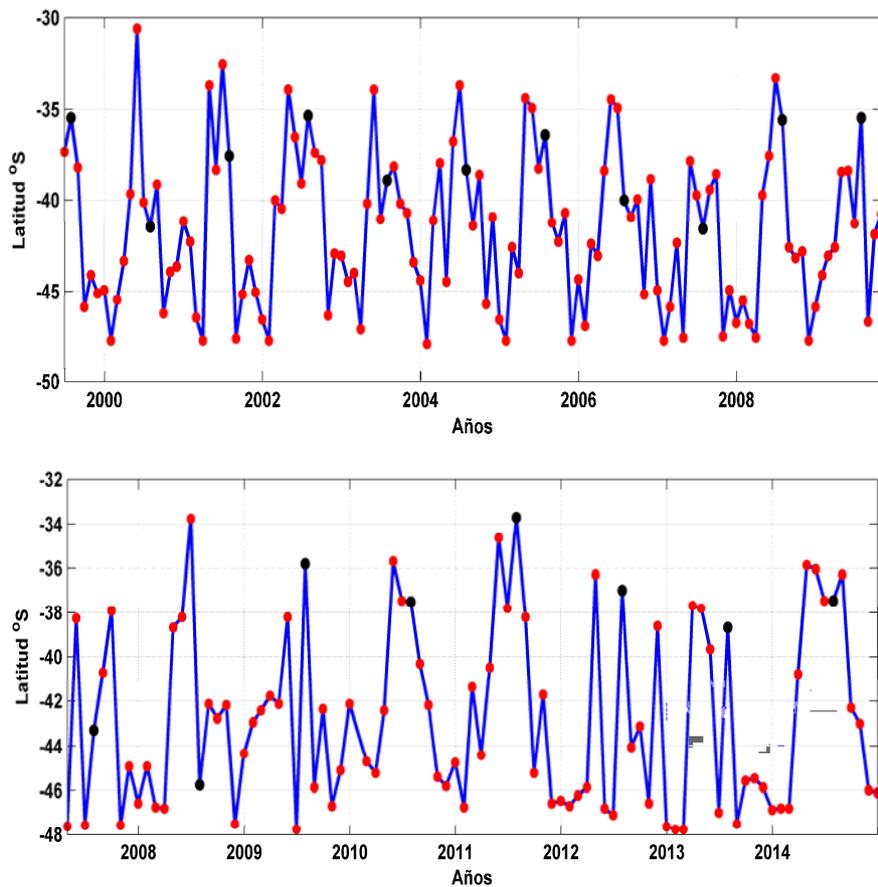


Figura A12. Serie temporal del Esfuerzo Cero del viento meridional. Panel superior datos de vientos QuikSCAT a lo largo de la costa. (Serie Julio-1999/Noviembre-2009). Panel inferior datos de viento ASCAT a lo largo de la costa (Serie Mayo-2007/Enero-2015). Los puntos negros corresponden al mes de Agosto.

La Figura A13 muestra la variabilidad interanual y meridional del transporte de Ekman ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) por metro de costa, entre los años 1991 y 1999 (serie de viento satelital ERS), que evidencia el incremento significativo de la magnitud del transporte de Ekman fuera de la costa al norte de los 37°S verificando una región muy advectiva; en tanto que, por el contrario, la región situada al sur de la isla Mocha (al sur de los 38°S) revela una región con valores muy bajos o nulos de transporte fuera de la costa, que identifica a esta región costera como una zona muy retensiva.

En el dominio del estudio, destaca particularmente la zona asociada desde la punta Lavapié hacia el sur, debido a su interacción con fenómenos atmosféricos y oceanográficos

importantes. El forzante atmosférico actúa sobre la superficie del océano en forma de divergencia del esfuerzo del viento. Este fenómeno atmosférico tiene un desplazamiento meridional estacional considerable (ver Figura A11) generando una deriva de Ekman de muy baja intensidad. El corredor transversal de mínimas magnitudes en la deriva de Ekman es observado en la climatología donde actúa el viento.

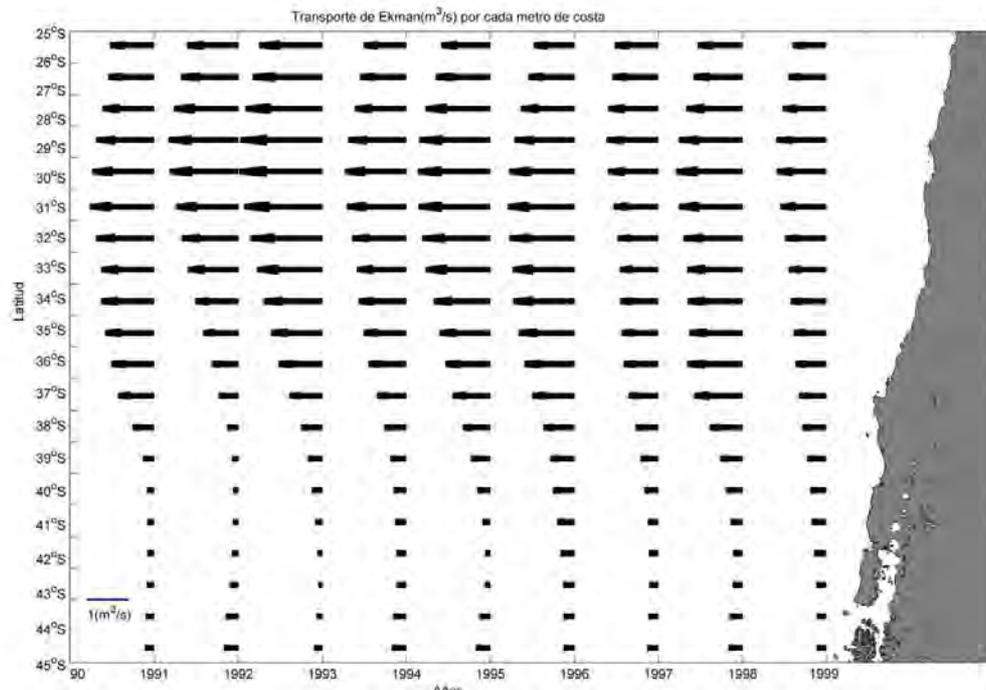


Figura A13. Variabilidad meridional del Transporte de Ekman ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) por metro de costa, entre los años 1991 y 1999.

A.4. Turbulencia estimada de viento satelital

La climatología de la turbulencia proveniente de las dos series de vientos ensayadas en este informe se presentan en las Figuras A14 y A15. En ellas se revela que las máximas magnitudes de turbulencia se identifican en la zona norte (al norte de los 35°S) durante los periodos de primavera y verano (meses de noviembre, diciembre y enero). Se destaca que las magnitudes más altas de turbulencia se inician en la zona de desprendimiento o de divergencia del esfuerzo del viento, en tanto que los valores más bajos de turbulencia se verifican especialmente en los meses de otoño e invierno.

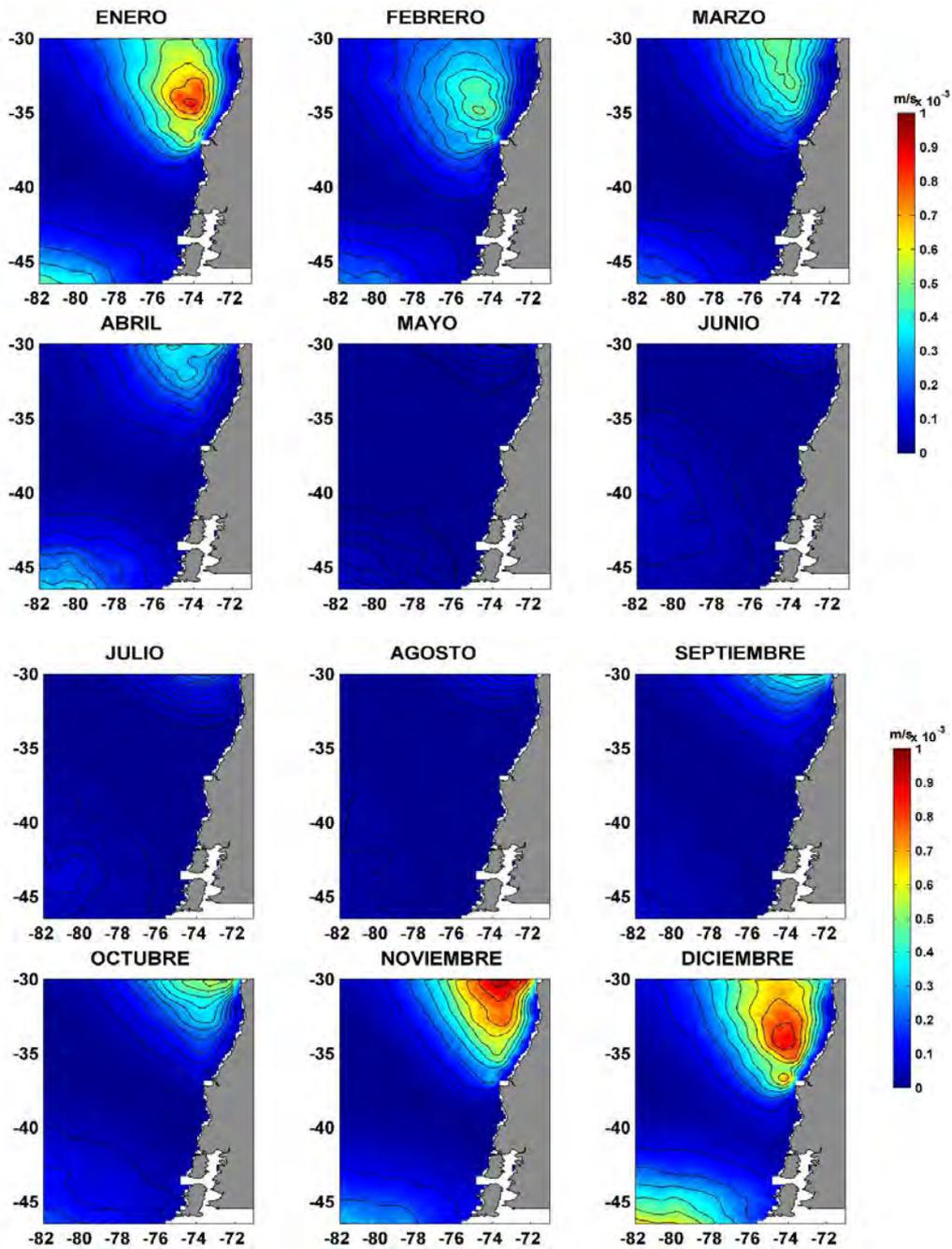


Figura A14. Climatología de la Turbulencia proveniente de datos QuikSCAT (Serie Enero-1993/Junio-2015).

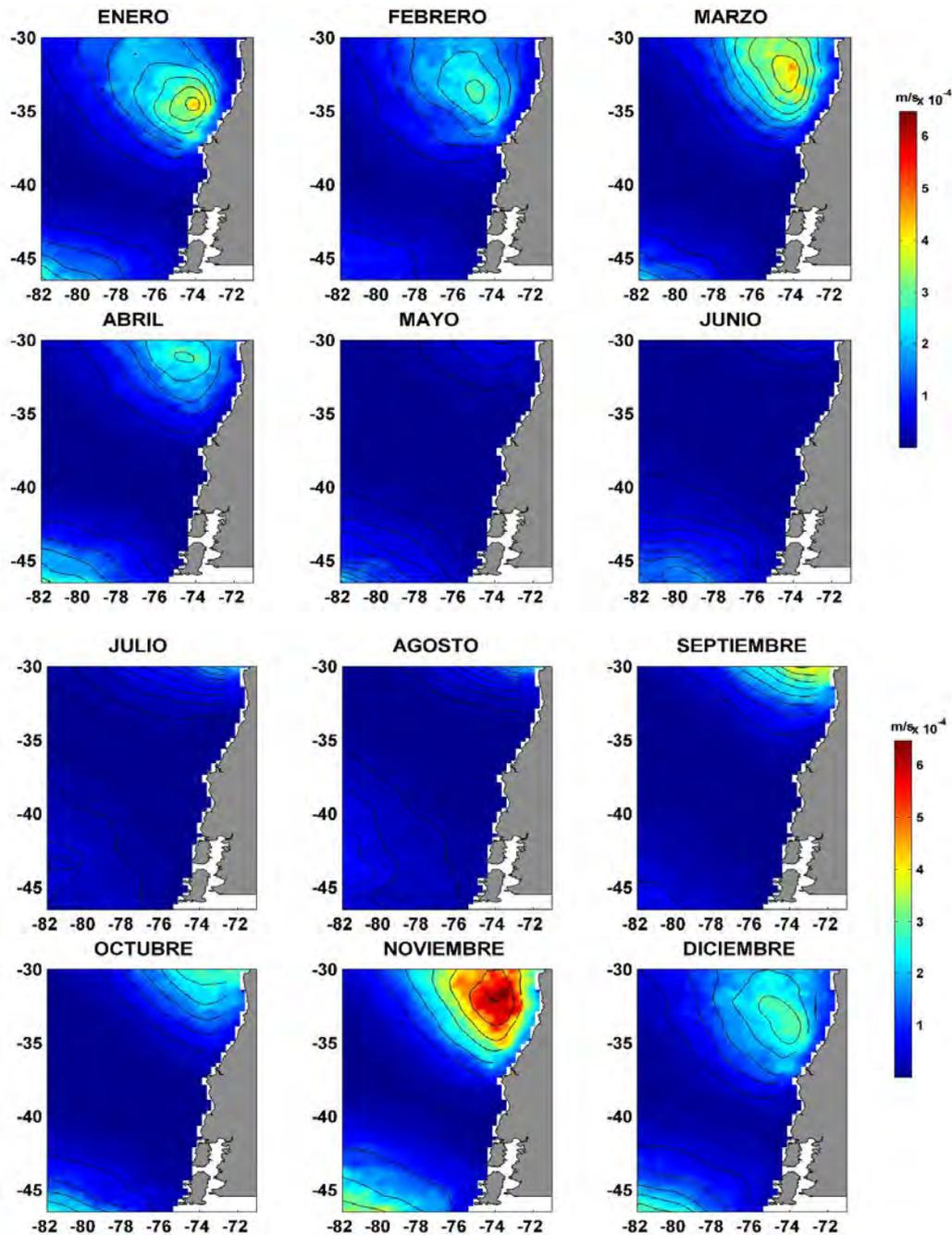


Figura A15. Climatología de la Turbulencia de la serie ASCAT (Mayo-2007/Enero-2015).

Las funciones empíricas ortogonales de las series QuikSCAT y ASCAT (Figuras A16 y A17), muestra que los tres primeros modos rescatan el 55% de la varianza total. La estructura espacial del primer modo explica el 47% de la varianza, revelando que las máximas amplitudes en la zona norte y el núcleo de máximas se inicia en la zona de Punta

Lavapié. Las zonas de mínimas turbulencia, por su parte, se localizan frente a la región costera al sur de los 38°S donde la variabilidad está modulada estacionalmente. Las estructuras espaciales de los modos 2 y 3 que explican el 8% de la variabilidad resaltan valores mínimos frente a la costa sur. Las estructuras temporales (c, d y f) que modulan las estructuras espaciales, no muestran un comportamiento estacional definido, mostrándose totalmente oscilante en el tiempo.

