

**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° 2014-33**

**“Estructura Poblacional y  
Estimación de Índices de  
Reclutamiento de Jurel Basados  
en Modelos Biofísicos (fase I)”**

**Talcahuano, Mayo 2017**

**TITULO DEL PROYECTO** : Estructura poblacional y estimación de índices de reclutamiento de jurel basados en modelos biofísicos (fase I)

**REQUIRENTE** : Consejo de Investigación Pesquera, CIP  
Fondo de Investigación Pesquera  
Presidente CIP: Pablo Berazaluze M.

**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](mailto:svasquez@inpesca.cl)

---

**FIP N° 2014-33**

**"ESTRUCTURA POBLACIONAL Y ESTIMACIÓN DE ÍNDICES  
DE RECLUTAMIENTO DE JUREL BASADOS EN MODELOS  
BIOFÍSICOS (FASE I)"**

**Jefe Proyecto**

**Sebastián Vásquez Pastene**

**AUTORES**

**Sebastián Vásquez Pastene**

**Cristian Salas Domínguez**

**Aquiles Sepúlveda Oróstica**

**Sergio Núñez Elías**

**Luis Soto Mardones**

**Jaime Letelier Pino**

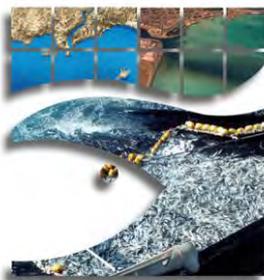
**Lilian Cisterna**

**Nicolás Alegría Landeros**

**Alexander Gretchina**

**Claudio Gatica Molina**

**Marcos Arteaga Vásquez**



**Instituto de  
Investigación  
Pesquera  
Octava Región**

Talcahuano (Chile), 2017

1	<b>INDICE DE CONTENIDOS</b>	
2		
3	<b>INDICE DE CONTENIDOS.....</b>	<b>1</b>
4	<b>INDICE DE TABLAS.....</b>	<b>7</b>
5	<b>INDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>9</b>
6	<b>1.- RESUMEN EJECUTIVO.....</b>	<b>17</b>
7	<b>2.- DESCRIPCION DE ACTIVIDADES DEL EQUIPO DE TRABAJO.....</b>	<b>20</b>
8	<b>3.- OBJETIVOS DEL PROYECTO .....</b>	<b>23</b>
9	<b>4.- ANTECEDENTES.....</b>	<b>25</b>
10	<b>i) Antecedentes del jurel y su estructura poblacional en el Pacifico suroriental</b>	<b>25</b>
11	<b>ii) La población de jurel como objeto de estudio mediante modelación biofísica</b>	<b>32</b>
12	<b>5.- METODOLOGÍA DE TRABAJO .....</b>	<b>36</b>
13	<b>5.1. Herramientas utilizadas .....</b>	<b>36</b>
14	<b>5.2. Modelo hidrodinámico.....</b>	<b>38</b>
15	<b>5.2.1. Descripción .....</b>	<b>38</b>
16	<b>5.2.2. Procesamiento de archivos de entrada.....</b>	<b>39</b>
17	<b>5.2.3. Grillas, dominios y resolución de las grillas .....</b>	<b>39</b>
18	<b>5.2.4. Resolución temporal .....</b>	<b>39</b>
19	<b>5.2.5. Forzantes del modelo .....</b>	<b>40</b>
20	5.2.5.1. Forzantes atmosféricos.....	40
21	5.2.5.2. Forzantes externos .....	40
22	<b>5.2.6. Condiciones iniciales y de borde.....</b>	<b>41</b>
23	<b>5.2.7. Configuración del modelo hidrodinámico .....</b>	<b>41</b>
24	<b>5.2.8. Simulaciones .....</b>	<b>42</b>
25	<b>5.2.9. Variables de salida del modelo hidrodinámico .....</b>	<b>42</b>
26	<b>5.2.10. Validación del modelo hidrodinámico .....</b>	<b>43</b>
27	5.2.10.1. Validación mediante el uso de información satelital.....	43
28	5.2.10.2. Validación de la estructura vertical a través del uso de datos in situ.....	45
29	5.2.10.3. El Niño Oscilación del Sur .....	46
30	5.2.10.4. Patrón de circulación superficial general.....	46
31	<b>5.3. Modelo biofísico .....</b>	<b>46</b>
32	<b>5.3.1. Sub-modelo de distribución espacial del desove .....</b>	<b>47</b>
33	5.3.1.1. Sub-área Chile centro-sur .....	48

1	5.3.1.2. Sub-área Perú .....	49
2	5.3.1.3. Sub-Norte de Chile .....	49
3	5.3.1.4. Generación de huevos virtuales (drifters) .....	49
4	5.3.1.5. Modelación espacial y ambiental de la abundancia de huevos de jurel.....	50
5	<b>5.3.2. Sub-modelo de distribución vertical del desove .....</b>	<b>52</b>
6	<b>5.3.3. Sub-modelo de sincronización temporal del desove .....</b>	<b>52</b>
7	<b>5.3.4. Sub-modelo de crecimiento .....</b>	<b>53</b>
8	5.3.4.1. Preparación de las secciones delgadas .....	54
9	5.3.4.2. Medición de las secciones delgadas.....	56
10	5.3.4.3. Ajustes modelos de crecimiento .....	56
11	<b>5.3.5. Sub-modelo de movimiento .....</b>	<b>58</b>
12	<b>5.3.6. Sub-modelo de mortalidad .....</b>	<b>59</b>
13	<b>5.3.7. Acoplamiento de modelo hidrodinámico y modelo biofísico.....</b>	<b>60</b>
14	5.3.7.1. Variables de estado, escalas y simulaciones .....	61
15	5.3.7.2. Simulaciones interanuales.....	61
16	5.3.7.3. Área y criterio de reclutamiento .....	62
17	5.3.7.4. Estocasticidad .....	62
18	<b>5.4. Principales forzantes que modulan el proceso de transporte y sobrevivencia de</b>	
19	<b>huevos, larvas y juveniles de jurel .....</b>	<b>62</b>
20	<b>5.4.1. Caracterización oceanográfica de las regiones de desove y reclutamiento .....</b>	<b>65</b>
21	5.4.1.1. Temperatura superficial del mar .....	65
22	5.4.1.2. Intensidad del viento .....	66
23	5.4.1.3. Esfuerzo del viento y velocidades geostróficas .....	66
24	5.4.1.4. Dinámica de la Deriva de Ekman .....	66
25	5.4.1.5. Funciones Ortogonales Empíricas (FOE) y Complejas (FOEC) .....	67
26	5.4.1.6. Determinación de variabilidad espacio-temporal del frente Sub-Tropical.....	69
27	5.4.1.7. Estructuras de meso-escala .....	70
28	5.4.1.8. Variabilidad espacio-temporal de la Deriva de los Vientos del Oeste.....	70
29	5.4.1.9. Variabilidad en la concentración de clorofila-a.....	71
30	<b>5.5. Indicadores de reclutamiento.....</b>	<b>71</b>
31	<b>5.5.1. Análisis espacial de la conectividad.....</b>	<b>71</b>
32	<b>5.5.2. Análisis temporal de la conectividad.....</b>	<b>73</b>
33	<b>5.5.3. Índice de reclutamiento biofísico.....</b>	<b>73</b>
34	<b>5.5.4. Análisis comparativo del reclutamiento.....</b>	<b>74</b>

1	5.5.4.1. Índice de reclutamiento asociado a la evaluación de stock.....	74
2	5.5.4.1.1. Datos e información utilizada en la Evaluación de stock de jurel .....	76
3	5.5.4.1.2. Descripción del modelo de evaluación de stock .....	78
4	5.5.4.2. Índice de reclutamiento asociado a la evaluación acústica .....	92
5	<b>5.6. Prueba de hipótesis y modelo conceptual de la estructura poblacional de jurel</b>	
6	.....	95
7	<b>6.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>98</b>
8	<b>6.1. Síntesis de la información biológica que sustenta el sistema de modelación biofísica:</b>	
9	<b>Sub-modelos.....</b>	<b>98</b>
10	6.1.1. <i>Sub-modelo</i> de distribución espacial del desove , generación de drifters.....	98
11	6.1.2. <i>Sub-modelo</i> de distribución vertical del desove.....	107
12	6.1.3. <i>Sub-modelo</i> de sincronización temporal del desove .....	109
13	6.1.4. <i>Sub-modelo</i> de crecimiento .....	111
14	6.1.5. <i>Sub-modelo</i> de movimiento.....	114
15	<b>6.2. Estructura y validación del modelo hidrodinámico.....</b>	<b>116</b>
16	6.2.1. Validación interanual por medio del uso de información satelital.....	116
17	6.2.2. Validación de la estructura vertical a través del uso de datos in situ .....	123
18	6.2.3. El Niño Oscilación del Sur .....	127
19	6.2.4. Patrón de circulación superficial general .....	129
20	<b>6.3. Zonas de crianza/reclutamiento en Chile Perú a partir de la modelación biofísica</b>	
21	.....	130
22	<b>6.4. Variables oceanográficas/biológicas que actúan como forzantes del transporte de</b>	
23	<b>huevos, larvas y juveniles de jurel .....</b>	<b>134</b>
24	6.4.1. <b>Caracterización oceanográfica en la región Suroriental del Pacífico .....</b>	<b>134</b>
25	6.4.1.1. Variabilidad espacio-temporal de la TSM, el esfuerzo del viento y la turbulencia	135
26	Temperatura superficial del mar .....	135
27	6.4.1.2. Variabilidad de la velocidad del transporte de Ekman .....	138
28	6.4.1.3. Variabilidad espacio-temporal de las corrientes geostróficas.....	140
29	6.4.1.4. Variabilidad espacio-temporal del frente Sub-Tropical.....	141
30	6.4.1.5. Variabilidad espacio-temporal de la Deriva de los Vientos del Oeste.....	147
31	6.4.1.6. Remolinos de mesoescala, energía cinética y transporte en el área de desove del	
32	Jurel.....	148
33	6.4.1.7. Energía cinética asociada a remolinos de meso-escala (EKE) .....	152

1	6.4.1.8. Dinámica del Esfuerzo del Viento, deriva de Ekman y TSM en la zona de la	
2	curvatura (Chile-Perú) .....	154
3	6.4.1.8.1. Temperatura Superficial del Mar, Transporte de Ekman y Velocidades	
4	geostróficas .....	155
5	6.4.1.8.2. Esfuerzo de Viento Meridional .....	156
6	6.4.1.8.3. Variabilidad del transporte superficial de Ekman .....	158
7	6.4.1.8.4. Variabilidad de la clorofila-a en la región de reclutamiento .....	158
8	6.4.1.9. Análisis integrado .....	161
9	6.4.1.10. Efecto de la velocidad del transporte de Ekman sobre la TSM en la región oceánica	
10	de desove frente a Chile central .....	162
11	6.4.1.11. Efecto de la geostrofia (CARS) superficial sobre la temperatura superficial del mar	
12	.....	162
13	6.4.1.12. Climatología de Temperatura Superficial del Mar versus el Esfuerzo del viento	163
14	<b>6.4.2. Análisis del acoplamiento físico-biológico relacionado con el desove y el proceso</b>	
15	<b>de transporte</b> .....	166
16	6.4.2.1. Área de desove principal del jurel y esfuerzo del viento .....	166
17	6.4.2.2. Área de desove principal del jurel y ubicación del Frente Subtropical .....	167
18	6.4.2.3. Procesos de dinámica oceanográfica relacionada con el transporte de huevos y	
19	larvas de jurel .....	169
20	<b>6.5. Índices de reclutamiento (1994-2014) para el jurel asociado a rasgos biofísicos en la</b>	
21	<b>región centro-sur de Chile y Perú.</b> .....	174
22	<b>6.5.1. Dinámica espacial del reclutamiento</b> .....	174
23	<b>6.5.2. Dinámica temporal del reclutamiento</b> .....	175
24	<b>6.6. Relación de conectividad entre la zona de desove-crianza en Chile Perú y su aporte al</b>	
25	<b>reclutamiento global.</b> .....	180
26	<b>6.7. Modelo conceptual de la estructura poblacional del jurel en el Pacífico Sur y las</b>	
27	<b>asociaciones a forzantes biofísicas relevantes.</b> .....	192
28	<b>6.7.1. Conceptualización de las hipótesis vigentes de estructura poblacional</b> .....	193
29	<b>6.7.2. Aplicación de hipótesis en la población de jurel del Pacífico sur</b> .....	194
30	6.7.2.1. Hipótesis de metapoblación en aguas frente las costas del Perú y Chile .....	194
31	6.7.2.2. Hipótesis de superpoblación y/o de población distribuida por parches .....	196
32	6.7.2.3. Evidencias del presente estudio hacia el establecimiento de un modelo conceptual de	
33	estructura poblacional .....	202

1	6.7.2.4. Rol de las dorsales oceánicas y bajos submarinos como áreas potenciales de	
2	desove/crianza.....	212
3	6.7.2.5. Una nueva propuesta de modelo conceptual de la estructura poblacional del jurel	
4	basada en rasgos biofísicos.....	214
5	<b>7. CONCLUSIONES.....</b>	<b>218</b>
6	<b>7.1. Modelación Hidrodinámica.....</b>	218
7	<b>7.2. Aspectos Oceanográficos.....</b>	218
8	<b>7.3. Modelación biofísica y estructura poblacional.....</b>	220
9	<b>8. TALLERES Y REUNIONES.....</b>	<b>223</b>
10	<b>9. COMENTARIOS DEL EXPERTO INTERNACIONAL.....</b>	<b>225</b>
11	<b>10. REFERENCIAS.....</b>	<b>240</b>

12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38

1	<b>INDICE DE ANEXOS</b>	
2		
3	<b>ANEXO I. Trayectorias de transporte de los individuos reclutados desde desoves mensuales</b>	
4	<b>(Agosto-Enero, de izquierda a derecha), periodo 1994-2013 (de arriba a abajo) ocurridos en</b>	
5	<b>la zona de desove de Perú y frecuencia de distribución latitudinal al interior de la zona de</b>	
6	<b>reclutamiento modelado (extremo derecho).....</b>	<b>253</b>
7		
8	<b>ANEXO II. Trayectorias de transporte de los individuos reclutados desde desoves</b>	
9	<b>mensuales (Agosto-Enero, de izquierda a derecha) , periodo 1994-2013 (de arriba a abajo)</b>	
10	<b>ocurridos en la zona de desove de Chile norte y frecuencia de distribución latitudinal al</b>	
11	<b>interior de la zona de reclutamiento modelado (extremo derecho).....</b>	<b>261</b>
12		
13	<b>ANEXO III. Trayectorias de transporte de los individuos reclutados desde desoves</b>	
14	<b>mensuales (Agosto-Enero, de izquierda a derecha) , periodo 1994-2013 (de arriba a abajo)</b>	
15	<b>ocurridos en la zona de desove de Chile centro-sur y frecuencia de distribución latitudinal</b>	
16	<b>al interior de la zona de reclutamiento modelado (extremo derecho).....</b>	<b>269</b>
17		
18	<b>ANEXO IV. Modelling the early life history of Jack mackerel in the Southeastern Pacific:</b>	
19	<b>an approach to population connectivity.....</b>	<b>277</b>
20	<b>ANEXO V. Análisis climatológicos y Funciones ortogonales empíricas asociadas a la</b>	
21	<b>descripción oceanográfica del área de estudio .....</b>	<b>278</b>
22		
23	<b>ANEXO VI. Taller de Difusión y Discusión de resultados.....</b>	<b>312</b>
24		
25	<b>ANEXO VII. Biophysical modelling of jack mackerel in the south-eastern Pacific Ocean: a</b>	
26	<b>step forward in understanding recruitment dynamics.....</b>	<b>316</b>
27		
28	<b>ANEXO VIII. Biophysical modelling to assess population connectivity and inter-annual</b>	
29	<b>variability in the recruitment patterns of jack mackerel in the southeastern Pacific .....</b>	<b>318</b>
30		
31		
32		
33		
34		
35		
36		
37		
38		
39		
40		
41		
42		
43		

## 1 INDICE DE TABLAS

---

2		
3	Tabla I. Herramientas utilizadas en el proceso de modelación biofísica para la obtención de de	
4	índices de reclutamiento.....	36
5		
6	Tabla II. Frecuencias a la talla de individuos juveniles de <i>T. murphyi</i> disponibles para este	
7	estudio en el Instituto de Investigación Pesquera Talcahuano. ....	54
8		
9	Tabla III. Identificación de fuentes de información oceanográfica para el análisis de la	
10	variabilidad física en el área de desove y reclutamiento de jurel. ....	63
11		
12	Tabla IV. Forzantes o variables críticas que caracterizan la variabilidad física de las regiones de	
13	reclutamiento y desove de jurel, en las componentes estacional e interanual.....	64
14		
15	Tabla V. Fuente y valores de las capturas para las cuatro flotas utilizadas en el modelo de	
16	evaluación. ....	80
17		
18	Tabla VI. Captura a la edad en la flota 1. Unidades relativas y normalizadas a uno para cada año	
19	en el modelo. Verde sombreado refleja los niveles relativos máximos. ....	82
20		
21	Tabla VII. Captura a la edad en la flota 2. Unidades relativas y normalizadas a uno para cada año	
22	en el modelo. Verde sombreado refleja los niveles relativos máximos.....	83
23		
24	Tabla VIII. Captura a la edad en la flota 4. Unidades relativas y normalizadas a uno para cada	
25	año en el modelo. Verde sombreado refleja los niveles relativos máximos. ....	84
26		
27	Tabla IX. Captura a la talla en la flota 3. Unidades relativas y normalizadas a uno para cada año	
28	en el modelo. Verde sombreado refleja los niveles relativos máximos. ....	85
29		
30	Tabla X. Valores de índices usados en el modelo de evaluación de stock de jurel. Chile (1):	
31	acústica zona centro sur de Chile, Chile (2): acústica zona norte en Chile, Chile (3): CPUE	
32	pesquería centro-sur, Chile (4): MPDH, Perú (1): índice acústico peruano para la flota 3, Perú (2):	
33	CPUE pesquería peruana para la flota 3, China: CPUE china para la flota 4, EU: CPUE flota	
34	Europea para la flota 4, Russia/USSR: captura por día desde Rusia y URSS.....	86
35		
36	Tabla XI. Parámetros de crecimiento y mortalidad natural.....	87
37		
38	Tabla XII. Hipótesis consideradas en la evaluación de stock de jurel por el modelo JJM.....	87
39		
40	Tabla XIII. Símbolos y definiciones utilizadas para el modelo de evaluación.....	88
41		
42	Tabla XIV. Variables y ecuaciones que describen la implementación de modelo de evaluación	
43	conjunto de jurel.....	89
44		

1	Tabla XV. Especificación función objetivo a ser minimizada.....	91
2		
3	Tabla XVI. Listado de proyectos de evaluaciones hidroacústicas utilizados en el presente estudio,	
4	que contaron con la información requerida.....	94
5		
6	Tabla XVII. Resumen del GAM que predice la densidad de huevos de jurel en todo el dominio	
7	espacial para todos los cruceros realizados . La longitud fue normalizada.....	103
8		
9	Tabla XVIII. Resumen del GAM que predice la temperatura superficial del mar en todo el	
10	dominio espacial para todos los cruceros realizados. La longitud fue normalizada.....	106
11		
12	Tabla XIX. Resumen del GAM que predice la energía cinética en todo el dominio espacial para	
13	todos los cruceros realizados. La longitud fue normalizada. ....	106
14		
15	Tabla XX. Resumen de la predicción realizada por el modelo GAM para la densidad de huevos	
16	de jurel en todo el dominio y para todos los cruceros analizados. ....	107
17		
18	Tabla XXI. Parámetros de crecimiento en longitud para <i>T. murphyi</i> estimados por seis modelos	
19	diferentes. AIC=índice de Akaike. ....	114
20		
21	Tabla XXII. Señal anual de remolinos de meso-escala. ....	149
22		
23	Tabla XXIII. Señal interanual de número total de remolinos. ....	152
24		
25	Tabla XXIV. Matriz de conectividad para el área de desove de Perú. En rojo destacan las	
26	interacciones positivas entre celdas evaluadas. ....	191
27		
28	Tabla XXV. Matriz de conectividad para el área de desove de Chile norte. En rojo destacan las	
29	interacciones positivas entre celdas evaluadas. ....	192
30		
31	Tabla XXVI. Matriz de conectividad para el área de desove de Chile centro-sur. En rojo destacan	
32	las interacciones positivas entre celdas evaluadas. ....	193
33		
34		
35		
36		
37		
38		
39		
40		
41		
42		
43		
44		
45		
46		

## 1 INDICE DE FIGURAS

2		
3	Figura 1. Esquema de trabajo para el estudio de la historia de vida temprana del jurel y la	
4	dinámica del reclutamiento en el océano Pacífico suroriental bajo un enfoque de modelación	
5	biofísica.....	37
6		
7	Figura 2. Dominio espacial del modelo hidrodinámico ROMS para la modelación biofísica de	
8	jurel (cuadro rojo, panel izquierdo). Batimetría etopo2 utilizada para forzar el modelo, con	
9	resolución espacial de 4 km (panel derecho).....	43
10		
11	Figura 3. Distribución espacial de las transectas WOCE utilizadas para la validación vertical del	
12	modelo ROMS.....	45
13		
14	Figura 4. Áreas de liberación de desoves virtuales de jurel en el esquema de modelación	
15	biofísica. Se detallan las sub-áreas de modelación, i) Chile centro-sur (rojo), ii) Chile norte (azul),	
16	y iii) Perú (celeste).....	48
17		
18	Figura 5. Otolito de jurel fijado en portaobjeto mediante medio de montaje Crystal Bond.....	55
19		
20	Figura 6. Corte longitudinal otolito de jurel fijado en resina de poliéster y posteriormente al	
21	portaobjeto mediante medio de montaje Crystal Bond.....	55
22		
23	Figura 7. Otolito de <i>T. murphyi</i> con 14 cm LH con aumento 40X.....	56
24		
25	Figura 8. Ichthyop, modelo para configurar modelos biofísicos acoplados a modelos	
26	hidrodinámicos, <a href="http://www.ichthyop.org/">http://www.ichthyop.org/</a> ). En este sitio se encuentra disponible la	
27	documentación y descarga de archivos.....	60
28		
29	Figura 9. Celdas diseñadas para el establecimiento de matrices de conectividad. En gris se	
30	señalan las celdas que actúan como fuente de desoves de jurel.....	72
31		
32	Figura 10. Distribución espacial de la densidad de larvas de jurel ( $\text{ind}/\text{m}^2$ ) en la zona oceánica	
33	frente a Perú. Modificado de Ayon & Correa (2013).....	99
34		
35	Figura 11. Distribución espacial de la densidad del desove de jurel ( $\text{huevos}/10\text{m}^2$ ) en la zona	
36	costera frente a Chile norte. Modificado de Braun & Valenzuela (2008).....	100
37		
38	Figura 12. Distribución espacial de los desoves de jurel ( $\text{ind}/\text{m}^2$ ) en la zona oceánica frente a	
39	Chile centro sur.....	101
40		
41	Figura 13. Producción de huevos estimados para jurel frente a Chile centro-sur en primavera de	
42	2004 (cruce; panel superior) y densidad de huevos predicha ( $\text{huevos}/\text{m}^2$ ) usando un GAM con	
43	Año, Latitud y Longitud como covariables.....	102
44		
45	Figura 14. Ejemplo de aplicación de la generación de <i>drifters</i> mediante el uso de modelos	
46	espaciales GAM para el área de desove de Perú en el periodo 1990-1999.....	103

1		
2	Figura 15. Ejemplo de aplicación de la generación de <i>drifters</i> mediante el uso de modelos	
3	espaciales GAM para el área de desove norte de Chile en el periodo 1993-	
4	1999.....	104
5		
6	Figura 16. Ejemplo de aplicación de la generación de <i>drifters</i> mediante el uso de modelos	
7	espaciales GAM para el área de desove Chile centro-sur, año	
8	2005.....	104
9		
10	Figura 17. a) Temperatura superficial del mar (°C) observada durante la temporada reproductiva	
11	del 2004 (arriba) respecto a la predicha por el modelo (abajo). Detalles en Tabla XVI; b) energía	
12	cinética (cm <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> ) observada durante la temporada reproductiva del 2004 (arriba) respecto a la	
13	predicha por el modelo (abajo). Detalles en Tabla XVII.....	105
14		
15	Figura 18. Distribución vertical promedio de huevos de jurel (expresados en porcentaje) por	
16	estrato de profundidad en distintas zonas de muestreo (panel izquierdo). Densidad de huevos	
17	integrada por estrato de profundidad (panel derecho).....	108
18		
19	Figura 19. Distribución vertical promedio de larvas de jurel (expresados en porcentaje) por	
20	estrato de profundidad en distintas zonas de muestreo (panel izquierdo). Densidad de larvas	
21	integrada por estrato de profundidad (panel derecho).....	109
22		
23	Figura 20. Proporción de Hembras Reproductivamente activas desde microscopía (PHR) en	
24	función de su Índice Gónado Somático y su modelo logístico ajustado para estimar el IGS <sub>50%</sub> que	
25	define el valor umbral para el inicio de la actividad de desove.....	110
26		
27	Figura 21. Serie de tiempo del Índice Gónado Somático de jurel para el periodo 1991-2014 (panel	
28	superior). Serie de tiempo de la proporción de hembras reproductivamente activas periodo 1991-	
29	2014, los puntos muestran la proporción diaria calculada desde los muestreos y la línea roja el	
30	ciclo anual calculado mediante descomposición armónica (panel inferior).....	110
31		
32	Figura 22. Relación entre longitud horquilla (cm) y el radio del otolito (µm) de <i>Trachurus</i>	
33	<i>murphyi</i> colectados entre la segunda y novena regiones de Chile.....	111
34		
35	Figura 23. Otolito jurel (borde postrostrum) de 14 cm LH 40X ha sido realizado hasta el	
36	momento en un otolito de jurel correspondiente a un individuo de 9 cm LH.....	112
37		
38	Figura 24. Otolito jurel de 10.5 cm LH 400X, se observan el centro, primordio y primeros anillos	
39	de crecimiento diario.....	112
40		
41	Figura 25. Edad en días observadas en larvas y juveniles de <i>T. murphyi</i> capturados entre las II y	
42	X regiones de Chile, y ajuste de seis modelos de crecimiento probados para describir su	
43	crecimiento.....	113
44		
45	Figura 26. Distribución vertical de larvas de jurel desde datos observados (burbujas grises, como	
46	probabilidad) y esquema de migración diurno-nocturna usada en el modelo biofísico (línea	
47	roja).....	115

1	
2	Figura 27. Esquema de movimiento vertical de larvas de jurel como resultado de la modelación
3	biofísica. Incluye flotabilidad de huevos y migración diferenciada por edad para larvas y
4	juveniles. El último patrón mostrado se extendió hasta los 120 días, se muestran los primeros 40
5	días para efectos gráficos.....116
6	
7	Figura 28. Ciclo estacional de la anomalía de la temperatura superficial del mar para datos de
8	satélite Pathfinder (panel izquierdo) y modelo ROMS (panel derecho). Note diferentes barras de
9	color. La estaciones desde arriba a abajo: verano, otoño, invierno, primavera.....117
10	
11	Figura 29. Varianza explicada para los primeros veinte modos de variabilidad de los
12	componentes principales de la Temperatura Superficial del Mar para datos de satélite Pathfinder
13	(rojo) y modelo ROMS (azul).....118
14	
15	Figura 30. FOE del primer modo de variabilidad de la Temperatura superficial del mar. Dominio
16	espacial para a) Datos satélite Pathfinder y b) modelo ROMS, c) serie de tiempo 1994 – 2012
17	para datos de satélite y modelo ROMS, d) significancia de la correlación entre series de tiempo
18	basada en la función de densidad de probabilidad de los coeficientes de correlación
19	cruzada.....119
20	
21	Figura 31. FOE del segundo modo de variabilidad de la Temperatura superficial del mar.
22	Dominio espacial para a) Datos satélite Pathfinder y b) modelo ROMS, c) serie de tiempo 1994 –
23	2012 para datos de satélite y modelo ROMS, d) significancia de la correlación entre series de
24	tiempo basada en la función de densidad de probabilidad de los coeficientes de correlación
25	cruzada.....120
26	
27	Figura 32. Ciclo estacional de la anomalía de la salinidad superficial del mar para datos de
28	satélite Aquarius (panel izquierdo) y modelo ROMS (panel derecho). Note diferentes barras de
29	color. La estaciones desde arriba a abajo: verano, otoño, invierno, primavera.....121
30	
31	Figura 33. Varianza explicada para los primeros veinte modos de variabilidad de los
32	componentes principales de la Salinidad Superficial del Mar para datos de satélite Aquarius
33	(rojo) y modelo ROMS (azul).....122
34	Figura 34. FOE del primer modo de variabilidad de la Salinidad superficial del mar. Dominio
35	espacial para a) Datos satélite Aquarius y b) modelo ROMS, c) serie de tiempo 2011 – 2014 para
36	datos de satélite y modelo ROMS, d) significancia de la correlación entre series de tiempo basada
37	en la función de densidad de probabilidad de los coeficientes de correlación
38	cruzada.....123
39	
40	Figura 35. Análisis de la estructura vertical de la temperatura en el modelo ROMS respecto a
41	observaciones <i>in situ</i> realizadas por el crucero WOCE frente a las costas de Perú (16°45'S).....124
42	
43	Figura 36. Análisis de la estructura vertical de la salinidad en el modelo ROMS respecto a
44	observaciones <i>in situ</i> realizadas por el crucero WOCE frente a las costas de Perú
45	(16°45'S).....125
46	

1	Figura 37. Análisis de la estructura vertical de la temperatura en el modelo ROMS respecto a	
2	observaciones in situ realizadas por el crucero WOCE frente a las costas de Chile	
3	(32°30'S).....	126
4		
5	Figura 38. Análisis de la estructura vertical de la salinidad en el modelo ROMS respecto a	
6	observaciones in situ realizadas por el crucero WOCE frente a las costas de Chile	
7	(32°30'S).....	126
8		
9	Figura 39. Diagrama TS obtenido desde datos oceanográficos CTD (izquierda) y modelo ROMS	
10	(derecha) para la transecta realizada frente a Perú (16°45'S).....	127
11		
12	Figura 40. Diagrama TS obtenido desde datos oceanográficos CTD (izquierda) y modelo ROMS	
13	(derecha) para la transecta realizada frente a Chile (32°30'S).....	127
14		
15	Figura 41. Relación entre las series de tiempo de la anomalía de la profundidad de la isoterma de	
16	20°C y la señal de El Niño en la región ecuatorial 3.4.....	128
17		
18	Figura 42. Extensión meridional de las anomalías térmicas en la primera franja del océano desde	
19	una perspectiva interanual para el modelo ROMS (izquierda) y satélite Pathfinder	
20	(derecha).....	129
21		
22	Figura 43. Velocidades superficiales (en cm/s) y elipses de varianza de la velocidad obtenidas	
23	desde derivadores modelados (izquierda) y observados (derecha).....	130
24		
25	Figura 44. Distribución espacial de los reclutas de jurel observados mediante cruceros acústicos	
26	(izquierda) y de profundidad media de las agregaciones de reclutas (derecha).....	131
27		
28		
29	Figura 45. Distribución espacial de jurel por año, serie 1994 a 2013.....	132
30		
31	Figura 46. Profundidades medias por año (A), porcentaje de reclutas (B), longitud (C) y latitud	
32	(D) en los años analizados.....	134
33		
34	Figura 47. Variación latitudinal interanual del límite norte y límite sur del Frente sur tropical en	
35	las longitudes 88° y 82°W, definidos por la posición de las isohalinas superficiales de 34,8 y	
36	34,3. (Fuente: hidrografía SODA 226).....	143
37		
38	Figura 48. Corrientes geostróficas zonales ( $\text{cm s}^{-1}$ ) en las épocas de verano (enero) e invierno	
39	(julio) en 100°W (a,b), 90°W (c,d) y 85°W(e,f) calculadas de la climatología CARS, El frente	
40	subtropical se muestra como la isohalina (blanco) de 34,8 en superficie y la isoterma de 14°C	
41	(rojo) a 150 m de profundidad (Stramma <i>et al.</i> , 1995; Chaigneau & Pizarro 2005).....	146
42		
43	Figura 49. Distribución latitudinal del promedio zonal (1992-2011) de la velocidad geostrófica en	
44	verano e invierno ( $\text{cm s}^{-1}$ ) en 100°W, 95°W, 90°W and 85°W, producto de la combinación de la	
45	altimetría satelital de AVISO y la climatología CARS.....	147
46		

1	Figura 50. Evolución cronológica de las series de la zona de divergencia de los vientos del oeste	
2	(DVO) en latitudes para la Región sur (25°S-60°S y 80°W-70°W).....	148
3		
4	Figura 51. Conteo mensual promedio de los remolinos desde 2000 a 2014, para toda la región de	
5	estudio de remolinos ciclónicos (azul) y anticiclónicos (rojo), número total de remolinos	
6	(negro).....	149
7		
8	Figura 52. Conteo anual de los remolinos desde 2000 a 2014, para toda la región de estudio de	
9	remolinos ciclónicos (azul) y anticiclónicos (rojo), número total de remolinos	
10	(Negro).....	149
11		
12	Figura 53. Energía cinética de remolinos de mesoescala estandarizada por la desviación	
13	estandarizada y sin el promedio.....	150
14		
15		
16	Figura 54. Transporte anual (Sv) generado por remolinos de mesoescala asumiendo una	
17	profundidad promedio de 200 m.....	151
18		
19	Figura 55. Diagrama Hovmöller de la temperatura superficial del mar a lo largo de la	
20	costa.....	156
21		
22	Figura 56. Diagrama Hovmöller de una banda costera (20 km) de concentración de clorofila entre	
23	15°S y 30°S durante julio de 2002 a febrero de 2015.....	159
24		
25	Figura 57. (a) Serie temporal de concentración de clorofila para la zona norte entre los 15°S y	
26	20°S entre julio 2002 a febrero 2015. (b) Señal anual de concentración de clorofila para las	
27	latitudes 17,5°S (negro) y 18,5°S (azul) y (c) Anomalía de concentración de clorofila para	
28	17,5°S (negro) y 18,5°S (azul) entre julio 2002 a febrero de 2015. Todas las series son para en	
29	una banda costera de 20 km.....	160
30		
31	Figura 58. Zona de estudio proveniente de la intersección del esfuerzo del viento zonal (contorno	
32	rojo) y meridional (contorno negro) cero ( $\tau_x = \tau_y = 0$ ), respectivamente. Los círculos azules	
33	muestran los desplazamiento de la zona de intersección y costero.....	161
34		
35	Figura 59. Variabilidad espacio-temporal de la zona de intersección del esfuerzo del viento zonal	
36	y meridional cero ( $\tau_x = \tau_y = 0$ ), respectivamente.....	164
37		
38	Figura 60. Variabilidad espacio-temporal del desplazamiento costero del esfuerzo del viento	
39	zonal cero ( $\tau_x = 0$ ).....	164
40		
41	Figura 61. Intersección del esfuerzo del viento zonal (contorno rojo) y meridional (contorno	
42	negro) cero ( $\tau_x = \tau_y = 0$ ) en relación al área de desove de jurel para el periodo 1999-2014. En	
43	el año 2005 no pudo realizarse este análisis por inconvenientes asociados al dato de	
44	viento.....	167
45		

1	Figura 62. Relación entre el ciclo anual de la migración meridional (valores positivos hacia el	
2	norte y negativos al sur) del frente subtropical y el ciclo anual reproductivo del	
3	jurel.....	168
4		
5	Figura 63. a) migración meridional estacional del FST y ubicación meridional media del desove	
6	de jurel; b) regresión lineal entre la ubicación media del FST en Noviembre y la latitud media del	
7	desove anual de jurel frente a Chile centro-sur.....	169
8		
9	Figura 64. a) migración meridional estacional del FST y ubicación meridional media del desove	
10	de jurel; b) regresión lineal entre la ubicación media del FST en Noviembre y la latitud media del	
11	desove anual de jurel frente a Chile centro-sur.....	171
12		
13	Figura 65. Relación entre el índice El Niño 3.4 (escala inversa para propósitos comparativos) y la	
14	anomalía de la extensión latitudinal de la distribución espacial de los juveniles modelados	
15	biofísicamente.....	172
16		
17	Figura 66. a) climatología de la turbulencia producto del viento para el Pacífico suroriental; b)	
18	distribución de individuos de 120 días de edad simuladas mediante modelación biofísica en el	
19	norte de Chile durante el periodo 1994-2014, junto con los contornos de la señal media de la	
20	turbulencia producto del viento.....	173
21		
22	Figura 67. Indicadores poblacionales asumiendo un solo stock). Superior izquierda biomasa	
23	desovante en miles de toneladas. Superior derecha tasa de mortalidad por pesca (año <sup>-1</sup> ). Gráfica	
24	inferior izquierda reclutamiento (millones) a la edad 1 y gráfica restante representa a los	
25	desembarques en miles de toneladas.....	177
26		
27	Figura 68. a) Series de tiempo del índice de reclutamiento biofísico (IBM), Índice de Producción	
28	de Huevos (MPH) e Índice de reclutamiento desde un modelo estadístico edad-estructurado	
29	(expresado como abundancia del grupo de edad 1); b) Regresión lineal entre el índice de	
30	reclutamiento biofísico y el índice de reclutamiento proveniente de la evaluación de	
31	stock.....	179
32		
33		
34	Figura 69. Índice de conectividad entre el área de desove de Perú y el área de crianza situada en	
35	el norte de Chile y Sur de Perú.....	181
36		
37	Figura 70. Índice de conectividad entre el área de desove de Perú y el área de crianza situada en	
38	el norte de Chile y Sur de Perú.....	182
39		
40	Figura 71. Índice de conectividad entre el área de desove de Perú y el área de crianza situada en	
41	el norte de Chile y Sur de Perú.....	183
42		
43	Figura 72. Distribución espacial de los individuos sobrevivientes al proceso de transporte de 120	
44	días desde la zona de desove de Perú.....	184
45		
46	Figura 73. Distribución espacial de los individuos sobrevivientes al proceso de transporte de 120	
47	días desde la zona de desove en el norte de Chile.....	186

1		
2	Figura 74. Distribución espacial de los individuos sobrevivientes al proceso de transporte de 120	
3	días desde la zona de desove frente a Chile centro-sur.....	188
4		
5	Figura 75. Diagramas esquemáticas de cuatro hipótesis de estructura poblacional del jurel en el	
6	Pacífico Sur. Área azul: "cinturón de jurel del Pacífico Sur"; áreas amarillo: zonas de altas	
7	concentraciones de stocks (Gerlotto <i>et al.</i> , 2010a).....	193
8		
9	Figura 76. a) Modelo conceptual de la estructura espacial del stock de jurel frente las costas de	
10	Chile, previo a la ocurrencia de El Niño 1997-1998 (Arcos <i>et al.</i> , 2001) ; b) esquema conceptual	
11	de la hipótesis de metapoblación de jurel en el Pacífico Sur (Gerlotto & Dioses,	
12	2013).....	199
13		
14	Figura 77. Áreas distribución del jurel en el Océano Pacífico Sur (modificado, de Elizarov et al.,	
15	1993; Grechina, 1998).....	197
16		
17	Figura 78 .Esquema generalizado de migraciones oceánicas de jurel en el Océano Pacífico Sur	
18	durante su ciclo de vida. 1 – peces adultos desovantes; 2 – peces adultos en engorda; 3 – peces	
19	juveniles hasta 2-3 años de edad; 4 - peces adultos entre zonas de desove y engorda; 5 –	
20	distribución y migración de alevines y juveniles de hasta un año de edad (Elizarov et al., 1993;	
21	Grechina, 1998).....	197
22		
23	Figura 79. Áreas de desove del jurel en el Océano Pacífico Sur y posición de la isoterma de 16°C	
24	al inicio y término de la estación de desove. 1 –área principal de desove; 2 – áreas de registros	
25	huevos y larvas; 3 – zonas con concentraciones de huevos y larvas mayores a	200
26	unidades/m <sup>2</sup> (modificado, de Grechina et al., 1998).....	197
27		
28	Figura 80. Distribución de alevines y juveniles del jurel hasta un año de edad por clases de	
29	tamaños de 5 cm de LH (integración realizada a partir de información obtenida entre los años	
30	1980 y 1990 en los cruceros de investigación de la ex – URSS) (modificado, de Elizarov et al.,	
31	1993; Grechina, 1998).....	197
32		
33	Figura 81. Dinámica interanual de frecuencias de tamaños de jurel en las regiones del Perú, 1972-	
34	2012 (a) (modificado Díaz, 2013), del Norte de Chile, 1975-2010 (b) (modificado Canales <i>et al.</i> ,	
35	2011) y de Chile centro-sur, 1982-2013 (c) (Departamento de pesquerías de	
36	INPESCA).....	199
37		
38	Figura 82. Esquema conceptual de la hipótesis de "población de parches" y/o "superpoblación"	
39	en el Pacífico Sur (Gerlotto <i>et al.</i> , 2012; Gerlotto & Dioses, 2013) (a) y propuestas de su	
40	modificación en base de la historia de vida de jurel en los años 80-90' durante los años de las	
41	condiciones oceanográficas "normales" (b) y, "anómalos", de los años de El Niño (c) (este	
42	estudio).....	200
43		
44	Figura 83. a) temperatura superficial para la temporada reproductiva de jurel año 2015; b)	
45	probabilidad de encuentro basada en las condiciones térmicas para el año 2015; c) Distribución	
46	de estaciones de ictioplancton (puntos azules) y estaciones positivas (puntos rojos) con presencia	
47	de huevos y larvas del jurel durante los años 1972-1995 (recopilación de los resultados de	

1	investigación del IMARPE (Perú), VNIRO-AtlantNIRO (Rusia), IFOP e INPESCA	
2	(Chile).....	205
3		
4	Figura 84. Distribución espacial interanual probable de los individuos sobrevivientes al proceso	
5	de transporte de 120 días desde todas las zonas modeladas en conjunto (Perú, Chile norte, Chile	
6	centro-sur oceánica).....	208
7		
8	Figura 85. Distribución total de individuos juveniles de jurel (4 meses de edad) obtenida	
9	mediante modelación biofísica desde las tres áreas de desove consideradas (Perú, Chile norte y	
10	Chile centro-sur) en el periodo 1994-2013.....	210
11		
12	Figura 86. Ejemplos de encuentros y la estructura de tamaños de los juveniles de jurel en lances	
13	de pesca industrial y las prospecciones del BBIP Biomar III en los años 2007-2009 frente las	
14	costas de Chile centro sur.....	211
15		
16	Figura 87. Estaciones del buque de investigación BIC Atlantida (AtlantNIRO, Rusia) entre 18-22	
17	de Octubre de 2009 para estudiar la frecuencia de tallas de juveniles de jurel en el Pacífico Sur y	
18	batimetría de montes submarinos en el área entre 35°00'-37°30'S y 112°00'-116°30'W.....	213
19		
20	Figura 88. Probabilidad de las zonas temporales "de crianza-reclutamiento" en las regiones de las	
21	cordilleras de los montes submarinos en el Pacífico Sur.....	214
22		
23	Figura 89. Modelo conceptual para la estructura poblacional del jurel propuesto a partir de las	
24	evidencias del presente estudio: a) esquema espacial de distribución de las fracciones del ciclo de	
25	vida del jurel bajo un esquema de población única; b) esquema de las conexiones entre las	
26	fracciones de la población bajo un régimen cálido (previo al niño 1997-1998); c) esquema de las	
27	conexiones entre las fracciones de la población bajo un régimen frío (posterior al niño 1997-	
28	1998).....	217
29		
30		
31		
32		
33		
34		
35		
36		
37		
38		
39		
40		
41		
42		

## 1.- RESUMEN EJECUTIVO

---

En el presente informe se entregan los resultados obtenidos en el contexto del proyecto FIP 2014-33 "Estructura poblacional y estimación de índices de reclutamiento de jurel basados en modelos biofísicos (fase I)". Los principales focos de este informe fueron la implementación de un modelo hidrodinámico para el Pacífico suroriental, el esquema de acoplamiento físico-biológico para modelar la historia de vida temprana del jurel, 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 10 km para el Pacífico suroriental, demostró un buen desempeño reproduciendo los rasgos oceanográficos más importantes observados en el Pacífico suroriental tanto espacial como temporal (estacional e interanualmente), además de reproducir eventos extremos ecuatoriales de tipo El Niño y manifestar un alto grado de coherencia respecto al patrón de circulación general. 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 jurel a nivel de las tres áreas de desove identificadas: costa de Perú, costa de Chile norte y costa de Chile centro-sur. Los principales hallazgos asociados a este punto demostraron que las velocidades zonales y meridionales del transporte de Ekman a los 50 m indicaron un flujo desde la zona más oceánica hacia la costa en los  $\sim 35^{\circ}\text{S}$ , bifurcándose en la zona costera en concordancia con el sentido norte del flujo geostrofico, siendo un promotor de conectividad océano-costa. El frente subtropical (FST) y la Corriente del Pacífico Sur (CPS) tienen un movimiento latitudinal estacional, hacia el norte en invierno y hacia el sur en primavera-verano, en donde el jurel desova preferentemente. La dinámica superficial de la región norte de Chile, al interior de las 200 mn (zona de crianza de jurel juvenil), se encontró modulada principalmente por la forma de la línea de costa (curvatura) que induce una drástica disminución del esfuerzo del viento meridional, promoviendo altos niveles de retención. La baja ventilación en la zona de la curvatura induce una disminución de la surgencia, y por ende, un menor enfriamiento de las zonas contiguas. Esta baja ventilación induce que en la zona de la curvatura, la temperatura superficial del mar sea más conservativa

1 estacionalmente, es decir, tienda a mantener altos rangos de temperaturas durante un mayor  
2 periodo con respecto a las zonas aledañas, quedando el ascenso de aguas frías de surgencia  
3 acotado a una región muy cercana a la costa. En Perú destacaron dos escenarios, el primero  
4 asociado a un sistema al sur asociado a la curvatura topográfica con bajos niveles de estrés de  
5 viento que promueven la retención y el transporte hacia el sur, mientras que la región centro norte  
6 estuvo caracterizada por el proceso de surgencia producto del viento con altos niveles de  
7 advección costa afuera en donde huevos y larvas de jurel serían exportados.

8  
9 Además, se presentan los resultados asociados a un complejo esquema de modelación que  
10 incluyó la simulación del desove y del transporte de huevos, larvas y juveniles desde tres zonas  
11 de desove y para 20 temporadas reproductivas (1994-2013). Este modelo identificó que  
12 diferentes centroides de distribución de estados tempranos de jurel (Perú, Chile norte, Chile  
13 centro-sur) están conectados con la zona de crianza modelada establecida entre la zona centro-  
14 norte de Chile y sur de Perú, la cual estuvo altamente correlacionada espacialmente con el área de  
15 máxima probabilidad de encuentro de individuos reclutas observados por cruceros de  
16 prospección acústica.

17  
18 En este estudio se caracterizó la conectividad entre tres zonas evaluadas y el área de crianza,  
19 identificándose que: i) el transporte desde la zona de desove en Perú está altamente diferenciado  
20 por la localización de los centros reproductivos, mientras que desoves situados en la zona centro-  
21 norte tendrían mayor probabilidad de ser exportados costa afuera, desoves en el extremo sur  
22 muestran mayor grado de retención y conectividad con el área de crianza; ii) el área de desove en  
23 el norte de Chile está dentro del área de crianza y mostró una alta retención (>80%), sugiriendo  
24 que bajo escenarios de desoves de alta densidad, esta zona puede ser altamente relevante para el  
25 reclutamiento; y iii) el área de desove principal frente a Chile centro-sur mostró un alto grado de  
26 dispersión con individuos transportados recurrentemente en trayectorias noreste. No obstante, se  
27 observó un alto grado de variabilidad interanual, todos los años modelados mostraron  
28 conectividad con el área de crianza, evidenciando un rasgo recurrente en la población.

29  
30 Estos patrones de conectividad son producto de distintos procesos oceanográficos dependiendo  
31 de la zona, identificándose los siguientes aspectos: i) el patrón de dispersión desde Perú mostró  
32 dos escenarios de acoplamiento biofísico, el primero respecto a desoves ocurridos en la zona  
33 centro-norte, donde los desoves se acoplan con un sistema de surgencia activo y experimentaron  
34 altos niveles de advección costa afuera; y el segundo con desoves en la región centro-sur donde

1 experimentaron un mayor grado de retención y transporte hacia el sur por la costa (un sistema  
2 más estable en relación al viento); ii) el patrón de dispersión en la zona norte de Chile sugirió un  
3 escenario poco variable entre años con importantes niveles de retención, producto de un sistema  
4 altamente estable, con bajo estrés de viento y baja advección costa afuera y; iii) El área principal  
5 de desove de Chile centro-sur evidenció una alta correlación con la ubicación del frente  
6 subtropical en primavera con desoves en un ambiente estable en términos del estrés del viento y  
7 la energía cinética. Posterior al desove esta área evidenció altos niveles de dispersión producto  
8 del patrón de circulación general además del transporte de Ekman asociado al estrés del viento en  
9 estratos superficiales.

10

11 Finalmente, en este estudio se destacó la significativa correlación que entrega el índice de  
12 reclutamiento biofísico con el reclutamiento del modelo de evaluación de stock (grupo de edad  
13 1), sugiriendo un importante poder predictivo de este modelo en relación a la dinámica del  
14 reclutamiento un año posterior a los desoves. En cuanto al aporte de este estudio en el  
15 entendimiento de la estructura poblacional del jurel, se estableció que el alto rango de dispersión  
16 y alta sobreposición de los productos de desove apoyan la hipótesis de una población panmíctica  
17 coincidente con la evidencia genética que hasta ahora conocemos del recurso. Además, la  
18 población de jurel mostró características de un recurso altamente migratorio o transzonal con alto  
19 nivel de conectividad apoyado por procesos oceanográficos y sin que existan barreras en el  
20 hábitat utilizado por el recurso. De esta manera, los resultados obtenidos respaldaron la  
21 generación de un modelo conceptual del población de jurel bajo una hipótesis de una población  
22 altamente conectada, sin aislamiento reproductivo y sin barreras físicas que impidan el  
23 intercambio genético a nivel del área de distribución en el Pacífico suroriental.

24

25

26

27

28

29

30

31

32

33

34

## 2.- DESCRIPCIÓN 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	Objetivos	Función
Sebastián Vásquez P.	Msc en Pesquerías	Objetivos 1, 2, 3, 4 y 5	Jefe Proyecto, coordinación general del proyecto. Reuniones consultivas con FIP. Desarrollo e implementación del modelo biofísico para jurel. Validación del modelo hidrodinámico. Asistencia logística en todos los talleres. Confección informes. Redacción de publicación.
Aquiles Sepúlveda O.	PhD in Oceanography	Objetivos 5 y 6	Discusión del modelo conceptual de la estructura poblacional de jurel en el Pacífico sur-oriental. Inclusión de resultados provenientes de la modelación biofísica en el ordenamiento pesquero regional (Organización Regional de Pesca).
Alexander Gretchina	PhD in Zoology	Objetivos 5 y 6	Discusión del modelo conceptual de la estructura poblacional de jurel en el Pacífico sur-oriental. Revisión y ordenamiento de datos de la flota rusa (desove/juveniles) para ser incluidos en el proceso de modelación. Presentación en talleres de discusión/difusión. Confección de Informes
Cristian Salas	Dr. en Ciencias Físicas	Objetivos 1, 2 y 3	Coordinación de las actividades de modelación hidrodinámica. Supervisión y generación de corridas del modelo. Generación de variables de salida. Análisis de los forzantes físicos asociados al proceso de transporte y conectividad de la población de jurel. Corridas de modelos y la generación de las variables de salidas. Presentación en talleres. Confección de Informes
Sergio Núñez E.	Msc en Oceanografía	Objetivos 3 y 5	Oceanografía física/biológica. Desarrollo de los <i>sub-modelos</i> de distribución espacial del desove, sincronización del desove, y de abundancia del desove. Coordinación logística de talleres. Confección de Informes.

Claudio Gatica Molina	Msc en Pesquerías	Objetivo 4	Elaboración de un modelo conceptual que permita inclusión de resultados provenientes de la modelación biofísica en el ordenamiento pesquero. Descripción de modelos de evaluación de stock y discusión de la interacción con modelos biofísicos. Revisión bibliográfica. Participación en la elaboración del modelo conceptual de la población de jurel en el Pacífico sur-oriental. Elaboración de informes. Presentación en talleres.
Marcos Arteaga V	Msc en Pesquerías	Objetivo 4	Revisión bibliográfica del uso de índices y estimaciones biofísicas en los modelos de evaluación de stock. Elaboración de un modelo conceptual que permita la inclusión de resultados provenientes de la modelación biofísica en el ordenamiento pesquero. Coordinación logística de talleres.
Lilian Cisternas	Msc(c) en Pesquerías	Objetivo 2	Edad y crecimiento de jurel. Lectura de microincrementos en otolitos de jurel. Ajuste de modelos y estimación de parámetros de crecimiento en escala inferior al año para alimentar el módulo de crecimiento del modelo biofísico. Elaboración de informes
Evelyn Sanhueza	Bióloga Marina	Objetivo 2	Edad y crecimiento de jurel. Preparación de muestras. Lectura de microincrementos en otolitos de jurel.
Nicolás Alegría L.	Biólogo Marino	Objetivo 4	Análisis de la estructura espacial del desove y distribución de juveniles de jurel en el Pacífico suroriental. Geoestadística. Análisis de la distribución de juveniles/reclutas de jurel desde datos acústicos. Elaboración de informes.
Carlos González A.	Tecnólogo Marino	Objetivo 6	Discusión del modelo conceptual de la estructura poblacional de jurel en el Pacífico sur-oriental. Ordenamiento y análisis de la información de la flota pesquera utilizada para el establecimiento de patrones de migración y estructuración por edades.

Patric Contreras	Técnico en Administración de redes y soporte computacional	Objetivos 1 y 2	Implementación, mantención y funcionamiento de las unidades computacionales necesarias para cumplir los distintos objetivos del proyecto asociados a la modelación hidrodinámica y modelación biofísica
Jaime Letelier	Dr. en Oceanografía	Objetivo 3	Oceanografía física. Análisis integrado de forzantes oceanográficos en el Pacífico suroriental. Identificación de estructuras oceanográficas involucradas en el proceso de transporte de estadios tempranos de jurel. Redacción de informes
Luis Soto	Dr. en Oceanografía Física	Objetivo 3	Participación como experto especialista en modelación hidrodinámica y experto en el modelo ROMS. Revisión de desempeño de la configuración y validación del modelo

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10
- 11
- 12
- 13
- 14
- 15
- 16
- 17
- 18
- 19

### 1 **3.- OBJETIVOS DEL PROYECTO**

---

2

3 El Objetivo General del proyecto es "Implementar un modelo biofísico espacialmente explícito  
4 que permita realizar predicciones de reclutamiento a nivel de los juveniles de jurel y entender las  
5 relaciones de conectividad entre todas las zonas de desove conocidas del recurso".

6

7 Para el cumplimiento del objetivo general, se aborda la problemática con un enfoque  
8 multidisciplinario que incluye la modelación hidrodinámica, biofísica y de dinámica poblacional,  
9 la oceanografía física y pesquera, ecología larval, evaluación de stock, estadística y análisis  
10 espacial lo que permite abordar la problemática de forma integral en términos de generación de  
11 indicadores de conectividad hacia el reclutamiento del jurel en la región del Pacífico suroriental.

12

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

14

15 2.1. Desarrollar e implementar un sistema de modelación biofísica para la población de jurel  
16 hasta al menos el estado juvenil, que acople modelos biológicos y un modelo hidrodinámico  
17 validado para la región del Pacífico suroriental de todo el hábitat de distribución de jurel incluido  
18 el límite norte de distribución en la zona sur de Perú y de Chile.

19

20 2.2. Modelar el proceso de transporte/movimiento, crecimiento y sobrevivencia de estadios  
21 tempranos de jurel hasta juveniles y su efecto sobre la variabilidad del reclutamiento,  
22 identificando regiones fuente y sumidero de reclutas de jurel en la zona centro-sur de Chile y  
23 Perú desde los años 1994 a 2014.

24

25 2.3. Identificar los principales forzantes del ambiente que modulan el proceso de transporte y  
26 sobrevivencia de huevos, larvas y juveniles de jurel y que determinan la variabilidad del  
27 reclutamiento.

28

29 2.4. Contrastar los índices de reclutamiento de jurel (1994-2014) en base a toda la información  
30 disponible en Chile y Perú asociados a modelos de dinámica poblacional y la  
31 recopilación/integración de información acústica.

32

1 2.5. Realizar experimentos de simulación que evalúen hipótesis acerca de la estructura del stock  
2 de jurel en el Pacífico suroriental, identificando zonas fuente y sumidero y su contribución  
3 parcial país y global poblacional al reclutamiento total.

4

5 2.6. Elaborar un modelo conceptual de la estructura poblacional de jurel asociado a forzantes  
6 biofísicos relevantes, contrastando este modelo con toda la información disponible y con  
7 hipótesis vigentes actualmente.

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

25

26

27

28

29

30

31

32

33

34

---

## 4.- ANTECEDENTES

---

### i) Antecedentes del jurel y su estructura poblacional en el Pacífico suroriental

El jurel, *Trachurus murphyi*, es una especie pelágica de amplia distribución en el Pacífico Suroriental y su pesquería se desarrolla principalmente frente a Perú y Chile; incluyéndose, en esta última área a la fracción oceánica que se distribuye frente a las costas de la zona centro-sur de Chile y sobre la cual operó con éxito la flota de arrastre de media agua de la ex Unión Soviética entre los años 1978 y 1991 (Serra, 1991, Grechina *et al.*, 1998b). En esta misma región, luego de nueve-diez años de ausencia de operaciones pesqueras, a partir del año 2000 ha comenzado nuevamente la explotación del recurso jurel por una flota internacional compuesta por embarcaciones de origen asiático (China, Corea), de la Comunidad Europea, del Perú, Rusia y de banderas de conveniencia (Belize, Islas Faroe, Vanuatu), las cuales en conjunto alcanzaron capturas máximas por temporada de pesca durante los años 2007-2008, superiores a las 400 mil toneladas (SWG-03, SPRFMO, 2012). Desde el año 2002 y hasta el año 2011, incluyendo la fracción oceánica fuera de la ZEE de Chile, el recurso jurel incrementó significativamente su importancia también en las capturas totales anuales de la flota industrial nacional de cerco, con porcentajes de más de un 40% (incluso de un 60%) de la cuota global para algunos años. Sin embargo, luego de este marcado aporte de la fracción oceánica en las capturas globales del recurso y que ha permitido a éstas mantenerse entre los años 2002-2007 en un nivel entre 1,7 y 2,0 millones de toneladas anuales, desde el año 2008 se produce una declinación progresiva de las capturas totales, tanto en las regiones oceánicas como costeras, disminuyendo a 727 mil toneladas en 2010, 606 mil toneladas en 2011 y 417 mil toneladas en 2012, cifras provistas por la Secretaría interina de la Organización Regional del Pacífico Sur al grupo de trabajo científico de esta organización (SWG-03, SPRFMO, 2012). Esta caída de las capturas de todas las flotas continúa en el año 2013. Las cifras preliminares para 2013 indican que éstas prácticamente no superan una barrera de 300 mil toneladas.

A lo largo de las costas chilenas se identifican las siguientes unidades de pesquerías: a) Zona Norte (18° – 24°S), b) Caldera (27°S) - Coquimbo (30°S); y c) Zona Centro-Sur (32° – 42°S), incluyendo el sector oceánico fuera de la ZEE. Estas pesquerías lograron una captura máxima de 4,4 millones de toneladas en 1995. En 1997-1998, la pesquería de jurel entra en crisis debido a la alta incidencia de jurel juvenil menor a la talla mínima legal de 26 cm de longitud horquilla en la zona centro-sur, que coincide con el desarrollo en el Pacífico Ecuatorial de un evento extremo El Niño y que es consistente con el término de un régimen climático cálido y el inicio de un régimen

1 climático frío en el Pacífico Suroriental (SWG-11-8a, SPRFMO, 2012). A contar del 2001  
2 comienza un período de ordenamiento de la pesquería con la entrada en vigencia de la Ley de  
3 Capturas Máximas por Armador. En el período 2002-2006 los desembarques de jurel en la zona  
4 centro-sur bordearon en promedio los 1,2 millones de toneladas anuales, verificándose un  
5 incremento de su talla media de 26 cm de LH en el año 2002 a 32 cm de LH en el año 2006. El  
6 año 2007 si bien se mantuvo la magnitud del desembarque, la flota no logró capturar la totalidad  
7 de la cuota asignada, quedando un remante superior a doscientas mil toneladas, producto  
8 principalmente de la baja disponibilidad del recurso en las áreas históricas (próximas a las costas)  
9 de pesca. Desde el año 2008, a pesar de inclusión activa de las zonas oceánicas a la pesquería,  
10 como fue ya indicado, la tendencia de quedarse con un remanente no capturado de la cuota  
11 asignada se mantiene, como se mantiene también una tendencia progresiva hacia la disminución  
12 de las capturas anuales totales en la zona centro-sur: desde 1,13 millones toneladas en 2007 hasta  
13 195 mil toneladas en 2010 (SWG-03, SPRFMO, 2012); para estabilizarse en un nivel de 210 mil  
14 toneladas en 2012-2013, nivel de cuota regulada por la Subsecretaría de Pesca y en atención a las  
15 recomendaciones de la Organización Regional del Pacífico Sur (ORP).

16  
17 En base a la información disponible sobre la distribución espacial de los lances de pesca del jurel  
18 por la flota industrial de la Octava Región de Chile entre los años 1995-2012, es posible  
19 distinguir por lo menos 4 períodos diferenciados entre sí principalmente por la distancia entre las  
20 zonas de pesca y los puertos de desembarques y, por la cobertura espacial de áreas de  
21 operaciones de la flota durante la temporada anual de pesca. Estos períodos son: 1) período 1995-  
22 2002: con la distribución de operaciones de la flota próxima a las costas de V-IX Regiones  
23 durante todo el año; 2) período 2003-2007: con la distribución de lances de pesca durante la  
24 época de engorda (Enero-Mayo) en la zona costera y desde la costa hacia el océano abierto (hacia  
25 el Noroeste) durante el período pre-desove (Junio-October), para dispersarse en Noviembre en  
26 una supuesta zona de desove en el sector entre 31°-34°S, al Oeste de los 80°-82°W; 3) período  
27 2008-2011: caracterizado por la operación pesquera en la zona costera, principalmente entre V-X  
28 Regiones, entre Enero-Marzo, y por la distribución casi completamente oceánica, fuera de la ZEE  
29 de Chile centro-sur, entre Marzo-Abril y Agosto-Septiembre; ésta última con clara tendencia  
30 hacia el área de desove durante Junio-Septiembre, por una ruta más oceánica y paralela a la  
31 registrada durante el período anterior que, a su vez puede indicar un alejamiento del área de  
32 desove hacia el Oeste de los 84°-86°W; 4) período 2012-2013: las operaciones pesqueras se  
33 concentran exclusivamente dentro de la ZEE de Chile central, con una distribución espacial  
34 próxima a las costas entre VIII y III Regiones principalmente entre Enero y Mayo-Junio, sin

1 registros de concentraciones comerciales de jurel para la pesca con red de cerco en las zonas  
2 oceánicas adyacentes.

3

4 Al analizar la operación de la flota chilena durante los últimos dos períodos, es posible destacar  
5 entre 2008-2011 una clara tendencia hacia la separación espacial y temporal entre el área costera  
6 y el área oceánica en distribución del recurso. En estos cuatro años las concentraciones de jurel  
7 estuvieron presentes en la zona costera principalmente durante los primeros tres meses del año y,  
8 el resto tiempo, entre Abril y Septiembre, exclusivamente en la zona oceánica, por fuera de la  
9 ZEE de Chile centro-sur. En ésta última, durante Marzo-Abril hasta Junio el recurso se encuentra  
10 en estado pleno de engorda, realizando migraciones más zonales que meridionales, entre los 41-  
11 47°S y desde los 90-100°W hasta el límite de la ZEE y, entre los meses de Junio-Septiembre se  
12 verifican migraciones rápidas hacia el N-NW (al norte de los 37°S y al Oeste de los 82-85°W),  
13 dispersándose a inicios de Octubre, presentando un comportamiento típico previo al proceso de  
14 desove. Al mismo tiempo, desde 2008 al 2011 se reduce paulatinamente el área de operaciones  
15 pesqueras de la flota de Chile (distribución del jurel), como también las capturas totales de ésta  
16 región.

17

18 Prácticamente el mismo comportamiento dentro de una temporada de pesca de los años 2009-  
19 2011 presentó la distribución espacial de las embarcaciones pesqueras (lances, zonas de pesca) de  
20 las flotas internacionales. Éstas operaron en los mismos sectores que la flota chilena, afectadas  
21 por la misma tendencia hacia la reducción de las zonas oceánicas de pesca y capturas de jurel, las  
22 que siguen durante el mismo período (Junio-Septiembre) a las concentraciones de peces que  
23 migran hacia el área de desove y abandonan la región con la dispersión de los cardúmenes pre-  
24 desovantes de jurel desde Septiembre-Octubre. La única diferencia entre el comportamiento  
25 intra-anual de ambas flotas (chilena e internacional) radica en que la flota internacional detectó  
26 agregaciones pre-desovantes en sectores ubicados más hacia el Oeste, prácticamente hasta los  
27 120°W (2009) por la línea de los 34-35°S aproximadamente. Este último antecedente, en conjunto  
28 con lo precitado en base de análisis de la distribución espacial de jurel pre-desovante en áreas de  
29 operación de la flota nacional, puede indicar una extensión amplia meridionalmente del posible  
30 área de desove de jurel, posicionada por lo menos entre 82°-84° y 110°-120°W y al Norte de 37°-  
31 35°S.

32

33 La confirmación de tal distribución de las agregaciones de jurel dentro de una temporada anual  
34 de pesca, detectada en base de las operaciones pesqueras de las flotas nacional e internacional,

1 fue obtenida durante los estudios continuos de INPESCA efectuados a bordo de un barco de  
2 búsqueda e investigación pesquera (BBIP) Biomar III durante los años 2009 y 2010. Destaca en  
3 estos estudios una similitud en el comportamiento espacial del recurso jurel (en base a estudios  
4 acústicos de biomasa instantánea y de la posición espacial de las zonas mensuales de pesca) tanto  
5 en la zona costera como oceánica, en la temporalidad de las migraciones de las concentraciones  
6 de peces desde la zona de engorda hacia la zona de desove (Junio-Septiembre), y en la dispersión  
7 de los cardúmenes a partir del mes de Septiembre. Sin embargo, entre estos dos años destacan  
8 también diferencias importantes, a saber: en 2010 aumenta significativamente la distancia entre la  
9 distribución costera y oceánica de jurel al respecto de 2009, así como también se desplaza más al  
10 Oeste la zona de dispersión del recurso durante Septiembre, desde 85-86°W en 2009 hacia 88-  
11 90°W en 2010 lo que puede indicar un posible desplazamiento hacia el Oeste entre estos años de  
12 las zonas del desove próximo.

13

14 Por otra parte, durante Agosto-Noviembre de 2009 en el área oceánica frente las costas de Chile  
15 se desarrolló un crucero de investigación pesquera sobre jurel por el BIC Atlantida (AtlantNIRO,  
16 Rusia). En este crucero se delimitó un área continua y dispersa de jurel predesovante  
17 comprendida entre 33-38°S desde la ZEE de Chile hasta 125°W, con una densidad promedio de  
18 3,3 t/mn<sup>2</sup> en una superficie de 112.000 mn<sup>2</sup> (AtlantNIRO, 2010) que es muy inferior a la  
19 registrada en un crucero similar en el año 2002, de 25.4 t/mn<sup>2</sup> en 249.000 mn<sup>2</sup> respectivamente  
20 (AtlantNIRO, 2003), concluyendo en una disminución significativa de la abundancia del recurso  
21 entre los años 2002 y 2009.

22

23 En base a la información sobre el área de distribución de jurel obtenida en el crucero de BIC  
24 Atlantida en 2009 y los desplazamientos mensuales de las zonas de operaciones pesqueras de la  
25 flota de Chile centro-sur y de la flota internacional durante la temporada de pesca 2009, se  
26 confeccionó un esquema del ciclo migratorio de jurel en el que se establece que las rutas  
27 operacionales de ambas flotas terminan (Septiembre-Noviembre) en el área delimitada por el BIC  
28 Atlantida y la cual puede ser un área de desove. Sin embargo, se debe considerar que a pesar que  
29 éste es bastante continuo, su extensión zonal es muy reducida. Basándose solo en los datos de la  
30 dinámica interanual de los desembarques de jurel en el Pacífico Suroriental durante los últimos  
31 10-12 años, se ve claramente que el recurso presenta signos de disminución importante en su  
32 disponibilidad para las flotas pesqueras tanto en las zonas costeras de Chile como en aguas  
33 internacionales, y que puede relacionarse con una disminución generalizada y progresiva de su  
34 abundancia en nivel poblacional. Al mismo tiempo, analizando la dinámica interanual de las

1 frecuencias de tamaños de jurel en las capturas de la flota nacional durante el período entre los  
2 años 2008-2013 (base datos de INPESCA), en la zona de distribución costera (de diciembre a  
3 abril-mayo) y la zona de distribución oceánica, fuera de la ZEE (de marzo a septiembre-octubre),  
4 es posible precisar unas importantes diferencias. En primer lugar, en la costera la pesquería de  
5 jurel está representada principalmente por los peces entre 23-25 y 40-42 cm de LH, sin embargo  
6 el mayor porcentaje de ejemplares son de tamaños entre 25-36 cm. Dentro de este rango es  
7 posible distinguir 2-3 clases de tamaños modales, de los cuales lo más repetitivos son 29-32 cm y  
8 25-27 cm, además de 34-35 cm presente en 2012. La presencia relativamente frecuente de peces  
9 de menor tamaño (hasta 26-28 cm de LH) en las capturas de dicha zona, especialmente durante el  
10 año 2010, puede indicar la entrada relativamente constante de nuevos reclutamientos de peces.  
11 Sin embargo, éstos no siempre son reflejados de manera íntegra en las capturas de la flota que  
12 trata evitar los sectores con una alta presencia de peces menores a los 26 cm de LH.

13

14 Por el contrario, en la zona oceánica durante las temporadas de pesca de 2008-2011 (en 2012-  
15 2013 la flota nacional no ha operado en dicha zona), destaca la ausencia de peces menores a 32  
16 (2008) – 35 (2011) cm LH y la presencia de los ejemplares hasta 50 cm y más. Por otro lado,  
17 entre los años (2008-2011) es posible observar un aumento gradual de tamaños modales en las  
18 capturas, desde los 34-35 cm en 2008 hasta los 39-40 cm en 2011, y esto sin ingreso a la  
19 pesquería oceánica de los peces de menor tamaño. De esta manera, lo anterior supone un  
20 progresivo “envejecimiento” del grupo poblacional distribuido en aguas internacionales frente a  
21 Chile centro-sur, posiblemente debido a un aislamiento temporal durante el período analizado.

22

23 Una conclusión similar es posible establecer del análisis de la dinámica de las frecuencias de  
24 tallas desde la flota de la Unión Europea entre los años 2007-2011, que indica un progresivo  
25 aumento de los tamaños modales de peces desde 32 cm en 2007 hasta 40 cm de LH en 2011  
26 (Corten & Janusz, 2011), confirmando que la operación de esta flota sobre peces de una a dos  
27 generaciones seguidas que en su tiempo colonizaron la parte oceánica del área de distribución y  
28 que han permanecido envejeciendo en ésta. Sin embargo, durante los años 2010-2011 se detecta  
29 también un grupo de peces de menor tamaño (modas 19-20 y 27-29 cm de LH respectivamente).  
30 Se supone que esta generación no está relacionada con la zona costera del Pacífico Suroriental,  
31 sino más bien es el producto del desove exitoso local en fines de 2008- inicio de 2009 en el área  
32 de los bajos submarinos ubicada entre 100-120°W (AtlantNIRO, 2010; Parada *et al.*, 2017; avisos  
33 personales de V. Anikeev (AtlantNIRO) sobre los reportes de los capitanes de algunas  
34 embarcaciones de dicha flota). Sin embargo, los peces de esta generación no se reportan de las

1 capturas de la flota oceánica del Perú en la temporada de pesca de 2012 (SC-01-12, SPRFMO,  
2 2013) lo que puede indicar su bajo aporte a la formación de la abundancia total en la región. Al  
3 contrario, en 2012 ha continuado la tendencia generalizada de envejecimiento poblacional de  
4 jurel en aguas abiertas del Pacífico Sur; en las capturas se registraron solamente los peces de  
5 tamaños superiores a los 36 cm de LT, con una moda principal centrada a los 45 cm de LT (41-42  
6 cm de LH) (SWG-11-08a, SPRFMO, 2012). De esta evidencia ha surgido la pregunta: ¿Los  
7 montes submarinos pueden cumplir un rol potencial como zonas temporales “de desove-crianza-  
8 reclutamiento”? Para abordar esta problemática se implementó un modelo biofísico en la zona de  
9 bajos submarinos (entre los 35°-37°30'S y 112°-116°30'W) para evaluar los patrones de  
10 transporte y retención asociados, y el potencial de los bajos submarinos como zonas de crianza-  
11 reclutamiento (Parada *et al.*, 2017). Para ello se determinó un índice de retención definido como  
12 el número de partículas que permanecen en la zona de montes submarinos por un período al  
13 menos de 3 meses, estableciendo un alto nivel de retención de partículas para los años 2001 y  
14 2005 consistente con la presencia de remolinos estacionarios asociados a los montes submarinos  
15 y a un bajo nivel de energía cinética de remolinos sugiriendo acoplamientos biofísicos para la  
16 ocurrencia de juveniles ocasionales de jurel en océano abierto.

17

18 De acuerdo a estos antecedentes biológico-pesqueros, se confirma que *T. murphyi* muestra un  
19 fuerte patrón migratorio relacionado a procesos de alimentación y reproducción, con una  
20 migración hacia la zona oceánica durante primavera en donde se desarrolla el desove, y una  
21 migración hacia la costa durante la época otoñal relacionada con una mayor disponibilidad de  
22 alimento en el sector costero (Quiñones *et al.*, 1997; Arcos *et al.*, 2001; Cubillos *et al.*, 2008). De  
23 acuerdo a lo reportado a la fecha, la estructura poblacional del jurel incluye tres hábitats  
24 diferentes: i) un área de crianza situada en el sur de Perú y norte de Chile, ii) un área de  
25 alimentación ubicada en la zona centro-sur de Chile, en donde ocurre el reclutamiento  
26 (individuos de 2-3 años de edad) y finalmente, iii) una extensa área de desove situada en la zona  
27 oceánica frente a Chile en donde se lleva a cabo la reproducción durante la primavera (Arcos *et*  
28 *al.*, 2001). Dicha zona de desove es recurrente a través de los años y muestra una alta actividad  
29 reproductiva desde octubre a diciembre, con un máximo en noviembre. En este periodo el jurel,  
30 bajo condiciones de alta fecundidad, se dispersa hacia una vasta área en aguas oceánicas, sin  
31 formar cardúmenes o agregaciones comerciales (Konchina *et al.*, 1996; Cubillos *et al.*, 2008).  
32 Incluir antecedentes sobre el desove en Perú

33

1 La oceanografía del área en que se desarrolla la población de jurel se caracteriza por presentar un  
2 gradiente costa océano asociado al alto nivel productivo del sector costero, como parte del  
3 sistema de surgencia de Perú-Chile. En la zona norte y central de Chile, vientos hacia el ecuador  
4 se registran de manera persistente alcanzando su máximo en la zona central durante primavera-  
5 verano influenciados por la presencia del anticiclón subtropical (Strub *et al.*, 1995; Shaffer *et al.*,  
6 1999). En el sector costero, la dirección, intensidad y rotor del viento produce una dinámica de  
7 surgencia (~100 km) que se refleja en marcados gradientes de temperatura superficial del mar  
8 durante el verano (Yáñez *et al.*, 1994) y que redundan en altos niveles de productividad biológica  
9 que sustenta, entre otras, importantes poblaciones de peces pelágicos. Por otra parte, existe una  
10 fuerte variabilidad de mesoescala en la región donde interactúan aguas costeras y oceánicas. Esta  
11 región está asociada a altos niveles de actividad cinética, lo que genera una zona de transición  
12 costera altamente dinámica (Hormazábal *et al.*, 2004). Dicha zona promueve el intercambio de  
13 propiedades desde el sector costero al oceánico, extendiendo las áreas de producción costa  
14 afuera, por ejemplo, aumentando los niveles de producción de clorofila oceánica (Correa-  
15 Ramírez *et al.*, 2007) o extendiendo el área de distribución de copépodos hacia el océano  
16 (Morales *et al.*, 2010). Entre las estructuras que promueven el intercambio entre el sector  
17 oceánico y el costero, destaca la presencia de remolinos de mesoescala y corrientes de meandros  
18 producto de una elevada energía cinética que caracteriza a la zona de transición costera frente a  
19 las costas de Chile centro-sur (Leth & Shaffer, 2001; Hormazábal *et al.*, 2004; Chaigneau &  
20 Pizarro, 2005b) y que podrían interactuar directamente con los estados tempranos de desarrollo  
21 de jurel e influenciar a los procesos de conectividad y sobrevivencia de estadios tempranos  
22 (Vásquez *et al.*, 2013).

23  
24 En cuanto a la circulación regional, la principal característica es la presencia del Giro  
25 Anticiclónico Subtropical, que abarca la Corriente Sur-Ecuatorial hacia el oeste (CSE) al norte de  
26 los 25°S, la Corriente del Pacífico Sur hacia el este (CPS) entre los 30 y 40°S y la corriente  
27 Chile-Perú (CCP) que fluye hacia el ecuador a lo largo de la costa (Chaigneau & Pizarro, 2005a).  
28 La CPS corresponde a una extensión de la Corriente Australiana del Este y está asociada a la  
29 Convergencia o Frente Subtropical (FST). El área de desove del jurel ha sido fuertemente  
30 relacionada a la presencia del FST que avanza hacia el sur en el período primavera-verano  
31 (Evseenko, 1987; Cubillos *et al.*, 2008). El FST separa las aguas subtropicales relativamente más  
32 cálidas y salinas de las aguas subantárticas más frías y menos salinas. La velocidad y orientación  
33 superficial del FST se caracteriza por alcanzar niveles por sobre los 6 cm s<sup>-1</sup> de un flujo  
34 predominante hacia la costa (Chaigneau & Pizarro, 2005a).

## 1 **ii) La población de jurel como objeto de estudio mediante modelación biofísica**

2 En las últimas dos décadas, en conjunto con el rápido crecimiento de la capacidad computacional,  
3 se han desarrollado modelos numéricos hidrodinámicos de escala regional, los que están  
4 disponibles para describir la circulación de distintas cuencas alrededor del mundo en forma  
5 realista (Haidvogel & Beckmann, 1998). Los modelos basados en el individuo (Individual Based  
6 Models; IBM) están siendo, cada vez más, acoplados con dichos modelos hidrodinámicos para  
7 estudiar la dinámica de los estadios tempranos de vida de especies marinas (Mullon *et al.*, 2003;  
8 Parada *et al.*, 2003; Miller *et al.*, 2006; Brochier *et al.*, 2008a). En un Modelo Basado en el  
9 Individuo (IBM), las características de un sistema simulado emergen de las propiedades  
10 individuales de los agentes modelados y su interacción, tanto con el medio como con otros  
11 agentes (Grimm *et al.*, 2006). En consecuencia, el uso de estos modelos para simular la historia  
12 de vida temprana de organismos marinos, considera a huevos y larvas pelágicas como partículas  
13 individuales que interactúan con el medio en que son liberadas, y que dependiendo de las  
14 condiciones que experimenten pueden determinar propiedades de la población, como son la  
15 variabilidad del reclutamiento y la sustentabilidad de la población en el tiempo.

16  
17 Este enfoque de modelación biofísica ha sido utilizado para estudiar poblaciones de peces  
18 marinos, permitiendo resolver problemáticas relacionadas con el transporte de huevos y larvas  
19 (Hinckley *et al.*, 1996; Hugget *et al.*, 2003; Parada *et al.*, 2003; Brochier *et al.*, 2008b; Itoh *et al.*,  
20 2009), la retención de estadios tempranos de desarrollo en zonas de crianza productivas y  
21 convenientes para el crecimiento de larvas (Miller *et al.*, 2006; Brochier *et al.*, 2008a; Parada *et al.*  
22 *et al.*, 2008), la simulación de patrones de reclutamiento (Bartsch *et al.*, 2004), la evaluación de los  
23 cambios en el momento y lugar de la reproducción (Hinckley *et al.*, 2001), relaciones tróficas y  
24 de crecimiento larval (Kristiansen *et al.*, 2007) y el efecto de variables ambientales en la tasa de  
25 sobrevivencia de huevos y larvas (Allain *et al.* 2007). De esta manera, los IBM constituyen una  
26 metodología compleja que permite evaluar cómo varios factores asociados al ambiente, actúan  
27 independiente o simultáneamente durante las diversas fases de la etapa de la historia de vida  
28 temprana de dichas poblaciones.

29  
30 En un esquema de modelación biofísica marina el medio en que se desarrollan los individuos está  
31 dado por el modelo hidrodinámico, que debe rescatar los principales rasgos físicos y  
32 oceanográficos del área de estudio y que determinará las condiciones experimentadas por los  
33 individuos en cada paso de tiempo (i.e. velocidad y dirección de corriente, temperatura,  
34 salinidad, etc.). En consecuencia, este tipo de modelación requiere de modelos hidrodinámicos

1 que reproduzcan de manera consistente la dinámica física del hábitat estudiado. Uno de los  
2 modelos más utilizados corresponde al Regional Oceanic Modeling System (ROMS). El modelo  
3 ROMS ha sido ampliamente utilizado por la comunidad científica. Destacado por ejemplo la  
4 modelación de la cuenca del Atlántico norte (Haidvogel *et al.*, 2000), el estudio de la corriente de  
5 California (Marchesiello *et al.*, 2003), el estudio de la corriente polar oriental (Peliz *et al.*, 2003),  
6 el estudio de la dinámica estacional de la circulación superficial de la corriente de California (Di  
7 Lorenzo, 2003), la circulación y estudio biogeoquímico del océano (Dinniman *et al.*, 2003), la  
8 variabilidad oceanográfica (Budgell, 2005), estudio de turbulencias (Warner *et al.*, 2005), el  
9 estudio de ecosistemas marinos (Wilkin *et al.*, 2005), el estudio de circulación del océano frente a  
10 Nueva Zelanda (Hadfield *et al.*, 2007), el estudio de condiciones de bordes, iniciales y forzantes  
11 en la costa de Perú (Echevin *et al.*, 2011), entre otros.

12  
13 El transporte de huevos y larvas desde el área de desove hacia las zonas de crianza constituyen un  
14 factor crítico que afecta la sobrevivencia larval y el subsecuente reclutamiento en peces pelágicos  
15 (Hare & Cowen, 1993; Nakata *et al.*, 2000). Además, las interacciones entre los procesos físicos  
16 y los biológicos de los estadios tempranos de desarrollo han sido consideradas uno de los  
17 principales factores que determinan la sobrevivencia larval y el éxito reproductivo, y que de esta  
18 manera contribuyen a la dinámica del reclutamiento de las especies de peces marinos (Myers &  
19 Drinkwater, 1989; Jenkins & May, 1994; Nakata *et al.*, 2000). Los procesos oceanográficos  
20 físicos que influyen la distribución de huevos y larvas de peces, actúan en un amplio rango de  
21 escalas que van desde algunos metros (e.g. circulación Langmuir y transporte marea; Kingsford,  
22 1990) a miles de kilómetros (Cowen, 1985). Uno de los aspectos más importantes que pueden ser  
23 abordados a través de un esquema de modelación biofísica es el estudio de las estrategias  
24 demográficas de diferentes sub-poblaciones, incluyendo la dinámica del desove, la dispersión  
25 larval, la conectividad espacial y la variabilidad del reclutamiento (Grimm *et al.*, 2006). El  
26 conocimiento de la distribución espacial del desove de jurel ha demostrado que desoves  
27 oportunistas pueden ocurrir en cualquier zona donde el stock adulto está presente. En este  
28 contexto, desoves de jurel han sido observados hasta los 15°S frente a las costas de Perú  
29 (Santander & Castillo, 1971; Gorbunova *et al.*, 1985). Sin embargo, las mayores concentraciones  
30 de huevos y larvas han sido registradas entre los 30° y 40°S frente a Chile centro-sur (Grechina *et*  
31 *al.*, 1998b). Basado en antecedentes biológico-pesqueros una única área de desove ha sido  
32 descrita para jurel en el Pacífico suroriental, situada en el norte de Chile y Sur de Perú (Arcos *et*  
33 *al.*, 2001). Estudios genéticos y de microquímica de otolitos de jurel no han entregado evidencia  
34 robusta sobre la existencia de diferenciación poblacional en el Pacífico (Cárdenas *et al.*, 2009;

1 Ashford *et al.*, 2011). De esta manera, la Organización Regional de Pesca del Pacífico Sur  
2 (SPRMO) ha restringido la hipótesis de estructura poblacional a dos: una superpoblación o una  
3 metapoblación (ver Gertlotto *et al.*, 2012). En ambas hipótesis un aspecto importante es la  
4 conectividad entre el stock adulto y el stock recluta por medio de la dispersión y sobrevivencia de  
5 estados tempranos de desarrollo.

6  
7 Considerando una única área de reclutamiento en el Pacífico suroriental (sur de Perú, norte de  
8 Chile), existe una separación de gran escala entre la zona de desove principal (zona oceánica  
9 frente a Chile centro-sur) y una distancia menor respecto a los desoves más costeros, pero menos  
10 abundantes, registrados en el mar de Perú. De esta manera, el proceso previo al reclutamiento  
11 desde la zona de desove principal involucra un mecanismo eficiente que propicie el transporte de  
12 estadios tempranos hacia la zona de crianza, mientras que los desoves ocurridos en el área de  
13 Perú necesitarían recorrer una menor distancia, y ser retenidos en el área de crianza. Una vez  
14 establecida la conectividad mediada por procesos oceanográficos, los juveniles de jurel debiesen  
15 mantenerse al interior del sector costero del norte de Chile y sur de Perú y encontrar un ambiente  
16 propicio para su desarrollo.

17  
18 Hasta la fecha, estudios realizados por el Instituto de Investigación Pesquera mediante estudios  
19 biofísicos, han permitido establecer que los productos de desove de jurel que ocurren frente a  
20 Chile centro sur son transportados hacia el área principal de desove estableciendo conectividad  
21 entre el stock desovante y la fracción recluta de la población (Vásquez, 2012; Vásquez *et al.*,  
22 Aceptado en PIO). Además, se han identificado los principales procesos oceanográficos que  
23 pueden mediar la dispersión larval y modular la conectividad entre el área principal de desove y  
24 el área de crianza (Vásquez *et al.*, 2013) y se han propuesto nuevos ambientes oceánicos, como  
25 los bajos submarinos, como potenciales zonas de desove/reclutamiento (Parada *et al.*, 2017).  
26 Todas estas piezas de información han permitido a la fecha esclarecer aspectos relevantes para el  
27 entendimiento de la estructura poblacional del jurel respecto al desove frente a Chile, sin  
28 embargo, existen aun enormes desafíos que se esperan consolidar a través del presente proyecto,  
29 entre los que se encuentran: i) Definir la historia de vida temprana del jurel en zonas de desove  
30 distintas a la oceánica frente a Chile central; ii) Incorporar información biológico/pesquera en los  
31 módulos de crecimiento, comportamiento de los individuos en la modelación biofísica; iii)  
32 Definir las condiciones físico-biológicas que definen al área de crianza de jurel (¿Porque los  
33 reclutas de jurel parecen distribuirse exclusivamente en el norte de Chile y sur de Perú?), iv)  
34 Describir el proceso de transporte de estadios tempranos de desarrollo en la zona de Perú; v)

1 Realizar un análisis comparativo de las densidades e importancia del desove en las distintas zonas  
2 donde este ha sido registrado; vi) Analizar la importancia que pudiesen tener ambientes  
3 ocasionales de desove/reclutamiento de jurel (e.g. montes submarinos) en un escenario de baja  
4 abundancia poblacional; vii) Discutir y ponderar la importancia de los distintos focos de desove  
5 de la especie hacia el proceso de reclutamiento poblacional, viii) Sugerir y discutir mecanismos  
6 de modelación que permitan la incorporación de indicadores biofísicos en la estimación de  
7 reclutamiento en la evaluación de stock de jurel y en el manejo de la especie en el Pacífico  
8 suroriental.

9  
10 La evaluación de stock de jurel realizada con modelos edad-estructurados (Serra *et al.*, 2001;  
11 Sepúlveda *et al.*, 2006), requiere de índices de abundancia relativa o absolutas para la calibración  
12 del modelo. En el caso del jurel, se ha utilizado la información de captura por unidad de esfuerzo  
13 estándar, las evaluaciones acústicas de biomasa realizadas frente a la zona centro-sur en otoño-  
14 invierno del período 1997-2012 y las estimaciones de biomasa desovante estimadas mediante el  
15 MPDH. Sin embargo, el decaimiento sostenido del reclutamiento, los cambios en la  
16 disponibilidad de jurel en la zona costero-oceánica podrían ser determinantes en indicadores  
17 como las tasas de captura de la flota y en las evaluaciones acústicas de la biomasa hacen  
18 altamente recomendable la obtención de indicadores poblacionales independiente de la pesquería  
19 y que incorporen elementos del hábitat que puedan modular cambios en la productividad  
20 poblacional o diferencias en la composición espacial del stock de jurel. Por esta razón, un estudio  
21 mediante modelación biofísica que enlace el proceso de desove (y la biomasa desovante) con el  
22 reclutamiento toma una mayor relevancia como un indicador del estado de la abundancia de los  
23 individuos que se incorporan a la población y como un índice auxiliar para la evaluación de stock  
24 del recurso, de manera independiente de la pesquería, especialmente en el estado crítico que se  
25 encuentra este proceso actualmente.

26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34

## 5.- METODOLOGÍA DE TRABAJO

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11

La implementación de un modelo biofísico espacialmente explícito que permita obtener índices de reclutamiento y probar hipótesis relacionadas con la historia de vida temprana y la estructura poblacional de jurel requirió 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 jurel. Este modelo acoplado permite conocer la historia de vida de cada uno de los individuos modelados (desde huevo a juvenil) y en conjunto generar índices de reclutamiento a nivel de población o subpoblacional.

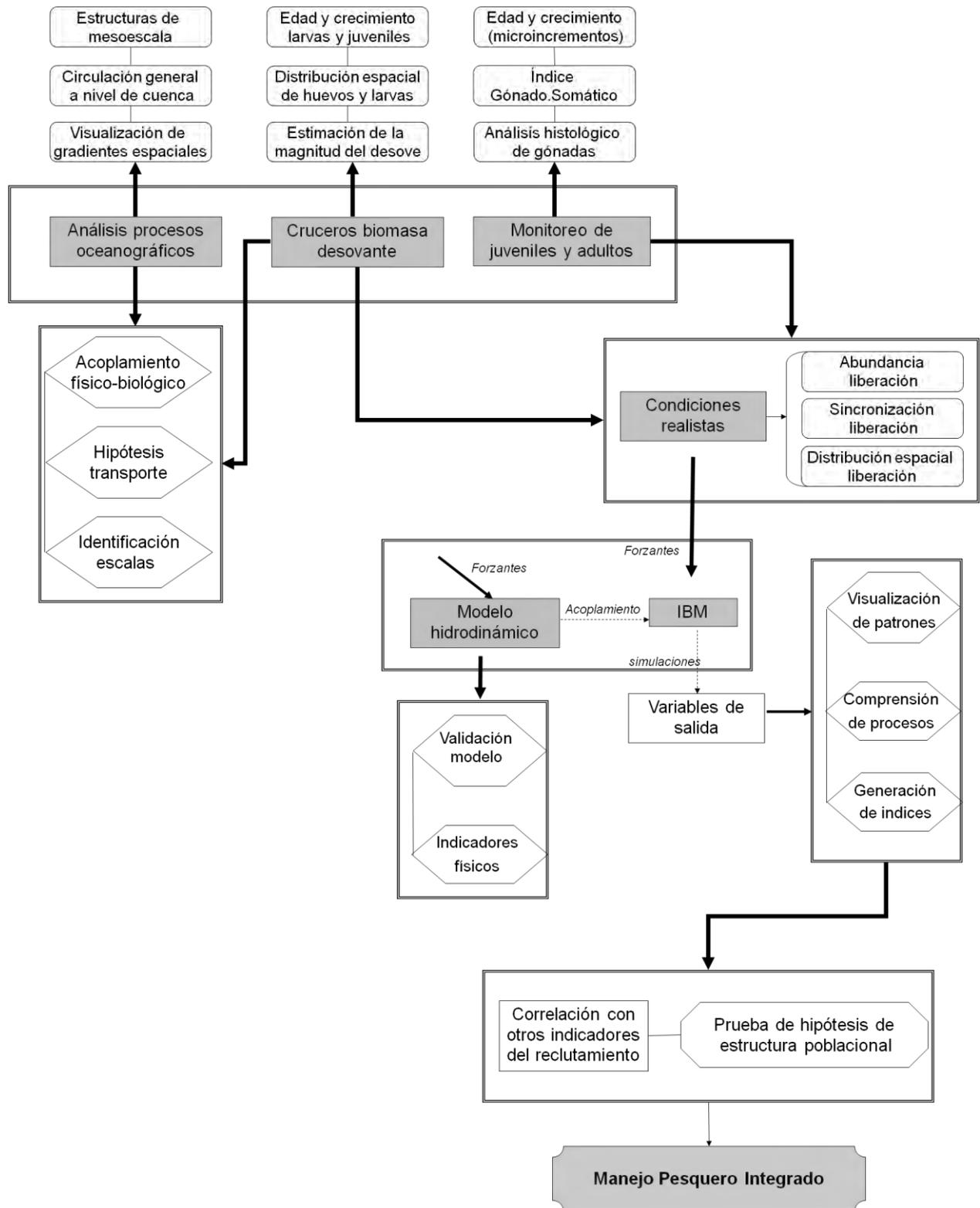
### 5.1. Herramientas utilizadas

12 Las herramientas computacionales que se utilizaron en la modelación se enumeran en la Tabla I y  
13 consideraron la implementación de un modelo hidrodinámico, el acoplamiento biofísico, la  
14 modelación espacio-temporal del desove, la evaluación de stock y el post-proceso de la  
15 información emanada del modelo biofísico.  
16

17  
18  
19

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

Herramienta	Función	Sitio web	Referencia
ROMS agrif	Modelación hidrodinámica	<a href="http://romsagrif.org">http://romsagrif.org</a>	Penven <i>et al.</i> , 2006; Shchepetkin & McWilliams, 2003
Ichthyop	Modelación biofísica	<a href="http://www.ichthyop.org">http://www.ichthyop.org</a>	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	<a href="http://admb-project.org">http://admb-project.org</a>	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	<a href="http://www.r-project.org">http://www.r-project.org</a>	Dalgaard, 2008
Matlab	Lenguaje y ambiente de programación para análisis estadístico de los resultados de la modelación y en la graficación de resultados biofísicos y oceanográficos	<a href="http://www.mathworks.com">http://www.mathworks.com</a>	Moler, 1984



1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8

Figura 1. Esquema de trabajo para el estudio de la historia de vida temprana del jurel y la dinámica del reclutamiento en el océano Pacífico suroriental bajo un enfoque de modelación biofísica

## 1 **5.2. Modelo hidrodinámico**

### 2 **5.2.1. Descripción**

3 El modelo hidrodinámico utilizado en la modelación biofísica constituyó un componente  
4 esencial, pues las condiciones que experimentan los individuos modelados en cada paso de  
5 tiempo (ubicación espacial, condiciones físicas del ambiente, etc) son producto de la interacción  
6 del comportamiento individual (movimiento, natación) con el modelo hidrodinámico que simula  
7 el ambiente oceánico donde habita, en este caso, el jurel. En consecuencia es altamente necesario  
8 contar con un modelo validado que represente los principales rasgos del sistema oceanográfico  
9 donde se desarrolla la población de jurel. En el presente estudio se ha utilizado el modelo  
10 regional ROMS (Regional Ocean Modeling System), específicamente la versión ROMS\_AGRIF  
11 v3.0 desarrollada por el IRD en Francia e implementado por expertos nacionales en el marco de  
12 el presente proyecto para el Pacífico suroriental, el cual fue validado por medio de diversas  
13 aplicaciones metodológicas. El modelo ROMS ha sido ampliamente utilizado por la comunidad  
14 científica para realizar estudios de circulación del océano. El modelo ROMS resolvió la  
15 circulación asociada al hábitat de los lugares de desove y desarrollo temprano de jurel a través de  
16 simulaciones basadas en cálculo numérico.

17

18 La modelación mediante ROMS consideró varias etapas en su desarrollo, se inició con la creación  
19 de la grilla y máscara de la zona a modelar (tamaño de las celdas de la grilla), se incorporó la  
20 batimetría del fondo marino, los forzantes atmosféricos (esfuerzo del viento) y superficiales (por  
21 ejemplo: flujo y transporte superficial del calor, flujo de agua dulce), y por último las condiciones  
22 iniciales y las condiciones de bordes laterales, tales como temperatura, salinidad, corrientes y  
23 elevación de la superficie del mar. La etapa siguiente correspondió a la compilación del modelo;  
24 entrelazando la información del pre-procesamiento con el algoritmo del código ROMS. Una vez  
25 obtenido el ejecutable, la siguiente etapa fue correr el modelo, donde ROMS resuelve las  
26 ecuaciones primitivas de la hidrodinámica numéricamente, almacenando la información de las  
27 variables requeridas, para cada paso de tiempo y durante todo el periodo que se desea modelar. El  
28 algoritmo ROMS estuvo paralelizado, por lo cual fue posible correrlo en varios procesadores por  
29 medio de su memoria compartida o memoria distribuida. Finalmente, en la etapa de observación  
30 de los resultados, se trabajó con los archivos de salida en formato Netcdf, los cuales se  
31 procesaron para realizar análisis de interés que permitieron hacer el diagnóstico del modelo. Al  
32 término del proceso se realizó la validación, comparando los resultados del modelo con los datos  
33 empíricos.

34

### 1 **5.2.2. Procesamiento de archivos de entrada**

2 El modelo ROMS requirió como archivos de entrada, el forzantes atmosféricos provenientes de  
3 NCEP2, condiciones de borde e iniciales provenientes de ECCO, batimetría ETOPO2 y aportes  
4 mensuales de agua dulce en forma de precipitaciones provistas por el forzante atmosférico  
5 NCEP2. El procesamiento de los archivos de entrada fue realizado mediante la herramienta  
6 Matlab ROMSTOOLS (Penven *et al*, 2007). En general, esta herramienta permitió interpolar  
7 espacialmente los forzantes a la grilla del modelo ROMS, suavizar la batimetría y seleccionar las  
8 zonas de descarga de ríos (en ambientes costeros).

9

### 10 **5.2.3. Grillas, dominios y resolución de las grillas**

11 La grilla de modelación hidrodinámica utilizada para este estudio involucró una gran escala  
12 espacial a nivel de la cuenca del Pacífico suroriental con el objeto de incorporar todas las posibles  
13 áreas de desove de jurel y sus trayectoria de transporte. El dominio modelado comprendió desde  
14 los 8°N hasta los 47°S, desde los 68°W hasta los 130°W. La grilla del dominio utilizado se  
15 muestra en la Figura 2, la cual tiene una resolución de 10 km, con 610 x 587 puntos de grilla. En  
16 la Figura 3 se muestra la batimetría etopo2 de 4 km de resolución utilizada en el modelo. El  
17 modelo ROMS generado tiene 32 niveles verticales, niveles que se distribuyen de manera más  
18 densa en la superficie. Una de las alternativas que entrega la modelación ROMS es la posibilidad  
19 de realizar subdominios de anidamiento *off-line* mediante el método roms2roms (Mason *et al.*,  
20 2010), el cual permite obtener a partir de un dominio amplio (llamado dominio padre) un  
21 dominio acotado de mayor resolución espacial (llamado dominio hijo). Esta metodología es útil  
22 para el estudio y entendimiento de procesos locales que requieren una mayor resolución espacial  
23 que el modelo inicial. En este estudio se ha desestimado la realización de modelos anidados, pues  
24 los procesos de transporte y conectividad de jurel responden a una escala regional amplia, por lo  
25 que la grilla de 10 km resolvió los procesos oceanográficos involucrados en la historia de vida  
26 temprana del jurel. En versiones futuras del modelo que busquen abordar aspectos locales de  
27 formación de agregaciones de jurel será recomendable el uso de esta metodología para aumentar  
28 la resolución espacial del modelo hidrodinámico.

29

### 30 **5.2.4. Resolución temporal**

31 El modelo ROMS desarrollado fue del tipo interanual, el cual comprendió finalmente 2 décadas  
32 que correspondió al periodo con disponibilidad de condiciones de borde e iniciales continuas, así  
33 como de forzantes para la modelación. Los anterior asociado a que no es recomendable mezclar

1 diferentes productos para forzar el modelo. Se ha utilizado el producto ECCO como condiciones  
2 iniciales y de borde, el cual comenzó en 1993 hasta 2014, al igual que el producto NCEP2  
3 correspondiente a los forzantes atmosféricos. Por otro lado, la resolución temporal del modelo  
4 fue diaria, lo cual fue suficiente para resolver los fenómenos oceanográficos que modulan la  
5 dinámica del transporte de estadios tempranos de jurel.

6

## 7 **5.2.5. Forzantes del modelo**

### 8 *5.2.5.1. Forzantes atmosféricos*

9 El modelo ROMS utilizó forzantes atmosféricos provenientes del producto NCEP-DOE re-  
10 análisis 2, el cual contempló un sistema de análisis/pronóstico para realizar asimilación de datos  
11 usando datos del pasado a partir de 1979 hasta el año anterior. Estos datos fueron proporcionados  
12 por el PSD (Physical Sciences Division) NOAA/OAR/ESRL, ubicada en Boulder, Colorado,  
13 EE.UU. desde su sitio web: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>. Los datos tuvieron una resolución  
14 temporal de 6 horas y resolución espacial de 1.9° aproximadamente. La información que contiene  
15 estos forzantes correspondieron a la temperatura a 2 metros de la superficie del mar, el flujo  
16 medio de radiación de onda larga ascendente y descendente en la superficie, el flujo medio de  
17 radiación solar ascendente y descendente en superficie, la tasa de precipitación en superficie, la  
18 humedad específica a 2 metros de la superficie, la temperatura superficial del mar, las  
19 componentes del viento U y V a 10 metros de superficie del mar. A los forzantes se incorporó  
20 datos de marea, provenientes del modelo global TPXO7. Los archivos forzantes ("roms\_frc")  
21 tienen un tamaño cada uno 1.1 Gb, los forzantes de volumen ("roms\_blk") 5.1 Gb, para el  
22 periodo total de modelación se necesitó 1.6 Tb de almacenamiento, disponible en el sistema de  
23 almacenamiento de INPESCA.

24

### 25 *5.2.5.2. Forzantes externos*

26 La batimetría del fondo marino que se utilizó provino del producto ETOPO2 de 4 km de  
27 resolución. Las mareas provienen del modelo global TPXO7, el cual a su vez asimila datos de  
28 anomalías del nivel del mar provenientes del modelo TOPEX/Poseidon, estos modelo de marea  
29 proporcionaron amplitudes complejas de la elevación de la superficie del mar para los 8  
30 armónicos constituyentes primarios (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1), así mismo incorpora los  
31 armónicos de periodo largo (Mf, Mm) y los no lineales (M4, MS4, MN4), estos datos tienen  
32 resolución de 1/4°. El modelo ROMS utiliza las componentes de marea: M2, S2, N2, K2, K1, O1,  
33 P1, Q1, Mf y Mm.

### 1 **5.2.6. Condiciones iniciales y de borde**

2 Las condiciones iniciales y de borde que se utilizaron corresponden al producto global ECCO  
3 Kalman Filter (kf080) que consiste en un sistema de asimilación de datos oceánicos global,  
4 ECCO está basado en el modelo de circulación general del MIT (MITgcm). Este modelo global  
5 incorpora datos altimétricos, tales como altura superficial del mar del modelo TOPEX/Poseidon y  
6 altimetría del modelo ERS-1/2. Por otro lado ECCO utilizó forzantes hidrográficos obtenidos de  
7 diferentes métodos observacionales, tales como datos de perfiladores CTD de temperatura y  
8 salinidad provenientes de secciones del proyecto The World Ocean Circulation Experiment  
9 (WOCE), Batitermógrafos reemplazables (XBT) para perfiles verticales de temperatura,  
10 temperatura superficial del océano y salinidad superficial del océano del análisis de Reynolds  
11 (Reynolds, 1988), boyas ARGO para temperatura y salinidad, campos de temperatura y salinidad  
12 de Levitus. La resolución temporal de estos datos fue de 10 días, la resolución espacial es de 1°  
13 con 46 niveles de resolución vertical. El modelo ROMS utilizó los datos de salinidad,  
14 temperatura, velocidad zonal y meridional, velocidad vertical y nivel del mar como condiciones de  
15 borde.

16

### 17 **5.2.7. Configuración del modelo hidrodinámico**

18 El modelo hidrodinámico utilizado es ROMS (Regional Ocean Modeling System) versión  
19 AGRIF V3.0 ([www.romsagrif.org](http://www.romsagrif.org)) desarrollada por el IRD y INRIA en Francia. La  
20 implementación del modelo hidrodinámica comprendió el periodo: **Enero de 1993 a Junio de**  
21 **2014**. El modelo se corrió en el nodo que posee el Instituto de Investigación Pesquera. El tiempo  
22 de modelación por mes fue aproximadamente de 6 horas, por lo tanto para un año de modelación  
23 se necesitó cuatro días, para el periodo de 21 años se requiere más de tres meses de modelación  
24 continua e ininterrumpida. El modelo tiene una resolución espacial de 10 km con salidas diarias.  
25 La configuración del modelo contempló seleccionar algunas opciones en el archivo cppdefs.h.,  
26 las cuales se presentan a continuación:

- 27 • Paralelización: OPENMP.
- 28 • Bordes abierto: OBC\_WEST, OBC\_NORTH, OBC\_SOUTH.
- 29 • Mareas: SSH\_TIDES, UV\_TIDES, TIDERAMP.
- 30 • Configuración de la grilla: CURVGRID, SPHERICAL, MASKING.
- 31 • Dinámica del modelo: SOLVE3D, UV\_COR, UV\_ADV.
- 32 • Advección de trasadores laterales: TS\_HADV\_RSUP3.
- 33 • Nudging: ZNUDGING, M2NUDGING, M3NUDGING, TNUDGING, FRC\_BRY,

- 1 Z\_FRC\_BRY, M2\_FRC\_BRY, M3\_FRC\_BRY, T\_FRC\_BRY
- 2 • Mezcla vertical: LMD\_MIXING, LMD\_SKPP, LMD\_BKPP, LMD\_RIMIX,
- 3 LMD\_CONVEC, LMD\_NONLOCAL.
- 4 • Ecuaciones de estado: SALINITY, NONLIN\_EOS, SPLIT\_EOS.
- 5 • Forzante superficial: BULK\_FLUX, BULK\_FAIRALL, BULK\_LW, BULK\_EP,
- 6 BULK\_SMFLUX.
- 7 • Capa esponja: SPONGE, SPONGE\_GRID.
- 8 • Forzante fondo: ANA\_BSFLUX, ANA\_BTFLUX.
- 9 • Condiciones de borde: OBC\_M2FLATHER, OBC\_M3ORLANSKI, OBC\_TORLANSKI.
- 10

### 11 **5.2.8. Simulaciones**

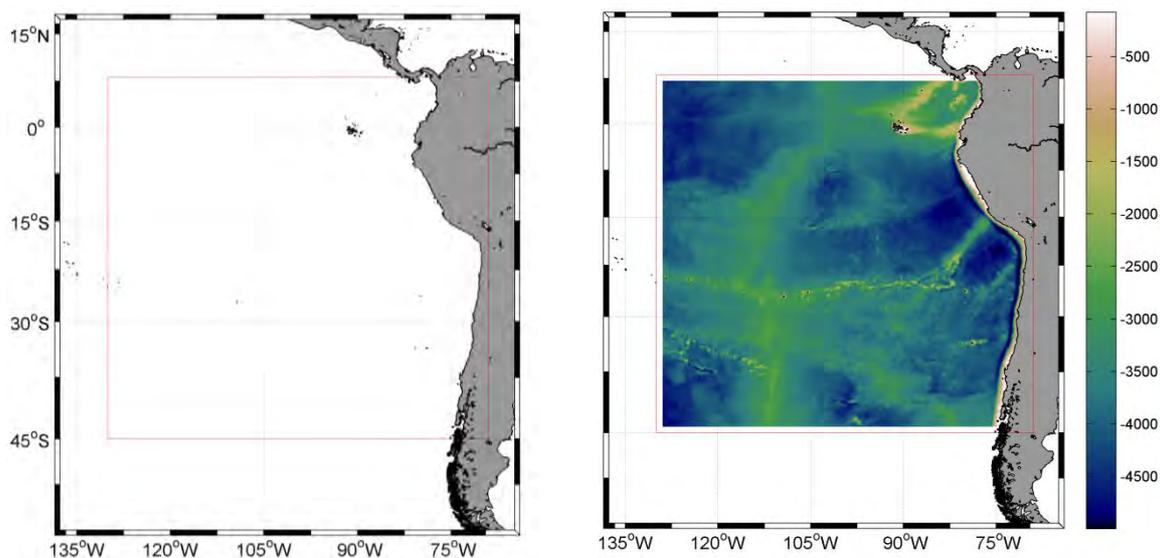
12 El tiempo de modelación continua e ininterrumpida para el periodo 1993-2014 fue de cuatro  
13 meses. Se debe destacar que la modelación fue realizada continuamente en el clúster de  
14 INPESCA. El modelo tiene una resolución espacial de 10 km con salidas diarias. Las corridas  
15 fueron mensuales, es decir se obtuvo un archivo de salida para cada mes.

16

### 17 **5.2.9. Variables de salida del modelo hidrodinámico**

18 Las variables de salidas del modelo correspondieron a dos tipos, las salidas "his" las cuales  
19 tuvieron resolución diaria, en estas fueron temperatura, salinidad, corrientes U y V para  
20 diferentes profundidades y nivel del mar, cada una de estas salidas "his" pesó 7 Gb. Por otro lado  
21 se crearon las variables "avg" que corresponden a un promedio mensual para cada una de las  
22 anteriores variables, cada una de estas salidas tuvo un tamaño de 326 Mb aproximadamente. Por  
23 lo tanto, para todo el periodo de modelación se necesitó un almacenamiento de 2 TB.

24



1  
2  
3  
4  
5  
6

Figura 2. Dominio espacial del modelo hidrodinámico ROMS para la modelación biofísica de jurel (cuadro rojo, panel izquierdo). Batimetría etopo2 utilizada para forzar el modelo, con resolución espacial de 4 km (panel derecho).

#### 7 **5.2.10. Validación del modelo hidrodinámico**

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

20

##### 21 *5.2.10.1. Validación mediante el uso de información satelital*

22 Con el objeto de analizar el ciclo anual y la variabilidad interanual del modelo respecto a  
23 información observada se obtuvo información de la temperatura superficial del mar desde el  
24 programa internacional PATHFINDER ([www.pathfinder.nodc.noaa.gov](http://www.pathfinder.nodc.noaa.gov); periodo 1994-2012) y  
25 salinidad superficial del mar desde AQUARIUS (<ftp://podaac-ftp.jpl.nasa.gov>, periodo 2011-

2014). La validación y contraste de modelos hidrodinámicos se hizo siguiendo la metodología propuesta por Vásquez, 2012 y Vásquez *et al.*, 2013, el cual se basa en el uso de Funciones Ortogonales Empíricas (FOE) que permitieron cuantificar el desempeño de los modelos en reproducir la variabilidad oceánica en tiempo y espacio. La metodología además permitió probar la significancia de la correlación entre los componentes principales del modelo y de los datos observados por medio de una aproximación Montecarlo que permitió cuantificar la autocorrelación en las series de tiempo.

Para aplicar la metodología de validación basada en FOE, la información original proveniente del satélite y de las salidas del modelo hidrodinámico debió ser reorganizadas en matrices tiempo-espacio, de esta forma se obtuvo 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,  $\lambda S$  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 utilizó una aproximación Montecarlo, la cual permitió 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

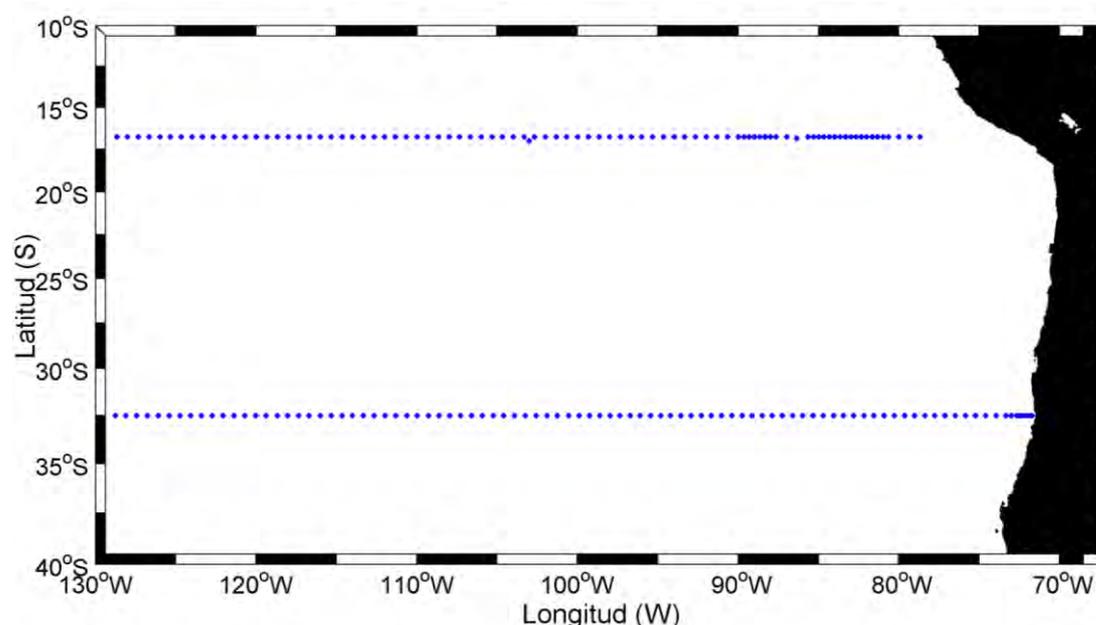
1 cada una de las 10.000 realizaciones y se construyó una distribución de probabilidad de la  
2 correlación cruzada entre los componentes principales. Desde dicha distribución se estimó la  
3 significancia de la correlación. Si la correlación sobrepasa del 95% de ocurrencias se consideró la  
4 correlación estadísticamente significativa.

5

#### 6 5.2.10.2. Validación de la estructura vertical a través del uso de datos *in situ*

7 Con el fin de analizar localmente la estructura vertical del modelo ROMS respecto a mediciones  
8 realizadas *in situ*, se generó un método de análisis que permitió replicar un crucero oceanográfico  
9 virtualmente al interior del modelo ROMS tridimensional. Para esto se utilizó información  
10 proveniente de muestreos con perfiladores CTD realizados en el marco de dos cruceros del  
11 WOCE (World Ocean Circulation Experiment Global Data Resource) los cuales abarcan todo el  
12 dominio longitudinal del modelo ROMS, el primero realizado frente a las costas de Perú (latitud  
13 16°45'S, desde el 78°45' al 128°40'W) con una extensión de 5300 km; y el segundo realizado  
14 frente a las costas de Chile (latitud 32°30'S, desde el 71°40' al 128°40'  
15 W) (Figura 3). De esta manera se realizaron, secciones comparativas, análisis de series espacio y  
16 diagramas TS para indagar en el desempeño del modelo reproduciendo las principales masas de  
17 agua del sistema.

18



19

20 Figura 3. Distribución espacial de las transectas WOCE utilizadas para la validación vertical del  
21 modelo ROMS.

22

23

### 1 5.2.10.3. El Niño Oscilación del Sur

2 Por otra parte, se analizó la capacidad del modelo hidrodinámico respecto de reproducir una de  
3 las señales más características y críticas el Pacífico suroriental: El Niño. Para analizar si el  
4 modelo captura la variabilidad ecuatorial se comparó la anomalía de la profundidad de la  
5 isoterma de 20°C a los 105°W, 5°S respecto al índice el Niño 3.4.

6

### 7 5.2.10.4. Patrón de circulación superficial general

8 Finalmente, se analizó el patrón de circulación en los primeros metros de la columna de agua  
9 (donde habita el jurel y donde toma parte el modelo biofísico) para verificar que el modelo  
10 reproduzca correctamente la dirección y magnitud de las corrientes. Para este propósito, la  
11 circulación observada fue inferida usando derivadores seguidos por satélites desplegados en el  
12 periodo 1979-2010. El set de datos de derivadores es parte del programa Global Drifter  
13 Program/Surface Velocity Program (ver <http://www.aoml.noaa.gov>) desplegados en el Pacífico  
14 suroriental cuya posición es reportada en intervalos de 6 horas por el Atlantic Oceanographic and  
15 Meteorological Laboratory in Miami (Hansen & Poulain, 1996) los cuales fueron promediados a  
16 registros diarios. Todos los derivadores son provistos de una draga a 25 metros de profundidad la  
17 cual rescata la dirección e intensidad de la corriente en dicho estrato. En el caso del modelo  
18 hidrodinámico se replicó el esquema observado mediante el despliegue mensual de derivadores  
19 virtuales a profundidad fija de 25 m que fueron generados en una grilla de 1 x 1° entre la costa y  
20 el 95°W y entre los 5° y 45°S cuyas trayectorias fueron computadas por 6 meses en el periodo  
21 1994 -2014. Los componentes de velocidad fueron calculados a través de un esquema centrado  
22 en diferencias.

23

## 24 5.3. Modelo biofísico

25 La modelación de la historia de vida temprana de jurel y su efecto en la dinámica del  
26 reclutamiento es altamente dependiente del modelo conceptual de la historia de vida de la especie  
27 en las distintas fracciones de la población. En este estudio y considerando la compleja estructura  
28 poblacional del jurel y la condición de baja abundancia poblacional, se requirió abordar más de  
29 una hipótesis para hacer emerger patrones que expliquen la variabilidad del reclutamiento. No  
30 obstante, para probar dichas hipótesis fue necesario identificar los compartimentos biológicos y  
31 las piezas de información necesarias para probar dichas hipótesis. El modelo biofísico fue  
32 implementado en la plataforma de acoplamiento ICHTHYOP versión 3.2 (Lett *et al.*, 2008,  
33 <http://www.ichthyop.org/>) que es un software libre desarrollado para el estudio de transporte de  
34 estados tempranos de peces y el estudio del efecto de factores físicos (temperatura, densidad,

1 corrientes) y biológicos (boyantes, crecimiento, movimiento, etc) en la historia de vida de estos  
2 organismos con foco hacia la dinámica del reclutamiento. El modelo biofísico implementado  
3 permitió simular la historia de vida temprana de jurel a través de una modelación basada en el  
4 individuo (IBM) que incorporó la historia de vida de cada organismo a través del concepto de  
5 programación objeto orientado, donde el ambiente físico experimentado por cada individuo está  
6 caracterizado por las variables físicas heredadas desde el modelo hidrodinámico. Los individuos  
7 modelados fueron caracterizados por variables de estado a nivel del individuo. Estas variables de  
8 estado correspondieron a edad (días), estado (huevo, larva con saco vitelino, larva en estado de  
9 alimentación), posición (latitud, longitud, profundidad), y estatus de sobrevivencia, entre otras.

10

11 Las variables de estado oceanográficas y físicas (variables de entrada: temperatura, salinidad, u,  
12 v, w, zeta) provinieron de una grilla discreta de modelación hidrodinámica ROMS. De tal  
13 manera, que el modelo biofísico heredó la estructura de espacial de la grilla del modelo  
14 hidrodinámico, y fue forzado por las variables de estado ambientales a la escala espacial en que  
15 estas han sido almacenadas. Para determinar la localización de cada uno de los individuos y sus  
16 propiedades, las variables ambientales fueron interpoladas en el espacio y tiempo. De esta  
17 manera, el modelo biofísico fue capaz de generar trayectorias de movimiento de partículas y su  
18 evolución en el tiempo en alta resolución. Considerando los objetivos del presente proyecto, se  
19 requirió abordar la problemática con un esquema de modelación biofísica basada en condiciones  
20 realistas para hacer emerger patrones que expliquen la variabilidad del reclutamiento. No  
21 obstante, para llevar a cabo este esquema fue necesario identificar los compartimentos biológicos  
22 (también llamados sub-modelos) y las piezas de información necesarias para probar dichas  
23 hipótesis. A continuación se muestra la definición de los *sub-modelos*, procesos y datos para  
24 alimentar los distintos compartimentos del modelo biofísico (ver Figura 1).

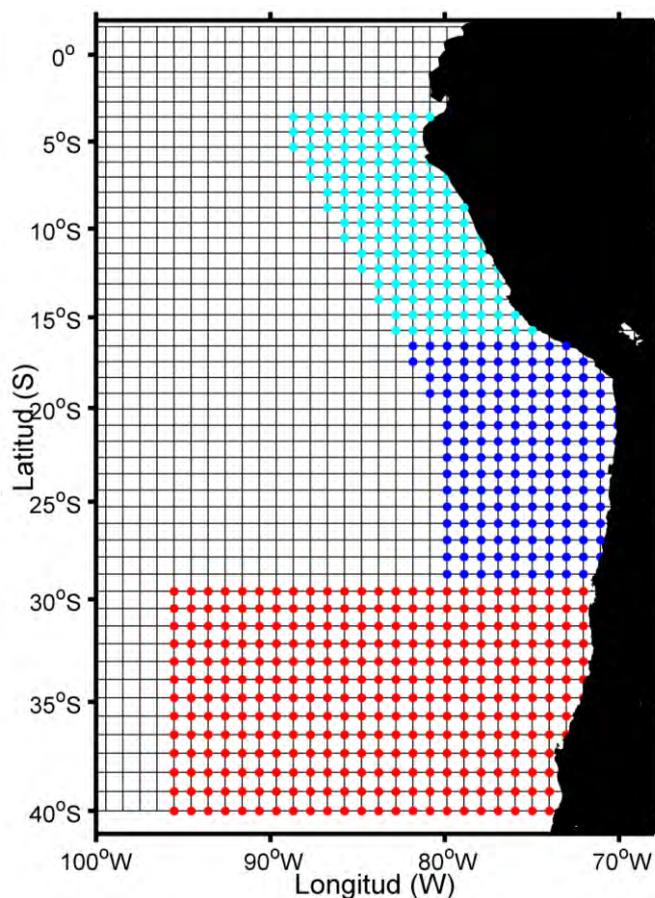
25

### 26 **5.3.1. Sub-modelo de distribución espacial del desove**

27 De acuerdo al esquema planteado, el proceso de modelación comienza con el desove de jurel, el  
28 que debe ser definido de forma espacialmente explícita en el modelo biofísico para todas las  
29 zonas donde se ha reportado presencia de actividad reproductiva, con énfasis en las zonas de  
30 Chile y Perú. En este sentido, la simulación espacial del desove de jurel en el contexto de un  
31 modelo biofísico se definió de la forma más realista posible en función de la disponibilidad de  
32 información de campo. En el compartimento de desove de ICHTHYOP las áreas de desove  
33 fueron definidas como agregaciones de huevos virtuales cuya ubicación espacial dependió de la  
34 disponibilidad de información respecto de la distribución de huevos de jurel para cada temporada

1 reproductiva anual modelada. De esta manera se han generado distintas estrategias dependiendo  
2 de la disponibilidad de información: i) generación de huevos virtuales con distribución y  
3 densidad análoga a la obtenida por cruceros de evaluación anual del desove; ii) generación de  
4 huevos virtuales con distribución y densidad análoga a condiciones promedio para periodos en  
5 los que se cuenta con información respecto a áreas reproductivas; y iii) distribución espacial  
6 inferida por las condiciones del hábitat de acuerdo a un modelo *ad-hoc*. Las distintas sub áreas  
7 donde se desarrollaron simulaciones del proceso de transporte de estadios tempranos de jurel  
8 corresponden a : i) Chile centro-sur, ii) Chile norte y iii) Perú (Figura 4).

9



10

11 Figura 4. Áreas de liberación de desoves virtuales de jurel en el esquema de modelación  
12 biofísica. Se detallan las sub-áreas de modelación, i) Chile centro-sur (rojo), ii) Chile norte (azul),  
13 y iii) Perú (celeste).

14

### 15 5.3.1.1. Sub-área Chile centro-sur

16 De acuerdo al conocimiento de la población de jurel, el área principal de desove (en términos de  
17 abundancia del desove) está situada en la zona oceánica frente a Chile centro-sur (Gretchina *et*  
18 *al.*, 1998b; Arcos *et al.*, 2001). La abundancia de huevos de jurel ha sido registrada, a través de  
19 muestreos planctónicos sistemáticos, mediante una serie de proyectos del Fondo de Investigación

1 Pesquera (FIP) denominados "Condición Biológica del jurel en altamar", llevado a cabo por el  
2 Instituto de Investigación Pesquera durante la época primaveral entre los años 1999 – 2013, con  
3 excepción del año 2002 y el periodo 2009-2011 (FIP 1999-14, 2000-10, 2001-12, 2002-12, 2004-  
4 33, 2005-01, 2006-05, 2007-08, 2008-06, 2012-10 y 2013-31). En este punto se solicitó  
5 formalmente al FIP para la utilización de las bases de datos correspondientes a estos proyectos.  
6 La distribución espacial de huevos de jurel registrada en cada crucero, ha sido utilizada para  
7 describir la distribución espacial de liberación de partículas en los experimentos realizados para  
8 cada año del periodo 1999 – 2013.

9

#### 10 5.3.1.2. Sub-área Perú

11 En el caso del mar del Perú se utilizó la información provista por el Instituto del Mar del Perú  
12 (IMARPE) a la Secretaria Ejecutiva de la Organización Regional de Pesca del Pacífico Sur  
13 (SWG-11-08a, 2012) y que se reportan en Ayon & Correa (2013) para el periodo comprendido  
14 entre 1966 y 2010. No obstante, la información reportada por Perú hace referencia a la  
15 distribución espacial de larvas de jurel y no se reporta información asociada a huevos de esta  
16 especie en mar peruano. De esta manera, la información reportada respecto a la distribución  
17 espacial de larvas ha sido utilizada para describir el área reproductiva de jurel en Perú.

18

#### 19 5.3.1.3. Sub-Norte de Chile

20 Para la zona del norte de Chile el *sub-modelo* de distribución espacial del desove se ha basado en  
21 resultados de investigaciones realizadas por el Instituto de Fomento Pesquero entre los años 1981  
22 y 2007 a través de los cruceros de investigación ictioplanctónica las que se informan en detalle en  
23 Braun & Valenzuela (2008). En este caso, la información corresponde a la distribución de huevos  
24 de jurel, las que no estaban basadas en cruceros sistemáticos anuales por lo que fueron agregados  
25 en periodos que darán origen a los desoves virtuales: periodo 1993-1999, periodo posterior al año  
26 2000.

27

#### 28 5.3.1.4. Generación de huevos virtuales (*drifters*)

29 Un paso adelante en la modelación fue incrementar la precisión de las condiciones iniciales  
30 respecto a la ubicación espacial de los huevos virtuales, los cuales deben reflejar la distribución  
31 observada del desove en el campo o buscar un *proxy* basado en condiciones del ambiente que  
32 refleje la distribución y abundancia del evento reproductivo. Para esto, se generó un marco de  
33 modelación espacial y temporal del desove de jurel que ha incorporado toda la información  
34 disponible en un esquema general que ha permitido obtener la distribución de los *drifters* que

1 simularon a los huevos de jurel en la modelación biofísica. Los objetivos del desarrollo de esta  
2 metodología fueron: i) usar datos observados del desove en cada área donde se han desarrollado  
3 cruceros de evaluación para definir los patrones espaciales de la abundancia de jurel en el  
4 Pacífico suroriental, y ii) desarrollar un modelo que pueda ser utilizado para predecir el número  
5 de huevos por cohorte en áreas específicas en relación a patrones climáticos y ambientales en el  
6 caso de Chile centro-sur. Además, se utilizó este modelo para predecir los patrones de  
7 abundancia del desove en años previos al inicio de los cruceros de evaluación del desove. Dos  
8 hipótesis ecológicas se desarrollaron en este punto: la primera que la temperatura y la formación  
9 de giros de mesoescala influyen en la abundancia de huevos; la segunda es que la distribución de  
10 huevos de jurel muestra cierta fidelidad espacial, con áreas de alta densidad de huevos  
11 encontradas en coordenadas similares en los cruceros de evaluación.

12  
13 Para el desarrollo del modelo acoplado con variables ambientales se utilizó información de los  
14 proyectos "Condición biológica de jurel en altamar" desarrollados los años 1999, 2000, 2001,  
15 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2012 y 2013 en los cuales se obtuvo la densidad de huevos  
16 de jurel en un esquema de muestreo sistemático. Además, en cada posición de las estaciones de  
17 muestreo se obtuvo la temperatura superficial del mar (TSM) y la Eddy kinetic energy (EKE)  
18 desde observación de satélites.

#### 19 20 *5.3.1.5. Modelación espacial y ambiental de la abundancia de huevos de jurel*

21 Modelos espaciales fueron desarrollados para cada crucero y también para el periodo total 1999 -  
22 2014. Algunos pasos previos fueron requeridos para desarrollar los modelos explícitos espaciales  
23 y ambientales: i) estandarización de las variables espaciales y ambientales; ii) preparación de una  
24 densa grilla de probabilidad dentro de los límites de los cruceros; y iii) una predicción de la TSM  
25 y EKE para todos los puntos de la densa grilla de cada crucero. La estandarización de las  
26 variables espaciales y ambientales fue realizada para permitir que co-variasen en el modelo  
27 usando aproximadamente los mismos grados de libertad dentro del rango de valores observados  
28 para cada variable (Bernal *et al.*, 2011). Las variables ambientales fueron normalizadas. Tanto la  
29 estandarización como la normalización fueron hechas en ambiente R (Dalgaard, 2008). La  
30 preparación de una densa grilla fue realizada para predecir la variable ambiental y la densidad de  
31 huevos en todos los posible puntos del área de estudio. Para evitar que la grilla se extienda mas  
32 allá de los límites observados por los cruceros, se realizó una estimación de los límites  
33 observados usando las librerías de R *spatstat* y *shachar* (Bernal *et al.*, 2007).

1 Una vez que los pasos explicado más arriba fueron realizados, se aplicaron Modelos Aditivos  
 2 Generalizados (GAM, por su sigla en inglés) para predecir las variables ambientales en toda la grilla  
 3 en cada crucero desde los datos de huevos y satelitales disponibles. GAMs (Hastie & Tibshirani  
 4 1986) son una generalización de los modelos lineales (GLM), en el cual la variable respuesta está  
 5 relacionada con uno a varios "suavizadores" (funciones de suavizamiento no-lineal) de una o más  
 6 covariables (Wood, 2006). La principal ventaja de los GAMs es su capacidad de modelar datos no  
 7 lineales usando suavizadores no-paramétricos (Hastie & Tibshirani 1986; Wood, 2006). La selección  
 8 los predictores suavizados siguió el método propuesto por Wood & Augustin (2002), usando la  
 9 librería de R *mgcv*.

10

11 La predicción de las variables ambientales fueron hechas generando un análisis GAM para cada  
 12 variable por crucero, según la siguiente ecuación:

13

$$14 \quad GV \sim s(\text{Stand.Long}, \text{Lat}) \text{ con un valor } K$$

15

16 donde *GV* es la variable ambiental de interés estandarizada (en este caso *TSM* y *EKE*),  
 17 *Stand.Long* es la longitud estandarizada, *Lat* es la latitud y *K* es los grados de libertad. Un vez  
 18 que el modelo fue ajustado a los datos observados, este se aplicó en un modo predictivo para  
 19 obtener estimados de *TSM* y *EKE* en cada uno de los nodos de la grilla espacial desarrollada en el  
 20 punto ii) más arriba (*TSM.pred.norm* y *EKE.pred.norm*, respectivamente).

21

22 Modelos de abundancia fueron ajustados a los datos de cada crucero para predecir la probabilidad  
 23 de observar huevos de jurel en una muestra dada como una función de las variables espaciales y  
 24 ambientales. La metodología seguida fue similar a la utilizada por Bernal *et al.*, (2007) para  
 25 desarrollar un modelo de desove para la sardina en las costas del Atlántico Europeo.

26

27 Un total de 18 GAM's fueron probados. El modelo final seleccionado correspondió a la siguiente  
 28 ecuación:

29

$$30 \quad \text{egg.prod.m2} = s(\text{Stand.long}, \text{Lat}) + s(\text{SST.pred.norm}) + s(\text{EKE.pred.norm}),$$

31 *family=quasipoisson)*

32

33 Una vez que el modelo final fue seleccionado, se obtuvieron estimados de abundancia de huevos  
 34 para todos los años en una grilla regular, incluyendo años previos al inicio de los cruceros de

1 evaluación para el periodo 1994-2013. De esta estimación espacial se muestrearon posiciones  
2 espaciales, las cuales correspondieron a la posición inicial de los huevos virtuales incorporados  
3 en el módulo de distribución del desove en ICHTHYOP.

4

### 5 **5.3.2. Sub-modelo de distribución vertical del desove**

6 Con el propósito de conocer la distribución vertical de huevos y larvas de jurel para definir el  
7 rango vertical de la liberación del desove en el área de prospección, se analizó la información de  
8 muestreos estratificados realizados en el marco de los proyectos FIP 2004-33 y FIP 2005-11 en  
9 donde se realizaron muestreos en 4 estratos de profundidad en la columna de agua evaluada: 0 –  
10 25 m, 25 – 50 m, 50 – 75 m y 75 – 100 m, los cuales fueron muestreados con redes WP-2 de 0,6  
11 metros de área de boca y 0,33 milímetros de abertura de malla con sistema de cierre mediante  
12 gatillos y mensajeros. Los resultados obtenidos en este punto fueron enlazados con la generación  
13 de huevos virtuales definida anteriormente. De esta manera, la distribución vertical del desove  
14 incorporado en ICHTHYOP fue proporcional a lo observado en el campo, distribuyendo de  
15 manera aleatoria en cada estrato, pero conservando la abundancia proporcional en cada uno de  
16 ellos.

17

### 18 **5.3.3. Sub-modelo de sincronización temporal del desove**

19 Un punto relevante asociado al esquema de modelación biofísica fue la definición del comienzo y  
20 el fin de la temporada reproductiva en un ciclo anual de modelación. El esquema propuesto en  
21 este proyecto incluyó una liberación proporcional a la actividad reproductiva de las hembras de  
22 jurel en la secuencia inicio, máximo y fin del desove, los cuales deben estar definidos por un  
23 método adecuado que dé cuenta de estos procesos biológicos en la escala intra e interanual. En  
24 este contexto, el jurel es una especie desovante parcial asincrónico, que manifiesta una rápida  
25 maduración y corta época reproductiva primaveral (Grechina *et al.*, 1998a). Dentro de las  
26 técnicas para conocer los cambios que ocurren durante el proceso de maduración gonádica en  
27 peces, la histología resulta ser uno de los métodos más precisos y avanzados y consiste en el  
28 análisis microscópico del estado de desarrollo de las células reproductivas de las hembras. Por  
29 otra parte, un índice ampliamente usado, simple y económico de aplicar, es el índice  
30 gonadosomático (IGS) que corresponde al peso de la gónada expresado como porcentaje del peso  
31 corporal eviscerado y sin ovario. Este índice en especies con desove estacional cambia muy  
32 notoriamente en las sucesivas etapas del desarrollo gonadal y permite identificar la época  
33 reproductiva. En este estudio, se utilizaron estos dos indicadores (histología e IGS) para describir  
34 de manera precisa la evolución de la temporada reproductiva del jurel en Chile. Primero, a partir

1 de análisis histológico realizado a hembras de todos los tamaños provenientes de muestreos  
 2 dirigidos realizados durante el periodo 1999 - 2013, se buscó obtener un índice objetivo que  
 3 permitiera identificar cuando una hembra de jurel comienza su actividad reproductiva. Este  
 4 índice es denominado  $IGS_{50\%}$  y ha sido definido a partir de la curva de madurez (Ruiz *et al.*,  
 5 2010; Vásquez, 2012):

$$6 \quad P_{IGS} = \frac{1}{1 + \exp^{(\alpha + \beta * IGS)}} \quad , \quad y \quad IGS_{50\%} = -\frac{\alpha}{\beta}$$

8 donde

9  
 10  $P_{IGS}$ : Proporción de hembras maduras (histología) al valor de IGS.

11  $\alpha, \beta$ : Parámetros de intercepto y pendiente.

12  $IGS_{50\%}$ : Índice Gónado-Somático donde el 50% de las hembras están reproductivamente activas.

13

14 Para el área de desove de Perú el patrón de IGS mensual y el cálculo de la proporción de hembras  
 15 reproductivamente se realizó desde los datos reportados por IMARPE a la Secretaría Ejecutiva de  
 16 la SPRFMO (SWG-11-08a, 2012) los cuales son resumidos en Perea *et al.*, (2013). En el caso del  
 17 norte de Chile el patrón temporal del desove se tomó como una función estándar de desove anual,  
 18 la cual se replicó para todos los años de modelación y se basó en la información de IGS histórico.  
 19 Para la frecuencia de liberación de partículas en las simulaciones, se utilizó la frecuencia de  
 20 desove media, que ha sido calculada para el periodo de estudio, para realizar sucesivas  
 21 liberaciones que constituyan el desove anual del jurel (de acuerdo a Gretchina *et al.*, 1998a).

22

### 23 **5.3.4. Sub-modelo de crecimiento**

24 El crecimiento de larvas y juveniles de jurel fue explícitamente incorporado en el modelo  
 25 biofísico. Dadas las escalas del proceso evaluado (días) se incorporaron funciones de crecimiento  
 26 en escala diaria, estimadas desde un análisis de microincrementos desde otolitos de jurel que  
 27 incorporan la fase de crecimiento larval (realizado en INPESCA y disponibles en Vásquez *et al.*,  
 28 2013) y la fase de juveniles hasta la talla de primera madurez sexual la cual se ha realizado en el  
 29 marco del presente proyecto (constituyendo la Sobreoferta 1). Una vez obtenidos los parámetros  
 30 de crecimiento en escala diaria, estos fueron incorporados en el compartimiento biológico de  
 31 ICHTHYOP, permitiendo obtener el crecimiento de cada individuo y tener un estimado de la talla  
 32 que poseen al alcanzar el área de reclutamiento. A continuación se describe la metodología  
 33 utilizada para el estudio del patrón de crecimiento de larvas y juveniles de jurel.

1 Para la estimación de parámetros de crecimiento diario en larvas y juveniles de jurel por medio  
 2 de lectura de microincrementos diarios se utilizaron aquellos otolitos de peces juveniles  
 3 disponibles en la colección del laboratorio de edad y crecimiento del Instituto de Investigación  
 4 Pesquera Talcahuano; se contó con un total de 625 otolitos distribuidos entre las tallas de 8,5 y 21  
 5 centímetros de longitud horquilla (LH; Tabla II). Las muestras fueron recolectadas entre el norte  
 6 de Caldera y sur de Puerto Montt dentro y fuera de la zona económica exclusiva de las costas  
 7 frente a Chile .

8

9 Tabla II. Frecuencias a la talla de individuos juveniles de *T. murphyi* disponibles para este  
 10 estudio en el Instituto de Investigación Pesquera Talcahuano.

11

Li	Ls	Clase	Frecuencia	% acumulado
8.5	9.9	9.9	29	5
9.9	11.3	11.4	53	13
11.3	12.7	12.9	104	30
12.7	14.1	14.4	161	56
14.1	15.5	15.8	135	77
15.5	16.9	17.3	56	86
16.9	18.3	18.8	46	93
18.3	19.7	20.3	39	100
19.7	21.1	21.8	2	100

12

13

#### 14 5.3.4.1. Preparación de las secciones delgadas

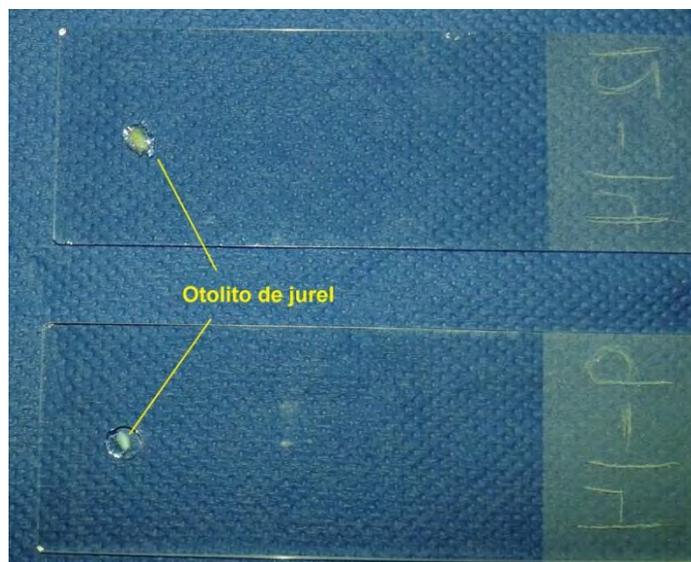
15 Para el registro de la lectura de incrementos de crecimiento diario se preparó un total de 101  
 16 secciones delgadas de otolitos derechos de jurel, de las cuales 52 corresponden a peces cuya  
 17 longitud varió entre los 8,5 y 14,5 cm LH (grupo 1), y 49 a aquellos individuos que miden entre  
 18 14,6 y 27 cm de LH (grupo 2).

19

20 Los 52 otolitos correspondientes a peces del grupo 1 fueron adheridos a un portaobjeto por su  
 21 lado interno mediante un medio de montaje completamente transparente (Crystal Bond™ 509)  
 22 (Figura 5). Para lograr visualizar los incrementos diarios se procedió a adelgazar los otolitos con  
 23 diversos tipos de lijas al agua de grano 1500, 2000 y 2500; cuando el grosor del otolito fue igual  
 24 a 0,5 mm se procedió a aplicar pulido manual con pasta de pulir (GAMMA ALUMINA) de  
 25 espesor 0,05 µm hasta que se logró ubicar el centro del otolito (Figuras 5 y 7) y algunos  
 26 incrementos diarios presentes en el *postrostrum* (Figura 7). Para pulir la cara interna del otolito se  
 27 procedió a desmontar la muestra y adherirla al portaobjeto por su cara externa. Durante todo el  
 28 proceso de pulido se realizaron observaciones de la preparación para no dañar el núcleo del otolito

1 con el pulido y lograr el grosor deseado. Los otolitos fueron individualizados a través de un  
2 código para su posterior identificación.

3



4

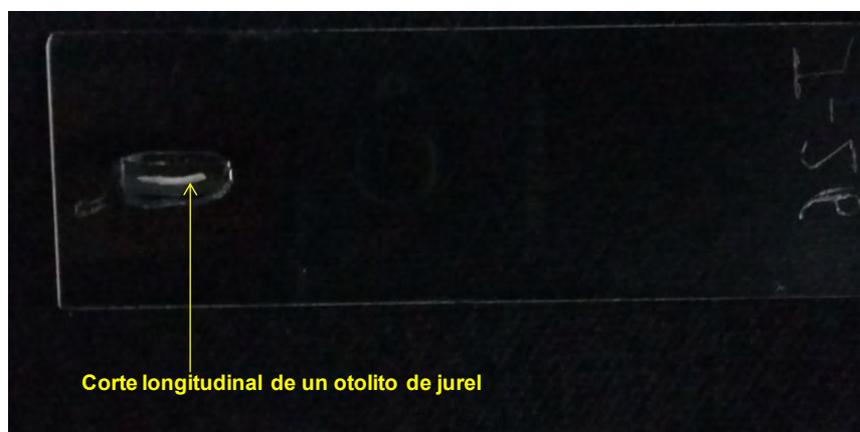
5 Figura 5. Otolito de jurel fijado en portaobjeto mediante medio de montaje Crystal Bond.

6

7 Los 49 otolitos pertenecientes a individuos cuya longitud es mayor 14,5 cm fueron colocados en  
8 moldes de plastilina y fijados en resina de poliéster con el fin de conseguir una sección  
9 longitudinal del otolito (Figura 6), posteriormente se aplicó la misma metodología descrita  
10 anteriormente para preparar la muestra con el fin de observar incrementos de crecimiento diario.

11 Las preparaciones tienen un espesor aproximado 0,5 mm, lo que permite la transmisión de la luz  
12 del microscopio a través de la muestra haciendo posible observar los incrementos de crecimiento  
13 diario (Morales-Nin, 1991).

14



15

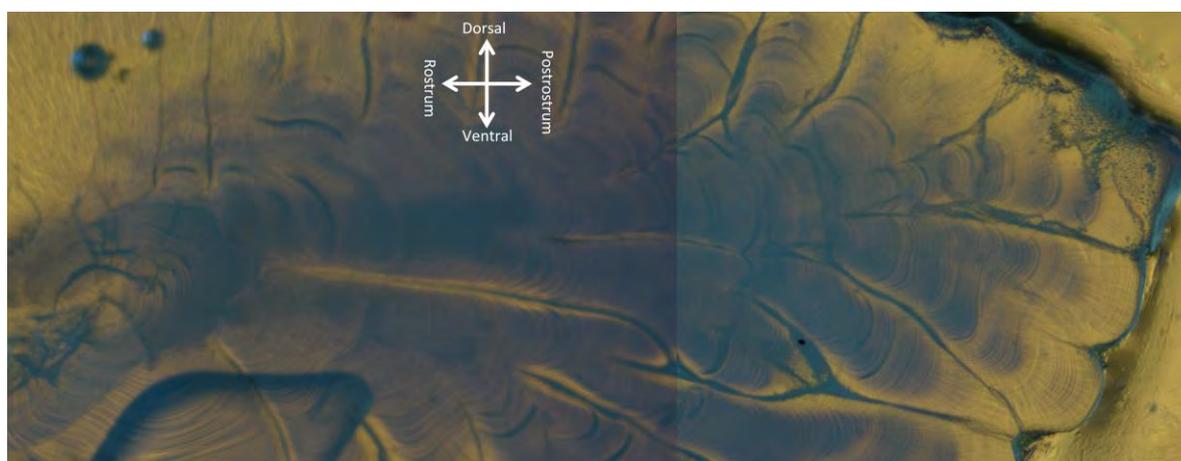
16 Figura 6. Corte longitudinal otolito de jurel fijado en resina de poliéster y posteriormente al  
17 portaobjeto mediante medio de montaje Crystal Bond.

18

#### 1 5.3.4.2. Medición de las secciones delgadas

2 Los incrementos de crecimiento diario aparecieron bajo el microscopio óptico como anillos  
3 concéntricos alternadamente claros y oscuros. Cada par de estas unidades formó un incremento  
4 de crecimiento diario según lo descrito por Morales-Nin (1992) y Green *et al.* (2009). Para la  
5 observación de los incrementos de crecimiento diario se utilizó un microscopio marca Nikon  
6 Modelo Eclipse E200. Las observaciones fueron realizadas a 400 y 1000 aumentos. El conteo de  
7 incrementos diarios observados con microscopía óptica se realizó siguiendo el radio del otolito  
8 previamente establecido (Cisterna, 2014). Las características estructurales del otolito  
9 (discontinuidades e incrementos más anchos) fueron usadas como marcador, facilitando el  
10 recuento. El número de incrementos por unidad de área del otolito fue contado con la ayuda de un  
11 retículo ocular de 100 divisiones.

12



13

14

15 Figura 7. Otolito de *T. murphyi* con 14 cm LH con aumento 40X.

16

17 Un total de 330 lecturas de anillos de crecimiento diario en otolitos de larvas de *T. murphyi* han  
18 sido realizadas previamente por Vásquez *et al.* (2013) para individuos capturados entre los años  
19 2003, 2004 y 2005. Estos datos fueron agregados a los obtenidos en este estudio para obtener un  
20 mejor ajuste de los modelos de crecimiento diario.

21

#### 22 5.3.4.3. Ajustes modelos de crecimiento

23 Una vez terminadas las lecturas de anillos de crecimiento diario se procedió a estimar la edad de  
24 los individuos en días y ajustar un modelo a dichos datos, los modelos que han sido propuestos  
25 son:

26 Lineal

$$Y = a + bX$$

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

5

6 donde:  $Y$ : Longitud (mm);  $X$ : número de microincrementos;  $a$  y  $b$  parámetros a estimar;  $Y_{\infty}$   
7 :longitud asintótica;  $G$ : tasa instantánea de crecimiento en el origen de la curva;  $X_0$ : edad (en días)  
8 en el punto de inflexión de la curva;  $K$ : coeficiente instantáneo de crecimiento individual (días<sup>-1</sup>);  
9  $t_0$ : edad teórica cuando la longitud es cero.

10

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

15

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

16

17

18 Donde  $y$  es el valor observado de la variable dependiente, e  $\hat{y}$  es el valor estimado. El método no  
19 lineal de mínimos cuadrados tiene los siguientes supuestos: especificación correcta del modelo,  
20 independencia de las observaciones, homocedasticidad, errores distribuidos normalmente con  
21 media cero y conocimiento de la variable independiente sin error. Para seleccionar el modelo que  
22 explique mejor el crecimiento de *T. murphyi* se utilizó el método basado en verosimilitud  
23 (Buckland *et al.*, 1997; Burnham & Anderson, 2002). El propósito del método es evaluar la  
24 fuerza relativa de las evidencias que soportan un determinado tipo de modelo. Este soporte  
25 relativo de los modelos puede ser evaluado usando la teoría de la verosimilitud combinada con el  
26 criterio de información de Akaike (AIC) (Burnham & Anderson, 2002). Un solo valor del AIC  
27 permite evaluar el soporte relativo de los datos para dos o más modelos. AIC penaliza la  
28 complejidad del modelo, dado por el número de parámetros, para alcanzar un óptimo entre  
29 exactitud y parsimonia del modelo, de acuerdo a la siguiente expresión:

30

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

31

32

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

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

3  $\varepsilon_i^2$  son residuos estimados para un modelo particular. El modelo con el menor valor de AIC es el  
4 modelo más probablemente correcto.

5

### 6 **5.3.5. Sub-modelo de movimiento**

7 Un punto relevante en la modelación biofísica basada en IBM's es el movimiento y  
8 comportamiento de los individuos. Estudios realizados recientemente han demostrado que la  
9 inclusión de aspectos como la migración vertical diurno/nocturna (Vikebø *et al.*, 2007;  
10 Ospina-Álvarez *et al.*, 2012) y el movimiento horizontal orientado (Staaterman *et al.*, 2012)  
11 pueden cambiar la trayectoria de deriva, el ambiente físico que experimentan larvas y  
12 juveniles y el consecuente destino final de los individuos. Hasta la fecha estos aspectos no  
13 han sido incorporados en las experiencias desarrolladas en jurel, pero han sido identificados  
14 como un punto relevante a ser incorporado (Vásquez, 2012). En el presente estudio se  
15 recopiló evidencia para sostener un esquema de flotabilidad en huevos y movimiento vertical  
16 (migración diurno-nocturna) de larvas y juveniles de jurel e incorporar estos aspectos al  
17 esquema de modelación biofísica. De esta manera en esta versión del modelo biofísico, el  
18 movimiento dejó de ser puramente lagrangeano (pasivo, en donde el movimiento vertical y  
19 horizontal dependen exclusivamente del modelo hidrodinámico) y se incluyó boyantes para  
20 huevos y un esquema de movimiento vertical para larvas y juveniles.

21

22 La boyantes para los huevos fue calculada como una función de la densidad del huevo y la  
23 densidad del agua de mar, esta última calculada como una función de la temperatura y la  
24 salinidad (ver Parada *et al.*, 2003 para detalles). El esquema de boyantes solo fue aplicado  
25 antes de la eclosión, esto es, los tres primeros días posterior al desove, según lo sugieren  
26 estudios llevados a cabo en laboratorio (Arcos *et al.*, 2004). Considerando que a la fecha se  
27 desconocen los cambios en la densidad específica de los huevos de jurel a medida que se  
28 desarrollan, en el presente estudio se consideró que la densidad disminuye ligeramente con el  
29 desarrollo y los huevos ascienden ligeramente hacia la superficie de manera que asegure que  
30 los huevos de jurel se distribuyan sobre la termoclina, de acuerdo a lo observado en campo  
31 (ver sección distribución vertical del desove) siguiendo a Ospina-Álvarez *et al.*, 2012. El  
32 comportamiento de movimiento vertical en la modelación biofísica consistió de un esquema  
33 migración diurno – nocturna dependiente de la edad. Para indagar en evidencias e migración

1 diurno-nocturna, se utilizó información proveniente de muestreos estratificados llevados a  
 2 cabo en dos años sucesivos (2004 y 2005) en el marco de los proyectos FIP 2004-33 y FIP  
 3 2005-11 en los cuales se tomaron muestras discretas en cuatro estratos de profundidad (0-25,  
 4 25-50, 50-75, 75-100) durante la temporada de máxima actividad reproductiva. Se estimó la  
 5 edad de todas las larvas de jurel registradas en los muestreos verticales de acuerdo a curvas  
 6 de crecimiento basadas en lecturas de microincrementos (ver Vásquez *et al.*, 2013 para  
 7 detalles) y se caracterizó la máxima extensión de dispersión vertical de larvas de acuerdo a  
 8 tres grupos de tamaño: 2-6 mm, 6-10 mm y >10 mm. La existencia de migración vertical se  
 9 probó calculando la probabilidad de encontrar una larvas de estos tamaños a distintas  
 10 fracciones del día esto es: 0-4, 4-8, 8-12, 12-16, 16-20 y 20-24 hrs. Finalmente, y con el fin  
 11 de generar un esquema continuo de movimiento, se ajustó un modelo apropiado para  
 12 describir el patrón de movimiento vertical, el cual fue incorporado en la sección de migración  
 13 vertical de ICHTHYOP materializando un esquema de migración vertical tamaño  
 14 dependiente para larvas y juveniles de jurel.

15

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

17

$$18 \quad x(t + \Delta t) = x(t) + V_u * \Delta t$$

$$19 \quad y(t + \Delta t) = y(t) + V_v * \Delta t$$

$$20 \quad z(t + \Delta t) = z(t) + (V_z + V_{buoy}(a) + B(a)) * \Delta t$$

21

22 donde,

23

24  $(x,y,z)$  = posición de los individuos;  $a$  = edad de los individuos (días desde el desove);  $t$  = tiempo;

25  $V_{u,v,z}$  = velocidad de la corriente a lo largo de los ejes  $u$ ,  $v$  o  $z$ ;  $V_{buoy}(a)$  = velocidad de boyantes

26 dependiente de la densidad del huevo y el agua de mar;  $B$  = comportamiento de migración

27 vertical dependiente de la hora, la profundidad y la edad.

28

### 29 **5.3.6. Sub-modelo de mortalidad**

30 Las fuentes de mortalidad exploradas estuvieron asociadas a la mortalidad natural y fueron: i)

31 advección fuera de zonas de crianza, que corresponderá a la fracción de individuos que no logró

32 el criterio de éxito en el reclutamiento; y ii) efecto letal de temperatura, que corresponderá a

33 individuos que alcancen temperaturas por debajo de los 12°C y por sobre los 26°C las cuales han

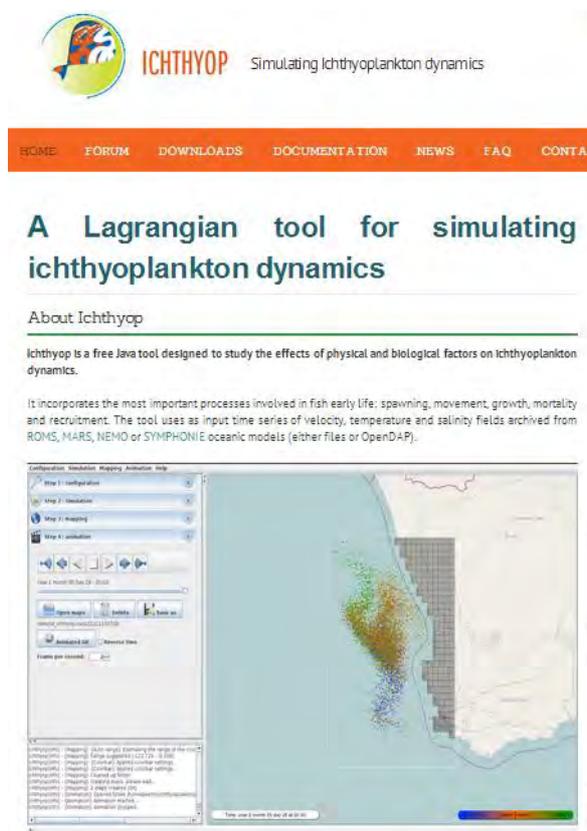
1 sido determinadas como límites en que los huevos no se registran en el campo (Cubillos *et al.*,  
2 2008) y se maximiza la probabilidad de inviabilidad de acuerdo a experiencias de laboratorio (A.  
3 Sepúlveda *comm pers*).

4

### 5 **5.3.7. Acoplamiento de modelo hidrodinámico y modelo biofísico**

6 El modelo biofísico ha sido implementado en la plataforma de acoplamiento ICHTHYOP 3.2  
7 (Lett *et al.*, 2008, <http://www.ichthyop.org/>) que es un software libre desarrollado para el estudio  
8 de transporte de estados tempranos de peces (Figura 8), y estudio del efecto de factores físicos  
9 (temperatura, densidad, corrientes) y biológicos (flotabilidad, crecimiento, movimiento, etc) en la  
10 historia de vida de estos organismos con foco hacia la dinámica del reclutamiento. Para el  
11 desarrollo de este estudio, se ha modificado el código base de ICHTHYOP para crear una versión  
12 personalizada ICHTHYOP\_JUREL que incorpora todos los elementos detallados en los *sub-*  
13 *modelos* descritos anteriormente. Para esto se ha contado con la asesoría del diseñador y  
14 programador de ICHTHYOP Philippe Verley y del experto internacional Andrés Ospina-Álvarez.

15



16

17 Figura 8. Ichthyop, modelo para configurar modelos biofísicos acoplados a modelos  
18 hidrodinámicos, (<http://www.ichthyop.org/>). En este sitio se encuentra disponible la  
19 documentación y descarga de archivos.

20

### 1 5.3.7.1. Variables de estado, escalas y simulaciones

2 El modelo biofísico implementado permitió simular individuos de una población de forma  
3 explícita basado en el concepto de programación objeto orientado. El modelo estuvo compuesto  
4 por individuos virtuales y su entorno físico proveniente del modelo hidrodinámico (Figura 1).  
5 Los individuos se definieron en base a las variables de estado individual: edad (en días),  
6 ubicación (tridimensional; longitud, latitud y profundidad), estado de desarrollo (huevo, larva o  
7 juvenil), talla (desde un modelo de crecimiento explícito) y condición (vivo o muerto). Las  
8 condiciones físicas fueron provistas por los modelos hidrodinámicos y el entorno físico fue  
9 definido través de campos tridimensionales de las variables de estado: velocidad de flujo (en  $m\ s^{-1}$ )  
10 para sus componentes horizontales  $u$  y  $v$  y vertical  $w$ , temperatura (en  $^{\circ}C$ ) y salinidad (PSU)  
11 que provendrán de una grilla discreta de ROMS. De tal manera, que el modelo biofísico heredó la  
12 estructura de espacial de la grilla del modelo hidrodinámico. Se han utilizado las salidas 3D de  
13 los modelos, que entregaron campos de velocidad, temperatura y salinidad diarias sub-diarias  
14 (ROMS). Dichos campos fueron interpolados en el tiempo y espacio en el IBM, con el objeto de  
15 determinar los valores de las variables ambientales de estado en cualquier ubicación de los  
16 individuos cada dos horas.

17

### 18 5.3.7.2. Simulaciones interanuales

19 Para cada año del periodo 1994-2013 se seleccionó la temporada reproductiva, área de desove y  
20 abundancia individuos liberados para inicializar simulaciones que describieran el transporte de  
21 huevos, larvas y juveniles de jurel para cada área de desove en estudio: Perú, Chile norte y Chile  
22 centro-sur. La inicialización y comportamiento de los individuos fueron definidos por los *sub-*  
23 *modelos* descritos más arriba. La duración de las simulaciones fue de 120 días, considerando que  
24 en esta etapa las larvas y juveniles de jurel no pueden nadar lo suficiente como para remontar la  
25 corriente, evitar predadores y alimentarse activamente (*Gretchina comm pers*) como ha sido  
26 sugerido también para otras especies congénéricas (Kasai *et al.*, 2008; *Trachurus japonicus*). Las  
27 simulaciones consistieron en el seguimiento de las posiciones y propiedades (variables de estado)  
28 de las partículas simuladas (huevos, larvas y juveniles de jurel) a pasos de tiempo discretos (sub-  
29 diarios) y durante toda la simulación. En cada paso de tiempo cada individuo se movió, creció  
30 (experimenta en el tiempo una serie de estadios), evaluó su estado de mortalidad y reclutamiento,  
31 de acuerdo a los *sub-modelos* propuestos. Las variables ambientales acopladas al modelo  
32 biofísico fueron actualizadas cada día para el modelo en función de la frecuencia a la que las  
33 salidas de las configuraciones del modelo biofísico fueron almacenadas (cada 6 horas en este  
34 caso).

### 1 5.3.7.3. *Área y criterio de reclutamiento*

2 El presente estudio se basó en una aproximación objeto-orientada, en donde el modelo generó  
3 patrones que no estuvieron explícitamente codificados, pero que fueron resultado de la  
4 interacción de todos los elementos que comprendió el modelo. Se consideró el inicio del modelo  
5 en la distribución observada o modelada de huevos de jurel, que involucró un gradiente espacial  
6 como resultado de la distribución espacial del stock desovante activo. El patrón de dispersión  
7 simulada se refirió a la advección y transporte desde el área de desove al área de crianza o  
8 reclutamiento. En este estudio se consideró como área de crianza al polígono comprendido entre  
9 los 15°S y 30°S y entre la costa y los 600 km costa afuera. Uno de los objetivos principales de  
10 este estudio fue la cuantificación de los individuos que son reclutados hacia esta área de crianza  
11 desde las tres zonas de desove evaluadas: Perú, Chile norte y Chile centro-sur. De esta manera,  
12 constituyeron el índice de reclutamiento biofísico aquellos individuos que tuviesen al menos 60  
13 días de edad y que se encontrasen dentro del área de reclutamiento ya especificada (ambos puntos  
14 en conjunto constituyen el "criterio de reclutamiento").

15

### 16 5.3.7.4. *Estocasticidad*

17 Para establecer el número apropiado de partículas (individuos) en los experimentos de transporte  
18 (simulaciones), se realizaron repetidos ensayos en que se aumentó el número de partículas a  
19 liberar (1.000, 5.000, 10.000, 15.000, 20.000, 25.000 y 30.000) determinando el promedio grupal  
20 y la desviación estándar y determinando el punto en la cual estos estadísticos se estabilizan. Se  
21 determinó que 20.000 partículas representan un punto de equilibrio y fue la cantidad de  
22 individuos simulados por cada punto de liberación a lo largo de la temporada reproductiva. Así,  
23 se asumió que no era necesario repetir las corridas y que sólo una simulación era necesaria para  
24 cada conjunto de parámetros y para cada día de liberación (Ospina-Álvarez *et al.*, 2013).

25

## 26 **5.4. Principales forzantes que modulan el proceso de transporte y sobrevivencia de huevos, 27 larvas y juveniles de jurel**

28 Se analizaron las principales variables, forzantes y procesos oceanográficos asociados al desove y  
29 al proceso de transporte de huevos, larvas y juveniles de jurel. Como resultado del Taller interno,  
30 se logró consensuar la disponibilidad de información ambiental física (oceanográfica y climática)  
31 hacia el proyecto, la cual se detalla en la Tabla III.

32

33

1 Tabla III. Identificación de fuentes de información oceanográfica para el análisis de la  
 2 variabilidad física en el área de desove y reclutamiento de jurel.

3

Variable	Naturaleza del dato	Fuente	Escala espacial	Escala temporal	Período	Disponibilidad	Sitio web (link)
TSM	Satelital	IGOSS	1X1°	Mensual	1982-2014	Disponible	<a href="http://iridl.ldeo.columbia.edu">http://iridl.ldeo.columbia.edu</a>
TSM	Satelital	Pathfinder	4x4 km	Mensual	1985-2009	Disponible	<a href="http://www.podaac.jpl.nasa.gov">http://www.podaac.jpl.nasa.gov</a>
Viento superficial	Satelital	ERS-1/ ERS-2	0,5x0,5°	Mensual	1991-2000	Disponible	<a href="ftp://www.podaac.jpl.nasa.gov/oc_ean_wind/quikscat/">ftp://www.podaac.jpl.nasa.gov/oc_ean_wind/quikscat/</a>
Viento superficial	Satelital	QuikSCAT	0.25x0.25°	Mensual	1999-2009	Disponible	<a href="ftp://www.podaac.jpl.nasa.gov/oc_ean_wind/quikscat">ftp://www.podaac.jpl.nasa.gov/oc_ean_wind/quikscat</a>
Corrientes	Satelital	CARS	0,5x0,5°	Diaria	2009	Disponible	<a href="http://www.marine.csiro.au">http://www.marine.csiro.au</a>
Clorofila	Satelital	Modis	4x4 km	Diaria	2002-2014	Disponible	<a href="http://oceancolor.gsfc.nasa.gov">http://oceancolor.gsfc.nasa.gov</a>

4

5 Asimismo, se revisaron paralelamente los diferentes resultados de los proyectos vinculados con  
 6 la distribución de huevos y larvas de jurel (denominados genéricamente proyectos "Condición  
 7 biológica de jurel en alta mar"), y que se han desarrollado en la época de desove de la especie  
 8 (mes de Noviembre) durante el período 1999-2008 y 2012-2014.

9 En relación con la bibliografía existente y a la experiencia de los investigadores del grupo, se  
 10 logró identificar diferentes forzantes que determinan la variabilidad física, tanto de la región  
 11 oceánica de desove frente a Chile central, así como del área de reclutamiento en la región costera  
 12 del norte de Chile. En la Tabla IV, se detalla las principales forzantes asociadas a ambas  
 13 regiones.

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

25

26

27

28

29

30

31

32

1 Tabla IV. Forzantes o variables críticas que caracterizan la variabilidad física de las regiones de  
 2 reclutamiento y desove de jurel, en las componentes estacional e interanual.  
 3

Variable	Naturaleza del dato	Escalas de interés	Referencias
Región costera del norte de Chile (reclutamiento)			
Viento superficial	Satelital	Estacional, interanual	Pizarro <i>et al.</i> 1994; Soto-Mardones <i>et al.</i> ; 2004, Del Pino 2010.
Índice de turbulencia	(calculado)	Estacional, interanual	Soto-Mardones <i>et al.</i> , 2004; Del Pino 2010.
TSM	Satelital	Estacional, interanual	Pizarro <i>et al.</i> , 1994; Hormazábal <i>et al.</i> , 2001; Blanco <i>et al.</i> , 2001; Soto-Mardones <i>et al.</i> , 2004
EKE	(calculado)	Estacional, interanual	Hormazábal <i>et al.</i> , 2001, 2004.
Corrientes	Satelital	Estacional, interanual	Strub <i>et al.</i> , 1995; Letelier <i>et al.</i> , 2010; Fuenzalida <i>et al.</i> , 2008.
Región oceánica frente a Chile central (desove)			
TSM	Satelital	Estacional, interanual	Núñez <i>et al.</i> , 2004; Cubillos <i>et al.</i> , 2008; Núñez <i>et al.</i> , 2008; Vásquez 2012; Vásquez <i>et al.</i> , 2013.
Viento superficial	Satelital	Estacional, interanual	Dávila <i>et al.</i> , 2002; Núñez <i>et al.</i> , 2004; Sepúlveda <i>et al.</i> , 2007; Vásquez 2012., Vásquez <i>et al.</i> 2013.
Índice de turbulencia	(calculado)	Estacional, interanual	Sepúlveda <i>et al.</i> , 2007; Núñez <i>et al.</i> , 2008.
Corrientes	Satelital	Estacional, interanual	Núñez <i>et al.</i> , 2008, Vásquez 2012; Vásquez <i>et al.</i> , 2013.
EKE	(calculado)	Estacional, interanual	Hormazábal <i>et al.</i> . 2004; Núñez <i>et al.</i> , 2004; Letelier <i>et al.</i> , 2010.
Frentes	(calculado)	Estacional, interanual	Letelier <i>et al.</i> , 2009; Letelier <i>et al.</i> , 2010.
Clorofila	Satelital	Estacional, interanual	Correa-Ramírez <i>et al.</i> , 2007; Vásquez 2012, Vásquez <i>et al.</i> , 2013.

4  
 5 El marco oceanográfico que se analizó en este capítulo, detalla la caracterización ambiental física  
 6 por sobre los 50-100 metros de la columna de agua, estrato donde se ha reportado la mayor  
 7 densidad de estados tempranos de desarrollo de jurel (huevos y larvas en diferentes fases), así  
 8 como de ejemplares juveniles. Este marco oceanográfico, se remitió entonces a la principal  
 9 región oceánica de desove situada frente a Chile central, y a la principal área de crianza situada  
 10 en el sector costero del norte de Chile y sur del Perú. Las variaciones espaciales y temporales de  
 11 estas variables y forzantes principales se analizaron preferentemente a través de climatologías  
 12 mensuales para series de tiempo de más de una década, así como por medio del análisis de  
 13 frecuencias empíricas ortogonales (tradicionales y complejas) en sus tres primeros modos de  
 14 variabilidad.

15

1 El estudio del marco oceanográfico del proyecto, tuvo el propósito de: i) identificar los  
2 principales forzantes (variables críticas) y/o estructuras, que tienen impacto en la abundancia y  
3 distribución de huevos y larvas de jurel, en el área oceánica de desove frente a Chile central, y en  
4 el área de reclutamiento del norte de Chile y Perú; ii) Identificar los principales procesos  
5 involucrados en la variabilidad de los forzantes o variables críticas identificadas; y iii)  
6 Determinar la variabilidad espacial y temporal (estacional e interanual) de los principales  
7 forzantes sobre la hidrografía y dinámica de las regiones de desove principal y de reclutamiento  
8 principal de jurel en el Pacífico Suroriental.

#### 9 10 **5.4.1. Caracterización oceanográficas de las regiones de desove y reclutamiento**

11 Para la caracterización oceanográfica de las regiones principales de desove y reclutamiento de  
12 jurel en el sector oriental del Pacífico Sur, se utilizaron principalmente las siguientes variables y  
13 forzantes: a) temperatura superficial del mar, b) el viento superficial y sus productos asociados  
14 como el esfuerzo del viento, la velocidad del transporte de Ekman, y el índice de turbulencia  
15 vertical, c) corrientes geostróficas, d) la variabilidad del Frente Subtropical y de la deriva de los  
16 vientos Oeste, así como, e) la dinámica de estructuras de meso-escala (remolinos ciclónicos y  
17 anti-ciclónicos, y el índice de energía cinética asociada a remolinos, EKE), y f) la clorofila-a  
18 como un *proxy* de la biomasa fitoplanctónica en estas regiones.

##### 19 20 *5.4.1.1. Temperatura superficial del mar*

21 Para el establecimiento de forzantes y variables de interés que tuvieran relevancia ambiental en la  
22 caracterización de las regiones principales de desove y de crianza (o reclutamiento) de jurel en la  
23 región oriental del Pacífico Sur, se utilizaron datos mensuales de temperatura superficial del mar  
24 (TSM) e intensidad del viento. Los datos de TSM abarcan desde Enero de 1983 (recuperados  
25 mediante interpolación climática) hasta Diciembre del 2009. Cada imagen tiene una resolución  
26 espacial de 9 kilómetros (0,08°) en latitud y longitud, y una resolución temporal cada 30 días. Los  
27 satélites que se ocuparon en este período fueron NOAA -14, -16, -17 y -18. Este conjunto de  
28 datos proviene del Programa Pathfinder del Physical Oceanography Distributed Active Archive  
29 Center, PODAAC y se obtuvieron desde el sitio web <http://www.podaac.jpl.nasa.gov>. El  
30 procesamiento de la información, incluyó, en primer lugar la extracción de la zona de interés (10-  
31 46°S y 115°W-costa), desde imágenes de TSM globales. Posteriormente se construyó la señal  
32 anual o climatología mensual a partir de los promedios de todos los meses correspondientes.

33

#### 1 5.4.1.2. Intensidad del viento

2 Las imágenes de intensidad del viento, de 12,5 x 12,5 km de resolución espacial, fueron  
3 adquiridas por el sensor de microondas del satélite QuikScat y distribuidas por Laboratorio de  
4 Oceanografía Satelital (CERSAT) (cersat.ifremer.fr). Este sensor entregó datos entre 1999 y  
5 2009, después de lo cual no se ha logrado una calibración correcta con los satélites que le  
6 sucedieron (ejemplo: ASCAT), por lo que se decidió estimar la señal anual y las respectivas  
7 anomalías para ese intervalo de 10 años y no mezclar fuentes de datos no ajustadas entre ellas.  
8 Por otro lado, se derivó la turbulencia ( $m^3 s^{-3}$ ) producida por el viento al multiplicar al cubo la  
9 intensidad la intensidad del viento ( $m s^{-1}$ ), proveniente de satélite. De igual manera al  
10 procedimiento realizado con la TSM, se derivó la climatología mensual para estas variables.

11

#### 12 5.4.1.3. Esfuerzo del viento y velocidades geostróficas

13 La climatología del esfuerzo del viento consideró imágenes mensuales que cubre el periodo  
14 desde julio de 1999 hasta noviembre del 2009, con una resolución espacial de 12,5 km x 12,5 km.  
15 A partir de las imágenes del esfuerzo del viento se extrajo el área de estudio al interior de la zona  
16 delimitada por los contornos del esfuerzo del viento zonal (contorno rojo) y el esfuerzo  
17 meridional (contorno negro) con magnitud igual a cero ( $\tau_x = \tau_y = 0$ ). Por otra parte, para la  
18 zona de estudio se derivaron los campos horizontales y verticales de las velocidades geostróficas,  
19 referidas a los 1000 m, a partir de datos de salinidad y temperatura de la climatología CARS,  
20 siguiendo la metodología propuesta por Pond & Pickard (1983). Se utilizó la climatología  
21 hidrográfica diaria CSIRO Atlas of Regional Seas, CARS 2009, de CSIRO (Commonwealth  
22 Scientific and Industrial Research Organisation), construido en base a datos *in situ* históricos,  
23 satelitales y de modelos de asimilación Estos datos tienen una resolución espacial de  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  y  
24 cobertura en profundidad. Su metodología y algoritmos están descritos en detalle en Ridgway *et*  
25 *al.* (2002) y Dunn & Ridgway (2002) (<http://www.marine.csiro.au/~dunn/cars2009/>). Esta base  
26 de datos permitió obtener una climatología de las corrientes zonales en el Pacífico Sur y mapas  
27 superficiales de velocidad geostrófica absoluta para el PSO ( $25^\circ S$  y  $45^\circ S$ ;  $120^\circ W$  y  $73^\circ W$ ).

28

#### 29 5.4.1.4. Dinámica de la Deriva de Ekman

30 La deriva de Ekman, partió separando las ecuaciones de Ekman (bajo supuesto de linealidad). El  
31 esfuerzo del viento estuvo en balance con la fuerza de Coriolis, y fue calculado de acuerdo a las  
32 siguientes ecuaciones:

33

$$-fV_{Ek} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_x}{\partial z}$$

$$+fU_{Ek} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_y}{\partial z}$$

1 La velocidad ( $U_{Ek}, V_{Ek}$ ) de Ekman medida en  $\text{cm s}^{-1}$ .

2

#### 3 5.4.1.5. Funciones Ortogonales Empíricas (FOE) y Complejas (FOEC)

4 En gran parte del análisis, se usó la técnica de FOE para parámetros escalares, como por ejemplo,  
5 distribución vertical de la temperatura superficial del mar, en tanto que la técnica de FOEC  
6 fueron aplicadas a parámetros vectoriales, como por ejemplo los componentes de las corrientes  
7 superficiales y el esfuerzo del viento.

8

9 El análisis de Funciones Ortogonales Empíricas (FOE) es una técnica estándar para eliminar la  
10 información redundante con la mínima pérdida de variabilidad. Esto se logra proyectando el  
11 conjunto de datos en un nuevo espacio de menor dimensión que el original, donde las nuevas  
12 variables (dimensiones) representan aquellas direcciones del espacio donde los datos tienen  
13 mayor varianza; en otras palabras, el análisis es una técnica eficiente para comprimir datos  
14 (Preisendorfer & Mobley, 1988). Este método es especialmente útil en espacios de alta  
15 dimensionalidad, donde los datos pueden estar correlacionados en sus distintas componentes y,  
16 por tanto, pueden contener mucha información redundante en su descripción. La técnica reduce la  
17 dimensión del espacio preservando el máximo de varianza de la muestra. Para ello, la base del  
18 nuevo espacio se forma con aquellos vectores donde la muestra proyectada presenta mayor  
19 varianza. Los vectores de esta base son de utilidad, pues los primeros de ellos pueden  
20 corresponder a patrones dominantes (en el sentido de la variabilidad de la muestra que  
21 representan).

22

23 Para extraer la estructura espacial y la variabilidad temporal de la TSM, se utilizaron las  
24 funciones empíricas ortogonales y cuya aplicación sólo dependió de consideraciones estadísticas  
25 (Barnett & Patzert, 1980; Kelly, 1985). Las FOE permitieron cuantificar la varianza total de las  
26 series temporales en modos ortogonales o independientes entre sí. De esta manera se obtuvieron  
27 modos o estructuras que contuvieron el mayor porcentaje de la varianza, que representaron a las  
28 señales dominantes en la región de estudio, quedando en los modos inferiores las contribuciones  
29 asociadas con otro tipo de procesos o escalas.

30

1 Asimismo, para extraer la estructura espacial y la variabilidad temporal del esfuerzo del viento y  
 2 las corrientes geostróficas, se utilizaron las funciones empíricas ortogonales complejas, que se  
 3 detalla a continuación.

4

$$W_{tk}(\vec{x}_i) = U_{tk}(\vec{x}_i) + V_{tk}(\vec{x}_i)\hat{i}$$

5 que denota la velocidad bidimensional en el tiempo  $t_k$  con  $k = 1, \dots, K$  y las localizaciones  
 6  $\vec{x}_i$  con  $i = 1, \dots, N$ .

$$R(\vec{x}_i, \vec{x}_j) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \overline{W_{tk}(\vec{x}_i)} W_{tk}(\vec{x}_j)$$

7 donde  $\bar{u}$  representa el complejo conjugado de  $u$ .

8 Al determinar las funciones propias  $\phi_n(\vec{x}_i)$  y valores propios  $\lambda_n$  de la matriz  $R(\vec{x}_i, \vec{x}_j)$  es  
 9 definida por

$$\sum_{i=1}^N R(\vec{x}_i, \vec{x}_j) \phi_n(\vec{x}_i) = \lambda_n \phi_n(\vec{x}_j), \quad i = 1, \dots, N$$

10 Ya que la matriz de correlación es Hermitiana, esto es  $R(\vec{x}_i, \vec{x}_j) = \overline{R(\vec{x}_j, \vec{x}_i)}$ , los vectores propios  
 11 complejos satisfacen la condición de ortogonalidad

$$\sum_{i=1}^N \overline{\phi_n(\vec{x}_i)} \phi_m(\vec{x}_i) = \delta_{ij}$$

12 donde los valores propios  $\phi_n$  son reales y positivos.

13 Los vectores propios son llamados modos complejos empíricos ortogonales y la información se  
 14 expande la forma

$$W_{tk}(\vec{x}_i) = \sum_{n=1}^N E_n(t_k) \phi_n(\vec{x}_i)$$

15 donde las amplitudes complejas  $E_n(t_k)$  están dados por

$$E_n(t_k) = \sum_{i=1}^N \overline{\phi_n(\vec{x}_i)} W_{tk}(\vec{x}_i)$$

16 y se sigue que

$$\sum_{k=1}^K \overline{E_n(t_k)} E_m(t_k) = \lambda_n \delta_{nm}$$

17 así las amplitudes de dos modos diferentes no estuvieron correlacionados en el tiempo y los  
 18 valores propios son el promedio de la energía de los modos. La suma de los valores propios es  
 19 igual al total de la energía.

$$\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N \overline{T_{tk}(\vec{x}_i)} T_{tk}(\vec{x}_i) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N \overline{E_n(t_k)} E_n(t_k) = \sum_{i=1}^N \lambda_i \quad )$$

1

2 El número de modos espaciales  $M \leq K$  a considera será determinado según la cantidad de  
3 energía a ser representada y se utiliza la siguiente expresión para determinar este número de  
4 modos espaciales

$$\frac{\sum_{i=1}^M \lambda_i}{\sum_{i=1}^K \lambda_i} \leq 0.80$$

5

#### 6 5.4.1.6. Determinación de variabilidad espacio-temporal del frente Sub-Tropical

7 Se utilizó la climatología hidrográfica diaria CARS 2009, del programa CSIRO (Commonwealth  
8 Scientific and Industrial Research Organisation) construido en base a datos *in situ* históricos,  
9 satelitales y modelos. La información de la climatología CARS abarca matrices globales con  
10 resolución espacial de  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  entre superficie y 5000 m de profundidad  
11 (<http://www.marine.csiro.au/~dunn/cars> 2009).

12 Para identificar el Frente Subtropical (FST) se utilizó como criterio el cambio de la temperatura  
13 de 4 a  $5^\circ\text{C}$ , y una variación de salinidad en un rango de 0,5 (Deacon, 1982). La ubicación de este  
14 FST varía a lo largo del Pacífico Sur, identificándose al sur de los  $45^\circ\text{S}$  en las cercanías de Nueva  
15 Zelanda (isoterma de  $12^\circ\text{C}$  a 100 metros e isohalina superficial de 35) hasta llegar frente a la  
16 costa Sudamericana donde se ubica entre los  $34^\circ\text{S}$  y los  $40^\circ\text{S}$ , de acuerdo a la isoterma de  $14^\circ\text{C}$  a  
17 150 metros e isohalinas superficiales 34,3 y 34,8 (Stramma *et al.*, 1995; Chaigneau & Pizarro  
18 2005b).

19 Por otra parte, utilizando la hidrografía de CARS se derivaron los campos horizontales y  
20 verticales de las velocidades geostróficas, referidas a los 1000 metros de profundidad (Pond &  
21 Pickard, 1983). Esta base de datos permitió obtener la climatología de las corrientes geostróficas  
22 absolutas en el PSO y las componentes zonales en  $100^\circ$ ,  $90^\circ$  y  $85^\circ$  W. Paralelamente, con datos de  
23 un modelo de asimilación de datos (SODA 226), se realizó un análisis histórico del cambio  
24 latitudinal del límite norte y sur del FST definidos por las isohalinas de 34,8 y 34,3 (Stramma *et*  
25 *al.*, 1995).

26

#### 1 5.4.1.7. Estructuras de meso-escala

2 Con el objetivo de determinar la variabilidad de las estructuras de mesoescala en la zona de  
 3 desove y de reclutamiento de jurel en el área de estudio, se utilizaron datos de altimetría satelital,  
 4 específicamente de la anomalía del nivel del mar (ANM) y la velocidad geostrófica global  
 5 distribuida por el programa AVISO (Archiving Validation and Interpretation of Satellite  
 6 Oceanographic Data), con un intervalo temporal diario en una malla global de proyección  
 7 Mercator de  $1/4^\circ \times 1/4^\circ$  entre el año 2002 y 2014 (<http://www.aviso.altimetry.fr/duacs/>). Se  
 8 identificaron remolinos de mesoescala en la región de estudio a través de un análisis lagrangeano  
 9 basado en el parámetro de Okubo-Weiss (OW; Okubo, 1970; Weiss, 1991). El parámetro de OW  
 10 permitió identificar a los remolinos como regiones donde la vorticidad relativa dominó sobre los  
 11 esfuerzos de deformación (Chelton *et al.*, 2007). Este parámetro se define como  $Q = S_n^2 + S_s^2 - \zeta^2$   
 12 , donde  $S_n$  y  $S_s$  son las componentes normal y de corte de la deformación y  $\zeta$  es la componente  
 13 vertical de la vorticidad relativa. Los remolinos de mesoescala son identificados como regiones  
 14 que tienen el mismo signo de vorticidad y con valores de  $Q$  menores en magnitud al valor crítico  
 15  $Q_c = -0.2\sigma_Q$ , donde  $\sigma_Q$  representa la desviación estándar de  $Q$ .