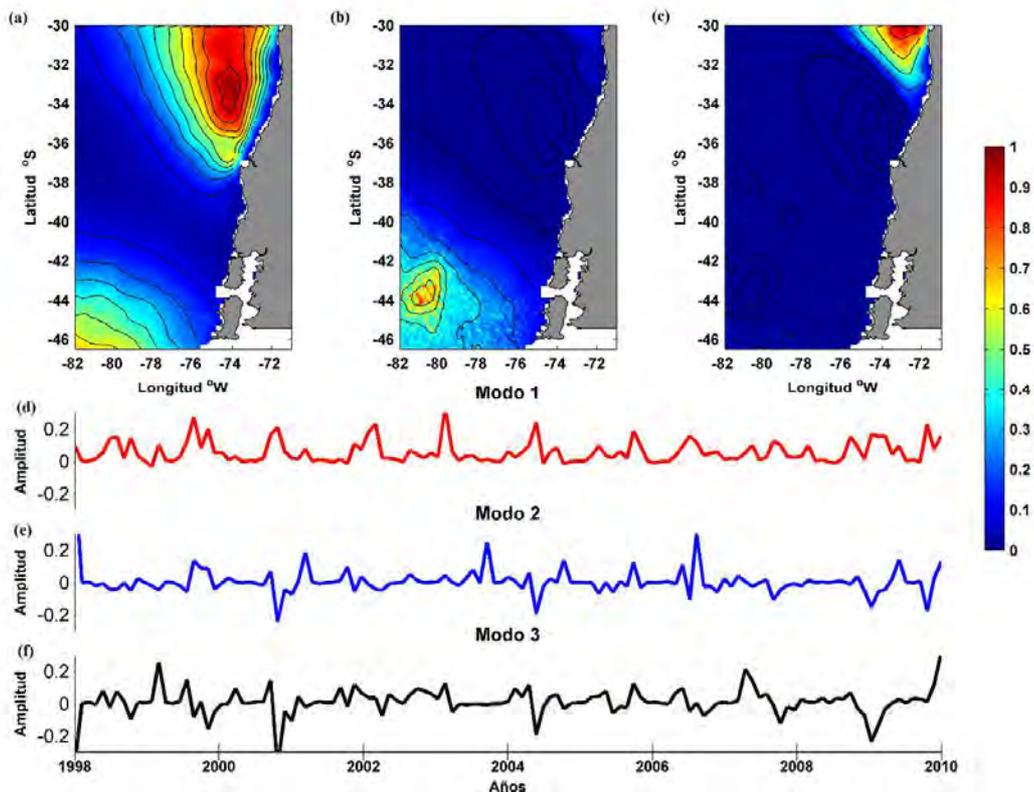


Figura A16. Funciones Empíricas Ortogonales de la Turbulencia proveniente de datos QuikSCAT (Serie Enero-1993/Junio-2015). Las estructuras espaciales de (a) Primer, (b) Segundo y (c) Tercer modo. Las estructuras temporales de (d) Primer, (e) Segundo y (f) Tercer modo.

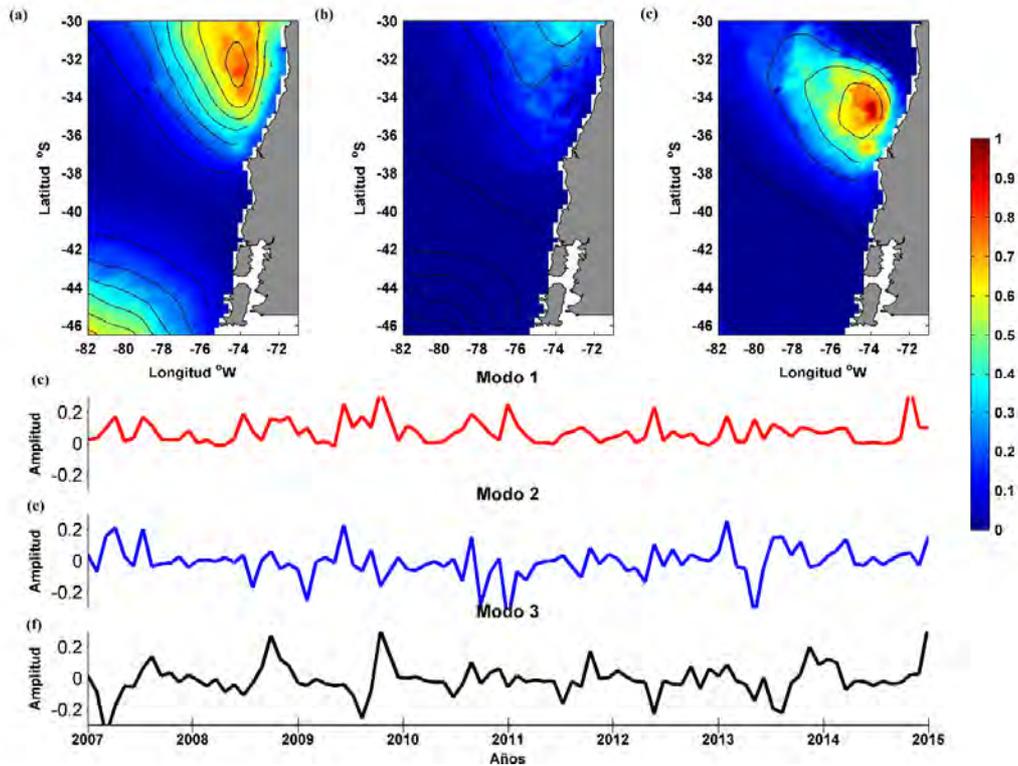


Figura A17. Funciones Empíricas Ortogonales de la Turbulencia proveniente de datos ASCAT (Serie Mayo-2007/Enero-2015). Las estructuras espaciales de (a) Primer, (b) Segundo y (c) Tercer modo. Las estructuras temporales de (d) Primer, (e) Segundo y (f) Tercer modo.

A.5. Climatología satelital de la velocidad geostrófica

La climatología de la velocidad geostrófica (Figura A18) muestra un chorro estacional a lo largo de la costa, que se identifica en la región sur, despegándose de la costa frente a punta Lavapié, y que se verifica con mayor claridad en los meses de Enero-Marzo y Junio-Agosto. Resulta interesante ver que por efecto topográfico (línea de costa de Punta Lavapié) la corriente geostrófica no se atrape en la costa y se desprenda justo en la punta. Los tres primeros modos de FEOC de la corriente geostrófica explican el 61% de la varianza total. La estructura espacial del primer modo (Figura A19a) rescata toda la dinámica de la circulación geostrófica mostrada en la climatología, es decir, la corriente estrecha pegada a la costa que comienza desde la zona más austral del área estudiada, y que se despega de la región costera en las cercanías de Punta Lavapié en forma de meandros hacia la zona oceánica. La serie temporal (Figura A19d) que modula la estructura espacial muestra un comportamiento aproximadamente estacional.

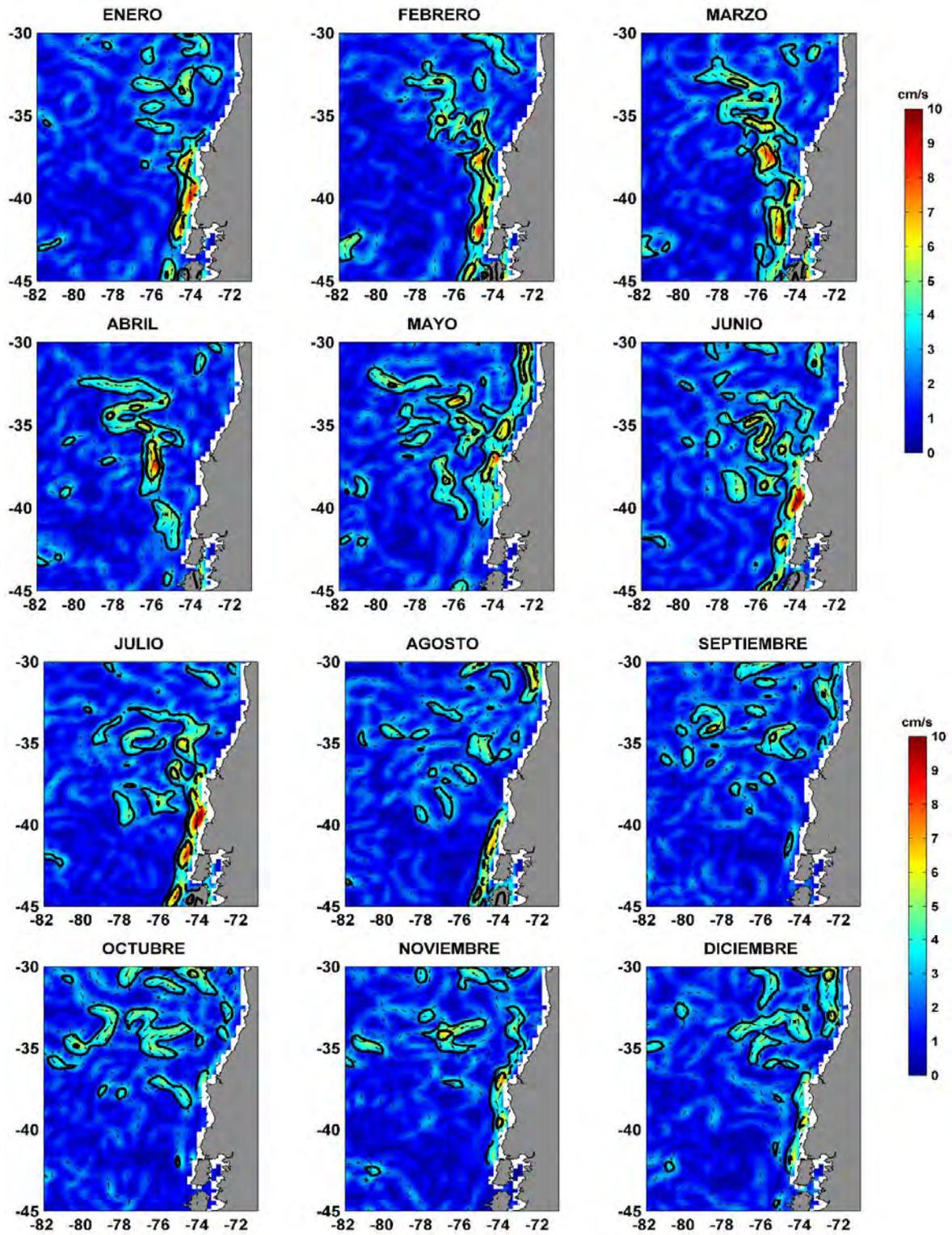


Figura A18. Climatología de la velocidad geostrófica proveniente del programa AVISO (Serie Enero-1993/Junio-2015).

Por otro lado, las estructuras espaciales del segundo y tercer modo que explican el 11% de la variabilidad muestran el desprendimiento de los meandros y giros hacia el NW de la zona de estudio, revelando asimismo una variabilidad temporal caracterizada en ambos modos por un marcado comportamiento estacional (Figuras A19e y f).

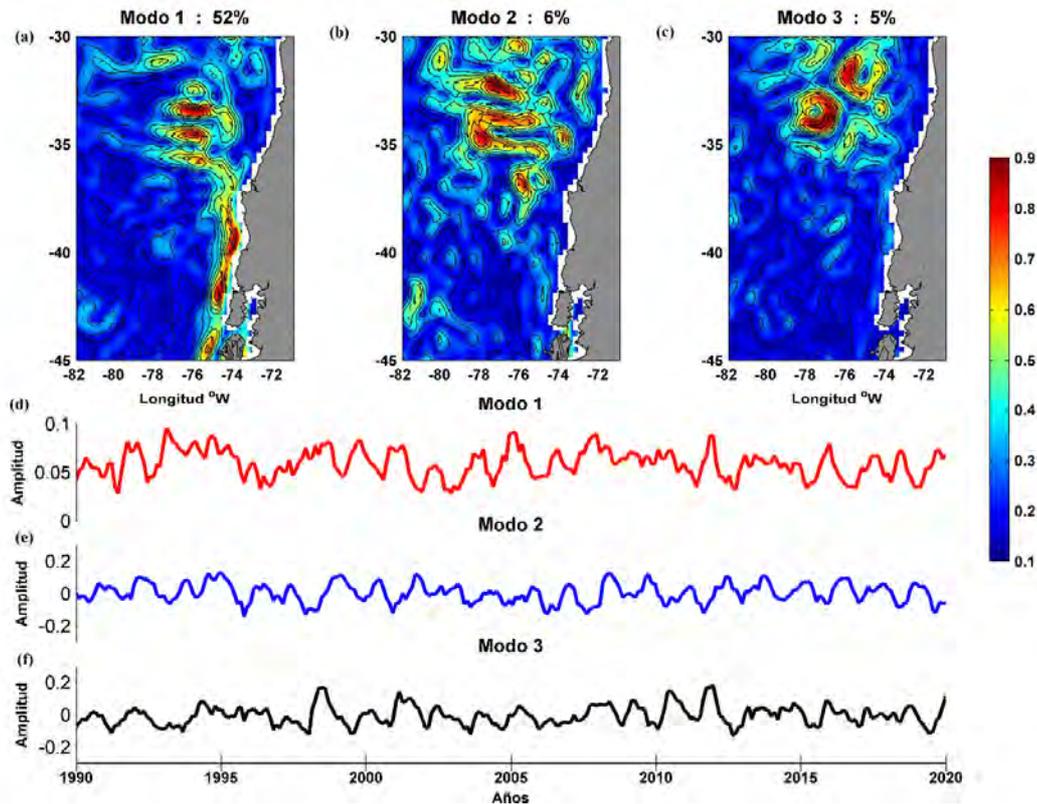


Figura A19. Funciones Empíricas Ortogonales de la velocidad geostrófica proveniente del programa AVISO (Serie Enero-1993/Junio-2015). Las estructuras espaciales de (a) Primer, (b) Segundo, y (c) Tercer modo. Las estructuras temporales de (d) Primer, (e) Segundo y (f) Tercer modo.

La Figura A20 muestra también los resultados de la climatología de la velocidad geostrófica mensual (mapas de vectores de la corriente), verificando claramente variaciones estacionales. Durante el período de primavera-verano las corrientes hacia el norte se intensifican en toda la zona, especialmente a lo largo de la costa situada al sur de punta Lavapié, donde se desvían producto de la surgencia local (entre los 37°30'-35°30'S) volviendo a la costa en los ~35°S. Este proceso comienza típicamente en Noviembre llegando a un máximo (5 cm s^{-1}) en Enero y Febrero, para luego decaer a partir de Marzo.

Por otro lado, desde Mayo a Agosto las corrientes promedio se orientan hacia el sur de la zona de estudio (con máximos entre Junio y Julio). En el inicio de la primavera (Septiembre-Octubre), aparece un periodo de bajas intensidades de la corriente asociados al cambio de estación. Durante todo el año se presentan corrientes de meandro y remolinos de mesoescala en la zona, pero son más evidentes entre Enero y Abril. En Enero aparece en la parte oceánica de la corriente de chorro costero, mientras que a partir de Febrero se desplazan hacia el oeste empujando a esta corriente hacia el oeste especialmente desde punta Lavapié. En este sector también aparecen en septiembre y octubre aunque de menos intensidad y con una componente hacia la costa hacia el sur de esta punta, tal como fue descrito para el periodo de desove.

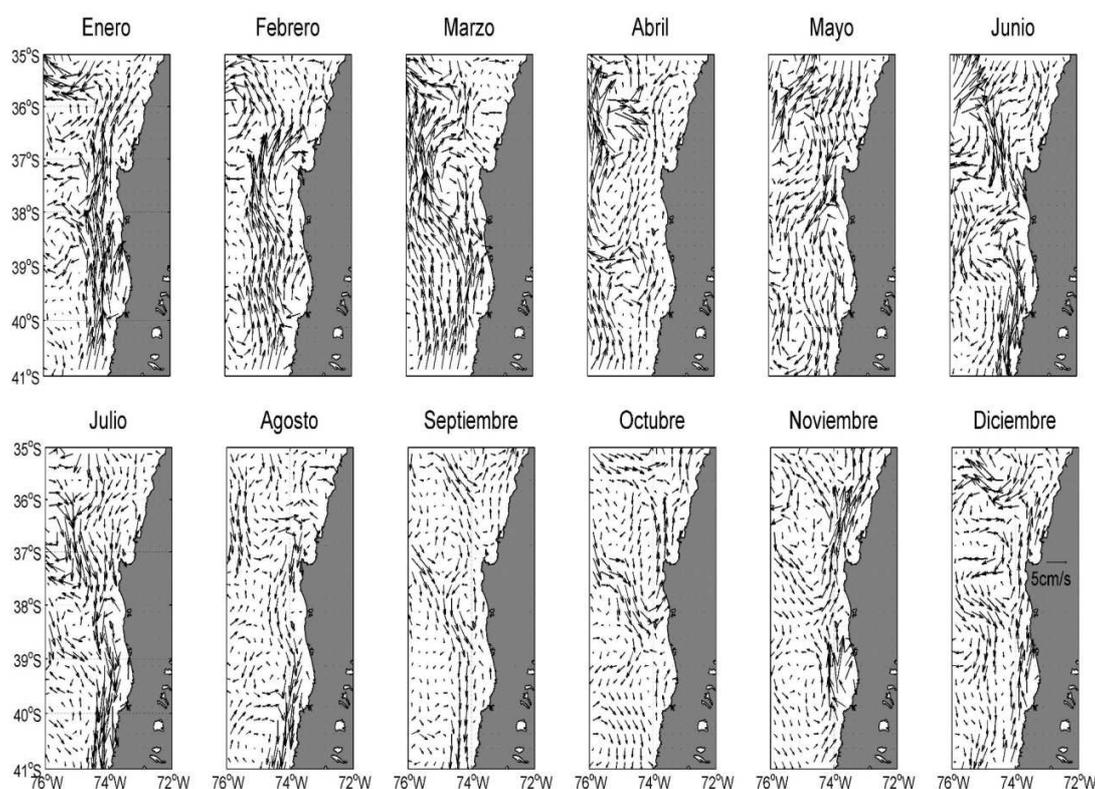


Figura A20. Climatología Mensual de las velocidades geostróficas en la zona centro sur de Chile, derivada de datos diarios de velocidad del programa AVISO.