16  
 17 Se identificaron de remolinos con un tiempo de vida mayor a 60 días encontrando los máximos y  
 18 mínimos en cada el mapa de anomalía del nivel del mar asociándolos con el centro de los  
 19 remolinos anticiclónicos y ciclónicos, respectivamente. Se generó una malla alrededor de este  
 20 punto, así como se verificó que el punto se encuentre dentro en un contorno cerrado de altura del  
 21 nivel del mar y del parámetro OW, y que además contenga al menos 4 puntos de la malla. Al  
 22 cumplir estos criterios se calculó la vorticidad, la energía cinética, área, radio y amplitud para  
 23 cada uno de los remolinos. A partir de esta información, se estableció una serie de tiempo con el  
 24 número de remolinos ciclónicos, remolinos anticiclónicos y el número de remolinos totales, como  
 25 también el transporte que generan entre la costa a los  $120^\circ\text{W}$  abarcando las latitudes  $20^\circ$  a  $45^\circ\text{S}$ .  
 26 En el cálculo del transporte se asumió una profundidad promedio de cada remolino en 200  
 27 metros. Además se estimó la señal anual de los remolinos.

#### 29 5.4.1.8. Variabilidad espacio-temporal de la Deriva de los Vientos del Oeste

30 La variabilidad espacio-temporal de la deriva de los vientos oeste (DVO) se determinó de  
 31 acuerdo a la metodología establecida en Pardo & Soto-Mardones (2009), evidenciando la región  
 32 de divergencia de las ramas costera al norte y sur versus la latitud. Para este análisis se utilizaron  
 33 datos de esfuerzo del viento en el periodo 1999-2008 utilizando el producto QuikSCAT de

1 resolución espacial  $0,5^\circ$  y temporal de cada 12 horas. La divergencia de la DVO se calculó en el  
2 cuadrante delimitado por los  $25^\circ\text{S}$ - $60^\circ\text{S}$  y  $80^\circ\text{W}$ - $70^\circ\text{W}$ .

3

#### 4 *5.4.1.9. Variabilidad en la concentración de clorofila-a*

5 Esta variable se utilizó espacialmente para la región costera del norte de Chile y centro-sur del  
6 Perú. La información de clorofila-a (como estimador de la biomasa de fitoplancton) provino en  
7 una escala mensual desde el Centro de Distribución Ocean Color Web  
8 (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>). Esta información es de cobertura global con una resolución  
9 espacial de  $4 \times 4$  km y abarcó entre los años 2002 y 2015. Los datos de clorofila fueron cortados a  
10 la zona de interés, correspondientes al sur de Perú y norte de Chile ( $15^\circ\text{S}$  a  $30^\circ\text{S}$  y desde la costa  
11 hasta  $80^\circ\text{W}$ ). Con la información disponible de clorofila se construyó un diagrama latitud vs  
12 tiempo (gráficas Hovmöller) de la zona de la curvatura del continente sudamericano de una banda  
13 costera promedio de 20 km. Utilizando la información satelital clorofila se calculó la serie  
14 temporal para el período de estudio y para las latitudes  $17,5^\circ\text{S}$  y  $18,5^\circ\text{S}$ . Posteriormente se  
15 calculó la señal anual para las latitudes precitadas, y finalmente se obtuvo la anomalía de la  
16 clorofila para las mismas latitudes.

17

### 18 **5.5. Indicadores de reclutamiento**

19 Uno de los objetivos principales del presente estudio fue la obtención de un indicador de  
20 reclutamiento proveniente de la modelación biofísica de la historia de vida temprana del jurel, el  
21 cual es un indicador independiente de la información proveniente de la pesquería. Además,  
22 considerando que el esquema de modelación propuesto es espacialmente explícito, fue posible la  
23 generación de indicadores temporales y espaciales de reclutamiento biofísico. A continuación se  
24 describe la formulación de los indicadores del modelo biofísico y los elementos con los que fue  
25 contrastado con resultados provenientes de modelos de dinámica poblacional y la  
26 recopilación/integración de información acústica.

27

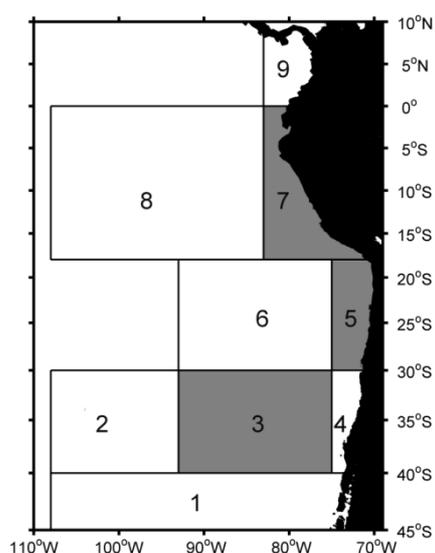
#### 28 **5.5.1. Análisis espacial de la conectividad**

29 La escala espacial de la conectividad entre las áreas de desove propuestas y el área de crianza fue  
30 evaluada para los distintos escenarios planteados bajo dos enfoques: i) identificación de zonas  
31 fuente: se analizó el aporte de cada una de las áreas de liberación respecto de los individuos que  
32 alcanzaron las áreas de crianza (matriz de conectividad) por medio del uso de las zonas liberación  
33 detalladas anteriormente; y ii) identificación de zonas sumidero: se analizó la distribución  
34 espacial de las partículas que sobrevivieron al proceso de transporte en los primeros cuatro meses

1 de vida y las que alcanzaron el sector costero bajo los distintos escenarios planteados, buscando  
 2 dilucidar el efecto del transporte físico y del comportamiento de movimiento en el destino final  
 3 de los individuos liberados. A su vez, se analizó la distribución espacial de cada una de las  
 4 partículas liberadas que no llegaron al área de crianza (no conectadas), con el fin de indagar sobre  
 5 probables áreas de crianza no costeras y sobre la variabilidad interanual de la advección (desde  
 6 las distintas zonas de desove propuestas) de los productos reproductivos de jurel. Para el análisis  
 7 de la expresión espacial de estos resultados se discretizó la distribución espacial a una resolución  
 8 de  $1/2^\circ$  geográfico y para efectos gráficos se interpoló mediante la metodología DIVA (Data-  
 9 Interpolating Variational Analysis, Troupin *et al.* 2013).

10

11 Una de las formas más usadas para el análisis de la conectividad y la dispersión desde una zona  
 12 fuente a distintas zonas de destino, es el uso de matrices de conectividad las cuales miden la  
 13 proporción de individuos desplazados de un cuadrante a otro dentro de un dominio general. De  
 14 esta manera, el dominio modelado en el Pacífico suroriental consideró a las tres áreas de desove  
 15 como zonas fuente/destino, además de 6 zonas más como destino las que se muestran en la  
 16 Figura 9 y que consideran: extremo sur del dominio (sur de los  $40^\circ\text{S}$ ; celda 1), el oeste del área  
 17 principal de desove (oeste de  $93^\circ\text{W}$ ; celda 2), área de desove centro-sur (celda 3), sector costero  
 18 centro-sur de Chile (celda 4), área de desove Chile norte (celda 5), zona contigua al oeste de la  
 19 zona de desove norte Chile (hasta los  $93^\circ\text{W}$ ; celda 6), área de desove de Perú (celda 7), zona  
 20 contigua al oeste de la zona de desove Perú (hasta los  $100^\circ\text{W}$ ; celda 8), zona costera de Ecuador  
 21 (celda 9).



22

23 Figura 9. Celdas diseñadas para el establecimiento de matrices de conectividad. En gris se  
 24 señalan las celdas que actúan como fuente de desoves de jurel.

### 1 **5.5.2. Análisis temporal de la conectividad**

2 Dos enfoques se analizaron para evaluar la escala temporal de la conectividad. i) se evaluó el  
 3 aporte de cada uno de los pulsos de desove para estimar el efecto de la sincronización del desove  
 4 con el éxito de la conectividad hacia las zonas de crianza; ii) por medio de la edad de los  
 5 individuos conectados, se analizó la fecha de arribo de los individuos hacia el sector costero para  
 6 evaluar la variabilidad intra-anual del pulso de reclutamiento. De esta manera el índice de  
 7 conectividad para cada año y zona de desove queda definido por:

8

$$IC_{t,z} = \frac{(L_{t,z} - M_{t,z} - A_{t,z})}{L_{t,z}}$$

9

10 donde,

11  $t$  = año modelado (tiempo de liberación).

12  $z$  = zona de desove

13  $IC$  = Índice de conectividad

14  $M$  = mortalidad temperatura-dependiente

15  $A$  = número de individuos advectados fuera del área de reclutamiento modelada

16  $L_{t,z}$  = número de individuos liberados por zona y año

17

18 De esta manera se obtuvo un índice de aporte a la zona de reclutamiento para cada zona de  
 19 desove, el cual permitió un análisis comparativo que definió el aporte porcentual de las distintas  
 20 zonas de desove al proceso de conectividad poblacional lo que permitió probar hipótesis respecto  
 21 a la estructura poblacional del jurel en el Pacífico suroriental.

22

### 23 **5.5.3. Índice de reclutamiento biofísico**

24 El índice de reclutamiento biofísico debe incorporar dos señales de la población, primero la  
 25 abundancia del desove el cual está relacionado con el potencial reproductivo de la biomasa  
 26 desovante y segundo, la conectividad y sobrevivencia de estadios tempranos de desarrollo en el  
 27 proceso de transporte. En este estudio, y de acuerdo a la información disponible para las  
 28 fracciones de la población, se realizó un índice de reclutamiento desde el área de desove centro-  
 29 sur de Chile en donde se contó con un indicador insesgado de la abundancia del desove anual  
 30 proporcionado por la producción de huevos registrada en los cruceros de evaluación del desove.  
 31 En el caso de los años donde no se realizó un crucero de evaluación, la serie fue completada por  
 32 los estimados de producción generados por un modelo predictivo que incorporó la información

1 histórica y variables del ambiente asociadas al desove (ver punto 4.3.1.5.). De esta manera el  
2 índice de reclutamiento biofísico está dado por:

3

$$IR_t = IC_t * PH_t$$

4

5 donde,

6  $t$  = año modelado (tiempo de liberación).

7  $IC$  = Índice de conectividad

8  $PH$  = Producción de huevos modelada

9

#### 10 **5.5.4. Análisis comparativo del reclutamiento**

11 Uno de los objetivos más ambiciosos del trabajo con modelación bio-física de la historia de  
12 vida temprana de peces, es poder explicar la variabilidad en la fortaleza de las clases anuales.

13 Para explorar la sintonía de nuestros resultados con indicadores de la población de jurel, se  
14 utilizaron dos fuentes independientes de información. Primero, se contrastó el indicador de  
15 reclutamiento biofísico (descrito en el punto anterior) con la estimación de reclutamientos  
16 provenientes de la evaluación de stock estadístico edad-estructurado (nivel sub-regional,  
17 modelo conjunto Organización Regional de Pesca) y que está definido como el grupo de  
18 edad 1 de de la población de jurel (ver más adelante); segundo, se obtuvo un indicador  
19 espacial independiente de la pesquería, en este caso se utilizó la información proveniente de  
20 cruceros acústicos realizados en la zona norte y centro sur de Chile realizadas para el recurso  
21 jurel para probar la hipótesis de área de crianza y para tener un punto de comparación  
22 respecto a las áreas de crianza modeladas. A continuación se define la formulación para la  
23 obtención de ambas piezas de información utilizadas.

##### 24 *5.5.4.1. Índice de reclutamiento asociado a la evaluación de stock*

25 Se describió el modelo de dinámica poblacional desde el cual fueron obtenidas las estimaciones  
26 de reclutamiento a contrastar con los resultados del modelo biofísico y que correspondió al  
27 modelo de evaluación de la Organización Regional de Manejo Pesquero del Pacífico Sur año  
28 2015.

29

30 En este contexto, las unidades de manejo reconocidas son al menos cinco: (1) Pesquería  
31 ecuatoriana capturada como parte de una pesquería pelágica mayor al interior de la Zona  
32 Económica Exclusiva (ZEE), (2) Pesquería peruana de jurel capturada dentro de la ZEE y

1 dirigida a consumo humano, (3) la pesquería del norte y (4) centro-sur de Chile las cuales han  
2 sido administradas como unidades de manejo separadas. La pesquería norte captura al interior de  
3 la ZEE y la pesquería de la zona centro-sur en la ZEE y en la zona adyacente en la alta mar. (5)  
4 Finalmente, se encuentra una pesquería exclusiva de altamar multinacional la cual es manejada  
5 dentro del contexto de la SPRFMO.

6  
7 En relación a la estructura del stock se reconocen diferentes hipótesis y se sugieren cinco o más  
8 stocks separados, 1) el stock del norte o stock peruano que también posee un stock transzonal en  
9 alta mar, 2) el stock chileno o llamado stock del sur que de igual manera tiene un importante  
10 componente transzonal, 3) el stock del Pacífico Central el cual se encuentra únicamente en alta  
11 mar, 4) el stock del Pacífico Sur Oeste el cual de igual manera se encuentra en el altamar, y 5) un  
12 stock compartido por Nueva Zelandia y Australia tanto en alta mar como en la ZEE. Respecto a  
13 la zona Pacífico Sur este y central, la SPRFMO ha identificado cuatro stocks alternativos: 1) el  
14 jurel capturado frente a las costas de Perú y Chile constituyen stocks separados en alta mar; 2) el  
15 jurel capturado frente a las costas de Perú y Chile constituyen una sola población compartida en  
16 alta mar; 3) el jurel capturado en la zona de Chile constituyen una sola población transzonal que  
17 se extiende desde la costa hasta los 120° W; 4) el jurel capturado fuera de la zona de Chile  
18 constituyen stocks transzonales y de alta mar independientes. De acuerdo al sub-grupo de trabajo  
19 de jurel (Jack Mackerel Sub-group, JMSG) del grupo de trabajo científico (Science Working  
20 Group, SWG) de la SPRFMO, se han evaluado estas consideraciones planteando hipótesis  
21 alternativas para llevar a cabo la evaluación de stock en conjunto.

22  
23 La pesquería de jurel del Pacífico sureste, es realizada por flotas de los estados costeros de Chile,  
24 Perú y Ecuador y por una flota de altamar multinacional que opera más allá de la ZEE de los  
25 países costeros. La pesquería en los estados costeros se desarrolla por una flota cerquera. La  
26 pesquería de jurel existente en Chile, tiene como destinos la producción de harina de pescado y  
27 productos para consumo humano. En Perú, la pesquería es variable entre años, y la pesca se  
28 realiza con el mismo arte de pesca empleado en la pesquería de anchoveta, aunque difiere de  
29 Chile en que la producción va destinada netamente a consumo humano por regulación  
30 gubernamental. En Ecuador la pesquería ocurre en ciertos años cuando la flota cerquera local  
31 puede extraer cantidades importantes de pesca y el producto de la pesca se dirige a harina de  
32 pescado y en los últimos años hacia consumo humano. Por su parte, la flota extranjera que opera  
33 fuera de la ZEE de los países costeros utiliza las capturas para destinarlas a consumo humano. La  
34 pesquería de jurel es esencialmente mono-específica, donde más del 90% de la pesca corresponde

1 a la especie, verificándose en una baja proporción a la especie caballa (*Scomber japonicus*) y  
2 reineta (*Brama australis*).

3

4 Por otro lado, el jurel ha sido manejado por los estados costeros desde mediados de los años 90.  
5 La cuota de captura nacional fue implementada para Perú en 1995 y en Chile desde 1999.  
6 Estableciendo en el Perú la prohibición de producción de harina de pescado desde el año 2002.  
7 En el contexto de las flotas internacionales, el primer acuerdo voluntario consistió en disminuir el  
8 número de barcos en el año 2010. Comenzando el año 2011, la cuota de captura para jurel fue  
9 determinada considerando la operación conjunta de todos los países del Pacífico Oriental.

10

#### 11 *5.5.4.1.1. Datos e información utilizada en la Evaluación de stock de jurel*

##### 12 *Datos Pesqueros*

13 La información de captura para el modelo de evaluación de stock consideró un total de cuatro  
14 flotas, donde cada una de ellas es consistente con el arte y el área general de pesca (Tabla V).  
15 Los datos de longitud utilizados, medidos como longitud de horquilla, provinieron tanto de la  
16 ZEE como de la altamar. Por su parte, la distribución de longitud desde la flota chilena y la  
17 extranjera son convertidas en distribuciones por edad empleando claves longitud-edad producidas  
18 de las capturas de la flota chilena, estas claves fueron generadas por el programa de seguimiento  
19 desarrollado por el Instituto de Fomento Pesquero (IFOP). Se utilizaron los datos de Captura por  
20 Unidad de Esfuerzo (CPUE) provenientes de la flota chilena. Por medio de la utilización de  
21 Modelos Lineales Generalizados (MLG), se realizó la estandarización de la CPUE, permitiendo  
22 predicción como una combinación lineal de variables explicatorias. La CPUE de la flota peruana  
23 fue estandarizada aplicando un modelo de tipo GAM, lo que permitió la inclusión de relaciones  
24 no lineales entre las variables, y utilizando como variable independiente la captura por viaje en  
25 escala mensual. La CPUE de la flota China, fue estandarizada usando un MLG, donde esta serie  
26 fue estimada como un índice de biomasa explotable de la flota en alta mar. La CPUE de la flota  
27 Rusa, fue incluida con una baja ponderación dado que no se encontraba estandarizada, y por  
28 último la CPUE de la flota de la Unión Europea (UE), se utilizó con una actualización al último  
29 año de evaluación.

30

##### 31 *Estructura de los datos de captura*

32 Datos de longitud de horquilla en las capturas se encontraron disponibles para las principales  
33 pesquerías dentro y fuera de la ZEE. Las distribuciones de longitud de horquilla de la flota  
34 chilena e internacional fueron convertidas a edad utilizando claves longitud-edad desde muestras

1 obtenidas de la flota chilena desde el seguimiento biológico pesquero del Instituto de Fomento  
2 Pesquero (IFOP) (Tablas VI, VII y VIII). Para las capturas de la flota peruana y ecuatoriana, se  
3 utilizó la composición por longitudes (Tabla IX). En el caso de las flotas donde no se dispone de  
4 información a la edad, se utilizó una frecuencia ponderada, considerando las claves longitud-edad  
5 de la flota chilena de la zona centro sur.

6

### 7 Datos independientes de la pesquería

8 En Chile se realizan dos cruceros de prospección bajo un marco de programa de investigación, un  
9 crucero hidroacústico que evalúa el stock de jurel y un Método de Producción Diaria de Huevos  
10 (MPDH) orientado a cuantificar el stock desovante. En el caso de la biomasa estimada de manera  
11 acústica en la zona norte existen estimaciones desde el año 2006 al 2015. En la zona centro sur,  
12 esta información está disponible desde el año 1997. Por su parte, las estimaciones desde el  
13 MPDH están disponibles desde el año 1999. Estas estimaciones fueron utilizadas como índices de  
14 abundancia relativa, para ajustar los modelos de evaluación de stock indirecta. En Perú el jurel en  
15 su programa de investigación incluye cruceros sobre huevos y larvas, y estimaciones del stock  
16 por medio de hidroacústica. Los resultados del crucero de huevos y larvas provee de información  
17 acerca de la variabilidad temporal y espacial de las larvas de jurel a lo largo de la costa peruana  
18 desde 1966. Las estimaciones de biomasa acústica constan desde el período de años entre 1986-  
19 2015, la cual representa estimaciones basadas en supuestos acerca de los potenciales cambios de  
20 hábitat. La acústica en Perú tiene como especie objetivo la anchoveta, por lo tanto la cobertura de  
21 prospección no superó las 80 millas náuticas (mn) y eventualmente las 100 mn. En la Tabla X se  
22 muestran los índices utilizados desde todas las flotas.

23

### 24 Parámetros biológicos

25 La madurez a la edad fue actualizada basada en un estudio chileno que redujo la primera edad de  
26 madurez de 3 a 4 años a 2 a 3 años. Por su parte la madurez a la longitud fue consistentemente  
27 observada cerca de los 23 cm de LH. En la Tabla XI se encuentran los parámetros de crecimiento  
28 y de mortalidad natural utilizados en el modelo de evaluación de stock. Respecto al peso medio a  
29 la edad, con el cual se determinan los niveles de biomasa en el stock y sus capturas estimadas,  
30 esta fue calculada de manera anual considerando la longitud media a la edad en la captura y la  
31 relación longitud peso del año. Por su parte, este mismo indicador en el Perú, fue calculado  
32 anualmente tomando en cuenta la longitud media invariable desde la ecuación de crecimiento, en  
33 conjunto con la relación peso longitud del año. La estimación de la mortalidad natural, provino  
34 desde el método de Pauly, siguiendo a Gili *et al.*, (1995) y Dioses (2013) en las funciones de

1 crecimiento en Chile y Perú respectivamente. El estimado de  $M$  fue considerado invariable entre  
2 edades y años para un stock en particular en el modelo de evaluación.

3

#### 4 5.5.4.1.2. Descripción del modelo de evaluación de stock

5 Para evaluar el stock de jurel se utilizó un modelo estadístico de captura a la edad denominado  
6 JJM ("Joint Jack Mackerel Model"), el cual fue implementado en la plataforma computacional  
7 ADMB y consideró los diferentes tipos de información compilados por las distintas flotas y  
8 países desde 1970 al 2015. El modelo JJM es un modelo edad-estructurado explícito que utiliza  
9 un enfoque de estimación por medio de máxima verosimilitud para resolver los parámetros del  
10 modelo. La dinámica poblacional operacional del modelo, fue definida por la ecuación de captura  
11 estándar con algunas modificaciones. Respecto a la validez del modelo, se ha determinado que  
12 este modelo es adoptado desde el año 2010, luego de numerosas reuniones técnicas. El modelo  
13 desde su adopción ha sido actualizado con variantes asociadas a información de estructura de  
14 tamaños y supuestos acerca del crecimiento, estimación de mortalidad natural por edad y tiempo  
15 e incorporación explícita de cambios de régimen en la productividad. El modelo además fue  
16 consistente con diversos componentes tales como:

17

18 1) *dinámica poblacional del reclutamiento*: el reclutamiento en el modelo fue concebido  
19 hacia el mes de enero mientras que el desove es considerado como un proceso instantáneo  
20 a mediados de noviembre. La composición de edad en la población consideró el rango de  
21 edades entre 1 y 12 años de edad y una relación estocástica Beverton & Holt entre el  
22 stock desovante y los reclutas. Los sobrevivientes siguen una mortalidad edad-específica  
23 compuesta por la mortalidad por pesca a la edad y por la flota junto con la mortalidad  
24 natural. El modelo fue espacialmente agregado exceptuando que las pesquerías son  
25 geográficamente distintas. Respecto a las condiciones iniciales, la población es basada en  
26 una condición de equilibrio en 1958, es decir una escala generacional antes que se inicie  
27 el modelo en el año 1970.

28 2) *Dinámica pesquera*: La interacción de la pesquería con la población ocurre por medio de  
29 la mortalidad por pesca. Esta última se asumió compuesta por un concepto de  
30 separabilidad asociada a la selectividad de la flota, la cual describe el patrón de  
31 mortalidad por pesca edad-específico. La selectividad es no-paramétrica y se asume  
32 pesquería específico y variante a través del tiempo. Por su parte la capturabilidad fue  
33 fijada por el índice y fue estimada para nueve índices de abundancia.

1       3) *Modelo de observación a los datos*: Se consideraron cinco componentes de datos en la  
2       función de verosimilitud, los datos de captura total, de frecuencia de longitud, de  
3       frecuencia de edad y los índices de abundancia.

4       4) *Estimación de parámetros*: los parámetros del modelo fueron estimados mediante  
5       funciones de log-verosimilitud, y la estimación se condujo mediante series de fases. El  
6       modelo fue compilado e implementado en ADMB.

7

8       Modelo para la estructura de hipótesis: durante el Science Working Group 11, dos tipos de  
9       estructura poblacional fueron evaluadas. La Tabla XII resume estas hipótesis con referencia a los  
10      modelos presentados.

11

12      Detalles del modelo: los símbolos y definiciones utilizados para describir el modelo de  
13      evaluación de stock se encuentran en la Tabla XIII. A su vez las ecuaciones utilizadas y variantes  
14      se muestran en la Tabla XIV. Finalmente, en la Tabla XV se describen las ecuaciones  
15      relacionadas con la función objetivo utilizada y los distintos componentes de verosimilitud  
16      utilizados en la modelación.

Tabla V. Fuente y valores de las capturas para las cuatro flotas utilizadas en el modelo de evaluación.

Año	Flota 1 Chile N	Flota 2 Chile CS	Flota 3 (Norte)					Flota 4 (Alta mar)										Total					
			Cook Islas	Cuba (2)	Ecuador (ANJ)	Perú (ANJ)	USSR	Subtotal	Belice	China	Cuba	Unión Europea	Islas Faroe	Japón	Korea	Perú	Rusia/ USSR		Ucrania	Vanuatu	Subtotal		
1970	101685	10309				4711		4711													0	116705	
1971	143454	14988				9189		9189														0	167631
1972	64457	22546				18782		18782								5500					5500	111285	
1973	83204	38391				42781		42781														0	164376
1974	164762	28750				129211		129211														0	322723
1975	207327	53878				37899		37899														0	299104
1976	257698	84571				54154		54154						35								35	396458
1977	226234	114572				504992		504992						2273								2273	848071
1978	398414	188267				386793	0	386793						1667	403	49220					51290	1024764	
1979	344051	253460		6281		151591	175938	333810			12719	1180		120		356271					370290	1301611	
1980	288809	273453		38841		123380	252078	414299			45130	1780				292892					339802	1316363	
1981	474817	586092		35783		37875	371981	445638			38444			29		399649					438123	1944670	
1982	789912	704771		9589		50013	84122	143724			74292	7136				651776					733204	2371611	
1983	301934	563338		2096		76825	31769	110690			52779	39943		1694		799884					894300	1870262	
1984	727000	699301		560		184333	15781	200674			33448	80129		3871		942479					1059927	2686902	
1985	511150	945839		1067		87466	26089	114622			31191			5229		762903					799323	2370934	
1986	55210	1129107		66		49863	1100	51029			46767			6835		783900					837502	2072848	
1987	313310	1456727		0		46304	0	46304			35980			8815		818628					863423	2679764	
1988	325462	1812793		5676		118076	120476	244229			38533			6871		817812					863215	3245699	
1989	338600	2051517		3386	35108	140720	137033	316247			21100			701		854020					875821	3582185	
1990	323089	2148786		6904	4144	191139	168636	370823			34293			157		837609					872059	3714757	
1991	346245	2674267		1703	45313	136337	30094	213447			29125					514534					543659	3777618	
1992	304243	2907817		0	15022	96660	0	111682			3196					32000	2736				37932	3361674	
1993	379467	2856777			2673	130681		133354														0	3369598
1994	222254	3819193			36575	196771		233346														0	4274793
1995	230177	4174016			174393	376600		550993														0	4955186
1996	278439	3604887			56782	438736		495518														0	4378844
1997	104198	2812866			30302	649751		680053														0	3597117
1998	30273	1582639			25900	386946		412846														0	2025758
1999	55654	1164035			19072	184679		203751						7								7	1423447
2000	118734	1115565			7121	296579		303700			2318											2318	1540317
2001	248097	1401836			134011	723733		857744			20090											20090	2527767

FIP 2014-33 "Estructura poblacional y estimación de índices de reclutamiento basados en modelos biofísicos (fase I)"

2002	108727	1410266		604	154219	154823		76261									76261	1750077
2003	143277	1278019		0	217734	217734		94690			2010	7540		53959	158199	1797229		
2004	158656	1292943		0	187369	187369		131020			7438	62300		94685	295443	1934411		
2005	165626	1264808		0	80663	80663	867	143000	6187		9126	7040		77356	243576	1754673		
2006	155256	1224685		0	277568	277568	481	160000	62137		10474	0		129535	362627	2020136		
2007	172701	1130083	7	927	254426	255360	12585	140582	123523	38700	10940	0		112501	438831	1996975		
2008	167258	728850	0	0	169537	169537	15245	143182	108174	22919	12600	4800		100066	406986	1472631		
2009	134022	700905	0	1935	74694	76629	5681	117963	111921	20213	0	13759	13326	9113	79942	371918	1283474	
2010	169012	295796	0	4613	17559	22172	2240	63606	67497	11643	0	8183	40516		45908	239593	726573	
2011	30825	216470	0	69153	257241	326394	0	32862	8	2248	0	0	9253	674	8229	7617	60891	634580
2012	13256	214204	0	104	187292	187396	0	13012	0	0	0	0	5492	5346	0	16068	39918	454774
2013	16361	214999	0	3564	77022	80586		8329	10102	0		5267	2670		14809	47230	341720	
2014	30337	240789		6	65008	65014		19738	19990	0		4178	0		15039	58945	395085	

Tabla VI. Captura a la edad en la flota 1. Unidades relativas y normalizadas a uno para cada año en el modelo. Verde sombreado refleja los niveles relativos máximos.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12+
1975	0	1	2	8	10	28	29	14	5	1	1	0
1976	0	0	0	2	10	30	37	17	3	1	0	0
1977	0	2	3	7	20	33	25	9	1	0	0	0
1978	0	1	8	15	14	9	25	20	7	1	0	0
1979	0	0	4	9	18	22	23	18	6	1	0	0
1980	0	1	3	6	17	23	27	19	4	0	0	0
1981	0	0	2	9	20	24	29	14	3	0	0	0
1982	0	0	1	14	15	20	27	16	5	1	0	0
1983	0	0	0	7	20	29	27	14	3	0	0	0
1984	0	0	11	28	13	13	17	15	3	0	0	0
1985	0	0	4	17	27	29	17	5	1	0	0	0
1986	4	13	12	7	8	15	22	13	5	1	0	0
1987	0	5	40	41	10	2	2	1	0	0	0	0
1988	0	0	11	41	38	9	0	0	0	0	0	0
1989	0	1	1	6	45	38	8	1	0	0	0	0
1990	1	9	1	3	28	48	10	1	0	0	0	0
1991	0	2	20	20	11	17	24	6	0	1	0	0
1992	0	3	21	12	23	23	13	5	1	0	0	0
1993	0	3	62	25	5	4	1	0	0	0	0	0
1994	0	14	34	10	26	13	2	0	0	0	0	0
1995	0	16	32	28	14	8	2	0	0	0	0	0
1996	8	16	31	34	9	2	0	0	0	0	0	0
1997	0	5	55	36	4	0	0	0	0	0	0	0
1998	0	2	57	24	12	4	0	0	0	0	0	0
1999	0	6	72	17	4	1	0	0	0	0	0	0
2000	7	30	17	30	14	2	0	0	0	0	0	0
2001	0	12	63	23	1	0	0	0	0	0	0	0
2002	6	12	47	21	11	2	1	0	0	0	0	0
2003	1	14	55	22	5	2	1	0	0	0	0	0
2004	0	2	13	59	24	1	0	0	0	0	0	0
2005	4	26	38	16	12	4	0	0	0	0	0	0
2006	2	3	33	52	6	2	1	0	0	0	0	0
2007	0	9	32	44	10	3	2	1	0	0	0	0
2008	1	49	24	8	9	8	1	0	0	0	0	0
2009	0	7	29	51	4	8	0	0	0	0	0	0
2010	0	46	5	32	12	3	1	0	0	0	0	0
2011	6	59	28	3	1	2	0	0	0	0	0	0
2012	4	12	15	61	8	0	0	0	0	0	0	0
2013	4	68	26	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2014	6	93	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2015	0	9	0	10	53	16	10	0	2	0	0	0

Tabla VII. Captura a la edad en la flota 2. Unidades relativas y normalizadas a uno para cada año en el modelo. Verde sombreado refleja los niveles relativos máximos.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12+
1975	0	0	1	2	6	18	28	25	14	5	2	0
1976	0	1	0	0	1	14	36	31	14	2	0	0
1977	0	0	0	3	11	19	35	27	4	0	0	0
1978	0	0	1	6	19	31	26	12	3	0	0	0
1979	0	0	1	13	18	18	18	16	11	4	0	0
1980	0	0	1	9	23	25	22	12	6	1	0	0
1981	0	0	0	4	17	31	28	14	4	1	0	0
1982	0	0	0	3	18	24	26	18	7	2	0	0
1983	0	2	4	7	17	25	26	13	5	1	0	0
1984	0	0	4	8	10	23	27	20	7	1	0	0
1985	0	0	1	8	14	25	31	16	4	0	0	0
1986	0	1	1	5	15	24	33	18	3	0	0	0
1987	0	4	9	8	5	15	32	22	4	1	0	0
1988	0	0	3	21	24	10	17	18	6	1	0	0
1989	0	0	0	4	23	32	19	15	6	1	0	0
1990	0	0	0	1	8	26	33	19	11	2	0	0
1991	0	1	2	2	1	7	28	31	16	8	3	1
1992	0	0	1	4	6	7	8	24	21	18	8	3
1993	0	0	4	12	15	14	13	12	14	12	4	1
1994	0	0	1	11	17	18	11	10	15	12	4	0
1995	0	0	4	18	14	25	18	9	6	4	2	0
1996	0	1	11	14	20	18	16	11	5	2	1	0
1997	0	2	17	31	22	11	6	4	4	2	1	0
1998	0	4	28	35	14	6	3	3	3	1	1	0
1999	0	4	37	34	14	5	2	1	1	1	1	1
2000	0	1	15	40	25	10	3	1	1	1	1	1
2001	0	1	10	26	34	16	5	2	2	2	1	2
2002	0	1	12	26	26	16	6	3	2	2	2	3
2003	0	0	6	25	30	20	8	3	2	2	1	1
2004	0	0	4	14	29	29	13	5	3	2	1	1
2005	1	1	1	5	17	39	19	8	5	2	1	1
2006	0	0	1	4	8	21	27	14	10	7	4	3
2007	0	0	1	13	15	11	15	15	13	9	5	4
2008	1	2	0	1	7	21	19	15	11	9	5	9
2009	0	0	4	9	2	19	22	17	11	7	5	4
2010	0	0	4	29	20	10	10	6	9	7	2	2
2011	0	0	1	16	13	35	10	6	13	5	1	1
2012	0	0	0	7	31	31	18	7	4	1	0	0
2013	0	0	2	18	29	33	14	3	0	0	0	0
2014	0	0	4	17	38	24	14	2	0	0	0	0
2015	0	0	9	25	21	17	19	9	1	0	0	0

Tabla VIII. Captura a la edad en la flota 4. Unidades relativas y normalizadas a uno para cada año en el modelo. Verde sombreado refleja los niveles relativos máximos.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12+
1979	0	0	0	0	4	13	25	30	19	8	1	0
1980	0	1	1	5	16	24	26	17	9	2	0	0
1981	0	0	0	2	10	24	31	22	8	2	0	0
1982	0	0	0	1	7	20	31	26	11	3	1	1
1983	0	2	4	3	10	23	30	18	7	1	0	0
1984	0	0	2	7	11	19	26	23	9	1	0	0
1985	0	0	1	10	17	25	28	14	5	1	0	0
1986	0	1	2	7	20	25	26	15	3	0	0	0
1987	0	4	5	3	8	24	33	18	4	1	0	0
1988	0	1	4	15	16	16	24	17	6	1	0	0
1989	0	0	1	5	22	27	21	15	8	2	0	0
1990	0	0	0	1	10	33	28	15	10	3	0	0
1991	0	0	0	1	2	16	40	23	10	5	2	1
2000	0	3	18	27	17	11	7	6	5	4	2	0
2001	0	2	15	30	30	14	4	2	2	1	0	0
2002	1	2	20	42	21	9	3	1	1	0	0	0
2003	0	1	18	48	25	7	1	0	0	0	0	0
2006	0	0	0	1	13	37	29	10	5	3	1	0
2007	0	0	0	1	7	22	23	16	15	10	6	0
2008	0	0	0	0	1	11	30	26	16	10	6	0
2009	0	0	1	1	0	2	15	35	25	14	9	0
2010	0	1	29	14	0	0	5	10	19	15	5	0
2011	0	0	1	9	8	17	11	10	24	14	6	0
2012	0	0	0	0	0	0	2	4	50	27	8	8
2013	0	0	1	18	21	25	17	8	3	4	1	1
2014	0	2	28	21	14	14	12	5	2	1	1	1
2015	0	1	35	17	7	6	8	13	7	2	1	3

Tabla IX. Captura a la talla en la flota 3. Unidades relativas y normalizadas a uno para cada año en el modelo. Verde sombreado refleja los niveles relativos máximos.

	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50											
1980	1	2	2	2	3	2	5	3	2	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	3	3	5	8	12	11	9	7	5	3	2	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0									
1981	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	9	11	9	10	10	9	8	7	6	4	3	3	2	2	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0									
1982	0	0	1	3	6	6	6	5	4	5	6	4	1	0	0	0	0	0	0	1	1	4	8	12	9	6	3	2	2	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0									
1983	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	2	3	7	15	18	15	13	7	5	3	2	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0									
1984	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	4	6	8	8	8	11	11	10	8	6	4	3	2	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0									
1985	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	4	5	7	7	8	8	7	7	7	7	6	5	3	3	2	2	2	2	2	2	1	2	1	0	0	0								
1986	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	2	4	7	10	13	12	12	8	6	5	3	3	2	2	2	2	2	1	1	1	0	0	0								
1987	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	2	2	4	5	8	11	12	10	8	5	3	2	3	4	4	3	2	2	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0								
1988	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	4	7	9	10	9	7	5	4	3	3	3	3	3	2	2	2	3	3	2	3	3	2	3	3	2	2	1	1	0	0	0								
1989	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	7	10	5	6	4	3	2	2	2	3	4	6	8	8	8	6	4	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0							
1990	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	3	5	6	7	9	12	13	10	8	6	4	3	3	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
1991	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	4	2	1	1	1	1	2	2	3	4	5	5	7	8	8	8	7	6	4	3	3	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1						
1992	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	4	7	9	12	11	8	6	6	5	5	4	3	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0						
1993	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2	3	4	6	9	12	9	7	6	5	5	6	5	5	5	4	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0						
1994	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	2	3	3	5	11	14	11	8	6	4	3	3	3	2	3	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0						
1995	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12	10	6	3	2	2	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
1996	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2	2	3	5	6	6	6	6	7	9	8	6	6	5	4	4	3	3	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
1997	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	7	11	10	5	4	8	14	16	8	4	3	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
1998	0	0	0	0	0	0	0	1	2	4	3	2	4	7	16	20	14	8	4	3	2	2	2	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
1999	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	2	3	5	7	12	13	16	15	8	5	3	2	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
2000	0	0	0	0	0	0	0	4	8	7	5	4	4	10	8	7	8	12	11	7	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
2001	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1	1	2	4	7	10	12	16	16	14	9	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
2002	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	3	9	16	19	19	14	7	3	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
2003	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	5	7	8	6	5	6	9	10	7	5	4	3	4	5	5	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
2004	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	6	7	9	12	13	11	8	8	7	5	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2005	0	0	1	1	1	0	1	3	6	8	8	10	10	6	3	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	5	9	9	5	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
2006	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	6	8	7	8	8	7	8	8	7	8	8	7	5	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
2007	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	5	9	8	5	6	4	3	6	10	12	11	8	6	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2008	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	3	10	18	21	17	10	6	3	2	1	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2009	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	4	4	4	2	2	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	2	5	11	19	20	11	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
2010	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2	25	49	18	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
2011	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	8	18	23	24	18	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2012	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	2	15	32	27	14	6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2013	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	2	4	4	11	8	5	2	0	1	1	1	3	12	20	15	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2014	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2	2	5	20	31	19	8	3	2	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

1 Tabla X. Valores de índices usados en el modelo de evaluación de stock de jurel. Chile  
 2 (1): acústica zona centro sur de Chile, Chile (2): acústica zona norte en Chile, Chile (3):  
 3 CPUE pesquería centro-sur, Chile (4): MPDH, Perú (1): índice acústico peruano para la  
 4 flota 3, Perú (2): CPUE pesquería peruana para la flota 3, China: CPUE china para la  
 5 flota 4, EU: CPUE flota europea para la flota 4, Russia/USSR: captura por día desde  
 6 Rusia y URSS.

7

Year	Chile (1)	Chile (2)	Chile (3)	Chile (4)	Peru(1)	Peru(2)	Peru(3)	China	EU_U	Russia/USSR
1983			0.994							
1984		99	0.912							
1985		324	0.808							
1986		123	0.686		17811	108				
1987		213	0.817		22955	110				55.0
1988		134	0.723		9459	114				58.2
1989			0.713		15034	157				51.1
1990			0.616		14139	230				52.6
1991		242	0.689		16486	232				61.0
1992			0.643		6266	180				
1993			0.578		19659	146				
1994			0.624		10768	95				
1995			0.562		6429	54				
1996			0.567		7271	30				
1997	3530		0.468		2561	32				
1998	3200		0.397		190	44				
1999	4100		0.406	5724	342	53				
2000	5600		0.396	4688	2373	106				
2001	5950		0.477	5627	2052	132		1.47		
2002	3700		0.419		248	97	212.7	2.07		
2003	2640		0.370	1388	1118	67	244.1	1.83		
2004	2640		0.403	3287	864	52	276.6	1.47		
2005	4110		0.369	1043	1025	75	193.2	1.51	141	
2006	3192	112	0.404	3283	1678	111	245.9	1.01	310	
2007	3140	275	0.304	626	522	80	231	1.16	308	
2008	487	259	0.211	1935	223	24	222.6	0.99	256	77.4
2009	328	18	0.176		849		184.2	0.84	200	59.6
2010		440	0.132			7	255.4	0.61	121	
2011		432	0.074		678	35	264.9	0.35	56	45.2
2012		230	0.229		94	50	264.7	0.41		
2013		144	0.191		890	64	139.3	0.57	72	
2014		87	0.160				240.4	0.52	89	
2015		459	0.131						160	

1 Tabla XI. Parámetros de crecimiento y mortalidad natural.

2

Parámetro	Stock norte	Stock sur	Stock unitario
$L_{\infty}$ (cms) (Longitud Total)	80.77	-	80.77
$k$	0.16	-	0.16
$t_0$ (Año)	-0.356	-	-0.356
M (Año <sup>-1</sup> )	0.33	0.23	0.23

3

4

5 Tabla XII. Hipótesis consideradas en la evaluación de stock de jurel por el modelo JJM.

6

Modelo	Stock/hipótesis	Flota	Consideraciones
2xN	Stock norte (hipótesis #1, SPRMFO/FAO 2008)	Norte extremo	Esta considera la hipótesis que la información de la pesquería Peruana y Ecuatoriana proviene de la misma población, y es independiente del stock del sur, principalmente explotado por la flota de Chile.
2xS	Stock sur (hipótesis #1 y #3 SPRMFO/FAO 2008)	Norte, centro-sur, aguas internacionales	Esta considera la hipótesis que la información de la pesquería proveniente de Chile y aquella perteneciente a la flota internacional que opera fuera de la ZEE de Chile proviene de la misma población, la cual es independiente del stock del norte, principalmente explotado por la flota peruana.
0,4s	Una unidad de stock (hipótesis #2 SPRMFO/FAO 2008)	Todas las flotas	Este considera la hipótesis que el stock del norte y sur corresponden a una unidad poblacional.

7

8

9

10

11

12

13

1 Tabla XIII. Símbolos y definiciones utilizadas para el modelo de evaluación.

Definición general	Símbolo/valor	Utilización en el modelo de captura a la edad
Indice año: $i=\{1970,\dots,2015\}$	$i$	
Indice edad: $j=\{1,2,\dots,12+\}$	$j$	
Indice longitud: $I=\{10,11,\dots,50\}$	$l$	
Longitud media a la edad	$L_j$	
Coefficiente variación longitud a la edad	$cv$	
Peso medio en año $t$ y edad $j$	$W_{t,j}$	
Máxima edad a la cual la selectividad es constante	Maxage	Parametrización selectividad
Mortalidad natural instantánea	$M$	fija y constante sobre todas las lades
Proporción hembras maduras a la edad	$p_j$	Definición de biomasa desovante
Proporción de longitud a alguna edad	$\Gamma$	Transformación desde edad a longitud
Tamaño de muestra de la proporción en el año $i$	$T_i$	Supuesto de escala multinomial sobre la estimación de proporción a la edad
Coefficiente capturabilidad crucero	$q^s$	Distribución prior=lognormal( $\mu_q^s$ , $\sigma_q^2$ )
Parámetros stock-recluta	$R_0$	Reclutamiento en equilibrio sin explotación
	$h$	Steepness stock – recluta
	$\sigma_R^2$	Varianza reclutamiento
Biomasa sin pesca	$\phi$	Biomasa desovante por recluta sin explotación
Parámetros estimados		
$\phi(\#), R_0, h, \varepsilon_i(\#), \mu^f, \mu^s, M, \eta_j^s(\#), q^s(\#)$		
El número de parámetros de selectividad estimados dependerá de la configuración del modelo de evaluación.		

2  
3  
4

1  
2 Tabla XIV. Variables y ecuaciones que describen la implementación de modelo de  
3 evaluación conjunto de jurel.

nro	Descripción	símbolo	Ecuación
1)	Índice abundancia crucero(s) por año	$I_i^s$	$I_i^s = q^s \sum_{j=1}^{12+} N_{ij} W_{ij} S_j^s e^{-\Delta^s Z_{ij}}$
2)	Captura en biomasa por año y edad/longitud	$\hat{C}_{il}, \hat{C}_{ij}$	$\hat{C}_{ij}^f = \sum_{j=1}^{12} W_{ij} N_{i,j} \frac{F_{ij}}{Z_{ij}} (1 - e^{-Z_{ij}})$ $\hat{C}_{il} = \Gamma_{l,j} \hat{C}_{ij}$ $\Gamma_{ij} = \int_j^{j+1} e^{-\frac{1}{2\sigma_j^2}(l-L_j)^2} dl$ $L_j = L_\infty (1 - e^{-k}) + e^{-k} L_{j-1}$ $\sigma_j = cvL_j$
3)	Proporción a la edad $j$ , en el año $i$	$P_{ij},$ $\sum_{j=1}^{12} P_{ij} = 1.0$	$p_{ij}^f = \frac{\hat{C}_{ij}^f}{\sum_j \hat{C}_{ij}^f} P_{ij} = \frac{N_{ij} S_{ij}^f}{\sum_{k=1}^{12} N_{ik} S_{ik}^f}$
	Proporción a la longitud $l$ , en el año $i$	$p_{il},$ $\sum_{l=10}^{50} p_{il} = 1.0$	$p_{il} = \frac{C_{il}}{\sum_{l=10}^{50} C_{il}}$
4)	Abundancia en número a la edad	$j = 1$	$N_{1970,j} = e^{\mu R + \epsilon_{1970}}$
5)		$1 < j < 11$	$N_{1970,j} = e^{\mu R + \epsilon_{1991-j}} \prod e^{-M}$
6)		$j = 12$	$N_{1992,12} = N_{1992,11} (1 - e^{-M})^{-M}$
7)	Años subsecuentes ( $i > 1970$ )	$j = 1$	$N_{i,1} = e^{\mu R + \epsilon}$
8)		$1 < j < 11$	$N_{i,j} = N_{i-1,j-1} e^{-Z_{i-1,j-1}}$
9)		$j = 12$	$N_{i,12+} = N_{i-1,11} e^{-Z_{i-1,10}} + N_{i-1,12} e^{-Z_{i-1,11}}$
10)	Efecto año e individuo a edad 1 y año $i=1958, \dots, 2015$	$\epsilon_i, \sum_{i=1958}^{2015} \epsilon_i = 0$	$N_{i,1} = e^{-\mu R + \epsilon_i}$

11)	Índice de capturabilidad	$\mu^s, \mu^s$	$q_i^s = e^{\mu^s}$
	Efecto medio		$s_j^s = e^{\eta_j^s} \quad j \leq \text{max age}$
	Efecto edad	$\eta_j^s, \sum_{j=1958}^{2015} \eta_j^s = 0$	$s_j^s = e^{\eta_{\text{maxage}}^s} \quad j > \text{max age}$
12)	Mortalidad por pesca instantánea		$F_{ij} = e^{\mu_j + \eta_j^f + \theta_i}$
13)	Efecto de la pesca	$\mu_j$	
14)	Efecto anual de la mortalidad por pesca en el año i	$\varphi_i, \sum_{i=1970}^{2015} \varphi_i = 0$	
15)	Efecto edad o pesca en periodo año donde la variación es permitida	$n_j^f, \sum_{j=1958}^{2015} n_j^f = 0$	$s_{ij}^f = e^{\eta_j^f} \quad j \leq \text{max edad}$ $s_{ij}^f = e^{\eta_{\text{maxage}}^f} \quad j > \text{max edad}$
	En años donde la selectividad es constante sobre el tiempo	$n_{i,j}^f = n_{i-1,j}^f$	$i \neq \text{año de cambio}$
16)	Mortalidad natural	M	fija
17)	Mortalidad total		$Z_{ij} = \sum_f F_{ij} + M$
18)	Biomasa desovante (mediado noviembre)	$B_i$	$B_i = \sum_{j=2}^{12} N_{ij} e^{-\frac{10.5}{12} Z_{ij}} W_{ij} p_j$
19)	Reclutamiento (B_H) a edad 1	$\tilde{R}_i$	$\tilde{R}_i = \frac{\alpha B_i}{\beta + B_i}$ $\alpha = \frac{4hR_0}{5h-1}, \beta = \frac{B_0(1-h)}{5h-1}$ con $h=0.8$ $B_0 = R_0 \varphi$ $\varphi = \sum_{j=1}^{12} e^{-M(j-1)} W_j p_j + \frac{e^{-12} W_{12} p_{12}}{1 - e^{-M}}$

1  
2  
3  
4  
5

1 Tabla XV. Especificación función objetivo a ser minimizada.

Verosimilitud/componentes de penalización		Descripción/notas
Índice de abundancia	$L_1 = 0.5 \sum_i \frac{1}{cv_f^2} \sum \log \left( \frac{I_j}{\hat{I}_j} \right)^2$	Cruceros & CPUE índices
Prior de suavizamiento para selectividades	$L_2 = \sum_l \lambda_2 \sum_{j=1}^{12+} (\eta'_{j+2} + \eta'_j - 2\eta'_{j+1})^2$	Suavizador (segunda diferenciación), Nota: $l = \{s, f\}$ para selectividad de crucero y pesquería.
Prior de regularidad del reclutamiento	$L_3 = \lambda_3 \sum_{i=1958}^{2015} \varepsilon_j^2$	Influencia de estimaciones donde existe información faltante (i.e. si no hay señales de fuerza de reclutamiento disponibles, entonces la estimación de reclutamiento convergerá a un valor medio).
Verosimilitud de la proporción a la edad	$L_4 = - \sum_{v,i,j} n^v P_{i,j l}^v \log(\hat{P}_{i,j l}^v)$	$L = \{s, j\}$ para observaciones de composición por edad de crucero y pesquería.
Verosimilitud de la captura en biomasa	$L_5 = 0.5 \sum_i \frac{1}{cv_f^2} \sum_{j=1970}^{2015} \log \left( \frac{C_{\hat{f}}}{\hat{C}_{\hat{f}}} \right)^2$	Ajuste de la captura en biomasa en cada año.
Mortalidad por pesca	Valores de F restringidos entre 0 y 5	relajado en la fase final de estimación.
Curva de reclutamiento	$L_6 = \frac{0.5}{cv_r^2} \sum_{j=1970}^{2015} \log \left( \frac{N_{i,1}}{\hat{R}_i} \right)^2$	Condicionamiento de la curva stock recluta 1977-2014
Prior o supuesto	$R_0$ no informativo	Exploración de valores alternativos de $\sigma_R^2$
Función objetivo a ser minimizada	$L = \sum_k L_k$	

2

3

#### 5.5.4.2. Índice de reclutamiento asociado a la evaluación 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 jurel financiados por el Fondo de investigación pesquera (FIP) en Chile.

En relación a este objetivo, se abordó 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 el Instituto de Fomento Pesquero (IFOP) en Chile.
2. La información acústica obtenida de las bases de datos proporcionados por el FIP de los cruceros que cuenten con información de Jurel realizados en Chile, con principal interés en la zona norte y centro-norte.

Los índices acústicos derivados de las bases de datos mencionadas correspondieron sólo a los datos de los años en que se recibió información.

Ordenamiento de la data acústica: Se realizó un ordenamiento y estandarización de la base de datos proporcionada por el FIP de los cruceros de evaluación hidroacústica de jurel realizados en Chile, además se incluyeron en el análisis datos (de jurel) obtenidos de los cruceros de evaluación de anchoveta en el norte y centro-norte de Chile. Luego de cerciorar el contar con la información necesaria, como datos de densidad acústica (NASC;  $m^2/mn^2$ ) georreferenciada, hora y batimetría de los cardúmenes o unidades básicas de muestreo, además de datos biológicos como la estructura de tallas y longitud- peso de jurel para cada año o crucero, se realizó un segundo ordenamiento de los datos, en el cual se acoplaron las matrices de georreferenciación y densidad acústica, que

1 además incluía profundidad media (en algunos casos, cuando se tuvo información) de  
2 los cardúmenes de jurel, obteniendo una matriz única para cada año y todos los años.

3  
4 Análisis de la información de jurel: Luego del ordenamiento de la base de datos, se  
5 generó una matriz global con toda la data obtenida a partir de los datos ordenados para  
6 cada año, teniendo como componentes principales: latitud, longitud, valores de densidad  
7 acústica(NASC), profundidad media de los cardúmenes y proporción de reclutas de  
8 jurel. Para el análisis de la data se utilizó el software estadístico R 3.0.1 (Dalgaard,  
9 2008) y el software para análisis de datos oceanográficos Ocean Data View, obteniendo  
10 valores de densidad georreferenciada por UBM, porcentaje de reclutas y su distribución  
11 (espacial y batimétrica), y generar mapas que permitieron observar de mejor manera los  
12 índices obtenidos para cada año.

13  
14 Densidad acústica de Jurel: El NASC es una medida de densidad acústica cuya unidad  
15 de medida es  $m^2/mn^2$ , y está interpretada por la formula,

$$16 \quad s_A = 4\pi (1852)^2 s_a$$

17  
18 donde,  $s_a$  representa al coeficiente de retrodispersión por unidad de área, en  $m^2/m^2$ ,

$$19 \quad s_a = \int_{z_1}^{z_2} S_V dz$$

20  
21  
22  
23 Distribución espacial de reclutas de jurel por año: Para observar los cambios  
24 interanuales de la densidad del recurso por sector se pretendía subdividir el área  
25 evaluada por los cruceros acústicos en sectores discretizados, lo cual no fue necesario,  
26 por el contrario, debido a que el recurso presentó un claro patrón de distribución en el  
27 área de estudio, se decidió trabajar con el porcentaje de reclutas de jurel por año  
28 espacialmente, esto se realizó considerando la información de los lances de pesca  
29 realizados durante los cruceros de evaluación y en los casos en que no se contó con esta  
30 información, se obtuvo de los informes FIP correspondientes. Además, se utilizaron  
31 datos de profundidad media de los cardúmenes de jurel en los años en que se contó con  
32 la información.

1 Finalmente, se integró la información para todos y cada uno de los años, obteniendo  
 2 figuras y mapas de distribución espacial que permitieron observar de mejor manera la  
 3 variación interanual que presenta este recurso en una serie de tiempo de dos décadas  
 4 (1994 - 2013) en la zona de interés.

5  
 6 Cruceros de evaluación acústica del jurel y anchoveta utilizados para la ejecución del  
 7 proyecto: a continuación se detallan las fuentes de información utilizadas para la  
 8 estandarización de los registros acústicos (ver Tabla XVI para el detalle de los  
 9 proyectos involucrados).

10  
 11 -Bitácora del crucero: Georreferencia e información de lances de pesca de  
 12 identificación.

13 -Información acústica: Latitud, longitud, Fecha, Hora, densidad acústica (NASC) y  
 14 profundidad media de los cardúmenes por UBM.

15 -Información biológica: Estructura de tallas y longitud peso georreferenciada para cada  
 16 crucero.

17  
 18 Tabla XVI. Listado de proyectos de evaluaciones hidroacústicas utilizados en el  
 19 presente estudio, que contaron con la información requerida.  
 20

<b>Código</b>	<b>Título</b>	<b>Ejecutor</b>
FIP 94-13	Evaluación hidroacústica de los stocks de sardina española, anchoveta y jurel en la zona norte (I a IV Regiones).	IFOP
FIP 98-07	Evaluación acústica del reclutamiento de anchoveta en las Regiones I y II, 1998.	IFOP
FIP 98-11	Evaluación hidroacústica de jurel en la ZEE de Chile.	IFOP
FIP 99-03	Evaluación hidroacústica de jurel en la ZEE de Chile.	IFOP
FIP 2001-02	Evaluación hidroacústica de jurel en la ZEE de Chile, marzo de 2001.	IFOP
FIP 2002-02	Evaluación hidroacústica de jurel en la ZEE de Chile, año 2002.	IFOP
FIP 2005-26	Evaluación hidroacústica del recurso anchoveta en la III y IV Regiones.	IFOP
FIP 2006-07	Evaluación hidroacústica del reclutamiento de anchoveta entre la III y IV Regiones, año 2007.	IFOP
FIP 2006-08	Evaluación hidroacústica de jurel en la región oceánica de la I y II regiones.	IFOP
FIP 2006-39	Evaluación hidroacústica del reclutamiento de anchoveta entre la I y II Regiones, año 2007.	IFOP

FIP 2007-02	Evaluación hidroacústica del reclutamiento de anchoveta en la I y II Regiones, año 2008.	IFOP
FIP 2007-03	Evaluación hidroacústica del reclutamiento de anchoveta en la III y IV Regiones, año 2008.	IFOP
FIP 2007-09	Evaluación hidroacústica de jurel en la I y II regiones, año 2007.	IFOP
FIP 2008-02	Evaluación hidroacústica del reclutamiento de anchoveta entre la XV y IV Regiones, año 2009.	IFOP
FIP 2008-21	Monitoreo de condiciones bio-oceanográficas entre la I y IV regiones, año 2008.	IFOP
FIP 2008-07	Evaluación hidroacústica de jurel en la I y II regiones, año 2008.	IFOP
FIP 2009-03	Evaluación hidroacústica del reclutamiento de anchoveta en la III y IV Regiones, año 2010.	IFOP
FIP 2009-07	Evaluación hidroacústica de jurel en la XV, I y II regiones, año 2009.	IFOP
FIP 2011-06	Evaluación hidroacústica de jurel entre la XV y III regiones, año 2011.	IFOP
FIP 2012-01	Evaluación hidroacústica de jurel entre la XV y III regiones, año 2012.	IFOP
FIP 2012-13	Evaluación hidroacústica del reclutamiento de anchoveta en la III y IV Regiones, año 2013.	IFOP
FIP 2013-03	Evaluación hidroacústica del reclutamiento de anchoveta en la IV, I y II Regiones, año 2014.	IFOP

1

## 2 **5.6. Prueba de hipótesis y modelo conceptual de la estructura poblacional de jurel**

3 En la estructura del stock de jurel en el Pacífico Suroriental unos de los componentes  
4 principales es la delimitación del área (áreas) de desove y de su conexión con las zonas  
5 de mayor concentración de los peces juveniles (pre-reclutas y reclutas), esto es zonas de  
6 crianza de los peces hasta que alcanzan la edad de primera madurez sexual y/o hasta la  
7 entrada (contribución) masiva a la pesquería.

8

9 En este contexto actualmente se reconocen por lo menos dos hipótesis principales  
10 vigentes al respecto de la posible ubicación espacial de las áreas de desove de jurel  
11 dentro de su área total de distribución en la región del Pacífico sur y su conectividad con  
12 la dinámica del reclutamiento:

13

- 14 1. El área de desove es único dentro de la "superpoblación", es extendido a lo largo  
15 de todo "el cinturón de jurel" en el Pacífico Sur y es conectado con una sola

1 zona de crianza en aguas costero-oceánicas del Sur del Perú y del Norte de  
2 Chile.

3 2. Supone dos áreas de desove frente las costas de Chile central y centro-sur y  
4 frente las costas del Perú, corresponden a dos stocks de jurel en el Pacífico  
5 Suroriental, chileno y peruano, sin embargo ambas áreas están conectadas con  
6 una zona compartida de crianza, ubicada en aguas costero-oceánicas de Sur del  
7 Perú y del Norte de Chile.

8 Al mismo tiempo, estas hipótesis están estrechamente relacionadas con aquellas que  
9 tienen que ver con la estructura de la población de jurel en el Pacífico suroriental y que  
10 han sido resumidas por Gerlotto *et al.*, 2012:

11 1. Una "red de poblaciones cerradas", donde cada subpoblación en la zona tiene un  
12 ciclo particular y donde no existe intercambio entre subpoblaciones. Las  
13 poblaciones son completamente independientes y viven espacialmente  
14 separadas. Este patrón puede conducir a la especiación.

15 2. Una "población parchosa", donde hay un solo ciclo para toda la población y  
16 donde los individuos "se mueven frecuentemente entre *parches* de hábitat y  
17 pueden reproducirse en varios *parches* durante su vida" (Ovaskainen & Hanski  
18 2004). Este grupo requiere ya sea una zona de desove común para toda la  
19 población o la posibilidad para cada individuo pueda desovar en cualquier zona  
20 de desove, e implica que los "*parches*" son en su mayoría áreas de crecimiento y  
21 alimentación

22 3. Una "metapoblación", donde las subpoblaciones tienen ciclos particulares pero  
23 donde persiste cierto intercambio entre ellas: "los individuos permanecen toda su  
24 vida en su población natal, y los movimientos entre las poblaciones son poco  
25 frecuentes, aunque la tasa de migración es lo suficientemente alta como para  
26 permitir la eventual recolonización de hábitats, donde una población local se ha  
27 extinguido" (Ovaskainen y Hanski 2004 *fide* Gerlotto *et al.*, 2012). Cada  
28 subpoblación es autónoma, pero unos pocos individuos mantienen vínculos entre  
29 las diferentes poblaciones (mezcla genética).

30

1 Todas estas hipótesis respecto a la estructura poblacional del jurel involucran procesos  
2 de intercambio de individuos a través de migraciones o de colonización por medio de la  
3 dispersión de los productos reproductivos. Consecuentemente, la evaluación del grado  
4 de conexión de las áreas de desove con todas las posibles áreas de reclutamiento o  
5 crianza (o incluso con otras fracciones donde ocurre la reproducción), es un punto clave  
6 para evaluar las hipótesis planteadas. De esta manera, los resultados obtenidos en este  
7 estudio fueron discutidos en términos de evaluar el grado de intercambio o conectividad  
8 entre las distintas fracciones identificadas dentro del área de distribución global del jurel  
9 en el Pacífico suroriental y la evidencia para contrastar las diferentes hipótesis de  
10 estructura poblacional.

11

12 En este contexto los experimentos de modelación biofísica se abordaron en relación a  
13 estas hipótesis de zonas de desove a través de experimentos de simulación que se  
14 inician en cada una de ellas, y continúan con el seguimiento de la historia de vida de  
15 cada uno de los individuos para identificar zonas fuente y sumidero y la contribución  
16 parcial país y global poblacional al reclutamiento.

17

18

19

20

21

22

23

24

25

26

27

28

29

30

31

32

33

## 6.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

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

#### 6.1.1. *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 actividad reproductiva de jurel considerando huevos y larvas. En el caso de Perú no fue posible contar con información de la distribución espacial de huevos y larvas tampoco con variabilidad interanual en parámetros reproductivos. De esta manera se utilizó información de la distribución espacial de larvas de jurel informados en Ayon & Correa (2013) como *proxy* de la actividad reproductiva, considerando que existe una correlación espacial entre huevos y larvas (Patricia Ayón, *comm pers*). Esta información corresponde a agregaciones decadales que describen las zonas reproductivas, las cuales se muestran en la Figura 10. Los resultados para las décadas 1990-1999 y 2000-2010 fueron utilizados para inicializar el modelo biofísico en la región de Perú (la última también se consideró para la modelación del periodo 2011-2013). De esta manera, se observó un área reproductiva muy costera en las costas de Perú, con una alta variabilidad espacial decadal con un foco norte relevante en la década de 1990 (centrado en los 8°S) y uno secundario en el extremo sur (18°S), mientras que durante la década del 2000 el foco de distribución se desplaza al sur centrándose en los 17°S. Este escenario generó un escenario de inicialización diferente entre décadas de simulación en el área de Perú. Como ha quedado establecido en este estudio, la inclusión de condiciones iniciales realistas para el estudio de la conectividad es un tópico relevante. Sin embargo, la descripción de áreas reproductivas de jurel para Perú se realizó de forma indirecta por carecer de datos de evaluación directa del desove, no obstante se hicieron los esfuerzos por conseguir dicha información. Es necesario avanzar hacia esfuerzos colaborativos internacionales para la obtención de datos respecto a la distribución de huevos de jurel en aguas de Perú para futuras versiones del modelo biofísico. La inclusión reciente de Perú desde enero de 2016 en la SPRFMO es una instancia que podría ayudar en esta perspectiva.

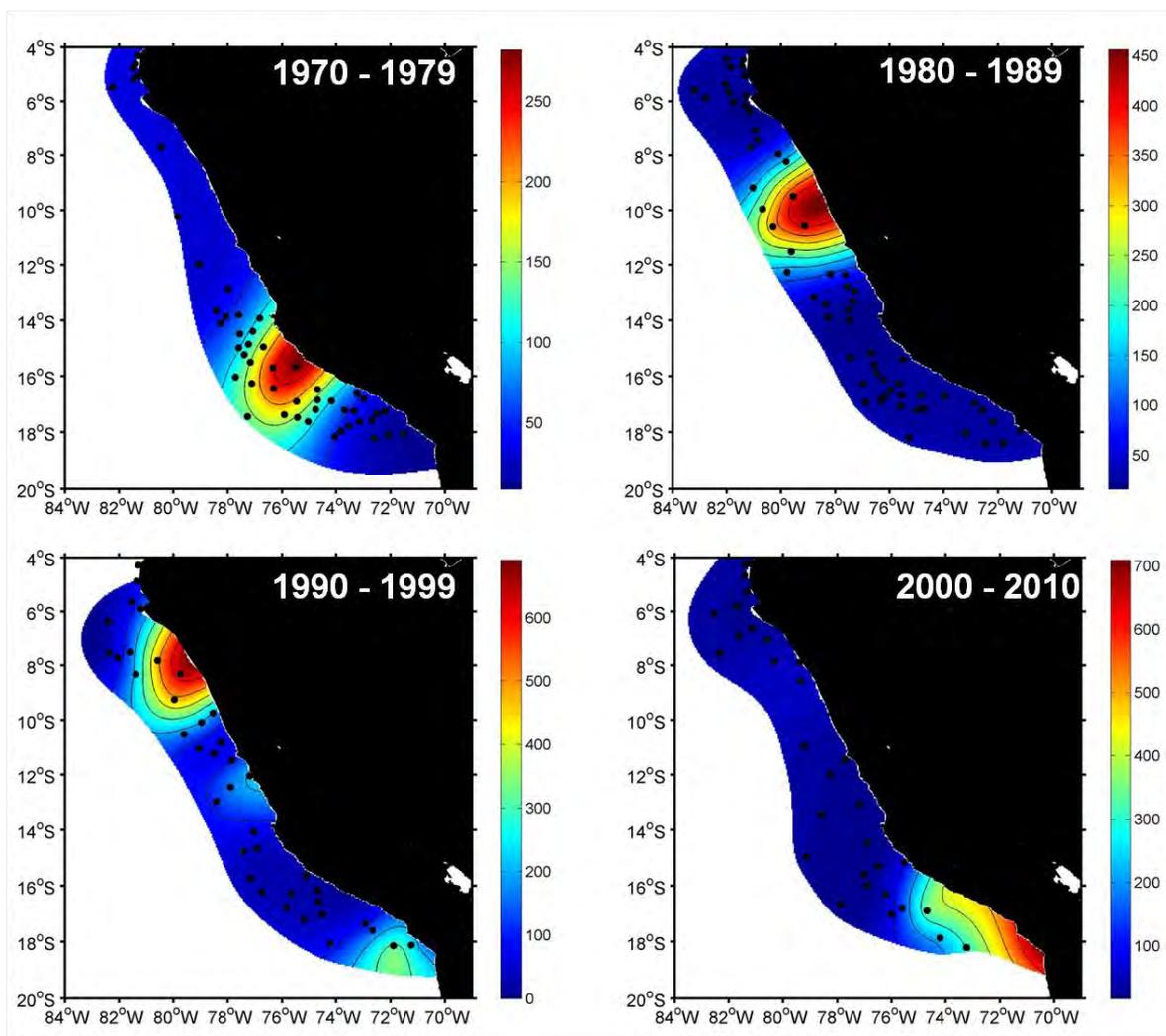


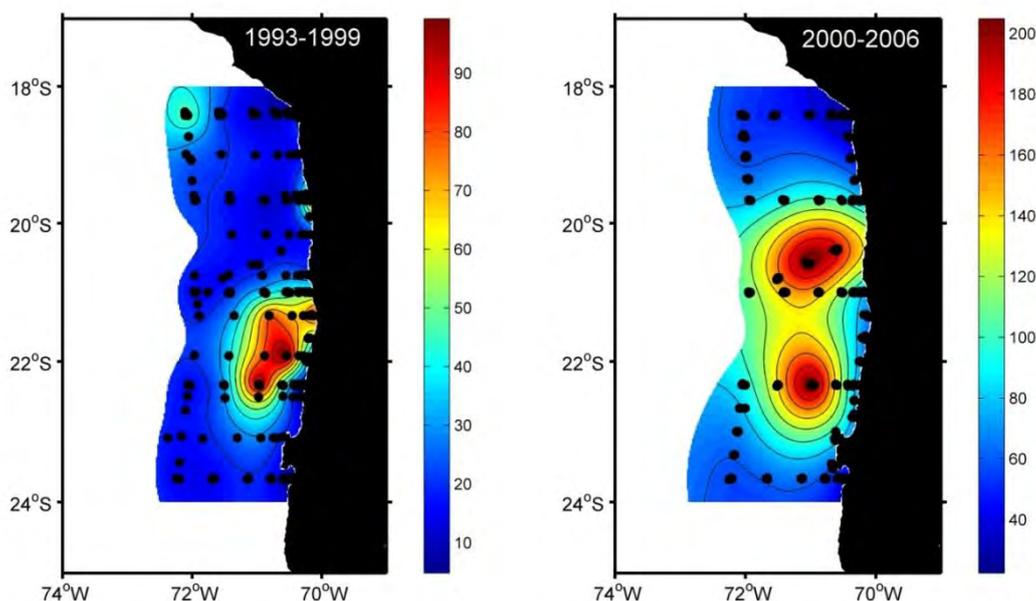
Figura 10. Distribución espacial de la densidad de larvas de jurel ( $\text{ind}/\text{m}^2$ ) en la zona oceánica frente a Perú. Modificado de Ayon & Correa (2013).

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16

En el caso del área de desove propuesta para el norte de Chile, se consideró la información de distribución espacial de huevos de jurel reportada en el marco de la Organización Regional de Pesca la cual es resumida por Braun & Valenzuela (2008). En el caso de esta región la información no proviene de cruceros sistemáticos, sino más bien de lances adaptativos al interior de la zona de estudio situada en el sector costero entre el  $18^\circ$  y  $24^\circ\text{S}$ . De esta manera, y en forma similar a lo realizado para el área de Perú, la información fue agrupada bajo un esquema decadal en dos periodos: 1993-1999 y 2000-2006 (considerando éste último para el periodo 2007-2013). Los resultados revelan cierta consistencia temporal en el área de distribución de huevos de jurel, no obstante el periodo 1993-1999 se caracterizó por tener un área más concentrada, centrada en los  $22^\circ\text{S}$  con baja extensión espacial y sin aparente extensión costa afuera (Figura 11). En el caso del periodo 2000-2006, se observó una expansión en el área de

1 desove informada, con dos núcleos relevantes que parecen ser parte de una única unidad  
2 espacial, el principal centrado en los 19°S y uno secundario en los 23°S (Figura 11). De  
3 esta manera, estos reportes generaron un escenario de inicialización poco variable  
4 espacialmente para el área norte de Chile.

5



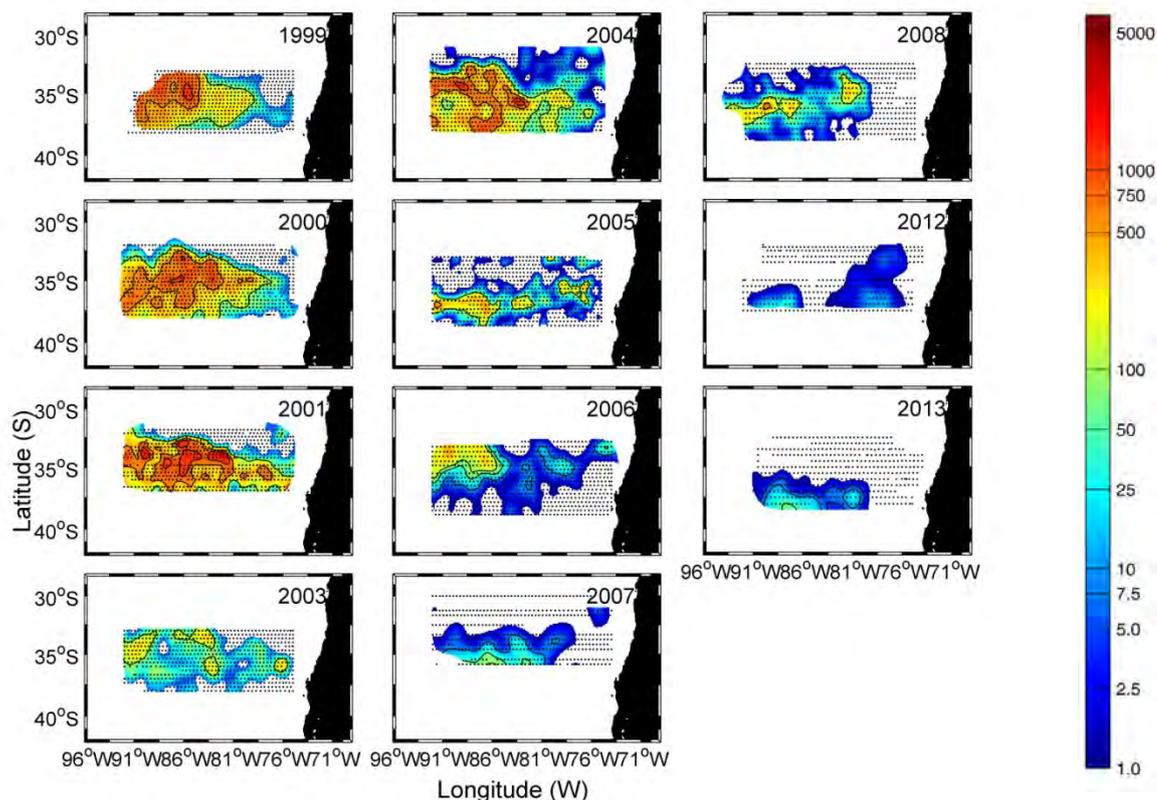
6

7 Figura 11. Distribución espacial de la densidad del desove de jurel (huevos/10m<sup>2</sup>) en la  
8 zona costera frente a Chile norte. Modificado de Braun & Valenzuela (2008).

9

10 Finalmente, en el caso de la zona centro-sur de Chile, considerada como el área de  
11 desove principal del jurel en términos de extensión y abundancia, se contó con mayor y  
12 más detallada información en término de abundancia y distribución de huevos de jurel.  
13 Lo anterior vinculado principalmente, a que en esta zona es la única zona de desove  
14 conocida de jurel donde se han desarrollado estudios orientados a establecer la  
15 variabilidad interanual de la producción de huevos de jurel y la extensión del área de  
16 desove por medio del método de producción diaria de huevos. Lo anterior permite  
17 contar con cruceros diseñados sistemáticamente con un desarrollo cuasi-sinóptico con  
18 amplia cobertura y consistencia interanual. De esta manera, para esta zona de desove se  
19 consideró la información anual para la inicialización del modelo y en el caso de años sin  
20 crucero (2002, 2009, 2010 y 2011) se utilizó un modelo basado en la información  
21 conocida y en la relación del desove con información ambiental (descrito más adelante).  
22 Los resultados mostraron rasgos de recurrencia interanual en la distribución espacial

1 del desove de jurel, con núcleos centrados en los 86°W y 36°S. La variabilidad espacial  
 2 interanual se observó en años donde el desove se manifiesta más costero (2003, 2012) o  
 3 más oceánico (2007, 2008 y 2013). No obstante a esta recurrencia en el área de desove,  
 4 destaca la variabilidad interanual en la abundancia del desove con una tendencia  
 5 sostenida a decaer a lo largo del tiempo (Figura 12), lo que será relevante en términos  
 6 de contrastar la abundancia del desove con la conectividad y su efecto en la dinámica  
 7 del reclutamiento.

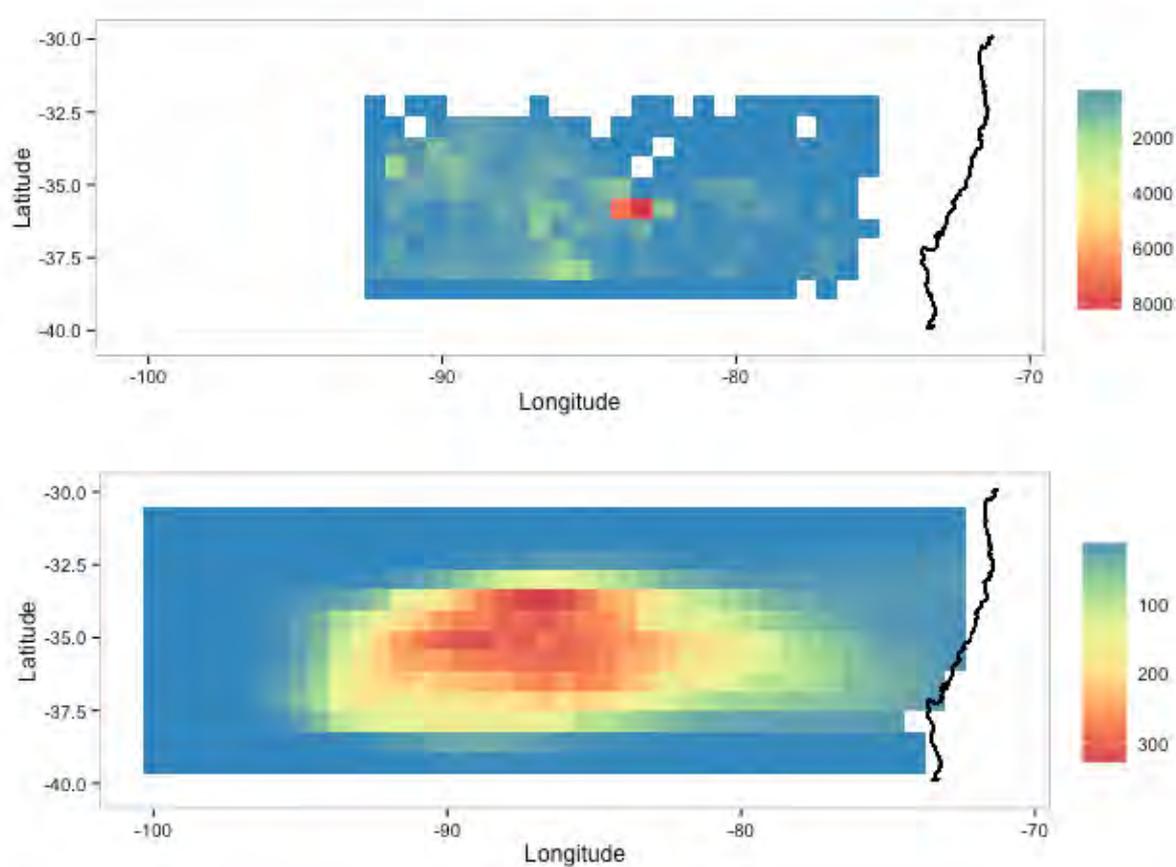


8  
 9 Figura 12. Distribución espacial de los desoves de jurel (ind/m<sup>2</sup>) en la zona oceánica  
 10 frente a Chile centro sur.

11 Uno de los aspectos destacados en el esquema de modelación biofísica planteado en este  
 12 estudio es la precisión en la inicialización del modelo, donde la ubicación espacial de la  
 13 liberación de los individuos modelados es clave. En este contexto, experiencia previas  
 14 de modelación incluían grillas de liberación en donde se distribuían aleatoriamente  
 15 fracciones del total desovado (ver Vásquez, 2012 para detalles). En el presente estudio  
 16 se ha desarrollado un modelo GAM espacial que permitió la generación de individuos  
 17 (*drifters*) los cuales tuvieron una ubicación espacial propia y que en conjunto replicaron  
 18 la densidad espacial de huevos de jurel registrados por los cruceros de evaluación,  
 19

1 además el modelo planteado permitió la generación de individuos en años donde no  
 2 hubo observación espacial.

3 El modelo GAM espacial generado mostró una débil preferencia del jurel para la  
 4 selección de sitios de desove entre años, sin embargo se detectó una tendencia a la  
 5 agregación entre años. De esta manera, los GAMs mostraron una débil tendencia entre  
 6 la variable respuesta, huevos de jurel por metro cuadrado, respecto a las covariables  
 7 espaciales (Latitud y Longitud) con un 8,8% de la devianza explicada. Sin embargo,  
 8 esta relación fue más evidente cuando el Año fue incluido como una nueva variable  
 9 aditiva en el modelo, alcanzando un 45,2% de devianza explicada (Tabla XVII, Figura  
 10 13)



11  
 12 Figura 13. Producción de huevos estimados para jurel frente a Chile centro-sur en  
 13 primavera de 2004 (crucero; panel superior) y densidad de huevos predicha (huevos/m<sup>2</sup>)  
 14 usando un GAM con Año, Latitud y Longitud como co-variables.

15  
 16

1 Tabla XVII. Resumen del GAM que predice la densidad de huevos de jurel en todo el  
 2 dominio espacial para todos los cruceros realizados . La longitud fue normalizada.

```

Family: quasipoisson
Link function: log

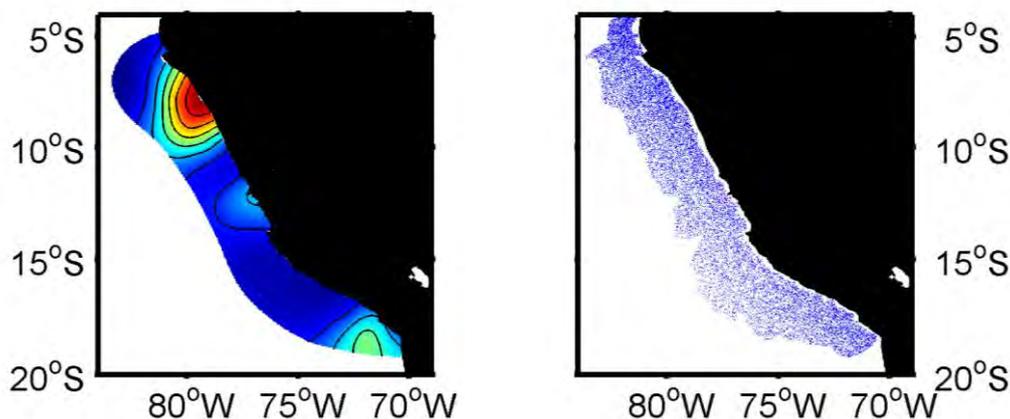
Formula:
egg.prod.m2 ~ Year + s(Stand.Long, Lat, k = -1)

Parametric coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) 414.565115  18.185144  22.80  <2e-16 ***
Year        -0.206685   0.009078 -22.77  <2e-16 ***
---
Approximate significance of smooth terms:
              edf Ref.df    F p-value
s(Stand.Long,Lat) 28.89    29 23.73  <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

R-sq.(adj) =  0.127   Deviance explained = 45.2%
GCV = 255.15   Scale est. = 1461         n = 2003
    
```

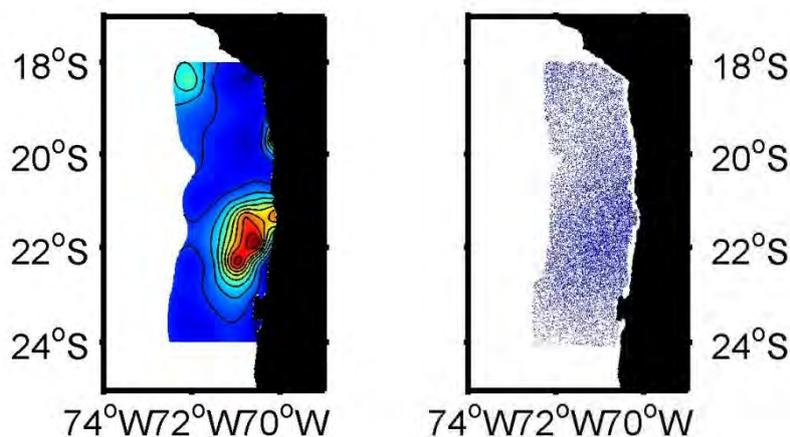
3

4 Desde este modelo espacial, que reprodujeron las condiciones de desove interanual del  
 5 jurel, se generaron individuos virtuales (*drifters*), cuyas posiciones inicializaron el  
 6 modelo biofísico. El mismo modelo realizado para la zona centro-sur fue replicado para  
 7 Perú y norte de Chile (estadísticas no reportadas en este informe). Un ejemplo de la  
 8 generación de *drifters* para cada zona se muestra en las Figura 14, 15 y 16 para Perú,  
 9 norte de Chile y Chile centro-sur respectivamente.



10

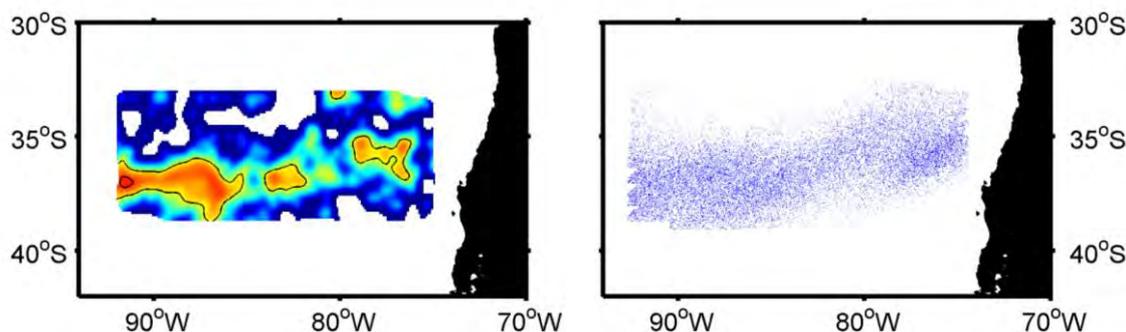
11 Figura 14. Ejemplo de aplicación de la generación de *drifters* mediante el uso de  
 12 modelos espaciales GAM para el área de desove de Perú en el periodo 1990-1999.



1

2 Figura 15. Ejemplo de aplicación de la generación de *drifters* mediante el uso de  
3 modelos espaciales GAM para el área de desove norte de Chile en el periodo 1993-  
4 1999.

5

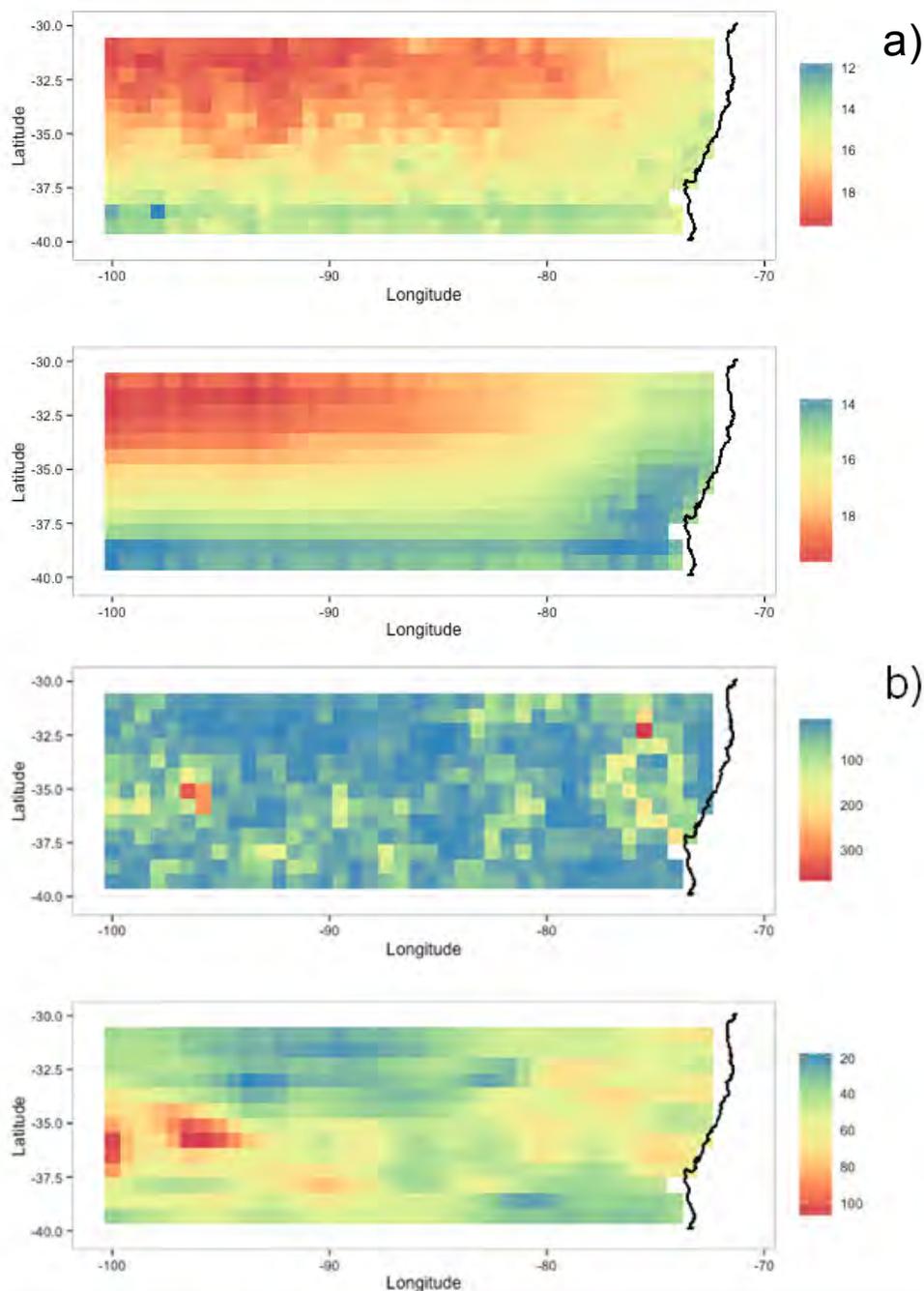


6

7 Figura 16. Ejemplo de aplicación de la generación de *drifters* mediante el uso de  
8 modelos espaciales GAM para el área de desove Chile centro-sur, año 2005.

9

10 El mismo esquema de modelación GAM fue utilizado para el establecimiento de  
11 condiciones iniciales en años donde no se contaba con información de campo, para este  
12 efecto se generó un modelo que incorpora como co-variables predictoras del desove a la  
13 temperatura y la energía cinética en conjunto con las variables espaciales latitud,  
14 longitud y la variables temporal año. En este contexto el modelo planteado mostró una  
15 fuerte relación entre las variables espaciales y la TSM con un 86,6% de desviación  
16 explicada (Figura 17a; Tabla XVIII). En el caso de la EKE no hubo una relación clara  
17 con las variables espaciales a través de los años con aproximadamente un 12% de  
18 desviación explicada (Figura 17b; Tabla XIX).



1

2

3 Figura 17. a) Temperatura superficial del mar (°C) observada durante la temporada  
 4 reproductiva del 2004 (arriba) respecto a la predicha por el modelo (abajo). Detalles en  
 5 Tabla XVIII; b) energía cinética ( $\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$ ) observada durante la temporada reproductiva  
 6 del 2004 (arriba) respecto a la predicha por el modelo (abajo). Detalles en Tabla XIX.

7

8

9

1 Tabla XVIII. Resumen del GAM que predice la temperatura superficial del mar en todo  
 2 el dominio espacial para todos los cruceros realizados . La longitud fue normalizada.

```
Family: gaussian
Link function: identity

Formula:
SST.norm ~ Year + s(Stand.Long, Lat, k = 200) -
1

Parametric coefficients:
      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
Year 6.834e-09 1.294e-06  0.005  0.996

Approximate significance of smooth terms:
              edf Ref.df    F p-value
s(Stand.Long,Lat) 156.7 184.3 696.6 <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

R-sq.(adj) =  0.865  Deviance explained = 86.6%
GCV = 0.13602  Scale est. = 0.13495  n = 20039
```

3

4

5 Tabla XIX. Resumen del GAM que predice la energía cinética en todo el dominio  
 6 espacial para todos los cruceros realizados . La longitud fue normalizada.