A.6. Climatología de la Energía cinética

La climatología de la energía cinética a partir de las velocidades geostróficas (Figura A21) muestra que la zona más dinámica se evidencia a lo largo de la costa sur en la mayor parte

de los meses del año, a excepción del período de términos de invierno e inicios de primavera (Agosto, Septiembre y Octubre). En cambio, en los meses restantes esta señal se desprende desde la zona costera hacia la zona oceánica.

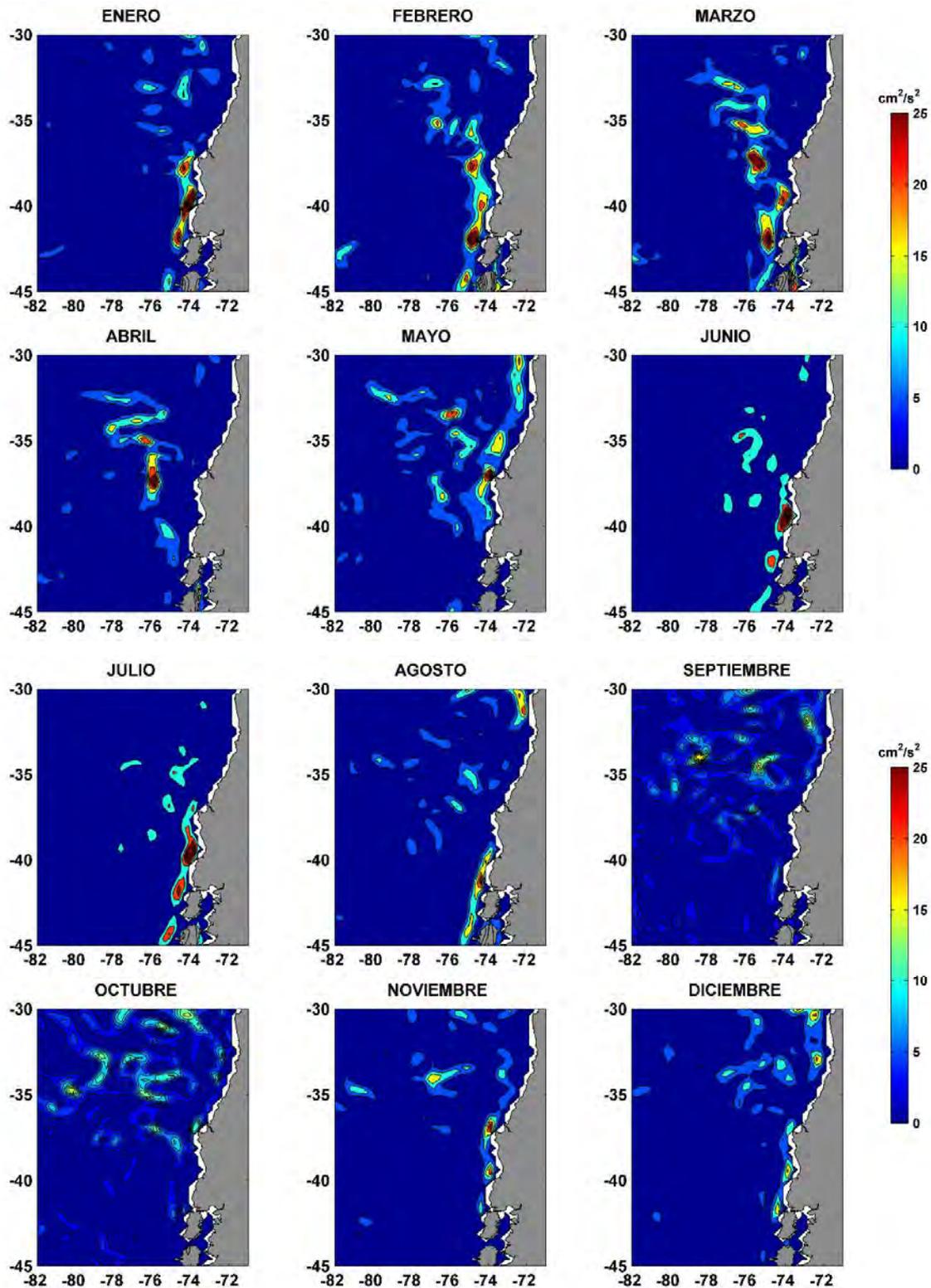


Figura A21. Climatología de la Energía Cinética proveniente del programa AVISO (Serie Enero-1995/Junio-2015).

Las Funciones Empíricas Ortogonales (Figura A22) muestran que los dos primeros modos explican el 56% de la varianza total. El primer modo rescata el 49% de la variabilidad total y la estructura espacial (Figura A23a) muestra las máximas magnitudes en la cercanía de la costa, coincidiendo con lo reportado por diversos autores (Hormazábal *et al.*, 2004; Echevin *et al.* 2011), en tanto que la estructura temporal (Figura A22c) que modula la estructura espacial muestra un comportamiento estacional con las máximas amplitudes en primavera-verano. El segundo modo que rescata el 6% de la varianza total y muestra en la estructura espacial una oscilación zonal con las máximas amplitudes en la zona cercana a la costa, variando estacionalmente.

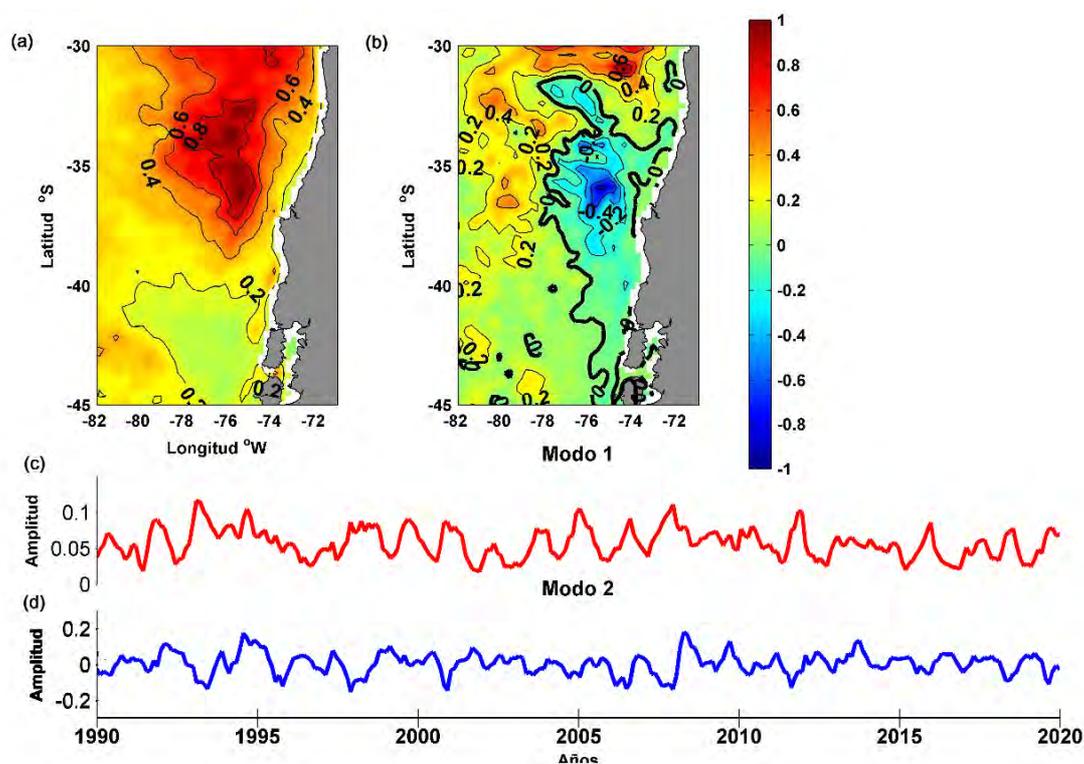


Figura A22. Funciones Empíricas Ortogonales de la Energía Cinética proveniente del programa AVISO (Serie Enero-1995/Junio-2015). Las estructuras espaciales de (a) Primer y (b) Segundo modo. Las estructuras temporales de (c) Primer y (d) Segundo modo.

A.7. Climatología de la TSM satelital

La climatología de la temperatura superficial del Mar (TSM) proveniente de la serie Pathfinder, muestra una compresión de las isotermas durante el verano (Diciembre-Marzo)

(Figura A23) partir de la isoterma de 16°C frente a Punta Lavapié. Esta bifurcación se debe a un efecto topográfico o por efecto dinámico. Además, para este periodo se observa una compresión de las isotermas hacia el sur, desde la isoterma de 16°C. En cambio, durante el resto del año (especialmente en invierno e inicios de primavera), la región de estudio se enfría gradualmente desplazándose la isoterma de 16°C hacia el NW, y estableciéndose el dominio en la región costera del centro-sur de Chile de las isotermas de 13-15°C en superficie. La serie de imágenes de satélite de TSM Modis Aqua (serie entre Julio 2002 y Diciembre 2015) (Figura A24) rescata la estacionalidad de la climatología, aunque esta serie muestra mayores estructuras en la zona costera.

El análisis de las Frecuencias Ortogonales Empíricas de la temperatura superficial del mar de ambas series, muestran que el primer modo explica el 96% y 95% de la varianza total, respectivamente, donde la estructura espacial (Figura A25a) muestra las mayores amplitudes en la zona norte, las que decaen gradual y transversalmente hacia el sur. La estructura temporal muestra claramente un comportamiento estacional de la TSM (Figura A25c). La estructura espacial del segundo modo de la serie Pathfinder explica un 2% de la variabilidad, aunque el porcentaje de la varianza es pequeña representa uno de los fenómenos más importante de las costas del borde oriental, la surgencia que caracteriza a la zona de Punta Lavapié. De igual forma, las FEOs de la TSM (Figura A26) muestran que ambas estructuras espacial rescatan la variabilidad espacial asociada a la radiación solar y los fenómenos de surgencia frente a Punta Lavapié.

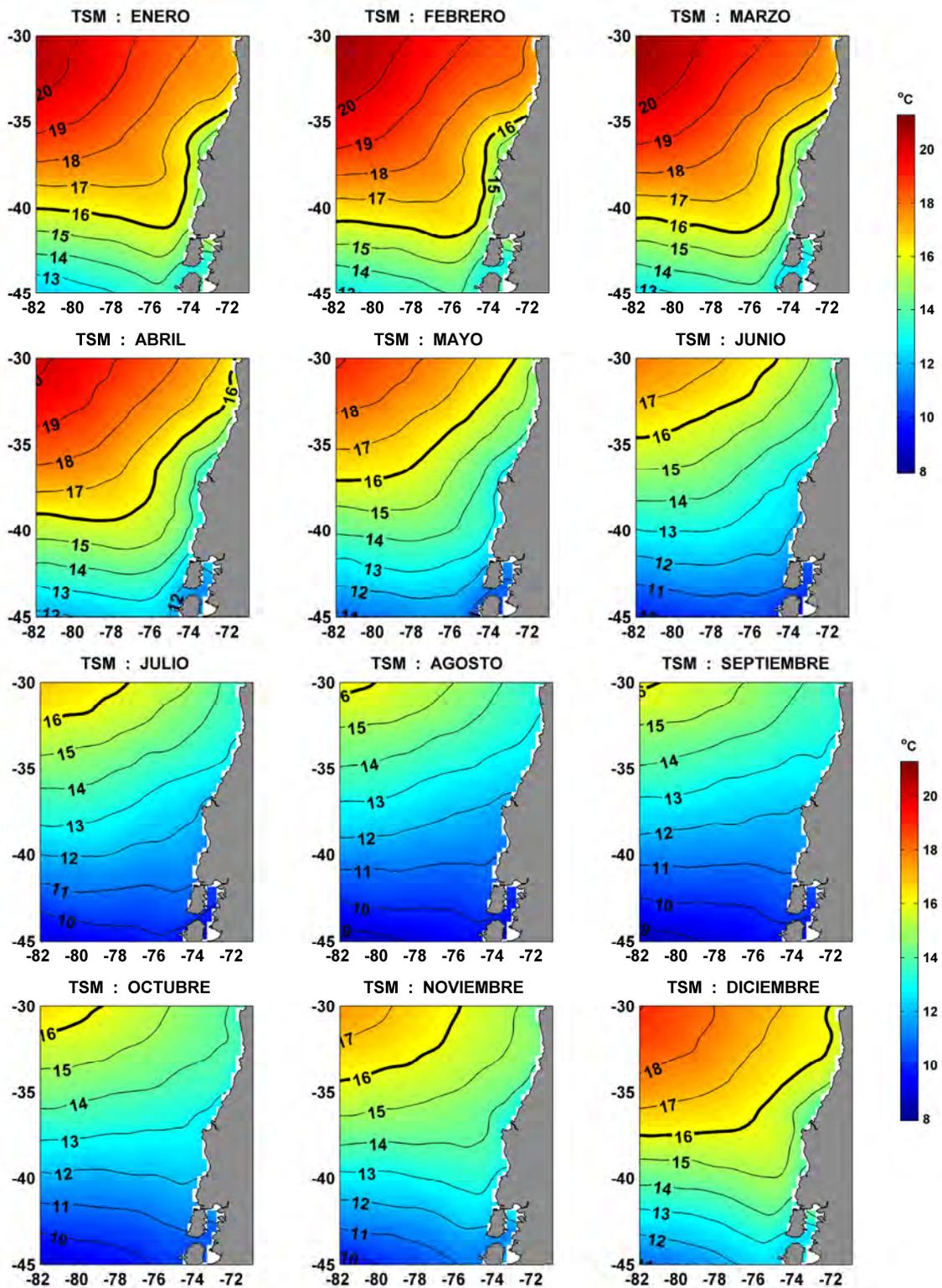


Figura A23. Climatología de la temperatura superficial del mar proveniente del programa Pathfinder. Serie Septiembre-1981/Diciembre-2008).

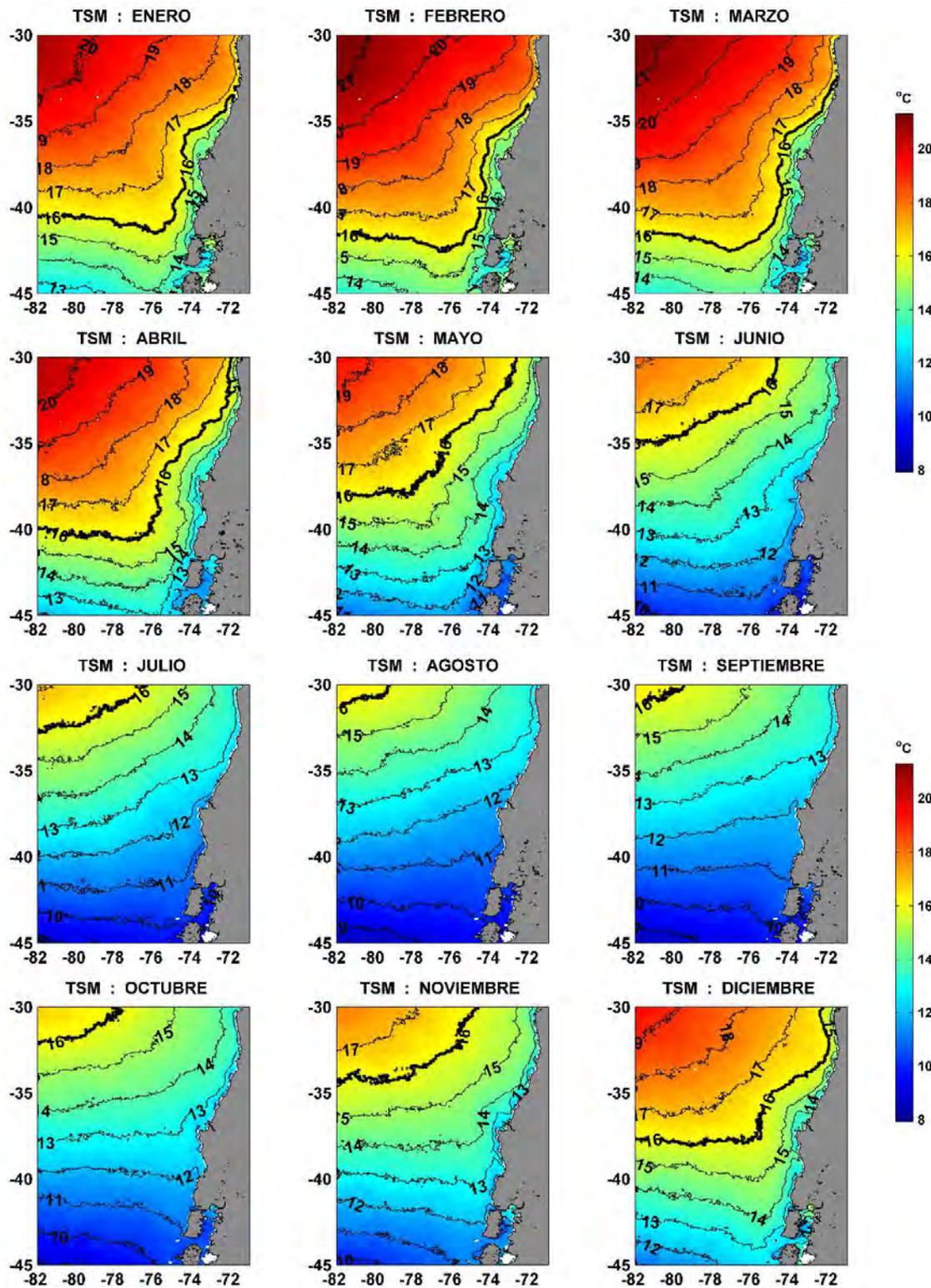


Figura A24. Climatología de la temperatura superficial del mar proveniente del programa ModisAqua (Serie Julio-2002/Diciembre-2015).