7

```
Family: gaussian
Link function: identity

Formula:
EKE.norm ~ Year + s(Stand.Long, Lat, k = 200) -
1

Parametric coefficients:
      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
Year 8.228e-09 3.318e-06  0.002  0.998

Approximate significance of smooth terms:
              edf Ref.df    F p-value
s(Stand.Long,Lat) 168.8 191.2 13.59 <2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

R-sq.(adj) =  0.113  Deviance explained = 12%
GCV = 0.89438  Scale est. = 0.8868  n = 20039
```

8

9 La TSM en sí misma no resultó ser un predictor fuerte de la abundancia espacial de  
 10 huevos de jurel por metro cuadrado. Los GAM mostraron relaciones débiles entre estas  
 11 variables con un 24,3% de desviación explicada. La relación fue similar al incluir la  
 12 EKE como co-variable derivada de los GAM con un 25,5% de desviación explicada.  
 13 Sin embargo la predicción espacial de la densidad de huevos fue más suave usando la

1 TSM predicha. El modelo final seleccionado para predecir el modelo explicó el 48,3%  
 2 de la varianza total (Tabla XX). Este modelo incluyó la TSM predicha y la EKE  
 3 normalizada como *splines* independientes y un suavizador bivariado para las variables  
 4 espaciales. El modelo seleccionado se ajustó bien con los datos para todos los cruceros,  
 5 donde el *p-value*, los grados de libertad por *spline* y el porcentaje explicado de la  
 6 varianza total fueron altos. Los *splines* para las variables ambientales fueron para todos  
 7 los cruceros menos significativos en comparación con los espaciales. Este modelo fue al  
 8 mismo tiempo utilizado para estimar el área y la abundancia del desove para años donde  
 9 no se realizó crucero de evaluación del desove.

10 Tabla XX. Resumen de la predicción realizada por el modelo GAM para la densidad de  
 11 huevos de jurel en todo el dominio y para todos los cruceros analizados.

```
Family: quasipoisson
Link function: log

Formula:
egg.prod.m2 ~ s(Year) + s(SST, Stand.Long) + s(EKE, Lat) + s(Year,
  Stand.Long) + s(EKE, Lat)

Parametric coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -0.05599    0.64619  -0.087   0.931

Approximate significance of smooth terms:
              edf Ref.df    F  p-value
s(Year)          8.089  8.540  8.998 6.46e-13 ***
s(SST,Stand.Long) 23.738 25.329 31.080 < 2e-16 ***
s(EKE,Lat)        6.790  8.686 13.912 < 2e-16 ***
s(Year,Stand.Long) 14.205 27.000  3.680 < 2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

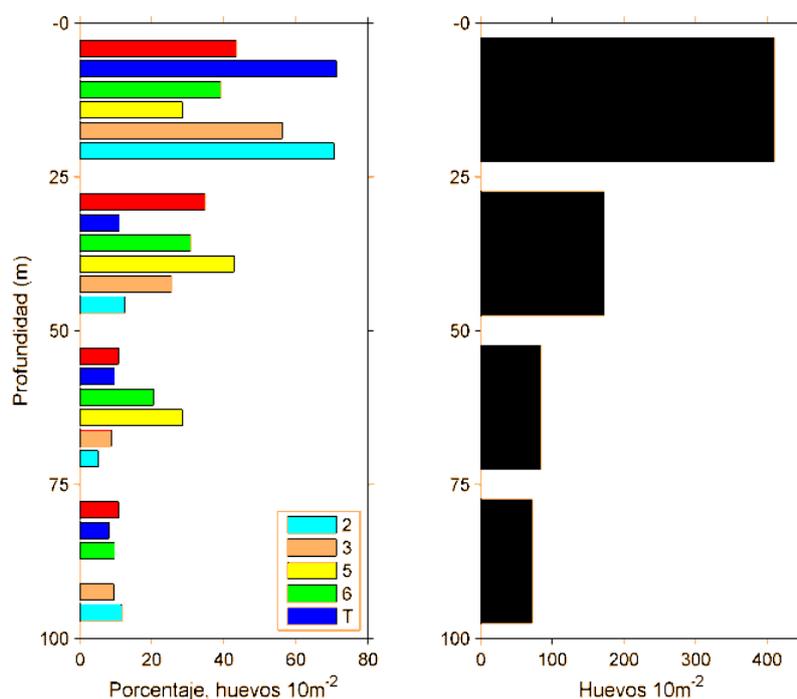
R-sq.(adj) = 0.152  Deviance explained = 48.3%
fREML = 95485  Scale est. = 797.72  n = 20039
```

12

### 14 6.1.2. Sub-modelo de distribución vertical del desove

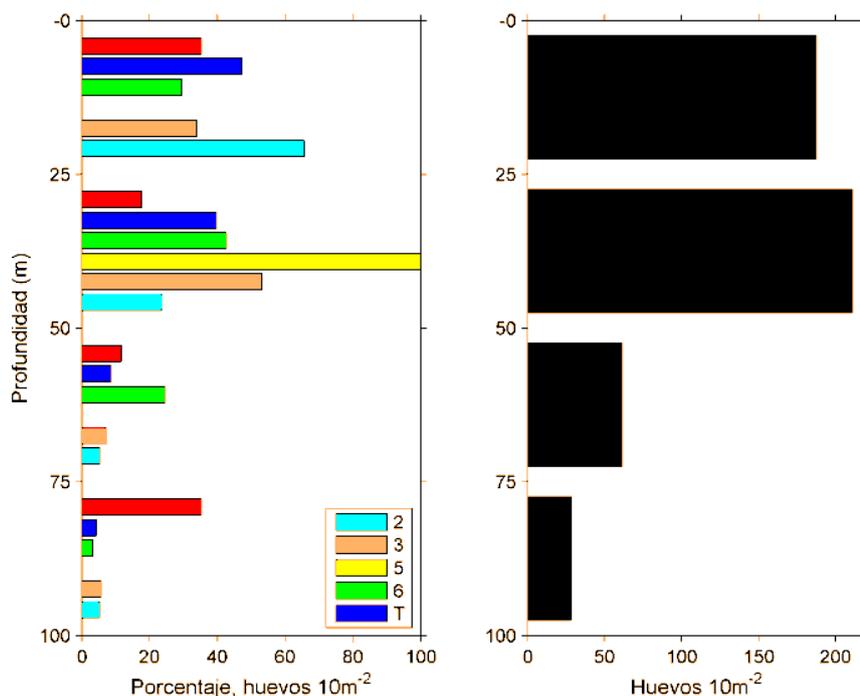
15 Con el propósito de conocer la distribución vertical de huevos y larvas de jurel para  
 16 definir el rango vertical de la liberación del desove en el área de prospección, se analizó  
 17 la información de muestreos estratificados realizados en 4 estratos de profundidad en la  
 18 columna de agua evaluada: 0 – 25 m, 25 – 50 m, 50 – 75 m y 75 – 100 m. Las Figuras  
 19 18 y 19 muestran el resultado de este análisis donde se evidencia que más de un 60% de  
 20 los huevos y larvas de jurel se localizan dentro de los primeros 2 estratos de  
 21 profundidad desde la superficie (< 50 m), siendo este patrón más notorio para los  
 22 huevos que para las larvas. En el caso de los huevos, entre un 42% y un 78% del total

1 registrado en la columna de agua hasta los 100 m de profundidad se detectan en el  
2 estrato superficial (<25 m) y en términos de densidad se corrobora un declive de tipo  
3 exponencial con la profundidad. Para efectos de modelación biofísica se consideró la  
4 distribución porcentual de todas las observaciones con un 85,35%, 12,28%, 2,45% y  
5 1,76% desde el estrato más superficial al más profundo respectivamente. De esta  
6 manera los *drifters* generados siguieron este mismo patrón porcentual de distribución  
7 vertical.



8

9 Figura 18. Distribución vertical promedio de huevos de jurel (expresados en porcentaje)  
10 por estrato de profundidad en distintas zonas de muestreo (panel izquierdo). Densidad  
11 de huevos integrada por estrato de profundidad (panel derecho).



1

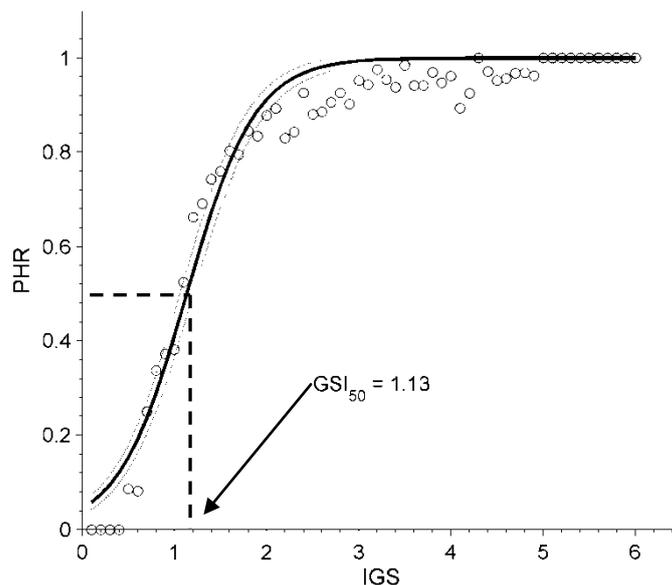
2 Figura 19. Distribución vertical promedio de larvas de jurel (expresados en porcentaje)  
 3 por estrato de profundidad en distintas zonas de muestreo (panel izquierdo). Densidad  
 4 de larvas integrada por estrato de profundidad (panel derecho).

5

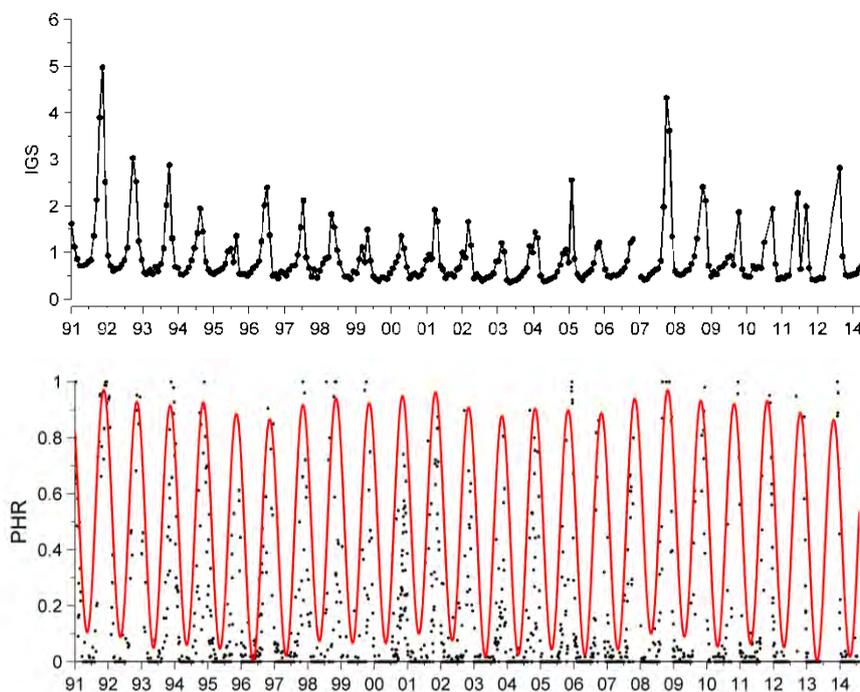
### 6 **6.1.3. Sub-modelo de sincronización temporal del desove**

7 Se estimó un valor de IGS umbral ( $IGS_{50\%}$ ) que permita tener un valor incesgado para  
 8 determinar en qué momento las hembras comienzan la actividad reproductiva y cuando  
 9 esta se detiene (Figura 20). De esta manera, las hembras que se encuentren en un IGS  
 10 por sobre el  $IGS_{50\%}$  fueron consideradas reproductivamente activas y que, por lo tanto,  
 11 se han incorporado a la temporada de desove. Para este fin, se estructuró una serie de  
 12 tiempo, en escala diaria, que describe la proporción de hembras maduras presentes en la  
 13 población a lo largo del año, utilizando como fuente de información el muestreo  
 14 biológico regular realizado por INPESCA sobre las capturas de jurel en escala semanal,  
 15 a partir del cual se calculó el IGS a cada hembra muestreada que será contrastado con el  
 16  $IGS_{50\%}$  como valor objetivo. De esta manera, se obtuvo la proporción de hembras  
 17 desovantes a lo largo del año lo que permite estimar la temporada reproductiva del jurel  
 18 (Figura 21). Para la frecuencia de liberación de partículas en las simulaciones, se utilizó  
 19 la frecuencia de desove media, calculada para el periodo de estudio, para realizar  
 20 sucesivas liberaciones que constituyan el desove anual del jurel siguiendo el patrón  
 21 obtenido desde el IGS. Este patrón de desove indicó un inicio en Agosto y un término

1 en Enero, con un máximo en Noviembre con bajos niveles de variabilidad interanual,  
 2 patrón que fue replicado para todas las zonas de desove, considerando la similitud con  
 3 lo reportado para el jurel en Perú (Perea *et al.*, 2013)



4  
 5 Figura 20. Proporción de Hembras Reproductivamente activas desde microscopía  
 6 (PHR) en función de su Índice Gónado Somático y su modelo logístico ajustado para  
 7 estimar el  $IGS_{50\%}$  que define el valor umbral para el inicio de la actividad de desove.

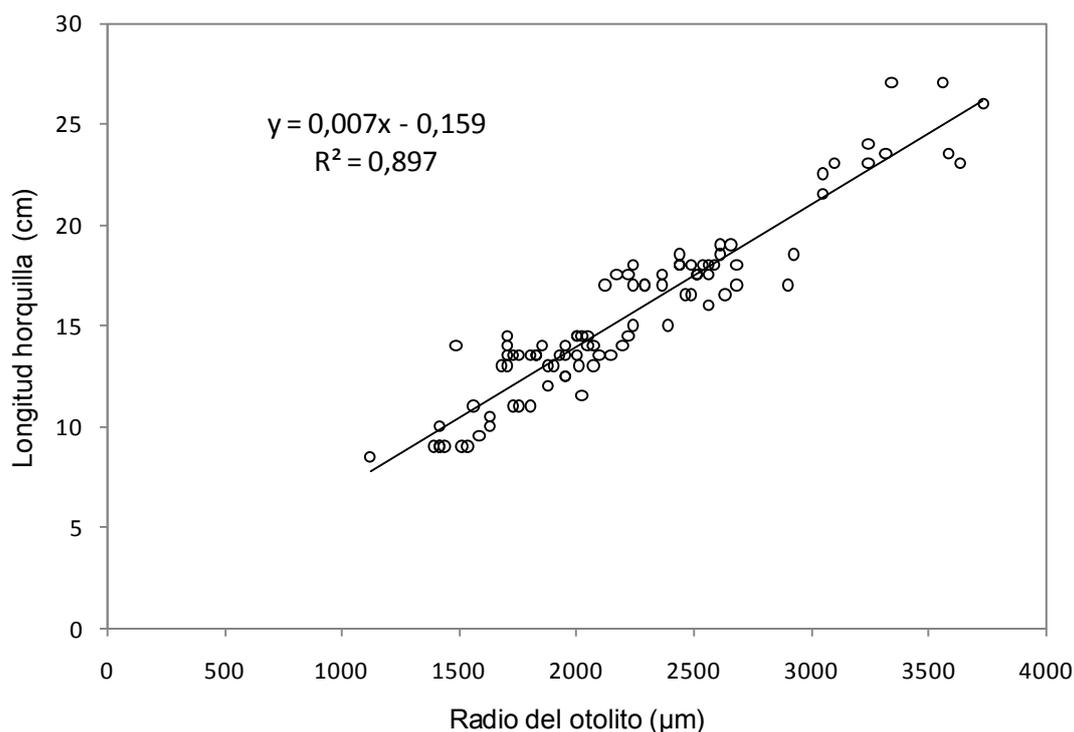


8  
 9  
 10 Figura 21. Serie de tiempo del Índice Gónado Somático de jurel para el periodo 1991-  
 11 2014 (panel superior). Serie de tiempo de la proporción de hembras reproductivamente  
 12 activas periodo 1991-2014, los puntos muestran la proporción diaria calculada desde los  
 13 muestreos y la línea roja el ciclo anual calculado mediante descomposición armónica  
 14 (panel inferior)

15

#### 1 6.1.4. Sub-modelo de crecimiento

2 Para obtener la relación entre la longitud total del pez y el radio del otolito se seleccionó  
 3 un eje de medición para obtener el mayor radio del otolito, tomando desde el núcleo  
 4 hasta el borde postrostral bajo microscopio óptico (4X).  
 5 Se estimó una alta correlación entre el radio máximo del otolito y la longitud del pez  
 6 (Figura 22) demostrando que el crecimiento somático y otolitario se encuentran  
 7 altamente acoplados en estas etapas de la ontogenia.



8

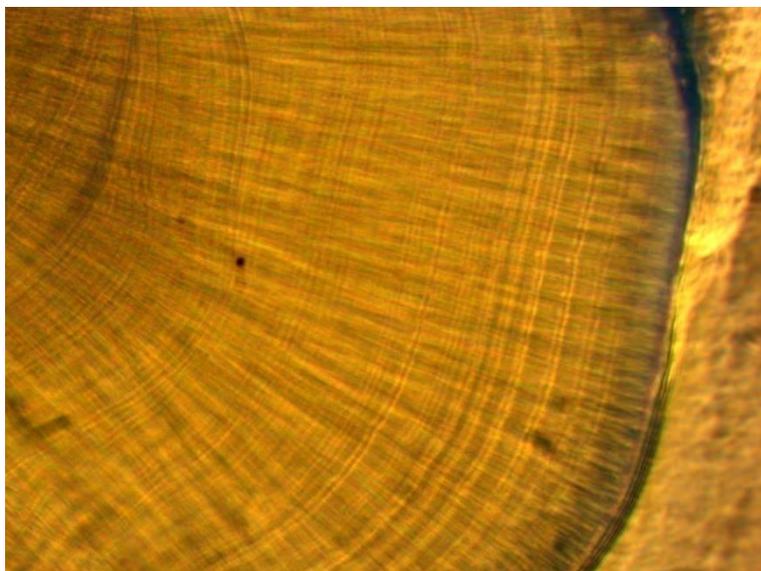
9 Figura 22. Relación entre longitud horquilla (cm) y el radio del otolito (μm) de  
 10 *Trachurus murphyi* colectados entre la segunda y novena regiones de Chile.

11

12 Bajo microscopio óptico los incrementos de crecimiento diario aparecieron compuestos  
 13 de dos unidades: una unidad de aspecto claro y una de aspecto oscuro (Figuras 23 y 24).  
 14 La unidad clara, denominada habitualmente como unidad incremental, es rica en  
 15 microcristales de aragonita depositados sobre una matriz orgánica de otolina. La unidad  
 16 de aspecto oscuro, denominada unidad discontinua, está compuesta únicamente por  
 17 fibras de otolina (Morales-Nin, 2000). Estos incrementos, depositados desde el núcleo  
 18 central (Figura 24), quedan encerrados por la aparición de núcleos accesorios, formando  
 19 así el área poligonal denominada "primordio". En todos los individuos el espesor de los  
 20 incrementos de crecimiento diario aumentó progresivamente hacia el borde del  
 21 primordio. El máximo número de anillos diarios registrados en un otolito de *T. murphyi*

1 fue 910 en un individuo de 26 cm de longitud horquilla. Mientras que el individuo que  
2 presentó menos correspondió a un pez con longitud horquilla 8,5 cm de que presentó  
3 249 anillos de crecimiento.

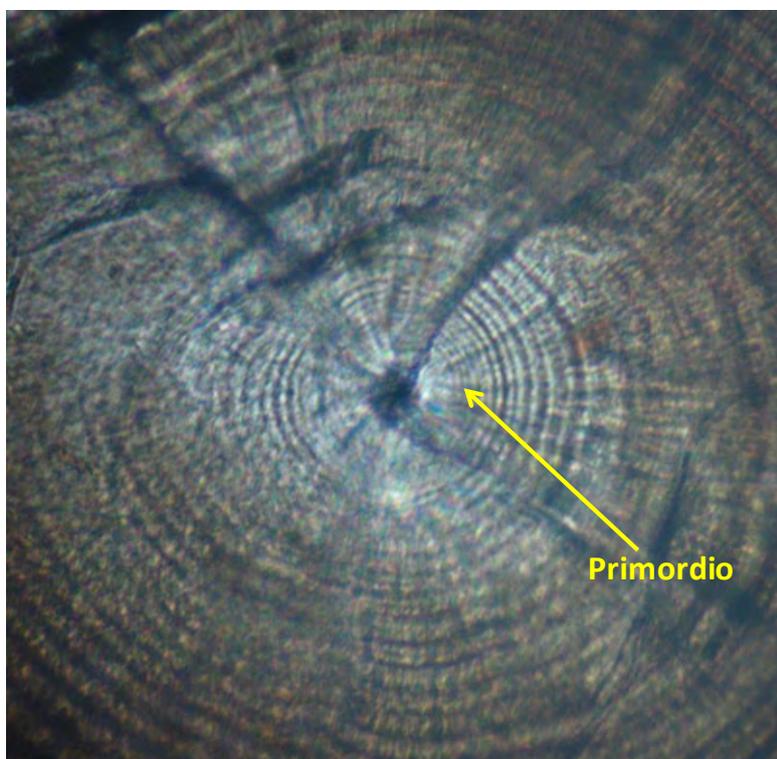
4



5

6 Figura 23. Otolito jurel (borde *postrostrum*) de 14 cm LH 40X ha sido realizado hasta el  
7 momento en un otolito de jurel correspondiente a un individuo de 9 cm LH.

8

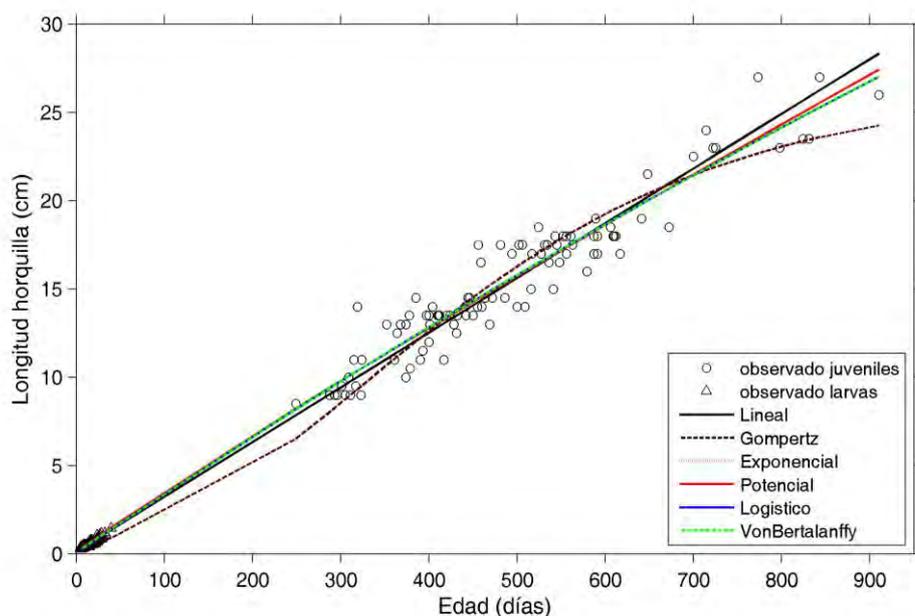


9

10 Figura 24. Otolito jurel de 10.5 cm LH 400X, se observan el centro, primordio y  
11 primeros anillos de crecimiento diario.

12

1 En la Tabla XXI se presenta los parámetros de crecimiento en longitud estimados para  
2 *T. murphyi* ajustando los modelos lineal, Gompertz , exponencial, potencial, logístico y  
3 von Bertalanffy (Figura 25) y el valor de AIC asociado a cada modelo, donde según este  
4 índice, los modelos que presentaron mejor ajuste fueron Logístico, von Bertalanffy ,  
5 potencial y lineal, mientras que el modelo que menos se ajustó fue el exponencial.  
6



7

8 Figura 25. Edad en días observadas en larvas y juveniles de *T. murphyi* capturados entre  
9 las II y X regiones de Chile, y ajuste de seis modelos de crecimiento probados para  
10 describir su crecimiento.

11

12 De esta manera, la inclusión de larvas y juveniles de jurel permitió la obtención de una  
13 función de crecimiento en escala diaria, la cual fue incorporada en la sección de  
14 crecimiento de ICHTHYOP y permitió estimar la talla de cada individuo modelado  
15 desde la eclosión hasta los 120 días de duración de la etapa pelágica (extensión de las  
16 simulaciones) y obtener la estructura de tallas de los individuos reclutados.

17

18

19

20

21

22

23

24

25

26

1 Tabla XXI. Parámetros de crecimiento en longitud para *T. murphyi* estimados por seis  
 2 modelos diferentes. AIC=índice de Akaike.  
 3

Modelo	Parámetro	Estimado	E. S.	Valor t	Valor p	AIC
Lineal	a	0.12	0.04	3.344	0.001	834
	b	0.03	0.00	207.282	<2e-16	
Gompertz	$L_{\infty}$ (cm)	4.8E-01	3.6E-02	1.3E+01	<2e-16	933
	G	4.0E+00	7.1E-02	5.7E+01	<2e-16	
	g	4.2E-03	8.5E-05	5.0E+01	<2e-16	
Exponencial	a	2.4E+00	1.2E-01	19.8	<2e-16	2048
	b	3.2E-03	7.9E-05	40.26	<2e-16	
Potencial	a	0.05	0.00	13.75	<2e-16	811
	b	0.93	0.01	80.39	<2e-16	
Logístico	$Y_{\infty}$ (mm)	1.1E+02	2.0E+01	5.7E+00	2.6E-08	808
	K (días <sup>-1</sup> )	3.0E-04	5.8E-05	5.2E+00	3.3E-07	
	$t_0$ (días)	-1.9E+00	1.1E+00	-1.7E+00	0.099	
von	$L_{\infty}$ (cm)	1.1E+02	2.0E+01	5.68	2.6E-08	808
Bertalanffy	K (año <sup>-1</sup> )	3.0E-04	5.8E-05	5.19	3.3E-07	
Longitud	$t_0$ (años)	-1.9E+00	1.1E+00	-1.65	0.0993	

4

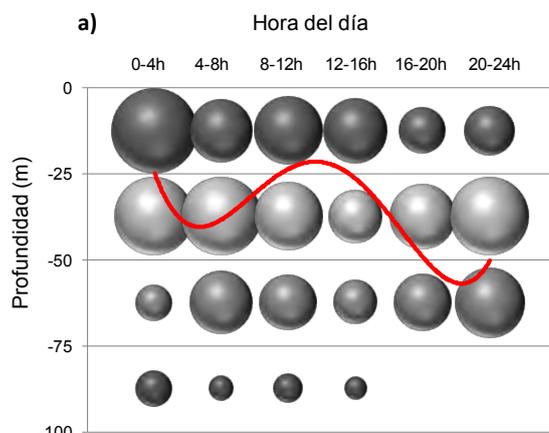
5

### 6 **6.1.5. Sub-modelo de movimiento**

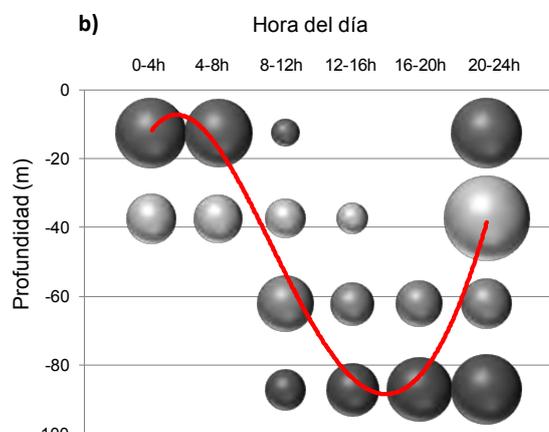
7 Un modelo de migración diurno-nocturna para larvas y juveniles de jurel fue  
 8 desarrollado en función de las observaciones de campo, además de un esquema de  
 9 flotabilidad para huevos. Desde datos observados de distribución vertical de larvas de  
 10 jurel se calculó la probabilidad de encuentro en los estratos 0-25, 25-50, 50-75 y 75-  
 11 100m para tres grupos de talla: 2-6, 6-10 y >10mm desde los que se ajustó un modelo  
 12 de migración diurno-nocturna que puede calcular la posición de las larvas a cualquier  
 13 hora del día. La Figura 26 muestra los resultados de esta aproximación, destacando que  
 14 en larvas pequeñas, no se observó un patrón marcado de migración vertical, con mayor  
 15 probabilidad de encuentro sobre los 50m de profundidad en gran parte del día solo  
 16 mostrando una leve profundización entre las 20 y 24h (Figura 26a). Para larvas entre 6-  
 17 10 mm la migración vertical resultó más evidente con máxima probabilidad de  
 18 encuentro en superficie durante la noche (entre las 20 y 8h) y profundización hasta los  
 19 80 m durante el día (Figura 26b). Para larvas grande sobre 10 mm la distribución  
 20 diferenciada entre noche y día se hizo muy clara con una ubicación casi exclusiva en

1 superficie entre las 20 y 8h y una mayor profundización durante el periodo de día,  
 2 alcanzando profundidades modeladas de 90 metros (Figura 26c).

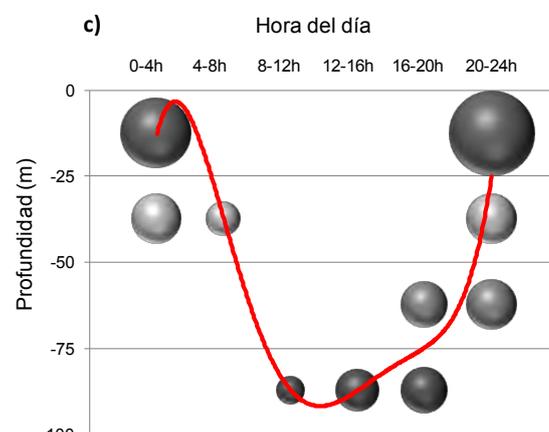
3



4



5

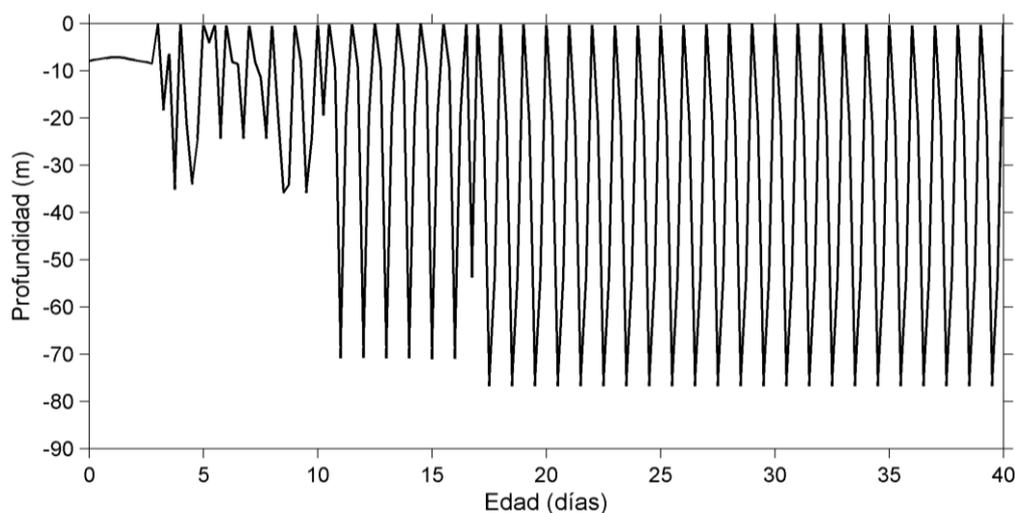


6 Figura 26. Distribución vertical de larvas de jurel por estrato de tamaño desde datos  
 7 observados (burbujas grises, como probabilidad) y esquema de migración diurno-  
 8 nocturna usada en el modelo biofísico (línea roja): a) estrato 2-6 mm; b) estrato 6-10  
 9 mm y; c) sobre 10 mm de longitud total.

10

11 De esta manera, el movimiento vertical de huevos, larvas y juveniles de jurel incluyó  
 12 que la densidad de huevos disminuye ligeramente con el desarrollo y los huevos

1 ascienden ligeramente hacia la superficie con el objeto que permanecieran sobre la  
2 termoclina y esquema de migración diurna nocturna diferenciado por talla (edad) fue  
3 incluido en la modelación biofísica resultando en una extensión vertical creciente a  
4 medida que aumenta la edad (Figura 27). De esta manera, al momento de la eclosión las  
5 larvas midieron 1,5 mm, y hasta la talla de los 2,0 mm realizaron migraciones verticales  
6 el 50% de las veces, la profundidad máxima que alcanzaron fue 37 metros, mientras que  
7 los individuos mayores de 6,0 mm y hasta los 10,0 mm realizaron migraciones  
8 verticales el 100% de las veces, hasta una profundidad de 71 m. Finalmente, individuos  
9 mayores a 10 mm siempre migraron hasta una profundidad de 80 m hasta el final de la  
10 simulación (Figura 27).



11

12 Figura 27. Esquema de movimiento vertical de larvas de jurel como resultado de la  
13 modelación biofísica. Incluye flotabilidad de huevos y migración diferenciada por edad  
14 para larvas y juveniles. El último patrón mostrado se extendió hasta los 120 días, se  
15 muestran los primeros 40 días para efectos gráficos.

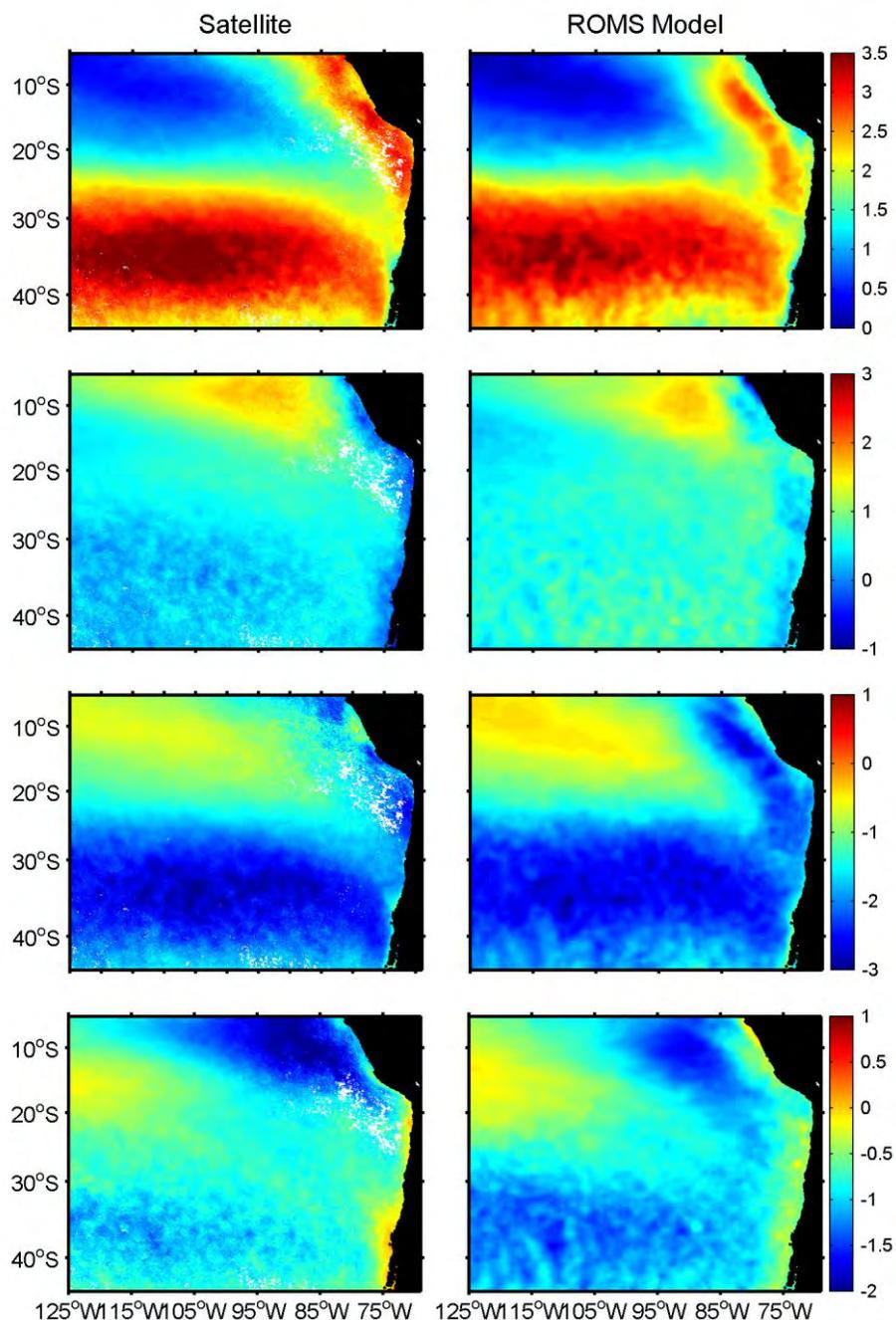
16

## 17 **6.2. Estructura y validación del modelo hidrodinámico**

### 18 **6.2.1. Validación interanual por medio del uso de información satelital**

19 La primera etapa para evaluar el desempeño del modelo hidrodinámico respecto a  
20 observaciones realizadas por satélites involucró el análisis de las señales estacionales,  
21 las cuales fueron definidas como la anomalía desde la señal media a lo largo de todo el  
22 dominio analizado. De esta manera, para explorar el desempeño del modelo ROMS en  
23 la escala interanual se removió la media climatológica mensual desde los datos  
24 observados y modelados de Temperatura superficial del mar (TSM) y Salinidad  
25 superficial del mar (SSM). Primero, en el caso de la TSM el modelo ROMS evidenció

1 una buen desempeño reproduciendo los principales rasgos estacionales a lo largo de  
 2 todo el dominio modelado en el Pacifico suroriental (Figura 28).  
 3

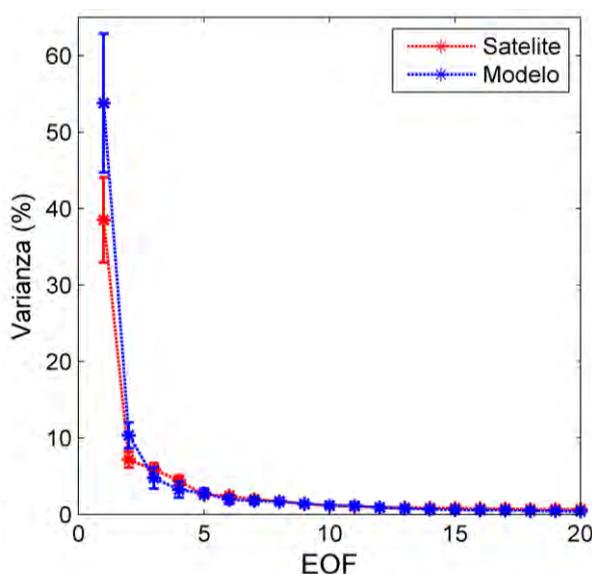


4  
 5 Figura 28. Ciclo estacional de la anomalía de la temperatura superficial del mar para  
 6 datos de satélite Pathfinder (panel izquierdo) y modelo ROMS (panel derecho). Note  
 7 diferentes barras de color. La estaciones desde arriba a abajo: verano, otoño, invierno,  
 8 primavera.  
 9

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

1 Pathfinder periodo 1994-2012, los cuales fueron comparados posteriormente para  
2 cuantificar el desempeño del modelo reproduciendo las principales señales de  
3 variabilidad de esta variable a lo largo del dominio modelado. Los dos primeros modos  
4 de variabilidad para los componentes principales de la TSM explicaron un gran  
5 porcentaje de la varianza (55,8% y 38,9% para datos modelados y observados  
6 respectivamente; Figura 29). Estos dos modos representan rasgos independientes, a  
7 diferencia de los siguientes modos de variabilidad que están ligados a estos modos  
8 superiores.

9



10

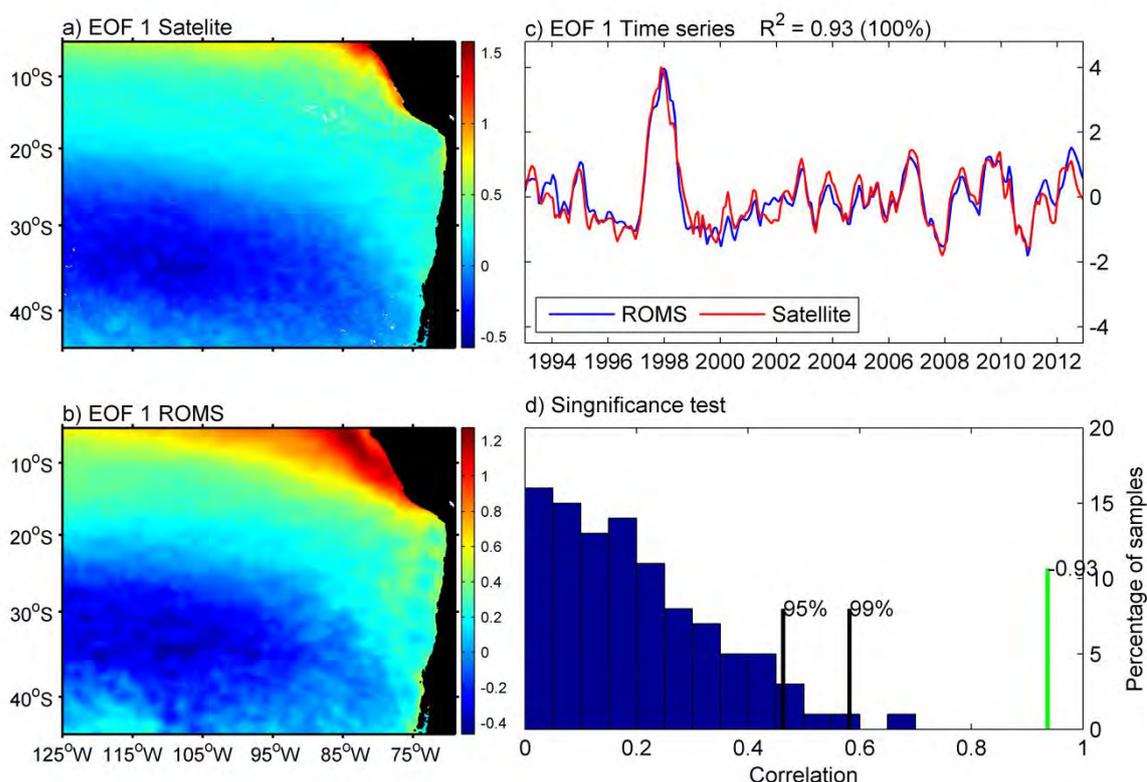
11 Figura 29. Varianza explicada para los primeros veinte modos de variabilidad de los  
12 componentes principales de la Temperatura Superficial del Mar para datos de satélite  
13 Pathfinder (rojo) y modelo ROMS (azul).

14

15 Los dos primeros componentes principales para la TSM en el modelo ROMS fueron  
16 consistentes con las observaciones en su patrón espacial y compartieron una  
17 significativa correlación en su evolución temporal. De esta manera, el primer modo de  
18 variabilidad del componente principal temporal de la TSM mostró un alto y  
19 significativo nivel de correlación entre los datos modelados y observados ( $R^2= 0,93$ ;  
20 Figura 30c, d). La expresión espacial de los datos modelados y observados mostraron  
21 una alta coherencia, reproduciendo los principales rasgos térmicos del dominio  
22 analizado (Figura 30a, b)

23

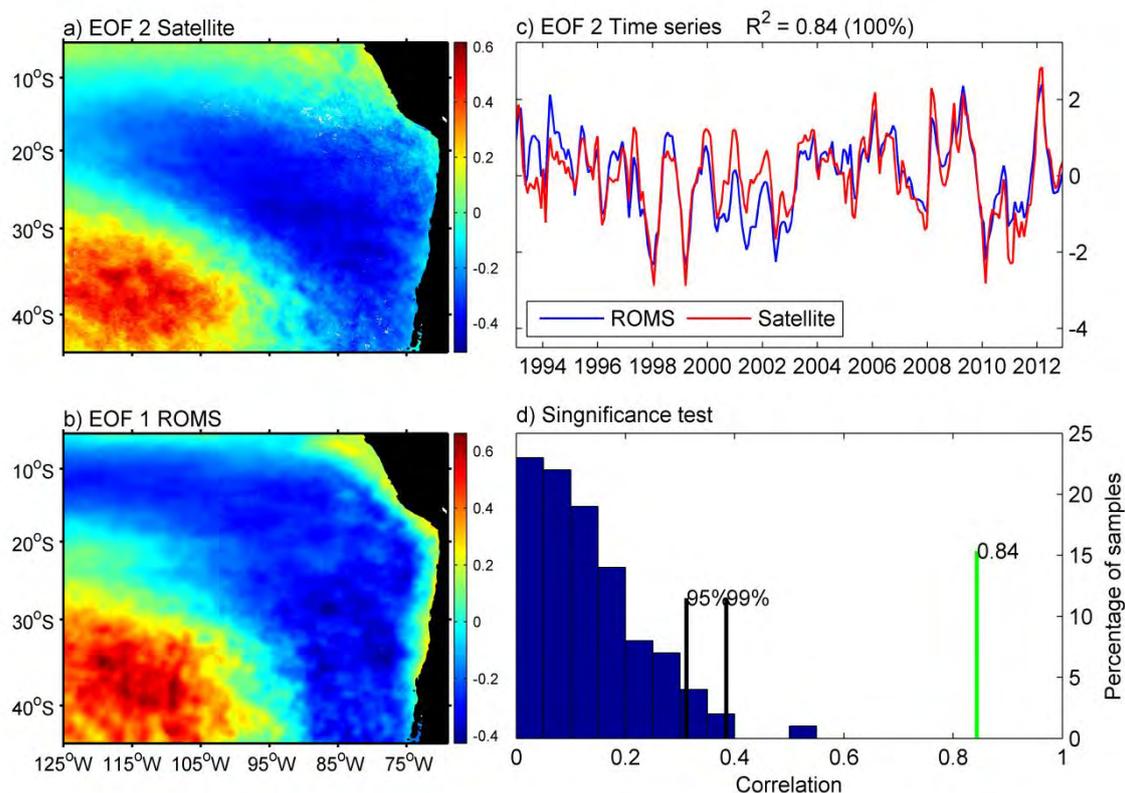
24



1  
 2 Figura 30. FOE del primer modo de variabilidad de la Temperatura superficial del mar.  
 3 Dominio espacial para a) Datos satélite Pathfinder y b) modelo ROMS, c) serie de  
 4 tiempo 1994 – 2012 para datos de satélite y modelo ROMS, d) significancia de la  
 5 correlación entre series de tiempo basada en la función de densidad de probabilidad de  
 6 los coeficientes de correlación cruzada.

7  
 8 Las series de tiempo para el segundo componente principal de la TSM mostraron una  
 9 alta consistencia interanual entre satélite y modelo, con un nivel alto y significativo de  
 10 correlación ( $R^2 = 0,84$ ; Figura 31c, d). Espacialmente, modelo y observaciones  
 11 evidenciaron una alta correlación en la zona oceánica y revelaron algunas diferencias en  
 12 la región costera, lo que podría estar relacionado con la dinámica de la surgencia local  
 13 (Figura 31a, b).

14  
 15

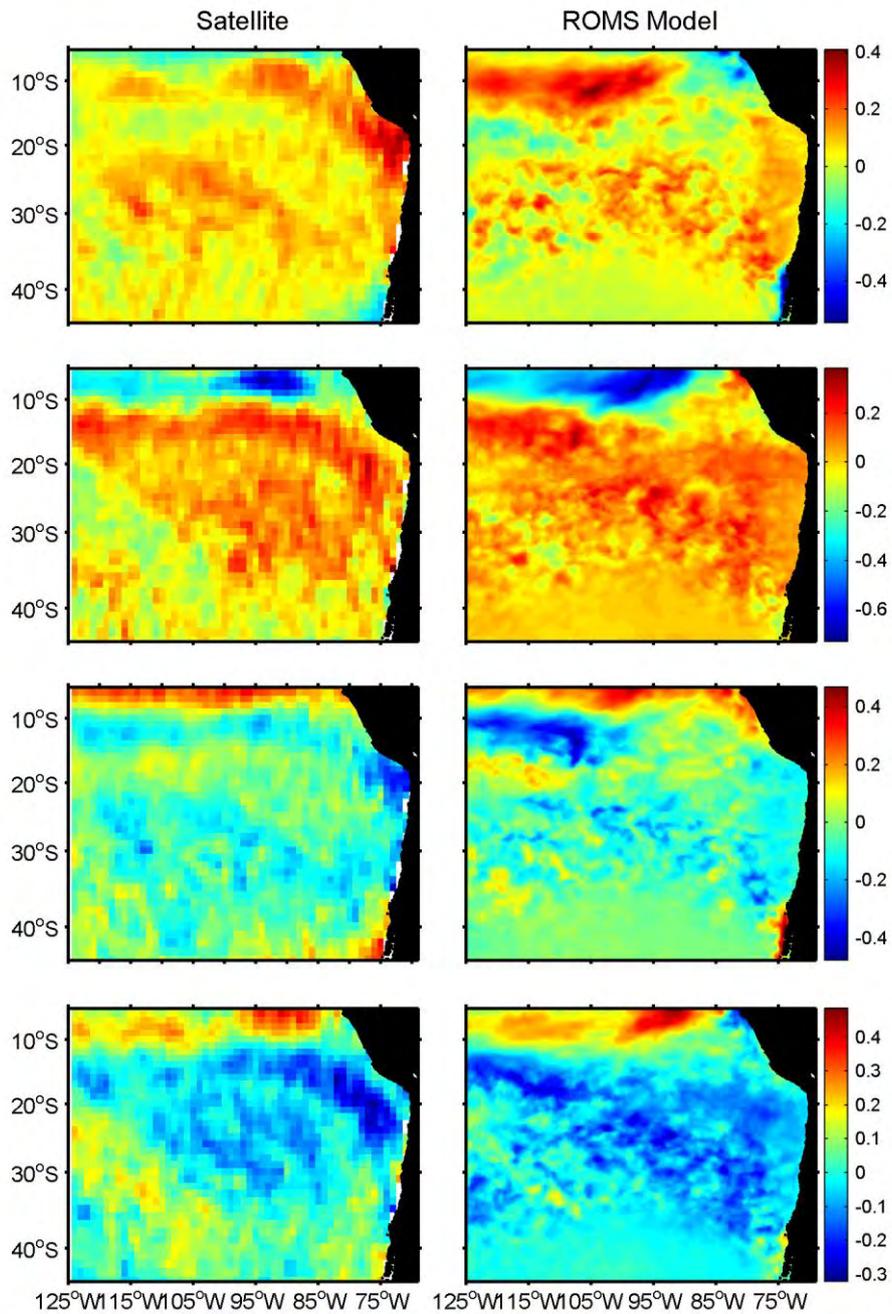


1

2 Figura 31. FOE del segundo modo de variabilidad de la Temperatura superficial del  
 3 mar. Dominio espacial para a) Datos satélite Pathfinder y b) modelo ROMS, c) serie de  
 4 tiempo 1994 – 2012 para datos de satélite y modelo ROMS, d) significancia de la  
 5 correlación entre series de tiempo basada en la función de densidad de probabilidad de  
 6 los coeficientes de correlación cruzada.

7

8 De la misma manera que lo realizado anteriormente, se analizó la señal estacional desde  
 9 la salinidad observada y modelada. Esta comparación evidenció una buen desempeño  
 10 reproduciendo los principales rasgos estacionales a lo largo de todo el dominio  
 11 modelado en el Pacífico suroriental (Figura 32).



1

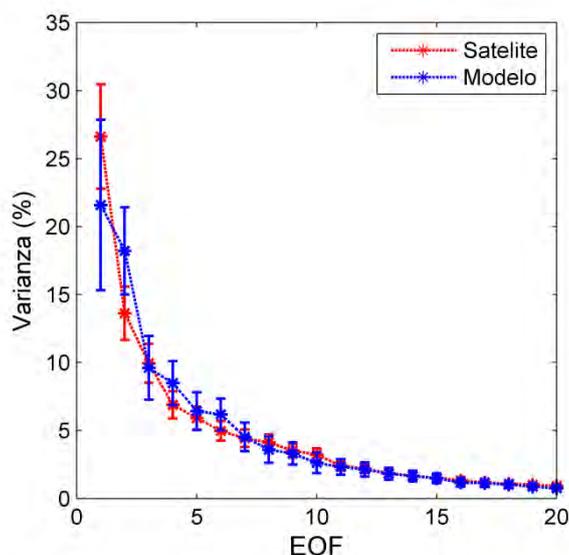
2 Figura 32. Ciclo estacional de la anomalía de la salinidad superficial del mar para datos  
 3 de satélite Aquarius (panel izquierdo) y modelo ROMS (panel derecho). Note diferentes  
 4 barras de color. La estaciones desde arriba a abajo: verano, otoño, invierno, primavera.

5

6

7

1 Los modos de variabilidad espacial y temporal de la SSM fueron calculados en base a  
2 funciones ortogonales empíricas (FOEs) para modelo ROMS y datos de satélite  
3 Aquarius periodo 2011-2014, los cuales fueron comparados posteriormente para  
4 cuantificar el desempeño del modelo reproduciendo las principales señales de  
5 variabilidad de esta variable a lo largo del dominio modelado. Solo el primer modo de  
6 variabilidad mostró independencia respecto a los otros modos analizados, explicando un  
7 27,5 y un 22,8% de varianza para datos observados y modelados respectivamente;  
8 Figura 33).



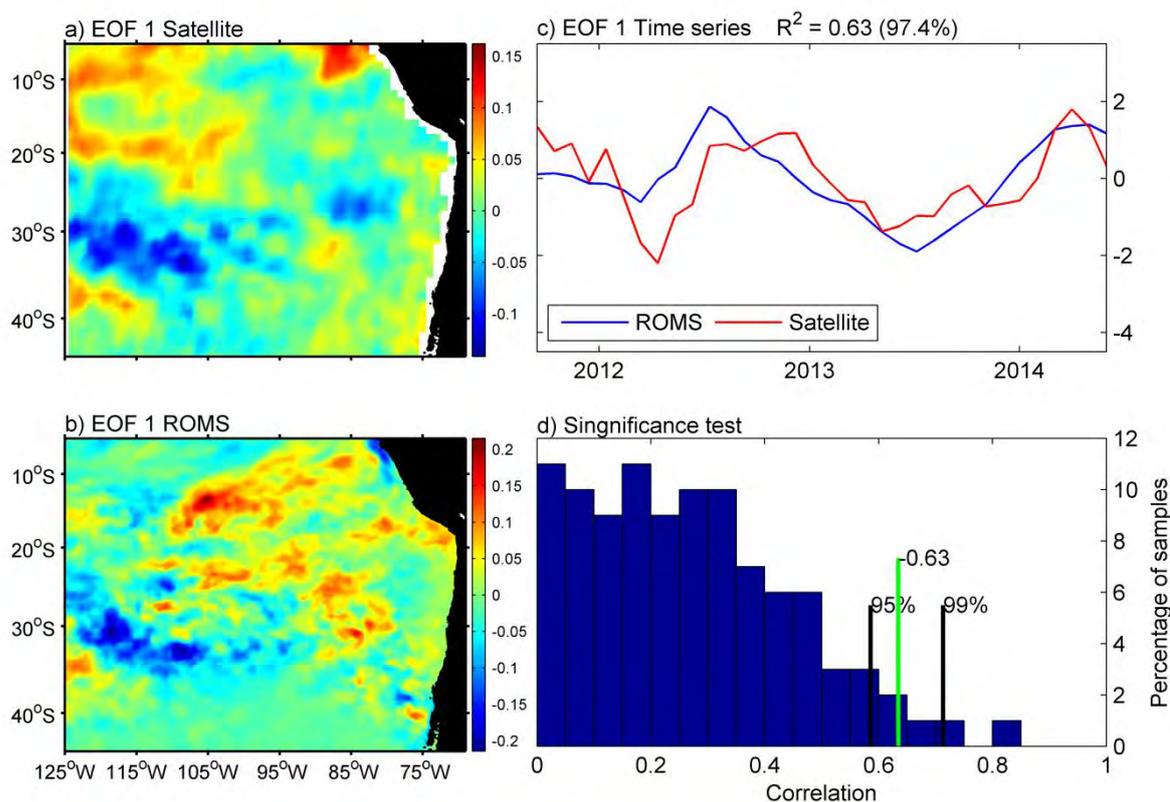
9

10 Figura 33. Varianza explicada para los primeros veinte modos de variabilidad de los  
11 componentes principales de la Salinidad Superficial del Mar para datos de satélite  
12 Aquarius (rojo) y modelo ROMS (azul).

13

14 El primer componente principal de la SSM en el modelo ROMS fueron consistentes con  
15 las observaciones en su patrón espacial y compartieron una alta correspondencia  
16 espacial en gran parte del dominio analizado, no obstante debido a la resolución del  
17 satélite no fue posible establecer esta comparación en el dominio costero. De esta  
18 manera, el primer modo de variabilidad del componente principal temporal de la SSM  
19 mostró un significativo nivel de correlación entre los datos modelados y observados  
20 ( $R^2= 0,63$ ; Figura 34c, d). La expresión espacial de los datos modelados y observados  
21 mostraron una alta coherencia, reproduciendo los principales rasgos salinos del dominio  
22 analizado (Figura 34a, b).

23



1  
2 Figura 34. FOE del primer modo de variabilidad de la Salinidad superficial del mar.  
3 Dominio espacial para a) Datos satélite Aquarius y b) modelo ROMS, c) serie de tiempo  
4 2011 – 2014 para datos de satélite y modelo ROMS, d) significancia de la correlación  
5 entre series de tiempo basada en la función de densidad de probabilidad de los  
6 coeficientes de correlación cruzada.

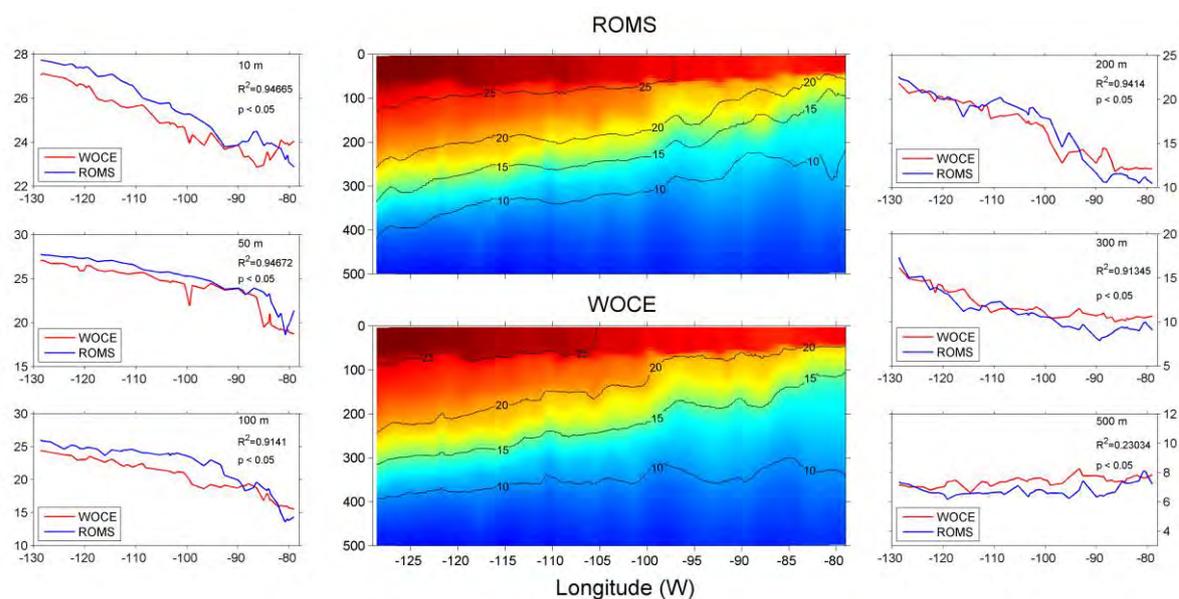
### 8 6.2.2. Validación de la estructura vertical a través del uso de datos in situ

9 A través del uso de información proveniente de perfiladores CTDO desplegados por el  
10 World Ocean Circulation Experiment (WOCE) en dos transectas ubicadas frente a las  
11 costas de Chile y Perú, se realizó un análisis comparativo de la estructura vertical del  
12 modelo ROMS respecto a observaciones locales. Además, el método desarrollado  
13 permitió replicar el crucero en el modelo ROMS por lo que la información tiene la  
14 misma resolución temporal y espacial, estableciéndose el nivel de certeza del modelo  
15 respecto a las masas de aguas predominantes

16  
17 La Figura 35 muestra las secciones de temperatura obtenidas desde ROMS y de las  
18 observaciones para la transecta realizada frente a las costas de Perú, destacándose la  
19 coherencia vertical del modelo en cuanto a la extensión de la capa de mezcla y a los  
20 gradientes entre la costa y el océano. Además, se analizaron series de espacio a 10, 50,  
21 100, 200, 300 y 500 en donde se observó una alta correlación entre modelo y  
22 observación ( $R^2 > 0,9$ ; en la mayoría de los casos) demostrando que el modelo replicó

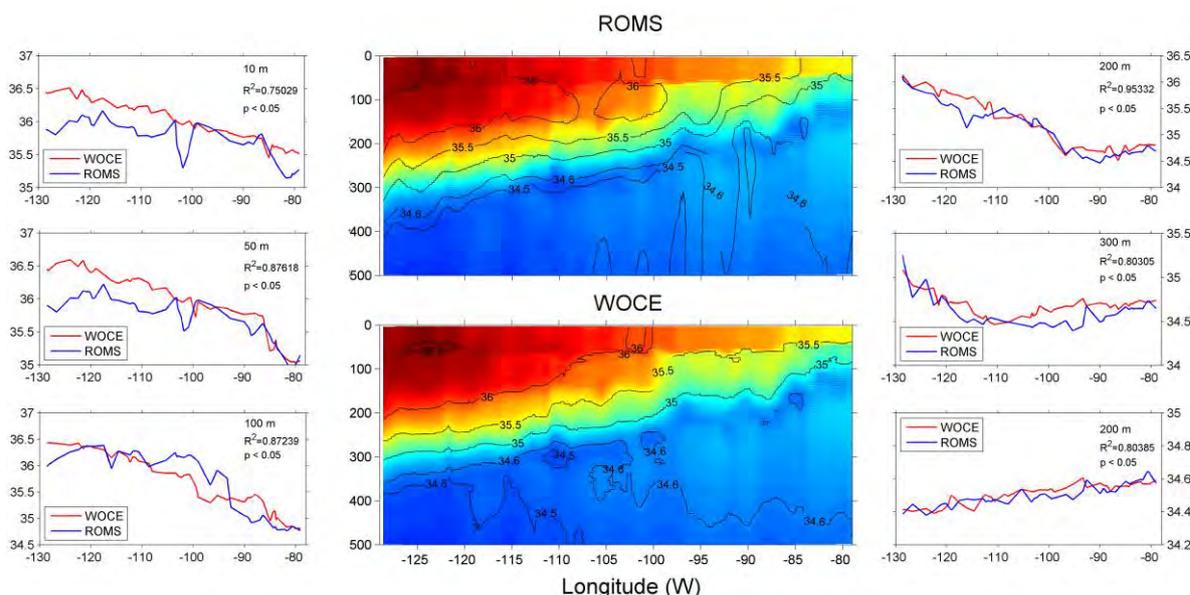
1 eficientemente la estructura de la columna de agua en distintas profundidades. No  
 2 obstante a estos buenos resultados, el modelo ROMS muestra una tendencia leve a  
 3 sobreestimar la temperatura en esta zona del océano en aproximadamente 0,5°C, lo que  
 4 fue especialmente valido para los primeros 200 metros de profundidad. En el caso de la  
 5 salinidad, se obtuvo un escenario muy similar con un alto nivel de precisión ( $R^2 > 0,85$ ;  
 6 en la mayoría de los casos) del modelo respecto a las observaciones, replicando el  
 7 gradiente con menor salinidad costa afuera y un ascenso de las isohalinas hacia el sector  
 8 costero, probablemente asociado a la dinámica de surgencia. Sin embargo, el análisis de  
 9 series mostró una leve tendencia a subestimar la salinidad por parte del ROMS en esta  
 10 zona del océano en aproximadamente 0,5 psu principalmente en los primeros 100  
 11 metros de la columna de agua (Figura 36).

12



13

14 Figura 35. Análisis de la estructura vertical de la temperatura en el modelo ROMS  
 15 respecto a observaciones *in situ* realizadas por el crucero WOCE frente a las costas de  
 16 Perú (16°45'S).

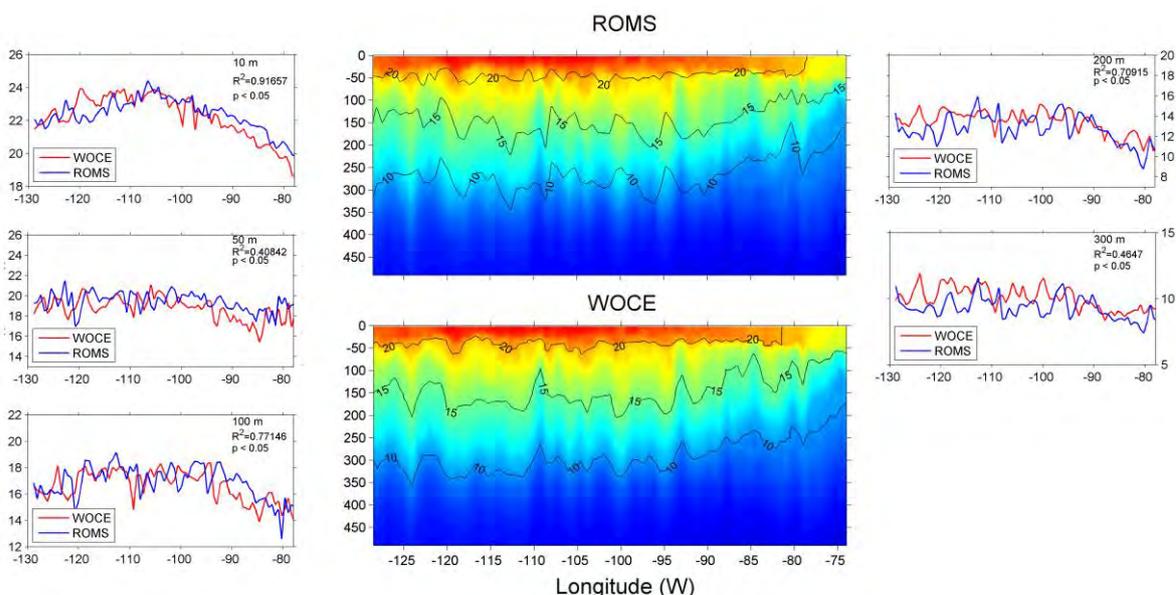


1

2 Figura 36. Análisis de la estructura vertical de la salinidad en el modelo ROMS respecto  
 3 a observaciones *in situ* realizadas por el crucero WOCE frente a las costas de Perú  
 4 (16°45'S).

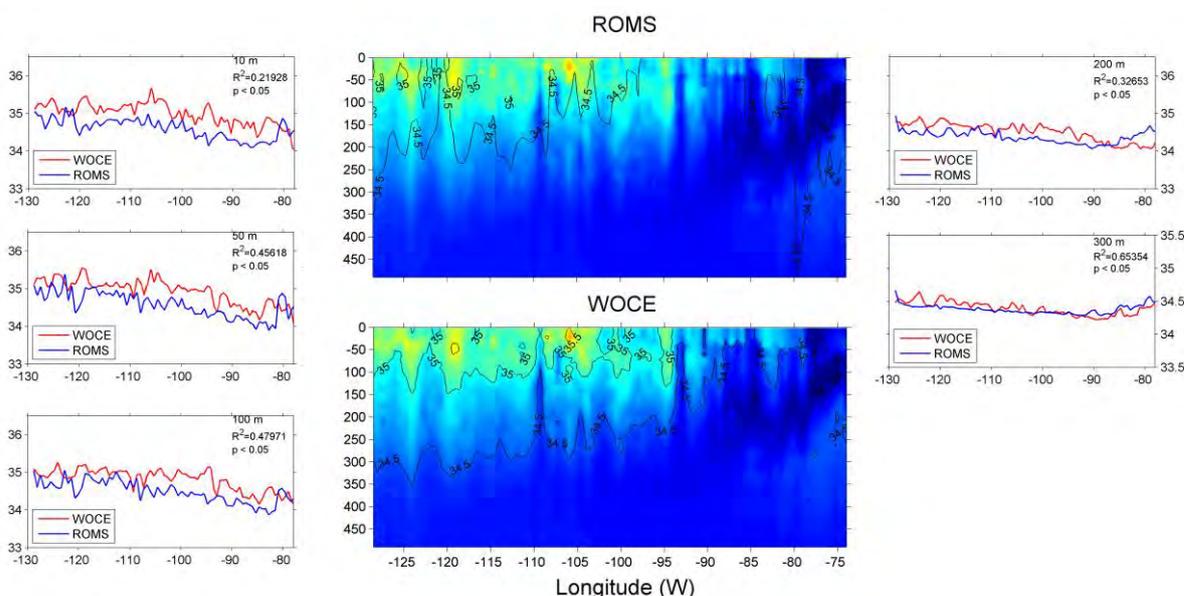
5

6 La Figura 37 muestra las secciones de temperatura obtenidas desde ROMS y de las  
 7 observaciones para la transecta realizada frente a las costas de Chile, destacándose la  
 8 coherencia vertical del modelo en cuanto a la extensión de la capa de mezcla y a los  
 9 gradientes entre la costa y el océano en todas las profundidades analizadas, en donde se  
 10 observó una alta correlación entre modelo y observación ( $R^2 > 0,6$ ; en la mayoría de los  
 11 casos) demostrando que el modelo replica eficientemente la estructura de la columna de  
 12 agua. A diferencia de la transecta anterior, no se observó un patrón claro de  
 13 sobrestimación siendo ROMS altamente efectivo en la magnitud térmica. En el caso de  
 14 la salinidad, se obtuvo un escenario muy similar con un alto nivel de certeza del modelo  
 15 respecto a las observaciones, replicando el gradiente con mayor salinidad costa afuera y  
 16 un ascenso de las isohalinas hacia el sector costero, probablemente asociado a la  
 17 dinámica de surgencia. Al igual que la transecta anteriormente analizada, se obtuvo una  
 18 leve tendencia a subestimar la salinidad por parte del ROMS en esta zona del océano en  
 19 aproximadamente 0,5 psu principalmente en los primeros 100 metros de la columna de  
 20 agua (Figura 38).



1

2 Figura 37. Análisis de la estructura vertical de la temperatura en el modelo ROMS  
 3 respecto a observaciones in situ realizadas por el crucero WOCE frente a las costas de Chile  
 4 (32°30'S).



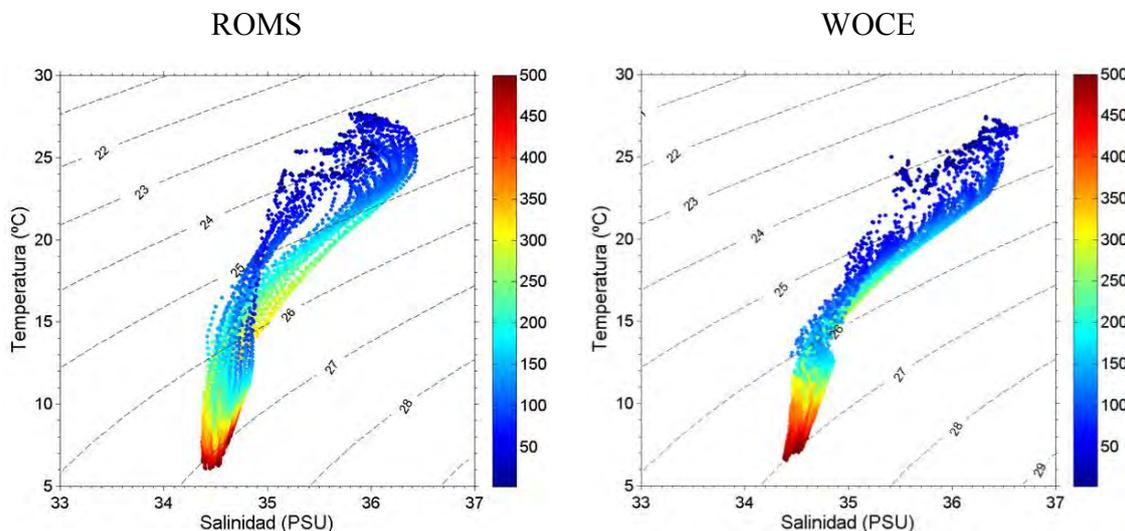
5

6 Figura 38. Análisis de la estructura vertical de la salinidad en el modelo ROMS  
 7 a observaciones in situ realizadas por el crucero WOCE frente a las costas de Chile  
 8 (32°30'S).

9

10 La Figura 39 muestra los diagramas TS para el modelo ROMS y CTD en la transecta  
 11 realizada frente a Perú, los cuales muestran que el modelo reprodujo consistentemente  
 12 las masas de agua, no obstante tendió a sobreestimar levemente la influencia de las más  
 13 dulces en superficie, las cuales pueden deberse a efectos locales que no replica el

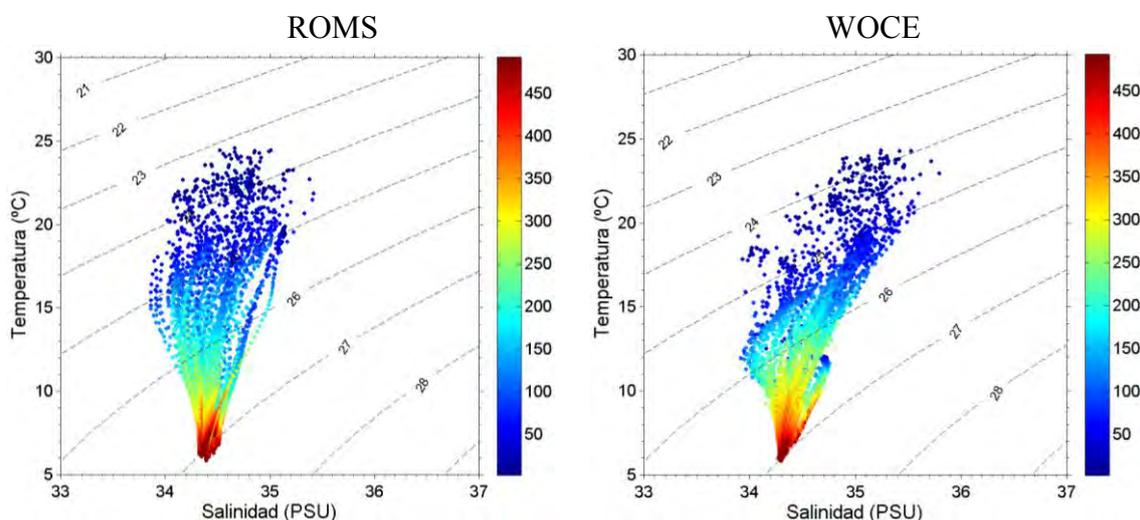
1 modelo. La Figura 40 muestra los resultado del mismo análisis para la transecta  
 2 realizada frente a Chile central mostrando una alta coherencia en replicar la presencia de  
 3 las distintas masas de agua en todas las profundidades.



6

7

8 Figura 39. Diagrama TS obtenido desde datos oceanográficos CTD (izquierda) y  
 9 modelo ROMS (derecha) para la transecta realizada frente a Perú (16°45'S).



13

14 Figura 40. Diagrama TS obtenido desde datos oceanográficos CTD (izquierda) y  
 15 modelo ROMS (derecha) para la transecta realizada frente a Chile (32°30'S).

16

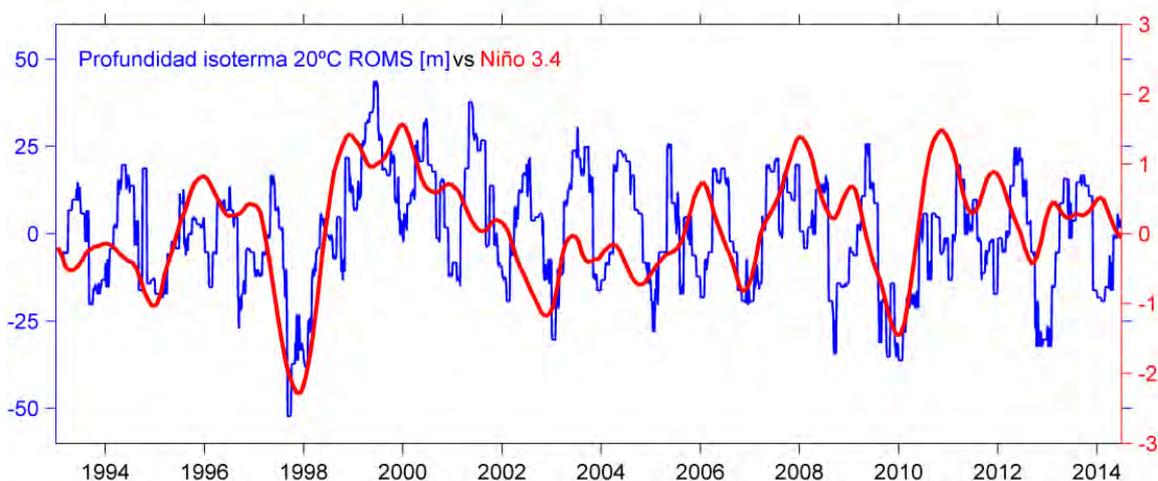
17

18 **6.2.3. El Niño Oscilación del Sur**

19 Se analizó la capacidad del modelo hidrodinámico respecto de reproducir una de las  
 20 señales más características y críticas el Pacífico suroriental: El Niño. Para analizar si el  
 21 modelo captura la variabilidad ecuatorial se comparó la anomalía de la profundidad de

1 la isoterma de 20°C a los 105°W, 5°S respecto al índice el Niño 3.4. Además, se analizó  
2 la extensión de la señal de este evento a través de la señal de la temperatura superficial  
3 del mar en los primeros 50 km de la franja costera desde los 5°S hasta los 40°S. En  
4 primer lugar la anomalía de la profundización de la isoterma de 20°C en el ROMS  
5 mostró un buen nivel de correlación respecto al índice El Niño 3.4., principalmente en  
6 los periodos extremos (1997-1998; 2009-2010) denotando una alta capacidad de replicar  
7 eventos disruptivos del sistema en el Pacífico suroriental. En periodos de escenarios  
8 "normales" el modelo mostró un comportamiento más errático, pero manteniéndose  
9 muy cerca de la señal media (Figura 41).

10



11

12 Figura 41. Relación entre las series de tiempo de la anomalía de la profundidad de la  
13 isoterma de 20°C y la señal de El Niño en la región ecuatorial 3.4.

14

15 Por otra parte, al analizar la extensión meridional de las anomalías térmicas, se observó  
16 que el modelo ROMS replicó adecuadamente los cambios estacionales e interanuales en  
17 esta variable. Los principales rasgos que el modelo reprodujo son la extensión de las  
18 anomalías positivas hasta aproximadamente los 15°S incluyendo el aumento de las  
19 anomalías en la región del codo de Arica, la propagación del evento El Niño 1997-1998  
20 caracterizado por fuertes anomalías positivas desde el Ecuador, la manifestación del  
21 enfriamiento extremo ocurrido en la zona centro-sur de Chile durante 2007 el cual se  
22 extendió al norte hasta los 20°S (Figura 42).

23

24

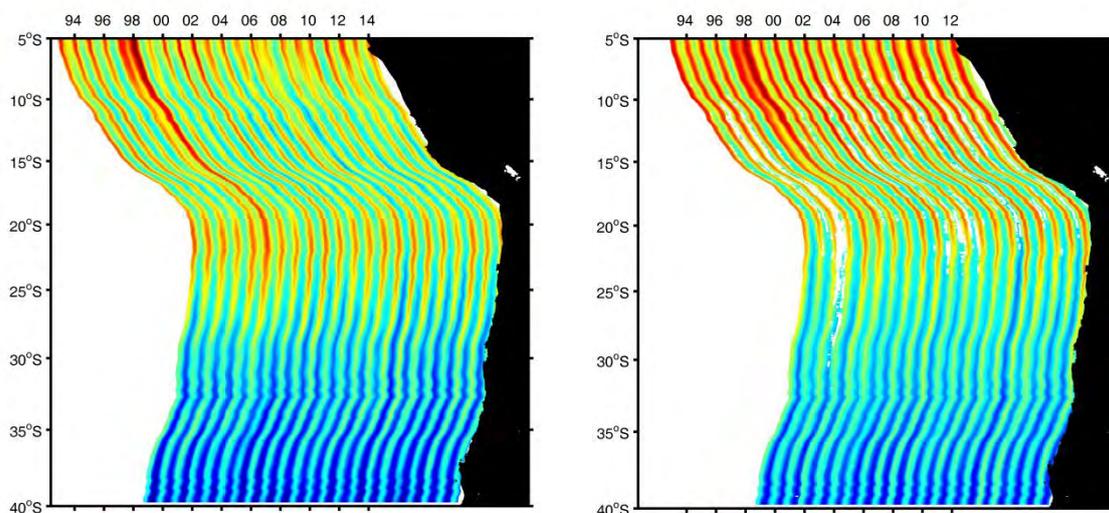
25

26

1

ROMS

Satélite



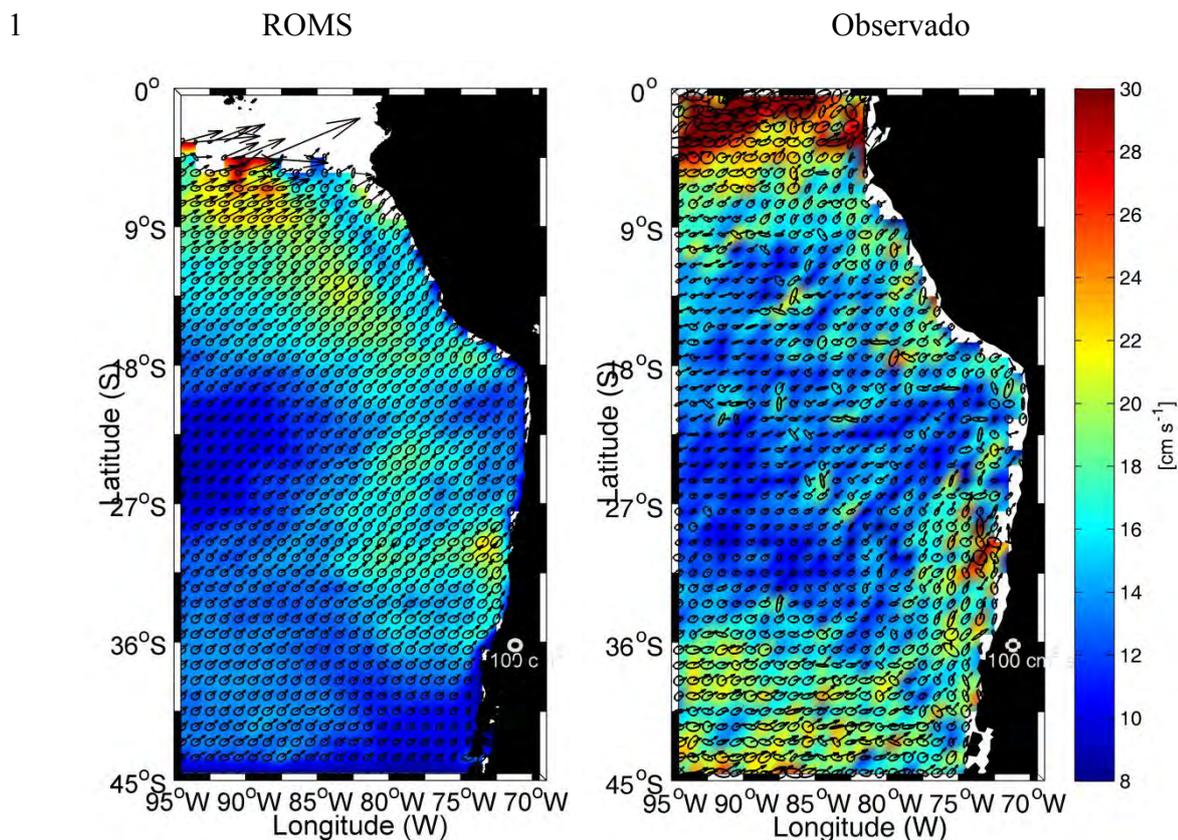
2

3 Figura 42. Extensión meridional de las anomalías térmicas en la primera franja del  
 4 océano desde una perspectiva interanual para el modelo ROMS (izquierda) y satélite  
 5 Pathfinder (derecha).

6

#### 7 **6.2.4. Patrón de circulación superficial general**

8 Finalmente, el promedio de la circulación de las corrientes fue inferido desde la  
 9 trayectorias de derivadores superficiales observados y modelados. la Figura 43 muestra  
 10 una descripción detallada de estas corrientes en términos de velocidad, dirección y  
 11 magnitud en un área amplia que involucra las áreas de desove y crianza del jurel en el  
 12 Pacífico suroriental. En modelo y observación se identificó un patrón superficial  
 13 predominantemente en dirección Este con un incremento progresivo de las velocidades  
 14 desde el sur de los 35°S y desde los 80°W hacia la costa, con un máxima en torno a los  
 15 45°S. En el área costera, modelo y observación mostraron una dirección  
 16 predominantemente norte con velocidades que se incrementan desde el 37°S al norte.  
 17 Estos resultados señalaron una alta coherencia del patrón de transporte del modelo  
 18 ROMS, que en conjunto con los otros resultados de modelación, proporcionaron un  
 19 modelo altamente confiable para el desarrollo del modelo biofísico del jurel en el  
 20 pacífico suroriental (Figura 43).



6 **Figura 43.** Velocidades superficiales (en cm/s) y elipses de varianza de la velocidad  
 7 obtenidas desde derivadores modelados (izquierda) y observados (derecha).

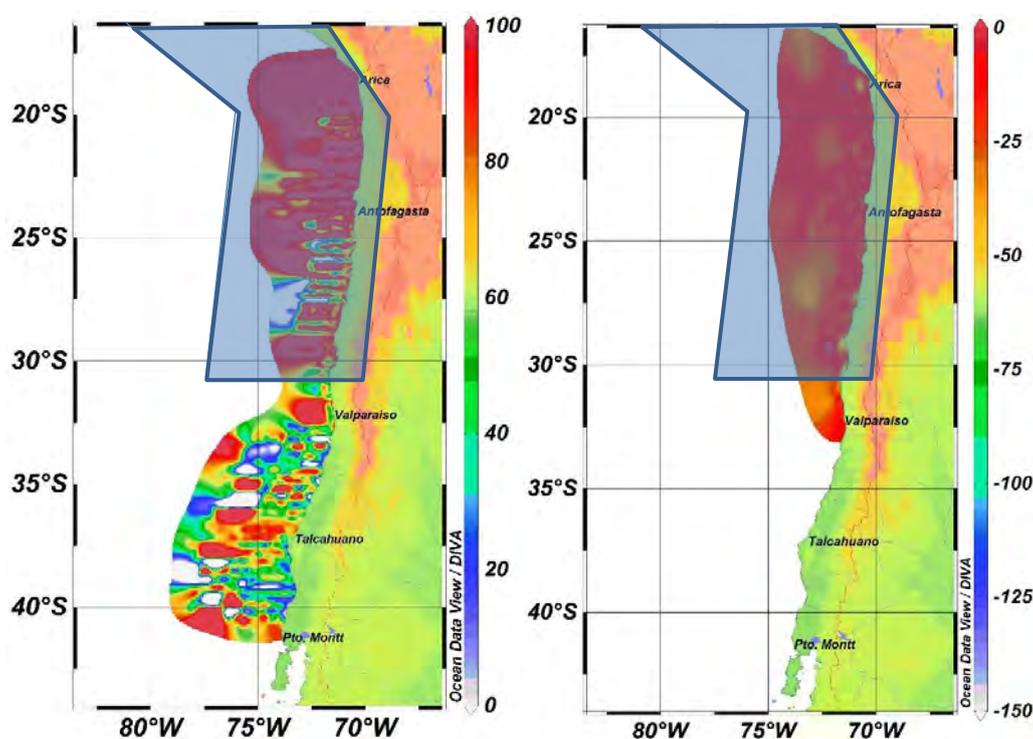
### 8 **6.3. Zonas de crianza/reclutamiento en Chile Perú a partir de la modelación** 9 **biofísica**

10 A través de los resultados de la modelación biofísica, fue posible establecer la  
 11 conectividad entre las distintas zonas de desove y el área de crianza modelada que se  
 12 extiende entre la costa y los 600 km costa afuera y entre los 15° y 30°S con individuos  
 13 conectados a lo largo de toda el área de crianza/reclutamiento (ver Anexos, I, II y III  
 14 panel derecho). Para confirmar que el área de reclutamiento modelada corresponda a un  
 15 área de crianza de jurel, se analizó la información de registros acústicos de reclutas  
 16 disponibles para Chile norte y centro sur.

17 Los reclutas de jurel en la serie de los años 1994 a 2013 (Figura 44, izquierda)  
 18 presentaron un marcado patrón de distribución hacia la zona norte de Chile,  
 19 preferentemente desde el paralelo 25°S hacia el norte del área de estudio,  
 20 principalmente asociados al sector costero. En la parte sur del área analizada, se

1 observaron pequeños parches de distribución de reclutas, asociados a longitudes más  
 2 oceánicas, sin presentar un claro patrón de distribución. Se observó que la profundidad  
 3 media de los cardúmenes de jurel presentó una distribución asociada a los primeros 25  
 4 metros de profundidad, en la zona costera principalmente, profundizándose a medida  
 5 que avanza hacia el oeste en algunos sectores, llegando a profundidades entre 50 y 75  
 6 metros (Figura 44, panel derecha). Latitudinalmente se apreció una profundización  
 7 hacia el sur, alcanzando profundidades entre los 125 y 135 m entre los 29° y 30°S. Al  
 8 asociar la distribución espacial de los reclutas con la distribución batimétrica de los  
 9 mismos, se observó una profundización de los cardúmenes asociada a una menor  
 10 cantidad de reclutas (Figura 44).

11



12

13 Figura 44. Distribución espacial de los reclutas de jurel observados mediante cruceros  
 14 acústicos (izquierda) y de profundidad media de las agregaciones de reclutas (derecha).  
 15 El polígono corresponde al área de crianza definida en el esquema de modelación  
 16 biofísica.

17

18 La distribución de la densidad acústica de jurel, registrada en los cruceros de evaluación  
 19 realizados en Chile durante los últimos 20 años, mostró un patrón general de  
 20 distribución con reclutas de jurel ubicados principalmente entre el límite norte de Chile  
 21 (18°30' S) y los 25°00' S, sin embargo, en el crucero FIP98-11 se observó una  
 22 distribución más austral, esto se podría asociar al evento del niño ocurrido en los años

- 1 1997-1998, que en este caso, como consecuencia, produjo la aparición de juveniles
- 2 entre los 35°00' y 40°00'S (Figura 45).

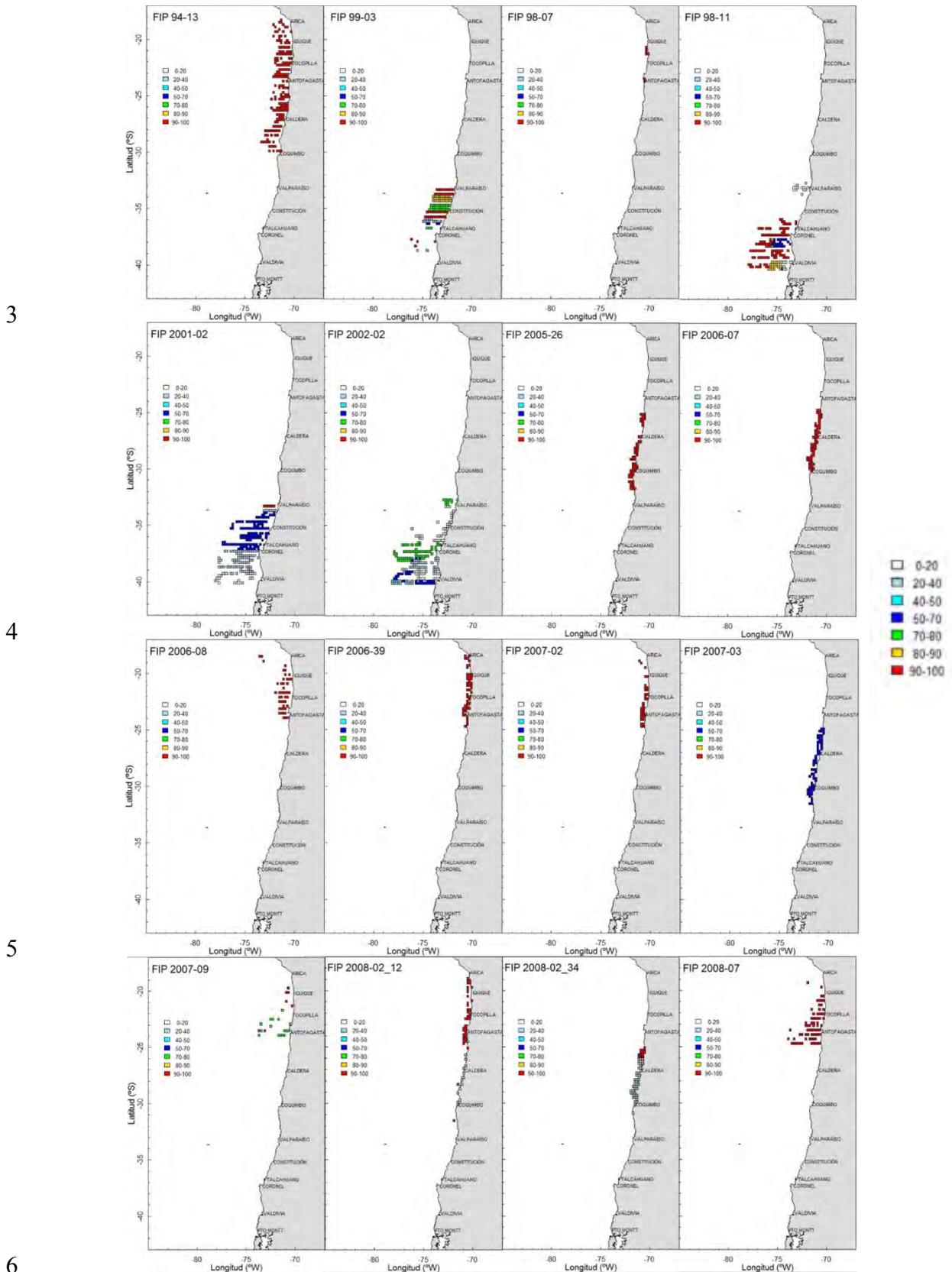


Figura 45. Distribución espacial de juel por año, serie 1994 a 2013.

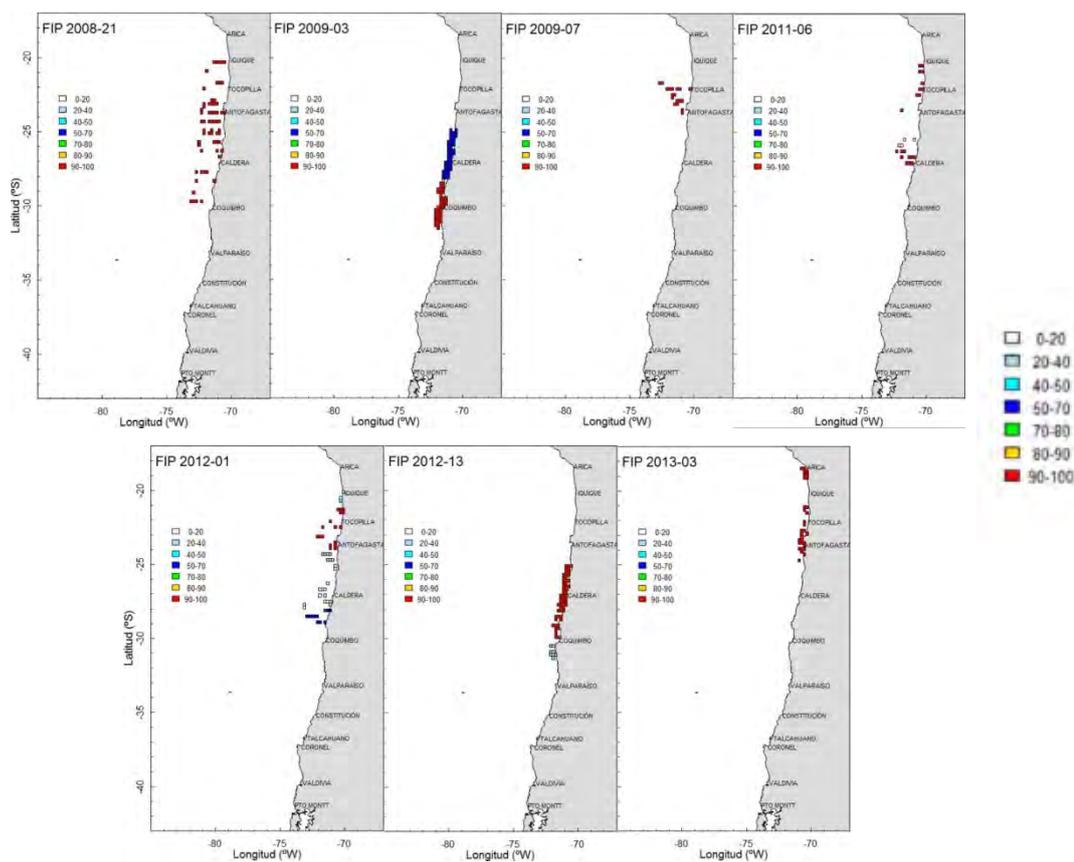
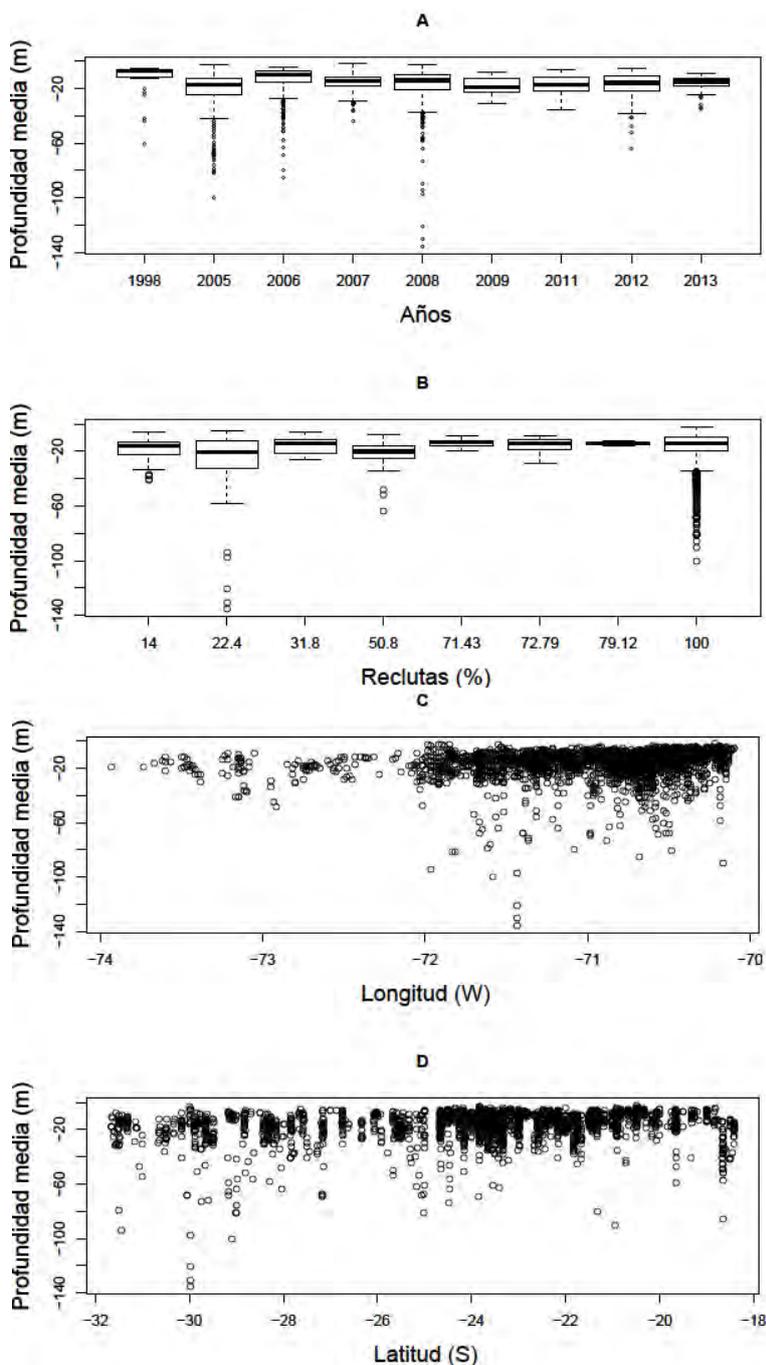


Figura 45 (continuación). Distribución espacial de jurel por año, serie 1994 a 2013.

La profundidad media de los cardúmenes de jurel, en los años que se tuvo información al respecto, mostró una distribución somera, asociada principalmente a los primeros 25 m, con un rango de profundidad que varió entre los 2 y 140 m, éstos máximos y mínimos se observan en los años 2008 y 1998 respectivamente, este último, sin superar los 15 m (Figura 46a). En la Figura 46b se observa que los cardúmenes con menor porcentaje de reclutas estuvieron asociados a mayores profundidades, por su parte en la Figura 46a se da cuenta que los cardúmenes de jurel sobrepasan los 80 metros de profundidad entre los 71° y 72° W, mientras que en latitud, se observa una profundización del recurso a medida que se desplaza hacia el sur (Figura 46d).



1

2

3 Figura 46. a) profundidades medias por año; b) porcentaje de reclutas; c) longitud oeste  
4 y; d) latitud sur en los años analizados.

5

## 6 **6.4. Variables oceanográficas/biológicas que actúan como forzantes del transporte** 7 **de huevos, larvas y juveniles de jurel**

### 8 **6.4.1. Caracterización oceanográfica en la región Suroriental del Pacífico**

9 Los principales parámetros oceanográficos que definen la dinámica estacional e  
10 interanual en la región de estudio fueron: la temperatura superficial del mar

1 (información satelital), las corrientes debidas al esfuerzo del viento (Ekman), las  
2 corrientes debidas a la rotación terrestre (geostróficas), la turbulencia vertical debida al  
3 viento, y el transporte. En términos atmosféricos, la variable principal fue el esfuerzo  
4 del viento sobre la superficie del océano. La dinámica conjunta de estas variables y  
5 forzantes, tienen efecto sobre la variabilidad espacial y temporal del hábitat de desove  
6 de jurel, situado principalmente en la región oceánica (más allá de la ZTC) frente a  
7 Chile central (32°-40°S), así como sobre la variabilidad espacial y temporal de la región  
8 de reclutamiento de juveniles situada principalmente en la región más costera del norte  
9 de Chile y el Perú (centro-sur). A continuación, se analizaron las variables precitadas en  
10 ambas regiones de interés (región oceánica de desove y región costera de  
11 reclutamiento), evidenciándolas como los principales responsables de la variabilidad  
12 ambiental en los primeros 50-100 metros de la columna de agua en éstas regiones. Los  
13 resultados asociados a análisis climatológicos y estadísticos FOE son presentados en el  
14 Anexo IV, para propósitos de continuidad del capítulo (Figuras con prefijo A1)

#### 16 *6.4.1.1. Variabilidad espacio-temporal de la TSM, el esfuerzo del viento y la* 17 *turbulencia*

##### 19 *Temperatura superficial del mar*

20 La climatología mensual de la temperatura superficial del mar (Figura A1-1), muestra la  
21 distribución espacial de las isotermas en el sector oriental del Pacífico Sur. Se observó  
22 la mayor deflexión (hacia el NE) de los contornos de las isotermas durante los meses de  
23 primavera y verano. Durante este periodo se verificó una lengua cálida atrapada a la  
24 costa del Perú la que queda retenida en la zona de la curvatura entre Perú y Chile. Esta  
25 lengua cálida fue desplazada en una delgada franja hacia la zona oceánica producto de  
26 procesos de surgencia. Además, se observó una lengua fría oceánica que desplaza en  
27 sentido contrario a la lengua cálida costera.

29 En la región sur, se observó un comportamiento similar para el periodo de primavera-  
30 verano, donde se observó una lengua fría atrapada a la costa y una lengua cálida  
31 oceánica que se desplaza hacia el sur. En cambio, en los meses de invierno destacó una  
32 distribución espacial ordenada gradualmente y una disminución de los gradientes  
33 térmicos con respecto a lo observado en primavera-verano. Paralelamente, y con el fin

1 de examinar la variabilidad espacio temporal de los mapas de TSM, se aplicaron las  
2 Funciones Empíricas Ortogonales (FEO), cuya aplicación sólo depende de  
3 consideraciones estadísticas (Barnet & Patzert 1980; Kelly 1985). Las FEOs  
4 permitieron cuantificar la varianza total en modos ortogonales o independientes entre sí.  
5 De esta manera se obtuvieron los modos que contienen el mayor porcentaje de la  
6 varianza, que representan a las señales dominantes en la región de estudio, quedando los  
7 modos inferiores las contribuciones asociadas con otro tipo de procesos o escalas. El  
8 primer modo rescató el 98,2% de la varianza total, donde la estructura espacial (Figura  
9 A1-2a) rescató la compleja dinámica de la región norte, evidenciando la angosta franja  
10 de bajas amplitudes asociadas a procesos de surgencia frente a la costa del Perú, además  
11 de la lengua cálida costera culminando su desplazamiento en la zona de la curvatura  
12 Perú-Chile. Asimismo, se destacó la intrusión de una lengua fría oceánica proveniente  
13 desde el sur que defleca suavemente las amplitudes hacia el NW, lo que también se  
14 observó hacia el sur. Por otro lado, la variabilidad temporal (Figura A1-2b) muestra un  
15 carácter oscilante, rescatando un comportamiento estacional.

16  
17 Aunque el segundo y tercer modo explicaron una varianza muy pequeña, ya que  
18 rescataron aproximadamente 1,1% de la varianza total (Figuras A1-3, 4), las estructuras  
19 espaciales mostraron resultados muy importantes. La estructura espacial del segundo  
20 modo (Figura A1-3a) mostró las lenguas cálida (costera) y fría (oceánica) observada en  
21 la climatología (Figura 53) y modulada por un comportamiento claramente estacional  
22 (Figura A1-3b). En cambio, la variabilidad temporal del tercer modo (Figura A1-4b)  
23 mostró claramente la señal interanual, destacando los dos eventos más cálidos de la  
24 serie asociados a El Niño 1982-1983 y 1997-1998. De igual forma, la estructura  
25 espacial (Figura A1-4a) mostró la lengua costera de mayores amplitudes provenientes  
26 de la región ecuatorial. Además, como la serie temporal es oscilante (pasa de + a -)  
27 produjo cambios en las amplitudes en la estructura espacial, entrando en fase fría  
28 asociada el evento de La Niña.

29

### 30 *Esfuerzo del viento*

31 Se observó en la climatología (Figura A1-5) la bifurcación de los vientos del oeste  
32 (~40°S) desde enero a abril, la que se bifurcó en una rama hacia el polo y otra rama más  
33 grande hacia la región norte. Destacó un núcleo intenso apegado a la costa (~38-40°S

1 hacia el norte) que se desplazó en un intenso flujo hacia el NW despegándose de la  
2 curvatura del norte de Chile. En los meses de mayo a septiembre en la región sur,  
3 desapareció la rama sur, en cambio, la rama norte se intensificó. En los meses de  
4 primavera, el esfuerzo del viento retomó el comportamiento observado en los meses de  
5 verano.

6  
7 Las Funciones Empíricas Ortogonales Complejas (FEOC) del esfuerzo del viento,  
8 mostraron que el primer modo rescató el 88% de la variabilidad total. La estructura  
9 espacial (Figura A1-6a) sintetiza claramente el patrón de circulación observado en la  
10 climatología, donde la bifurcación de los vientos oeste se encontró centrada en los  
11  $\sim 40^{\circ}\text{S}$  y el flujo hacia el norte fue muy robusto en comparación a la rama sur. Se rescató  
12 además, que en la zona de la curvatura del norte de Chile, el flujo NW se debilita,  
13 similar comportamiento se observó en región costera norte del Perú. La estructura  
14 temporal (Figura A1-6b) no mostró un comportamiento estacional definido dado la gran  
15 cobertura espacial del esfuerzo del viento. El segundo modo explicó el 6% de la  
16 varianza total y la estructura espacial (Figura A1-7a) mostró la zona de mayor  
17 variabilidad. La variabilidad temporal (Figura A1-7b) es una señal estacional y  
18 oscilatoria, lo que explicaría la alta variabilidad de la estructura espacial.

#### 19 *Turbulencia asociada al esfuerzo del viento*

20  
21 La climatología de la turbulencia por efecto del viento mostró que los periodos de  
22 mayor turbulencia en el océano ocurrieron en la zona central y norte en otoño e invierno  
23 (Figura A1-8) y decayeron en los meses de primavera y verano. Estos resultados fueron  
24 coherentes con lo que mostraron la climatología y FEOC del esfuerzo del viento. Los  
25 tres primeros modos de las FEOs de la turbulencia explicaron el 83% de la varianza  
26 total (Figura A1-9). La estructura espacial del primer modo (Figura A1-9a) explicó el  
27 56% de la varianza total y rescató las zonas de mayor turbulencia observados en la  
28 climatología y cuyo comportamiento fue estacional de acuerdo a los mostrado por la  
29 variabilidad temporal (Figura A1-9d, contorno rojo). El segundo modo explicó el 20%  
30 de la variabilidad total (Figura A1-9b) que osciló estacionalmente de acuerdo a la  
31 variabilidad temporal (Figura A1-9d, contorno azul) que moduló la estructura espacial  
32 (Figura A1-9b). Finalmente, el tercer modo explicó el 7% de la varianza total y la  
33 estructura espacial rescató el núcleo de mayor amplitud apegada a la región costera

1 (centrado  $\sim 35^{\circ}\text{S}$ ) y la cual osciló de acuerdo a la estructura temporal (Figura A1-9d,  
2 contorno negro).

#### 3 4 6.4.1.2. Variabilidad de la velocidad del transporte de Ekman

5 Se analizó la dinámica de las velocidades zonales y meridionales del transporte de  
6 Ekman en los estratos de 0, 20 y 50 metros de profundidad, donde se han encontrado las  
7 mayores densidades de larvas, post-larvas y juveniles de jurel (Sepúlveda *et al.* 2007,  
8 Vásquez *et al.*, 2013), tanto en la región oceánica de desove frente a Chile central, como  
9 en la región de reclutamiento situada en el margen costero del norte de Chile y centro-  
10 sur de Perú.

#### 11 Estrato superficial

12 El transporte de Ekman en términos de las velocidades superficiales, mostró el flujo que  
13 deriva hacia la costa a través de la climatología (Figura A1-10). Durante las estaciones  
14 de otoño e invierno, las máximas velocidades se encontraron en la región norte y más  
15 oceánica y se debilitaron hacia la costa. En cambio, en primavera y verano las  
16 velocidades asociadas al transporte fueron más bajas.

17 El primer modo de las Funciones Empíricas Ortogonales Complejas (FEOC), que  
18 explicó el 87% de la varianza total y la estructura espacial mostró que las máximas  
19 amplitudes se ubicaron en la región norte y decayeron hacia la costa (Figura A1-11a),  
20 destacando las zonas costera del Perú y la curvatura del continente. Por otro lado, la  
21 variabilidad temporal mostró las máximas amplitudes en invierno (Figura A1-11d,  
22 contorno rojo) y mínima en verano.

23 El segundo modo, que rescató el 7% de la varianza total (Figura A1-11b), mostró una  
24 franja costera (desde  $\sim 30^{\circ}\text{S}$  hacia el norte) más ancha que el modo 1. Este proceso  
25 estuvo asociado posiblemente a procesos de surgencia costera, dado que la estructura  
26 temporal mostró las máximas amplitudes en primavera-verano (Figura A1-11d,  
27 contorno azul).

28 Finalmente, el tercer modo representó el 3% de la variabilidad total, destacó un núcleo  
29 en la zona costera de máximo transporte en la vecindad de los  $35^{\circ}\text{S}$ . Este núcleo,  
30 apareció en otros parámetros asociados al esfuerzo del viento, el cual alcanzó el máximo  
31 en primavera-verano (Figura A1-11d, contorno negro).

## 1 Estrato de 20 m de profundidad

2 La climatología de velocidades asociadas al transporte de Ekman a la profundidad de 20  
3 metros de profundidad, mostró un comportamiento estacional del transporte a esa  
4 profundidad con una dirección preferencial hacia la costa (SE), desviándose hacia la  
5 zona oceánica en la región del núcleo máximo costero (Figura A1-12). Resaltó, la banda  
6 de baja intensidad de la deriva de Ekman ubicada entre los 25°-40°S que alcanzó la  
7 costa en la mayoría de las estaciones, excepto en verano.

8 Las FEOC de las velocidades del transporte de Ekman (Figura A1-13a) mostró que el  
9 primer modo explicó el 84% de la varianza total, y la estructura espacial rescató los  
10 principales patrones de movimientos mostrado en la climatología, alcanzando las  
11 máximas amplitudes en primavera-verano (Figura A1-13d, contorno rojo) y mínima en  
12 invierno.

13 El segundo modo explicó el 8% de la varianza total (Figura A1-13b), y evidenció la  
14 franja de mínima velocidad del transporte de Ekman que se desplazó hacia el norte,  
15 alcanzando las máximas amplitudes en primavera-verano (Figura A1-13d, contorno  
16 azul). El tercer modo representó el 3% de la variabilidad total, destacando un núcleo en  
17 la zona costera de máximo transporte en la vecindad de los 35°S, que se incrementó  
18 hacia el sur y que alcanzó las máximas amplitudes en primavera-verano (Figura A1-  
19 13d, contorno negro).

## 20 Estrato de 50 m de profundidad

21 La climatología de las velocidades zonales y meridionales del transporte a los 50 m, a  
22 través de los 12 meses (Figura A1-14), indicó un flujo desde la zona más oceánica hacia  
23 la costa en la vecindad de los 35°S. La zona asociada a la deriva de los vientos oeste  
24 mostró una robusta rama hacia el norte y otra hacia el sur. El flujo es más intenso en los  
25 meses de primavera-verano y débil en verano.

26 La estructura superficial explicó el 84% de variabilidad total (Figura A1-15a) y rescató  
27 la dinámica observada en la climatología, siendo más intensa en primavera-verano de  
28 acuerdo a la variabilidad temporal (Figura A1-15d, contorno rojo). En cambio, los  
29 modos 2 y 3 explicaron el 10% de la desviación estándar y el carácter oscilante de la  
30 estructura temporal (Figura A1-15d, contornos azul y negro, respectivamente) aportan

1 con el transporte en la fase positiva, en cambio, en la fase negativa el transporte fue  
2 hacia la zona oceánica.

3

#### 4 *6.4.1.3. Variabilidad espacio-temporal de las corrientes geostróficas*

5 Al igual que lo reportado para las velocidades del transporte de Ekman, se analizó la  
6 dinámica de las velocidades geostróficas zonales y meridionales a los estratos de 0, 20 y  
7 50 metros de profundidad, donde se encontraron las mayores densidades de larvas, post-  
8 larvas y juveniles de jurel, tanto en la región oceánica de desove frente a Chile central,  
9 como en la región de reclutamiento situada en el margen costero del norte de Chile y  
10 centro-sur de Perú.

11

#### 12 Estrato superficial

13 Las velocidades geostróficas de la climatología muestra una corriente hacia la costa en  
14 la vecindad de los 40°S, de la cual se desprendió una rama hacia el sur y la otra hacia el  
15 norte. Se observó una corriente límite muy intensa hacia el norte, y en latitudes  
16 medias se desprende una rama hacia la zona oceánica, en tanto que otra se atrapó en la  
17 zona de la curvatura hacia la costa del Perú, incrementándose la velocidad en la costa  
18 inclinada. Las velocidades, se intensificaron en los meses primavera-verano y  
19 disminuye en invierno (Figura A1-16).

20 El primer modo explicó el 97% de la varianza total (Figura A1-17a), la estructura  
21 espacial rescató los principales patrones de circulación observados en la climatología, es  
22 decir, el intenso flujo límite hacia el norte frente a las costa de Chile y la corriente  
23 atrapada desde la curvatura y que se extendió a lo largo de la costa del Perú. La  
24 estructura temporal (Figura A1-17d) que moduló la estructura espacial mostró un claro  
25 comportamiento estacional. Por otro, lado los modos 2 y 3 totalizaron el 3% de la  
26 varianza total y las estructuras espaciales (Figura A1-17b,c) y mostraron los típicos  
27 desprendimientos de giros, los cuales cambiaron de sentido de giro por las oscilación  
28 que muestran las estructuras temporales (Figura A1-17e,f).

29

#### 30 Estrato de 20 m de profundidad

31 La Figura A1-18 muestra la climatología de las velocidades geostróficas a 20 metros de  
32 profundidad, destacando que se conservaron las estructuras dinámicas observadas en la

1 climatología superficial y las FEOC. Aunque, se observó un ensanchamiento de las  
2 corrientes limítrofes.

3 En las FEOC a los 20 metros de profundidad, persistió la dinámica observada en  
4 superficie, aunque las estructuras espaciales del modo 2 y 3 (Figura A1-19b,c)  
5 mostraron mayor cantidad de giros y con mayor intensidad.

6

#### 7 Estrato de 50 m de profundidad

8 A los 50 metros de profundidad, persistió la tendencia observada en la circulación  
9 superficial y sub-superficial ( $z=20\text{m}$ ), aunque se observó en la climatología un  
10 debilitamiento de la corriente limítrofe en todas las estaciones (Figura A1-20). Además,  
11 se observó una disminución notable de las corrientes a esa profundidad en la costa norte  
12 del Perú. En FEOC a los 50 m (Figura A1-21) persistió la dinámica observada en  
13 superficie y el estrato sub-superficial de 20 metros.

14

#### 15 *6.4.1.4. Variabilidad espacio-temporal del frente Sub-Tropical*

16 En el Pacífico Suroccidental, el Frente Sub-Tropical (FST) fue caracterizado por la  
17 isohalina superficial de 34,8 (límite norte) y la isohalina superficial de 34,3 (límite sur)  
18 como también la isoterma de 14°C a 150 metros de profundidad. En estas longitudes la  
19 Corriente del Pacífico Sur (CPS) se ubicó en la zona donde se identificó el FST,  
20 abarcando un máximo de 5° de latitud y centrada en los 35°S.

21

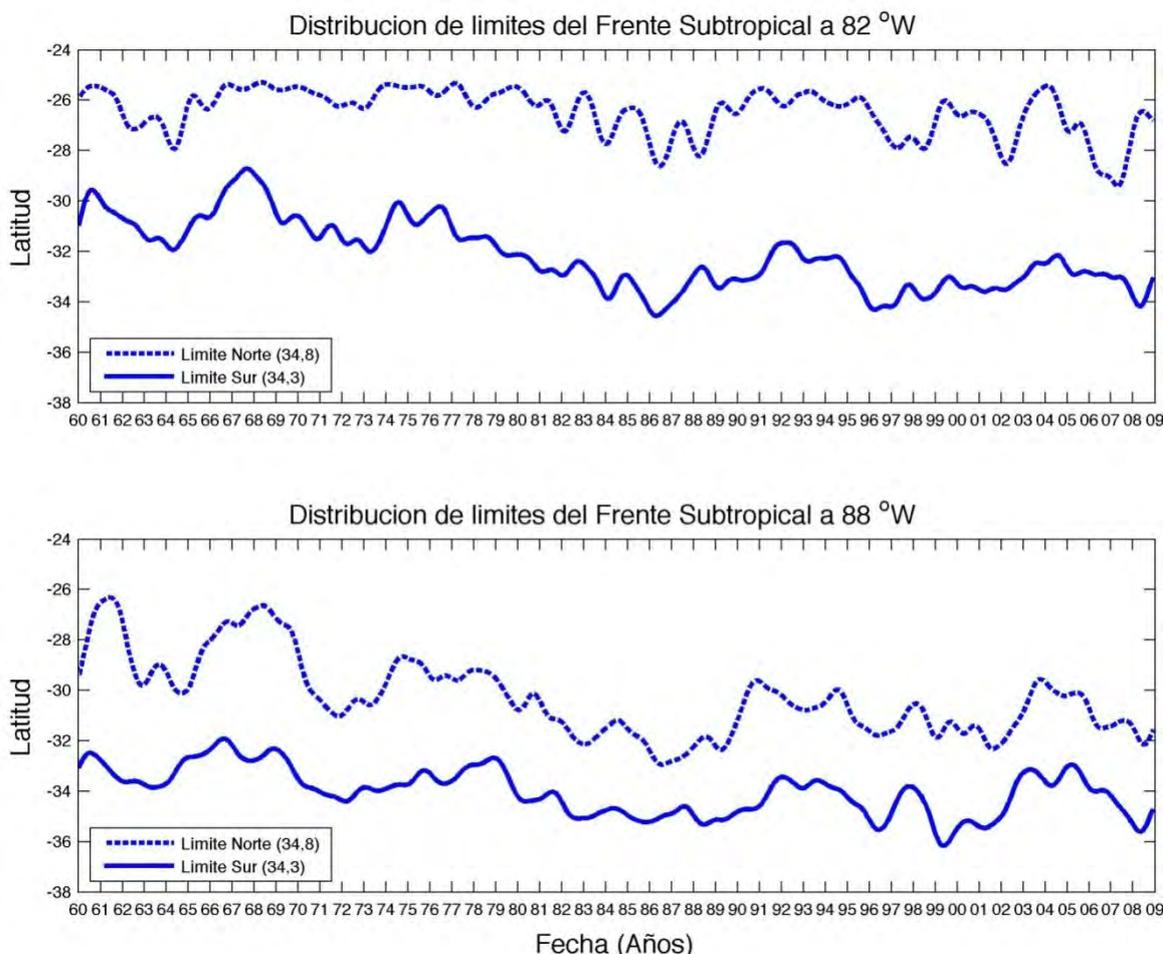
22 La climatología mostró que el FST se presentó con una distribución zonal, el cual a  
23 partir de los 90°W se desvió hacia el norte junto con la rama norte de la bifurcación de  
24 la CPS, la que se unió a la corriente de chorro paralela a la costa que se expresa a partir  
25 de los ~37°S hacia el norte (Figura A1-22, A1-23, A1-24). Los resultados revelaron que  
26 el FST tiende a un movimiento latitudinal estacional donde se desplaza 0,5°.

27 En la escala interanual (Figura 47), la variabilidad de los límites del FST entre 1960 y  
28 2009 mostró un desplazamiento hacia el sur de al menos 5° de latitud entre 1975 y  
29 1987. Posteriormente, se desplazó hacia el norte llegando a los 30°S (límite norte) para  
30 después nuevamente volver hacia el sur entre 1996 y 2002 con una interrupción entre  
31 1997 y 1998 donde tendió hacia el norte nuevamente durante el evento El Niño 1997-  
32 98. Se observó una mejor consistencia entre el límite norte y sur en los 88°W, es decir,

1 una separación constante y coherente en el tiempo. En la longitud 82°W, más cercana a  
2 la costa, éstas fronteras aparecieron más separadas y un comportamiento más  
3 independiente. A pesar de lo anterior, en ambas longitudes las fluctuaciones  
4 interanuales siguieron patrones similares, especialmente a partir de la década de los  
5 años 80.

6 Respecto a la climatología de la Corriente del Pacífico Sur a los 100°W (Figura 48a,b)  
7 se observó un flujo centrado en los 35°S con magnitudes zonales superficiales máximas  
8 de velocidad geostrófica en torno a los 10 cm s<sup>-1</sup> durante julio. En tanto que en enero y  
9 abril se alcanzaron magnitudes mínimas con valores levemente superiores a los 7 cm s<sup>-1</sup>.  
10 El flujo promedio tuvo una profundidad entre los 350 y 450 m. En la Figura 48, el FST  
11 es representado por la isoterma de 14°C a 150 m de profundidad y la isohalina  
12 superficial de 34,8 ubicándose entre los 33° y 35°S.

13 A los 90°W se registró que el flujo zonal de la CPS abarcó desde los 33° hasta los 40°S.  
14 En la parte norte, las magnitudes zonales superficiales máximas durante un enero  
15 promedio fueron del orden de 4 cm s<sup>-1</sup>, en tanto que las magnitudes mínimas de la  
16 velocidad geostrófica estuvieron en torno a los 3 cm s<sup>-1</sup> en el mes de julio. A los 40°S  
17 apareció un segundo máximo en las magnitudes zonales, con valores en torno a 5 cm s<sup>-1</sup>  
18 durante abril y valores levemente inferiores a 4 cm s<sup>-1</sup> durante octubre. El flujo  
19 promedio alcanzó profundidades entre 300 y 350 m, mientras que la ubicación del FST  
20 varió entre 31° y 35°S.



1

2 Figura 47. Variación latitudinal interanual del límite norte y límite sur del Frente sur  
 3 tropical en las longitudes 88° y 82°W, definidos por la posición de las isohalinas  
 4 superficiales de 34,8 y 34,3. (Fuente: hidrografía SODA 226).

5

6 En la transecta meridional de 85° W (Figura 48e,f) la CPS abarcó desde los 31°S hasta  
 7 los 41°S, encontrándose sus magnitudes zonales máximas en 40°S durante todo el año  
 8 ( $\sim 5 \text{ cm s}^{-1}$ ). En tanto que al norte de los 40°S las velocidades se mantuvieron en valores  
 9 del orden de  $3,5 \text{ cm s}^{-1}$ , siendo más intensas en invierno. El flujo promedio alcanzó  
 10 profundidades entre los 250 y 350 m. En esta longitud el FST estuvo orientado hacia el  
 11 norte por lo que resultó más dificultoso ubicarlo.

12 Los promedios aritméticos temporales (1992-2010) de las velocidades geostróficas a  
 13 diferentes latitudes (Figura 49) mostraron que a los 100°W la CPS estuvo centrada en  
 14 los 34°30'S con velocidades geostróficas en torno a los  $15 \text{ cm s}^{-1}$  durante los meses de  
 15 invierno y valores cercanos a  $10 \text{ cm s}^{-1}$  en los meses de verano. Un segundo máximo de

1 magnitud se presentó en 37°30'S, con valores superiores a 10 cm s<sup>-1</sup> durante los meses  
2 de verano y valores levemente superiores a 8 cm s<sup>-1</sup> en los meses de invierno. A los  
3 95°W la magnitud de velocidad geostrófica de la CPS mostró dos máximos, uno durante  
4 los meses de invierno a los 37° S y un segundo máximo en los meses de verano a los  
5 36° S, ambos con valores levemente superiores a 12 cm s<sup>-1</sup>. A los 90°W, los máximos  
6 en magnitud de velocidad zonal durante los meses de invierno estuvieron centrados en  
7 los 35°30'S y a los 39°S, ambos con valores entorno a los 10 cm s<sup>-1</sup>. A los 85°W el flujo  
8 máximo se encuentra en verano centrado en los 40°S con valores de 9.5 cm s<sup>-1</sup> y valores  
9 mínimos en invierno de 7 cm s<sup>-1</sup>, en tanto que la magnitud de velocidad geostrófica  
10 zonal máxima en invierno se centró en los 37°30'S con valores de 8 cm s<sup>-1</sup>.

11 Se identificó el FST utilizando las isohalinas de 34,3 y 34,8 psu (Stramma *et al.*, 1995,  
12 Chaigneau & Pizarro 2005b). Los resultados mostraron que entre 100° y 90°W el FST,  
13 al igual que la CPS, presentaron un movimiento latitudinal estacional ya que tendieron  
14 hacia el norte durante los meses de invierno, mientras que ambos límites se desplazaron  
15 hacia el sur en los meses de primavera y verano con un rango de variación de al menos  
16 0,5° de latitud. Este movimiento latitudinal estuvo asociado al movimiento latitudinal  
17 del Anticiclón del Pacífico Sur que conduce la circulación superficial (Bakun & Nelson  
18 1991). Los resultados mostraron que el límite sur del FST estuvo espacialmente mejor  
19 asociado a la presencia de la CPS que el límite norte.

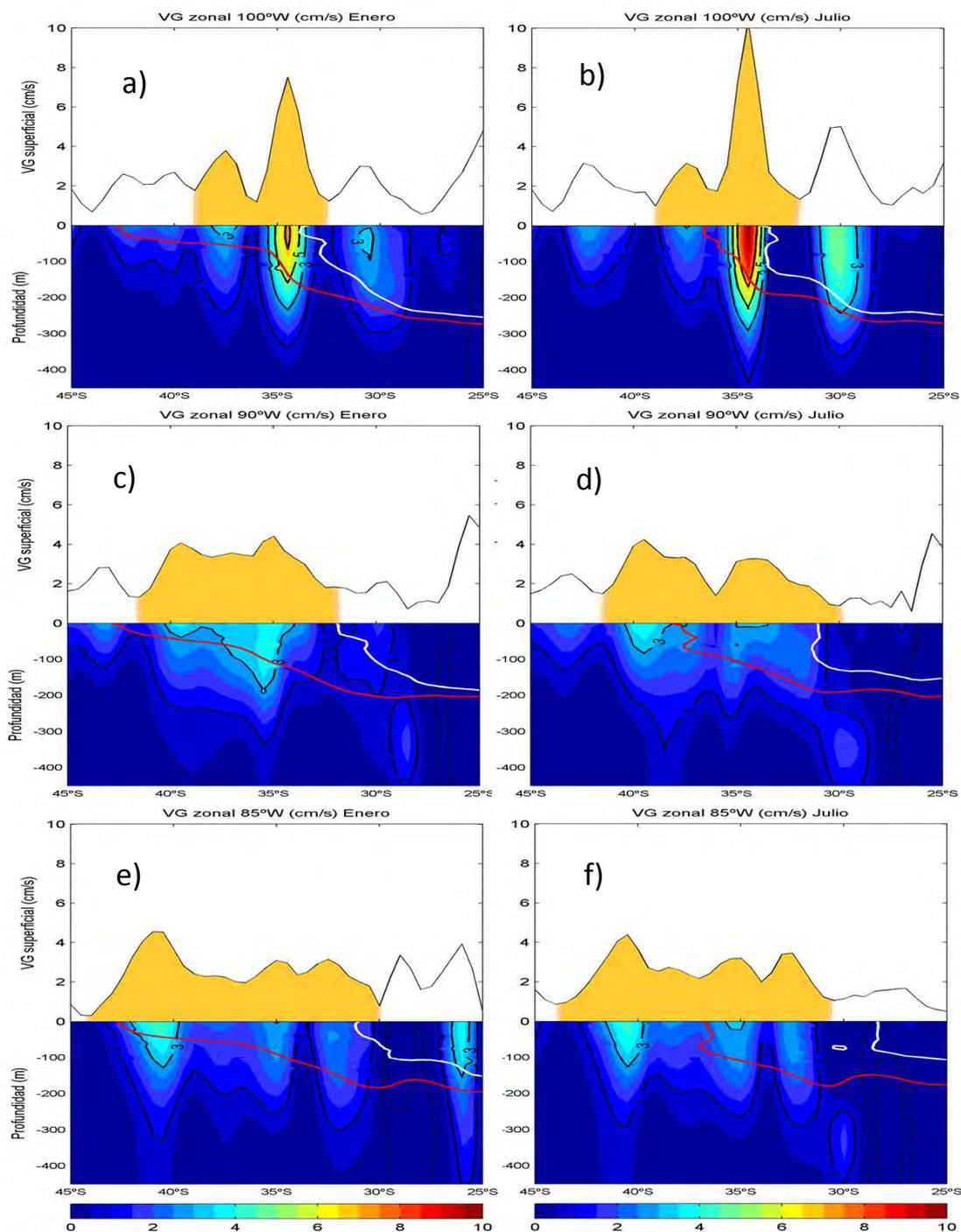
20 Hacia el este de los 90°W, la CPS comenzó a bifurcarse y el FST mostró una  
21 desviación hacia el norte junto con la rama norte de la CPS. Esta desviación estuvo  
22 asociada a la presencia del continente, la presencia de corriente de chorro a lo largo de  
23 la costa y el flujo de aguas salobres, menos salinas, provenientes de la zona subantártica  
24 y de los fiordos que acrecentaron los gradientes meridionales de salinidad (Dávila *et*  
25 *al.*, 2002; Letelier *et al.*, 2009). De este modo, el FST se orientó hacia el noreste a  
26 latitudes menores a los 30°S (Strub *et al.*, 1998; Leth *et al.*, 2004), en tanto la CPS  
27 disminuyó su intensidad al Este de los 95°W, debido a ramificaciones al noreste  
28 (~90°W) hacia el Sistema de la Corriente de Humboldt (SCH) y al sureste hacia el  
29 Sistema de Corrientes del Cabo de Hornos (Strub *et al.*, 1998; Leth & Shaffer 2001;  
30 Tomczak & Godfrey 2001).

31 A los 90°W se pudo apreciar de mejor manera, como una ramificación hacia el noreste  
32 de la CPS, la formación de parte del SCH al norte de los 33°S. La CPS disminuyó en

1 intensidad hacia el Este de los 85°W al ensanchamiento y la bifurcación. En la rama  
2 norte se encontraron magnitudes menores que las registradas en la rama sur (Silva &  
3 Neshyba 1979; Leth & Shaffer 2001; Fuenzalida *et al.*, 2008).

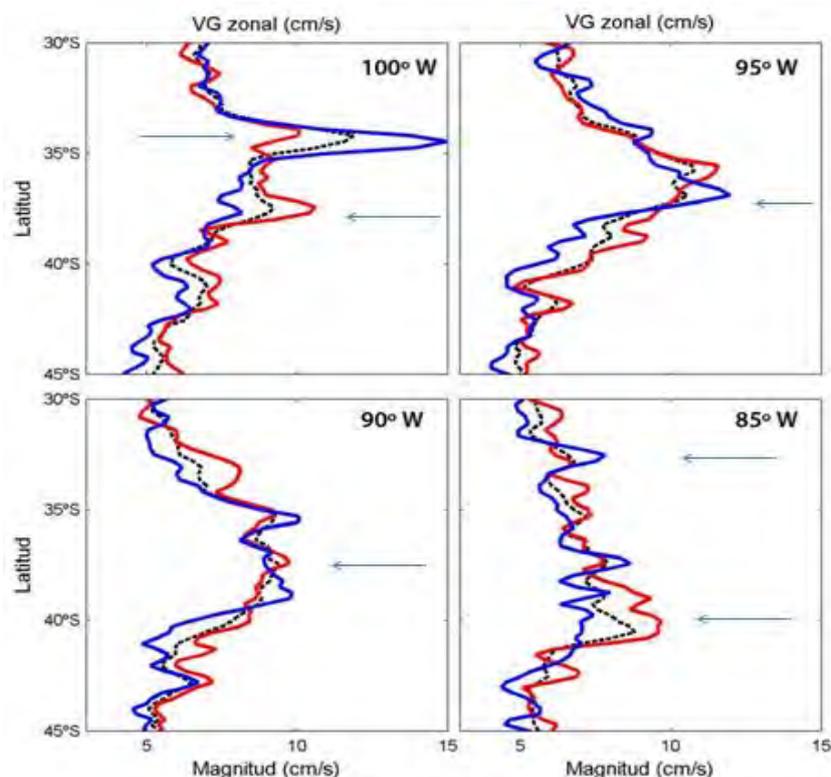
4 Los resultados del análisis de los límites del FST mostraron un desplazamiento hacia el  
5 sur a partir de 1975 para mantenerse al sur de los 30°S, en longitudes alrededor de los  
6 88°W. Cerca del continente, en los 82°W, los límites tendieron a ensancharse a partir  
7 de 1975 y moverse hacia el sur en la década de los ochenta. El FST se desplazó hacia el  
8 norte durante los años noventa y se ha mantenido variable durante la primera década  
9 del siglo XXI. Los movimientos del FST no han sido estudiados hasta estos resultados  
10 y pueden deberse a oscilaciones decadales que afectan a todo el Pacífico.

11 Letelier *et al.* (2012) mostraron la evolución temporal de la región frontal frente a Perú  
12 (~14,5°S) y Chile central (36,5°S), evidenciando gradientes costa-océano que fluctuaron  
13 entre los 0,5 y los 6,5 \*10<sup>-3</sup>°C km<sup>-1</sup> con una clara señal anual y mayores valores durante  
14 el invierno, revelando además el efecto de eventos El Niño en la región de estudio.



1  
2  
3  
4  
5  
6  
7

Figura 48. Corrientes geostroficas zonales ( $\text{cm s}^{-1}$ ) en las épocas de verano (enero) e invierno (julio) en  $100^\circ\text{W}$  (a,b),  $90^\circ\text{W}$  (c,d) y  $85^\circ\text{W}$ (e,f) calculadas de la climatología CARS, El frente subtropical se muestra como la isohalina (blanco) de 34,8 en superficie y la isoterma de  $14^\circ\text{C}$  (rojo) a 150 m de profundidad (Stramma *et al.*, 1995; Chaigneau & Pizarro 2005a).



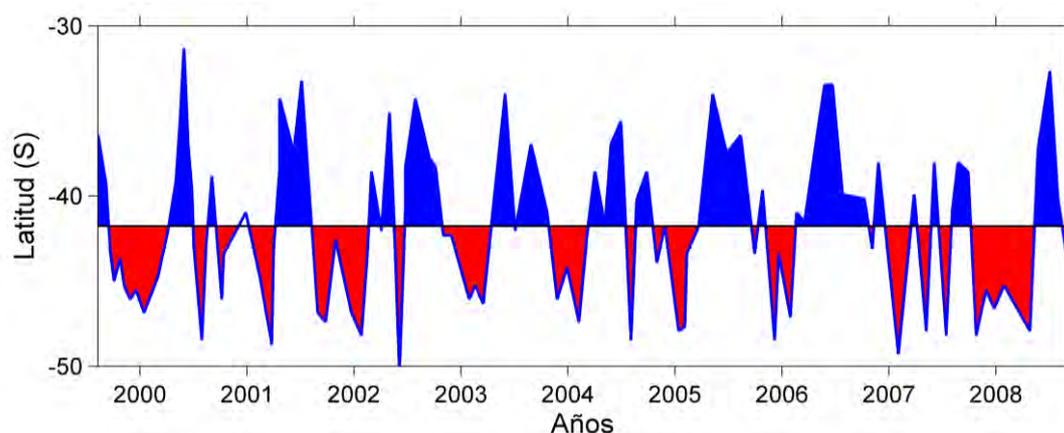
1  
2  
3  
4  
5  
6

Figura 49. Distribución latitudinal del promedio zonal (1992-2011) de la velocidad geostrófica en verano e invierno ( $\text{cm s}^{-1}$ ) en  $100^\circ\text{W}$ ,  $95^\circ\text{W}$ ,  $90^\circ\text{W}$  and  $85^\circ\text{W}$ , producto de la combinación de la altimetría satelital de AVISO y la climatología CARS.

#### 7 6.4.1.5. Variabilidad espacio-temporal de la Deriva de los Vientos del Oeste

8 En el estudio de la variabilidad de la región de Deriva de los Vientos Oeste (DVO),  
9 Pardo & Soto-Mardones (2009) mostraron que la climatología del esfuerzo del viento  
10 en la zona de la divergencia presentaron temporalmente un importante desplazamiento  
11 latitudinal. Con el fin de precisar cómo se desplaza en la región más costera la zona de  
12 divergencia (DZD), a cada mapa mensual del esfuerzo del viento se le extrajo la  
13 posición de la divergencia en función de la latitud, para de esta manera generar series de  
14 tiempo. La Figura 50 muestra la evolución temporal mensual del DVO en función de la  
15 latitud y el tiempo (agosto de 1999 hasta octubre del 2008). En la región sur, la  
16 divergencia mostró un desplazamiento marcadamente estacional, en el invierno la zona  
17 de divergencia alcanzó las latitudes más bajas, siendo la extrema en el invierno del 2000  
18 ( $\sim 30^\circ\text{S}$ ). Por otro lado, durante el periodo de verano, la zona de divergencia alcanzó el  
19 máximo desplazamiento hacia las altas latitudes ( $\sim 50^\circ\text{S}$ ) resultando un desplazamiento  
20 máximo de 20 grados de latitud.

1 Al aplicar las FEOs al esfuerzo del viento meridional de la región sur, la Figura A1-25  
 2 mostró la estructura espacial y temporal del primer y segundo modo para el  $\tau_y$ . El  
 3 primer modo explicó el 82% de la varianza total y en su estructura espacial  
 4 correspondiente, se observó nuevamente que  $\tau_y$  reveló donde se produce la zona de  
 5 divergencia, lo que ocurrió aproximadamente en los 47°S lugar donde se invirtieron los  
 6 vientos meridionales. La estructura temporal que modula la estructura espacial, muestra  
 7 amplitudes que oscilan entre los -0,01 y los 0,02 N/m<sup>2</sup>, indicando que la máxima  
 8 oscilación ocurrió a fines del año 2001 y cuyo comportamiento evoluciona en forma  
 9 aproximadamente estacional. La estructura espacial correspondiente al segundo modo  
 10 mostró un resultando interesante, ya que rescató un núcleo costero que oscila entre los  
 11 35°S y los 51°S denotando el desplazamiento estacional de la zona de divergencia. Este  
 12 resultado mostró un desplazamiento de la zona de divergencia de aproximadamente de  
 13 16° de latitud. La estructura temporal indica oscilaciones del viento meridional entre -  
 14 0,2 y 0,2 N/m<sup>2</sup>.



15  
 16 Figura 50. Evolución cronológica de las series de la zona de divergencia de los vientos  
 17 del oeste (DVO) en latitudes para la Región sur (25°S-60°S y 80°W-70°W).

18  
 19 6.4.1.6. *Remolinos de mesoescala, energía cinética y transporte en el área de desove*  
 20 *del Jurel*

21 Señal Anual

22 El cálculo de la señal anual permitió determinar el número promedio de remolinos,  
 23 anticiclónicos y ciclónicos, observados típicamente a lo largo del año (Tabla XXII). El  
 24 número máximo de remolinos en la zona se observa típicamente entre abril y mayo,  
 25 decayendo a un número mínimo en febrero y un mínimo relativo en septiembre (Figura  
 26 51).

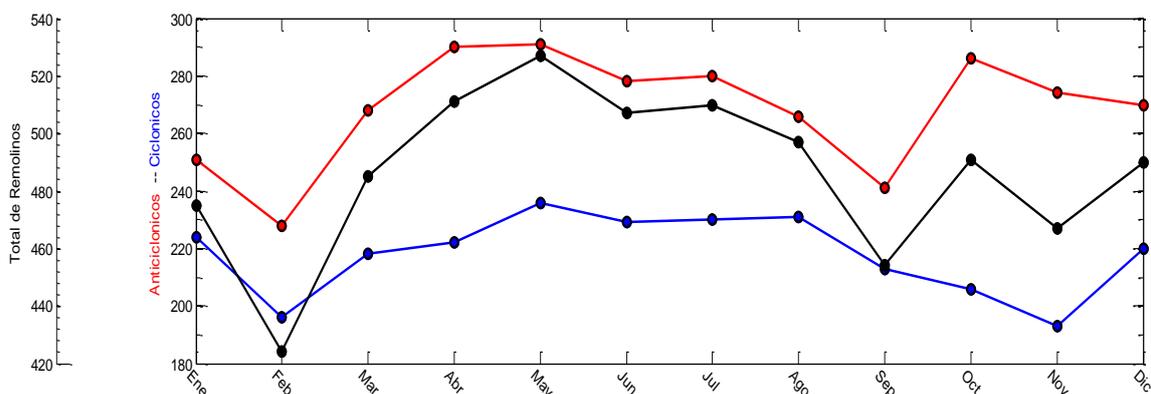
27

1 Tabla XXII. Señal anual de remolinos de meso-escala.

2

	Ciclónicos	Anticiclónicos	Total
Ene	224	251	475
Feb	196	228	424
Mar	218	268	485
Abr	222	290	511
May	236	291	527
Jun	229	278	507
Jul	230	280	510
Ago	231	266	497
Sep	213	241	454
Oct	206	286	491
Nov	193	274	467
Dic	220	270	490
Total	2.618	3.223	5.838

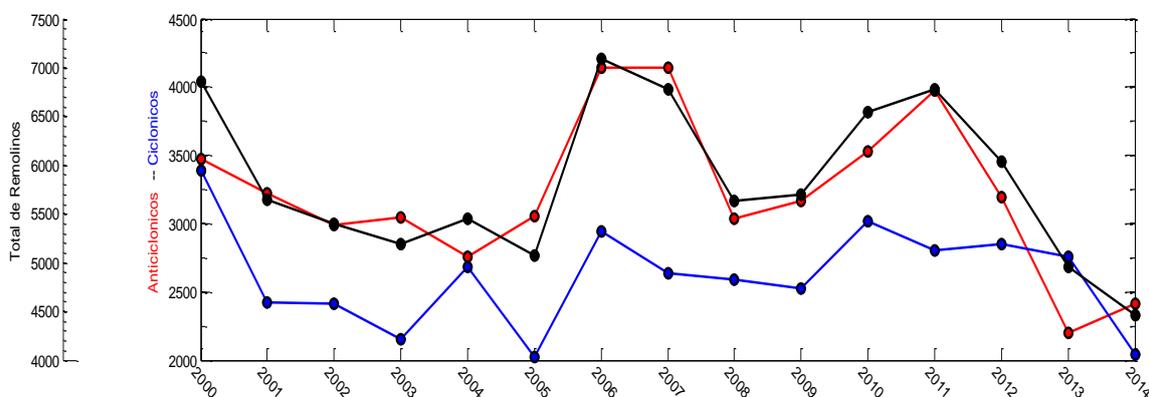
3



4

5 Figura 51. Conteo mensual promedio de los remolinos desde 2000 a 2014, para toda la  
6 región de estudio de remolinos ciclónicos (azul) y anticiclónicos (rojo), número total de  
7 remolinos (negro).

8



9

10 Figura 52. Conteo anual de los remolinos desde 2000 a 2014, para toda la región de  
11 estudio de remolinos ciclónicos (azul) y anticiclónicos (rojo), número total de remolinos  
12 (Negro).

13

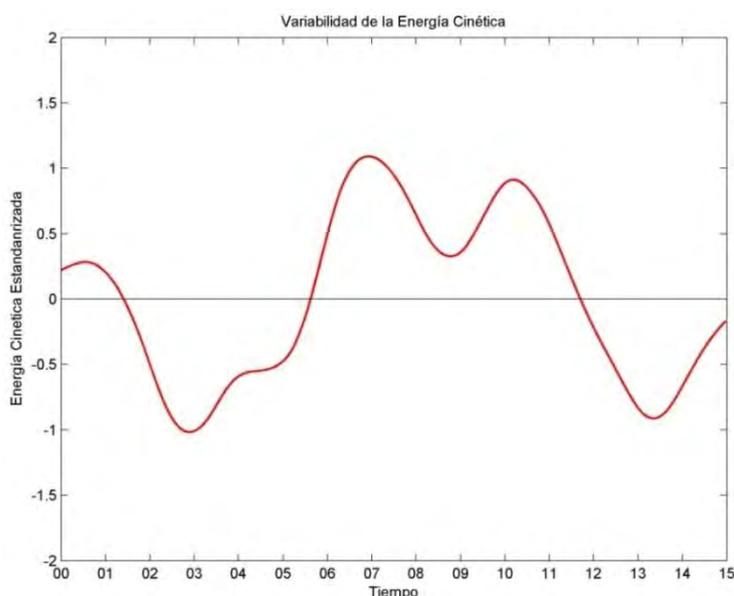
## 1 Señal Interanual

2 Los resultados asociados a la señal interanual mostraron un comportamiento irregular a  
3 lo largo de los años en el número de remolinos presentes en la zona de estudio (Tabla  
4 XXIII, Figura 52). Entre el año 2000 y 2005 el número de remolinos tendió a  
5 permanecer relativamente bajo para luego aumentar con el incremento de los remolinos  
6 anticiclónicos entre 2006 y 2007. El número total de remolinos descendió entre 2008 y  
7 2009 aumentando entre 2009 y 2011. A partir de 2012, descendieron tanto los remolinos  
8 ciclónicos como anticiclónicos alcanzando el mínimo en el año 2014.

9 La energía cinética también mostró un comportamiento irregular (Figura 53), ya que  
10 presentó valores bajo el promedio entre 2002 y 2005, valores positivos entre 2007 y  
11 2011 para posteriormente descender a valores menores al promedio a partir de 2012.  
12 Cabe señalar que durante entre el año 2008 y 2009 se presentó un mínimo relativo.

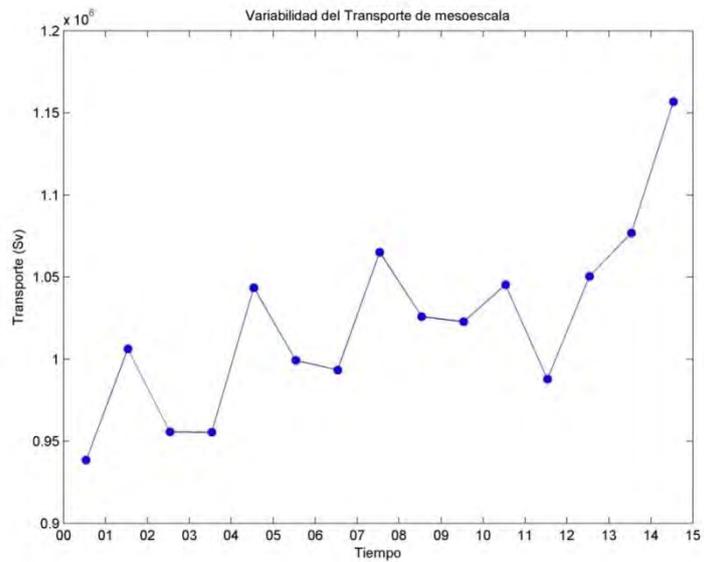
13 En forma particular el transporte mostró una tendencia al incremento (Figura 54) a  
14 pesar de que el número de remolinos presentó un comportamiento irregular y sin  
15 tendencia. Máximos relativos se presentaron en 2001, 2004, 2007, 2010 y 2014. El  
16 comportamiento presentó un cambio a partir del mínimo observado en 2011 para  
17 alcanzar el máximo valor de la serie en el año 2014.

18



19

20 Figura 53. Energía cinética de remolinos de mesoescala estandarizada por la desviación  
21 estandarizada y sin el promedio.



- 1
- 2 Figura 54. Transporte anual (Sv) generado por remolinos de mesoescala asumiendo una
- 3 profundidad promedio de 200 m.
- 4
- 5

1 Tabla XXIII. Señal interanual de número total de remolinos.

	Ciclónicos	Anticiclónicos	Total	Transporte (Sv)
2000	3390	3472	6862	938521
2001	2420	3223	5643	1006285
2002	2412	2988	5400	955651
2003	2154	3041	5195	955498
2004	2685	2761	5446	1043474
2005	2024	3052	5076	999233
2006	2945	4139	7084	993417
2007	2638	4146	6784	1065132
2008	2594	3039	5633	1025799
2009	2522	3171	5693	1022749
2010	3018	3532	6550	1045294
2011	2805	3975	6780	987747
2012	2850	3192	6042	1050406
2013	2754	2200	4954	1076852
2014	2046	2417	4463	1156672
Total	39257	48348	87605	

2

## 3 6.4.1.7. Energía cinética asociada a remolinos de meso-escala (EKE)

4 La Figura A1-26 muestra la climatología de la energía cinética, especialmente  
5 relacionadas con meandros y remolinos de mesoescala (Hormazábal *et al.* 2004) en el  
6 sector oriental del Pacífico Sur. El promedio mensual de la energía turbulenta (EKE=  
7 Eddy Kynetic Energy) dio cuenta de la energía disponible para la formación de  
8 remolinos de mesoescala (Stevens *et al.*, 2000; Hormazábal *et al.*, 2004). Los resultados  
9 verifican una franja paralela a la costa sudamericana, con altos valores de EKE (>30-40  
10  $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ ), la que estuvo asociada a la zona de transición costera que se extiende  
11 aproximadamente hasta los 600-800 km desde la costa (Hormazábal *et al.*, 2004) y a la  
12 región de influencia de la corriente de chorro (Fuenzalida *et al.*, 2008). Lo anterior, fue  
13 particularmente válido para el período de verano-inicios de otoño (Enero-Abril).  
14 Contrariamente, se observaron bajos valores de EKE en las dos regiones de interés  
15 asociado a los procesos de desove y reclutamiento principal de jurel en el Pacífico  
16 Sureste, esto es, tanto en el sector costero del norte de Chile como en el sector oceánico  
17 ( $82^{\circ}$ - $95^{\circ}$ W) frente a Chile central. Zonas de altos valores de EKE ( $> 40 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ ) también  
18 se observaron frente a la costa de Perú ( $10$ - $16^{\circ}$ S). Estos resultados muestran la  
19 evolución mensual de la EKE en la región de estudio, evidenciando en mayor detalle las  
20 diferencias zonales y meridionales, comparados con los resultados provenientes del

1 promedio climatológico del área global (Hormazábal *et al.*, 2004) y/o de climatologías  
2 estacionales (Serra *et al.*, 2010).

3 La distribución espacial de la EKE evidenció un debilitamiento hacia la primavera  
4 tardía donde ocurre el proceso de desove en aguas abiertas frente a Chile central ( $<20$   
5  $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ ) y frente a las costas del Perú, valores moderados a bajos que podrían estar  
6 asociados a una mejor sobrevivencia de huevos/larvas de jurel (Núñez *et al.*, 2004;  
7 Sepúlveda *et al.*, 2007; Vásquez *et al.*, 2013).

8 En la zona de estudio los resultados mostraron una presencia permanente de remolinos  
9 de meso-escala (Narvaéz, 2000; Hormazábal *et al.*, 2004, Chaigneau *et al.*; 2009), los  
10 que tienen una señal anual con preponderancia de remolinos anticiclónicos. El número  
11 mayor de remolinos se observó entre abril y mayo, mientras que los mínimos en febrero  
12 y septiembre. El desarrollo de estas estructuras y su posterior identificación deberían  
13 estar en desfase con los forzantes, por lo que es probable que los máximos de invierno  
14 están en relación con procesos estacionales entre verano y otoño, como podría ser el  
15 desplazamiento hacia el norte del Anticiclón del Pacífico Sur (Letelier *et al.*, 2010).  
16 Este desplazamiento genera cambios en la interacción de los vientos locales, en el rotor  
17 del viento y su interacción con las corrientes.

18 La variabilidad interanual de los remolinos mostró ciclos claros de  $\sim 5$  años, entre el  
19 2001 y 2005 con un número bajo de estas estructuras, entre 2006 y 2011 con valores  
20 altos que decaen solamente entre 2008 y 2009, posiblemente asociados a eventos fríos  
21 La Niña. Posteriormente, desde 2011 la serie mostró una tendencia hacia el mínimo  
22 observado en 2014-15. Esta variabilidad de 5 años fue coherente con los resultados de  
23 la distribución temporal de la energía cinética de remolinos que decayó en la primera  
24 fase de la serie para luego aumentar entre 2006 y 2011. La coherencia entre estas series  
25 está relacionada a que la energía cinética se deriva de la vorticidad que generan los  
26 remolinos. Por otro lado, el transporte asociado a las estructuras de meso-escala mostró  
27 una tendencia al aumento desde el año 2000 y especialmente notorio a partir de 2011 a  
28 pesar de que el número de remolinos disminuyó desde ese año. Una de las posibles  
29 explicaciones puede estar dada por un aumento de las áreas de los remolinos,  
30 paralelamente a su reducción en número.

1 *6.4.1.8. Dinámica del Esfuerzo del Viento, deriva de Ekman y TSM en la zona de la*  
2 *curvatura (Chile-Perú)*

3 Para la caracterización preliminar de la región costera del norte de Chile, se ensayaron  
4 las variables temperatura superficial del mar (TSM), el viento superficial, y la dinámica  
5 geostrófica como forzantes que determinan la variabilidad física en la principal región  
6 de reclutamiento (distribución de juveniles de jurel) situada en el norte de Chile y  
7 centro-sur del Perú.

8  
9 En la región fronteriza del norte de Chile, la forma de la línea de costa mostró un  
10 comportamiento aproximadamente meridional, revelando un fuerte y abrupto cambio  
11 hacia el oeste en la zona de Arica, observándose un leve ensanchamiento de la  
12 plataforma marina.

13  
14 Para analizar las series de datos se utilizaron Funciones Empíricas Ortogonales (FEOs)  
15 con el objetivo de extraer la estructura espacial y la variabilidad temporal del esfuerzo  
16 del viento meridional y de la TSM. Las FEOs permitieron cuantificar la varianza total  
17 de las series en modos ortogonales o independientes entre sí. De esta manera, se  
18 obtuvieron modos o estructuras que contienen el mayor porcentaje de la varianza, y los  
19 cuales probablemente representen a las señales dominantes en la región de estudio,  
20 quedando en los modos inferiores las contribuciones asociadas con otro tipo de procesos  
21 o escalas.

22

23

1 *6.4.1.8.1. Temperatura Superficial del Mar, Transporte de Ekman y Velocidades*  
2 *geostróficas*

3 La Figura A1-27 muestra la climatología de la temperatura superficial del mar (TSM)  
4 en conjunto con la velocidad del transporte de Ekman en la región costera y oceánica  
5 del norte de Chile y centro-sur del Perú. Los principales resultados asociados a esta  
6 climatología revelaron una lengua cálida proveniente de la zona ecuatorial durante  
7 primavera-verano que resaltó la coincidencia entre esta lengua costera y el flujo de  
8 Ekman en la misma dirección, quedando atrapada en la zona de la curvatura del norte de  
9 Chile. Por el contrario en el otoño-invierno este efecto desaparece. Por otra parte, la  
10 deflexión oceánica de las isothermas no mostraron una correlación con las velocidades  
11 asociadas al transporte de Ekman.

12  
13 Asimismo, la Figura A1-28 muestra la climatología de la temperatura superficial del  
14 mar en conjunto con la velocidad geostrófica en la región costera y oceánica del norte  
15 de Chile y centro-sur del Perú. Los principales resultados asociados a esta climatología  
16 mostraron que en la primavera-verano, se observó un flujo muy costero desplazándose  
17 en forma paralela a las isothermas hacia bajas latitudes. Destaca en la zona de la  
18 curvatura una rotación local anticiclónica, siguiendo el contorno del núcleo cálido en  
19 este sector. A diferencia de lo registrado en la relación TSM versus transporte de  
20 Ekman, en este caso no existió ninguna relación entre la velocidad geostrófica  
21 superficial y la lengua cálida proveniente de la zona ecuatorial. Por otra parte, la  
22 deflexión oceánica de las isothermas mostraron una alta correlación con las velocidades  
23 geostróficas superficiales en el período de primavera-verano.

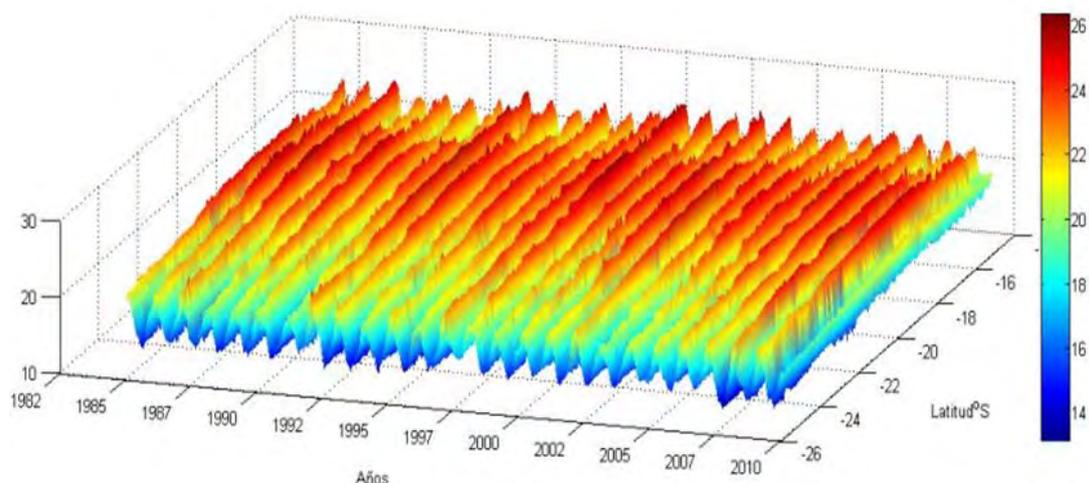
24  
25 Para observar los cambios que genera la línea de costa y el efecto que produce la  
26 disminución de la ventilación del viento meridional en la zona de la curvatura, se  
27 analizó la temperatura superficial del mar, y el esfuerzo del viento meridional. Para la  
28 TSM la secuencia de imágenes cubrió desde el periodo del 1985 hasta el 2010, contando  
29 con un total de 312 mapas mensuales. La Figura A1-29 muestra los dos primeros modos  
30 del análisis de Frecuencias Empíricas Ortogonales, que totalizaron 67% de la  
31 variabilidad de la TSM. La estructura espacial del primer modo (Figura A1-29) que  
32 representó el 58% de la varianza total mostró, en la zona de la curvatura, un núcleo de

1 mayor amplitud en comparación a su entorno. Destacó a lo largo de todo el dominio,  
2 mínimas amplitudes pegadas a la costa.

3 En cambio, el segundo modo que abarcó el 8% de la varianza total, mostró las mayores  
4 amplitudes en la zona costera y decayó hacia la zona más oceánica. La variabilidad  
5 temporal de los primeros dos modos reafirmó la existencia dominante de una señal  
6 estacional (Figura A1-29c, contorno rojo y azul).

7 Para observar la evolución de la TSM a lo largo de la costa, se extrajo el pixel 50 que  
8 atraviesa el núcleo (~200 km), formando el diagrama de latitud versus tiempo (Figura  
9 55). En esta figura se observó claramente el comportamiento estacional y con un claro  
10 dominio de la TSM en la zona de la curvatura (entre 18°S y 22°S) durante todo el  
11 período de estudio. Además, resalta que las mayores amplitudes están concentradas en  
12 la zona de la curvatura.

13



14

15

16 Figura 55. Diagrama Hovmöller de la temperatura superficial del mar a lo largo de la  
17 costa.

18

#### 19 6.4.1.8.2. Esfuerzo de Viento Meridional

20 Se analizaron dos series de vientos superficiales satelitales provenientes de los satélites  
21 ERS1-2 y QuikSCAT, que cubrieron los periodos 1991-2000 y 1999-2009,  
22 respectivamente. Para la información proveniente del satélite ERS1-2, la aplicación de  
23 las FEOs a la secuencia mensual de imágenes (1991-2000) de esfuerzo del viento  
24 meridional (EVM) mostró la presencia de una señal dominante, representada por el

1 primer modo, correspondiente a la variación estacional (Figura A1-30c, contorno azul),  
2 y explica la mayor parte de la variabilidad del EVM (68%). La estructura espacial del  
3 primer modo (Figura A1-30a) mostró un debilitamiento significativo (1/3 del total) en  
4 las magnitudes de la EVM en la zona de la curvatura. Un similar comportamiento  
5 mostró la estructura espacial del segundo modo que representa el 10% de la varianza  
6 total.

7  
8 Para el caso de la serie 1999-2009 (satélites QuikSCAT), la aplicación de las FEOs a la  
9 secuencia mensual de imágenes del EVM mostró que a partir de los dos primeros  
10 modos es posible explicar el 80% de la variabilidad total (Figura A1-31a,b). Ambas  
11 estructuras espaciales, mostraron claramente la disminución de la ventilación en la zona  
12 de la curvatura. La variabilidad temporal (Figura A1-31c, contornos azul y rojo)  
13 evidenció un comportamiento estacional, donde las mayores intensidades ocurren en  
14 periodo de primavera y verano.

15 La dinámica superficial de la región norte de Chile, al interior de las 200 mn, que  
16 asimismo se verifica como la región de reclutamiento de jurel juvenil proveniente del  
17 área principal de desove de Chile central, se encontró modulada por la forma de la línea  
18 de costa (curvatura) que induce una drástica disminución del esfuerzo del viento  
19 meridional.

20 Estos resultados (series de tiempo independientes y robustas, que abarcan un periodo  
21 aproximadamente de 20 años, ERS1-2 y QuikSKAT), mostraron la atenuación de los  
22 vientos provenientes del sur al arribar a la zona de la curvatura. La baja ventilación en la  
23 zona de la curvatura induce automáticamente una disminución de los procesos de  
24 surgencias, y por ende, un enfriamiento menor de las zonas aledañas, como lo mostró  
25 claramente el análisis de FEOs de la TSM. Esta baja ventilación induce que en la zona  
26 de la curvatura, la TSM sea más conservativa estacionalmente, es decir, tienda a  
27 mantener altos rangos de temperaturas durante un mayor periodo con respecto a las  
28 zonas aledañas, como mostró el diagrama de Hovmöller (Figura 55), quedando el  
29 ascenso de aguas frías producto del proceso de surgencia, acotado a una región muy  
30 cercana a la costa.

31  
32 Mayorga (2015) estudió la climatología del esfuerzo del viento zonal y meridional  
33 frente a la Península de Mejillones, mediante el uso del modelo hidrodinámico ROMS,

1 especialmente para analizar las perturbaciones generadas por la península de Mejillones  
2 en los campos de velocidades asociadas a las corrientes marinas y sus efectos ante  
3 escenarios del calentamiento global extremos. En la climatología del esfuerzo del viento  
4 Mayorga (2015) utilizó un indicador asociado al  $\tau$ -cero zonal. Este indicador reveló a  
5 través del desplazamiento estacional hacia la costa, el atrapamiento de remolinos al  
6 norte de la península de Mejillones en los periodos de otoño e invierno, al Este de la  
7 región delimitada por el esfuerzo del viento zonal cero (Figura A1-32, línea segmentada  
8 en rojo). Cuando el esfuerzo del viento zonal cero se desplaza hacia la zona oceánica en  
9 la primavera-verano se liberan los remolinos

#### 11 *6.4.1.8.3. Variabilidad del transporte superficial de Ekman*

12 La climatología del transporte superficial de Ekman frente a la zona de la curvatura  
13 Perú-Chile mostró un comportamiento estacional, es decir, alcanzó su máximo en  
14 primavera-verano ( $\sim 400 \text{ m}^2/\text{s}$ ), en cambio en otoño-invierno disminuyó hasta  $\sim 200 \text{ m}^2/\text{s}$   
15 (Figura A1-33). Esta zona se caracterizó por tener un mínimo de transporte en  
16 comparación a la zona norte que alcanza magnitudes superior a  $1000 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , verificando  
17 a la región de reclutamiento de juveniles de jurel como una región de mucho menor  
18 dinámica en la región noreste de la costa chilena.

#### 20 *6.4.1.8.4. Variabilidad de la clorofila-a en la región de reclutamiento*

21 La evolución temporal de la clorofila-a de una banda costera (20 km), entre  $15^\circ\text{S}$  y  
22  $30^\circ\text{S}$ , mostró que las mayores concentraciones estuvieron en rangos entre  $7,5 \text{ (mg}\cdot\text{m}^{-3})$   
23 y  $10 \text{ (mg}\cdot\text{m}^{-3})$  y abarcaron gran parte del área de estudio ( $\sim 16^\circ$  a  $20^\circ\text{S}$ ) (Figura 56). Las  
24 mayores concentraciones entre los años 2002 a fines de 2005 se ubicaron entre  $\sim 16,5^\circ\text{S}$   
25 y  $18^\circ\text{S}$  desde el 2007, excepto en el año 2012 en que las concentración disminuyeron  
26 ( $2,5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Además se observaron fluctuaciones interanuales en la concentración de  
27 clorofila durante el período de estudio, ya que se observaron períodos de menor  
28 concentración a fines de 2006 y en el año 2012, y períodos de mayor concentración  
29 entre los años 2003-2004-2005-2007-2008-2011 y 2014. Por su parte, la zona de la  
30 península de Mejillones mostró un quiebre en la distribución latitudinal de la  
31 concentración de la clorofila. Al sur de este quiebre, las concentraciones costeras fueron  
32 significativamente menores que al norte, aunque al norte se presentaron fluctuaciones

- 1 interanuales. Cabe señalar que la zona de Mejillones las altas concentraciones tendieron  
2 a ser permanentes.

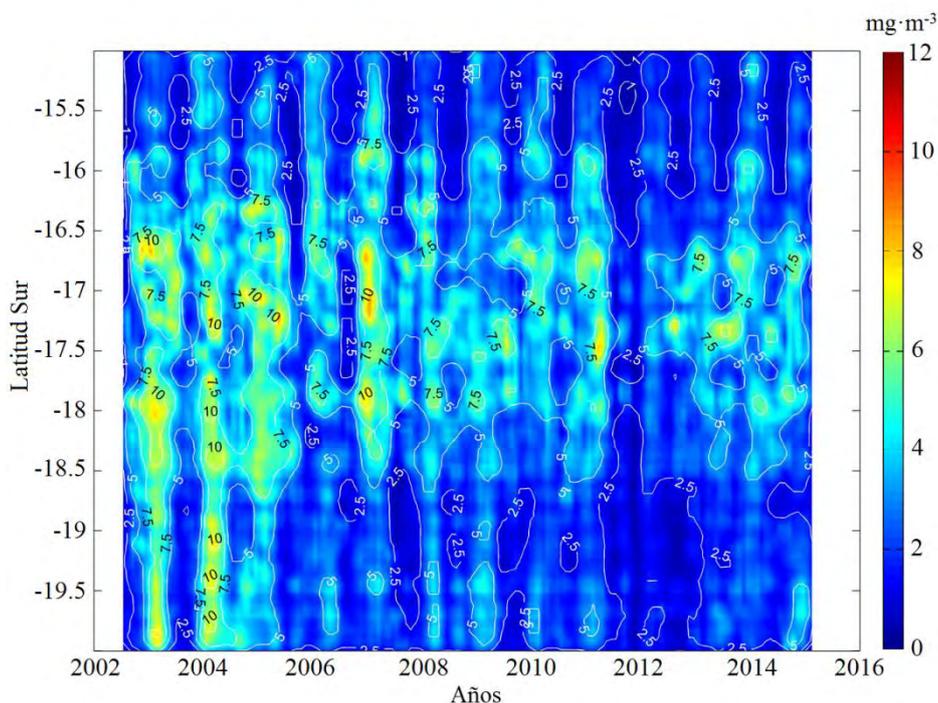


Figura 56. Diagrama Hovmöller de una banda costera (20 km) de concentración de clorofila entre 15°S y 30°S durante julio de 2002 a febrero de 2015.

- 3 La serie temporal de concentración de clorofila en la zona norte entre los 15°S y 20°S  
4 (Figura 57a), mostró que las máximas concentraciones se presentaron durante períodos  
5 de verano en los años 2003-2004-2005-2007 y 2008 ( $>8 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ). En 2006, las  
6 máximas concentraciones bordearon los 6 ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) al igual que el resto de los años,  
7 con la excepción del año 2011-2012 en que las máximas concentraciones fueron del  
8 orden de 4 ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ). La menor concentración de clorofila se observó a fines del año  
9 2011 ( $<1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ). La variabilidad estacional de la concentración de clorofila (Figura  
10 57b) mostró una señal anual débil y un comportamiento similar en las latitudes 17°30'S  
11 y 18°30'S con valores levemente mayores en mayo y abril ( $9 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ).
- 12 La señal de las anomalías de la concentración de clorofila mostraron un dominio de  
13 valores positivos durante el período de estudio (Figura 57c), destacándose algunos  
14 máximos significativos para ambas latitudes mayores o iguales a 5 ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Las  
15 anomalías negativas más significativas fueron observadas durante el 2002 hasta  
16 comienzos del 2004.

1 La concentración de clorofila en la costa norte de Chile y sur de Perú ( $15^{\circ}$ - $30^{\circ}$ S)  
 2 mostró una distribución espacial heterogénea y una variabilidad temporal aperiódica. El  
 3 análisis mensual evidenció una señal anual débil con máximos entre enero y abril  
 4 (Thomas, 1999). El promedio temporal permitió observar como la amplitud de las  
 5 fluctuaciones anuales disminuyó y se hizo irregular a partir del año 2009, incluso  
 6 cayendo significativamente en 2012. La distribución espacial presentó las mayores  
 7 concentraciones al norte de la península de Mejillones con influencia interanual de la  
 8 zona de surgencia del sur del Perú. Esta influencia fue más notoria entre el 2000 y 2006  
 9 disminuyendo durante el 2007 (año La Niña). Esta influencia vuelve a estar presente  
 10 entre 2008 y 2011, descendiendo nuevamente a partir del año 2012. La zona al sur de la  
 11 península de Mejillones mostró permanentemente bajas concentraciones en relación a  
 12 la zona norte. Esta diferencia se puede deber a que la zona sur presenta mayor  
 13 intensidad en el transporte de Ekman y por lo tanto menos retención de clorofila en la  
 14 banda costera, excepto en la zona alrededor de la bahía de Coquimbo.

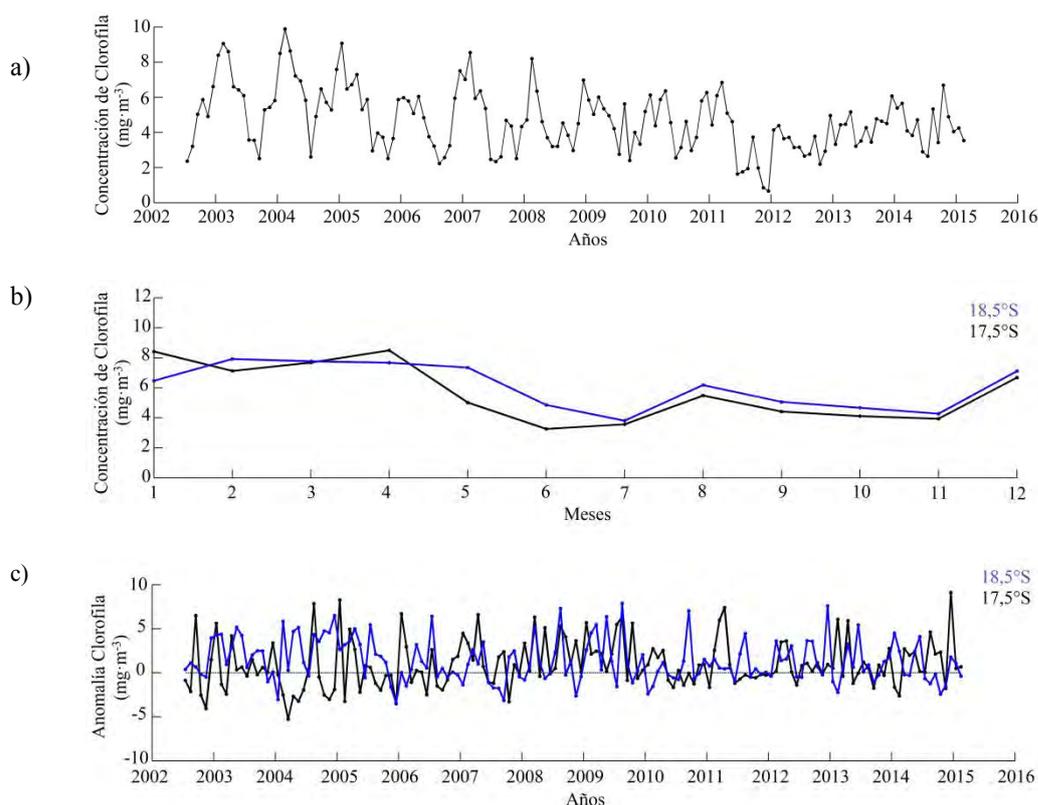


Figura 57. (a) Serie temporal de concentración de clorofila para la zona norte entre los  $15^{\circ}$ S y  $20^{\circ}$ S entre julio 2002 a febrero 2015. (b) Señal anual de concentración de clorofila para las latitudes  $17,5^{\circ}$ S (negro) y  $18,5^{\circ}$ S (azul) y (c) Anomalia de concentración de clorofila para  $17,5^{\circ}$ S (negro) y  $18,5^{\circ}$ S (azul) entre julio 2002 a febrero de 2015. Todas las series son para en una banda costera de 20 km.

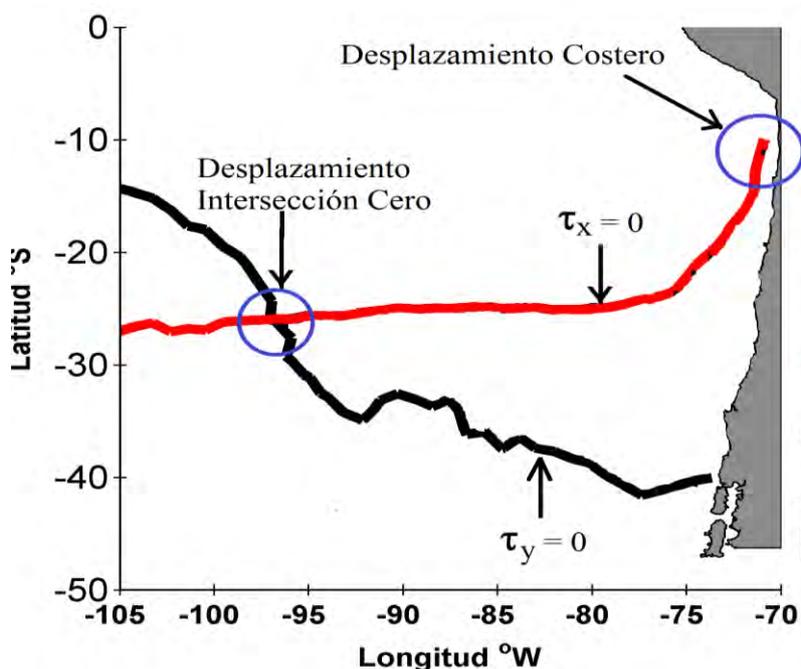
## 1 6.4.1.9. Análisis integrado

2 En los capítulos anteriores se analiza la TSM, esfuerzo del viento y las velocidades de  
 3 Ekman y geostróficas para el Pacífico Suroriental entre los 10°S y los 45°S. Los  
 4 resultados evidenciaron zonas muy dinámicas, como la zona de las deriva de los vientos  
 5 del Oeste (región oceánica frente a Chile central) y la costa inclinada del Perú, así como  
 6 regiones menos dinámicas como la zona costera vinculada a la curvatura del norte de  
 7 Chile, y la región de aguas abiertas frente a Chile central. En este capítulo, denominado  
 8 como "análisis integrado", estas regiones se analizarán en relación al efecto de la  
 9 dinámica geostrófica y a-geostrófica (viento) sobre la distribución de la temperatura  
 10 superficial del mar.

11

12 Para establecer lo anterior, la región oceánica centro-sur (zona de desove de jurel) se  
 13 delimitó en función de las isolíneas del esfuerzo del viento igual a cero, en la  
 14 componente zonal ( $\tau_x = 0$ ) y en la componente meridional ( $\tau_y = 0$ ) (Figura 58). Este  
 15 enfoque reveló que en las cercanías de la intersección de ambas isolíneas de Tau= cero,  
 16 el efecto del viento superficial es nulo o muy débil, incrementándose a medida que estas  
 17 isolíneas se separan latitudinalmente al ir acercándose a la región costera ( $< 85^\circ\text{W}$ ).

18



19

20 Figura 58. Zona de estudio proveniente de la intersección del esfuerzo del viento zonal  
 21 (contorno rojo) y meridional (contorno negro) cero ( $\tau_x = \tau_y = 0$ ), respectivamente.  
 22 Los círculos azules muestran los desplazamiento de la zona de intersección y costero.

1 *6.4.1.10. Efecto de la velocidad del transporte de Ekman sobre la TSM en la región*  
2 *oceánica de desove frente a Chile central*

3 La Figura A1-34 mostró la distribución de la TSM en conjunto con los vectores de  
4 velocidad del transporte de Ekman en la superficie, como climatologías mensuales, al  
5 interior de la región delimitada por los  $\tau-0$  zonales y meridionales.

6  
7 Destacó, en primer lugar, el efecto significativo que tiene el transporte de Ekman sobre  
8 la deflexión de las isotermas, especialmente en la región situada al Este de los 80°W.  
9 Este efecto de deflexión se evidenció principalmente en los períodos de primavera y  
10 verano; en tanto que en la región más oceánica, las isotermas se verificaron en forma  
11 perpendicular a la línea de costa, debido entre otras cosas al efecto nulo del esfuerzo del  
12 viento en esta región. Lo anterior verificó a estas dos variables como parámetros  
13 climático-oceanográficos críticos y que establecen un hábitat favorable de menor  
14 dinámica para el desove del jurel hacia el océano interior, más allá de los 85°W.

15  
16 A pesar de la presencia de variabilidad interanual y meridional, la isoterma de 16°C se  
17 verificó en todos los meses al interior de la región delimitada por los  $\tau-0$ , isoterma que  
18 ha sido establecida como un límite austral de la región de desove oceánica de jurel  
19 frente a Chile central (Evseenko, 1987; Cubillos *et al.*, 2008).

20  
21 *6.4.1.11. Efecto de la geostrofia (CARS) superficial sobre la temperatura superficial del*  
22 *mar*

23  
24 La Figura A1-35 muestra la climatología mensual de la TSM en conjunto con los  
25 vectores de velocidad geostrofica en superficie, al interior de la región delimitada por  
26 los  $\tau-0$ , zonales y meridionales.

27  
28 Para el caso de la velocidad geostrofica, se observaron magnitudes mayores asociadas a  
29 la región costera (<80°W) espacialmente al norte de los 38°S, las que tienden a modular  
30 la deflexión costera de las isotermas entre 16 y 18°C hacia el norte, constituyendo un  
31 probable mecanismo dinámico en la distribución espacial térmica en superficie.

32

1 6.4.1.12. *Climatología de Temperatura Superficial del Mar versus el Esfuerzo del*  
 2 *viento*

3 La climatología de la Temperatura Superficial del Mar (Figura A1-36) mostró la  
 4 variabilidad de la isothermas en función del esfuerzo del viento. Se observó para todos  
 5 los meses climatológicos la deflexión de los contornos de las isothermas por efecto del  
 6 esfuerzo del viento. Este efecto es más pronunciado cuando el esfuerzo del viento es  
 7 más intensos en primavera y verano. Estos resultados mostraron la directa dependencia  
 8 de la TSM a la variabilidad del esfuerzo del viento.

9

10 Desplazamiento de la intersección ( $\tau_x = \tau_y = 0$ ) y Costero ( $\tau_x = 0$ )

11

12 La zona de intersección de  $\tau_x = \tau_y = 0$ , mostró de acuerdo a la climatología, que la  
 13 región asociada al vértice no presentó la influencia del viento (que es casi nulo en dicha  
 14 región). Por lo anterior, fue importante estudiar el desplazamiento de la zona de  
 15 intersección de esfuerzo del viento cero con respecto a la latitud y la longitud (ver  
 16 Figura 58). La Figura 59 mostró el desplazamiento del vértice de intersección *versus* la  
 17 latitud (contorno azul), observándose un patrón estacional con mayor desplazamiento  
 18 [ $\overline{lat} = -30.4$  y  $\sigma = \pm 3.3$ ] hacia el norte en invierno. En cambio, si solo  
 19 consideramos los meses de primavera-verano (noviembre, diciembre, enero y febrero,  
 20 marcado con puntos rojos) la intersección cero se encontró más al sur y con menor  
 21 variabilidad [ $\overline{lat} = -34.4$  y  $\sigma = \pm 2.4$ ].