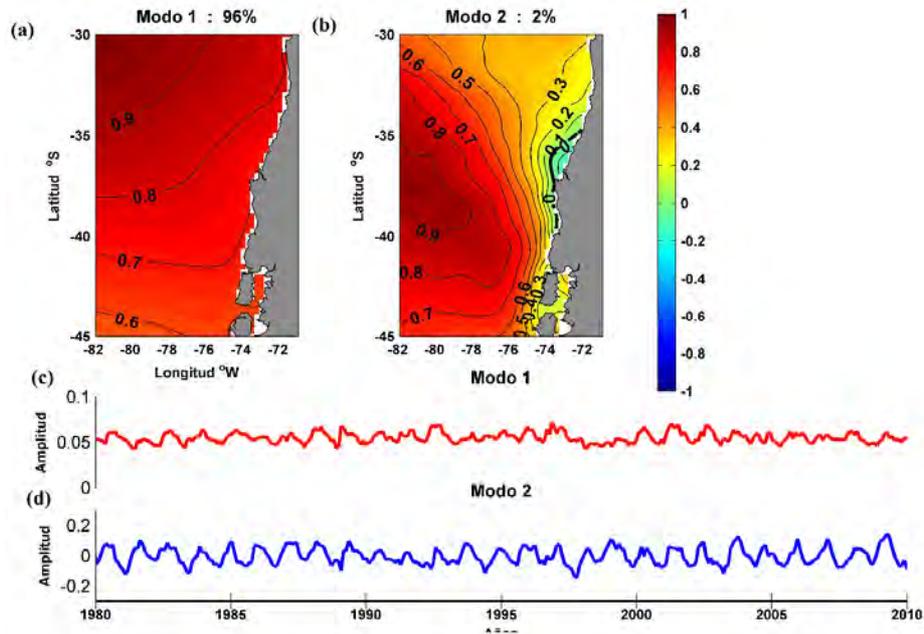


Figura A25. Funciones Empíricas Ortogonales de la temperatura superficial del mar proveniente del programa Pathfinder. Serie Septiembre-1981/Diciembre-2008). Las estructuras espaciales de (a) Primer y (b) Segundo modo. Las estructuras temporales de (c) Primer y (d) Segundo modo.

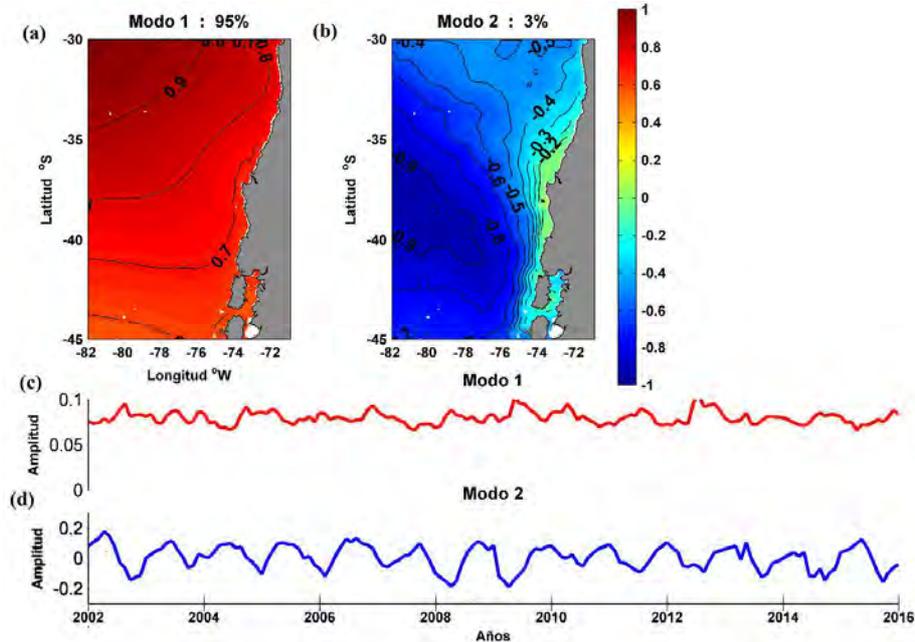


Figura A26. Funciones Empíricas Ortogonales de la temperatura superficial del mar proveniente del programa ModisAqua (Serie Julio-2002/Diciembre-2015). Las estructuras espaciales de (a) Primer y (b) Segundo. Las estructuras temporales de (c) Primer y (d) Segundo modo.

A.8. Variabilidad interanual de TSM y clorofila

Los parámetros oceanográficos estudiados en este trabajo están fuertemente influenciado por señales provenientes de la zona ecuatorial. La Figura A27 muestra el índice de oscilación del sur (IOS) que destaca los eventos cálidos de 1997, 2002-2005, 2010 y 2015-2016. La serie temporal de anomalías de TSM de Pathfinder (Figura A28) muestra los dos eventos más importante son El Niño 1982-83 y 1997-98, donde destaca el evento 1997 el cual logra mostrar anomalías hasta la región sur. Esta señal fue tan intensa que los datos hidrográficos medidos en la región sur muestran claramente los efectos de esta señal.

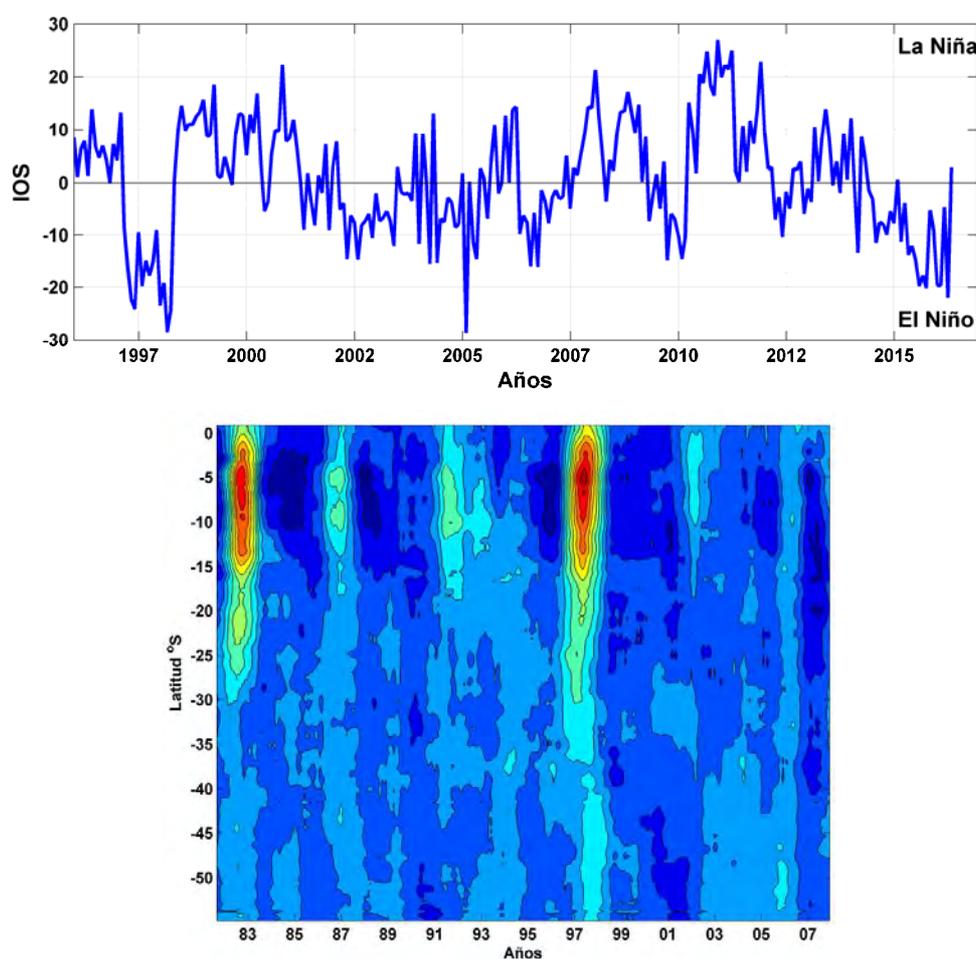


Figura A27. a) Serie temporal del Índice de Oscilación del Sur. b) Variabilidad interanual de la anomalía de la temperatura superficial del mar en la región costera del centro-sur. TSM de la Serie PathFinder.

Para el área de estudio (centro-sur de Chile, 35-41°S), la Figura A27 presenta los diagramas de Hovmöller (latitud-tiempo) para la TSM satelital para la clorofila satelital durante los

últimos 14 años, considerando una franja situada a los 74°S en la región de estudio. En la región costera se observa el claro comportamiento estacional, así como la expresión de eventos fríos La Niña (ejemplo: 2007-2013) y cálidos El Niño (2015). Para el caso de la clorofila satelital, el diagrama Hovmöller muestra mayores concentraciones de biomasa fitoplanctónica asociadas a la región del golfo de Arauco (37-37°20'S) y de la terraza del Itata (36°10'-36°50'S), y en segundo lugar la región costera vinculada a los 38°30'S (isla Mocha) - 40°S (Corral), donde se establece la principal área de desove de anchoveta en la región de estudio.

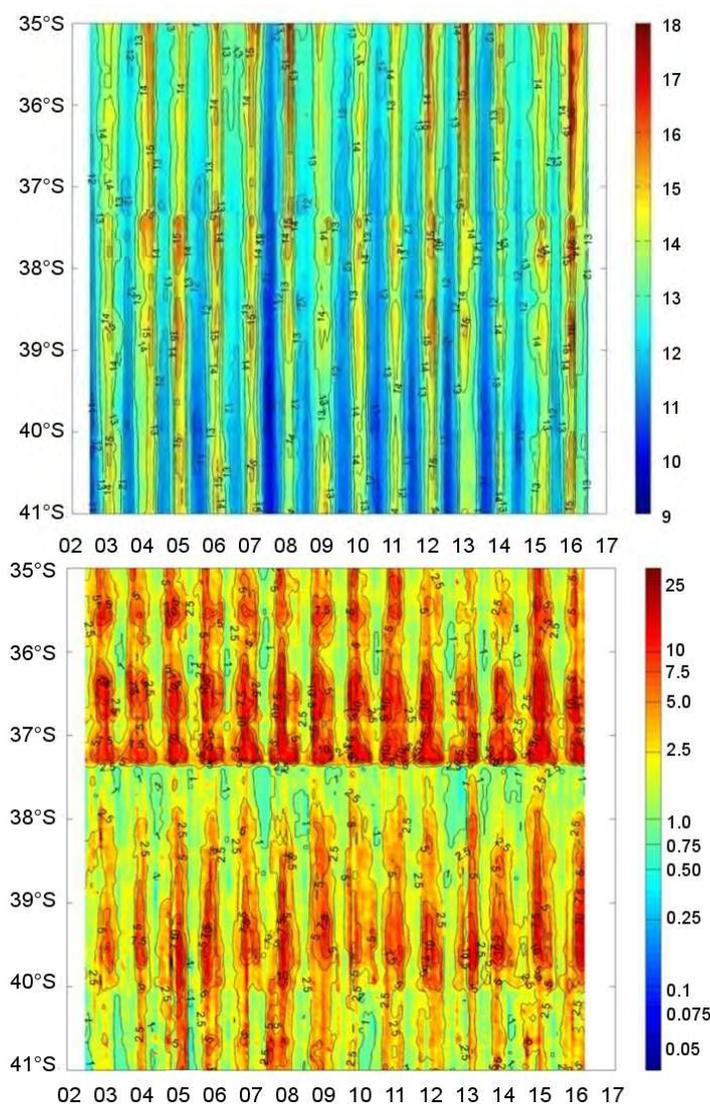


Figura A28. Diagramas de Hovmöller (Latitud-tiempo) para la TSM satelital (panel superior) y para la clorofila (color satelital) (panel inferior) para la serie 2002-2016, para una franja situada a los 74°S en la región de estudio (35-41°S).

A.9. Frentes costeros de origen térmico y concentración de clorofila

La distribución espacial de temperatura promedio satelital (Figura A29) durante el período de primavera mostró la formación de una banda costera de agua de menor temperatura, lo que es consistente con la climatología obtenida de datos de crucero. A pesar de que la distribución espacial es similar los valores al norte de punta Lavapié fueron levemente mayores (12° a $12,5^{\circ}\text{C}$), y la disposición espacial de las isotermas oceánicas fueron casi paralelas a la costa, generando un gradiente que superó $0,02^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ($1,5^{\circ}\text{C}$ en ~ 75 km), mientras que al sur de punta Lavapié no sobrepasó $0,01^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ($0,5^{\circ}\text{C}$ en ~ 30 km). Estos resultados revelan que los frentes de origen térmico son más intensos en la región situada al norte de punta Lavapié, que en los descritos para el sector situado al sur de los $37^{\circ}30'\text{S}$.

Por otro lado, la concentración de clorofila satelital promedio (Figura A29) mostró la formación de una banda costera a largo de la zona de estudio que es coherente con la banda costera de aguas frías, con una extensión zonal de ~ 55 km con concentraciones >2 mg m^{-3} , llegando incluso en promedio hasta los 5 mg m^{-3} en la región costera entre los 35°S y el golfo de Arauco y frente a 39°S . El límite exterior de clorofila promedio se vió marcada por el valor de 1 (mg/m^3), de 100 km tanto al norte como al sur de punta Lavapié, es decir, las concentraciones más significativas de clorofila promedio se encontraron asociadas a los primeros 50 km de la banda costera.

Los gradientes térmicos superficiales, derivados de TSM satelital, permitieron estimar la presencia y distribución de frentes de origen térmico a lo largo de toda la zona. Estos se apreciaron más intensos y con mayor presencia al norte de punta Lavapié (Figura A29), donde abarcaron desde la costa hasta una extensión de aproximadamente 40 a 50 km. Lo anterior es coherente con la distribución horizontal y vertical de las isolíneas derivadas de la hidrografía. Estas estructuras tendieron a moverse entre la costa y el límite exterior de la zona frontal formando una ancha banda paralela a la costa. A lo largo de estas zonas aparecieron zonas donde no se apreció la presencia de frentes térmicos de muy débil intensidad, asociados a la desembocadura del río Biobío y del río Itata. Al sur de punta Lavapié los frentes térmicos solamente son significativos en una banda al norte de $38,5^{\circ}\text{S}$,

mientras que hacia el sur fueron débiles y difusos ya que predominan frentes de origen salino. Es posible que este mismo proceso ocurra en la desembocadura de los ríos más importantes al norte del golfo de Arauco.