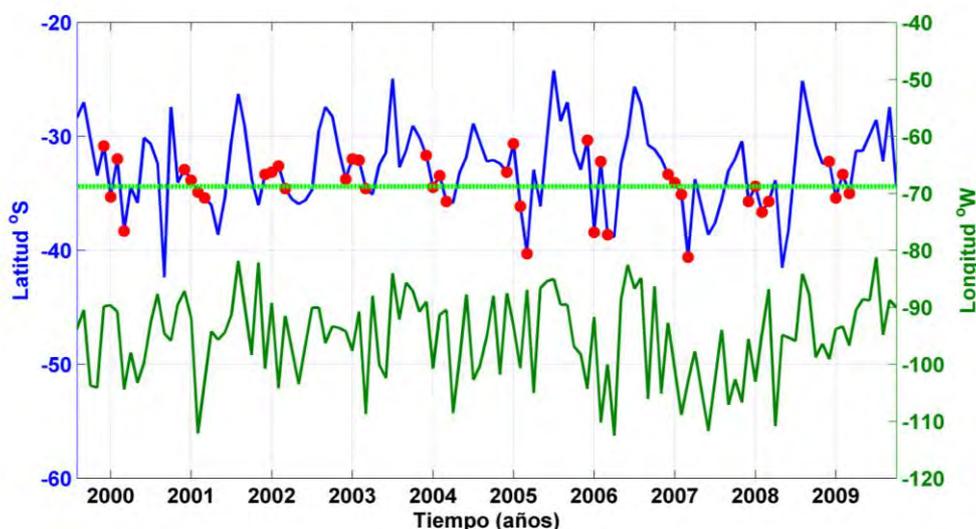
22

23 En cambio, el desplazamiento del vértice de intersección *versus* la longitud (contorno  
 24 verde), no mostró un patrón estacional claro, aunque, la longitud se centra en una  
 25 longitud media  $\overline{lon} = -95.3^\circ$  y una variabilidad  $\sigma = \pm 7.4$ . En el periodo de verano,  
 26 el vértice se desplaza al máximo hacia la zona oceánica alcanzando la longitud  
 27  $\sim 110^\circ W$ .

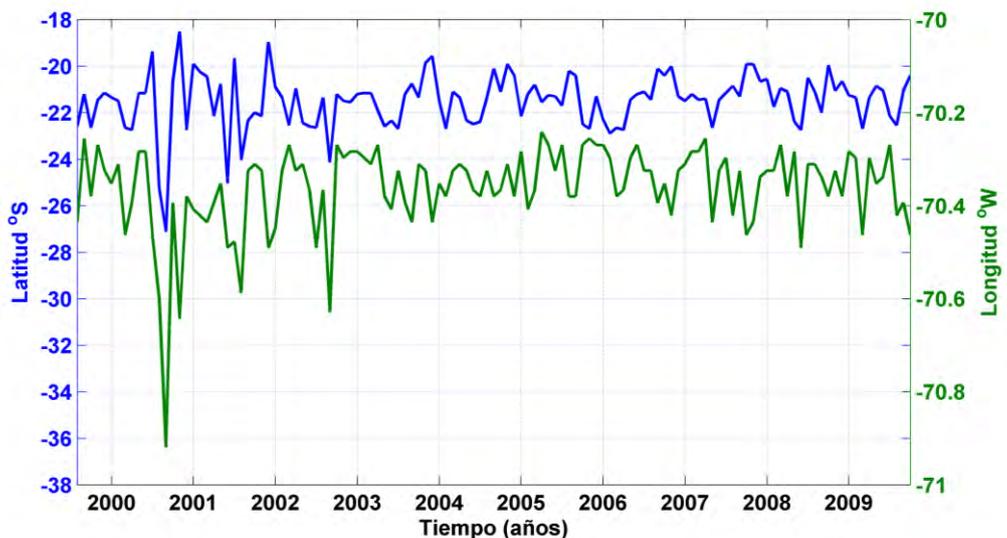
28

29 La Figura 60 muestra el desplazamiento costero *versus* la latitud, asociado al esfuerzo  
 30 del viento zonal ( $\tau_x = 0$ ), revelando un comportamiento estacional que alcanzó su  
 31 máximo desplazamiento hacia el norte en primavera, y se centró en una latitud media  
 32  $\overline{lat} = -21.5^\circ$  y su variabilidad  $\sigma = \pm 1.2$ . En cambio, el desplazamiento costero *versus*

1 la longitud no mostró un comportamiento estacional claro, evidenciando una muy baja  
 2 variabilidad ( $\overline{\text{lon}} = -70.4^\circ$  y  $\sigma = \pm 0.1$ ).  
 3



4  
 5 Figura 59. Variabilidad espacio-temporal de la zona de intersección del esfuerzo del  
 6 viento zonal y meridional cero ( $\tau_x = \tau_y = 0$ ), respectivamente.  
 7



8  
 9 Figura 60. Variabilidad espacio-temporal del desplazamiento costero del esfuerzo del  
 10 viento zonal cero ( $\tau_x = 0$ ).  
 11

12 En síntesis, en la escala anual, la climatología de la TSM y el primer y segundo modo  
 13 de las FEOs mostraron que las mayores variaciones de la distribución de las isothermas  
 14 ocurren en primavera y verano. Estas variaciones de la TSM fueron coherentes con las  
 15 variaciones espaciales del esfuerzo del viento, indicando que las máximas variaciones  
 16 de la deflexión de las isothermas ocurren donde los esfuerzo del viento son más intensos,

1 destacando el intenso núcleo costero frente a las costa de Chile y que varió de acuerdo a  
2 las derivas de los vientos oeste que en primavera-verano alcanzó la zona más austral. En  
3 cambio, en la zona de la curvatura Chile-Perú donde el esfuerzo del viento es débil, se  
4 induce una menor ventilación sobre la TSM, lo que explicaría que en esta zona la TSM  
5 es muy conservativa en el tiempo, similar efecto se observa en la vecindad de la Deriva  
6 de Vientos Oeste (~110°W hasta 80°W).

7  
8 De acuerdo a la variabilidad espacio-temporal del esfuerzo del viento, se induce a  
9 fraccionar el área de estudio (zona interior y exterior) considerando los esfuerzos del  
10 viento meridional-zonal cero. Los resultados mostraron en la superficie que la zona  
11 interior del esfuerzo del viento es mínimo lo que inducen que las isothermas no se  
12 deflectan y solo varían estacionalmente, en cambio, en la cercanía de la costa éstas se  
13 deflectan abruptamente hacia el norte. Pero en primavera y verano, las isothermas se  
14 curvan producto del flujo hacia el sur de las velocidades del transporte de Ekman y las  
15 intensas velocidades geostróficas hacia el norte favorecen la deflexión de las isothermas  
16 costeras hacia el norte.

17  
18 Las velocidades subsuperficiales (20 m) del transporte de Ekman en la zona costera de  
19 velocidades las corrientes se desplazan hacia la zona oceánica, en cambio, las  
20 velocidades geostróficas continúan desplazándose hacia el norte. Por otro lado, al nivel  
21 de 50 m de profundidad las velocidades de Ekman se desplazan perpendicularmente  
22 hacia la costa y bifurcándose en la zona costera hacia el norte, en cambio, el flujo  
23 geostrófico continua desplazándose hacia el norte.

24  
25 En la superficie de la región exterior norte del esfuerzo cero, la lengua cálida  
26 proveniente de la zona ecuatorial durante primavera-verano resaltó el flujo de Ekman en  
27 la misma dirección de la lengua cálida, quedando atrapada en la zona de la curvatura del  
28 norte de Chile. En cambio, el flujo geostrófico paralelo a la costa desplaza las isothermas  
29 hacia la zona oceánica y en la zona de la curvatura el flujo bordea la esfera cálida.

30  
31 Finalmente, la variabilidad espacio-temporal de la zona de intersección del esfuerzo del  
32 viento zonal y meridional mostró un comportamiento latitudinal estacional centrado en

1 la latitud de 30,4°S con una variabilidad de  $\pm 3.3^\circ$ , en cambio, el comportamiento  
2 longitudinal está centrado en 95,3°W con una variabilidad de  $\pm 7.4^\circ$ .

3

#### 4 **6.4.2. Análisis del acoplamiento físico-biológico relacionado con el desove y el** 5 **proceso de transporte**

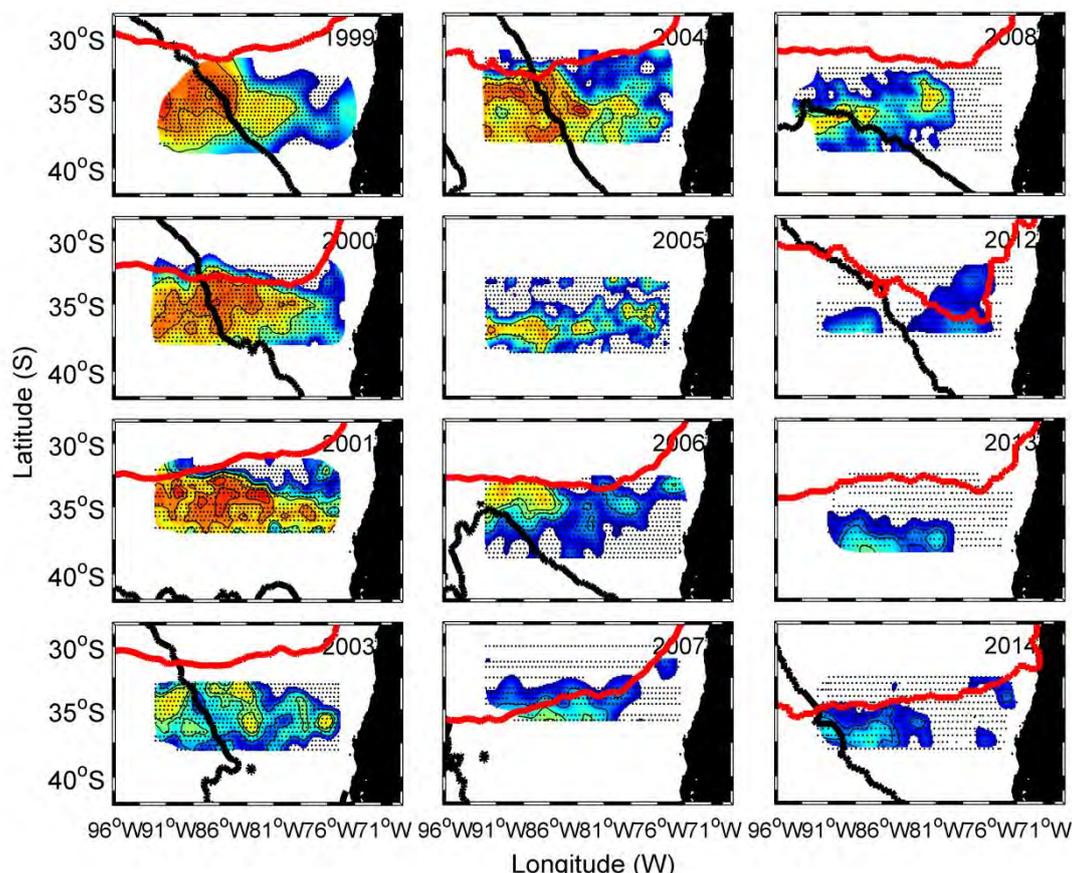
6 En los puntos anteriores se ha realizado una detallada descripción de los principales  
7 rasgos y procesos oceanográficos del área de estudio, con foco principal en el área  
8 oceánica frente a Chile centro-sur, donde se encuentra el área principal de desove de  
9 jurel, el área de la curvatura del continente situada entre el norte de Chile y el sur de  
10 Perú, en la cual se desarrollan desoves secundarios en términos de abundancia y en  
11 donde se encuentra ubicada el área principal de desove según los registros acústicos  
12 presentados en este estudio. Uno de los aspectos relevantes de este estudio es la  
13 identificación de procesos oceanográficos asociados al desove y al proceso de  
14 transporte. A continuación se presentan resultados asociados a este punto.

15

##### 16 *6.4.2.1. Área de desove principal del jurel y esfuerzo del viento*

17 Uno de los hallazgos relevantes de este capítulo fue la delimitación que puede  
18 establecerse en función de las isolíneas del esfuerzo del viento igual a cero, en la  
19 componente zonal ( $\tau_x = 0$ ) y en la componente meridional ( $\tau_y = 0$ ) (ver Figura 58).  
20 Este enfoque reveló que en las cercanías de la intersección de ambas isolíneas de Tau=  
21 cero, el efecto del viento superficial es nulo o muy débil, incrementándose a medida que  
22 estas isolíneas se separan latitudinalmente al ir acercándose a la región costera (<  
23 85°W). Además, este análisis sugirió que al interior del área delimitada por estas  
24 isolíneas, el viento que predomina tiene una orientación noreste, promoviendo el  
25 movimiento de la capa superficial del mar en esta dirección (dirección de conexión  
26 océano-costa). Para analizar la relación entre esta zona y la distribución espacial del  
27 desove en la Figura 61 se integraron estos dos procesos desde una perspectiva interanual  
28 considerando el esfuerzo del viento para el mes de Noviembre (máxima actividad  
29 reproductiva). De acuerdo a este análisis el porcentaje de desove registrado al interior de  
30 esta área correspondió al 54,3%, 64,7%, 96,3%, 74,6%, 49,7%, 93,2%, 87,8%, 82,3%,  
31 39,8%, 100% y 91,7% para los años 1999, 2000, 2001, 2003, 2004, 2006, 2007, 2008,  
32 2012, 2013 y 2014 respectivamente. De esta manera, se identificó una asociación,

1 recurrente entre el área de desove y el área de bajo estrés de viento con predominancia  
 2 noreste, situación que pudiese contribuir a la eclosión larval bajo condiciones de  
 3 estabilidad de la columna de agua, además de promover el transporte mediado por  
 4 viento hacia el sector noreste en la capa superficial.

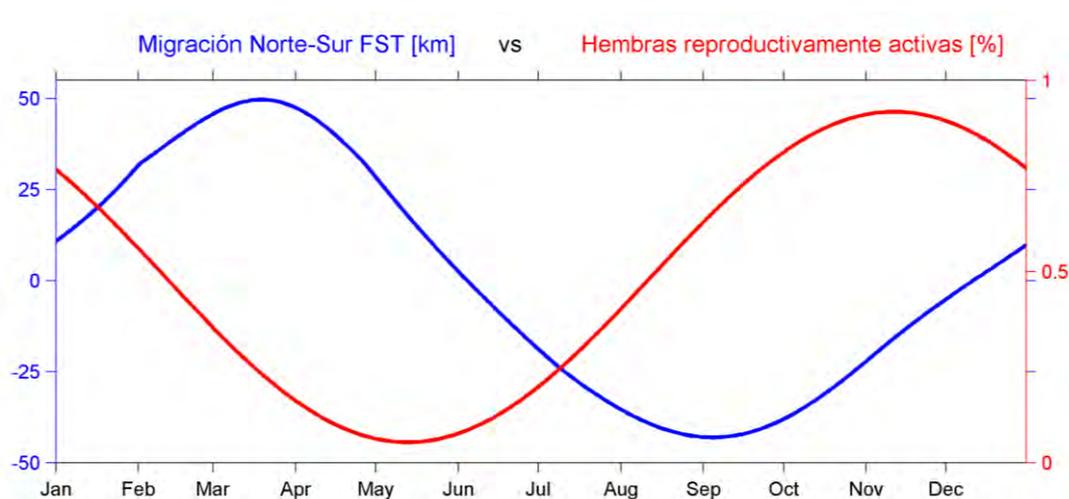


5  
 6 Figura 61. Intersección del esfuerzo del viento zonal (contorno rojo) y meridional  
 7 (contorno negro) cero ( $\tau_x = \tau_y = 0$ ) en relación al área de desove de jurel para el  
 8 periodo 1999-2014. En el año 2005 no pudo realizarse este análisis por inconvenientes  
 9 asociados al dato de viento.  
 10

#### 11 6.4.2.2. Área de desove principal del jurel y ubicación del Frente Subtropical

12 Uno de los rasgos oceanográficos que han sido vinculados con la dinámica reproductiva  
 13 del jurel de forma recurrente es la ubicación del frente subtropical (FST), no obstante la  
 14 identificación espacial de esta estructura resulta compleja y su asociación con aspectos  
 15 relacionados a la reproducción no ha sido analizado estadísticamente. Se analizó la  
 16 relación entre la reproducción de jurel desde dos perspectivas complementarias: i) el  
 17 análisis del ciclo anual de la migración meridional del FST respecto al ciclo anual de la  
 18 reproducción, y ii) la ubicación espacial del desove de jurel respecto a la ubicación del

1 FST en la temporada de máxima actividad reproductiva. La Figura 62 muestra el patrón  
 2 estacional de la migración norte sur del FST en la misma escala que la evolución  
 3 temporal del porcentaje de hembras reproductivamente activas, la cual alimentó al *sub-*  
 4 *modelo* de sincronización del desove en el modelo biofísico. El FST fue identificado  
 5 espacialmente mediante la posición de la isoterma de 14°C a 150 metros de  
 6 profundidad. Los resultados sugirieron un importante asociación en el *timing* de los  
 7 ciclos anuales de este proceso: el patrón del FST muestra una migración hacia el norte  
 8 durante el otoño-invierno alcanzando su máximo en Abril, desde cuando comienza a  
 9 moverse hacia el sur para alcanzar su máxima extensión en Septiembre. En el caso del  
 10 ciclo reproductivo de jurel, este alcanza niveles mínimos durante la temporada de  
 11 otoño-invierno (Mayo), que corresponde a la época de engorda, mientras que durante  
 12 primavera registra niveles máximos asociados a la temporada de desove (Octubre-  
 13 Diciembre).



14  
 15 Figura 62. Relación entre el ciclo anual de la migración meridional (valores positivos  
 16 hacia el norte y negativos al sur) del frente subtropical y el ciclo anual reproductivo del  
 17 jurel.

18  
 19 Una vez evaluado el acoplamiento temporal, se evaluó la correlación espacial entre la  
 20 ubicación meridional del FST a los 82°W (posición zonal media de los desoves  
 21 históricos de jurel) respecto a la latitud media del desove anual de jurel obtenido desde  
 22 los cruceros de evaluación (ver Figura 12 para desove espacial). El cálculo de la  
 23 posición latitudinal media del desove fue ponderado de acuerdo a la densidad de huevos  
 24 de acuerdo a:

25  
 26

$$LM = \sum(l_i * d_i) / \sum d$$

2

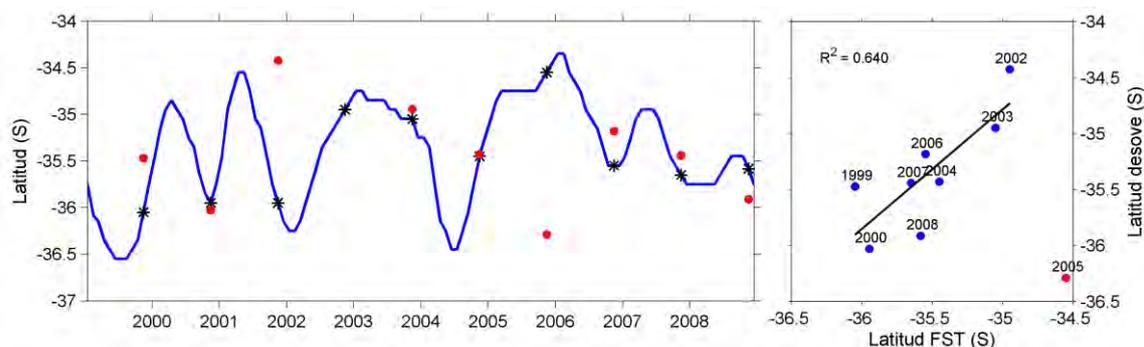
3 donde

4  $l_i$  = latitud de cada estación de muestreo de ictioplancton.5  $d_i$  = densidad de huevos de jurel registrada en cada estación de muestreo.

6

7 La Figura 63a muestra la evolución interanual de la posición meridional del FST (en  
8 azul) y la latitud media del desove espacial (puntos rojos). La ubicación del FST mostró  
9 una importante variabilidad interanual en la extensión de la migración norte-sur, sin  
10 embargo independiente de esta situación, se observó un alto nivel de consistencia (no  
11 más de un grado geográfico de variación) en su ubicación durante el mes de noviembre  
12 (máximo reproductivo del jurel). Esto último tiene un alto nivel de impacto en la  
13 correlación espacial de los dos procesos, esto se observó en la Figura 63b donde se  
14 analizó la correlación espacial con un  $R^2 = 0,64$  (a excepción del año 2005 que se  
15 consideró un año anómalo en términos estadísticos) lo que confirmó cuantitativamente  
16 la asociación entre la ubicación del FST y el área de desove oceánico de jurel como ya  
17 había sido propuesto anteriormente (Núñez *et al.* 2008, Cubillos *et al.* 2008, Vásquez *et*  
18 *al.*, 2013).

19



20

21 Figura 63. a) migración meridional estacional del FST y ubicación meridional media del  
22 desove de jurel, se indican en asterisco los meses de Noviembre utilizados para el  
23 análisis de regresión; b) regresión lineal entre la ubicación media del FST en Noviembre  
24 y la latitud media del desove anual de jurel frente a Chile centro-sur.

25

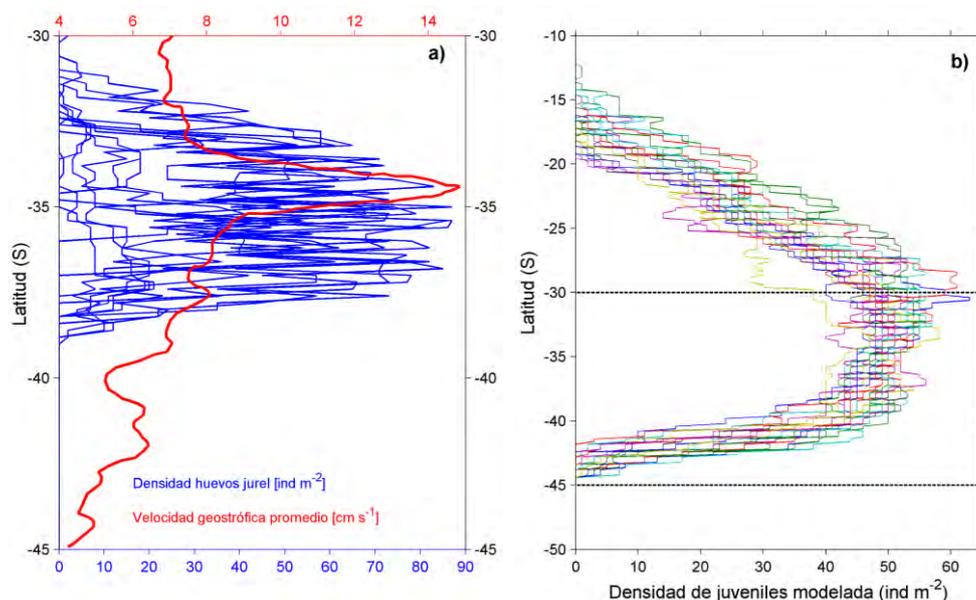
#### 26 6.4.2.3. Procesos de dinámica oceanográfica relacionada con el transporte de huevos y 27 larvas de jurel

28 Uno de los puntos críticos en la modelación del transporte de estadios tempranos de  
29 desarrollo de poblaciones de peces, es la identificación de los procesos oceanográficos

1 involucrados en distintas escalas espacio-temporales que modulan el éxito del transporte  
2 y determinan los patrones de conectividad poblacional. Uno de los hallazgos relevantes  
3 del análisis oceanográfico fue el gradiente meridional de la velocidad de la corriente  
4 hacia la costa en el estrato donde se distribuyen huevos y larvas de jurel (ver Figura 49)  
5 y que puede tener una influencia mayor en la conexión entre las zonas oceánica y  
6 costera. Para indagar en el acoplamiento espacial entre el proceso de desove y el  
7 posterior transporte y la velocidad de corriente, la Figura 64a presenta la velocidad  
8 promedio latitudinal de la corriente durante la temporada de primavera-verano (época  
9 de máxima actividad reproductiva de jurel) en relación con la frecuencia latitudinal del  
10 desove de jurel para todos los años en que se realizaron cruceros de evaluación espacial  
11 del desove (ver Figura 62). Los resultados mostraron una alta coherencia espacial entre  
12 el área de incremento de la corriente hacia la costa ( $\sim 35^{\circ}\text{S}$ ) y el centro histórico de  
13 desove de jurel frente a Chile centro-sur evidenciando un acoplamiento biofísico  
14 recurrente que resulta más relevante aun considerando la extensión del área bajo  
15 estudio. Al mismo tiempo, se analizó la frecuencia latitudinal de la distribución de la  
16 ubicación final del total de los individuos modelados posterior a 4 meses de transporte  
17 (periodo de duración larval). La Figura 64b es el resultado de este último análisis, que  
18 evidenció una extensión hacia el norte de los centros de distribución de juveniles de  
19 jurel que se extendió entre los  $12^{\circ}$  y  $45^{\circ}\text{S}$  con una forma de distribución asimétrica  
20 centrada en los  $30^{\circ}\text{S}$  y con mayor extensión la norte demostrando un transporte  
21 preferente hacia el norte y con mayor probabilidad hacia la costa producto de la acción  
22 conjunta de las corrientes y el viento en superficie.

23

24



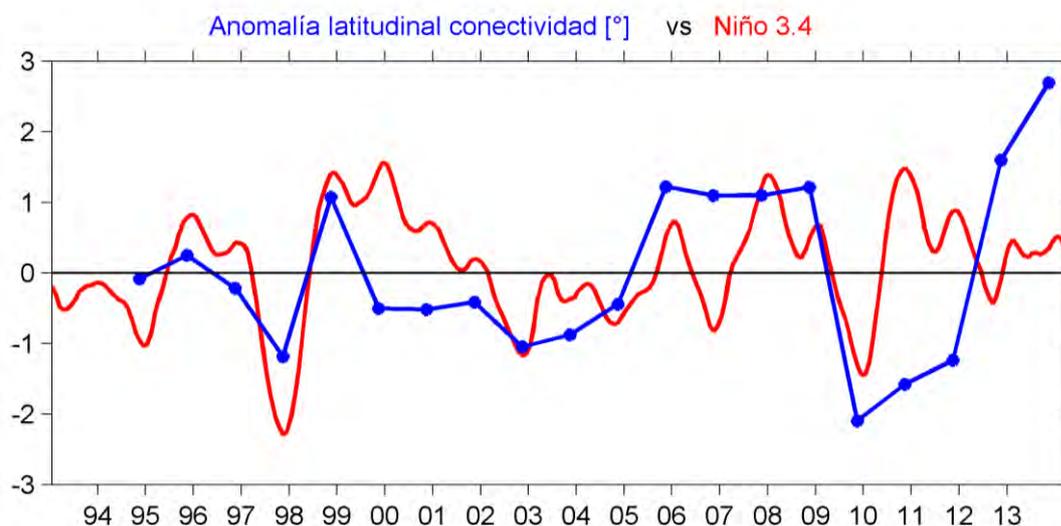
1

2 Figura 64. a) relación entre la velocidad geostrófica media por banda latitudinal y la  
 3 densidad de huevos de jurel observada en los cruceros planctónicos de evaluación  
 4 directa; b) distribución latitudinal de los juveniles de jurel (4 meses de edad) modelados  
 5 biofísicamente, las líneas punteadas señalan los límites del panel a) para una mayor  
 6 comprensión.

7

8 Además de los eventos locales, se indagó en la relación que pudiesen tener los centros  
 9 de dispersión de productos del desove respecto a procesos oceanográficos en una escala  
 10 espacio-temporal que excede al campo local. Se analizó el grado de correlación de la  
 11 posición del FST respecto a la expansión hacia el noreste de la distribución de los  
 12 juveniles obtenida desde la modelación biofísica, sin observarse una relación aparente,  
 13 sugiriendo que la relación está más ligada al evento de desove que maximiza el  
 14 transporte más que a la ubicación final de los individuos modelados. Uno de los  
 15 procesos oceanográficos en escala interanual más extremos y característicos del Pacífico  
 16 suroriental es El Niño que a través de teleconexiones desde el Ecuador modula aspectos  
 17 relacionados con la temperatura, los centros de presión y la dinámica de las corrientes.  
 18 Además, este evento ha sido señalado como crítico para la conectividad del jurel. La  
 19 Figura 65 muestra el resultado de un análisis exploratorio que relaciona la anomalía  
 20 latitudinal de la distribución espacial de juveniles modelados biofísicamente (ver Figura  
 21 73) desde el área principal de desove con la señal ecuatorial de El Niño 3.4, sugiriendo  
 22 un acoplamiento entre estos procesos, donde ante eventos el niño positivos (e.g. 1998,  
 23 2010) la manifestación espacial de la distribución de juveniles se ve restringida hacia el  
 24 sur, mientras que durante fases negativas de ENSO (e.g. 1999, 2008) aumenta la

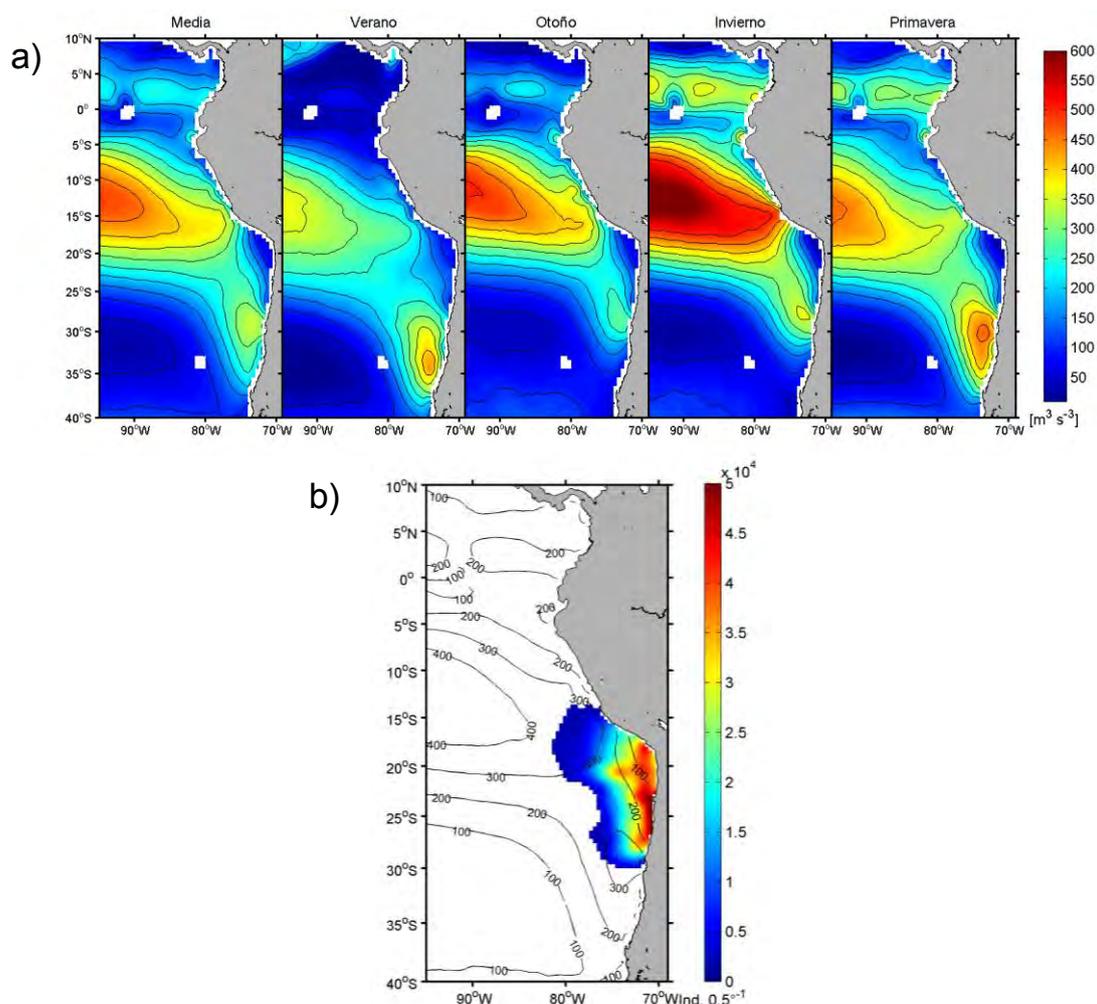
1 extensión norte del transporte biofísico, no obstante la conectividad con la zona de  
 2 crianza se manifiesta todos los años.



3  
 4 Figura 65. Relación entre el índice El Niño 3.4 (escala inversa para propósitos  
 5 comparativos) y la anomalía de la extensión latitudinal de la distribución espacial de los  
 6 juveniles modelados biofísicamente.

7  
 8 Finalmente, un aspecto relevante para la historia de vida temprana del jurel es el  
 9 proceso observado en la zona norte de Chile y sur de Perú, donde se encuentra ubicada  
 10 la principal área de crianza conocida para la especie en el Pacífico suroriental (Arcos *et*  
 11 *al.*, 2001). Los análisis de la dinámica oceanográfica revelaron un área de baja actividad  
 12 cinética y temperatura comparativamente mayor en el sector costero asociado al área de  
 13 crianza. Por otra parte, las simulaciones interanuales de transporte en esta zona  
 14 evidenciaron importantes niveles de retención de estadios tempranos de jurel, además de  
 15 conectividad con las zonas de desove ubicadas en Perú y la zona oceánica de Chile  
 16 centro-sur. Otra particularidad de la zona de curvatura del continente (donde se sitúa el  
 17 área de crianza) es el bajo nivel de estrés del viento. La Figura 66a muestra la  
 18 climatología de la turbulencia producto del estrés del viento en el Pacífico suroriental,  
 19 donde destacaron los altos niveles de estabilidad en el área de crianza de jurel, los que  
 20 constituyeron los centros de menor turbulencia a nivel costero desde el Ecuador al sur.  
 21 Estos bajos niveles de estrés del viento, generan bajos niveles de transporte de Ekman  
 22 costa afuera los que se vinculan con los altos niveles de retención costera. La Figura 66b  
 23 muestra el resultado de todas las simulaciones biofísicas realizadas en el Norte de Chile  
 24 (período 1994-2014), evidenciando que el 74,6% de los individuos modelados se  
 25 mantuvieron retenidos en condiciones bajo los  $200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-3}$  que indica condiciones de

1 bajos estrés de viento y baja turbulencia. De esta manera, el sector de la curvatura del  
 2 continente (sur de Perú y norte de Chile) evidenció condiciones de alta retención, mayor  
 3 temperatura y baja limitación de alimento, lo que favorece a la formación de  
 4 cardúmenes de jureles juveniles y pre-reclutas. En futuras versiones del esquema de  
 5 modelación biofísica será necesario identificar que procesos oceanográfico-climáticos  
 6 podrían alterar estas condiciones para la formación del área de crianza de jurel.  
 7



8  
 9 Figura 66. a) climatología de la turbulencia producto del viento para el Pacífico  
 10 suroriental; b) distribución de individuos de 120 días de edad simulados mediante  
 11 modelación biofísica en el norte de Chile durante el periodo 1994-2014, junto con los  
 12 contornos de la señal media de la turbulencia producto del viento.

13  
 14  
 15  
 16  
 17  
 18  
 19

## 6.5. Índices de reclutamiento (1994-2014) para el jurel asociado a rasgos biofísicos en la región centro-sur de Chile y Perú.

### 6.5.1. Dinámica espacial del reclutamiento

Uno de los objetivos principales de este estudio fue la obtención de indicadores asociados a la dinámica del reclutamiento de jurel mediante modelación biofísica. Además, considerando que esta aproximación es espacialmente explícita fue posible analizar la señal espacial del pulso de reclutamiento biofísico desde las distintas áreas de desove hacia el área de crianza/reclutamiento.

El Anexo I muestra las trayectorias realizadas por todos los individuos exitosamente reclutados provenientes de la zona de desove de Perú, además en el extremo derecho se observa un histograma porcentual de las bandas latitudinales donde ocurrió el reclutamiento modelado. Este análisis demostró que individuos provenientes de Perú reclutarían mayoritariamente entre el 16° y 22°S con máximos centrados entre 18° y 19°S. Sin embargo, las trayectorias de transporte muestran diferencias en su extensión hacia el norte dependiendo tanto de las condiciones hidrodinámicas hacia el transporte como de la ubicación de las áreas de desove (reproducción). De acuerdo a lo reportado por Ayon & Correa (2013) se observaron cambios en las áreas de reproducción de jurel, las cuales fueron incorporadas en el modelo biofísico, provocando que posterior al año 2000 las trayectorias de transporte se extendieran más al norte, sugiriendo que ante escenarios de desove más al sur, la expresión espacial del área de crianza puede extenderse en esta dirección. Por otra parte, cambios en las condiciones hidrodinámicas mostraron un efecto en las trayectorias de desplazamiento bajo iguales condiciones espacio-temporales de desove. Durante el periodo 1997-1999 caracterizado por eventos El Niño se observó una mayor extensión hacia el norte de las trayectorias de desplazamiento, lo que impactó en la extensión espacial del área de crianza modelada (ver Figura 65).

El mismo análisis se ejecutó para el área de desove de Chile norte en la cual, a diferencia de la otras áreas de desove, los individuos reclutados fueron retenidos dentro del área de crianza y no requieren ser transportados. El Anexo II muestra estos resultados en donde los individuos que reclutaron provenientes de esta zona, lo hicieron

1 preferentemente entre los 18° y 28° con máximos centrados entre 22° y 24°S denotando  
2 variabilidad interanual que produce una movilidad norte-sur en los centros de  
3 reclutamiento modelado. Finalmente, el Anexo III muestra las trayectorias y las bandas  
4 latitudinales en donde reclutaron exitosamente los individuos provenientes de la zona  
5 centro-sur de Chile. Los resultados mostraron una banda de pulso de reclutamiento  
6 centrado entre los 22° y 30°S pudiendo extenderse incluso hasta los 18°S en el extremo  
7 norte del área de reclutamiento modelada. No obstante se apreciaron diferencias  
8 interanuales en la magnitud de la conectividad, un patrón general de conectividad  
9 muestra que los individuos transportados exitosamente al área de crianza provinieron  
10 principalmente de desoves ocurridos al oeste de los 85°W al interior del área principal  
11 de desove siguiendo trayectorias acopladas espacialmente con el flujo superficial de la  
12 corriente (ver Figura 43) el cual maximiza su velocidad hacia la costa en la zona del  
13 frente subtropical y gira hacia el norte entre 75° y 80°W promoviendo el transporte de  
14 estadios tempranos de jurel hacia el área de crianza.

15  
16 Se evidenció una alta conectividad entre todas las áreas de desove y el área de  
17 crianza/reclutamiento, mostrando un alto nivel de dispersión poblacional del jurel y  
18 entregando evidencia para rechazar las hipótesis de poblaciones aisladas auto-sustentada  
19 mediante reclutamientos locales. De esta manera, es probable encontrar individuos  
20 juveniles provenientes del área principal de desove y organismos producto de desoves  
21 menos abundantes (ver sección 6.7.2.3. más adelante), pero con importante contribución  
22 desde desoves locales en el norte de Chile y desde el sector costero de Perú (niveles de  
23 conectividad y retención sobre el 50% en la mayoría de los casos). Finalmente, este  
24 grado de conectividad entre las áreas de desove y el área de reclutamiento propuso un  
25 área de reclutamiento modelado que se conecta espacialmente con lo obtenido desde  
26 observaciones de campo en este estudio (ver sección 6.4), sugiriendo que el origen de  
27 estos reclutas observados es proveniente del área principal de desove situada en la zona  
28 centro-sur de Chile con aportes de las áreas de desove secundaria del norte de Chile y el  
29 sector costero de Perú.

### 30 31 **6.5.2. Dinámica temporal del reclutamiento**

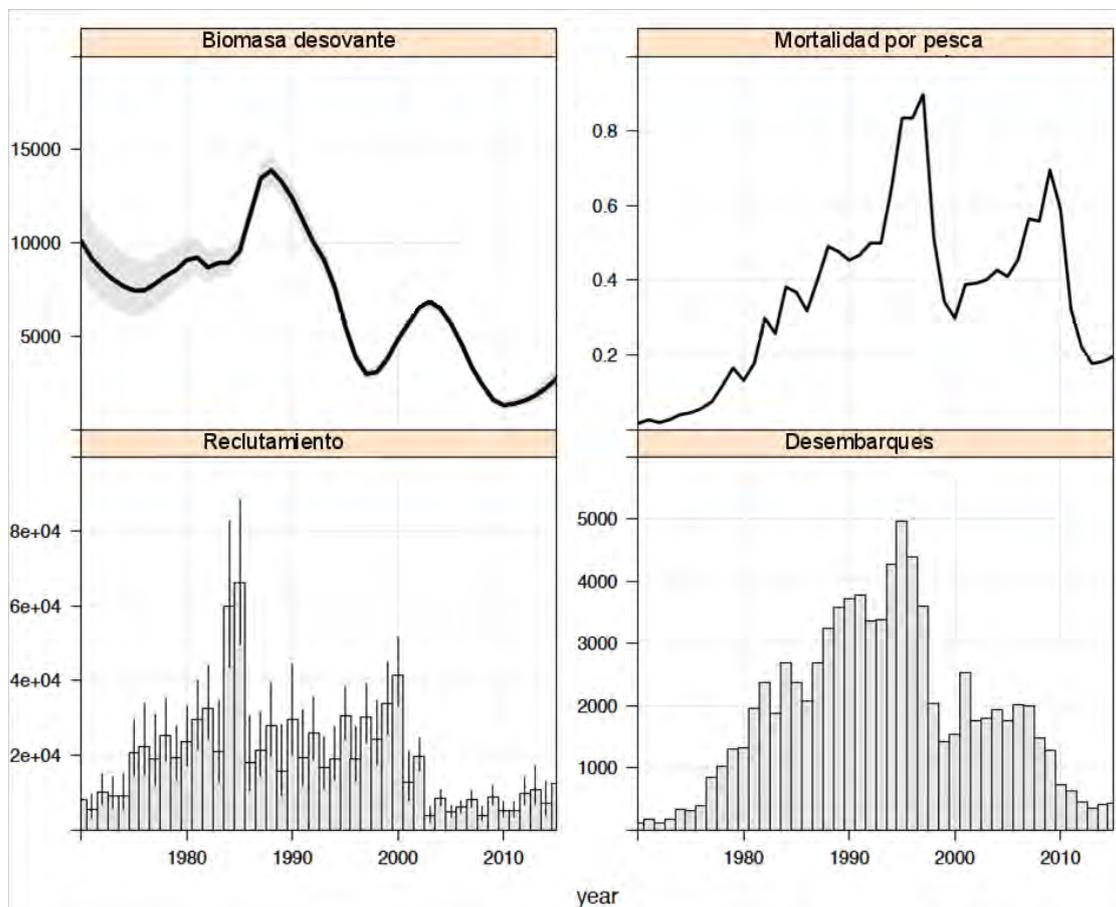
32 Uno de los objetivos finales de este estudio fue "realizar predicciones de reclutamiento a  
33 nivel de los juveniles de jurel". Bajo el esquema de modelación planteado, el índice de

1 reclutamiento biofísico contrastó dos etapas clave de la historia de vida temprana de  
2 peces pelágicos que tienen directa incidencia en la dinámica del reclutamiento: primero,  
3 la magnitud del desove anual, la cual se consideró relacionada con el potencial  
4 reproductivo de la biomasa desovante: segundo, el proceso de transporte de huevos,  
5 larvas y juveniles de jurel hasta llegar a las áreas de crianza/reclutamiento, el cual  
6 estuvo relacionado con la sobrevivencia de esta etapa de la historia de vida que  
7 considera un alto nivel de pérdidas para la población. La obtención de este indicador de  
8 reclutamiento, además de ser de alta utilidad en el entendimiento del modelo conceptual  
9 de la dinámica del ingreso de las clases anuales, tuvo como característica el ser  
10 independiente de la información proveniente de la actividad pesquera y puede ser  
11 utilizado como información de referencia para la estimación del reclutamiento en los  
12 modelos de dinámica poblacional edad estructurados. Además, tomando en cuenta que  
13 el reclutamiento es considerado como la magnitud de individuos que alcanzan el grupo  
14 de edad 1, el indicador de reclutamiento biofísico se consideró de alta utilidad como  
15 predictor (un año antes) de la intensidad del reclutamiento futuro.

16

17 En la actualidad, el comité científico de la Organización Regional de pesca del Pacífico  
18 Sur cuenta con un modelo edad estructurado, el cual incorpora información de distintas  
19 fuentes (pesquería, cruceros, seguimiento, parámetros biológicos; ver sección 5.5.4.1)  
20 para la estimación del reclutamiento (como grupo de edad 1), es por esto que esta pieza  
21 de información fue utilizada para evaluar el grado de sintonía con el indicador de  
22 reclutamiento biofísico con el objeto de indagar el nivel de explicación del modelo  
23 biofísico respecto a la estimación que es utilizada para determinar el *status* de la  
24 pesquería de jurel en el Pacífico suroriental. La Figura 67 muestra las principales salidas  
25 del modelo estadístico edad-estructurado para la evaluación de stock de jurel. El foco de  
26 atención estuvo puesto en el reclutamiento poblacional, mostrado en el panel inferior  
27 izquierdo, donde se observan que los mayores niveles de reclutamiento fueron  
28 estimados para los años 1984-1985, periodo que fue seguido por niveles inferiores y  
29 sostenidos en el tiempo. En el periodo del presente estudio (1994-2014), se observa un  
30 máximo asociado al año 2000 desde cuando se observó un decaimiento de los niveles de  
31 reclutamiento oscilando en torno a los 20.000 millones de individuos. De esta manera,  
32 tomando como referencia el año 1985 donde se registraron los máximos reclutamientos,  
33 al año 2008 se obtiene una diferencia del 94% (mínimo histórico), mientras que al año

- 1 2015 se observó una mejoría en este indicador poblacional restringiéndose la diferencia  
2 a un 82%.



- 3  
4 Figura 67. Indicadores poblacionales asumiendo un solo stock. Superior izquierda  
5 biomasa desovante en miles de toneladas. Superior derecha tasa de mortalidad por pesca  
6 ( $\text{año}^{-1}$ ). Gráfica inferior izquierda reclutamiento (millones) a la edad 1 y gráfica restante  
7 representa a los desembarques en miles de toneladas.

8

- 9 En consecuencia a los objetivos, este indicador fue contrastado con dos piezas de  
10 información obtenidas en el presente estudio, el indicador de producción de huevos y el  
11 índice de reclutamiento biofísico. Este procedimiento se realizó contrastando el  
12 reclutamiento desde la evaluación de stock con los indicadores biofísicos obtenidos el  
13 año inmediatamente anterior, asociando así el reclutamiento en un tiempo  $t$  al proceso  
14 reproductivo y de conectividad ocurrido en el año  $t-1$ . Es válido señalar que este  
15 procedimiento solo fue posible de llevar a cabo para el área principal de desove situada  
16 en la zona centro sur de Chile, pues en dicha zona es la única zona donde se pudo  
17 establecer condiciones de desove interanuales que permiten elaborar una serie de tiempo  
18 continua en el periodo de estudio. La Figura 68a muestra las tres series analizadas como  
19 índices adimensionales con fines comparativos. En primer lugar la serie de producción

1 de huevos mostró máximos niveles a fines de los 90' con un máximo en 1999 para luego  
2 decaer hacia el final de la serie interrumpida por un máximo en 2003. Al considerar esta  
3 serie como predictor del reclutamiento estimado en la evaluación de stock, se obtuvo un  
4  $R^2 = 0,51$ , resultando tener consistencia en las series y una relación media entre la  
5 intensidad del desove y el reclutamiento observado la temporada siguiente. Uno de los  
6 aspectos relevantes a desarrollar en futuras versiones de la modelación, es el  
7 establecimiento de condiciones interanuales conocidas del desove en las zonas de Perú y  
8 el norte de Chile, donde la carencia de información respecto a la distribución y  
9 abundancia de huevos (en Perú solo se informan larvas decadales) impidió tener un  
10 cálculo anual del reclutamiento biofísico.

11

12 Como ya se ha explicado anteriormente, el índice de reclutamiento biofísico  
13 correspondió a esta serie de producción ponderada por el éxito de la cohorte después de  
14 ser transportada hacia la zona de reclutamiento/crianza. Al correlacionar las series del  
15 índice biofísico con la proveniente de la evaluación de stock se obtuvo un  $R^2 = 0,660$ ,  
16 evidenciando una mejora del 11% en el poder predictor de la modelación biofísica  
17 respecto a la abundancia del grupo de edad 1 observado (o estimado) para el año  
18 siguiente. De esta manera, el resultado de la modelación biofísica resultó ser un  
19 predictor confiable para el reclutamiento, además de entregar información valiosa en  
20 términos del modelo conceptual detrás del modelo de evaluación de stock y respecto a  
21 la estructura de la población del jurel en el pacífico suroriental. La Figura 68b muestra  
22 una regresión entre ambos indicadores en la que se identificó que los años 1996, 1997 y  
23 1998 son los años en que las series mostraron un menor acoplamiento, los que  
24 coincidieron con cambios importantes en la cuenca el Pacífico suroriental asociado a la  
25 dinámica ecuatorial El Niño.

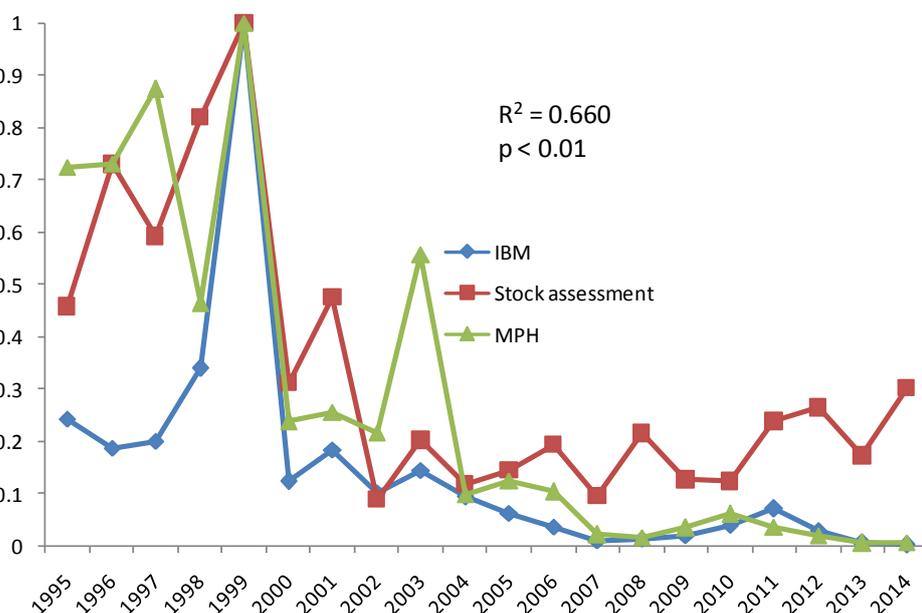
26

27 En estos años, los niveles de conectividad/sobrevivencia biofísica de estadíos tempranos  
28 no explicaron los altos niveles de reclutamiento observados, los que bajo el esquema  
29 propuesto, necesariamente se asociaron a mayores niveles de sobrevivencia en estados  
30 más tardíos de desarrollo (pre-reclutas en formación de cardúmenes). De acuerdo a lo  
31 sugerido por Arcos *et al.* (2004) el fenómeno de mayor presencia de juveniles en el  
32 sector costero e incremento en la abundancia del reclutamiento se debió a una mayor  
33 concentración debido al cambio en las condiciones del hábitat, el cual se comprimió

1 desde el norte al sur y desde el océano a la costa. Por otra parte, este fenómeno ha sido  
 2 atribuido a cambios en los patrones de circulación en la cuenca del Pacífico suroriental  
 3 asociado al evento El Niño, donde la dinámica del transporte zonal se debilita,  
 4 predominando la dinámica meridional favoreciendo el proceso de retención costera y de  
 5 transferencias norte-sur, lo que propiciaría eventos de redistribución de jurel juvenil  
 6 desde Perú hacia Chile (Gretchina, 2013).

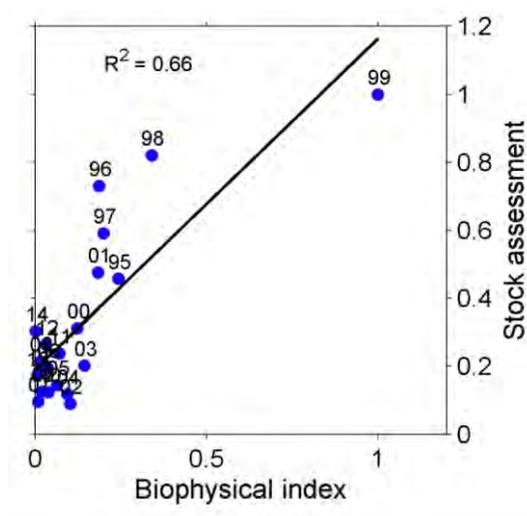
7

8 a)



9

10 b)



11

12 Figura 68. a) Series de tiempo del índice de reclutamiento biofísico (IBM), Índice de  
 13 Producción de Huevos (MPH) e Índice de reclutamiento desde un modelo estadístico  
 14 edad-estructurado (expresado como abundancia del grupo de edad 1); b) Regresión

1 lineal entre el índice de reclutamiento biofísico y el índice de reclutamiento proveniente  
2 de la evaluación de stock.

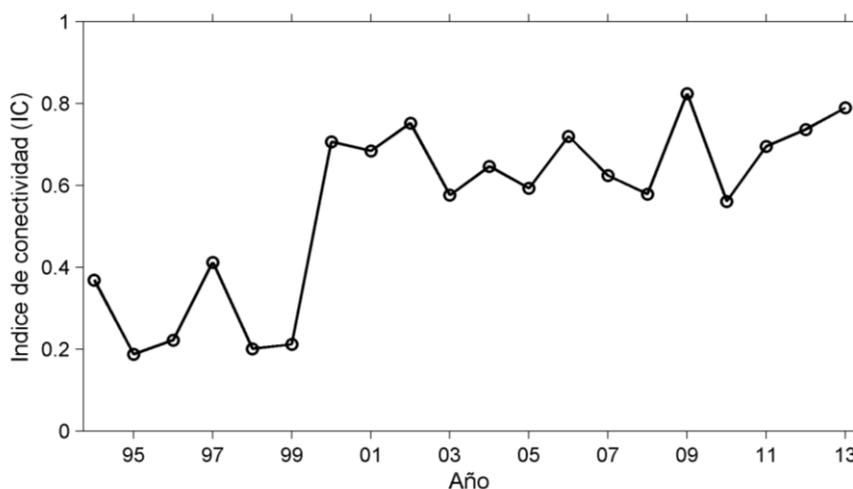
### 4 **6.6. Relación de conectividad entre la zona de desove-crianza en Chile Perú y su** 5 **aporte al reclutamiento global.**

6 La modelación biofísica utilizada en el presente estudio, involucró el acoplamiento de  
7 un modelo basado en el individuo con un modelo hidrodinámico. En este esquema de  
8 modelación las características poblacionales emergen de las propiedades individuales de  
9 los individuos modelados y su interacción, tanto con el medio como con otros agentes  
10 (Grimm *et al.*, 2006). En el caso del presente estudio, la modelación se inició con el  
11 proceso de desove de jurel el cual involucra un tiempo (*timing* del desove) y un espacio  
12 (área de desove) y continuó con la modelación del transporte de huevos, larvas y  
13 juveniles hasta los 120 días de edad. Durante este tiempo se contabilizaron todos los  
14 individuos que alcanzaron el criterio de reclutamiento y la integración de todos estos  
15 individuos entregó información respecto a la conectividad y el reclutamiento del jurel  
16 desde las distintas zonas de desove. Una de las características principales de esta  
17 modelación fue el criterio espacialmente explícito que posee, en donde en cada paso de  
18 tiempo fue posible obtener las variables que experimentó cada individuo entre ellas la  
19 posición espacial. De esta manera, las trayectorias de los individuos que han reclutado  
20 exitosamente pudieron ser trazadas en función de la edad que experimentaron. En este  
21 contexto la variabilidad espacio-temporal de las zonas de desove han sido reconocidas  
22 como factores importantes en el proceso de transporte y conectividad poblacional  
23 (Bartsch, 2005). Como se ha descrito anteriormente, en este estudio las condiciones  
24 espaciales iniciales para la modelación en Perú y el norte de Chile correspondieron a  
25 zonas de desove sin variabilidad interanual, generadas con información agregada en  
26 escala decadal. La información asociada a las áreas de desove (ver sección 6.1.1)  
27 sugiere que este último punto puede ser de mayor relevancia para el análisis de la  
28 conectividad, en la zona de desove de Perú donde las áreas de reproducción parecen  
29 tener menor recurrencia espacial respecto a lo observado en la zona norte y centro-sur  
30 de Chile y donde, además, se evidencia un fuerte gradiente meridional en las  
31 condiciones oceanográficas (a diferencia del norte de Chile donde existe mayor  
32 estabilidad), impactando en el acoplamiento biofísico. No obstante los resultados  
33 presentados son concluyentes en los patrones de conectividad, será necesario aumentar

1 los esfuerzos por contar con información más precisa en futuras versiones de este  
2 esquema de modelación.

3

4 En el Anexo I se reportan las trayectorias de todos los individuos reclutados para la  
5 zona de desove situada en Perú en donde se observó que una porción relevante de  
6 individuos desovados en esta zona es transportada hacia el sur, alcanzando la zona de  
7 reclutamiento modelada. Esta porción de individuos proveniente de pulsos de desove a  
8 lo largo de toda la temporada reproductiva, y que alcanza la zona de reclutamiento  
9 constituye el Índice de Conectividad Anual entre la zona de desove de Perú y el área de  
10 reclutamiento. La evolución temporal de este índice se muestra en la Figura 69 donde se  
11 observaron dos escenarios a lo largo del tiempo, el primero entre las temporadas de  
12 desove de 1994 y 1999 donde la proporción de individuos que fueron transportados al  
13 área de crianza fue menor a 0,4 (con una media de 0,27), mientras que en el periodo  
14 2000-2013 este índice mostró variabilidad interanual, pero con una señal notablemente  
15 más alta (media de 0,68). Es destacable que este cambio en este índice parece estar  
16 fuertemente ligado al cambio decadal del área de reproducción evidenciado para el jurel  
17 en esta área.



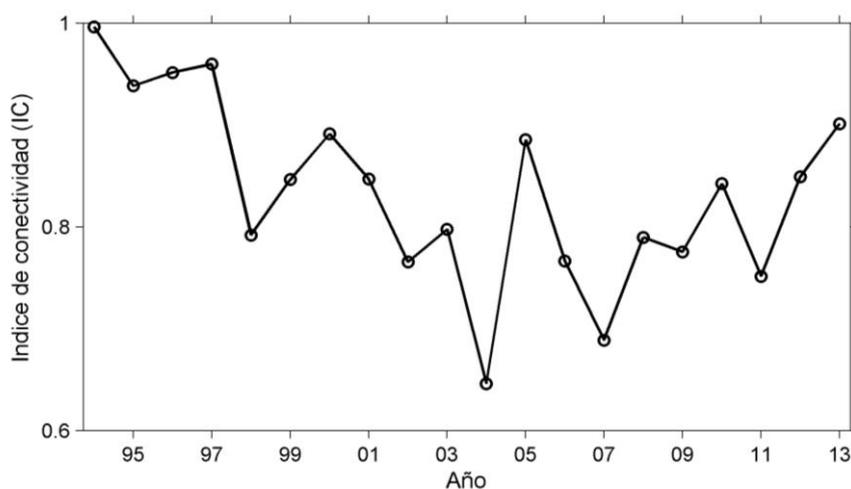
18

19 Figura 69. Índice de conectividad entre el área de desove de Perú y el área de crianza  
20 situada en el norte de Chile y Sur de Perú.

21

22 De la misma manera que lo descrito para el área de desove de Perú, se obtuvo el índice  
23 de conectividad para el área de desove del norte de Chile. Esta zona de desove tiene la  
24 particularidad, que se encuentra al interior del área de reclutamiento modelada, es por  
25 esto que el índice de conectividad puede ser, al mismo tiempo, entendido como un

1 índice de retención. La dinámica temporal de este índice mostró altos niveles al  
2 comienzo de la serie (periodo 1994-1997) con niveles por sobre 0,9 de  
3 conectividad/retención, luego se observa un sostenido decaimiento hasta un mínimo en  
4 el año 2004 donde se obtuvo un valor de 0,64. Hacia el final de la serie se observa un  
5 ascenso del indicador alcanzando un 0,9 para la temporada de desove 2013 (Figura 70).



6

7 Figura 70. Índice de conectividad entre el área de desove de Perú y el área de crianza  
8 situada en el norte de Chile y Sur de Perú.

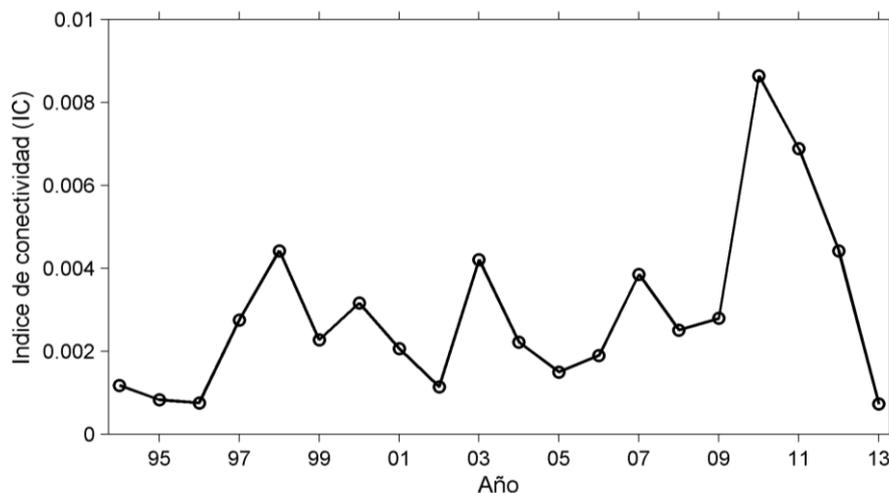
9

10 Finalmente, la Figura 71 muestra la evolución temporal del índice de conectividad entre  
11 el área principal de desove situada en la zona oceánica frente a Chile centro-sur y el área  
12 de reclutamiento. En esta serie se observaron niveles bajos de conectividad, situación  
13 esperable por la distancia que separa esta área de desove con el área de crianza. Se  
14 observa variabilidad interanual en este indicador fluctuando en torno al 0,2% en el  
15 periodo 1994-2009. Sin embargo, durante el año 2010 se observa un máximo en la serie  
16 con una valor cuatro veces más alto alcanzando el 0,86% para luego decaer al promedio  
17 histórico hacia el 2013 (Figura 71). Estos niveles de conectividad fueron relevantes  
18 considerando que las magnitudes del desove en esta zona son un par de órdenes de  
19 magnitud superior a lo observado en las otras áreas de desove, por lo que el aporte en  
20 términos poblacionales sigue siendo alto hacia el pulso de reclutamiento.

21

22

23

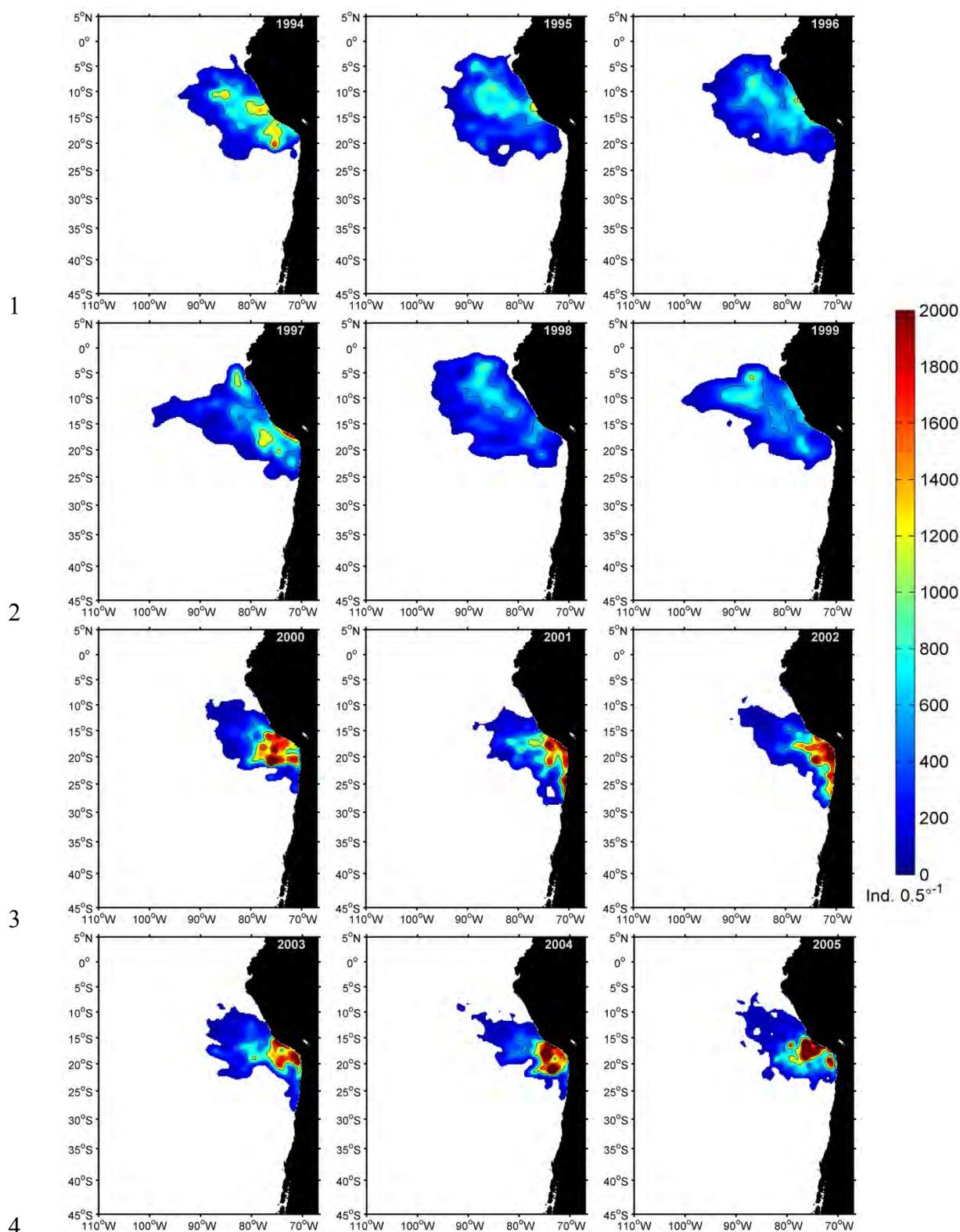


1

2 Figura 71. Índice de conectividad entre el área de desove de Perú y el área de crianza  
3 situada en el norte de Chile y Sur de Perú.

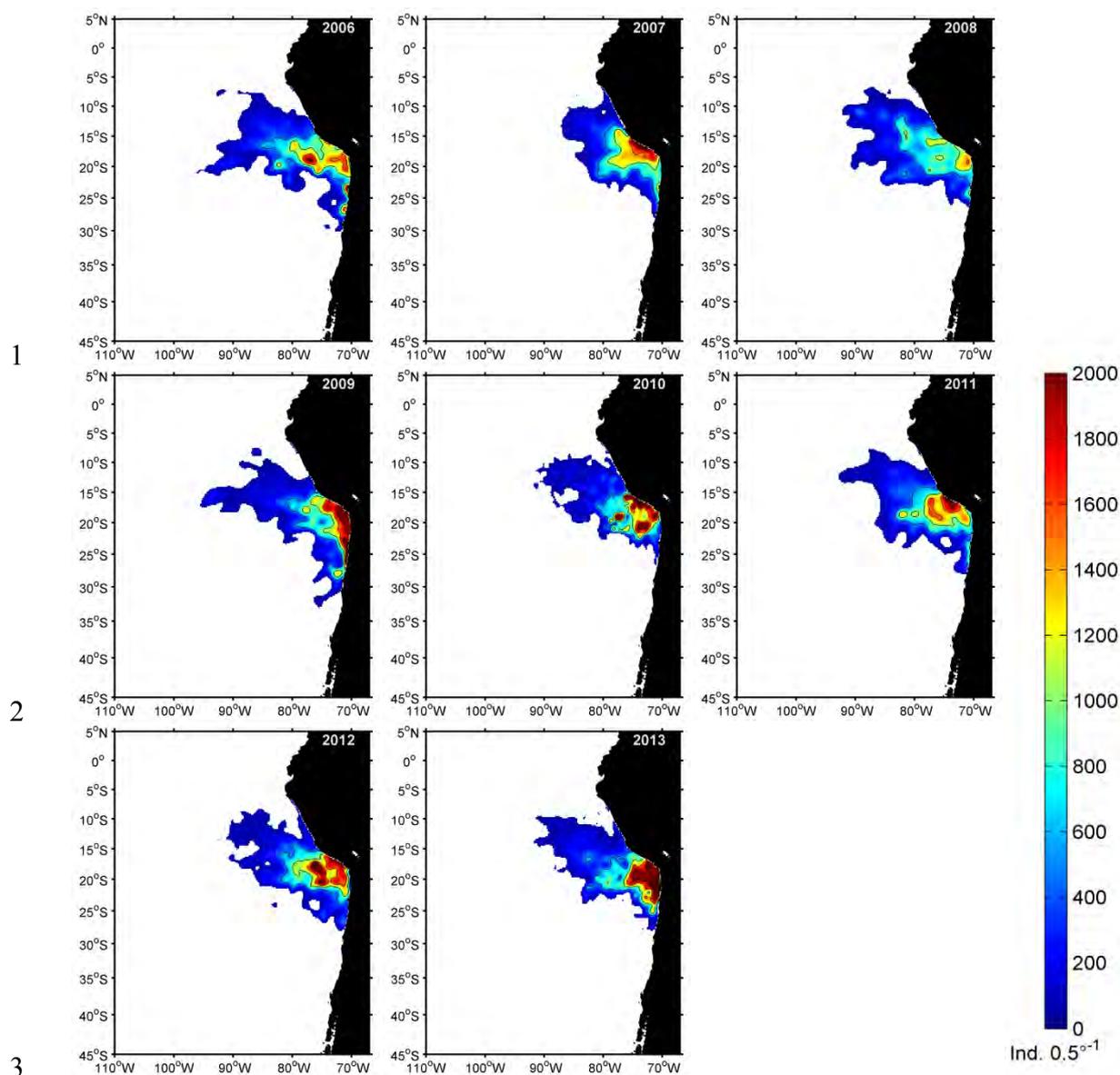
4

5 El Índice de conectividad anteriormente descrito, mostró la proporción de individuos  
6 exitosos en el arribo hacia el área de crianza modelada. Sin embargo, los organismos  
7 que sobrevivieron al proceso de transporte pueden tener un destino distinto al área de  
8 crianza generando nuevos patrones de conectividad y distribución espacial de áreas  
9 probable de encuentro de reclutas o juveniles de jurel. Es por esto que se realizó un  
10 análisis basado en matrices de conectividad que buscó relacionar las áreas fuente de  
11 desoves con las distintas zonas probables de destino de individuos sobrevivientes. En  
12 primer lugar, se analizó la distribución espacial de los sobrevivientes de jurel posterior a  
13 un proceso de transporte de 120 días para cada temporada y área reproductiva. La  
14 Figura 72 muestra la distribución espacial de los sobrevivientes de jurel para la zona de  
15 desove ubicada en Perú, en donde destacaron dos escenarios muy marcados en el patrón  
16 espacio-temporal: el primero, con altos niveles de dispersión hacia la zona oceánica  
17 pudiendo sobrepasar los 500 km de extensión desde la costa, producto de desoves  
18 ocurridos en la zona norte de Perú, lo que caracterizó al periodo 1994-1999; segundo,  
19 altos niveles de retención costera y conectividad con el área de crianza y el norte de  
20 Chile producto de desoves ocurridos en el extremo sur de área de desove de Perú, lo que  
21 caracterizó el desove modelado en el periodo 2000-2013.



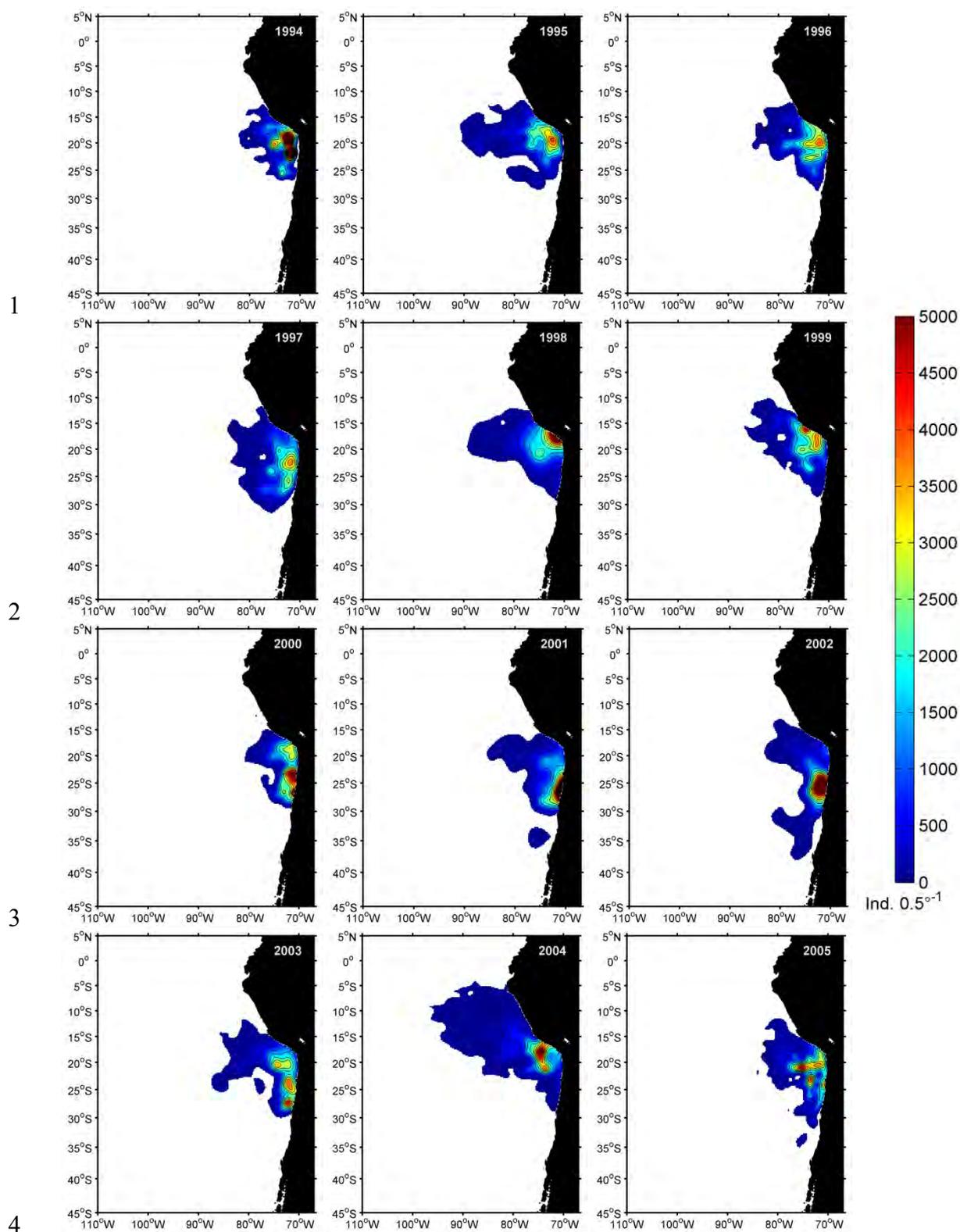
5 Figura 72. Distribución espacial de los individuos sobrevivientes al proceso de  
 6 transporte de 120 días desde la zona de desove de Perú.

7

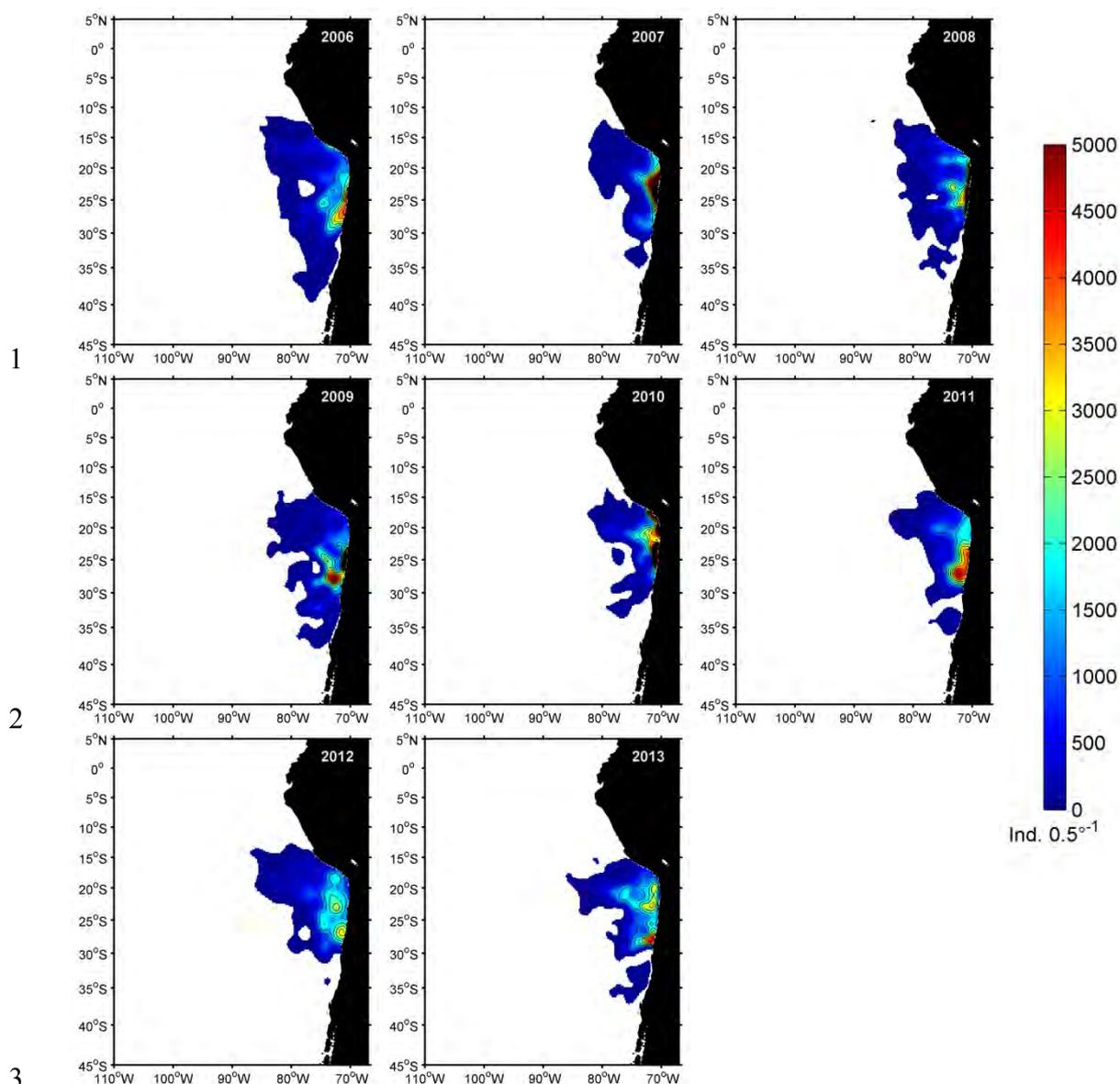


4 Figura 72 (continuación). Distribución espacial de los individuos sobrevivientes al  
5 proceso de transporte de 120 días desde la zona de desove de Perú.

6  
7 La Figura 73 muestra el resultado de la distribución espacial de los sobrevivientes de  
8 jurel posterior al proceso de transporte desde la zona de desove situada en el norte de  
9 Chile donde destacaron los altos niveles de retención en este sistema que co-ocurre  
10 espacialmente con el área de crianza. El año 2004 destacó por la extensión costa-afuera  
11 del núcleo de sobrevivientes indicando una alta dispersión, al igual que 2002, 2003 y  
12 2013 por su extensión hacia el sur, pero conservando su rasgo de retención en la costa.



5 Figura 73. Distribución espacial de los individuos sobrevivientes al proceso de  
6 transporte de 120 días desde la zona de desove en el norte de Chile.

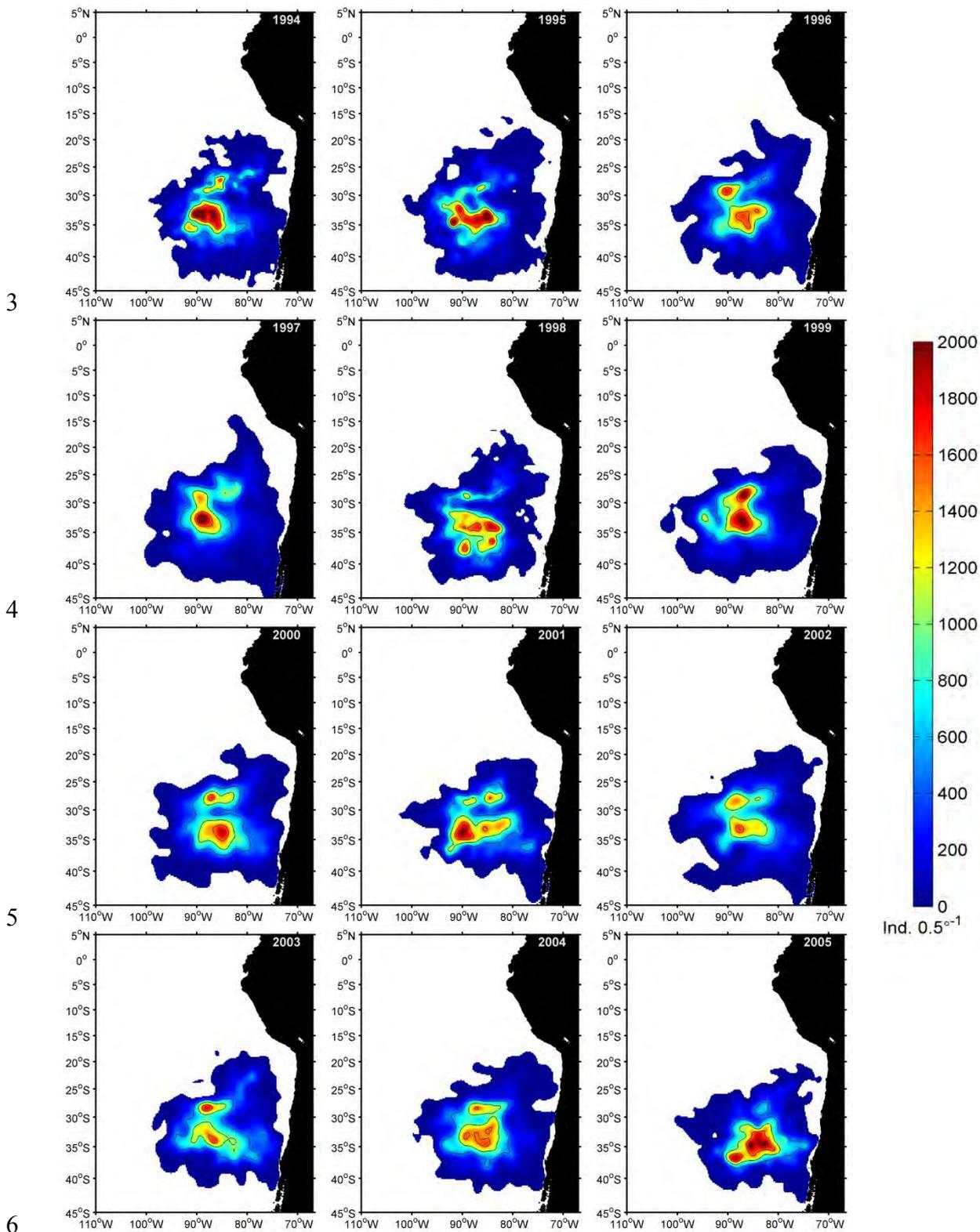


4 Figura 73 (continuación). Distribución espacial de los individuos sobrevivientes al  
 5 proceso de transporte de 120 días desde la zona de desove en el norte de Chile.

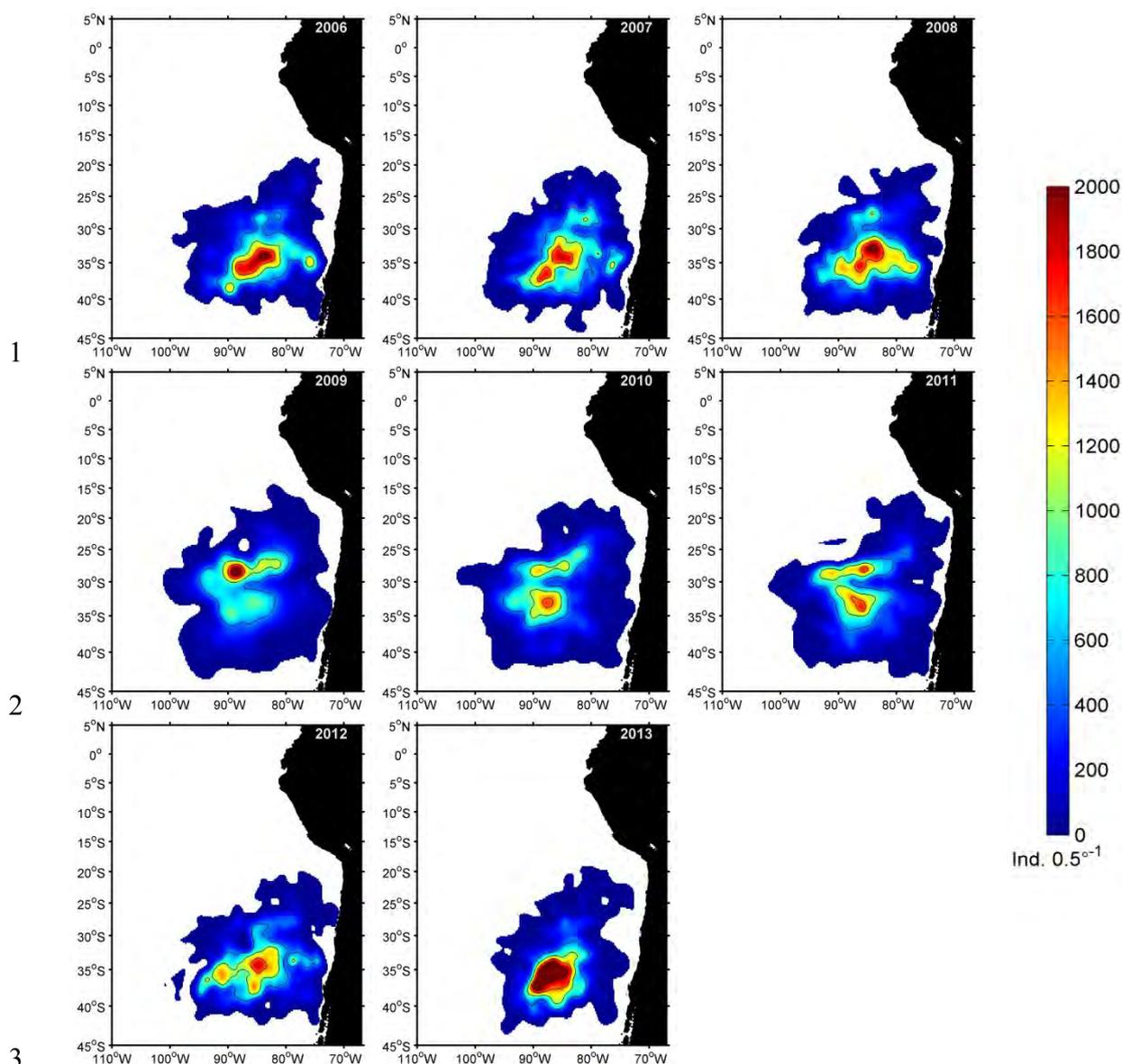
6

7 La Figura 74 muestra la extensión de la distribución de sobrevivientes de jurel posterior  
 8 al proceso de transporte desde la zona de desove principal frente a Chile centro-sur. En  
 9 general el patrón espacial mostró una alta dispersión en dirección preferentemente  
 10 noreste con una mayor extensión hacia el norte de los individuos que alcanzaron los  
 11 80°W. No obstante a esta dispersión, existe un alto contingente que denotó una menor  
 12 dispersión y parece ser retenido en el sector oceánico. Resulta interesante el hecho que  
 13 aunque la modelación mostró bajos niveles de conectividad con el área de crianza  
 14 modelada, la dispersión promueve un amplio acercamiento de los individuos a zonas

- 1 aledañas a esta, donde posteriormente a través de la natación activa podrían ingresar al
- 2 sector costero.



- 7 Figura 74. Distribución espacial de los individuos sobrevivientes al proceso de
- 8 transporte de 120 días desde la zona de desove frente a Chile centro-sur.



4 Figura 74 (continuación). Distribución espacial de los individuos sobrevivientes al  
 5 proceso de transporte de 120 días desde la zona de desove frente a Chile centro-sur.

6

7 La Tabla XXIV muestra el resultado de la matriz de conectividad que consideró a la  
 8 zona de desove de Perú como zona de origen y evaluó el grado de conexión de  
 9 individuos sobrevivientes con otras celdas evaluadas. De esta manera, el área de desove  
 10 de Perú estuvo mayormente conectada con la celda 5 (Norte de Chile) en particular  
 11 durante los años 2001, 2002, 2009 y 2013 con niveles sobre 0,4. Además, esta zona  
 12 mostró importantes niveles de retención al interior del área de desove, principalmente  
 13 en los años 1994, 1997 y 2005 con valores sobre 0,5. Además, esta zona mostró  
 14 conexión con la zona oceánica inmediatamente al oeste del área de desove (celda 8),

1 con niveles sobre 0,5 durante los años 1995, 1998 y 1999. Finalmente, se observaron  
2 conexiones con la zona oceánica frente a Chile norte con niveles promedio de 0,18.

3

4 Tabla XXIV. Matriz de conectividad para el área de desove de Perú. En rojo destacan  
5 las interacciones positivas entre celdas evaluadas.

Año/Interacción	C7-C1	C7-C2	C7-C3	C7-C4	C7-C5	C7-C6	C7-C7	C7-C8	C7-C9
1994	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.12	0.50	0.33	0.00
1995	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.10	0.36	0.53	0.00
1996	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.10	0.40	0.49	0.00
1997	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	0.13	0.53	0.22	0.00
1998	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.10	0.26	0.62	0.00
1999	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.08	0.36	0.55	0.00
2000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.28	0.40	0.07	0.00
2001	0.00	0.00	0.00	0.00	0.44	0.17	0.33	0.06	0.00
2002	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.13	0.30	0.07	0.00
2003	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30	0.18	0.43	0.09	0.00
2004	0.00	0.00	0.00	0.00	0.36	0.17	0.40	0.07	0.00
2005	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	0.25	0.50	0.08	0.00
2006	0.00	0.00	0.00	0.00	0.28	0.23	0.33	0.16	0.00
2007	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	0.23	0.46	0.07	0.00
2008	0.00	0.00	0.00	0.00	0.19	0.22	0.40	0.18	0.00
2009	0.00	0.00	0.00	0.00	0.47	0.14	0.29	0.10	0.00
2010	0.00	0.00	0.00	0.00	0.28	0.18	0.44	0.10	0.00
2011	0.00	0.00	0.00	0.00	0.21	0.26	0.41	0.11	0.00
2012	0.00	0.00	0.00	0.00	0.29	0.26	0.36	0.09	0.00
2013	0.00	0.00	0.00	0.00	0.46	0.20	0.24	0.10	0.00

6

7 La Tabla XXV muestra el resultado de la matriz de conectividad que consideró a la  
8 zona de desove de Chile Norte como zona de origen y evalúa el grado de conexión de  
9 individuos sobrevivientes con otras celdas evaluadas. De esta manera, el área de desove  
10 de Chile norte estuvo mayormente conectada con la celda 6 (zona oceánica adyacente)  
11 en particular durante los años 1995, 1998, 2005 y 2013 con niveles sobre 0,2. Además,  
12 esta zona mostró importantes niveles de retención al interior del área de desove en todos  
13 los años modelados, principalmente en los años 2000, 2001, 2005, 2007 y 2010 con  
14 valores sobre 0,85. Por otra parte, esta zona mostró conexión con la zona costera de  
15 Perú (celda 7), con niveles sobre 0,3 durante los años 1998, 1999 y 2004. Finalmente, se  
16 observaron conexiones eventuales con las celdas 3, 4 y 8 con niveles que no  
17 sobrepasaron los 0,03.

1 Tabla XXV. Matriz de conectividad para el área de desove de Chile norte. En rojo  
2 destacan las interacciones positivas entre celdas evaluadas.