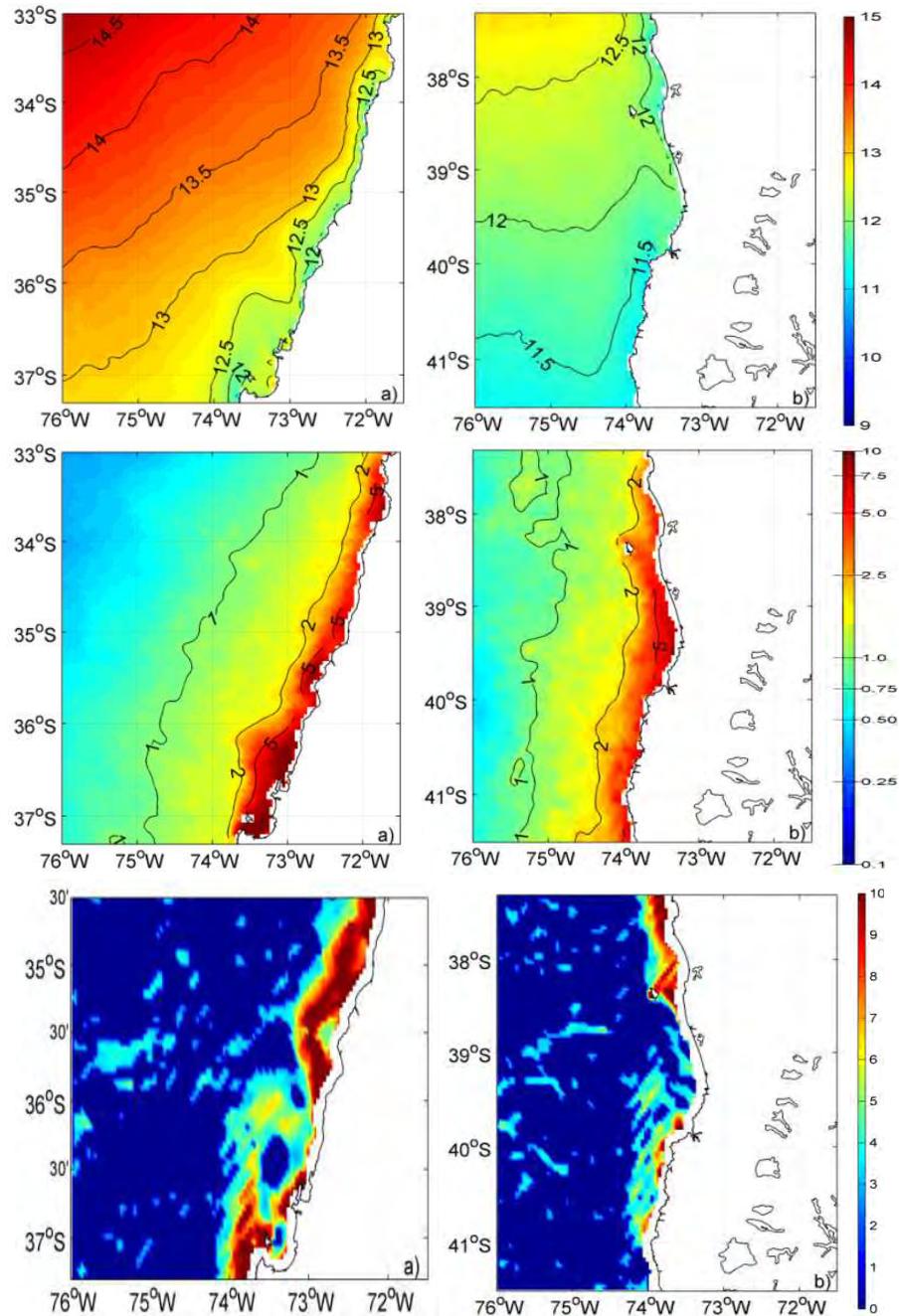


Figura A29. Panel superior: Distribución superficial promedio de temperatura ($^{\circ}\text{C}$). Panel intermedio: Distribución superficial promedio de clorofila ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$). Panel inferior: Bandas formadas por zonas frontales de origen térmico ($^{\circ}\text{C}/\text{km}$) en el sector costero de la región centro-sur de Chile.

Al igual que las corrientes, los frentes de origen térmico (Figura A30) presentan una diferencia estacional ya que están presentes claramente a partir de Noviembre, llegando a ser más intensos entre Enero y Abril para luego debilitarse y desaparecer completamente entre Julio y Octubre. Las magnitudes máximas observadas llegan a $5 \times 10^{-2} \text{ }^\circ\text{C/Km}$ formando una banda paralela a la costa. Es a partir de Abril/Mayo que comienzan a debilitarse los gradientes costa océano. La distribución de las zonas frontales aparecen asociadas al ascenso de las isolíneas en la costa, la banda de aguas más frías y a las mayores concentraciones de clorofila.

En el período de otoño-invierno, los frentes térmicos significativos ($>1 \times 10^{-2} \text{ }^\circ\text{C/Km}$) desaparecen para recién volver a aparecer a partir de Noviembre. La distribución espacial de los frentes encierran la región costera entre isla Mocha y Corral como también la plataforma continental entre punta Lavapié y la zona de la desembocadura del río Itata.

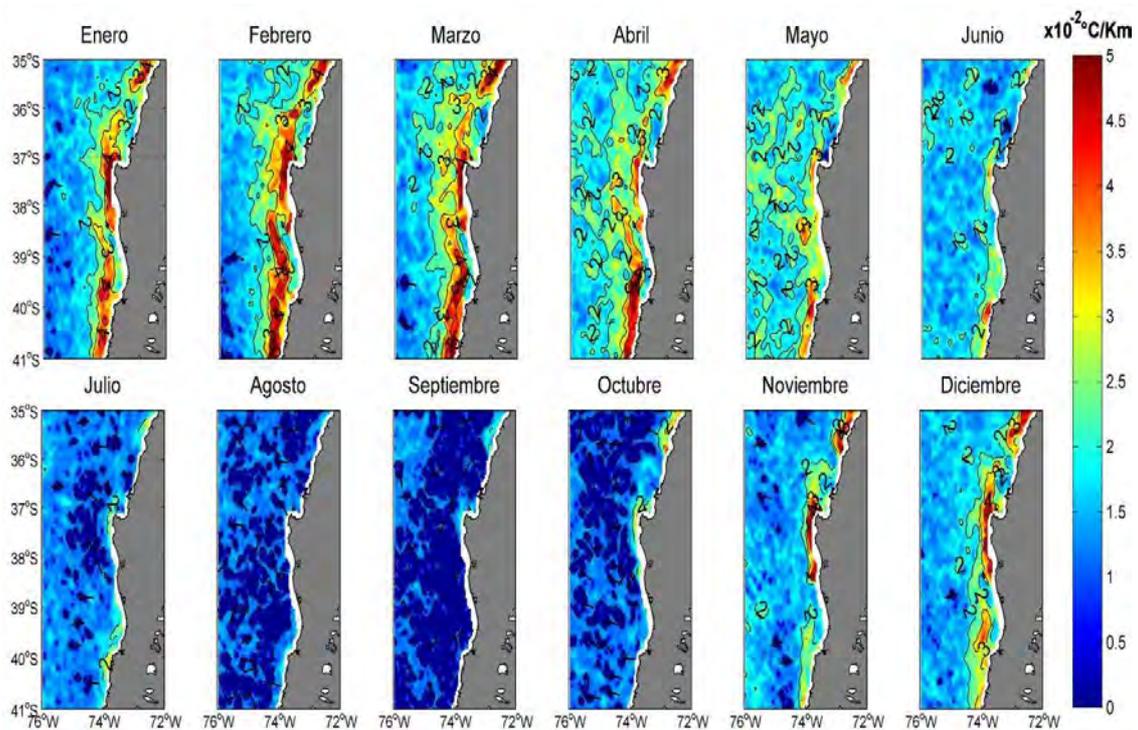


Figura A30. Climatología Mensual de las frentes de origen térmico en la zona centro sur de Chile. Climatología derivada de información satelital de TSM de MODIS-A.

A.10. Hidrografía a lo largo de la costa

La zona de desove de anchoveta zona centro sur de Chile (34,5°S a 41,5°S) tiene una serie de complejidades asociadas a la heterogeneidad topográfica, la variabilidad oceanográfica y meteorológica observada durante la primavera que es el período de desove de la sardina común y anchoveta (Bernal *et al.*, 2004; Cubillos *et al.*, 2006; Cubillos *et al.*, 2008, 2009, Cubillos *et al.*, 2010; Cubillos *et al.*, 2011; Cubillos *et al.*, 2013; Parada *et al.*, 2013).

Los resultados del campo hidrográfico de las variables conservativas y semiconservativas consideró la información recolectada en el período del término de invierno e inicios de la primavera durante: a) los cruceros de evaluación de stock desovante de anchoveta y sardina común en la región centro-sur de Chile (Agosto-Octubre de los años 2003 y 2014) entre los 34,5°S y los 41,5°S, y b) los cruceros realizados en la región costera del centro-sur de Chile asociados a la evaluación acústica de merluza común desarrollados en Agosto-Septiembre de los años 1997 y 2015, entre los 30°S y los 41°S. Las Figuras A30 a la A34 presentan la distribución horizontal superficial y a 10 m de profundidad y la distribución vertical (transectas perpendiculares y paralelas a la costa) de la hidrografía en el área de estudio. Esta información oceanográfica fue comparada respecto de la climatología de la zona de estudio reseñada en el Atlas Oceanográfico de Chile Volumen I, considerando los datos de crucero como válidos dentro de 4 desviaciones estándar respecto de la climatología (Alvarado, 2015).

A.10.1. Distribución horizontal en los primeros 50 metros de profundidad

Las distribuciones horizontales promedio (grillas interpoladas en la horizontal y vertical) permitió construir el campo hidrográfico promedio para la serie ensayada durante el período del término de invierno-inicios de primavera y caracterizar sus estructuras hidrográficas dominantes. Las transectas perpendiculares a la costa fueron situadas en los 36,5°S, 38,5°S y 39,5°S (Figura A31), en tanto que las transectas paralelas a la costa se situaron entre los 30 y 41°S (Figuras A32 a la A34).

La capa superficial de la columna de agua (Figura A31a) mostró temperaturas promedio comparativamente más altas al norte de los 36°S y entre los 40°S y 38°S, con valores entre 12,4°C y 11,6°C. En ambos casos se observó un leve descenso de la temperatura hacia el norte de cada sector. Por su parte, la salinidad en ambos estratos (0, 10 m) mostró salinidades comparativamente mayores al norte de los 37°S (golfo de Arauco), sector que muestra el dominio de la isohalina de 33,7 psu en el estrato superficial (sin presentar gradientes zonales ni meridionales de importancia), y entre 33,7 y 34,1 psu en el estrato de 10 metros de profundidad, evidenciando un leve gradiente positivo a la costa. En tanto, al sur de los 38°S, las salinidades fueron comparativamente más bajas, evidenciando un rango de fluctuación similar en ambos estratos (entre 32,7 y 33,1 psu) siendo levemente menos salina en superficie presumiblemente por el efecto de mezcla con aguas de origen continental asociadas a los ríos Imperial, Toltén y al complejo Valdivia-Tornagaleones (Figura A31a).

Por su parte, la densidad del agua de mar en el estrato superficial, reveló que al norte de los 37°S la variable parece estar asociada a la distribución de salinidad, dividiendo la zona por un frente asociado a la por la isopicna de 25,8 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$); en tanto que, al sur de los 38°S se observaron menores densidades en ambos estratos, quedando bien caracterizadas por las isopicnas de 24,8-25,1 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (en superficie, Figura A31a) y 25,0-25,2 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (a 10 m de profundidad, Figura A31b), siendo consistentes con la leve variación meridional de la salinidad. A los 50 m de profundidad, las distribuciones de temperatura, salinidad y densidad mostraron una menor variabilidad aunque con rangos similares a los descritos en las capas superiores. La temperatura (11,3° a 10,9°C) siguió mostrando el gradiente meridional positivo hacia el norte. la distribución de salinidad al norte de punta Lavapié se observó más homogénea, con valores centrados en 34,3 psu, en tanto que al sur de punta Lavapié se registró valores promedios entre 33,7 y 34,1 psu.

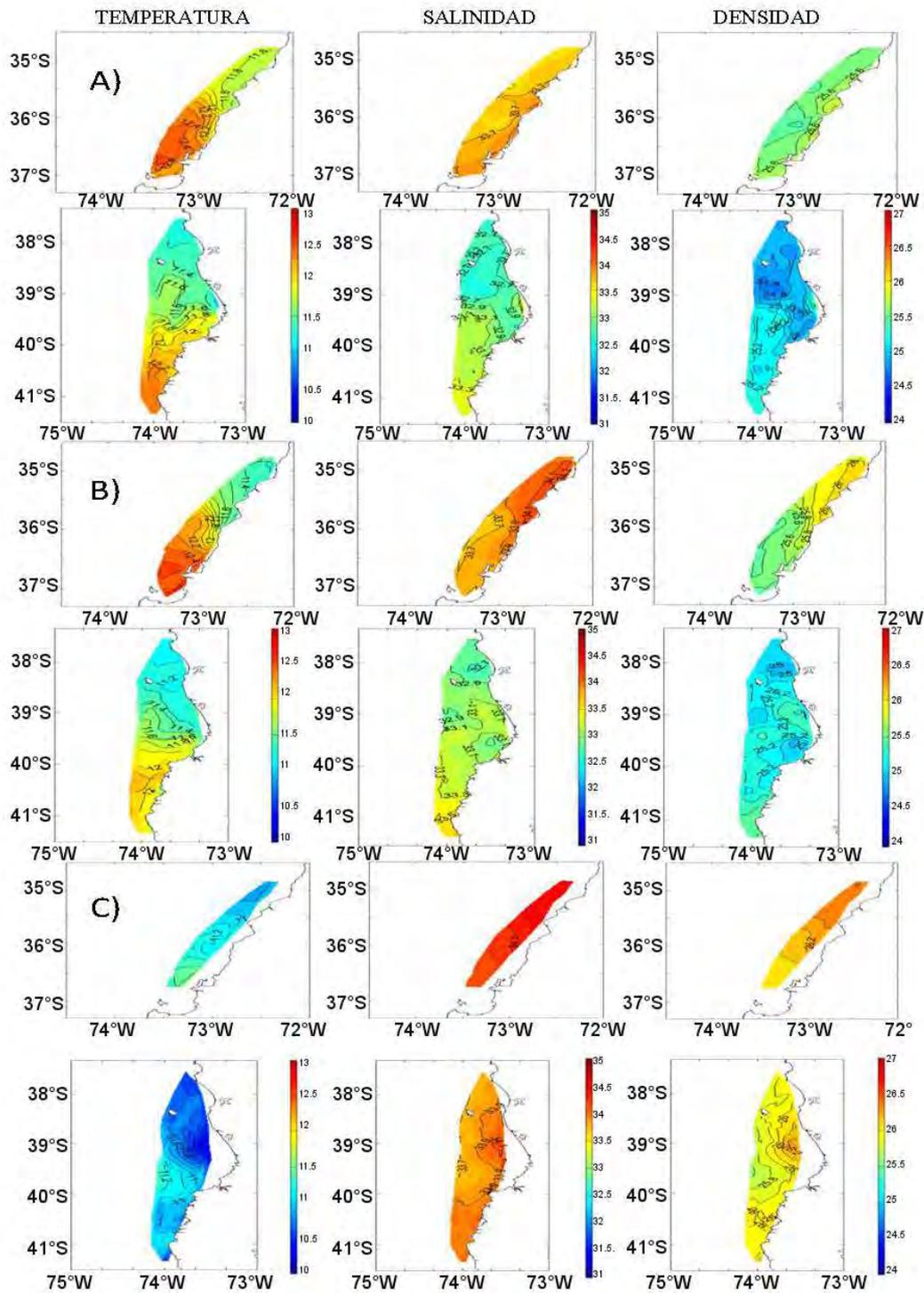


Figura A31. Distribución promedio de la temperatura del mar ($^{\circ}\text{C}$), salinidad (psu) y densidad (Kg m^{-3}), al norte y al sur de punta Lavapié. Panel superior (A) Estrato superficial. Panel intermedio (B) estrato de 10 m de profundidad. Panel inferior (C) estrato de 50 m de profundidad.

A.10.2. Distribución vertical (secciones perpendiculares y paralelas a la costa)

La Figura A32 muestra la distribución promedio de la temperatura, salinidad y densidad del agua de mar, durante el período primaveral (Agosto-October), en transectas perpendiculares a la costa ubicadas en las latitudes 36,5°S, 38,5°S y 39,5°S. En la transecta ubicada en 36,5°S las isolíneas muestran un ascenso hacia a costa, situación típica de la distribución zonal en una zona con surgencia costera, la que es predominante en los meses de primavera-verano en la región central de Chile. Las temperaturas que afloran son del orden de 12,4°C, mientras que las isohalinas e isopicnas (que ascienden en toda la columna de agua) son del orden de 33,8-33,9 psu y 25,6-25,7 kg m⁻³, respectivamente, mostrando una banda costera de mayores densidades y un frente costero alrededor de los 73-73,5°W.

La transecta ubicada en los 38,5°S, al sur de punta Lavapié, mostró isolíneas que no ascienden típicamente hacia la costa sino similares a un sistema estratificado. Esta distribución mostró una perturbación entre los 73,8°W y 74°W que se manifestó en las isohalinas e isopicnas revelando un núcleo de agua salobre o menos salina probablemente asociado a un intenso flujo a lo largo de la costa en los primeros 10 metros de la columna de agua y a 35 km de la costa. Este tipo de flujo favorece la estratificación vertical y la formación de frentes costeros salinos hacia la costa del flujo y hacia el oeste del flujo. Las isotermas bajo los 20 metros presentaron un muy leve alzamiento cerca de la costa, en tanto que los valores de salinidad se incrementan en profundidad (32,7 a 33,9 psu) lo mismo que la densidad (24,9 kg·m⁻³ a 26 kg·m⁻³). Para la transecta situada en los 39,5°S, el núcleo de baja salinidad aparece a los 10 km de la costa, asociado al hundimiento de las isotermas e isopicnas, es decir, evidenciando un flujo superficial a lo largo de la costa y sobre los 20 metros de profundidad. Lo anterior confirma un flujo de agua salobre que favorece la formación de frentes de origen salino cercanos a la costa. Para las transectas paralelas a la costa, y con el propósito de extender el rango meridional del análisis hidrográfico (al rango entre 30°S y 41°S), se utilizó la información recopilada de los cruceros acústicos de merluza común realizados a lo largo de la costa entre Agosto-Septiembre de la serie 1997-2015, siguiendo una sección definida en el punto medio de las transectas perpendiculares a la costa asociadas a dichos cruceros.

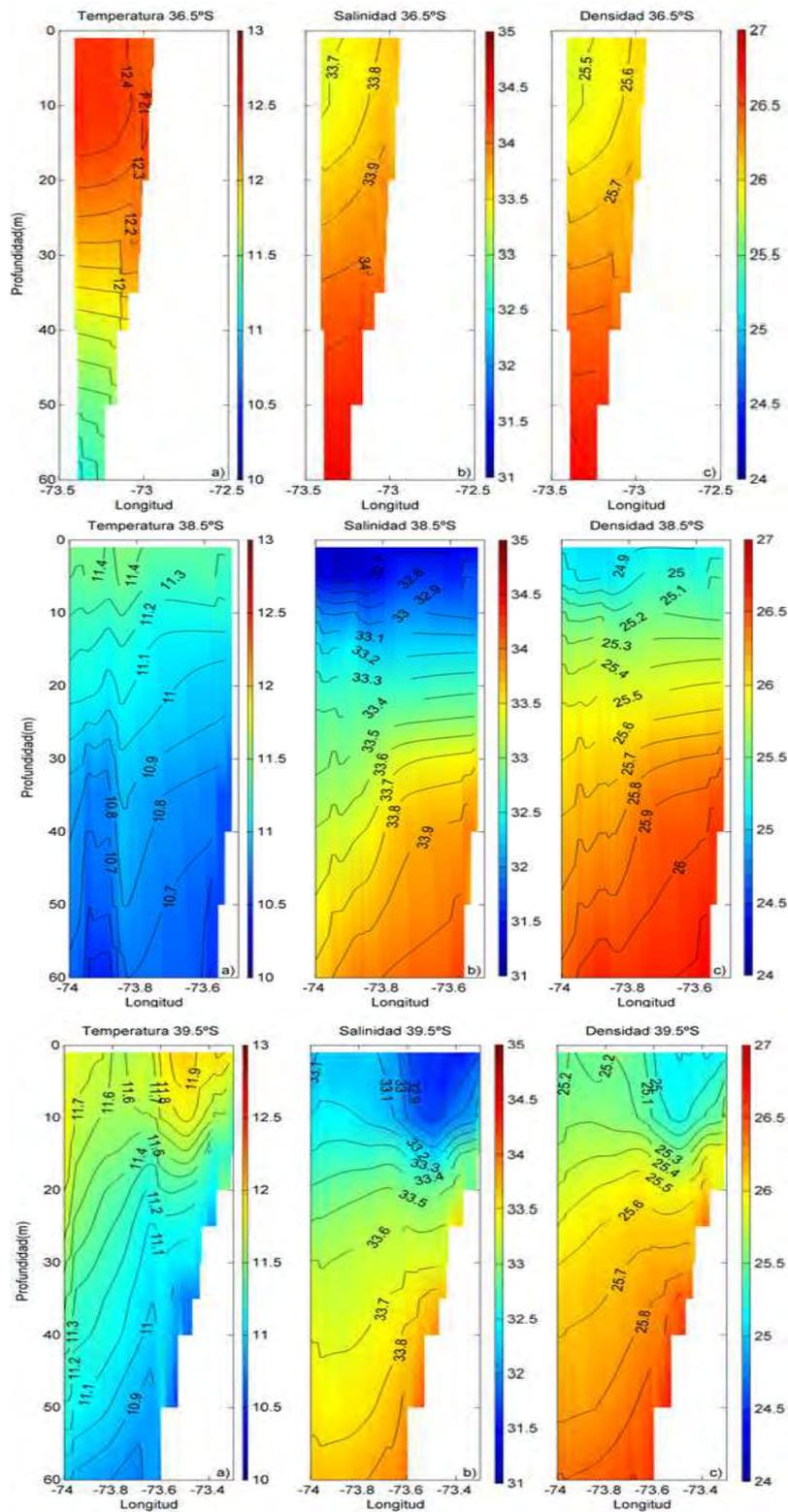


Figura A32. Distribución promedio de la temperatura (°C), salinidad y densidad (kg·m⁻³) en una transecta perpendicular a la costa ubicada

La Figura A33 muestra la transectas costera de temperatura hasta la profundidad de 200 m, demarcando el contorno de dos isotermas típicas (12°C contorno negro y la de 11°C color plomo) para analizar la evolución de la temperatura con la profundidad. Las distribuciones verticales de temperatura durante los 17 años ensayados revelan una alta variabilidad, asociada principalmente que la región sur está afectada por la divergencia de los vientos zonales, por la intrusión de aguas más frías provenientes de la zona de los fiordos y por plumas de ríos, y por otro lado aguas cálidas provenientes del norte por efectos de fenómenos interanuales.

Se observa la profundización de la isoterma de referencia (12°C) sobre los 150 para la costa norte en los años 1997 y 2015, además, durante esos dos periodos sobrepasa los 40° de latitud. Estas intrusiones provenientes del norte (y también aunque de menor magnitud en los años 2001, 2006) están asociadas claramente a efectos interanuales de eventos cálidos El Niño. Por el contrario, para el caso de eventos fríos La Niña (en los años 1999, 2000, 2007, 2010 y 2011) se evidencia una menor profundización de la isoterma de referencia. Por otro lado, en las distribuciones meridionales de la salinidad en la vertical (Figura A34) se demarca una isohalina típica (34,4 psu) para observar la evolución en profundidad durante la serie de años ensayados. Todas las transectas muestran una profundización de la isohalina de referencia hacia la región sur, y la presencia de aguas comparativamente menos salinas en los primeros 50-100 m de profundidad entre ~35-36°S hacia el extremo austral de la distribución (41°30'S): En años particularmente cálidos, la isohalina se profundiza bajo los 150 metros (El Niño 1997 y 2015), ocurriendo el fenómeno inverso durante los años fríos (La Niña). En general, la alta variabilidad de las distribuciones verticales de salinidad están asociada a efectos locales (aporte de aguas dulces y fiordos) y remotos (altas concentraciones asociadas a aguas subtropicales).

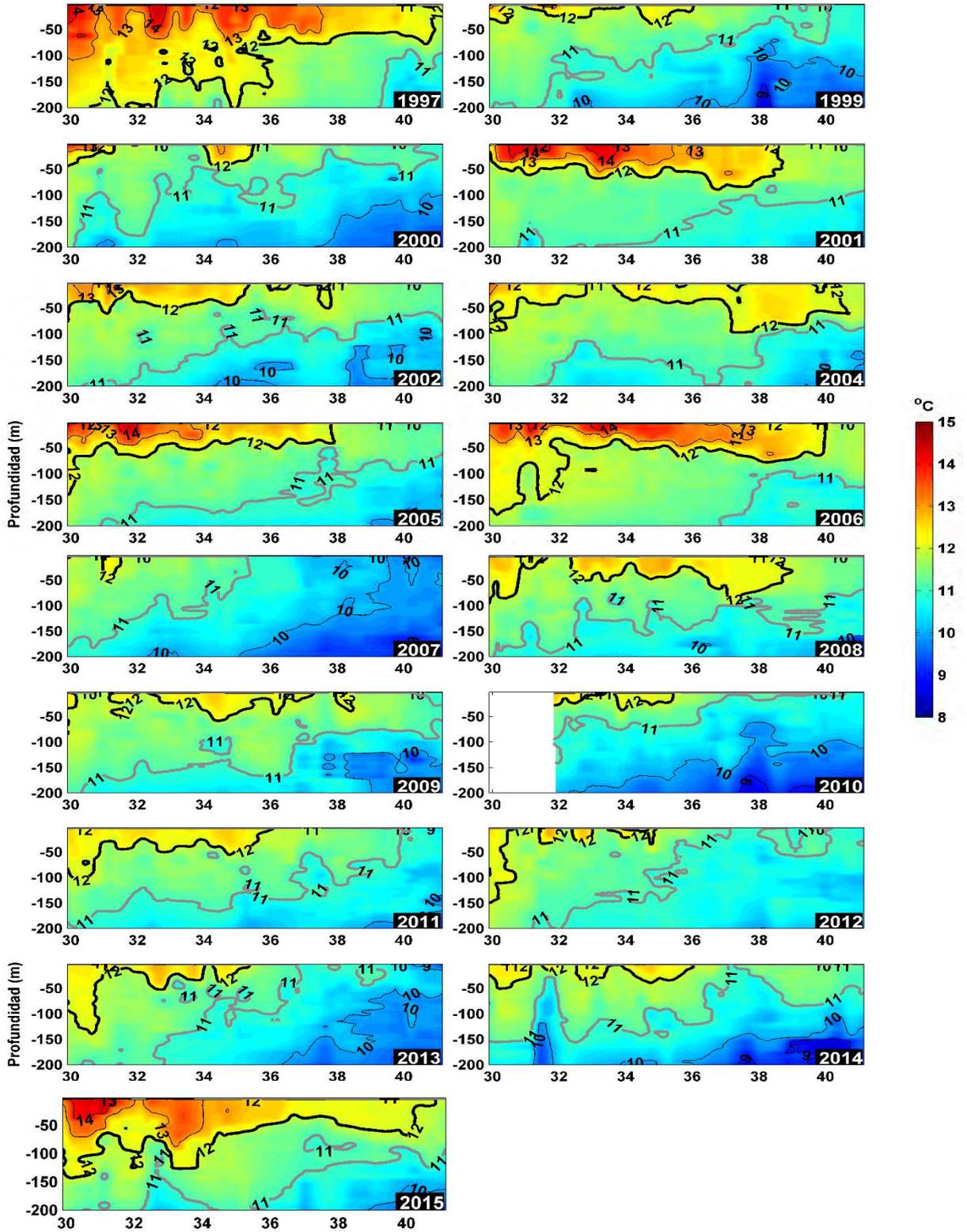


Figura A33. Muestreo hidrográfico (Temperatura, °C) a lo largo de la costa realizado en agosto de cada año, desde 1997 hasta el 2015.

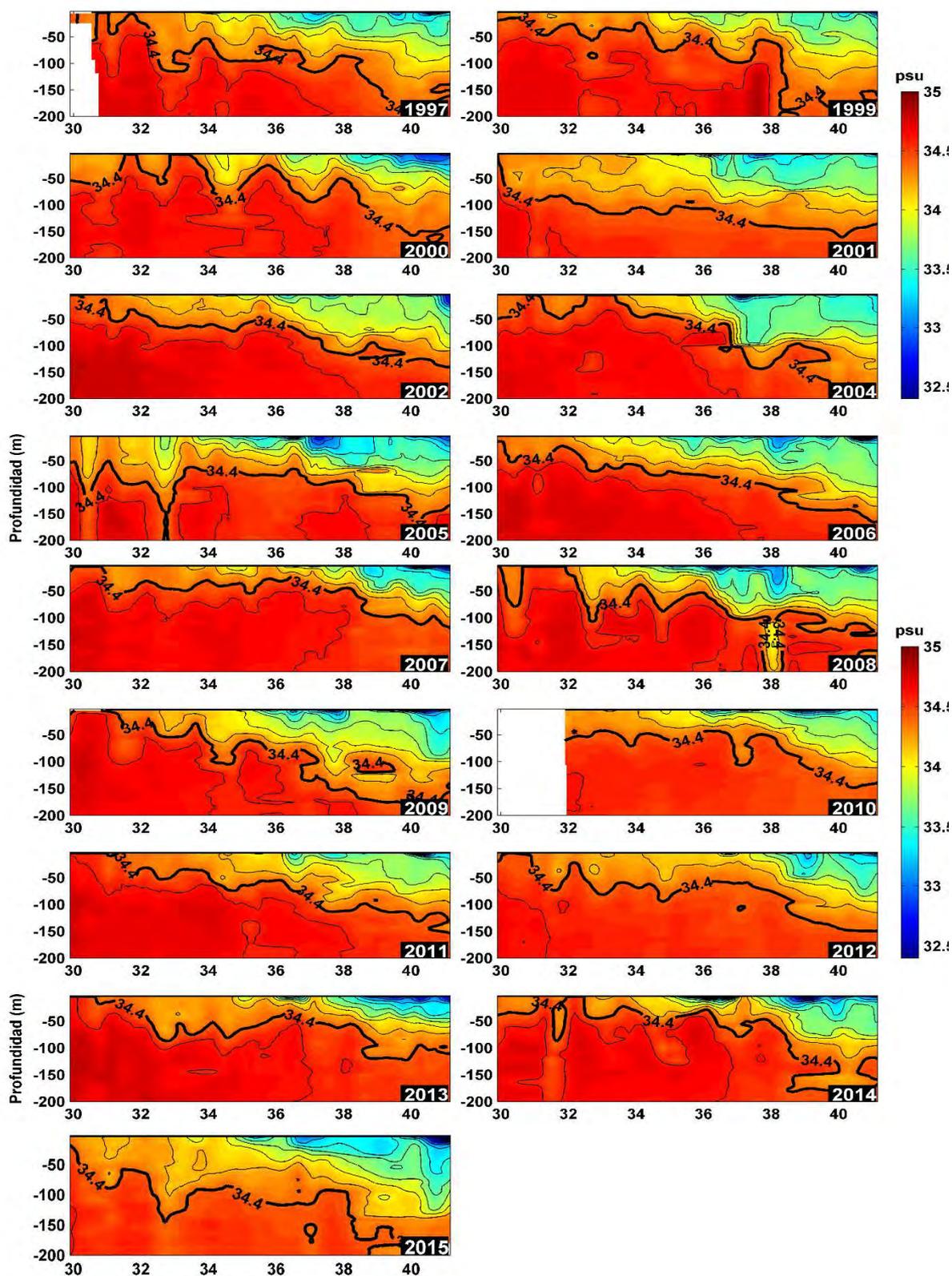


Figura A34. Muestreo hidrográfico (Salinidad, psu) a lo largo de la costa realizado en agosto de cada año, desde 1997 hasta el 2015.

Por su parte, la Figura A35 muestra la variabilidad interanual y meridional en la distribución vertical (0-200 m) de la concentración de oxígeno disuelto entre 1997-2015. Los resultados revelan la existencia de varios eventos interanuales importantes, como por ejemplo los eventos cálidos de El Niño que hacen profundizar las isolíneas de concentración de oxígeno en prácticamente todo el transecto, situando a la mínima de oxígeno (1 mL L^{-1}) por debajo de los 120-140 m, así como los eventos fríos La Niña (1999, 2000, 2007, 2010 y 2011) que evidencian un ascenso relevante de la mínima de oxígeno especialmente al norte de los 36°S situándose entre los 50-100 m de profundidad.