Año/Interacción	C5-C1	C5-C2	C5-C3	C5-C4	C5-C5	C5-C6	C5-C7	C5-C8	C5-C9
1994	0.00	0.00	0.00	0.00	0.73	0.11	0.15	0.00	0.00
1995	0.00	0.00	0.00	0.00	0.46	0.24	0.29	0.01	0.00
1996	0.00	0.00	0.00	0.00	0.62	0.18	0.20	0.00	0.00
1997	0.00	0.00	0.00	0.00	0.72	0.19	0.09	0.00	0.00
1998	0.00	0.00	0.00	0.00	0.46	0.24	0.30	0.00	0.00
1999	0.00	0.00	0.00	0.00	0.43	0.19	0.38	0.00	0.00
2000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.88	0.05	0.07	0.00	0.00
2001	0.00	0.00	0.00	0.00	0.88	0.10	0.02	0.00	0.00
2002	0.00	0.00	0.01	0.01	0.92	0.04	0.02	0.00	0.00
2003	0.00	0.00	0.00	0.00	0.81	0.11	0.09	0.00	0.00
2004	0.00	0.00	0.00	0.00	0.47	0.17	0.35	0.01	0.00
2005	0.00	0.00	0.00	0.00	0.70	0.22	0.08	0.00	0.00
2006	0.00	0.00	0.01	0.02	0.74	0.11	0.12	0.00	0.00
2007	0.00	0.00	0.00	0.00	0.93	0.03	0.03	0.00	0.00
2008	0.00	0.00	0.00	0.00	0.79	0.11	0.09	0.00	0.00
2009	0.00	0.00	0.03	0.03	0.81	0.11	0.02	0.00	0.00
2010	0.00	0.00	0.00	0.00	0.86	0.07	0.07	0.00	0.00
2011	0.00	0.00	0.00	0.01	0.84	0.11	0.04	0.00	0.00
2012	0.00	0.00	0.00	0.00	0.74	0.17	0.08	0.00	0.00
2013	0.00	0.00	0.00	0.00	0.75	0.22	0.03	0.00	0.00

3

4 La Tabla XXVI muestra el resultado de la matriz de conectividad que consideró a la  
5 zona de desove de Chile centro-sur como zona de origen y evaluó el grado de conexión  
6 de individuos sobrevivientes con otras celdas evaluadas. De esta manera, el área de  
7 desove de Chile-centro sur estuvo altamente conectada con la celda 6 que incluye la  
8 zona externa del área de crianza modelada y su zona oceánica adyacente con niveles  
9 promedio de 0,25. Además, esta zona mostró importantes niveles de retención al interior  
10 del área de desove en todos los años modelados, principalmente en los años 2005, 2006,  
11 2008, 2012 y 2013 con valores sobre 0,8. Además, esta zona mostró conexión con la  
12 zona al oeste del área de desove (celda 2), con niveles que no sobrepasaron los 0,1.  
13 Finalmente, se observaron conexiones eventuales con las celdas 1 y 4 (extremo sur y sur  
14 costero) con niveles que no sobrepasaron los 0,03. No obstante estos análisis  
15 permitieron analizar la tasa de transferencia entre los distintos sectores, en futuras  
16 versiones del esquema de modelación se debe avanzar hacia el entendimiento de las  
17 inter-relaciones con la variabilidad espacio-temporal de los procesos oceanográficos.

1 Tabla XXVI. Matriz de conectividad para el área de desove de Chile centro-sur. En rojo  
2 destacan las interacciones positivas entre celdas evaluadas.

Año/Interacción	C3-C1	C3-C2	C3-C3	C3-C4	C3-C5	C3-C6	C3-C7	C3-C8	C3-C9
1994	0.01	0.03	0.70	0.00	0.00	0.26	0.00	0.00	0.00
1995	0.01	0.08	0.69	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00
1996	0.01	0.06	0.67	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00
1997	0.01	0.04	0.57	0.00	0.00	0.36	0.00	0.00	0.00
1998	0.02	0.05	0.74	0.00	0.00	0.17	0.00	0.00	0.00
1999	0.00	0.10	0.61	0.00	0.00	0.27	0.00	0.00	0.00
2000	0.00	0.02	0.66	0.00	0.00	0.31	0.00	0.00	0.00
2001	0.00	0.02	0.71	0.00	0.00	0.26	0.00	0.00	0.00
2002	0.00	0.04	0.59	0.00	0.00	0.34	0.00	0.00	0.00
2003	0.00	0.05	0.63	0.01	0.00	0.31	0.00	0.00	0.00
2004	0.00	0.04	0.68	0.00	0.00	0.27	0.00	0.00	0.00
2005	0.00	0.01	0.86	0.01	0.00	0.12	0.00	0.00	0.00
2006	0.00	0.02	0.83	0.01	0.00	0.14	0.00	0.00	0.00
2007	0.01	0.02	0.79	0.01	0.00	0.17	0.00	0.00	0.00
2008	0.01	0.02	0.82	0.00	0.00	0.14	0.00	0.00	0.00
2009	0.01	0.04	0.43	0.00	0.00	0.48	0.00	0.00	0.00
2010	0.00	0.07	0.51	0.00	0.00	0.39	0.00	0.00	0.00
2011	0.00	0.02	0.58	0.00	0.00	0.36	0.00	0.00	0.00
2012	0.01	0.05	0.81	0.01	0.00	0.11	0.00	0.00	0.00
2013	0.03	0.01	0.89	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00

3

#### 4 **6.7. Modelo conceptual de la estructura poblacional del jurel en el Pacífico Sur y** 5 **las asociaciones a forzantes biofísicas relevantes.**

6 En la estructura del stock de jurel en el Pacífico Suroriental unos de los componentes  
7 principales es la delimitación del área (áreas) de desove y de su conexión con las zonas  
8 de mayor concentración de los peces juveniles (pre-reclutas y reclutas), esto es zonas de  
9 crianza de los peces hasta que alcanzan la edad de primera madurez sexual y/o hasta la  
10 entrada (contribución) masiva a la pesquería. A continuación, se presenta un análisis de  
11 las distintas hipótesis relacionadas con la estructura poblacional de jurel, la información  
12 biológica que las sustentan y principalmente como los resultados de este proyecto  
13 permitieron proponer un esquema conceptual de estructura poblacional de acuerdo a las  
14 hipótesis vigentes.

15

16

### 6.7.1. Conceptualización de las hipótesis vigentes de estructura poblacional

Al interior del trabajo de la Organización Regional de Pesca del Pacífico Sur (SPRFMO) se han desarrollado hipótesis de la estructura de stock para el jurel, las que han evolucionado con el paso del tiempo. El desarrollo de estas hipótesis ha estado basada en información presentada al interior del grupo científico de la SPRFMO o previamente publicada. Las hipótesis planteadas inicialmente (SPRFMO, 2008) pueden ser resumidas de la siguiente manera (ver Figura 75):

- *Hipótesis 1:* Las fracciones de jurel fuera de las costas de Perú y Chile constituyen stocks separados que se sitúan en alta mar.
- *Hipótesis 2:* Las fracciones de jurel fuera de las costas de Perú y Chile constituyen un solo stock compartido que se sitúa en alta mar.
- *Hipótesis 3:* Las fracciones de jurel fuera del área chilena constituye un solo stock que se sitúa desde la costa hacia afuera hasta cerca de los 120°W.
- *Hipótesis 4:* Las fracciones de jurel fuera del área chilena constituye stocks separados que se sitúan en alta mar.

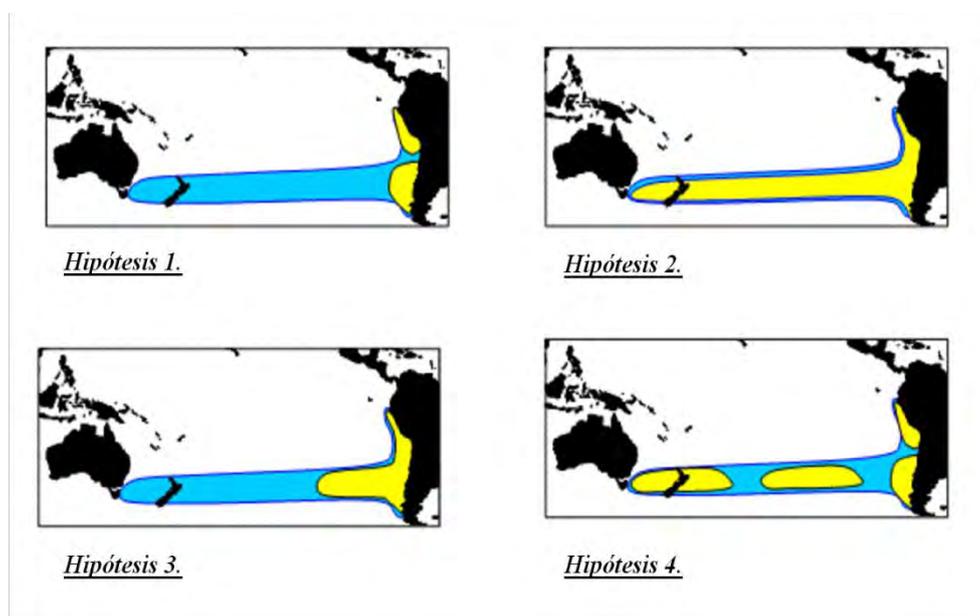


Figura 75. Diagramas esquemáticas de cuatro hipótesis de estructura poblacional del jurel en el Pacífico Sur. Área azul: "cinturón de jurel del Pacífico Sur"; áreas amarillo: zonas de altas concentraciones de stocks (Gerlotto *et al.*, 2010a).

En informes de reuniones posteriores del grupo científico de SPRFMO (Gerlotto *et al.*, 2010b; Gerlotto & Dioses, 2013) y por medio de publicaciones científicas (Gerlotto *et al.*, 2012) se analizaron diferentes conceptos teóricos de la dinámica y los posibles

1 escenarios de evolución en la estructura poblacional del jurel (Figura 76), las cuales han  
2 sido restringidas a dos hipótesis conceptuales que buscan describir la estructura  
3 poblacional del jurel en el Pacífico Sur, a saber:

4  
5 La hipótesis de "metapoblación" (correspondiente a la Hipótesis 1 en la Figura 75), que  
6 considera la existencia de subpoblaciones, las cuales pueden tener una historia de vida  
7 independiente (y divergir eventualmente) en el tiempo y en el espacio. Se asume que  
8 cada una de las subpoblaciones puede tener, en ciertas condiciones, su propia área de  
9 desove con aislamiento reproductivo.

10  
11 La hipótesis de "superpoblación" (Gerlotto *et al.*, 2010b) y/o de "población de parches"  
12 (Gerlotto *et al.*, 2012; Gerlotto & Dioses, 2013; corresponde a la Hipótesis 2 en la  
13 Figura 75), se basa en la existencia de un único ciclo de vida (historia de vida) que  
14 contempla un triángulo migratorio clásico: a) los peces adultos en engorda (pudiendo  
15 desarrollarse en una o varias áreas); b) un área de desove masivo de los peces adultos de  
16 varias generaciones; c) un área de concentración y crecimiento de los peces juveniles.  
17 En otras palabras, superpoblación es conceptualmente una población simple, pero que  
18 es capaz de expandirse rápidamente hacia nuevos hábitats a través de las migraciones  
19 masivas de peces adultos o contraerse volviendo al estado cercano a virginal de  
20 población en su hábitat que permite mantenerse a la población como tal independiente  
21 de los niveles de abundancia. A pesar de estas variaciones, el aporte de peces juveniles  
22 (reclutamientos futuros) a la población proviene de un área común de desove y los peces  
23 adultos, de un área común de crecimiento de peces juveniles (zona de crianza)  
24 (Gretchina *et al.*, 2009; Gretchina, 2013).

## 25 26 **6.7.2. Aplicación de hipótesis en la población de jurel del Pacífico sur**

27 De acuerdo a lo explicado anteriormente, la refinación de las hipótesis relativas a la  
28 estructura población de jurel ha confluído en dos: la de metapoblación y la de  
29 superpoblación, cuyos fundamentos biológico-pesqueros se detallan a continuación.

### 30 31 *6.7.2.1. Hipótesis de metapoblación en aguas frente las costas del Perú y Chile*

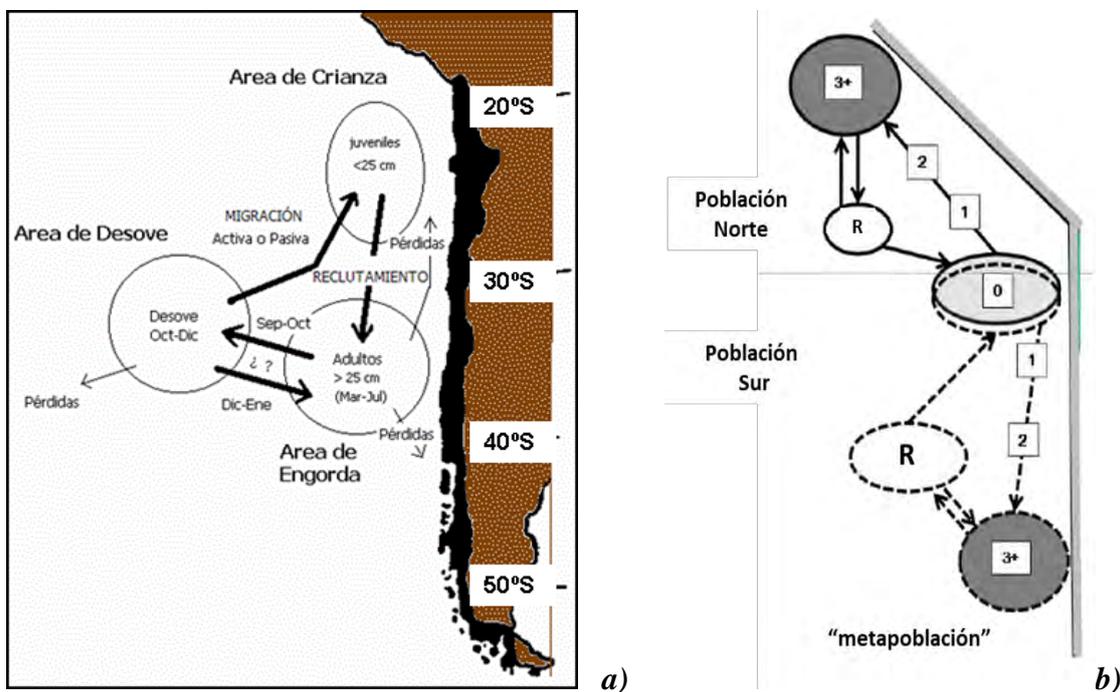
32 En este esquema de modelo conceptual de la estructura poblacional las áreas de  
33 engorda, desove y crianza se encuentran separados formando sub-fracciones frente a las

1 costas de Perú y Chile respectivamente (Gerlotto *et al.*, 2010b; Gerlotto *et al.*, 2012;  
2 Gerlotto & Dioses, 2013). De acuerdo a esta hipótesis frente las costas del Perú y frente  
3 las costas de Chile habitan dos stocks diferentes de jurel (opinión que expone la  
4 delegación científica y política del Perú en las reuniones anuales de SPRFMO desde el  
5 año 2008). Esta hipótesis considera que en ambos stocks puede ser aplicado un esquema  
6 conceptual del triángulo de ciclo de vida de jurel (adultos (engorda) – desove – área de  
7 crianza) similar a lo propuesto por Arcos *et al.*(2001) (Figura 76a) y Serra (1991) y  
8 esquematizado en conjunto por Gerlotto & Dioses (2013) (ver Figura 76b). Este  
9 esquema considera zonas de reproducción aisladas, con dos zonas de desove: una frente  
10 a Perú y otra frente a Chile centro-sur, con una zona de crianza común en el norte de  
11 Chile y sur de Perú, en la cual confluyen individuos juveniles y pre-reclutas que  
12 permanecerán allí hasta alcanzar la madurez. Una vez maduros, una fracción de los  
13 individuos migra hacia el norte para conformar agregaciones de adultos en alimentación  
14 en la zona centro-norte de Perú, los cuales formarán una fracción desovante que se  
15 reproducirá en aguas peruanas cerrando el ciclo de vida. Por otra parte, una fracción  
16 mayoritaria de estos individuos migra hacia el sur, constituyendo cardúmenes en  
17 alimentación que sustenta la pesquería de Chile centro-sur y que forman un área de  
18 reproducción en la zona oceánica frente a Chile centro-sur la cual conforma el área  
19 principal de desove. De esta manera, se establecerían dos esquemas de triángulos  
20 migratorios uno opuesto espacialmente al otro (Chile y Perú (Figura 76b). El esquema  
21 bajo la hipótesis de metapoblación involucra la posibilidad que la zona de crianza de  
22 jurel del stock peruano puede manifestarse separada espacialmente del stock chileno  
23 (Gerlotto *et al.*, 2010b) como compartida para ambos stocks (Gerlotto & Dioses, 2013).

24

25 Esta hipótesis poblacional considera que la formación de áreas de reproducción aisladas  
26 geográficamente promueve la divergencia genética desde una población parental inicial  
27 (Gerlotto & Dioses, 2013), no obstante este rasgo no ha sido comprobado para el jurel  
28 en el Pacífico sur (Cardenas *et al.*, 2009). Además, este esquema se sostiene en la idea  
29 que el jurel es una especie de desove oportunista el cual despliega en cualquier lugar  
30 donde las condiciones sean favorables, eliminando la opción de un comportamiento tipo  
31 *natal homing* (filopátrico) que involucra un rasgo inherente a la población en donde los  
32 individuos vuelven a desovar en el mismo lugar donde nacieron. Más aún, considera  
33 que el jurel desova en el sector más cercano a las áreas de alimentación donde las

1 condiciones ambientales sean adecuadas. De esta manera, se generaría ciclos  
 2 independientes y la metapoblación ocurre.  
 3



4  
 5 Figura 76. a) Modelo conceptual de la estructura espacial del stock de jurel frente las  
 6 costas de Chile, previo a la ocurrencia de El Niño 1997-1998 (Arcos *et al.*, 2001) ; b)  
 7 esquema conceptual de la hipótesis de metapoblación de jurel en el Pacífico Sur  
 8 (Gerlotto & Dioses, 2013).  
 9

10 *6.7.2.2. Hipótesis de superpoblación y/o de población distribuida por parches*

11 El esquema conceptual del modelo de la estructura poblacional se basa en un esquema  
 12 generalizado de migraciones de jurel durante su ciclo de vida en el Pacífico Sur durante  
 13 los años 80-90', cuando el recurso jurel alcanzaba los altos valores de biomasa total y  
 14 una máxima distribución espacial (Elizarov *et al.*, 1993; Gretchina, 1998) (Figuras 77-  
 15 80).

16  
 17  
 18  
 19

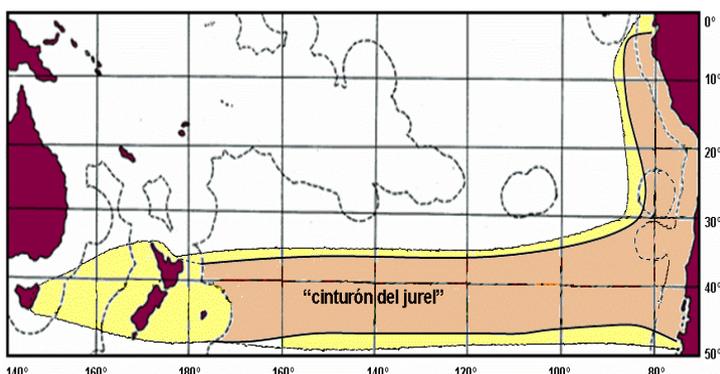


Figura 77. Áreas distribución del jurel en el Océano Pacífico Sur (modificado, de Elizarov *et al.*, 1993; Gretchina, 1998).

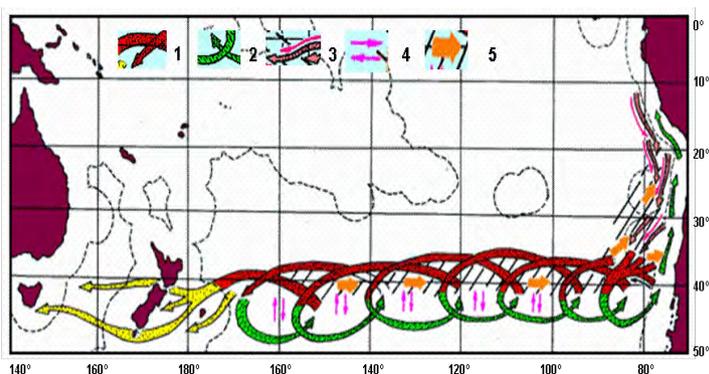


Figura 78. Esquema generalizado de migraciones oceánicas de jurel en el Océano Pacífico Sur durante su ciclo de vida. 1 – peces adultos desovantes; 2 – peces adultos en engorda; 3 – peces juveniles hasta 2-3 años de edad; 4 - peces adultos entre zonas de desove y engorda; 5 – distribución y migración de alevines y juveniles de hasta un año de edad (Elizarov *et al.*, 1992; Gretchina, 1998b).

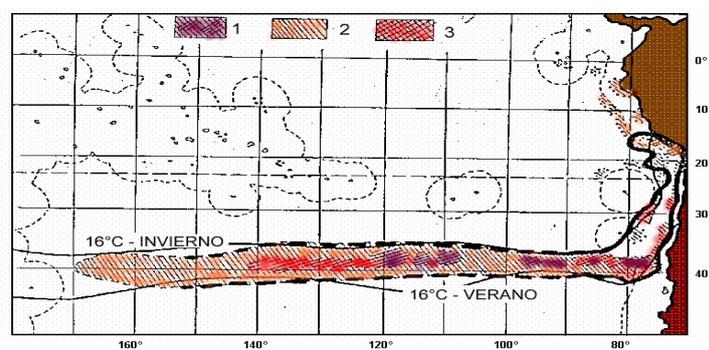


Figura 79. Áreas de desove del jurel en el Océano Pacífico Sur y posición de la isoterma de 16°C al inicio y término de la estación de desove. 1 –área principal de desove; 2 – áreas de registros huevos y larvas; 3 – zonas con concentraciones de huevos y larvas mayores 200 unidades/m<sup>2</sup> (modificado, de Gretchina *et al.*, 1998b).

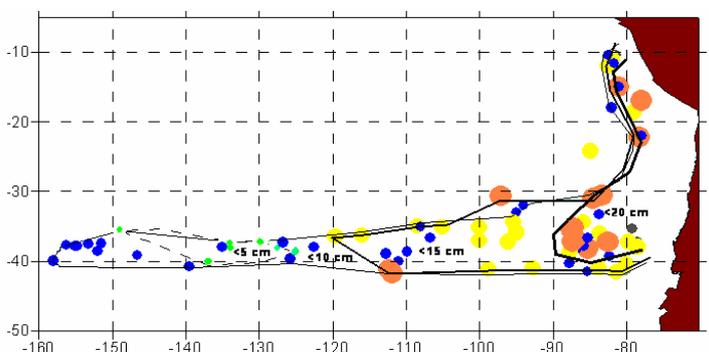


Figura 80. Distribución de alevines y juveniles del jurel hasta un año de edad por clases de tamaños de 5 cm de LH (integración realizada a partir de información obtenida entre los años 1980 y 1990 en los cruceros de investigación de la ex - URSS) (modificado, de Elizarov *et al.*, 1992; Gretchina, 1998b).

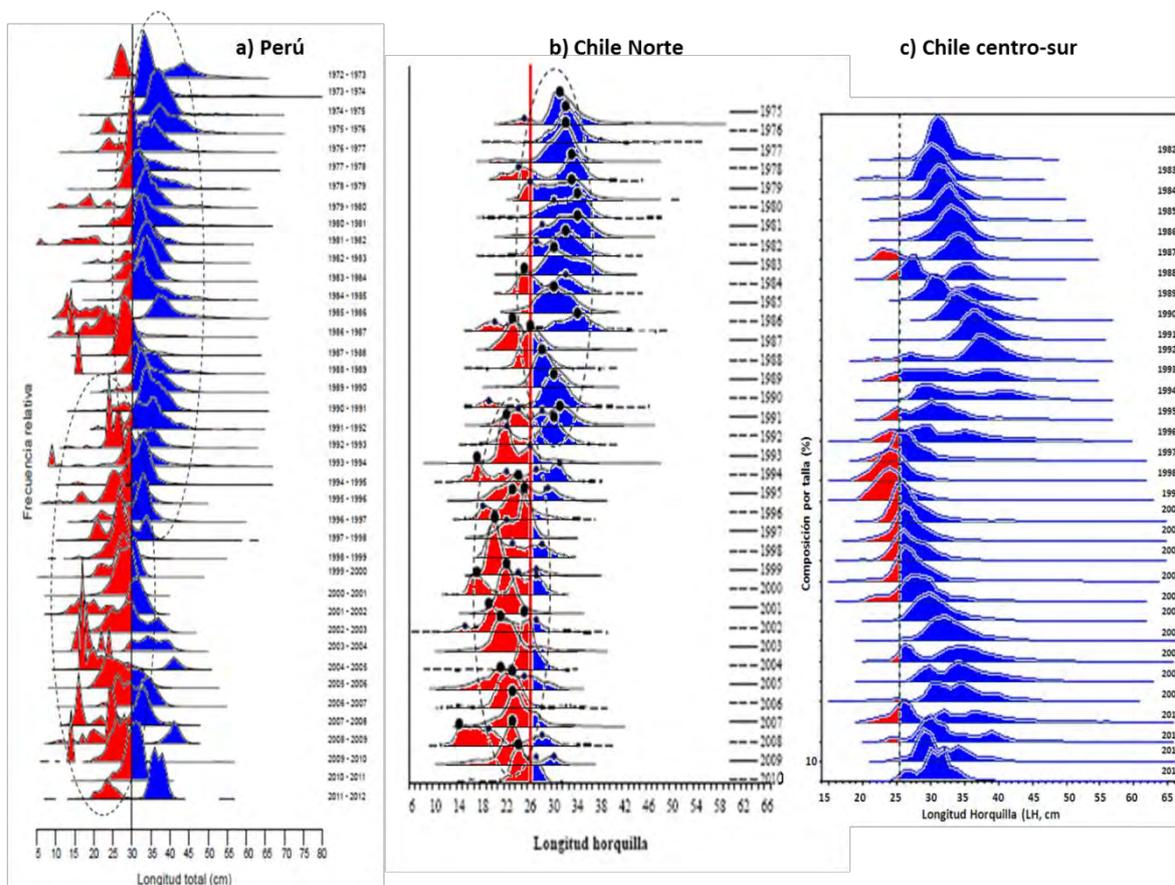
1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10

1 Este esquema es parcialmente coincidente con el esquema propuesto por Gerlotto *et al.*  
2 (2010b) y Gerlotto *et al.* (2012) para el modelo conceptual de "superpoblación" y/o  
3 propuesta (modificada) por Gerlotto & Dioses (2013) como el modelo de "población de  
4 parches" para la región del Pacífico Suroriental. Este esquema incluye: a) la posición  
5 espacial de áreas de engorda (**A**) de peces adultos frente las costas del Perú (Norte de  
6 Chile) (**A<sub>norte</sub>**) y frente las costas de Chile centro-sur, incluyendo las aguas oceánicas  
7 (**A<sub>sur</sub>**); b) un área única y continuo de desove (**R**) que se extiende espacialmente en  
8 aguas costero-oceánicas del Perú y el Norte de Chile y, desde el Este hacia el Oeste  
9 frente las costas de Chile central y centro-sur preferentemente en aguas oceánicas; c)  
10 hacia esta área realizan sus migraciones peces adultos maduros (en desove) desde las  
11 áreas de alimentación (**A**) del Perú en dirección del Norte hacia el S-SW y, desde Chile  
12 centro-sur en dirección hacia el SW, de esta manera confluyen y co-ocurren  
13 espacialmente adultos a través del desove (**A<sub>norte</sub> – R** y/o **A<sub>sur</sub> – R**); d) un aporte directo  
14 desde el área de desove de peces juveniles que se distribuyen espacialmente de acuerdo  
15 al patrón de transporte biofísico (**J**), originados en el período desove hacia una única y  
16 recurrente zona de crianza (**C**) ubicada en aguas costeras de sur del Perú y del Norte de  
17 Chile (conexión **R – C**), e) generaciones de jurel, que han alcanzado la madurez sexual,  
18 de abundancia variable (dependiente de las variaciones interanuales de las condiciones  
19 oceanográficas en el Pacífico Sur en momento de nacimiento) abandonan **C** reclutando  
20 anualmente hacia las pesquerías del Perú (**A<sub>norte</sub>**) y/o de Chile (**A<sub>sur</sub>**), o pueden pasar  
21 (emigran) directamente hacia el área de desove próximo (**R**) desde su área de  
22 distribución (**C**).

23

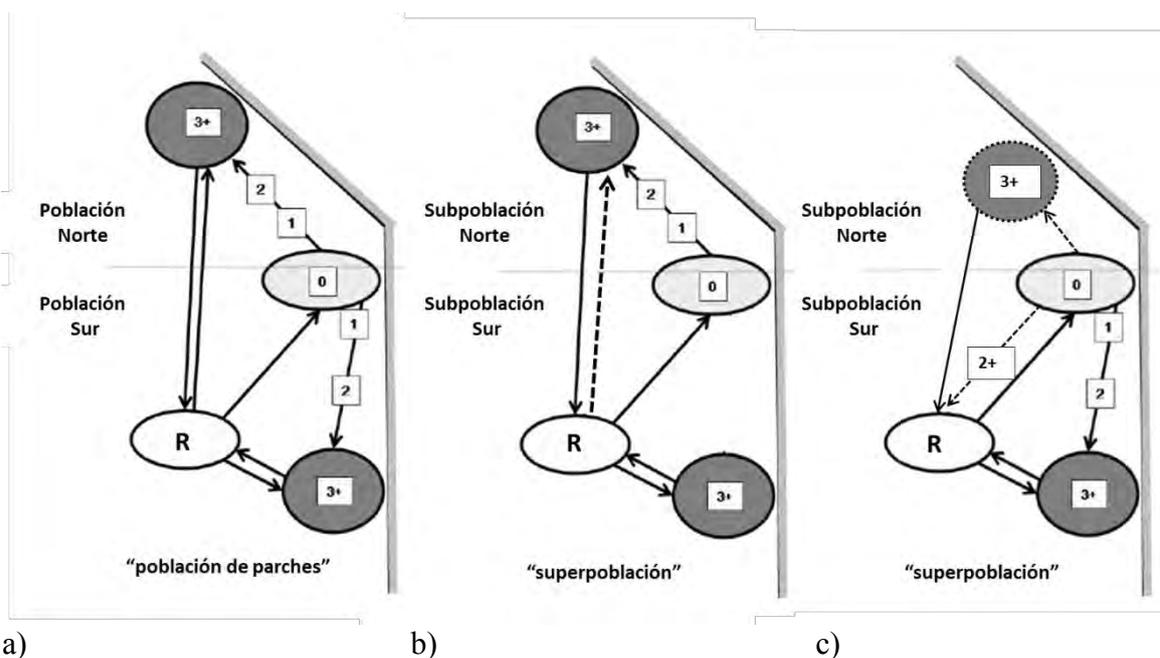
24 En general, esta propuesta de modelo conceptual de la estructura poblacional de jurel en  
25 el Pacífico Sur, basada principalmente en los antecedentes de la historia vida del recurso  
26 en los años 80-90', es aceptable para el período de alta abundancia poblacional de la  
27 especie el cual coincide con el régimen climático cálido que extendió aproximadamente  
28 hasta los años de El Niño 1997-1998. En este período (previo a 1997-1998), al analizar  
29 las estructuras anuales de tamaños de jurel en las aguas costeras del Perú, del norte y de  
30 centro-sur de Chile (Figura 81), además lo reportado por la flota de la ex URSS en  
31 aguas oceánicas frente al Perú y Chile centro-sur (Gretchina, 1998; Sepúlveda *et al.*,  
32 1998), es interesante destacar dos importantes antecedentes: i) una baja ocurrencia en  
33 las capturas del Norte de Chile de peces juveniles y; ii) los peces juveniles (<26 cm LH)

1 aparecen en las capturas de la flotas de Chile centro-sur y oceánica solo durante los años  
 2 de El Niño, como en 1982-1983, 1986-1987 y 1992.  
 3



4  
 5 Figura 81. Dinámica interanual de frecuencias de tamaños de jurel en las regiones del  
 6 Perú, 1972-2012 (a) (modificado Díaz, 2013), del Norte de Chile, 1975-2010 (b)  
 7 (modificado Canales *et al.*, 2011) y de Chile centro-sur, 1982-2013 (c) (Departamento  
 8 de pesquerías de INPESCA).  
 9

10 En base de estos dos antecedentes es posible establecer que: 1) la zona de crianza de  
 11 jurel en los años indicados fue desplazada espacialmente hacia las aguas costeras del  
 12 Perú, en esta dirección también reclutaron ejemplares de jurel y, 2) en las aguas costero-  
 13 oceánicas frente las costas de Chile centro-sur habitaron casi exclusivamente peces  
 14 adultos, es decir, pueden solo tener procedencia desde las zonas costeras del Norte de  
 15 Chile y/o del Perú, probablemente después de pasar por el área de desove. Debido a esto  
 16 último, la fracción de jurel adulto en la región costero-oceánico frente las costas de  
 17 Chile centro-sur es fuertemente dependiente de la fracción habitante en las zonas  
 18 costero-oceánicas del Perú y del Norte de Chile siendo parte de una estructura  
 19 poblacional única ("superpoblación") en el Pacífico Suroriental (Figura 82).



1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8

a) b) c)  
 Figura 82. Esquema conceptual de la hipótesis de “población de parches” y/o “superpoblación” en el Pacífico Sur (Gerlotto *et al.*, 2012; Gerlotto & Dioses, 2013) (a) y propuestas de su modificación en base de la historia de vida de jurel en los años 80-90’ durante los años de las condiciones oceanográficas “normales” (b) y, “anómalos”, de los años de El Niño (c) (este estudio).

9 Durante el período posterior a 1997-1998, un período de régimen climático frío, que  
 10 abarca la mayor parte del período de estudio del presente proyecto (1994-2014), el  
 11 recurso jurel en el Pacífico Sur presenta varios e importantes cambios, entre éstos: a)  
 12 disminuye drásticamente la biomasa total (y desovante) en todo el Pacífico Sur y, en  
 13 especial, en aguas del Perú (de un promedio entre 1983-1997 de 5 millones de toneladas  
 14 a menos de 500 mil toneladas a partir de 1998) (Espinoza *et al.*, 2008; SWG-11-08;  
 15 SPRFMO, 2012; Ñiquen *et al.*, 2013); b) la baja abundancia de jurel en el Perú se  
 16 distribuye muy dispersa espacialmente, con preferencia hacia las zonas central y sur del  
 17 país y, además, presenta fuertes variaciones interanuales, de un aumento relativo en  
 18 algunos años hasta prácticamente desaparecer en otros (Dioses, 2013; Segura & Aliaga,  
 19 2013); c) la estructura de tamaños anuales en las aguas peruanas en este período se  
 20 presenta por pulsos el cual sustenta a la pesquería por 3-4 años con disminución  
 21 sostenida de la abundancia hasta el ingreso de un nuevo pulso, a diferencia del periodo  
 22 anterior que presentó continuidad interanual en el pulso de reclutamiento (Figura 81a);  
 23 d) en las zonas costeras del norte de Chile la estructura anual de jurel se ve presentada  
 24 casi exclusivamente por peces juveniles (<26 cm LH) (Figura 81), esto puede significar  
 25 que en este período la “zona de crianza” se establece en las aguas costeras del Norte de

1 Chile, probablemente, compartida con de sur del Perú; e) un más frecuente aporte de los  
2 peces juveniles (reclutas) hacia las pesquerías de centro-sur de Chile (Figura 81, c; años  
3 1995-2004, 2007, 2009-2011 y, actual, 2015-2016) y oceánica capturada por la flota  
4 extranjera (2002-2005, 2010, 2014-2015) (Reportes nacionales de pesquería de jurel,  
5 SPRFMO, 2010-2015; datos INPESCA de monitoreo operacional de la flota) que puede  
6 significar un aporte importante, con cierta constancia de nuevos reclutamientos de peces  
7 hacia éstas, a diferencia del período anterior cuando los peces juveniles estuvieron  
8 presentes solo en los años de El Niño.

9  
10 Sin embargo, a diferencia del período previo a 1997-1998, el período de este estudio  
11 carece la información biológico-pesquera del área oceánica fuera de las 100 mn de la  
12 costa frente las costas del Perú y del Norte de Chile, área donde se propone ocurre el  
13 desove de jurel en sus migraciones desovantes desde el Norte hacia el Sur-Suroeste del  
14 Pacífico suroriental, constituyendo un componente faltante (e importante) para el  
15 modelo conceptual (actualizado) de la estructura poblacional de jurel. Es probable que  
16 la ausencia de esta información, o su escasez, ha influido lo propuesto por Gerlotto *et*  
17 *al.* (2010b), Gerlotto *et al.* (2012) y Gerlotto & Dioses (2013) quienes se inclinan hacia  
18 una hipótesis (modelo conceptual) de “metapoblación” de jurel frente las costas del Perú  
19 y Chile. En este contexto, existe escasez de información relevante respecto de la  
20 conectividad en diferentes etapas de vida de jurel entre los stocks del Perú, de Chile  
21 centro-sur y oceánico en relación a: la zona de crianza – la distribución de peces adultos  
22 frente las costas del Perú ( $C - A_{\text{norte}}$ ); los peces adultos del Perú - el área de desove  
23 (oceánico?) ( $A_{\text{norte}} -$ ) y/o la continuidad del área de desove del Perú hacia Chile y el  
24 mar abierto ( $R_{\text{norte}} - R_{\text{Chile norte}} - R_{\text{Chile centro-sur}} - R_{\text{oceánico}}$ ); los peces juveniles de  
25 diferentes focos de desove (oceánico, Chile centro-sur, Chile Norte, Perú) – la zona de  
26 crianza ( $[R_{\text{oceánico}} - R_{\text{Chilecentro-sur}} - R_{\text{Chilenorte}} - R_{\text{norte}}] - ZC$ ). Considerando estos vacíos  
27 de información se establece que ambas hipótesis y/o modelos conceptuales de la  
28 estructura poblacional de jurel en el Pacífico Sur respecto a una “metapoblación” ya una  
29 “superpoblación” o “población de parches”, pueden ser válidos en las discusiones del  
30 grupo científico de ORP.

31  
32 Sin embargo, en base de los estudios y la pesca comercial de jurel, especialmente de la  
33 flota extranjera, de los últimos años, como también de los resultados obtenidos en el

1 marco del presente proyecto de modelación biofísica, es posible presentar nuevos  
2 antecedentes para el entendimiento de los procesos de conectividad entre diferentes  
3 áreas del hábitat de jurel, las cuales pueden ser un fundamento para confirmar uno de  
4 los dos modelos conceptuales de la estructura poblacional de jurel en el Pacífico Sur y/o  
5 proponer un modelo nuevo. En este caso, los conceptos deben tener en cuenta que el  
6 recurso jurel se encuentra actualmente en una situación de baja biomasa total y  
7 contracción de su área de distribución.

### 8 9 *6.7.2.3. Evidencias del presente estudio hacia el establecimiento de un modelo* 10 *conceptual de estructura poblacional*

11 En primer lugar, como un resultado del presente proyecto, desde análisis de los  
12 registros acústicos de peces inmaduros disponibles para Chile y desde las vías de  
13 conexión obtenidas por la modelación biofísica, se estableció que un área principal de  
14 crianza de jurel se asocia con las zonas costeras del norte de Chile, desde la costa hasta  
15 el 75°W y desde paralelo 25°S hacia el límite con el Perú (registros acústicos; Figura 44)  
16 la cual presentó conexiones en toda su extensión con las distintas áreas de desove  
17 evaluadas a través del proceso de transporte de juveniles de hasta 4 meses de edad (ver  
18 Anexos I, II y III panel derecho). Además, en éste último sector, en su parte más  
19 costera, a partir de los años 1994-1997 y hasta actualidad, se registra un predominio  
20 prácticamente total en las estructuras anuales de tamaños de jurel de ejemplares  
21 juveniles (<30 cm LT para el Perú y <26 cm LH para Chile) (Figura 81) (Canales *et al.*,  
22 2011; Díaz, 2013). Luego, en la distribución espacial de los peces adultos en engorda  
23 durante el período posterior a El Niño 1997-1998 es posible delimitar por lo menos tres  
24 importantes áreas (=stocks comercial): i) frente las costas del Perú ( $A_{\text{norte}}$ ), adyacente  
25 hacia el norte con la zona de crianza, con importantes fluctuaciones interanuales de éste  
26 a lo largo de la costa, de uno continuo hasta limitado hacia el norte o hacia el sur de país  
27 (SWG-11-08a, 2012); ii) frente las costas de Chile central y centro-sur ( $A_{\text{sur}}$ ) entre los  
28 meses de diciembre a mayo (junio), con el límite sur entre la Punta Lavapie e Isla  
29 Mocha, dentro de la ZEE de Chile, adyacente hacia el sur de la zona de crianza  
30 (Monitoreo jurel de Departamento Pesquerías INPESCA); iii) costero-oceánico frente  
31 las costas de Chile centro-sur y sur ( $A_{\text{oceánico}}$ ) entre los meses de enero-febrero hasta  
32 julio-agosto, al sur de Punta Lavapie de 74°30'W hasta 87°-90°W (Monitoreo jurel de

1 Departamento Pesquerías INPESCA), las cuales bajo ciertas condiciones pueden  
2 sobreponerse en solo un área de distribución de jurel adulto en alimentación.

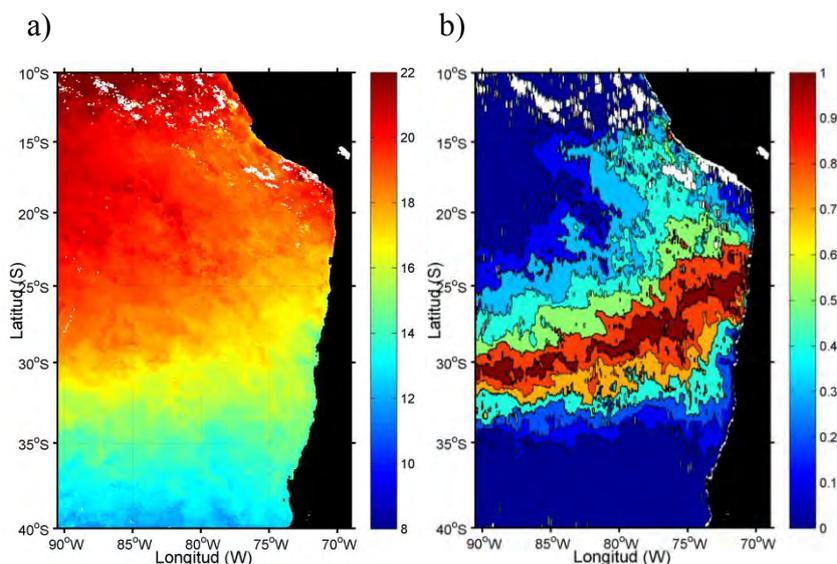
3  
4 No obstante, en el presente estudio se consideraron tres zonas de desove separadas  
5 espacialmente (Perú, norte de Chile, centro-sur de Chile oceánico) basándose en  
6 estudios empíricos de distribución de huevos y larvas, es posible establecer una  
7 hipótesis alternativa relacionada con la actividad de desove del jurel en el Pacífico  
8 suroriental. El alto grado de asociación entre la posición del frente subtropical y el  
9 desove de jurel permite establecer que las condiciones de desove preferente para la  
10 especie está asociada a esta estructura oceanográfica durante la temporada primaveral.  
11 En este contexto, y como ya se ha descrito anteriormente, la dinámica del FST  
12 manifiesta un marcado ciclo anual de migración norte-sur en el sector oceánico y una  
13 dinámica costa-océano en el sector costero. De esta forma, durante la época primaveral  
14 las condiciones para el desove se manifiestan en un compás cercano al continente en  
15 Perú y el norte de Chile que se va alejando al oeste en el centro-sur de Chile. Esto  
16 último se observó al monitorear las condiciones del océano durante las época primaveral  
17 y analizarla en el contexto de la probabilidad de encuentro de huevos de jurel (basada en  
18 los datos históricos 1998-2014 de cruceros ictioplantónicos y oceanografía) la que  
19 mostró niveles por sobre el 40% en una franja que abarca una vasta área continua del  
20 Pacífico suroriental (Figura 83a y b). De esta manera, se plantea la posibilidad de que el  
21 jurel presente un área de desove continua a lo largo de esta franja definida por las  
22 condiciones, principalmente térmicas, preferentes para la reproducción la que está  
23 definida por el avance del FST al sureste durante la primavera. Sin embargo, esta  
24 continuidad probable de la zona de desove del jurel presenta matices importantes en  
25 relación a la abundancia del desove a lo largo de las zonas que han sido visitadas por  
26 cruceros de investigación. En el contexto de este estudio, se ha analizado la mejor  
27 información disponible para describir el desove de jurel, y ha sido posible estandarizar  
28 las unidades de densidad informada en los distintos estudios evidenciando que existen  
29 diferencias significativas en la densidad media de huevos o larvas en las distintas zonas.

30  
31 De esta manera, la zona centro-sur de Chile presentó densidades anuales máximas que  
32 están en el mismo orden de magnitud, pero con niveles superiores, que las densidades  
33 larvales presentadas por Ayon & Correa (2013) para el área frente a Perú, incluso

1 considerando que esta última información se trata en una integración decadal de  
2 densidades registradas. Esta situación se repitió al observar las abundancia reportadas  
3 para el área costera del norte de Chile en el periodo de este estudio (Braun &  
4 Valenzuela, 2008), donde las densidades máximas estuvieron en un orden de magnitud  
5 por debajo de las reportadas para el área de desove centro-sur.

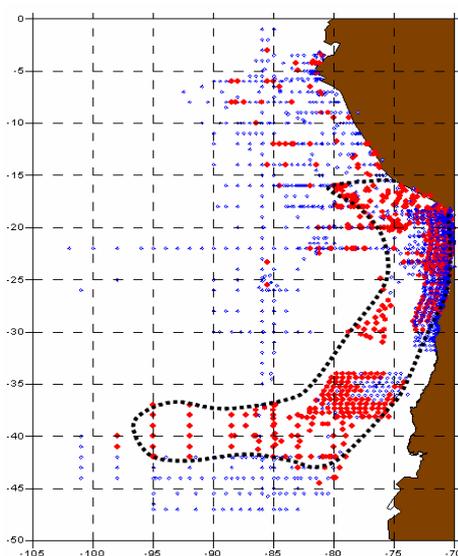
6  
7 Consecuentemente, se presentó evidencia para establecer que el área de desove de jurel  
8 puede ser considerada continua a lo largo de una franja delimitada por el frente  
9 subtropical, la cual presentó mayores densidades recurrentes en la zona oceánica en el  
10 centro sur de Chile, lo que puede estar relacionado con un rasgo tipo *natal homing*  
11 donde los jureles vuelven a desovar en el área donde nacieron. Esta hipótesis pudo  
12 también contrastarse al analizar en conjunto los registros positivos para huevos y larvas  
13 de jurel registrados por investigaciones rusas, chilenas y peruanas en un periodo extenso  
14 de tiempo (Figura 83c) las cuales coinciden espacialmente con lo propuesto. No  
15 obstante, un tema a abordar en futuras investigaciones, y que a la fecha no cuenta con  
16 antecedentes robustos para análisis, es el *timing* del desove a lo largo de la franja  
17 propuesta, el cual puede tener diferencias comenzando más temprano en el sector más  
18 cercano a la costa y terminando masivamente en el sector oceánico frente a Chile  
19 centro-sur.

1



2

c)



3

4 Figura 83. a) temperatura superficial para la temporada reproductiva de jurel año 2015;  
 5 b) probabilidad de encuentro basada en las condiciones térmicas para el año 2015; c)  
 6 Distribución de estaciones de ictioplancton (puntos azules) y estaciones positivas  
 7 (puntos rojos) con presencia de huevos y larvas del jurel durante los años 1972-1995  
 8 (recopilación de los resultados de investigación del IMARPE (Perú), VNIRO-  
 9 AtlantNIRO (Rusia), IFOP e INPESCA (Chile).

10

11 Uno de los resultados más relevantes de este estudio, hacia la estructura poblacional de  
 12 jurel, fueron los patrones espaciales de conectividad establecidos por el proceso de  
 13 transporte posterior al desove. Uno de los aspectos considerados por la hipótesis de  
 14 metapoblaciones explicada anteriormente es la independencia de las áreas de desove y  
 15 la segregación espacial de las rutas de conexión con el área de crianza donde se mezclan  
 16 los individuos de una u otra zona. Una vez analizada la posibilidad de continuidad del  
 17 área de desove, este proyecto incorporó la distribución espacial probable de juveniles de

1 jurel de 4 meses de edad bajo condiciones de nacimiento y transporte realistas para cada  
2 año modelado (periodo 1994-2014) y para las tres áreas de desove contempladas como  
3 unidades separadas espacialmente (Perú, Chile norte y Chile centro-sur oceánico), lo  
4 que permitió probar hipótesis relacionadas con la segregación de los patrones de  
5 conectividad del proceso global de reproducción de jurel en el Pacífico suroriental. A  
6 partir de la información que da origen a las Figuras 71, 72 y 73 se generó un patrón  
7 general de distribución probable de juveniles, para cada año, obtenidos desde  
8 modelación biofísica considerando todas las fuentes de desove, el cual se muestra en la  
9 Figura 84. Los resultados mostraron un patrón claro y consistente a lo largo del tiempo,  
10 el cual evidenció que independiente de la variabilidad interanual del proceso de  
11 transporte y de las trayectorias que generan los individuos, todos los años se observó  
12 una continuidad espacial de juveniles de jurel. Esta misma información se analizó en el  
13 contexto de la densidad espacial de individuos sobrevivientes considerando la  
14 información de todos los años modelados, lo que se resume en la Figura 85. En esta se  
15 observa la continuidad del proceso espacial de distribución espacial de juveniles  
16 modelados biofísicamente, donde el mayor núcleo de densidad se ubicó en el sector  
17 costero entre los 15° y 25°S disminuyendo en densidad hacia el suroeste y noroeste.  
18 Este resultado es consistente con aquel obtenido desde la distribución espacial de  
19 reclutas registrados por cruceros acústicos en cuanto a su extensión latitudinal dentro  
20 del mar territorial chileno, estadísticamente el 54% de los juveniles modelados  
21 biofísicamente se encontraron dentro del área de distribución observada de reclutas, no  
22 obstante la limitación de información acústica hace imposible una comparación en el  
23 resto de la distribución modelada. En este contexto, en futuras investigaciones es  
24 altamente necesaria la integración de información desde investigaciones de distribución  
25 de reclutas en Perú. No obstante a ello, lo reportado por Dioses (2013) para el jurel en el  
26 Perú muestra una distribución en una franja costera desde los 18°S al sur, lo que da  
27 continuidad a la distribución observada en el norte de Chile y coincide con lo modelado  
28 en el presente estudio.

29

30 Además, lo que subyace a este resultado es que no obstante el sistema es ampliamente  
31 dinámico afectado por distintas fuentes de variabilidad interanual en las condiciones  
32 ambientales y oceanográficas, las condiciones físicas del sistema promueven una  
33 conectividad general poblacional a través del proceso de dispersión en la historia de

1 vida temprana del jurel. Este resultado fue altamente informativo en términos de  
2 establecer que el hábitat de jurel en el Pacífico suroriental no presenta barreras físicas  
3 que generen una segregación del destino de los productos de la reproducción sugiriendo  
4 un esquema de población altamente conectada y sin límites biofísicos que generen  
5 unidades poblacionales aisladas geográficamente.

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

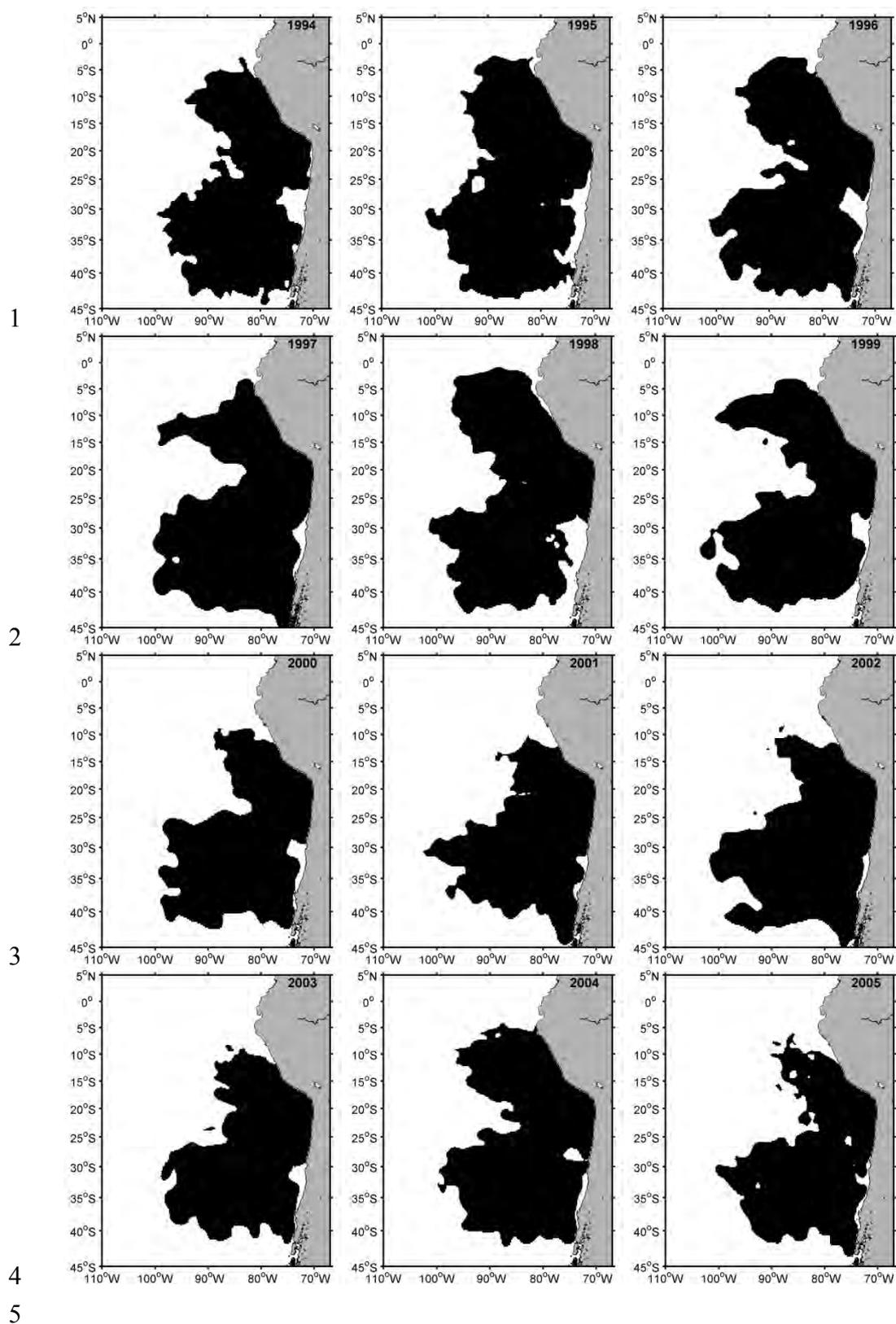
22

23

24

25

26



6 Figura 84. Distribución espacial interanual probable de los individuos sobrevivientes al  
 7 proceso de transporte de 120 días desde todas las zonas modeladas en conjunto (Perú,  
 8 Chile norte, Chile centro-sur oceánica).

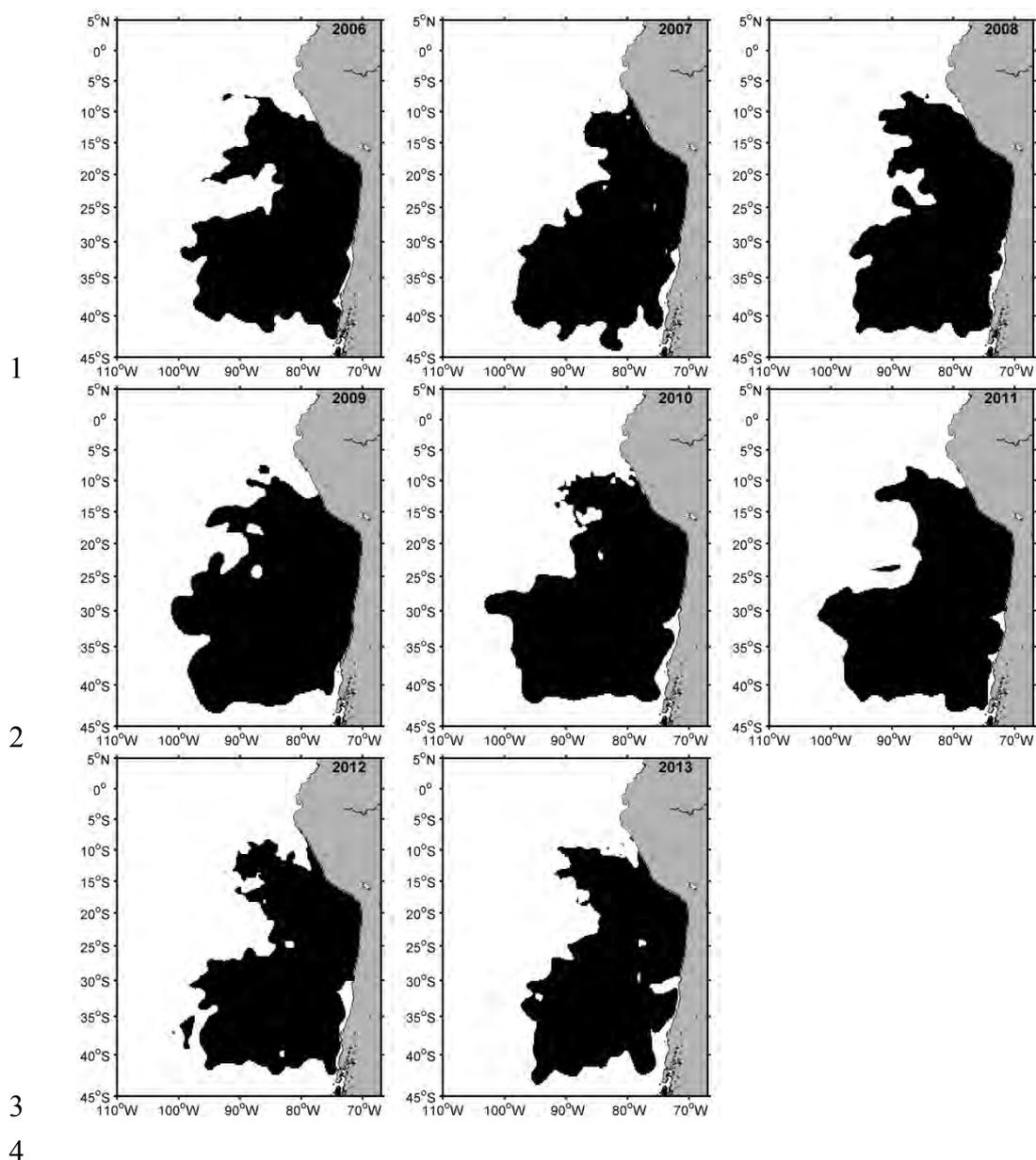
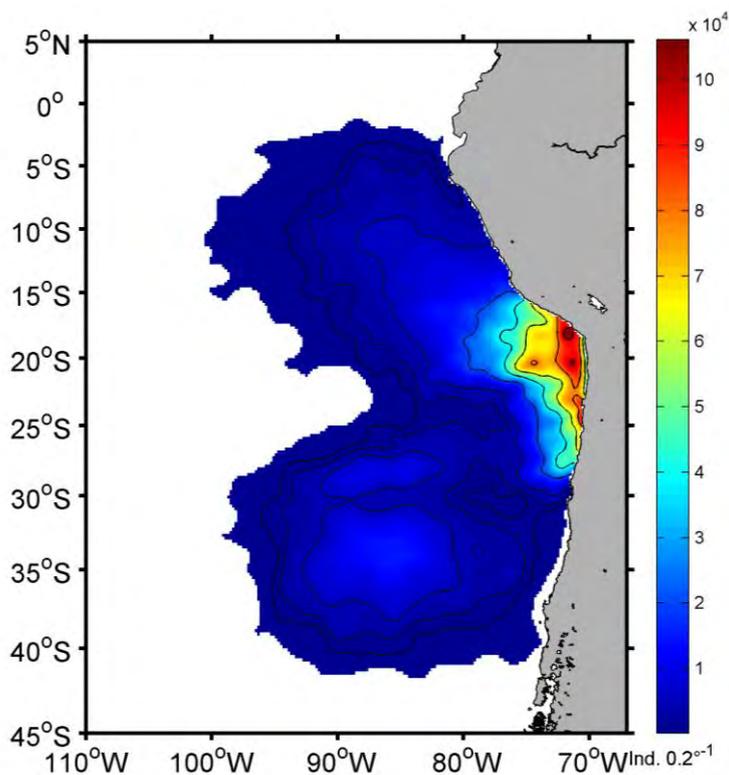


Figura 84(continuación). Distribución espacial interanual probable de los individuos sobrevivientes al proceso de transporte de 120 días desde todas las zonas modeladas en conjunto (Perú, Chile norte, Chile centro-sur oceánica).

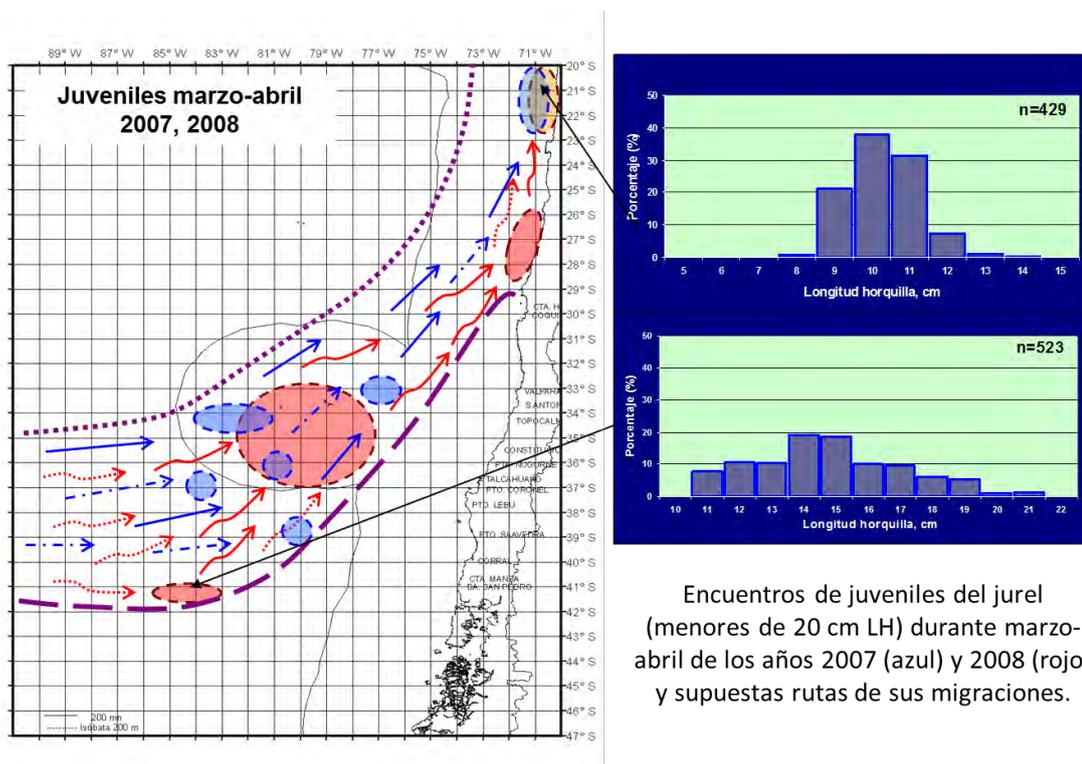
La conectividad de los peces juveniles nacidos en el área principal de desove hacia el área de crianza puede ser reflejada también en las migraciones activas de los peces juveniles de tamaños modales de 10 a 15 cm LH, las cuales fueron detectadas en cantidades importantes en los lances de pesca y en equipos acústicos de la flota nacional y la prospección científica del BBIP Biomar III en los años 2007-2009, principalmente en los meses marzo-abril (Figura 86). Es destacable la amplitud espacial zonal de éstas agregaciones, entre los 36°-41°30'S por el Oeste (87°-84°W) y los 33°-37°S en la cercanía de la ZEE de Chile (79°-77°W) altamente coincidente con los resultados de la

1 modelación. Estas agregaciones tenían, en general, un rumbo de desplazamiento hacia el  
2 Este-Noreste, es decir, hacia el sector costero. Su presencia en las costas en tamaños  
3 bastante similares fueron reportadas, por ejemplo, por los barcos de la flota en los meses  
4 de abril-mayo en los años 2010 y 2014 donde y cuando las agregaciones de jurel juvenil  
5 distribuyeron en una franja costera bastante estrecha (entre 5 y 20 mn) desde San  
6 Antonio hasta Caldera con una clara y rápida migración hacia el Norte. Resulta  
7 importante destacar una coincidencia de encuentros de los cardúmenes de peces  
8 juveniles (la zona Oeste) con la cercanía de la posición espacial de los núcleos de  
9 retención de huevos y larvas de jurel (73 del presente proyecto, los años 2006-2008, por  
10 ejemplo), los que pueden ser producto de sobrevivencia mayor de estos núcleos  
11 observados.  
12



15 Figura 85. Distribución total de individuos juveniles de jurel (4 meses de edad) obtenida  
16 mediante modelación biofísica desde las tres áreas de desove consideradas (Perú, Chile  
17 norte y Chile centro-sur) en el periodo 1994-2013.  
18

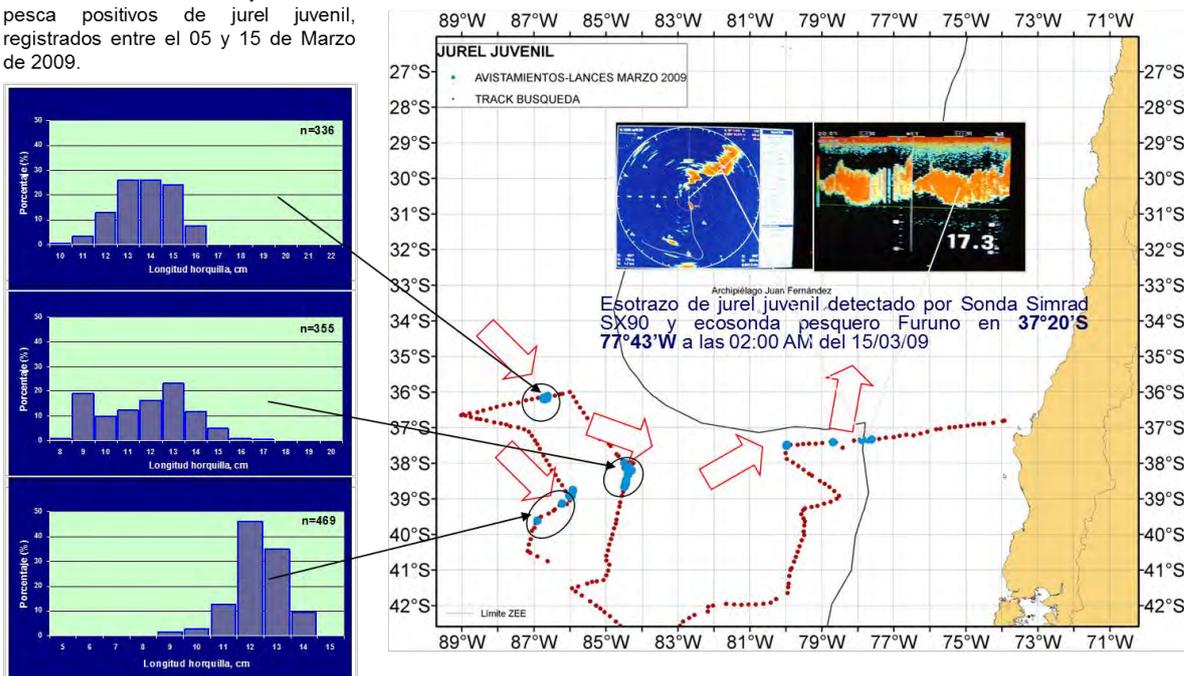
19  
20  
21



Encuentros de juveniles del jurel (menores de 20 cm LH) durante marzo-abril de los años 2007 (azul) y 2008 (rojo) y supuestas rutas de sus migraciones.

1

Posición de avistamientos y lances de pesca positivos de jurel juvenil, registrados entre el 05 y 15 de Marzo de 2009.



2

3

Figura 86. Ejemplos de encuentros y la estructura de tamaños de los juveniles de jurel en lances de pesca industrial y las prospecciones del BBIP Biomar III en los años 2007-2009 frente las costas de Chile centro sur.

7

Un último componente faltante en la estructura poblacional interna de jurel son las conexiones entre la zona de crianza y las áreas de distribución de peces adultos a través

9

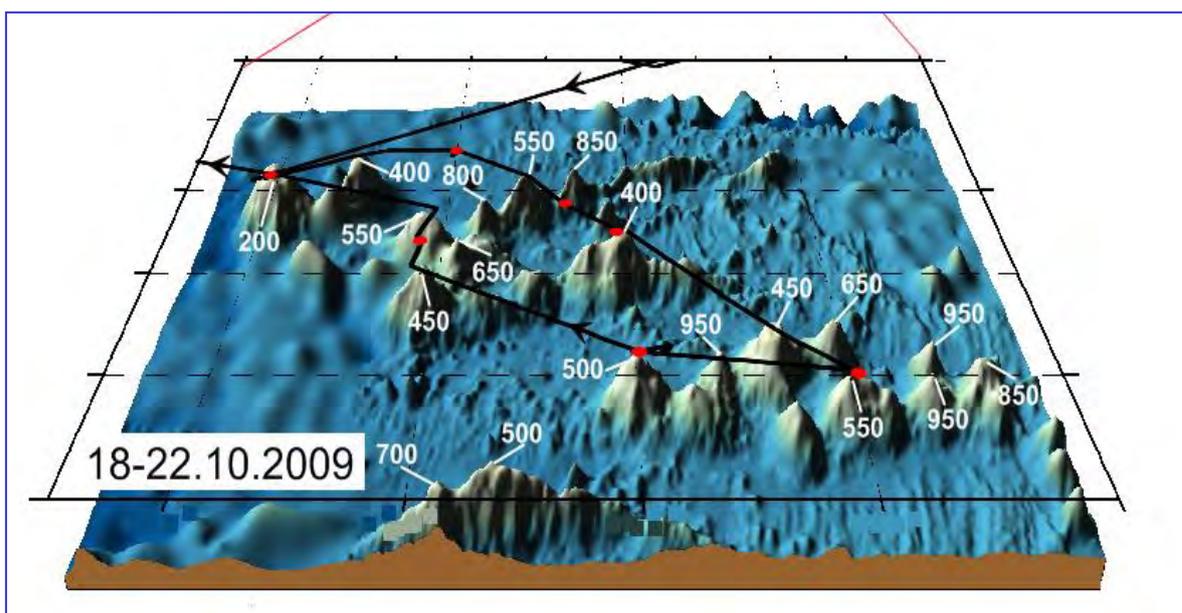
1 de los peces reclutas ( $C - r - A_{\text{norte}}$  y/o  $A_{\text{sur}}$ ), que pueden expresarse a través de  
2 entradas a las pesquerías regionales (Perú, Chile centro-sur, oceánica) de los peces  
3 juveniles en primera madurez sexual, alrededor de los 23-26 cm LH y/o de los 25-30  
4 cm LT (para el Perú), además incorporando en algunos años, a peces pre-reclutas, de  
5 tamaños menores y en etapa pre-desovante.

6  
7 Como ya fue descrito anteriormente, en época de régimen climático cálido (antes del El  
8 Niño 1997-1998), las migraciones predominantes de peces reclutas (y algunos pre-  
9 reclutas) estuvieron orientadas hacia aguas costero-oceánicas frente las costas peruanas  
10 y, solo en los años de El Niño (e.g. 1982-1983, 1986-1987 y 1992), éstas se registraron  
11 hacia aguas costeras de Chile centro-sur y también oceánicas adyacentes. A diferencia  
12 de ésta época, en el período de régimen climático frío (desde 1998-2000) se destacan  
13 migraciones más frecuentes de reclutas de jurel en dirección opuesta del período  
14 anterior, es decir, hacia el sur y suroeste desde la zona de crianza, y no solo en los años  
15 de El Niño. La existencia de estas rutas de migraciones, hacia aguas costeras de Chile  
16 centro-sur y aguas oceánicas frente esta región se refleja en la estructura anual de  
17 tamaños de jurel juvenil en las capturas de la zona costera de Chile centro-sur entre los  
18 años 1995-2004, también en 2007, 2009-2011 y 2015-2016 (Figura 81c) y, en la zona  
19 oceánica en las capturas de la flota extranjera entre los años 2000-2005, 2014-2015  
20 (citas ORP), como también en las prospecciones de AtlantNIRO en 2002 y 2009  
21 (AtlantNIRO, 2003, 2010). En las aguas costeras del Perú, a pesar de la presencia casi  
22 permanente de los peces juveniles, es posible destacar pulsos aislados y más abundantes  
23 de reclutas desde la zona de crianza hacia el Perú (después de 2000) solo en los años  
24 2001-2002, 2004-2005, 2007-2008, 2011-20012 (Figura 81a).

#### 26 *6.7.2.4. Rol de las dorsales oceánicas y bajos submarinos como áreas potenciales de* 27 *desove/crianza*

28 Basándose en los resultados de modelación biofísica del presente estudio hacia la  
29 determinación de rol de los montes submarinos (Figura 87) como zonas temporales de  
30 crianza, se observó que las trayectorias de transporte de juveniles de jurel alcanza la  
31 zona de intersección de la Cordillera del Pacífico Este y la Cordillera de Chile como  
32 además de los montes submarinos de la Cordillera Nazca (Figura 88), las que bajo  
33 condiciones propicias podrían favorecer a la formación de las zonas de crianza de jurel

1 en sus alrededores y también aportar a la abundancia de los reclutamientos en la región,  
 2 además esta última Cordillera se ubica bastante cerca tanto de las zonas de desove  
 3 oceánico de jurel (frente las costas del Perú y del Norte de Chile) como de la zona  
 4 principal de crianza de esta especie (aguas costero-oceánicas de sur del Perú y norte de  
 5 Chile).  
 6



7

8 Figura 87. Estaciones del buque de investigación BIC Atlantida (AtlantNIRO, Rusia)  
 9 entre 18-22 de Octubre de 2009 para estudiar la frecuencia de tallas de juveniles de jurel  
 10 en el Pacífico Sur y batimetría de montes submarinos en el área entre 35°00'-37°30'S y  
 11 112°00'-116°30'W.

12

13 Este resultado fue consistente con lo reportado por Parada *et al.* (2017) que a través de  
 14 experimentos de modelación, indican un alto nivel de retención de partículas para los  
 15 años 2001 y 2005 consistente con la presencia de remolinos estacionarios asociados a  
 16 los montes submarinos y a un bajo nivel de energía cinética de remolinos. La evidencia  
 17 de juveniles encontrados durante Octubre del 2009 (moda 14 cm), se vio corroborada en  
 18 los años siguientes (probable cohorte) por la evidencia de jureles con modas de 18-20  
 19 (2010), 26-28 (2011) cm en zonas adyacentes a los bajos submarinos durante  
 20 temporadas de pesca de 2010-2011 (lejos de la zona principal de crianza en el norte de  
 21 Chile y sur de Perú). Estas dos evidencias en conjunto con los resultados de la  
 22 modelación sugieren que los montes submarinos pueden cumplir un rol potencial como  
 23 zonas temporales "de crianza-reclutamiento", lo incorpora un nuevo conocimiento para  
 24 el entendimiento de la estructura poblacional de la especie en el Pacífico suroriental

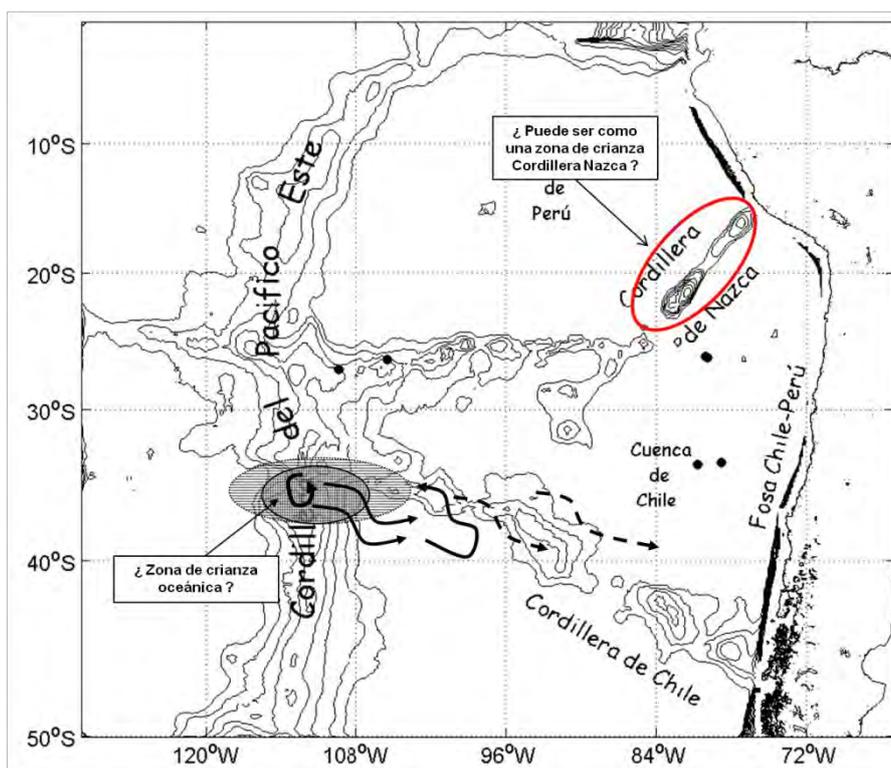


Figura 88. Probabilidad de las zonas temporales “de crianza-reclutamiento” en las regiones de las cordilleras de los montes submarinos en el Pacífico Sur.

6.7.2.5. Una nueva propuesta de modelo conceptual de la estructura poblacional del jurel basada en rasgos biofísicos.

En base de los antecedentes de la historia de vida de jurel y los resultados de la modelación biofísica de éste proyecto (adultos en engorda y desove, áreas de desove, migraciones de peces juveniles del desove, ubicación espacial de la zona de crianza, aportes de reclutamientos de la zona de crianza) se proponen esquemas para el modelo conceptual de la estructura poblacional del jurel en el Pacífico suroriental con una separación para períodos climáticos cálido y frío que coinciden con los períodos de alta y baja abundancia del recurso y/o de la expansión y contracción poblacional respectivamente, como también para los años de importantes eventos de El Niño en la región. Se propone que en el Pacífico suroriental habita una población de jurel ampliamente dispersiva a través de su historia de vida temprana, que habita un sistema que no presenta barreras físicas que generen segregación o aislamiento en unidades poblacionales discretas. Los resultados apoyan en mayor medida a la hipótesis vigente de “superpoblación o población por parches” distribuida tanto en aguas costeras del Perú y Chile como aguas oceánicas abiertas.

1 La Figura 89 resume el esquema de estructura poblacional propuesto en el presente  
2 estudio. Los elementos principales que dan origen a este esquema son:

3

4 - Dos áreas de distribución de peces adultos en engorda ( $A_{\text{norte}}$  y  $A_{\text{sur}}$ ) temporalmente  
5 separados entre sí en el sector del codo de Arica durante los meses de verano, sin  
6 embargo, existen conexiones entre éstos a través de las migraciones de peces por la  
7 costa desde el sur hacia el norte en los meses de otoño-invierno como también a través  
8 de migraciones de peces desovantes en los meses de primavera hacia el área de desove  
9 tanto desde el norte (Perú, norte de Chile) como del sur (Chile centro-sur y océano  
10 abierto), hacia un área donde se produce mezcla de los ejemplares adultos de jurel de  
11 ambas áreas ( $A_{\text{norte}}$  y  $A_{\text{sur}}$ ) y desde el área de desove hacia los áreas norte y sur de  
12 engorda. La existencia de dos áreas de distribución de peces adultos y las conexiones  
13 entre éstas son similares para ambos períodos en cuestión, sin embargo, se reducen  
14 (desaparecen) la conexiones costera hacia el norte por la costa y de la zona de desove  
15 hacia el área norte y se potencian las conexiones desde el área norte hacia el área de  
16 desove y del área de desove hacia el área sur en los años de El Niño.

17

18 - El área continua de desove que se extiende desde las aguas costero-oceánicas del Perú,  
19 del Norte de Chile hasta de Chile centro-sur y desde las zonas próximas de Chile centro-  
20 sur hacia el océano abierto (donde alcanza su máxima expresión), con una temporalidad  
21 de desove de peces que se incorporan al proceso de desove que comienza en julio-  
22 septiembre frente las costas del Perú y termina en diciembre-enero frente las costas de  
23 Chile centro-sur.

24

25 - El área principal de crianza de jurel juvenil durante los primeros 2 años de vida (hasta  
26 la edad de primera madurez sexual) se ubica en aguas costeras del norte de Chile y el  
27 sur del Perú ( $15^{\circ}$ - $30^{\circ}$ S), puede presentar variaciones espaciales tanto decadales (en  
28 período climático cálido más al sur del Perú, en período frío con ubicación preferente  
29 hacia el norte de Chile), interanuales (con desplazamientos de centros de gravedad hacia  
30 el norte en los años de La Niña y, hacia el Sur en los años de El Niño como estacionales  
31 (en verano una ubicación costera y en invierno una expansión hacia el mar abierto). Se  
32 confirma la existencia de conexiones entre los diferentes focos de desove de jurel dentro  
33 del área de desove y la zona principal de crianza tanto a través del proceso de transporte

1 de huevos, larvas y juveniles (modelación biofísica) como de las migraciones activas de  
2 los peces juveniles posterior a los 4 meses de edad (datos de las observaciones en  
3 terreno). En esta área de crianza se forman los nuevos reclutamientos de jurel de  
4 diferentes niveles de abundancia dependientes del éxito de entrada de los peces  
5 juveniles provenientes del desove anual.

6  
7 - Las migraciones activas de los reclutamientos anuales de jurel desde la zona principal  
8 de crianza hacia las áreas de distribución de los peces adultos presentan variabilidad  
9 interanual y decadal en los esquemas propuestas. Durante el régimen climático cálido  
10 éstas predominan hacia las aguas costero-oceánicas del Perú tanto de la región central  
11 como del norte y, fortalecen hacia el Sur-Suroeste (Chile centro-sur y el océano abierto)  
12 durante los años de El Niño. Durante el régimen climático frío, las entradas de los  
13 nuevos reclutamientos hacia las áreas de distribución de peces adultos tienen mayor  
14 regularidad y son más abundantes hacia el sur (Chile centro-sur y aguas abiertas) que  
15 hacia las aguas peruanas, independientes de las condiciones La Niña – El Niño; hacia  
16 las aguas peruanas estas aparecen en forma de pulsos irregulares, probablemente con el  
17 potenciamiento de flujos costeros de aguas frías de la Corriente Humboldt en algunos  
18 años. Sin embargo, en los años de El Niño en el esquema conceptual propuesto, las  
19 salidas de reclutas de la zona de crianza son bastante similares a las detectadas en el  
20 período del régimen climático frío.

21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29

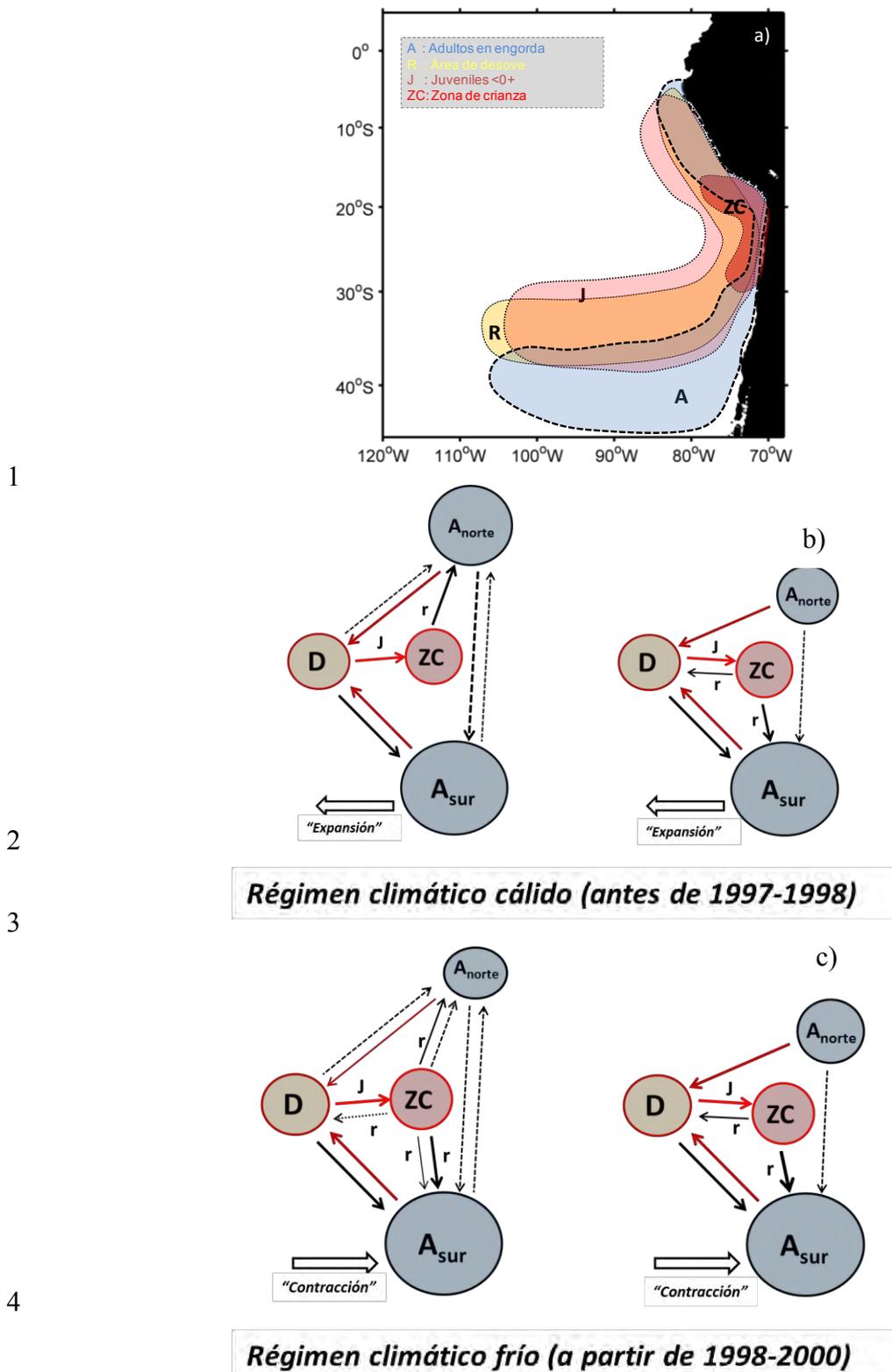


Figura 89. Modelo conceptual para la estructura poblacional del jurel propuesto a partir de las evidencias del presente estudio: a) esquema espacial de distribución de las fracciones del ciclo de vida del jurel bajo un esquema de población única; b) esquema de las conexiones entre las fracciones de la población bajo un régimen cálido (previo al niño 1997-1998); c) esquema de las conexiones entre las fracciones de la población bajo un régimen frío (posterior al niño 1997-1998).

## 7. CONCLUSIONES

### 7.1. Modelación Hidrodinámica

- El modelo hidrodinámico ROMS de resolución espacial de 10 km y temporal diaria para el Pacífico suroriental mostró un buen desempeño reproduciendo los rasgos oceanográficos más importantes observados en el Pacífico suroriental
- La comparación entre las salidas superficiales del modelo ROMS y datos satelitales de temperatura y salinidad superficial del mar arrojó una buena correlación espacial describiendo la señal estacional de estas variables y en términos temporales interanuales se obtuvo para el caso de temperatura una correlación de un 0,93 mientras que en salinidad es de 0,63.
- El comportamiento del modelo ROMS en la columna de agua mostró un buen ajuste con los datos CTD del crucero WOCE tanto para las transectas frente a Perú y a Chile, para salinidad y temperatura, mostrando el mismo comportamiento y descripción. La temperatura frente a Perú del modelo sobrestimó en 0,5°C mientras que la salinidad la subestimó en 0,5 psu. Frente a Chile la correlación se mantuvo alta en temperatura pero menor en salinidad. En términos generales el modelo describió las principales masas de agua presentes en dominio estudiado.
- La variación de la profundidad de la isoterma de 20°C que describió el modelo ROMS en promedio, se acopló a la señal El Niño 3.4, sobre todo en los periodos El Niño extremos 1997-1998 y 2009-2010. Así mismo el modelo reprodujo de buena forma la extensión meridional de la anomalía térmica proveniente del ecuador y remarcada por periodos El Niño. También el modelo mostró la señal de enfriamiento costera que se generó el 2007.
- El modelo fue capaz de describir la circulación general de las corrientes, mostrando similares patrones a los obtenidos mediante derivadores a 25 metros de profundidad. La circulación simulada por el modelo en promedio tiene una dirección desde el océano hacia la costa y luego subiendo hacia el norte, mostrando su máxima intensidad frente a Chile central, disminuyendo en norte de Chile (codo de Arica).

### 7.2. Aspectos Oceanográficos

- El transporte de Ekman tiene un efecto significativo sobre la deflexión de las isotermas, especialmente al Este de los 80°W y en primavera-verano. En la región situada al interior de los límites de  $\tau=0$  zonal y meridional, se verifica superficialmente un esfuerzo del viento mínimo que induce a la no-deflexión de las isotermas (perpendiculares a la costa), las que sólo varían estacionalmente, estableciendo un hábitat favorable de menor dinámica para el desove del jurel hacia el océano interior. En tanto, en las cercanías de la costa las isotermas se deflecan abruptamente hacia el norte, y en primavera-verano, éstas se curvan

- 1 producto del flujo hacia el sur de las velocidades del transporte de Ekman y las  
2 intensas velocidades geostróficas hacia el norte que favorecen la deflexión de  
3 las isotermas costeras a latitudes menores.
- 4 • La climatología mensual de las velocidades zonales y meridionales del  
5 transporte de Ekman a los 50 m indicaron un flujo desde la zona más oceánica  
6 hacia la costa en los  $\sim 35^{\circ}\text{S}$ , bifurcándose en la zona costera en concordancia  
7 con el sentido norte del flujo geostrófico. Lo anterior se verificó como un  
8 forzante no explorado para el transporte de estados tempranos de jurel desde la  
9 región oceánica de desove hacia la costa.
  - 10 • El frente subtropical (FST) y la Corriente del Pacífico Sur (CPS) tienen un  
11 movimiento latitudinal estacional, hacia el norte en invierno y hacia el sur en  
12 verano. La CPS al acercarse al continente se bifurca en una rama que se dirige  
13 al norte pasando a ser parte del Sistema de Corrientes de Chile-Perú, mientras  
14 que la otra rama se dirige hacia el sureste formando la corriente del Cabo de  
15 Hornos.
  - 16 • El FST y la CPS se mantienen asociados zonalmente hasta aproximadamente  
17 los  $90^{\circ}\text{W}$  donde el FST se desvía hacia el noroeste asociado a la rama norte de  
18 la corriente. La posición del FST tiende hacia latitudes mayores a partir de  
19 1975, permaneciendo relativamente estacionario en la década de los años 80 y  
20 oscilando meridionalmente entre latitudes menores en la década del 90 y 2000.
  - 21 • Los remolinos de mesoescala estuvieron siempre presentes en el área de estudio,  
22 con una señal anual y preponderancia de los anticiclónicos. El número de  
23 remolinos y la energía cinética asociada a ellos varía en el tiempo, mostrando  
24 periodos de aproximadamente 5 años con bajos valores de EKE (2000-2005),  
25 mayores valores entre 2006 y 2011, como también una caída significativa entre  
26 2013 y 2014. El transporte producido por los remolinos de mesoescala aunque  
27 es variable, muestra una clara tendencia al incremento, alcanzando un máximo  
28 en 2014.
  - 29 • La dinámica superficial de la región norte de Chile, al interior de las 200 mn  
30 (zona de crianza de jurel juvenil), se encontró modulada principalmente por la  
31 forma de la línea de costa (curvatura) que induce una drástica disminución del  
32 esfuerzo del viento meridional. La baja ventilación en la zona de la curvatura  
33 induce una disminución de la surgencia, y por ende, un menor enfriamiento de  
34 las zonas contiguas. Esta baja ventilación induce que en la zona de la curvatura,  
35 la TSM sea más conservativa estacionalmente, es decir, tienda a mantener altos  
36 rangos de temperaturas durante un mayor periodo con respecto a las zonas  
37 aledañas, quedando el ascenso de aguas frías de surgencia acotado a una región  
38 muy cercana a la costa.
  - 39 • En la superficie de la región exterior norte del  $\tau$ -cero, la lengua cálida  
40 proveniente de la zona ecuatorial durante primavera-verano resaltó el flujo de  
41 Ekman en la misma dirección, quedando atrapada en la zona de la curvatura del  
42 norte de Chile. La estructura espacial del primer modo FEO (98,2% varianza  
43 total) de la TSM rescata la compleja dinámica de la región norte, evidenciando  
44 la angosta franja de bajas amplitudes asociadas a procesos de surgencia frente a

1 la costa del Perú, además de la lengua cálida costera y su desplazamiento en la  
2 zona de la curvatura Perú-Chile.