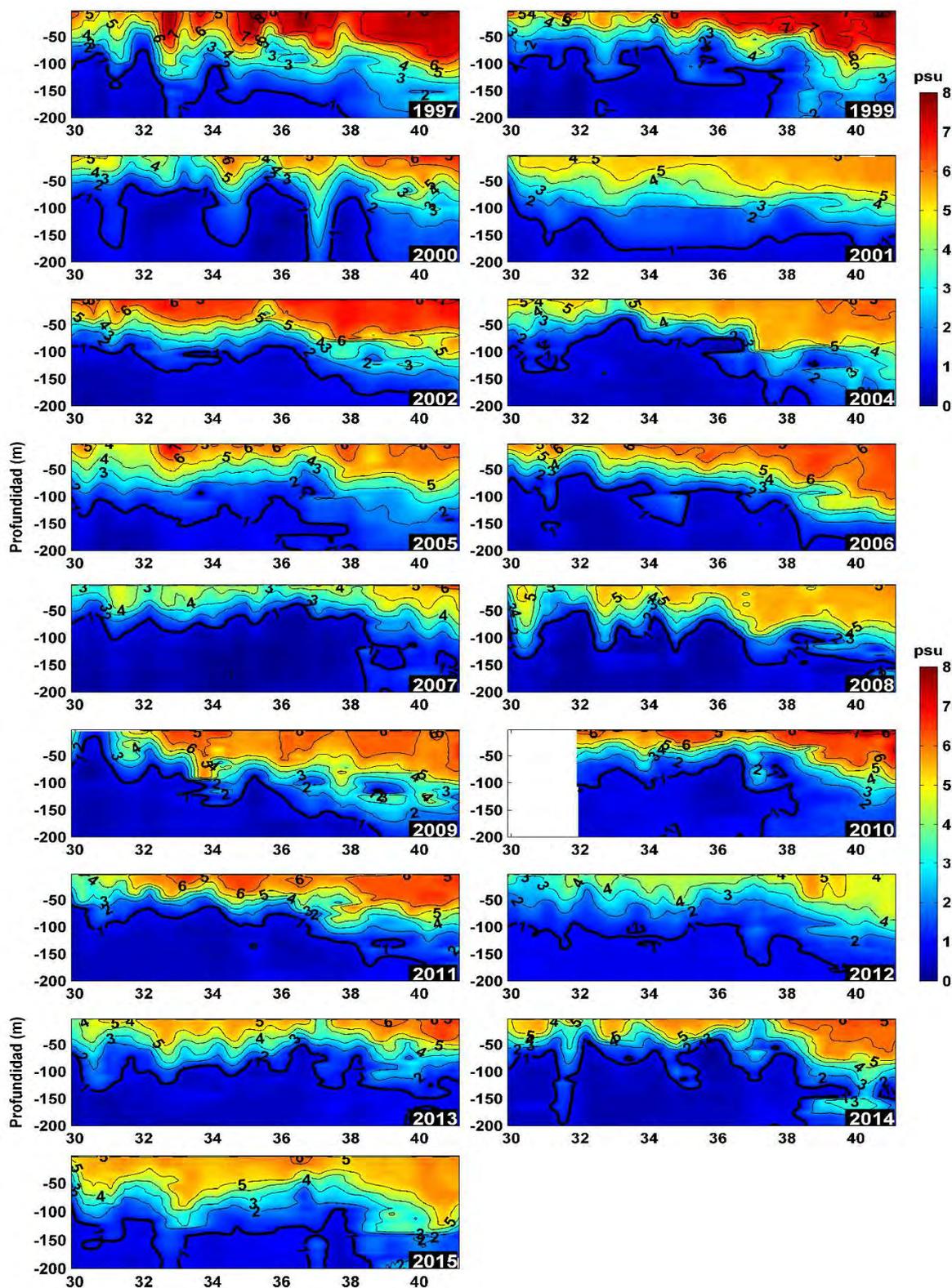


Figura A35. Muestreo hidrográfico (Oxígeno disuelto, mL L^{-1}) a lo largo de la costa realizado en agosto de cada año, desde 1997 hasta el 2015.

**Anexo II. Análisis comparativo entre experimentos de transporte pasivo (ETP)
y experimentos con comportamiento biológico (ECB) para la distribución
espacial de individuos 75 días posterior al desove.**

Tabla AI. Análisis comparativo entre 152 experimentos de transporte pasivo (ETP) y experimentos con comportamiento biológico (ECB) para la distribución espacial de individuos 75 días posterior al desove. Se presenta el test de agregación de Lloyd, el test de Mantel para evaluar homogeneidad espacial, y el test de Mann-Whitney-Wilcoxon para evaluar diferencias en la distancias recorridas (Transporte) y en el grado de advección (distancia de la costa).

Fecha de liberación del experimento			Test de agregación de Lloyd		Test de Mantel		Transporte (km)		Advección (km)		Test MWW (p-value)	
Año	Mes	Día	ECB	ETP	Correlación	p-value	ECB	ETP	ECB	ETP	Transporte	Advección
1994	8	7	5.8	1.12	0.16	0.02	258.1	265.3	138.1	170.5	p<0.001	p<0.001
1994	8	12	2.3	1.11	0.03	0.36	272.5	286.1	161.4	228.2	p<0.001	p<0.001
1994	8	17	3.1	1.11	0.01	0.47	277.2	231.2	179.4	182.1	p<0.001	p<0.001
1994	8	22	3.7	1.11	0.04	0.66	255.9	213.2	178.0	148.2	p<0.001	p<0.001
1994	8	27	2.3	1.10	0.04	0.63	233.2	225.7	153.3	138.8	p<0.001	p<0.001
1994	9	1	1.5	1.11	0.10	0.17	198.6	229.2	140.3	140.9	p<0.001	p<0.001
1994	9	6	1.3	1.10	0.01	0.46	195.0	242.1	135.3	174.7	p<0.001	p<0.001
1994	9	11	1.3	1.10	0.00	0.49	187.7	228.5	140.6	181.6	p<0.001	p<0.001
1994	9	16	1.4	1.10	0.06	0.28	199.1	221.8	150.1	166.3	p<0.001	p<0.001
1994	9	21	2.4	1.11	0.00	0.50	188.7	240.6	135.7	154.4	p<0.001	p<0.001
1994	9	26	1.7	1.13	0.04	0.65	185.1	222.9	121.1	151.8	p<0.001	p<0.001
1994	10	1	1.5	1.13	0.09	0.20	196.7	166.5	129.7	130.2	p<0.001	p<0.001
1994	10	6	1.4	1.12	0.09	0.78	212.7	179.2	142.5	154.8	p<0.001	p<0.001
1996	8	11	13.1	1.13	-0.05	0.74	210.3	317.2	132.4	251.7	p<0.001	p<0.001
1996	8	16	2.5	1.12	-0.09	0.80	223.5	498.9	145.4	474.3	p<0.001	p<0.001
1996	8	21	1.9	1.11	0.07	0.20	244.2	449.6	178.2	419.6	p<0.001	p<0.001
1996	8	26	1.8	1.14	-0.10	0.85	258.2	425.3	199.4	391.4	p<0.001	p<0.001
1996	8	31	1.7	1.14	-0.22	0.98	240.6	432.2	194.8	407.0	p<0.001	p<0.001
1996	9	5	2.1	1.15	0.00	0.51	258.0	425.2	209.6	414.5	p<0.001	p<0.001
1996	9	10	1.8	1.20	0.08	0.20	294.3	441.6	234.6	426.5	p<0.001	p<0.001
1996	9	15	1.4	1.16	0.12	0.18	277.3	282.7	226.0	240.6	p<0.001	p<0.001
1996	9	20	1.5	1.13	-0.01	0.53	277.4	200.9	231.5	160.5	p<0.001	p<0.001
1996	9	25	1.8	1.13	0.18	0.09	257.3	190.7	201.7	159.7	p<0.001	p<0.001
1996	9	30	1.5	1.13	-0.06	0.65	265.8	190.1	199.1	159.7	p<0.001	p<0.001
1996	10	5	1.6	1.12	-0.19	0.95	291.9	195.6	217.3	158.3	p<0.001	p<0.001
1996	10	10	1.5	1.13	-0.10	0.84	293.7	207.0	236.1	175.8	p<0.001	p<0.001
1996	10	15	1.8	1.12	-0.02	0.56	299.5	235.1	233.0	201.2	p<0.001	p<0.001
1996	10	20	1.7	1.12	0.08	0.20	289.1	260.0	230.2	232.8	p<0.001	p<0.001
1996	10	25	1.5	1.11	-0.11	0.89	318.6	249.5	259.2	230.0	p<0.001	p<0.001
1998	7	30	1.5	1.10	0.08	0.27	301.5	511.6	194.9	527.6	p<0.001	p<0.001
1998	8	4	1.3	1.10	-0.07	0.72	298.5	555.3	211.9	565.9	p<0.001	p<0.001

Tabla AI (...continuación). Análisis comparativo entre 152 experimentos de transporte pasivo (ETP) y experimentos con comportamiento biológico (ECB) para la distribución espacial de individuos 75 días posterior al desove. Se presenta el test de agregación de Lloyd, el test de Mantel para evaluar homogeneidad espacial, y el test de Mann-Whitney-Wilcoxon para evaluar diferencias en la distancias recorridas (Transporte) y en el grado de advección (distancia de la costa).

Fecha de liberación del experimento			Test de agregación de Lloyd		Test de Mantel		Transporte (km)		Advección (km)		Test MWW (p-value)	
Año	Mes	Día	ECB	ETP	Correlación	p-value	ECB	ETP	ECB	ETP	Transporte	Advección
1998	8	9	1.5	1.10	0.02	0.43	297.9	628.7	217.7	626.8	p<0.001	p<0.001
1998	8	14	1.3	1.08	-0.10	0.88	332.9	478.2	244.0	459.8	p<0.001	p<0.001
1998	8	19	1.4	1.08	-0.02	0.62	352.6	387.0	276.8	372.0	p<0.001	p<0.001
1998	8	24	1.5	1.08	0.07	0.21	326.6	416.3	251.2	408.5	p<0.001	p<0.001
1998	8	29	1.5	1.09	-0.10	0.85	310.4	420.4	231.3	406.2	p<0.001	p<0.001
1998	9	3	1.5	1.08	-0.01	0.56	318.4	387.1	243.7	352.4	p<0.001	p<0.001
1998	9	8	1.5	1.09	0.03	0.36	338.7	381.4	263.5	349.0	p<0.001	p<0.001
1998	9	13	1.4	1.09	-0.01	0.53	325.1	416.1	261.2	391.7	p<0.001	p<0.001
1998	9	18	1.5	1.09	0.08	0.20	383.2	392.4	327.9	372.6	p<0.001	p<0.001
1998	9	23	1.7	1.09	0.05	0.29	406.5	466.5	333.8	452.6	p<0.001	p<0.001
1998	9	28	1.9	1.10	0.03	0.37	381.5	447.7	319.8	422.4	p<0.001	p<0.001
2000	9	8	3.6	1.15	-0.03	0.57	216.2	382.3	123.3	362.4	p<0.001	p<0.001
2000	9	13	2.5	1.16	-0.12	0.83	209.5	447.0	127.6	415.4	p<0.001	p<0.001
2000	9	18	2.6	1.13	-0.08	0.71	201.6	366.5	148.3	342.7	p<0.001	p<0.001
2000	9	23	1.9	1.13	0.23	0.02	205.3	245.0	162.1	145.6	p<0.001	p<0.001
2000	9	28	1.8	1.15	0.00	0.50	193.4	242.3	156.1	164.7	p<0.001	p<0.001
2000	10	3	1.6	1.14	-0.02	0.57	220.0	236.2	185.7	192.5	p<0.001	p<0.001
2000	10	8	2.0	1.12	-0.10	0.87	234.2	251.3	194.9	222.9	p<0.001	p<0.001
2000	10	13	2.2	1.13	-0.04	0.66	235.5	274.6	202.3	255.2	p<0.001	p<0.001
2000	10	18	1.8	1.10	-0.16	0.96	245.5	299.4	191.9	273.7	p<0.001	p<0.001
2000	10	23	1.9	1.11	-0.09	0.86	268.9	288.3	181.4	252.3	p<0.001	p<0.001
2000	10	28	1.7	1.11	-0.03	0.60	235.2	296.1	166.7	207.4	p<0.001	p<0.001
2000	11	2	1.9	1.12	0.03	0.38	208.0	245.9	151.0	161.8	p<0.001	p<0.001
2000	11	7	3.2	1.14	0.04	0.34	209.7	211.8	151.0	148.6	p<0.001	p<0.001
2000	11	12	2.9	1.13	0.03	0.37	222.6	213.0	168.2	172.2	p<0.001	p<0.001
2002	8	28	9.0	1.25	-0.05	0.70	282.0	259.8	100.6	107.2	p<0.001	p<0.001
2002	9	2	2.0	1.22	0.20	0.03	262.5	415.8	95.3	360.9	p<0.001	p<0.001
2002	9	7	8.3	1.31	-0.14	0.94	267.5	351.2	97.1	160.2	p<0.001	p<0.001
2002	9	12	14.5	1.23	0.01	0.46	273.7	307.8	100.3	85.9	p<0.001	p<0.001
2002	9	17	19.1	1.23	0.09	0.21	261.7	295.7	106.5	82.8	p<0.001	p<0.001
2002	9	22	14.4	1.18	0.12	0.16	232.5	303.0	110.5	83.1	p<0.001	p<0.001

Tabla AI (...continuación). Análisis comparativo entre 152 experimentos de transporte pasivo (ETP) y experimentos con comportamiento biológico (ECB) para la distribución espacial de individuos 75 días posterior al desove. Se presenta el test de agregación de Lloyd, el test de Mantel para evaluar homogeneidad espacial, y el test de Mann-Whitney-Wilcoxon para evaluar diferencias en la distancias recorridas (Transporte) y en el grado de advección (distancia de la costa).

Fecha de liberación del experimento			Test de agregación de Lloyd		Test de Mantel		Transporte (km)		Advección (km)		Test MWW (p-value)	
Año	Mes	Día	ECB	ETP	Correlación	p-value	ECB	ETP	ECB	ETP	Transporte	Advección
2002	9	27	6.8	1.15	-0.04	0.67	232.6	275.8	114.5	90.2	p<0.001	p<0.001
2002	10	2	4.0	1.15	0.01	0.43	239.1	246.3	120.1	89.8	p<0.001	p<0.001
2002	10	7	3.4	1.14	0.12	0.10	209.5	241.7	125.0	102.8	p<0.001	p<0.001
2002	10	12	1.6	1.15	-0.06	0.72	192.9	239.2	129.2	122.6	p<0.001	p<0.001
2002	10	17	1.6	1.17	0.02	0.44	192.7	217.5	130.5	129.1	p<0.001	p<0.001
2002	10	22	1.7	1.11	0.25	0.02	226.4	225.7	160.0	142.3	p<0.001	p<0.001
2002	10	27	1.4	1.10	-0.17	0.94	261.8	278.4	173.2	187.0	p<0.001	p<0.001
2002	11	1	1.4	1.11	0.15	0.06	227.1	286.9	169.8	205.4	p<0.001	p<0.001
2002	11	6	1.8	1.15	0.01	0.46	200.9	221.9	169.7	194.2	p<0.001	p<0.001
2002	11	11	1.5	1.16	-0.02	0.58	206.4	210.2	171.8	184.7	p<0.001	p<0.001
2004	8	15	3.3	1.13	-0.05	0.65	185.5	422.0	122.4	391.8	p<0.001	p<0.001
2004	8	20	1.4	1.16	-0.06	0.77	178.9	349.6	114.3	319.3	p<0.001	p<0.001
2004	8	25	2.5	1.18	0.02	0.43	176.0	233.6	113.7	168.8	p<0.001	p<0.001
2004	8	30	3.2	1.17	0.35	0.00	170.4	178.5	116.0	115.3	p<0.001	p<0.001
2004	9	4	2.9	1.17	0.02	0.42	180.3	142.8	122.2	96.2	p<0.001	p<0.001
2004	9	9	1.8	1.15	-0.04	0.63	187.1	150.5	133.7	114.2	p<0.001	p<0.001
2004	9	14	2.0	1.14	0.10	0.20	192.1	164.5	136.6	124.3	p<0.001	p<0.001
2004	9	19	1.7	1.14	0.08	0.23	184.1	184.2	134.1	147.2	p<0.001	p<0.001
2004	9	24	1.9	1.14	0.21	0.05	172.0	176.9	124.4	142.5	p<0.001	p<0.001
2004	9	29	1.5	1.15	-0.11	0.81	172.0	174.8	119.7	143.0	p<0.001	p<0.001
2004	10	4	1.7	1.12	0.05	0.34	210.2	177.4	152.1	139.8	p<0.001	p<0.001
2004	10	9	1.8	1.12	0.03	0.40	220.8	229.9	164.9	158.0	p<0.001	p<0.001
2004	10	14	1.4	1.11	-0.03	0.60	220.0	258.3	166.7	172.4	p<0.001	p<0.001
2004	10	19	1.8	1.11	-0.06	0.80	267.8	290.4	211.9	209.5	p<0.001	p<0.001
2006	9	6	4.2	1.12	-0.07	0.75	217.7	549.6	130.7	540.9	p<0.001	p<0.001
2006	9	11	5.5	1.14	0.06	0.20	229.3	507.4	130.9	534.6	p<0.001	p<0.001
2006	9	16	3.2	1.15	-0.01	0.54	232.7	489.9	136.4	505.8	p<0.001	p<0.001
2006	9	21	3.2	1.12	0.00	0.48	235.7	538.4	147.7	543.5	p<0.001	p<0.001
2006	9	26	2.1	1.11	-0.15	0.87	254.9	240.6	184.2	127.4	p<0.001	p<0.001
2006	10	1	2.5	1.11	-0.21	0.95	253.4	261.5	194.9	134.8	p<0.001	p<0.001
2006	10	6	2.0	1.12	-0.07	0.73	258.3	244.9	200.1	150.0	p<0.001	p<0.001

Tabla AI (...continuación). Análisis comparativo entre 152 experimentos de transporte pasivo (ETP) y experimentos con comportamiento biológico (ECB) para la distribución espacial de individuos 75 días posterior al desove. Se presenta el test de agregación de Lloyd, el test de Mantel para evaluar homogeneidad espacial, y el test de Mann-Whitney-Wilcoxon para evaluar diferencias en la distancias recorridas (Transporte) y en el grado de advección (distancia de la costa).

Fecha de liberación del experimento			Test de agregación de Lloyd		Test de Mantel		Transporte (km)		Advección (km)		Test MWW (p-value)	
Año	Mes	Día	ECB	ETP	Correlación	p-value	ECB	ETP	ECB	ETP	Transporte	Advección
2006	10	11	1.6	1.12	-0.13	0.85	257.0	252.6	206.5	190.6	p<0.001	p<0.001
2006	10	16	1.4	1.11	0.04	0.34	277.2	285.5	226.0	234.3	p<0.001	p<0.001
2006	10	21	1.5	1.10	0.08	0.19	258.4	315.9	189.4	266.3	p<0.001	p<0.001
2006	10	26	2.0	1.10	0.14	0.14	263.1	300.5	204.2	268.4	p<0.001	p<0.001
2006	10	31	3.1	1.10	-0.08	0.74	282.3	295.1	232.7	294.9	p<0.001	p<0.001
2006	11	5	4.9	1.12	-0.05	0.66	282.6	330.5	244.4	338.6	p<0.001	p<0.001
2008	8	21	1.2	1.24	-0.13	0.83	236.3	518.1	113.4	535.7	p<0.001	p<0.001
2008	8	26	1.7	1.22	-0.01	0.57	239.9	449.3	123.0	404.4	p<0.001	p<0.001
2008	8	31	2.4	1.23	-0.11	0.83	225.8	265.4	122.7	106.1	p<0.001	p<0.001
2008	9	5	2.4	1.13	0.10	0.18	202.7	256.3	139.9	117.4	p<0.001	p<0.001
2008	9	10	2.1	1.15	0.15	0.14	200.4	244.1	146.2	134.8	p<0.001	p<0.001
2008	9	15	1.4	1.14	-0.12	0.82	208.2	232.2	158.4	144.5	p<0.001	p<0.001
2008	9	20	1.5	1.14	0.16	0.13	206.6	225.5	167.6	150.0	p<0.001	p<0.001
2008	9	25	1.6	1.18	-0.26	0.97	212.2	207.3	179.9	161.8	p<0.001	p<0.001
2008	9	30	1.6	1.12	-0.16	0.89	241.9	237.5	204.7	195.9	p<0.001	p<0.001
2008	10	5	1.5	1.09	0.06	0.24	274.4	275.7	227.6	229.2	p<0.001	p<0.001
2008	10	10	1.9	1.08	0.08	0.12	337.5	345.2	283.9	270.7	p<0.001	p<0.001
2010	9	11	1.4	1.11	0.13	0.12	248.7	599.8	219.4	602.0	p<0.001	p<0.001
2010	9	16	1.4	1.11	-0.13	0.85	285.0	512.3	258.5	493.5	p<0.001	p<0.001
2010	9	21	1.4	1.10	0.08	0.26	290.3	504.2	273.7	494.9	p<0.001	p<0.001
2010	9	26	1.3	1.10	0.16	0.06	321.2	395.3	308.1	383.3	p<0.001	p<0.001
2010	10	1	1.3	1.10	-0.06	0.74	305.7	377.1	288.6	364.8	p<0.001	p<0.001
2010	10	6	1.3	1.10	0.04	0.34	303.9	383.3	281.8	379.6	p<0.001	p<0.001
2010	10	11	1.3	1.12	-0.03	0.65	299.3	388.1	278.2	386.1	p<0.001	p<0.001
2010	10	16	1.3	1.11	0.28	0.00	321.8	360.9	301.6	352.6	p<0.001	p<0.001
2010	10	21	1.4	1.11	0.07	0.21	332.4	339.6	311.4	330.4	p<0.001	p<0.001
2010	10	26	1.3	1.10	0.00	0.50	346.4	391.0	322.2	382.3	p<0.001	p<0.001
2010	10	31	1.4	1.09	0.08	0.19	376.2	400.1	349.8	399.7	p<0.001	p<0.001
2010	11	5	1.5	1.09	-0.06	0.76	336.3	419.0	303.2	414.6	p<0.001	p<0.001
2010	11	10	1.5	1.09	0.06	0.24	344.7	421.7	319.4	414.8	p<0.001	p<0.001
2012	9	3	1.4	1.11	-0.05	0.71	275.3	390.8	220.6	373.0	p<0.001	p<0.001

Tabla AI (...continuación). Análisis comparativo entre 152 experimentos de transporte pasivo (ETP) y experimentos con comportamiento biológico (ECB) para la distribución espacial de individuos 75 días posterior al desove. Se presenta el test de agregación de Lloyd, el test de Mantel para evaluar homogeneidad espacial, y el test de Mann-Whitney-Wilcoxon para evaluar diferencias en la distancias recorridas (Transporte) y en el grado de advección (distancia de la costa).

Fecha de liberación del experimento			Test de agregación de Lloyd		Test de Mantel		Transporte (km)		Advección (km)		Test MWW (p-value)	
Año	Mes	Día	ECB	ETP	Correlación	p-value	ECB	ETP	ECB	ETP	Transporte	Advección
2012	9	3	1.4	1.11	-0.05	0.71	275.3	390.8	220.6	373.0	p<0.001	p<0.001
2012	9	8	1.4	1.11	-0.05	0.69	255.6	405.7	212.0	385.1	p<0.001	p<0.001
2012	9	13	1.3	1.11	0.07	0.24	259.4	455.4	215.4	417.6	p<0.001	p<0.001
2012	9	18	2.0	1.11	0.03	0.39	244.6	481.0	204.2	453.6	p<0.001	p<0.001
2012	9	23	2.0	1.12	-0.14	0.89	235.6	512.8	193.6	500.5	p<0.001	p<0.001
2012	9	28	1.3	1.10	-0.01	0.53	236.1	345.6	193.8	303.2	p<0.001	p<0.001
2012	10	3	1.5	1.10	-0.12	0.85	249.3	297.5	197.6	247.2	p<0.001	p<0.001
2012	1	8	1.5	1.10	-0.09	0.81	255.0	296.7	205.9	253.8	p<0.001	p<0.001
2012	10	13	1.5	1.10	-0.05	0.67	270.4	281.6	226.2	239.8	p<0.001	p<0.001
2012	10	18	1.4	1.09	-0.04	0.66	256.6	287.7	216.8	242.3	p<0.001	p<0.001
2012	10	23	1.5	1.09	0.12	0.08	255.8	282.3	213.4	245.7	p<0.001	p<0.001
2012	10	28	1.9	1.09	0.06	0.22	251.7	294.6	215.1	253.9	p<0.001	p<0.001
2012	11	2	1.5	1.08	-0.16	0.98	283.8	325.0	252.7	287.1	p<0.001	p<0.001
2012	11	7	1.4	1.08	0.02	0.41	313.8	373.2	284.5	324.7	p<0.001	p<0.001
2012	11	12	2.0	1.11	0.03	0.39	295.8	316.1	271.9	305.6	p<0.001	p<0.001
2014	7	25	38.9	1.64	0.01	0.46	351.4	452.8	84.7	55.6	p<0.001	p<0.001
2014	7	30	7.6	1.30	0.21	0.04	345.7	372.6	89.0	121.3	p<0.001	p<0.001
2014	8	4	9.3	1.21	0.15	0.14	351.9	396.9	84.4	61.0	p<0.001	p<0.001
2014	8	9	8.9	1.29	0.00	0.48	348.1	422.3	85.5	59.7	p<0.001	p<0.001
2014	8	14	7.4	1.34	-0.05	0.64	340.8	443.8	81.1	61.3	p<0.001	p<0.001
2014	8	19	9.7	1.29	-0.07	0.67	346.1	446.2	86.2	59.4	p<0.001	p<0.001
2014	8	24	10.0	1.45	-0.02	0.53	341.4	439.5	87.7	64.1	p<0.001	p<0.001
2014	8	29	13.5	1.36	0.05	0.65	315.2	418.9	84.6	67.0	p<0.001	p<0.001
2014	9	3	7.3	1.23	0.01	0.52	253.6	354.9	88.4	79.1	p<0.001	p<0.001
2014	9	8	6.2	1.23	0.03	0.62	194.7	284.9	89.0	87.8	p<0.001	p<0.001
2014	9	13	6.6	1.17	0.00	0.48	193.2	271.7	104.3	110.4	p<0.001	p<0.001
2014	9	18	7.3	1.15	0.08	0.78	179.8	261.5	105.8	106.1	p<0.001	p<0.001
2014	9	23	8.3	1.17	0.12	0.10	186.5	241.2	109.4	101.2	p<0.001	p<0.001

ANEXO III. Taller de Difusión y Discusión de resultados, Valparaíso.



Proyecto

"Estimación de índices de reclutamiento basado en variables y modelos biofísicos de pelágicos pequeños de la zona centro-sur de Chile, Fase II"

Financia: Fondo de Investigación Pesquera

Ejecuta: Instituto de Investigación Pesquera

Jefe de proyecto: Sebastián Vásquez Pastene

Valparaíso, miércoles 28 de Septiembre de 2016

Lugar: Hotel Diego de Almagro , Salón Concón. Molina 76, Valparaíso, Chile

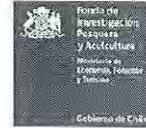
Programa

09:30 – 09:45:	Presentación del Proyecto FIP 2014-35 <i>Sebastián Vásquez P. (INPESCA)</i>	11:55 – 12:25:	Modelación Biofísica II: Proceso de transporte, patrones de conectividad y dinámica del reclutamiento de la anchoveta en la zona centro-sur de Chile. <i>Sebastián Vásquez P. (INPESCA)</i>
09:50 – 10:20:	Modelación Biofísica I: Esquema de modelación biofísica, aproximación metodológica y productos generados. <i>Sebastián Vásquez P. (INPESCA)</i>	12:30 – 13:00:	Evaluación del stock de anchoveta centro-sur de Chile: implicancias de indicadores biofísicos en el manejo pesquero. <i>Marcos Arteaga V. (INPESCA)</i>
10:25 – 10:50:	Modelación hidrodinámica del sector costero de Chile centro-sur, periodo 1994-2015. <i>Cristián Salas D. (INPESCA)</i>	13:05 – 13:35:	Emerging understanding of spawner and recruit processes and their application to fisheries management. <i>Andrés Ospina-Álvarez (CCM-PUC)</i>
10:55 – 11:15:	PAUSA CAFÉ	13:40 – 14:00:	Discusión y Conclusiones.
11:20 – 11:50:	Caracterización oceanográfica del sector costero de Chile centro-sur asociada al transporte de estadios tempranos de anchoveta. <i>Sergio Núñez E. (INPESCA)</i>		

Lista de Participantes en Taller de Difusión FIP 2014-35. Valparaíso



Taller de difusión de resultados



Proyecto FIP 2014-35 "Estimación de índices de reclutamiento basado en variables y modelos biofísicos de pelágicos pequeños de la zona centro-sur de Chile, Fase II"

Lista de asistentes

Nombre	Institución	Firma
Patricio Hermambly	Resa. LANDES	[Firma]
Ursula Lipentes	IFOP	[Firma]
Christian Galdames	Udegon	[Firma]
N. DELPITA		[Firma]
Sergio Núñez Erazo	Fund. Inv. Resque	[Firma]
Cristian Ruiz	Instituto Suroeste	[Firma]
Karen Walker	IFOP	[Firma]
Bernardo González	P. Bolivia Consul	[Firma]
Andrés Cepeda	CCM - PUC	[Firma]
Miriam Pedraza	SUBSECRETARIA DE PESCA	Miriam Pedraza
CRISTIAN SALAS	IN PESCA	[Firma]
Nicole Matzmann	SUBPESCA	[Firma]
H. Augusto Bastian	SUBPESCA	[Firma]
Victor Espeso B	SSPA	[Firma]
Silvia Flecondina	SSPA	[Firma]
D. Camila Bustos	SSPA	[Firma]
Jorge Castillo	IFOP	[Firma]
AQUILAS SEPULVEDA	INPESCA	[Firma]
Marcos Antezaga	INPESCA	[Firma]

ANEXO IV. Taller de Difusión y Discusión de resultados, Talcahuano.



Proyecto

"Estimación de índices de reclutamiento basado en variables y modelos biofísicos de pelágicos pequeños de la zona centro-sur de Chile, Fase II"

Financia: Fondo de Investigación Pesquera

Ejecuta : Instituto de Investigación Pesquera

Jefe de proyecto: Sebastián Vásquez Pastene

Talcahuano, miércoles 12 de Octubre de 2016

Lugar: Auditorio Instituto de Investigación Pesquera, Av. Colon 2780, Talcahuano.

Programa

09:30 – 09:45:	Presentación del Proyecto FIP 2014-35 <i>Sebastián Vásquez P. (INPESCA)</i>	11:55 – 12:25:	Caracterización oceanográfica del sector costero de Chile centro-sur asociada al transporte de estadios tempranos de anchoveta. <i>Sergio Núñez E. (INPESCA)</i>
09:50 – 10:20:	Emerging understanding of spawner and recruit processes and their application to fisheries management. <i>Andrés Ospina-Álvarez (CCM-PUC)</i>	12:30 – 13:00:	Modelación Biofísica II: Proceso de transporte, patrones de conectividad y dinámica del reclutamiento de la anchoveta en la zona centro-sur de Chile. <i>Sebastián Vásquez P. (INPESCA)</i>
10:25 – 10:50:	Modelación Biofísica I: Esquema de modelación biofísica, aproximación metodológica y productos generados. <i>Sebastián Vásquez P. (INPESCA)</i>	13:05 – 13:35:	Evaluación del stock de anchoveta centro-sur de Chile: implicancias de indicadores biofísicos en el manejo pesquero. <i>Marcos Arteaga V. (INPESCA)</i>
10:55 – 11:15:	PAUSA CAFÉ	13:40 – 14:00:	Discusión y Conclusiones.
11:20 – 11:50:	Modelación hidrodinámica del sector costero de Chile centro-sur, periodo 1994-2015. <i>Cristián Salas D. (INPESCA)</i>		

Lista de Participantes en Taller de Difusión FIP 2014-35. Talcahuano



Taller de difusión de resultados



Proyecto FIP 2014-35 "Estimación de índices de reclutamiento basado en variables y modelos biofísicos de pelágicos pequeños de la zona centro-sur de Chile, Fase II"

Lista de asistentes

Nombre	Institución	e-mail	Firma
Carolina Medel	Univ. de Concepción	mariaacaramedel@udec.cl	
María José	IUPERLA	Mar@iuperla.cl	
Jacelynn Silva	INPESCA	jsilva@inpesca.cl	
EVELIN SANHUEJA	INPESCA	esanhueja@inpesca.cl	
Nicolás Alagris	Inpesca	nalagris@inpesca.cl	
ESTHER LISIACCA	BIUMAR S.A		
Renato Mayra	LANDE	RENATOCAMAYRA@gmail.com	
Roberto Corrales	P.B.C.	Roberto	
Peter Branas	Foodcorp	pbranas@fc.cl	
Luis Carlos Pardo	CPS	cpvard@cps.cl	
PATRICIA HERNANDEZ	CPS	patricia.hernandez@cps.cl	
ALEXANDRO TORRES	CPS	alexandro.torres@cps.cl	
Victoria Muñoz	CARROTA	vickymunoz@carrota.cl	
Roberto Carrales	Blumen	roberto.carrales@blumen.cl	
Alexandre Cortés	INPESCA		
Roberto Salazar	Asociación de Pesca	RobertoSalazar@asociaciondepesca.cl	
Gregorio Silva	ASOCIACIÓN DE LOS ROSAS		
Luis Cubillas	UDC	lucubillas@udc.cl	
Blanca Bustos	Udec.	blancabustos@udec.cl	
Pedro Carrasco	Inpesca	pcarrasco@inpesca.cl	
María Peiró	Inpesca	mpeiro@inpesca.cl	
Lidia Vilij	Inpesca	Lidvilij@inpesca.cl	
Andrés Daroch	Foodcorp	adaroch@fc.cl	
Clara del Pino	INPESCA	cdelpino@inpesca.cl	