- 3 • La climatología del transporte superficial de Ekman frente a la zona de la  
4 curvatura Perú-Chile mostró un comportamiento estacional, alcanzando su  
5 máximo en primavera-verano ( $\sim 400 \text{ m}^2/\text{s}$ ), y disminuye hasta  $\sim 200 \text{ m}^2/\text{s}$  en  
6 otoño-invierno. Esta zona se caracterizó por tener un mínimo de transporte  
7 comparado con el centro-sur del Perú, con magnitudes  $>1000 \text{ m}^2/\text{s}$ , verificando  
8 a la región de reclutamiento de juveniles de jurel como una región de mucho  
9 menor dinámica en la región noreste de la costa chilena.

- 10 • En el norte de Chile, son relevantes las perturbaciones asociadas a la península  
11 de Mejillones en los campos de velocidades de las corrientes marinas. La  
12 climatología del esfuerzo del viento mostró el atrapamiento costero de giros al  
13 norte de la península de Mejillones, especialmente en otoño-invierno (al Este de  
14 la región delimitada por  $\tau$ -cero zonal), que podría actuar como otro mecanismo  
15 de retención (menor dinámica) en la región costera del norte de Chile.

- 16 • El comportamiento de la clorofila en la región de crianza de jurel en el norte de  
17 Chile, fue espacialmente heterogénea y temporalmente aperiódica con una señal  
18 anual débil. Las mayores concentraciones se observaron al norte de península de  
19 Mejillones y entre el 2002 y 2012. Estos valores disminuyeron a partir de 2012,  
20 aunque permanecieron mayores que al sur de Mejillones. La zona de la  
21 Península de Mejillones es un límite bio-oceanográfico que separa dos zonas,  
22 las cuales en términos de la clorofila retenida en la costa son diferentes.  
23

### 24 **7.3. Modelación biofísica y estructura poblacional**

- 26 • Diferentes áreas de desove, y para diferentes centroides de distribución de  
27 estados tempranos de jurel (Perú, Chile norte, Chile centro-sur), están  
28 conectadas con la zona de crianza establecida entre la zona norte y centro de  
29 Chile.  
30

- 31 • El área de reclutamiento modelada ( $15^\circ\text{S} - 30^\circ\text{S}$ ; costa – 600km) está  
32 correlacionada espacialmente con el área de máxima probabilidad de encuentro  
33 de individuos reclutas observados por acústica, confirmando la hipótesis de  
34 trabajo propuesta para este estudio.  
35

- 36 • El transporte desde la zona de desove en Perú está altamente diferenciado por la  
37 localización de los centros reproductivos. Desoves situados en la zona centro-  
38 norte tendrían mayor probabilidad de ser exportados costa afuera, mientras que  
39 desoves en el extremo sur muestran mayor grado de retención y conectividad  
40 con el área de crianza.  
41

- 42 • El área de desove en el norte de Chile está dentro del área de crianza y muestra  
43 una alta retención ( $>80\%$ ) con niveles medios de variabilidad interanual bajo  
44 escenarios de desoves de alta densidad, esta zona puede ser altamente relevante  
45 para el reclutamiento.

- 1 • El área de desove principal frente a Chile centro-sur muestra un alto grado de  
2 dispersión con individuos transportados recurrentemente en trayectorias noreste.  
3 No obstante, se observa un alto grado de variabilidad interanual, todos los años  
4 modelados mostraron conectividad con el área de crianza, evidenciando un rasgo  
5 recurrente en la población.  
6
- 7 • El proceso de dispersión desde el área de desove de Perú involucra conectividad,  
8 además del área de crianza simulada, con la zona oceánica adyacente a Perú, la  
9 zona oceánica adyacente al norte de Chile y retención dentro del área de Perú.  
10
- 11 • El proceso de dispersión desde el área de desove en el norte de Chile involucró  
12 conectividad, además de la retención en el área de crianza simulada, con la zona  
13 oceánica costera de Perú, con la zona oceánica adyacente a Chile norte y  
14 excepcionalmente con el aérea oceánica frente a Chile central.  
15
- 16 • El proceso de dispersión desde el área de desove en Chile centro-sur involucró  
17 conectividad, además de el área de crianza simulada, con el área oceánica frente  
18 a Chile norte, retención en el área oceánica centro-sur de Chile y bajos niveles  
19 de conexión con la zona al oeste del área de desove y el extremos sur del domino  
20 modelado.  
21
- 22 • El patrón de dispersión desde Perú mostró dos escenarios de acoplamiento  
23 biofísico, el primero respecto a desoves ocurridos en la zona centro-norte, donde  
24 los desoves se acoplan con un sistema de surgencia activo y experimentaron  
25 altos niveles de advección costa afuera; y el segundo con desoves en la región  
26 centro-sur donde experimentaron un mayor grado de retención y transporte hacia  
27 el sur por la costa (un sistema más estable en relación al viento).  
28
- 29 • El patrón de dispersión en la zona norte mostró un escenario poco variable entre  
30 años con importantes niveles de retención, producto de un sistema altamente  
31 estable, con bajo estrés de viento y baja advección costa afuera.  
32
- 33 • El área principal de desove de Chile centro-sur mostró una alta correlación con  
34 la ubicación del frente subtropical en primavera con desoves en un ambiente  
35 estable en términos del estrés del viento y la energía cinética. Posterior al desove  
36 esta área evidenció altos niveles de dispersión producto del patrón de circulación  
37 general además del transporte de Ekman asociado al estrés del viento en estratos  
38 superficiales.  
39
- 40 • Procesos de mesoescala como frentes, filamentos, meandros y particularmente  
41 giros pueden alterar localmente las trayectorias de transporte de huevos, larvas y  
42 juveniles de jurel, pudiendo atraparlos y generar patrones de  
43 retención/dispersión diferenciados.  
44
- 45 • Se destaca la significativa correlación que entrega el índice de reclutamiento  
46 biofísico con el reclutamiento del modelo de evaluación de stock (grupo de edad  
47 1), evidenciando el importante poder predictivo de este modelo en relación a la  
48 dinámica del reclutamiento un año posterior a los desoves.  
49

- 1 • El alto rango de dispersión y alta sobreposición de los productos de desove  
2 apoyan la hipótesis de una población panmíctica y coincidente con la evidencia  
3 genética que hasta ahora conocemos del recurso.  
4
  - 5 • La población de jurel muestra características claras de un recurso altamente  
6 migratorio o transzonal con alto nivel de conectividad apoyado por procesos  
7 oceanográficos y sin que existan barreras en el hábitat utilizado por el recurso.  
8
  - 9 • Los resultados obtenidos respaldaron la generación de un modelo conceptual del  
10 población de jurel bajo una hipótesis de una población altamente conectada, sin  
11 aislamiento reproductivo y sin barreras físicas que impidan el intercambio  
12 genético a nivel del área de distribución en el Pacífico suroriental.  
13
- 14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37

## 8. TALLERES Y REUNIONES

---

En el marco del desarrollo de este proyecto hasta la fecha se realizaron una serie de reuniones y talleres de trabajo, entre los que destacan:

**Reunión de coordinación con Subsecretaría de Pesca.** El día 03 de de septiembre de 2014 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. Mario Acevedo, Subsecretaría de pesca y acuicultura; Srta. Malú Zavando, Subsecretaría de pesca y acuicultura, Sr. Aquiles Sepúlveda, Director de INPESCA y Sr. Sebastian Vásquez, jefe de proyecto.

**Taller de diseño del modelo hidrodinámico.** El día 01 de Septiembre de 2014 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 jurel. 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 Octubre de 2014 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 del jurel en el Pacífico suroriental. En dicha reunión participaron los investigadores de INPESCA Aquiles Sepulveda, Alexander Gretchina, Sergio Núñez y Sebastian Vásquez.

**Taller interno de coordinación grupo de Oceanografía.** Realizado el día 28 de Noviembre de 2014 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 jurel frente a Chile, y en el sur del Perú, se realizó un Taller interno de trabajo del grupo de Oceanografía del proyecto, en dependencias del Instituto

1 de Investigación Pesquera. En dicho taller participaron los profesionales: Sergio Núñez  
2 Elías, Instituto de Investigación Pesquera; Luis Soto Mardones, Universidad del BíoBío  
3 Cristián Salas Domínguez, Instituto de Investigación Pesquera y Sebastián Vásquez  
4 Pastene, Jefe de proyecto. No estuvo presente en dicho taller el Dr. Jaime Letelier Pino  
5 (Universidad de Valparaíso), por imposibilidad de viajar. En consecuencia, se realizó  
6 una segunda reunión entre el Dr. Letelier y S. Núñez en Valparaíso el día 4 de  
7 Diciembre de 2014.

8  
9 **Sesión de trabajo del grupo de trabajo de dinámica poblacional.** El día 28 de  
10 Octubre de 2014 se realizó una jornada de discusión en dependencias de INPESCA para  
11 el análisis y discusión del modelo de evaluación de stock conjunto para jurel en al  
12 Pacífico suroriental, cuyos resultados serán parte de las piezas de información para  
13 contrastar las salidas del modelo hidrodinámico. En dicha reunión participaron los  
14 investigadores de INPESCA Marcos Arteaga, Claudio Gatica, Aquiles Sepúlveda y  
15 Sebastián Vásquez.

16  
17  
18 **Taller interno de análisis de resultados grupo de Oceanografía.** Realizado el día 04  
19 de Diciembre de 2015 con el propósito de analizar y discutir resultados relacionados  
20 con la caracterización oceanográfica de las zonas de desove y reclutamiento de jurel  
21 frente a Chile, y en el sur del Perú, en dependencias del Instituto de Investigación  
22 Pesquera. En dicho taller participaron los profesionales: Sergio Núñez Elías, Instituto de  
23 Investigación Pesquera; Luis Soto Mardones, Universidad del BíoBío, Cristián Salas  
24 Domínguez, Instituto de Investigación Pesquera y Sebastián Vásquez Pastene, Jefe de  
25 proyecto. No estuvo presente en dicho taller el Dr. Jaime Letelier Pino (Universidad de  
26 Valparaíso), por imposibilidad de viajar. En consecuencia, se realizó una  
27 videoconferencia para obtener sus apreciaciones.

28  
29 **Sesiones de discusión del grupo de trabajo de modelación biofísica y estructura**  
30 **poblacional.** Los días 02 de Abril , 16 de Diciembre de 2015 y 15 de enero de 2016 se  
31 realizaron reuniones de discusión en dependencias de INPESCA para la discusión  
32 relativas a los resultados de la modelación biofísica e hipótesis de estructura poblacional  
33 del jurel. En dichas reuniones participaron los investigadores de INPESCA Aquiles  
34 Sepúlveda, Alexander Gretchina, Sergio Núñez y Sebastián Vásquez.

1 **Sesión de análisis de modelo de evaluación de stock.** El día 21 de Diciembre de 2015  
2 se realizó en dependencias de INPESCA una reunión para analizar los datos y  
3 resultados reportados por la SPRFMO en relación al modelo de evaluación de stock y la  
4 estimación del reclutamiento. En esta reunión participaron los investigadores de  
5 INPESCA Claudio gatica, Marcos Arteaga y Sebastián Vásquez.

6  
7 **Preparación de manuscrito SPRFMO.** Durante el mes de Agosto sucesivas instancias  
8 de dialogo fueron establecidas para diseñar un manuscrito de apoyo al grupo científico  
9 de Chile en la *South Pacific Regional Fisheries Management Organisation*. Producto de  
10 esta instancia se generó el documento titulado: *Modelling the early life history of Jack*  
11 *mackerel in the Southeastern Pacific: an approach to population connectivity*  
12 presentado en la tercera reunión del comité científico celebrada en Port Vila, Vanuatu  
13 entre el 28 de Septiembre y 3 de Octubre de 2015. El citado artículo se adjunta en el  
14 Anexo V.

15  
16 **Taller de discusión y difusión de resultados.** El día viernes 28 de Septiembre de 2016  
17 se realizó con éxito el taller de discusión y difusión de resultados en dependencias del  
18 Hotel Diego de Almagro en la ciudad de Valparaíso. En dicha oportunidad participaron  
19 invitados de Subsecretaría de Pesca, institutos de investigación, Universidades,  
20 empresas pesqueras, etc. Además se contó con la presencia del experto internacional Dr.  
21 Andrés Ospina-Álvarez, quien además brindó una charla relativa al tema de estudio.  
22 Detalles del taller se entregan en el Anexo I.

23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33 **9. COMENTARIOS DEL EXPERTO INTERNACIONAL**

---

1  
2 En las bases técnicas de este proyecto se consideró altamente recomendable la  
3 participación de un experto internacional quien pudiera dar su opinión acerca del  
4 proyecto, sus impactos y sus proyecciones. De acuerdo a esto, el Dr. Andrés Ospina-  
5 Alvarez de reconocida trayectoria en el campo de la modelación biofísica fue invitado a  
6 participar del taller de difusión y discusión de resultados. El Dr. Ospina-Alvarez tuvo la  
7 gentileza de generar un documento de evaluación del proyecto, el cual se adjunta a  
8 continuación.

9  
10 **Taller de difusión de resultados FIP 2014-33**

11 *Informe de evaluación redactado por:*

12 Dr. Andrés Ospina-Alvarez

13 <http://www.andresospina.co.nr>

14  
15 

---

Center for Marine Conservation

16 Estación Costera de Investigaciones Marinas (ECIM)

17 Pontificia Universidad Católica de Chile

18 <http://ecim.cl>

19 <http://conservacionmarinauc.cl>

20  
21 **ANTECEDENTES**

22 El jurel *Trachurus murphyi* pertenece al grupo de los peces pelágicos de tamaño medio  
23 con un carácter altamente migratorio. Su distribución en el Pacífico es geográficamente  
24 muy amplia incluyendo toda la cuenca suroriental y hacia el suroccidente las  
25 inmediaciones de Nueva Zelanda y Tasmania. El extenso rango geográfico, la  
26 localización de las zonas de desove en Chile y Perú y las características reproductivas  
27 propias de la especie revelan la importancia de dilucidar la historia de vida temprana  
28 (huevos y larvas) del jurel con el objetivo de una gestión eficiente del stock o stocks.

29  
30 Los modelos hidrodinámicos acoplados a modelos de transporte de partículas son  
31 modelos biofísicos que permiten la simulación de las interacciones que experimentan  
32 los estadios tempranos pelágicos de especies marinas durante los procesos de transporte  
33 y dispersión por medio de las corrientes marinas. Este tipo de modelos permiten hacer  
34 predicciones para determinar el tránsito de huevos, larvas y juveniles desde las zonas de

1 desove hasta las zonas de crianza, que en muchas ocasiones suelen considerarse como  
2 zonas de reclutamiento. El análisis de los patrones de transporte y dispersión puede ser  
3 usado para responder interrogantes relacionados con sobrevivencia larval y juvenil,  
4 aporte de las zonas de desove al reclutamiento, cambios poblacionales relacionados con  
5 cambio climático, conectividad poblacional e incluso generar índices que complementen  
6 la evaluación del stock pesquero.

7  
8 El proyecto FIP 2014-33 tiene como objetivo general "Implementar un modelo biofísico  
9 espacialmente explícito que permita realizar predicciones de reclutamiento a nivel de  
10 los juveniles de jurel y entender las relaciones de conectividad entre todas las zonas de  
11 desove conocidas del recurso". Este informe analizará las distintas etapas en el proceso  
12 de modelación biofísica que han seguido los investigadores del proyecto FIP 2014-33  
13 desde un punto de vista externo y sugerirá recomendaciones prácticas que pueden ser  
14 aplicadas para mejorar los resultados y predicciones, igualmente se recomendarán  
15 esfuerzos en tópicos y subtópicos relacionados con la modelación biofísica en los que  
16 deberían enfocarse investigaciones futuras.

17  
18 El informe está estructurado en 6 secciones: 1) Modelo hidrodinámico; 2) Modelo de  
19 seguimiento de partículas; 3) Procesos biológicos; 4) Procesos oceanográficos; 5)  
20 Conectividad; 6) Predicción del reclutamiento; y 7) Conclusión. Para cada una de las  
21 seis primeras secciones se listarán una serie de tópicos y subtópicos en los que se  
22 detectaron fortalezas o debilidades, y se harán recomendaciones que puedan ser de  
23 ayuda práctica para reforzar, reformular o mejorar cada una de las etapas del proceso de  
24 modelado biofísico.

### 25 26 *1. Modelo hidrodinámico*

27 Los modelos hidrodinámicos tridimensionales (i.e. latitud, longitud y profundidad) son  
28 la piedra angular para los modelos de estadios tempranos de peces marinos. Velocidad  
29 de la corriente y difusividad son usados para calcular el movimiento de huevos y larvas  
30 en la columna de agua. Mientras que salinidad, temperatura y densidad son usadas para  
31 estimar la flotabilidad de huevos y larvas, predecir el desarrollo y crecimiento larval y  
32 determinar tasas de mortalidad. Un modelo hidrodinámico apropiado es crítico para el  
33 buen desarrollo de un ejercicio de modelado biofísico.

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32

*a. Tipo de modelo hidrodinámico*

El modelo hidrodinámico desarrollado por los investigadores del proyecto FIP 2014-33 es del tipo ROMS en su versión AGRIF 3.0 (IRD - Francia), este tipo de modelo se considera un estándar en las líneas de investigación de la oceanografía, hidrodinámica y climatología. Por parte del grupo ejecutor del proyecto FIP 2014-33 implementar este tipo de modelo hidrodinámico representa una elección adecuada que cumple ampliamente con los objetivos propuestos.

*b. Dominio espacial*

Desde los 7°N hasta los 44°S y desde 69°W hasta 129°W. Decisión acertada que cumple adecuadamente con el tipo de preguntas y objetivos planteados en el proyecto FIP 2014-33.

*c. Discretización horizontal y vertical*

La resolución horizontal del modelo utilizado es de 10 km que corresponden a mas o menos a 1/10°, equivalente a una grilla de 610 x 587 pixels. Se usaron estructuras de grilla que concuerdan con los tipos más comunes, Arakawa - B y Arakawa - C, lo cual permite una correcta solución de las ecuaciones primitivas para el dominio geográfico del Pacífico Suroriental. La resolución de 10 km es adecuada para representar procesos de mesoescala oceanográfica que afectan el transporte de estadios tempranos de jurel, sin embargo puede ser limitada para estudiar procesos que suceden muy cerca de la costa relacionados con el reclutamiento larval.

La resolución vertical es de 32 niveles sigma, la cual es más que suficiente para simular las condiciones de la columna de agua en la cual se desarrollan los estadios tempranos del jurel.

La recomendación en este apartado es utilizar modelos de mayor resolución horizontal, menor a 5 km, si se quieren hacer predicciones relacionadas con procesos ocurriendo cerca de costa. Otra alternativa es considerar el uso de modelos anidados, donde el modelo costero tenga una mayor resolución

1 horizontal que la actual.

2  
3 *d. Resolución temporal*

4 El modelo abarca desde 1993 hasta 2014. La resolución temporal del modelo es  
5 de 24 horas. El primer año se ha usado para estabilizar el modelo hidrodinámico.  
6 Dadas las condiciones de disponibilidad y accesibilidad de datos oceanográficos  
7 de calidad, el dominio temporal de 20 años se puede considerar como el mejor  
8 esfuerzo y opción implementada y aportada por el grupo ejecutor del proyecto.  
9 La resolución temporal también es adecuada para cumplir los objetivos del  
10 proyecto. A futuro, si existiera el interés de simular algunos tipos de procesos de  
11 resolución temporal menor, como mareas, patrones de brisa costera afectando el  
12 transporte en superficie, etc. sería necesario aumentar la resolución temporal a  
13 por lo menos 3 horas.

14  
15 *e. Lista de características del modelo*

- 16 i. Corrientes oceánicas: Según la charlas del Sr. Cristián Salas  
17 "Modelación hidrodinámica del Pacífico suroriental" y la charla  
18 del Sr. Sergio Núñez "Caracterización oceanográfica del Pacífico  
19 suroriental asociada al transporte de estadios tempranos de jurel"  
20 está claro que el modelo hidrodinámico está reproduciendo de  
21 manera adecuada la circulación general, corrientes costeras,  
22 remolinos de mesoescala, frentes, corrientes chorro, etc. tanto en  
23 una escala temporal como geográfica.
- 24 ii. Aporte de ríos: No está claro si la presencia de frentes en  
25 proximidades de la boca de los ríos más importantes de la región,  
26 la estratificación debido a la presencia de masas de agua dulce,  
27 intrusiones, etc. fueron incorporadas y evaluadas como  
28 características afectando el transporte de huevos y larvas. Por  
29 ejemplo, masas de agua adyacentes con diferencias de salinidad  
30 muy marcada pueden actuar como barreras para el movimiento  
31 vertical, o las intrusiones de agua dulce pueden afectar la  
32 profundidad a la cual se encuentren los organismos.

1                   iii. Condiciones iniciales y de frontera: Según las presentaciones de  
2                   los científicos del proyecto se puede afirmar que el periodo de  
3                   inicialización de un año (1993) previo al uso de las salidas del  
4                   modelo es apropiado para evitar efectos indeseados en, por  
5                   ejemplo, las velocidades baroclínicas, salinidad y temperatura. La  
6                   resolución espacial y la corrección de errores en los bordes del  
7                   modelo fue abordada de una manera adecuada por los  
8                   investigadores y permite confiar en que las condiciones de borde  
9                   no influyeron en los diferentes parámetros oceanográficos  
10                  simulados, permitiendo una aproximación adecuada al transporte  
11                  de estadios tempranos del jurel.

12                  iv. Validación del modelo: Según los análisis de EOF y resultados  
13                  expuestos en la reunión se observa un buen ajuste entre las  
14                  condiciones oceanográficas de la zona, observadas mediante  
15                  sensores remotos, boyas lagrangianas, CTD's, etc y las  
16                  condiciones oceanográficas simuladas. Los estudios de  
17                  sensibilidad demuestran una correlación alta entre lo observado y  
18                  simulado.

## 19

### 20   2. *Modelo de seguimiento de partículas*

21   El seguimiento de las partículas se realizó mediante el software ICHTHYOP v.3, lo cual  
22   es una buena elección que permite el correcto acoplamiento entre un modelo  
23   hidrodinámico y el modelo biológico. ICHTHYOP fue desarrollado y es mantenido  
24   actualmente por el IFREMER (Francia) y cuenta con el respaldo de reconocidos  
25   ingenieros de software y científicos, razón que permite un uso confiable de la  
26   plataforma. Adicionalmente, destaca que los científicos del proyecto FIP 2014-33  
27   realizaron un esfuerzo en la modificación del código fuente del ichthyop para incorporar  
28   condiciones biológicas propias del jurel que permitieran simulaciones del transporte  
29   larval que concordaran con lo observado en el medio natural.

- 1 a. Discretización temporal: Se usaron rutinas de discretización Runge-  
2 Kutta para la solución de ecuaciones estocásticas diferenciales, las cuales  
3 son avaladas por una ingente cantidad de publicaciones científicas.
- 4 b. Elección de los pasos de tiempo: No está claro cual fue el valor de paso  
5 de tiempo elegido dentro del modelo biofísico. Sin embargo, se extrae  
6 de la presentación de resultados que es menor a 6 horas, lo cual es  
7 suficiente para solucionar las ecuaciones de interpolación de la posición  
8 de las partículas dentro del modelo con solvencia.
- 9 c. Número de partículas: Se realizaron análisis de sensibilidad adecuados  
10 para determinar el número de partículas necesario para inicializar el  
11 modelo de transporte. No hay necesidad de hacer recomendaciones en  
12 este aspecto puesto que las decisiones de los investigadores parecen ser  
13 adecuadas para satisfacer las expectativas del proyecto.

### 14

15 3. *Procesos biológicos*

#### 16 a. *Condiciones iniciales: localización de los reproductores*

17 Las zonas de desove fueron establecidas en Chile centro sur, Chile norte y Perú.  
18 Sin embargo, la lectura como investigador externo al proyecto es que, a partir de  
19 la información presentada, faltan datos para establecer con claridad las zonas de  
20 desove de Chile norte y Perú. Estas zonas no cuentan con la información  
21 necesaria de cruceros biológicos y monitoreo acústico adecuados que permitan  
22 identificarlas como zonas de desove. La determinación de las zonas de desove  
23 del sur de Perú se basa en la concentración de larvas de todas las edades cerca de  
24 costa, no son estudios sobre densidad o concentración de huevos, tampoco son  
25 estudios acústicos de adultos reproductores. No existe variabilidad interanual en  
26 esta información, y son promedios interanuales. Se podría decir que esta  
27 información es únicamente un proxy del desove pero no corresponde con la o las  
28 zonas de desove. Igualmente, la determinación de las zonas de desove en el  
29 Norte de Chile corresponde a cruceros que no fueron pensados para estimar la  
30 distribución espacial de los huevos de jurel. El diseño de muestreo, geometría de  
31 las estaciones de muestreo, es bastante errático o arbitrario. Además los valores  
32 corresponden a promedios interanuales (decadales). En contraste, es de destacar

1 de manera positiva, que existe una ingente cantidad de información de calidad  
2 sobre la zona de desove Chile centro sur, tanto a nivel histórico como a nivel  
3 espacial, que permiten delimitar con claridad los límites espaciales que ocupan  
4 los reproductores, año tras año. Este tipo de información confiere una alta  
5 fiabilidad científica a las simulaciones de transporte en las cuales se establece  
6 como zona de desove el área histórica Chile centro sur. En conclusión, se  
7 observa una gran variabilidad en la calidad de datos disponibles sobre las  
8 diferentes áreas de desove, por lo cual se recomienda realizar un esfuerzo en la  
9 adquisición de información relevante que permita establecer con claridad la  
10 estructura espacial y temporal del desove para todas las regiones, así como los  
11 procesos evolutivos que gobiernan el desove para todo el dominio del Pacífico  
12 suroriental.

- 13 i. Modelos de producción de huevos: Son Necesarios para calcular  
14 la magnitud y la temporalidad de la producción de huevos a partir  
15 de la información obtenida de adultos reproductores. Es  
16 importante destacar que los investigadores involucrados en el  
17 proyecto poseen información base de muy buena calidad de la  
18 zona Chile sur. Además, para los años con información faltante el  
19 grupo investigador realizó un importante esfuerzo en  
20 implementar modelos aditivos generalizados (GAM) que  
21 permitieron predecir la magnitud y extensión de la producción de  
22 huevos basándose en condiciones físicas promedio usando como  
23 factores: año, SST, EKE, Latitud y Longitud, a partir de 11 años  
24 de datos conocidos y prediciendo para 8 años restantes, desde  
25 1994 a 2013. Igualmente, se destaca la buena implementación de  
26 modelos que permitieron establecer los picos de reproducción,  
27 variabilidad y extensión de la misma. Por ejemplo, destaca el  
28 acoplamiento de un modelo de sincronización temporal del  
29 desove a partir del Índice Gonadosomático. El inicio del desove  
30 se propone cuando el 50% de las hembras se encuentran  
31 sexualmente activas (i.e. fracción desovante del 50% o IGS\_50).  
32 Este modelo está de acuerdo con el ciclo reproductivo altamente  
33 conservativo de Agosto- Enero reportado en la literatura.

1 También es de destacar que se modeló correctamente la  
2 distribución vertical inicial de los huevos de jurel en la columna  
3 de agua. Por último, se recomienda tener en cuenta la resolución  
4 espacial de los modelos de producción de huevos y la de los  
5 modelos biofísicos acoplados cuando se realicen predicciones.  
6 Los modelos de producción de huevos proveen predicciones  
7 continuas, mientras que en los modelos de transporte de huevos y  
8 larvas la "liberación" de partículas ocurre en tiempos y  
9 localizaciones discretas. Predicciones del modelo de producción  
10 de huevos deberían ser convertidas en número de partículas por  
11 unidad de tiempo/espacio cuando sean incorporadas en un  
12 ejercicio de modelado biofísico.

13  
14 *b. Duración de la vida pelágica, desarrollo y crecimiento larval*

15 El PLD (del inglés Pelagic larval duration) establecido por los investigadores fue  
16 de 120 días. Este valor determina cuanto dura el transporte de huevos y larvas en  
17 las simulaciones. Los investigadores se basaron en estudios previos sobre  
18 crecimiento de *Trachurus japonicus*, una especie viviendo en aguas mas  
19 templadas. Se recomienda ahondar en el estudio del desarrollo de huevos y  
20 larvas de *Trachurus murphyi* para determinar como la temperatura afecta el  
21 tiempo de eclosión de los huevos y el crecimiento de las larvas y el desarrollo de  
22 sus estructuras natatorias. Es de considerar que luego de que la larva desarrolla  
23 completamente estas estructuras natatorias, existe un margen de tiempo en el  
24 cual todavía puede considerarse un organismo pelágico, ya que no puede  
25 contrarrestar aún la velocidad de las corrientes. Toda esta información es básica  
26 para determinar un tiempo de vida larval ajustado a la especie. También, es de  
27 relevancia establecer los tiempos de eclosión de los huevos de jurel en  
28 condiciones cambiantes de temperatura y salinidad para ajustar aún mejor los  
29 procesos físicos que están afectando a cada una de las distintas etapas del  
30 desarrollo, p.e. la flotabilidad de los huevos cambia con el desarrollo o la  
31 extensión de los movimientos verticales de las larvas se incrementa con la talla.

32  
33 *c. Ventana de tiempo para el reclutamiento*

1 Los investigadores del proyecto FIP 2014-33 consideraron que cualquier larva  
2 virtual con edad entre 60 y 120 días era susceptible de ser reclutada en las zonas  
3 de alevinaje predefinidas. Esta consideración tiene como consecuencia directa  
4 que se están reclutando organismos en una ventana de tiempo muy amplia (60 días)  
5 dada la especie en cuestión. Igual que en el punto anterior, sobre la duración de  
6 la vida larval, estudios de crecimiento termodependiente ayudarían a determinar  
7 una talla de reclutamiento y no una edad de reclutamiento, lo cual mejoraría las  
8 estimaciones y predicciones que sobre el reclutamiento puedan hacerse desde el  
9 modelo.

#### 10 *d. Modelos de mortalidad*

12 Aunque no se modeló explícitamente la mortalidad, en las simulaciones  
13 realizadas por los investigadores se puede asumir que existe una elevada  
14 mortalidad representada en aquellas larvas que no alcanzaron las zonas de  
15 reclutamiento predefinidas. A futuro se podrían implementar ecuaciones de  
16 mortalidad específicas para estadios tempranos del jurel e incorporarlas dentro  
17 del modelo biofísico. También se podrían incorporar modelos de mortalidad  
18 dependiente del encuentro con predadores o parásitos; encuentro con masas de  
19 agua con bajos niveles de oxígeno disuelto; o modelos de mortalidad por  
20 inanición, incorporando campos NPZ (Nutrientes, fitoplancton, zooplancton)  
21 que permitan simular el crecimiento de las larvas en su etapa planctotrófica. Sin  
22 embargo, los resultados mostrados por los investigadores cumplen  
23 satisfactoriamente con los objetivos propuestos y las anteriores recomendaciones  
24 solo son una guía para desarrollos futuros.

#### 25 *e. Cuestiones generales sobre el desarrollo de huevos y comportamiento* 26 *larval*

- 28 i. Flotabilidad de los huevos: Numerosos estudios han demostrado  
29 la importancia de establecer condiciones de flotabilidad realistas  
30 para los huevos de peces pelágicos en los modelos de transporte.  
31 Básicamente, porque la flotabilidad de los huevos determina el  
32 lugar que estos ocupan en la columna de agua. Además se ha  
33 demostrado que la flotabilidad de los huevos de muchas especies

1 de peces es cambiante con el desarrollo, desde la puesta hasta la  
2 eclosión. Los investigadores del proyecto FIP 2014-33 utilizaron  
3 una aproximación adecuada para abordar el problema de la  
4 flotabilidad de los huevos de jurel a la luz de los datos existentes,  
5 parametrizando una condición de flotabilidad positiva. Una  
6 posible mejora a las simulaciones, predicciones y estimaciones  
7 del reclutamiento larval del jurel debería incluir modelos de  
8 desarrollo de los huevos basados en estudios de morfología y  
9 fisiología de los huevos bajo escenarios fisicoquímicos  
10 cambiantes.

11 ii. Migración vertical: Como se ha explicado, la posición de las  
12 partículas en la columna de agua es fundamental en el caso de  
13 predecir sus trayectorias en el plano horizontal. En el caso de las  
14 larvas, el comportamiento de migración vertical, sea para escapar  
15 de predadores o para maximizar la búsqueda de alimento,  
16 determina y condiciona el proceso de transporte, por lo tanto debe  
17 ser incluido como *sub-modelo* en los modelos biofísicos  
18 acoplados. La solución de los investigadores FIP 2014-33 para  
19 modelar los movimientos de las larvas de jurel y su posición en la  
20 columna de agua, dependiendo de su talla y la hora del día,  
21 representa el mejor compromiso entre calidad de los datos  
22 existentes y una ecuación que sintetice dicha información. Es una  
23 buena aproximación y no hay mas comentarios al respecto.

24 iii. Natación horizontal: No fue parametrizada por los investigadores  
25 FIP 2014-33. Sin embargo, para larvas de jurel poca información  
26 al respecto se encuentra disponible y hasta que no haya mas  
27 estudios al respecto es mejor apelar a la cautela y no incluir  
28 movimientos que resulten en una incorporación de ruido  
29 estadístico que ocasione una pérdida de fiabilidad en los  
30 resultados.

31 iv. Orientación: En larvas de distintas especies de peces se han  
32 encontrado mecanismos que potencialmente permiten la  
33 orientación y sirven para dirigir la natación hacia las zonas de

1 alevinaje, cuando las larvas ya han desarrollado sus estructuras  
2 natatorias. Entre estos mecanismos destacan, el olfato, la  
3 audición, un compás magnético interno, un compás solar o el uso  
4 de la luz polarizada, entre otros. Los investigadores del proyecto  
5 FIP 2014-33 no incluyen este tipo de parametrización en el  
6 modelo de transporte apelando, nuevamente, al principio de  
7 cautela. Decisión que se considera acertada por parte de los  
8 ejecutores del proyecto. Como recomendación se proponen  
9 estudios de laboratorio y en terreno que permitan a futuro  
10 entender cuáles, cómo y que tan importantes son los mecanismos  
11 de orientación en las larvas de jurel.

- 12 v. Forrajeo, escape de predadores, formación de bancos: Pueden ser  
13 procesos biológicos que sea importante tener en cuenta  
14 dependiendo de las expectativas del modelo de transporte y el  
15 poder predictivo que se pretenda. No se hace necesaria su  
16 parametrización para cumplir los objetivos del proyecto FIP  
17 2014-33.

#### 18 19 4. *Procesos oceanográficos*

20 Un aspecto positivo que es importante destacar sobre la ejecución de este  
21 proyecto es cómo los investigadores hicieron un gran esfuerzo por vincular  
22 procesos oceanográficos y procesos biológicos para explicar el transporte de  
23 estadios tempranos de jurel. Este tipo de ejercicio pone en contexto como las  
24 diferencias interanuales en la localización de las zonas de desove, en el éxito del  
25 transporte larval y la magnitud del reclutamiento pueden ser explicadas en parte  
26 por la dinámica temporal y espacial de las condiciones oceanográficas. Sin ser  
27 exhaustivos, es destacable la hipótesis relacionada con la localización de la zona  
28 de desove Chile sur, la cual relaciona el tau-zero y su análisis en los  
29 componentes latitudinal y longitudinal, sugiriendo que los adultos reproductores  
30 monitorean el ambiente oceanográfico para encontrar las áreas de menor  
31 hidrodinamismo e iniciar la puesta. Adicionalmente, otra hipótesis interesante se  
32 relaciona con los análisis sobre velocidades del transporte de Ekman en

1 superficie y a 35 m de profundidad, los cuales permiten sugerir como el  
2 transporte hacia las zonas de alevinaje se da a media agua, alrededor de los 35, y  
3 no en las capas superficiales. En este apartado, la única recomendación es para  
4 que se siga trabajando desde esta perspectiva multidisciplinar que permite  
5 explicar las causas próximas y últimas que están relacionadas con la biología  
6 reproductiva del jurel. El equipo ejecutor del proyecto FIP 2014-33 representa  
7 un buen ejemplo de cómo el trabajo multidisciplinar puede generar  
8 conocimiento base y aplicado de calidad.

#### 9 10 5. *Conectividad*

11 Los análisis de conectividad presentados por el grupo ejecutor del proyecto  
12 sugieren la interconexión entre las diferentes zonas de desove y la zona de  
13 reclutamiento predefinida. Igualmente, los investigadores sugieren cambios en  
14 los patrones de conectividad en el sur de Perú, con desoves más al norte e  
15 índices de conectividad mas bajos en los 90's e índices de conectividad más altos  
16 y desoves mas al sur en los 2000's. Sin embargo en este aspecto, las condiciones  
17 iniciales, establecidas a partir de los datos disponible para Perú sur y Chile  
18 Norte, pueden estar condicionando este tipo de conclusiones. Se sugiere hacer  
19 experimentos de simulación del transporte con condiciones iniciales  
20 semejantes, en cuanto a la magnitud y localización del desove, para toda la  
21 ventana temporal (1994-2013) y así determinar si estos cambios se encuentran  
22 relacionados con procesos oceanográficos o procesos poblacionales. Los  
23 investigadores, también sugieren, que el reclutamiento en la zona Chile norte es,  
24 principalmente, mediado por la retención. En este aspecto, los ejecutores del  
25 proyecto deben corroborar el fenómeno de "encallamiento" cerca de la línea de  
26 costa para las partículas en su modelo de transporte. En los modelos biofísicos  
27 para la simulación del transporte de huevos y larvas, la determinación de la  
28 velocidad y posición de las partículas cerca de la línea de costa es un problema  
29 complejo, que en muchos experimentos de simulación ocasiona que existan  
30 partículas que permanecen estáticas cerca de costa, cuando en realidad deberían  
31 seguir el perfil de este. Se sugiere continuar con un esfuerzo de validación de los  
32 resultados extraídos del modelo biofísico y de información extraída a partir de  
33 cruceros acústicos y modelos de gestión de stocks. Este tipo de validaciones ya

1 fueron iniciadas por el grupo ejecutor, lo cual sugiere que este proceso  
2 evolucionará satisfactoriamente. Aunque los resultados del trabajo de simulación  
3 de transporte larval, análisis del reclutamiento y la conectividad, presentados por  
4 los ejecutores del proyecto son muy recientes aún, y falta una revisión por pares,  
5 es interesante como se empiezan a generar hipótesis que intentan responder  
6 preguntas relacionadas con la dinámica poblacional y la gestión de stocks. Entre  
7 ellas destaca la que sugiere que las diferentes áreas de desove del jurel se están  
8 conectandoa través del transporte larval con una única zona de reclutamiento, lo  
9 cual estaría garantizando que el jurel sea una población panmítica.

## 11 6. *Predicción del reclutamiento*

12 De manera similar al apartado anterior, los resultados sobre predicción del  
13 reclutamiento son muy recientes y es necesaria una evaluación por pares de este  
14 trabajo de investigación.

15 Los investigadores del proyecto FIP 2014-33 proponen un índice de  
16 reclutamiento basado en el modelo de transporte que corresponde al número de  
17 larvas que alcanzanun área de reclutamiento entre los 60 y 120 días de edad.  
18 Esteíndice se escala con la producción de huevos modelada y correspondiente a  
19 cada año. De manera preliminar, es claro que los índices obtenidos son  
20 coherentes con las estimaciones de biomasa del stock realizadas con  
21 métodosacústicos. La falta de correlación para algunos años puede deberse a que  
22 el índice derivado de métodos acústicos sea muy generalista, espacialmente  
23 hablando, y esté teniendo en cuenta juveniles y adultos, los cuales sus larvas  
24 provienen originalmente de otras zonas de desove. Es de destacar que los  
25 resultados e índices del reclutamiento larval del jurel, que hace el equipo  
26 ejecutor a partir de los resultados de su modelo biofísico, permiten obtener  
27 predicciones del reclutamiento de adultos de un año de edad con seis meses de  
28 adelanto o más respecto a otros métodos. Esto es de gran importancia en la  
29 gestión de las pesquerías por que da margen para generar políticas de veda y  
30 extracción realistas que permitan un aprovechamiento exitoso del stock.

## 32 7. *Conclusión*

33 El proyecto FIP 2014-33 ha permitido implementar satisfactoriamente un

1            modelo biofísico espacialmente explícito, el cual incorpora todos los aspectos  
2            hasta hora conocidos sobre la biología de los estadios tempranos del jurel, y que  
3            permite realizar predicciones que parecen realistas sobre el reclutamiento larval.  
4            El proyecto responde a interrogantes básicos sobre el transporte de huevos y  
5            larvas de jurel desde las diferentes áreas de desove hasta la única zona de  
6            alevinaje conocida. Destaca también el esfuerzo relacionando con identificar los  
7            procesos oceanográficos que gobiernan cada una de las etapas del desove, el  
8            transporte y el reclutamiento. Adicionalmente, se presenta un modelo  
9            conceptual, que junto a los resultados del reclutamiento larval, pueden  
10           convertirse en valiosas herramienta para entender las relaciones de conectividad  
11           de las diferentes zonas de desove con la única zona de crianza. El grupo ejecutor  
12           del proyecto ha hecho un esfuerzo multidisciplinar ejemplar que ha  
13           desembocado en un trabajo científico de calidad, el cual obviamente puede ser  
14           mejorado, pero que en su estado actual ya se presenta como una herramienta útil  
15           para incorporarse en los planes de gestión de la especie en cuestión. Las  
16           recomendaciones sugeridas en este informe son de carácter menor y muy  
17           seguramente serán implementadas por el grupo ejecutor como una manera de  
18           afinar sus resultados y predicciones. Las líneas de investigación, que se sugiere  
19           deberían implementarse para entender mejor la biología reproductiva y de los  
20           estadios tempranos del jurel, son de carácter satelital a este proyecto y deberían  
21           ser consideradas por la autoridad pesquera si se pretende una gestión eficiente  
22           del recurso en un contexto de cambio global.

---

## 10. REFERENCIAS

---

- 1  
2  
3 Allain, G., Petitgas, P., Lazure, P. & P. Grellier. 2007. Biophysical modelling of larval  
4 drift, growth and survival for the prediction of anchovy (*Engraulis encrasicolus*)  
5 recruitment in the Bay of Biscay (NE Atlantic). *Fisheries Oceanography* 16(6), 489–  
6 505.  
7  
8 Arcos, D., Cubillos, L. & S. Núñez. 2001. The jack mackerel fishery and El Niño 1997-  
9 98 effects off Chile. *Progress in Oceanography*, 49: 597-617.  
10  
11 Arcos, D., Cubillos, L. & S. Núñez. 2004. El Niño-La Niña 1997-2000. Sus efectos en  
12 Chile. En: S. Avartia, J. Carrasco, J. Ruttlund & E. Yáñez (eds.). CONA, Chile,  
13 Valparaíso, pp. 153-177.  
14  
15 Ashford, J., Serra, R., Saavedra, J.C. & J. Letelier. 2011. Otolith chemistry indicates  
16 large-scale connectivity in Chilean jack mackerel (*Trachurus murphyi*), a highly mobile  
17 species in the Southern Pacific Ocean. *Fisheries research*.  
18 doi:10.1016/j.fishres.2010.11.012.  
19  
20 AtlantNIRO, 2003. Informe de expedición científica al Pacífico Suroriental en STM-  
21 8390 "Atlantida" (crucero 32). 14 agosto 2002 – 03 marzo 2003. Archivos de  
22 AtlantNIRO, Kaliningrado, Rusia.  
23  
24 AtlantNIRO, 2010. Informe de la expedición científica de STM K-1704 "Atlantida"  
25 (crucero 53) a las regiones del Atlántico Norte y del Pacífico Sur fuera de las Zonas  
26 Económicas Exclusivas de los países ribereños. 15 Julio-28 Diciembre 2009. Archivos  
27 de AtlantNIRO, Kaliningrado, Rusia.  
28  
29 Ayón. P. & J. Correa. 2013. Variabilidad espacial y temporal de larvas de jurel  
30 *Trachurus murphyi* en el Perú entre 1966-2010. *Rev. Perú. Biol. Número especial*  
31 *20(1): 083-086*. Editores: Csirke J., R.Guevara-Carrasco & M.Espino.  
32  
33 Bakun, A. & C. S. Nelson. 1991. The seasonal cycle of wind-stress curl in subtropical  
34 eastern boundary current regions. *Journal of Physical Oceanography*. 21: 1815 - 1834.  
35  
36 Barnett TP & WC Patzert. 1980. Scales of thermal variability in the tropical Pacific.  
37 *Journal of Geophysical Research* 10: 529-540.  
38  
39 Bartsch, J., Reid, D. & S.H. Coombs. 2004. Simulation of mackerel (*Scomber*  
40 *scombrus*) recruitment with an individual-based model and comparison with field data.  
41 *Fisheries Oceanography* 13(6), 380-391.  
42  
43 Bartsch, J. 2005. The influence of spatio-temporal egg production variability on the  
44 modelled survival of the early life history stages of mackerel (*Scomber scombrus*) in the  
45 eastern North Atlantic. *e ICES Journal of Marine Science*, 62: 1049e1060.  
46  
47 Bernal, M., Stratoudakis, Y., Coombs, S., Angélico, M. M., Lago de Lanzós, A.,  
48 Porteiro, C., Sagarminaga Y., *et al.* 2007. Sardine spawning off the European Atlantic

1 coast: characterization of and spatio-temporal variability in spawning habitat. Progress  
2 in Oceanography; 74:210-227.

3  
4 Bernal, M., Stratoudakis, Y., Wood, S., Ibaibarriaga, L., Uriarte, A., Valdés, L., &  
5 Borchers, D. 2011. A revision of daily egg production estimation methods, with  
6 application to Atlanto-Iberian sardine. 2. Spatially and environmentally explicit  
7 estimates of egg production. – ICES Journal of Marine Science, 68: 528–536.

8  
9 Blanco JL, A Thomas, M Carr & P Strub. 2001. Seasonal climatology of hydrographic  
10 conditons in the upwelling region off northern Chile. Journal of Geophysical Research  
11 106(C6): 11451-11467.

12  
13 Braun, M. & V. Valenzuela. 2008. Seasonal distribution and abundance of jack  
14 mackerel (*Trachurus murphyi*) eggs and larvae off northern Chile 1981-2007. In:  
15 Chilean jack mackerel workshop, Santiago, Chile, SPRFMO Scientific papers,  
16 SWG/Jack Mackerel Sub-Group/CHJMWS paper #1. SPRFMO Interim Secretariat, PO  
17 Box 3797, Wellington 6140, New Zealand.

18  
19 Brochier, T., Lett, C., Tam, J., Fréon, P., Colas, F & P. Ayón. 2008a. An individual-  
20 based model study of anchovy early life history in the northern Humboldt Current  
21 system. Progress in Oceanography. 79: 313–325.

22  
23 Brochier, T., Ramzi, A., Lett, C., Machu, E., Berraho, A., Freon, P. & S. Hernandez-  
24 Leon. 2008b. Modelling sardine and anchovy ichthyoplankton transport in the Canary  
25 Current System. Journal of Plankton Research. Volume 30. 10:1133-1146.

26  
27 Buckland, S.Y., K.P. Burnham & N.H. Augustin. 1997. Model selection: An integral  
28 part of inference. Biometrics 53: 603-618.

29  
30 Budgell, W.P., 2005: Numerical simulation of ice-ocean variability in the Barents Sea  
31 region, Ocean Dynamics, Volume 55, 370-387.

32  
33 Burnham, K. P. & D.R. Anderson. 2002. Model selection and multimodel inference: a  
34 practical information-theoretic approach. 2<sup>nd</sup> Ed., Springer-Verlag, New York, NY.

35  
36 Cárdenas, L., Silva, A., Magoulas, A., Cabezas, J., Poulin, E. & P. Ojeda. 2009. Genetic  
37 population structure in the Chilean jack mackerel, *Trachurus murphyi* (Nichols) across  
38 the South-eastern Pacific Ocean. Fisheries research. 100(2), 109-115.

39  
40 Chaigneau, A. & O. Pizarro. 2005a. Surface circulation and fronts of the South Pacific  
41 Ocean, east of 120°W. Geophysical Research Letters, 32: L08605,  
42 doi:10.1029/2004GL022070.

43  
44 Chaigneau A. & O. Pizarro. 2005b. Eddy characteristics in the eastern South Pacific.  
45 Journal of Geophysical Research, 110, doi:10.1029/2004JC002815.

46  
47 Chaigneau, A., G. Eldin & B. Dewitte. 2009. Eddy activity in the four major upwelling  
48 systems from satellite altimetry (1992–2007), Prog. Oceanogr., 83, 117–123,  
49 doi:10.1016/j.pocean.2009.07.012.

50

- 1 Chelton, D.B., Schlax, M.G., Samelson, R.M. & R.A. de Szoek. 2007. Global  
2 observations of large oceanic eddies. *Geophys. Res. Lett.* 34, L15606.  
3 doi:10.1029/2007GL030812.  
4
- 5 Cisterna, L. 2014. Estimación de la edad de jurel (*Trachurus murphyi*) mediante  
6 lecturas de incrementos diarios en otolitos sagittae. Tesis Magíster en Ciencias Mención  
7 Pesquerías, Concepción, Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Naturales y  
8 Oceanográficas. 75 p.  
9
- 10 Correa-Ramirez, M, Hormazabal S & G. Yuras. 2007. Mesoscale eddies and high  
11 chlorophyll concentrations off central Chile (29°–39°S). *Geophysical Research Letters*  
12 Vol 34, L12604  
13
- 14 Corten, A. & J. Janusz. 2011. National report of the European Union to the 2011.  
15 SPRFMO Science Working Group. SPRFMO, Tenth SWG meeting, 19 - 23 September  
16 2011, Port Vila, Vanuatu. 18 p.  
17
- 18 Cowen, R. 1985. Large scale pattern of recruitment by the labrid, *Semicossyphus*  
19 *pulcher*: causes and implications. *Journal of Marine Research* 43(3):719-742.  
20
- 21 Cubillos, L.A., Paramo, J., Ruiz, P., Núñez, S. & A. Sepúlveda. 2008. The spatial  
22 structure of the oceanic spawning of jack mackerel (*Trachurus murphyi*) off central  
23 Chile (1998–2001). *Fisheries Research*, 90: 261 - 270.  
24
- 25 Dalgaard, R. 2008. *Introductory Statistics with R (Second Edition)*. Peter Dalgaard.  
26 Springer-Verlag, New York, 2008. ISBN 978-0-387-79053-4. 364 pp.  
27
- 28 Dávila PM, D Figueroa & E Müller. 2002. Freshwater input into the coastal ocean and  
29 its relation with the salinity distribution off austral Chile (35-55°S). *Continental Shelf*  
30 *Research* 22: 521-534.  
31
- 32 Deacon.G. 1982. Physical and biological zonation in the Southern Ocean. *Deep-Sea*  
33 *Res.*, 29,1-1  
34
- 35 Del Pino, M. 2010. Variabilidad espacio temporal en la zona de la curvatura Chile-Perú.  
36 Tesis para optar al título de Ingeniería en Estadística, Universidad del Bío-Bío.  
37
- 38 Di Lorenzo, E., 2003. Seasonal dynamics of the surface circulation in the southern  
39 California Current System, *Deep-Sea Res.*, Part II, 50, 2371-2388.  
40
- 41 Díaz, E. 2013. Estimación del crecimiento del jurel *Trachurus murphyi* capturado en el  
42 Perú, a partir del análisis de las frecuencias por tallas. *Rev. peru biol.* 20(1): 053-060.  
43
- 44 Dioses, T. 2013. Patrones de distribución y abundancia del jurel *Trachurus murphyi* en  
45 el Perú. *Rev. peru. biol.* 20(1): 067- 074  
46
- 47 Dinniman, M.S., Klinck, J. & W. O. Smith Jr. 2003. Cross shelf exchange in a model of  
48 the Ross Sea circulation and biogeochemistry, *Deep-Sea Res.*, Part II, 50, 3103-3120.  
49
- 50 Dunn, J.R. & K.R.Ridgway. 2002. Mapping ocean properties in regions of complex

- 1 560 topography, Deep Sea Res , 49(3), 591-604.  
2
- 3 Echevin, M., Colas, F., Chaigneau, A. & P. Penven. 2011. Sensitivity of the Northern  
4 Humboldt Current System nearshore modeled circulation to initial and boundary  
5 conditions, Journal of Geophysical Research, Volume 116, C07002.  
6
- 7 Elizarov, A., Grechina, A., Kotenev, B.N. & Kuznetsov, A.N. 1993. Peruvian jack  
8 mackerel, *Trachurus symmetricus murphyi*, in the open waters of the South Pacific.  
9 Journal of Ichthyology, 33: 86-104.  
10
- 11 Espinoza, E., Ñiquen, M. & Flores, R. 2008. Changes in the latitudinal and  
12 longitudinal distribution of the aggregations of Jack mackerel (*Trachurus murphyi*) in  
13 the Peruvian sea during 1996 – 2007. Chilean Jack Mackerel Workshop 30 June - 4  
14 July. 2008  
15
- 16 Evseenko, S.A. 1987. Reproduction of Peruvian jack mackerel, *Trachurus symmetricus*  
17 *murphyi*, in the southern Pacific, Journal of Ichthyology, 27: 151 – 160.  
18
- 19 Fournier *et al.*, 2012. AD Model Builder: using automatic differentiation for statistical  
20 inference of highly parameterized complex nonlinear models. Optimization Methods  
21 and Software. Volume 27, Issue 2, 2012  
22
- 23 Fuenzalida, R., Schneider, W., Garcés-Vargas, J. & L. Bravo. 2008. Satellite altimetry  
24 data reveal jet-like dynamics of the Humboldt Current. Journal of Geophysical  
25 Research, Vol. 113, c07043, doi:10.1029/2007jc004684.  
26
- 27 Gerlotto, F., Gutierrez, M. & A. Bertrand. 2010a. The distribution of Jack mackerel  
28 *Trachurus murphyi* in the South Pacific Ocean: a metapopulation hypothesis. FAST-  
29 ICES-WG annual meeting.SWNFS, NOAA, San Diego, Abril 2010.  
30
- 31 Gerlotto, F., Bertrand, A., Gutierrez, M. & A. Sepúlveda. 2010b. Population structure of  
32 the Chilean Mackerel (*Trachurus murphyi*) in the South Pacific Ocean.SWG-09-JM,  
33 SPRFMO: 38 p.  
34
- 35 Gerlotto, F., Gutierrez, M. & A.Bertrand. 2012. Insight on population structure of  
36 Chilean jack mackerel (*Trachurus murphyi*). Aquat. Living Resour. 25, pp. 341-355.  
37
- 38 Gerlotto, F. & T. Dioses, 2013. Bibliographical synopsis on the main traits of life of  
39 *Trachurus murphyi* in the South Pacific Ocean.SPRFMO, 1st Meeting of the Scientific  
40 Committee, La Jolla, United States of America, 21-27 October 2013, SC-01-INF-17.  
41
- 42 Gili, R., L. Cid, V. Bocic, V. Alegría, H. Miranda & H. Torres. 1995. Determinación de  
43 la estructura de edad del recurso jurel. En: Estudio biológico pesquero sobre el recurso  
44 jurel en la zona centro-sur, V a IX Regiones. Informes Técnicos FIP/IT-93-18: 121 pp.  
45
- 46 Gorbunova, N.N., Evseenko, S.A. and Garetovsky, S.V. 1985. Distribution of  
47 ichthyoplankton in the frontal zones of the Peruvian waters, Journal of Ichthyology. 25:  
48 67–79.  
49

- 1 Green, B., Mapstone, M., Carlos, G. & G. Begg. 2009. Tropical Fish Otoliths:  
2 Information for assessment, Management and Ecology. 1th Ed., Springer, Australia,  
3 Vol. 11, 313p.  
4
- 5 Gretchina, A., Núñez, S. & D. Arcos. 1998a. Biología reproductiva del jurel (*Trachurus*  
6 *symmetricus murphyi*) en el Pacífico sur. In: Arcos, D. (Ed.), Biología y ecología del  
7 jurel en aguas chilenas. Instituto de Investigación Pesquera, Talcahuano, pp. 77–79.  
8
- 9 Gretchina, A., Núñez, S. & D. Arcos. 1998b. El desove del recurso jurel (*Trachurus*  
10 *symmetricus murphyi* (Nichols)), en el Océano Pacífico Sur. In Biología y Ecología del  
11 Jurel en Aguas Chilenas, pp. 117-140. Ed. By D.Arcos. Instituto de Investigación  
12 Pesquera, Talcahuano.  
13
- 14 Gretchina, A., González, C., Núñez, S., & A. Sepúlveda, 2009. Superpoblación del jurel  
15 (*Trachurus murphyi*, Nichols, 1920) en el Océano Pacífico Sur: aspectos oceanográficos  
16 de hábitat, pesquerías y patrones migratorios. Libro de Resúmenes. XXIX Congreso de  
17 Ciencias del Mar. Sociedad Chilena de Ciencias del Mar. Instituto de Investigación  
18 Pesquera, Talcahuano, 25-28 de Mayo de 2009, p.198.  
19
- 20 Gretchina., A. 2013. Cadena oceánica de ciclo anual (engorda-desove-juveniles) en la  
21 historia de vida de jurel y los cambios de regímenes climáticos en el Pacífico Sur. XXXIII  
22 Congreso de ciencias del mar, Universidad de Antofagasta, Antofagasta, 27-30 mayo  
23 2013.  
24
- 25 Grimm, V., Berger, U., Bastiansen, F., Eliassen, S., Ginot, V., Giske, J., Goss-Custard,  
26 J.,Grand, T., Heinz, S.K., Huse, G., Huth, A., Jepsen, J.U., Jørgensen, C., Mooij, W.M.,  
27 Müller, B., Peter, G., Piou, C., Railsback, S.F., Robbins, A.M., Robbins, M.M.,  
28 Rossmannith, E., Ruger, N., Strand, E., Souissi, S., Stillman, R.A., Vabø, R., Visser, U. &  
29 D.L. DeAngelis. 2006. A standard protocol for describing individual-based and agent-  
30 based models. Ecological Modelling 198, 115–126.  
31
- 32 Hadfield, M., Graham, J. Rickarda, J. & M. Uddstroma, 2007, A hydrodynamic model  
33 of Chatham Rise, New Zealand, New Zealand Journal of Marine and Freshwater  
34 Research, Volume 41, 239-264.  
35
- 36 Haidvogel, D.B. & A. Beckmann. 1998. Numerical modelling of the coastal ocean. In:  
37 Brink, K.H., Robinson, A.R. (Eds.). The Sea, vol. 10. Harvard University Press,  
38 Cambridge, pp. 457–482.  
39
- 40 Haidvogel, D. B., Arango, H., Hedstrom, K., Beckmann, A., Malanotte-Rizzoli, P & A.  
41 F. Shchepetkin. 2000. Model evaluation experiments in the North Atlantic Basin:  
42 Simulations in nonlinear terrain-following coordinates, Dyn. Atmos. Oceans, 32, 239-  
43 281.  
44
- 45 Hansen, D. V. & P.M. Poulain. 1996. Quality control and interpolations of WOCE-  
46 TOGA drifter data. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 13: 900–909.  
47
- 48 Hare, J.A. & R.K. Cowen. 1993. Ecological and evolutionary implications of the larval  
49 transport and reproductive strategy of bluefish *Pomatomus saltatrix*. Marine Ecology  
50 Progress Series 98:1-16.

- 1  
2 Hastie, T.J. & R.J. Tibshirani. 1986. Generalized Additive Models. Stat. Sci., 1: 297-  
3 318.  
4  
5 Hinckley, S., Hermann, J.A. & B.A. Megrey. 1996. Development of a spatially explicit,  
6 individual based model of marine fish early life history. Marine Ecology Progress  
7 Series. 139: 47-68.  
8  
9 Hinckley, S., Hermann, A.J., Mier, K.L. & , B.A. Megrey. 2001. Importance of  
10 spawning location and timing to successful transport to nursery areas: a simulation  
11 study of Gulf of Alaska walleye pollock. ICES Journal of Marine Science 58, 1042–  
12 1052.  
13  
14 Hormazábal, S., Shaffer, G., Letelier, J. & O. Ulloa. 2001. Local and remote forcing of  
15 the sea temperature in the coastal upwelling system off Chile. Journal of Geophysical  
16 Research 106, 16657-16671.  
17  
18 Hormazabal, S., Shaffer, G., & O. Leth. 2004. Costal transition zone off Chile. . J.  
19 Geophys. Res. 109, C01021.  
20  
21 Huggett, J., Fréon, P., Mullon, C. & P. Penven. 2003. Modelling the transport success of  
22 anchovy *Engraulis encrasicolus* eggs and larvae in the southern Benguela: the effect of  
23 spatio-temporal spawning patterns. Marine Ecology Progress Series 250, 247–262.  
24  
25 Itoh, S., Yasuda, I., Nishikawa, H., Sasaki, H. & Y. Sasai. 2009. Transport and  
26 environmental temperature variability of eggs and larvae of the Japanese anchovy  
27 (*Engraulis japonicus*) and Japanese sardine (*Sardinops melanostictus*) in the western  
28 North Pacific estimated via numerical particle-tracking experiments. Fisheries  
29 Oceanography 18, 118–133.  
30  
31 Jenkins, G.P. & May, 1994. Variation in settlement and larval duration of king George  
32 whiting, *Sillaginodes punctata* (sillaginidae), in Swan Bay, Victoria, Australia. Bull.  
33 Mar. Sci. 54(1):281-296.  
34  
35 Kasai, A., Komatsu, K., Sassa, C. & Y. Konishi. 2008. Transport and survival processes  
36 of eggs and larvae of jack mackerel *Trachurus japonicus* in the East China Sea. Fish.  
37 Sci. 74: 8-18 CrossRef.  
38  
39 Kelly, K. 1985. The influence of winds and topography on the sea surface temperature  
40 patterns over the northern California slope, J. Geophys. Res., 90, 11,783-11,798.  
41  
42 Kingsford, M.J. 1990. Linear oceanographic features: A focus for research on  
43 recruitment process. Australian Journal of Ecology. 15: 391-401.  
44  
45 Konchina, Y.V., Nesin, A.V., Onishchik, N.A. & , Y.P. Pavlov. 1996. On the migration  
46 and feeding of the jack mackerel *Trachurus symmetricus murphyi* in the Eastern Pacific.  
47 J. Ichthyol. 36, 753–766.  
48

- 1 Kristiansen, T., Fiksen, O. & A. Folkvord. 2007. Modelling feeding, growth, and habitat  
2 selection in larval Atlantic cod (*Gadus morhua*): observations and model predictions in  
3 a macrocosm environment. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 64:136 - 151.  
4
- 5 Letelier, J., Pizarro, O. & S. Núñez. 2009. Seasonal variability of coastal upwelling and  
6 the upwelling front off central Chile. *Journal of Geophysical Research*. doi:10.1029/  
7 2008JC005171.  
8
- 9 Letelier, J., Hormazábal, S., Núñez, S. & O. Pizarro. 2010. Marco Oceanográfico. En:  
10 Estudio de migración del jurel (fase I), 2007. FIP N° 2007-27. Editado por R. Serra.  
11 Instituto de Fomento Pesquero, Valparaíso, 461 p.  
12
- 13 Letelier, J., Soto-Mardones, L., Salinas, S., Vincenti, L., Pavez, R. & M Arriagada.  
14 2012. Influencia de la península de Mejillones en la variabilidad oceanográfica anual e  
15 interanual frente al norte de Chile. *Revista de Biología Marina y Oceanografía* Vol.  
16 47(3):513-526.  
17
- 18 Leth, O. & G. Shaffer. 2001. A numerical study of the seasonal variability in the  
19 circulation off central Chile. *J. Geophys. Res.* 106, 2229-22248.  
20
- 21 Leth, O., Shaffer, G. & O. Ulloa. 2004. Hydrography of the eastern South Pacific  
22 Ocean: Results from the sonne 102 cruise, may june 1995, *Deep-Sea Res. II*, 51, 2349–  
23 2369.  
24
- 25 Lett, C., Verley, P., Mullon, C., *et al.*, 2008. A Lagrangian tool for modelling  
26 ichthyoplankton dynamics. *Environmental Modelling & Software* 28, 1210– 1214.  
27
- 28 Marchesiello, P., McWilliams, J.C. & A. Shchepetkin. 2003, Equilibrium structure and  
29 dynamics of the California Current System, *J. Phys. Oceanogr.*, 33, 753-783.  
30
- 31 Mason E., Molemaker J., Colas F., Shchepetkin A.F., McWilliams J.C. & P. Sangrà.  
32 2010. Procedures for offline grid nesting in regional ocean models. *Ocean Model.* 35: 1-  
33 15.  
34
- 35 Mayorga, N. 2015 Variabilidad espacio temporal del régimen de corrientes frente a la  
36 Península de Mejillones usando un modelo numérico ROMS forzado con el modelo del  
37 calentamiento global IPSL-CM4 en el periodo 2003-2033. Tesis para optar al grado de  
38 Magister en Física, Universidad del Bío-Bío, 125 pp.  
39
- 40 Miller, D.C.M., Moloney, C.L., van der Lingen, C.D., Lett, C., Mullon, C. & J.G. Field.  
41 2006. Modelling the effects of physical–biological interactions and spatial variability in  
42 spawning and nursery areas on transport and retention of sardine *Sardinops sagax* eggs  
43 and larvae in the southern Benguela ecosystem. *Journal of Marine Systems* 61, 212–  
44 229.  
45
- 46 Moler, 1984. MATLAB Version 1.0. Meeting of the IEEE Conference on Decision and  
47 Control, the CDC, Las Vegas, United States.  
48
- 49 Morales, C., Torreblanca, M., Hormazábal, S., Correa-Ramírez, M., Núñez, S. & P  
50 Hidalgo. 2010. Mesoscale structure of copepod assemblages in the coastal transition

- 1 zone and oceanic waters off central-southern Chile. Progress in Oceanography 84: 158-  
2 173.
- 3
- 4 Morales-Nin, B. 1991. Determinación del crecimiento de peces óseos en base a la  
5 microestructura de los otolitos. FAO Documento Técnico de Pesca, Número 322, Roma,  
6 FAO, 58 p.
- 7
- 8 Morales-Nin B. 1992. Determination of growth in bony fishes from otolith  
9 microstructure. FAO Fisheries Technical Paper 322: 1-51.
- 10
- 11 Morales-Nin, B., 2000. Review of the growth regulation processes of otolith daily  
12 increment formation. Fisheries Research 46, 53–67.
- 13
- 14 Mullon, C., Freon, P., Parada, C., Van der Lingen & C., Huggett, J. 2003. From  
15 particles to individuals: modelling the early stages of anchovy (*Engraulis capensis*/  
16 *encrasicolus*) in the southern Benguela. Fisheries Oceanography 12 (4/5), 396 – 406.
- 17
- 18 Myers, R.A. & Drinkwater, K.F. 1989. The influence of Gulf Stream warm core rings  
19 on recruitment of fish in the northwest Atlantic. Journal of Marine Research, 47: 635–  
20 656.
- 21
- 22 Nakata, H., S. Kimura, Y. Okazaki & A. Kasai. 2000. Implications of meso-scale eddies  
23 caused by frontal disturbances of the Kuroshio Current for anchovy recruitment. ICES  
24 Journal of Marine Science, 57: 143-152.
- 25
- 26 Narváez, D. 2000. Análisis de Giros de Mesoescala. Tesis para obtener el grado de  
27 Oceanógrafo. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
- 28
- 29 Núñez, S., Letelier, J., Donoso, D., Sepúlveda, A. & D. Arcos. 2004. Relating spatial  
30 distribution of Chilean jack mackerel eggs and environmental factors in the oceanic  
31 waters off Chile. Proceedings of the Pan Ocean Remote Sensing Conference, 2004.  
32 Remote Sensing of Oceans, Coasts and the Atmosphere: Developments and  
33 Applications. Gayana, Vol. 68. N° 2: 444-449.
- 34
- 35 Núñez, S., Vásquez, S., Ruiz, P. & A. Sepúlveda. 2008. Distribution of early  
36 developmental stages of jack mackerel in the Southeastern Pacific Ocean. In: Chilean  
37 jack mackerel workshop, Santiago, Chile, SPRFMO Scientific papers, SWG/Jack  
38 Mackerel Sub-Group/CHJMWS paper #2. SPRFMO Interim Secretariat, PO Box 3797,  
39 Wellington 6140, New Zealand.
- 40
- 41 Ñiquen M., M. Bouchon, D. Ulloa & A. Medina. 2013. Análisis de la pesquería del jurel  
42 *Trachurus murphyi* en el Perú. Rev. Peru. 20(1): 097-106 .
- 43
- 44 Okubo, A. 1970. Horizontal dispersion of floatable particles in the vicinity of velocity  
45 singularity such as convergences. Deep Sea Research 17: 445-454.
- 46
- 47 Ospina-Alvarez, A., Palomera, I. & C. Parada. 2012. Changes in egg buoyancy during  
48 development and its effects on the vertical distribution of anchovy eggs. Fish. Res. 117-  
49 118: 86-95. doi:10.1016/j.fishres.2011.01.030.
- 50

- 1 Ospina-Álvarez, A., Bernal M., Catalán I. A., Roos D., Bigot J.-L. & I. Palomera. 2013.  
2 Modeling Fish Egg Production and Spatial Distribution from Acoustic Data: A Step  
3 Forward into the Analysis of Recruitment. PLoS ONE 8(9), p. e73687.  
4 doi:10.1371/journal.pone.0073687  
5
- 6 Ovaskainen O. & I. Hanski. 2004. From individual behavior to metapopulation  
7 dynamics: unifying the patchy population and classic metapopulation models. Am. Nat.  
8 164, 364–377.  
9
- 10 Parada, C., van der Lingen, C.D., Mullon, C. & P. Penven. 2003. Modelling the effect  
11 of buoyancy on the transport of anchovy (*Engraulis capensis*) eggs from spawning to  
12 nursery ground in the southern Benguela: an IBM approach. Fisheries Oceanography 12  
13 (3), 170–184.  
14
- 15 Parada, C., Mullon, C., Roy, C., Fréon, P., Hutchings, L. & C.D van der Lingen. 2008.  
16 Does vertical migratory behaviour retain fish larvae onshore in upwelling ecosystems?  
17 A modelling study of anchovy in the southern Benguela. African Journal of Marine  
18 Science. 30(3): 437–452  
19
- 20 Parada, C., Gretchina, A., Vásquez, S., Combes, V. Ernst, B., Sepúlveda, A. & E. Di  
21 Lorenzo. 2017. Expanding the conceptual framework of the spatial population structure  
22 and life history of jack Mackerel in the southeastern Pacific off central Chile: Oceanic  
23 seamount region as potencial spawning/nursery habitat. ICES Journal of Marine  
24 Science. doi:10.1093/icesjms/fsx065.  
25
- 26 Pardo, T. & Soto-Mardones, L. 2009. Spatial and temporal variability of Westerly wind  
27 drift by satellite winds (QuikSCAT). Gayana 71(1):111-118.  
28
- 29 Peliz, A., Dubert, J., Haidvogel, D. B., & B. Le Cann. 2003. Generation and unstable  
30 evolution of a density-driven Eastern Poleward Current: The Iberian Poleward Current,  
31 J. Geophys. Res., 108(C8), 3268.  
32
- 33 Penven, P., Chang, N. & F. Shillington. 2006. Modelling the Agulhas current using  
34 SAFE (southern african experiment), Geophysical Research Abstracts, 8(04225).  
35
- 36 Perea A., Mori, J., Buitrón, B. & J. Sánchez. 2013. Aspectos reproductivos del jurel  
37 *Trachurus murphyi*. Rev. Perú. Biol. Número especial 20(1): 029-034. Editores: Csirke  
38 J., R.Guevara-Carrasco & M.Espino.  
39
- 40 Pizarro, O., Hormazabal, S., González, A. & E. Yáñez. 1994. Coastal wind, sea level  
41 and temperature variability in the north of Chile. Investigaciones Marinas, 22:85-101.  
42
- 43 Pond, S & G.L Pickard. 1983. Introductory dynamical oceanography. Butterworth  
44 Heinemann, 329 pp.  
45
- 46 Preisendorfer, R.W. & C.D. Mobley 1988. Theory of fluorescent irradiance fields in  
47 natural waters. Journal of Geophysical Research 93: doi: 10.1029/88JD00037. issn:  
48 0148-0227.  
49

- 1 Quiñones, R., Serra, R., Núñez, S., Arancibia, H., Córdova, J. & F. Bustos. 1997.  
2 Relación espacial entre el jurel y sus presas en la zona centro-sur de Chile. In: Tarifeño,  
3 E. (Ed.), Gestión de sistemas oceanográficos del Pacífico oriental. UNESCO COI/INF –  
4 1046, pp. 187–202.  
5
- 6 Ridgway, K. R., J. R. Dunn, & J. L. Wilkin. 2002. Ocean interpolation by four-  
7 dimensional least squares Application to the waters around Australia, J. Atmos. Oceanic  
8 Technol., 19, 1357 – 1375.  
9
- 10 Reynolds, R. W. 1988. A real-time global sea surface temperature analysis. J. Climate.  
11 1, 75-86.  
12
- 13 Ruiz, P., Parada, C. & S. Vásquez. 2010. A Lagrangian model to assess the influence of  
14 the spawning timing on the advection and transport patterns of early life stages of Jack  
15 Mackerel (*Trachurus murphyi*) in oceanic waters off South Pacific. International  
16 Conference: Environment and Resources of the South Pacific. Viña del Mar. Chile.  
17
- 18 Santander, H. & O. Castillo. 1971. Desarrollo y distribución de huevos y larvas de  
19 "jurel" *Trachurus symmetricus murphyi* (Nichols) en la costa peruana. Informe No. 36,  
20 Instituto del mar del Perú, Callao, Perú, 24 pp.  
21
- 22 Segura M. & A. Aliaga. 2013. Biomasa acústica y distribución del jurel *Trachurus*  
23 *murphyi* en el Perú. Rev. peru. biol. 20(1): 087- 096.  
24
- 25 Sepúlveda, A., Cubillos, L., Gretchina, A., Peña, H., Vilugron, L., Hernández, A.,  
26 Miranda, L., Sobarzo, P., Serra, R., Braun, M., Böhm, G., Valenzuela, V., Galleguillos,  
27 R., Montoya, R. & R. Quiñones. 1998. Informe final proyecto FIP 96-15, Migración  
28 del jurel desde y hacia la ZEE de Chile central. Instituto de Investigación Pesquera,  
29 Talcahuano, 248 p.  
30
- 31 Sepúlveda, A., Ruiz, P., Alarcón, R., Núñez, S., Gatica, C., Barbieri, M. A., Córdova, J.,  
32 Chong, J., Gonzáles, P., Rebolledo, H., Aguayo, M., Torres, P. & L. Bustos. 2006.  
33 Condición biológica del jurel en altamar, año 2005. Informes técnicos FIP. INPESCA.  
34 274 pp. www.fip.cl.  
35
- 36 Sepúlveda, A., Ruiz, P., Alarcón, R., Núñez, S., Bahamonde, R., Córdova, J., Chong, J.,  
37 Rebolledo, H., Aguayo & L. Bustos. 2007. Condición biológica del jurel en altamar,  
38 año 2006. Informes técnicos FIP. INPESCA. 275 pp. www.fip.cl.  
39
- 40 Serra, J.R. 1991. Important life history aspects of the Chilean jack mackerel, *Trachurus*  
41 *symmetricus murphyi*. Investigaciones Pesqueras (Chile), 36: 67 – 83.  
42
- 43 Serra, R., C. Canales, P. Barría, J. Córdova, A. Aranís & G. Böhm 2001. Diagnóstico  
44 actualizado del jurel al 2001 y análisis de escenario de captura. Proyecto Investigación y  
45 captura total permisible de jurel 2002, Instituto de Fomento Pesquero, 45 pp.  
46
- 47 Serra, R., et al. 2010. Estudio de migración de jurel en Chile (Fase I), 2007. Proyecto  
48 Fip N° 2007-27. Informe Final. IFOP/SUBPESCA.  
49

- 1 Shaffer, G.S., Hormazabal, S., Pizarro, O., & S. Salinas. 1999. Seasonal and interannual  
2 variability of currents and temperature off central Chile. *J. Geophys. Res.*, 104, 29, 931-  
3 962.
- 4
- 5 Shchepetkin, A.F. & J.C. McWilliams, 2003. A method for computing horizontal  
6 pressure-gradient force in an oceanic model with a nonaligned vertical coordinate, *J.*  
7 *Geophys. Res.*, 108 (C3), 3090, doi:10.1029/2001JC001047.
- 8
- 9 Silva, N. & S. Neshyba. 1979. Masas de agua y circulación geostrófica frente a la costa  
10 de Chile austral. *Inst. Antárt. Chil., Ser. Cient.*, 25/26: 5-32.
- 11
- 12 Soto-Mardones, L., Pares-Sierra, A. & R. Durazo. 2004. Propagation of low frequency  
13 SST signals on the eastern south Pacific. *Deep Sea Research*, II,51, 551-561.
- 14
- 15 SPRFMO. 2008. Report of the South Pacific regional fisheries management  
16 organization. Chilean Jack Mackerel Workshop. 30 June – 4 July 2008, Santiago, Chile,  
17 70 p.
- 18
- 19 Staaterman, E., Paris, C. & J. Helgers. 2012. Orientation behavior in fish larvae: A  
20 missing piece to Hjort's critical period hypothesis. *Journal of Theoretical Biology* 304,  
21 188-196.
- 22
- 23 Stevens, B., C. H. Moeng, & P. P. Sullivan, 2000: Subgrid sensitivities in large-eddy  
24 simulations of radiatively driven convection. *J. Atmos. Sci.*,
- 25
- 26 Stramma, L., Peterson, R. & M. Tomczak. 1995. The south Pacific current. *Journal of*  
27 *Physical Oceanography*. 25: 77-91.
- 28
- 29 Strub, P. T., Mesias, J.M & C. James. 1995. Altimeter observation of the Perú-Chile  
30 Countercurrent. *Geophys. Res. Lett.* 22(3): 211-214.
- 31
- 32 Strub, P., Mesías, J., Montecino, V., Rutlland, J. & S. Salinas. 1998. Coastal ocean  
33 circulation off western south America. Chapter 10. En. *The sea: The global coastal*  
34 *ocean, regional studies and synthesis*. vol.11 A. R. Robinson, & K. H. Brink (Eds.).  
35 John Wiley and Sons, Inc., New York pp. 273-313
- 36
- 37 SWG-03, SPRFMO, 2012. Report of the Jack Mackerel Subgroup. 11th Meeting of the  
38 Science Working Group, SPRFMO. Lima, Peru, 15-19 October 2012. 69  
39 p.([http://www.southpacificfmo.org/assets/11th-SWG-and-10th-DIWG-meetings/SWG-](http://www.southpacificfmo.org/assets/11th-SWG-and-10th-DIWG-meetings/SWG-11/SWG-JM-report-with-TechAttachments.pdf)  
40 [11/SWG-JM-report-with-TechAttachments.pdf](http://www.southpacificfmo.org/assets/11th-SWG-and-10th-DIWG-meetings/SWG-11/SWG-JM-report-with-TechAttachments.pdf)).
- 41
- 42 SWG-11-08a, SPRFMO, 2012. Peru National Report No2. National report on the  
43 peruvian stock of jack mackerel (northern stock) and the peruvian fishery in national  
44 jurisdictional waters. 11th Meeting of the Science Working Group, SPRFMO. Lima,  
45 Peru, 15-19 October 2012. 65 p. ([http://www.southpacificfmo.org/](http://www.southpacificfmo.org/eleveth-meeting/)  
46 [eleveth-meeting/](http://www.southpacificfmo.org/eleveth-meeting/)).
- 47
- 48 SC-01-12, SPRFMO. 2013. Report on the fishing activities of the peruvian fleet in the  
49 area of application of the south Pacific Regional Fisheries Management Organisation  
(SPRFMO) during January 2012-July 2013. South Pacific Regional Fisheries

- 1 Management Organization 1st Meeting of the Scientific Committee La Jolla, Ca.,  
2 United States of America, 21-27 October 2013.
- 3
- 4 Thomas, A. 1999. Seasonal distributions of satellite-measured phytoplankton pigment  
5 concentration along the Chilean coast. *J. Geophys. Res.* 104 (C11): 25,877-25,890.
- 6
- 7 Tomczak, M. & S. Godfrey. 2001. The Pacific Ocean. Chapt. 8. En. Regional  
8 Oceanography: An introduction. CSIRO, pp. 106-136.
- 9
- 10 Troupin, C., Ouberdous, M., Sirjacobs, D., Alvera-Azcárate, A., Barth, A., Toussaint,  
11 M.E. & J.M. Beckers. 2013. DIVA user's guide. GeoHydrodynamics and Environment  
12 Research, March edn.  
13 [http://modb.oce.ulg.ac.be/mediawiki/upload/DIVA/notes/DivaUserGuide\\_March2013.p](http://modb.oce.ulg.ac.be/mediawiki/upload/DIVA/notes/DivaUserGuide_March2013.pdf)  
14 [df](http://modb.oce.ulg.ac.be/mediawiki/upload/DIVA/notes/DivaUserGuide_March2013.pdf)
- 15
- 16 Vásquez, 2012. Modelación de la historia de vida temprana del jurel (*Trachurus*  
17 *murphyi*) en el Pacífico suroriental: Influencia de factores biofísicos en la conectividad  
18 de zonas desove-crianza. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias, mención  
19 Pesquerías. Departamento de Oceanografía. Universidad de Concepción. 161 pp.
- 20
- 21 Vásquez, S., Correa-Ramírez, M., Parada, C., & A. Sepúlveda. 2013. The influence of  
22 oceanographic processes on jack mackerel (*Trachurus murphyi*) larval distribution and  
23 population structure in the southeastern Pacific Ocean. *ICES Journal of Marine Science*,  
24 70: 1097–1107.
- 25
- 26 Vásquez, S., Parada, C. & Di Lorenzo, E. Connectivity patterns of the jack mackerel  
27 (*Trachurus murphyi*) in the southeastern Pacific: linking spawning-nursery grounds  
28 through a biophysical approach. Aceptado en Progress in Oceanography.
- 29
- 30 Vikebø, F., Jørgensen, C., Kristiansen, T. & Ø. Fiksen. 2007. Drift, growth, and  
31 survival of larval Northeast Arctic cod with simple rules of behaviour. *Marine Ecology*  
32 *Progress Series* 347, 207-219.
- 33
- 34 Warner, J.C, Sherwood, C.R., Arango, H.G. & R.P. Signell, 2005: Performance of four  
35 Turbulence Closure Methods Implemented using a Generic Length Scale Method.  
36 *Ocean Modelling*, 8, 81-113.
- 37
- 38 Weiss, J. 1991. The dynamics of entropy transfer in two dimensional hydrodynamics.  
39 *Physica D* 48: 273-294.
- 40
- 41 Wilkin, J.L., Arango, H.G., Haidvogel, D.B., Lichtenwalner, C.S., Durski, S.M. & K.S.  
42 Hedstrom. 2005. A regional Ocean Modeling System for the Long-term Ecosystem  
43 Observatory. *J. Geophys. Res.*, 110, C06S9.
- 44
- 45 Wood, S.N. & N.H. Augustin. 2002. GAMs with integrated model selection using  
46 penalized regression splines and applications to environmental modelling. *Ecological*  
47 *Modelling*, 157 (2-3), pp. 157-177.
- 48
- 49 Wood, S. 2006. Generalized Additive Models: An Introduction with R. February 27,  
50 2006 by Chapman and Hall/CRC Textbook - 410 Pages - 103 B/W Illustrations

1  
2 Yáñez, E., Barbieri, M.A., González, A., Pizarro, O., Bravo, M., Canales, C. & S.  
3 Salinas. 1994. Sea surface thermal structure associated to the pelagic fish resources  
4 distribution in northern Chile. Second Thematic Conf. on Rem. Sens. Mar. Coastal  
5 Envir. ERIM, Ann Arbor MI, 149-162.

6  
7  
8  
9  
10  
  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36

1

2

3

4

5

6

7

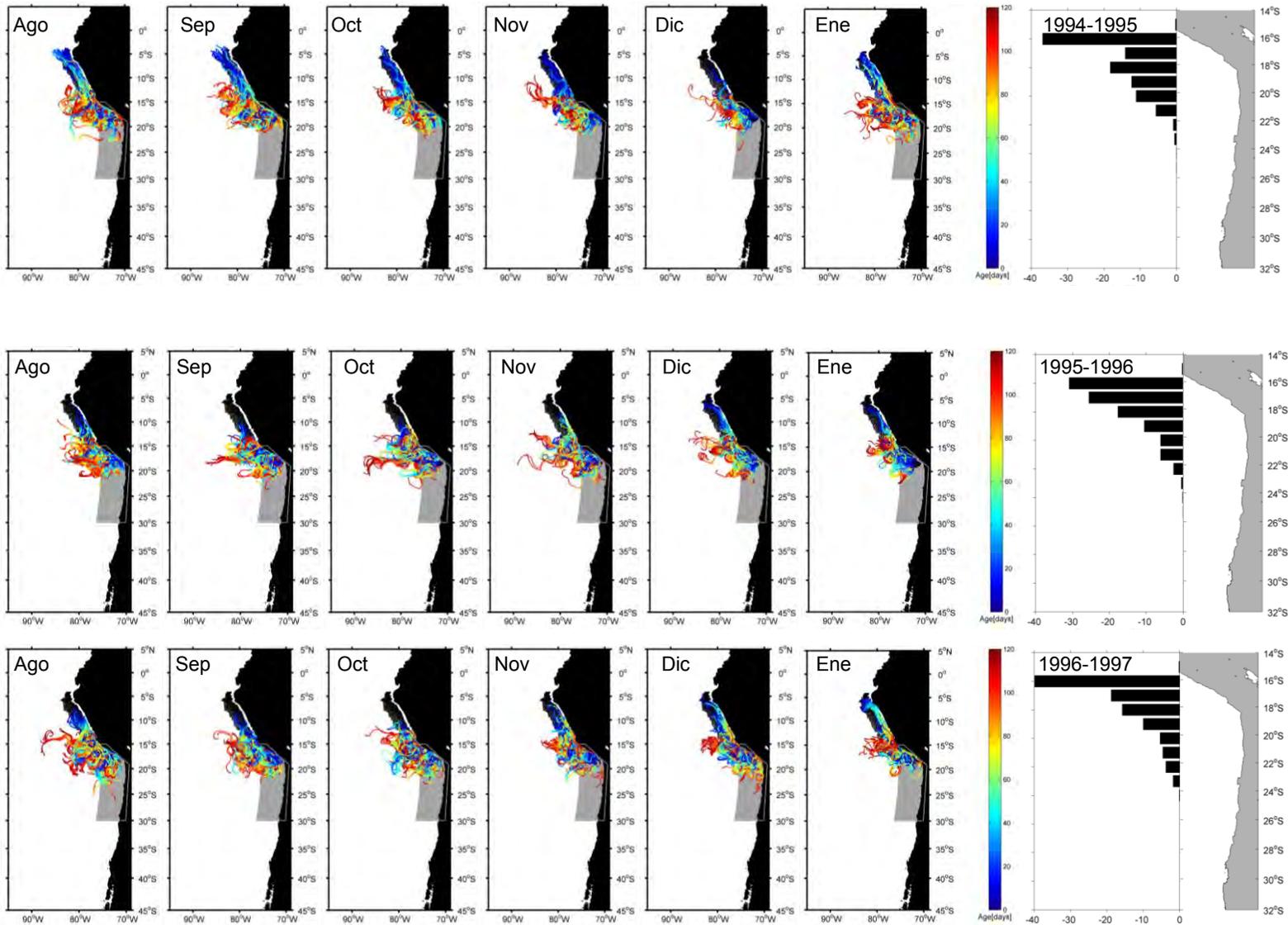
8

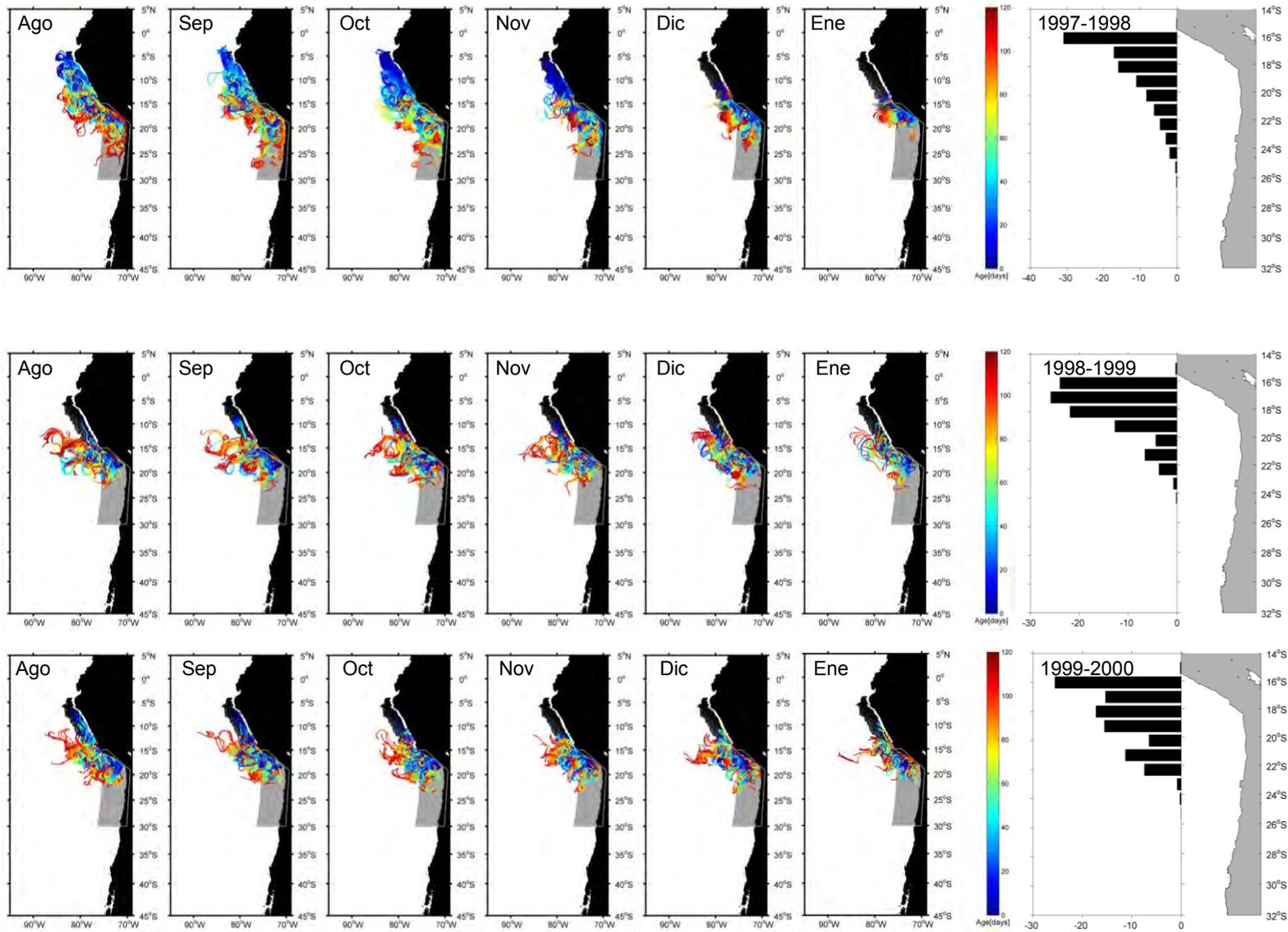
9

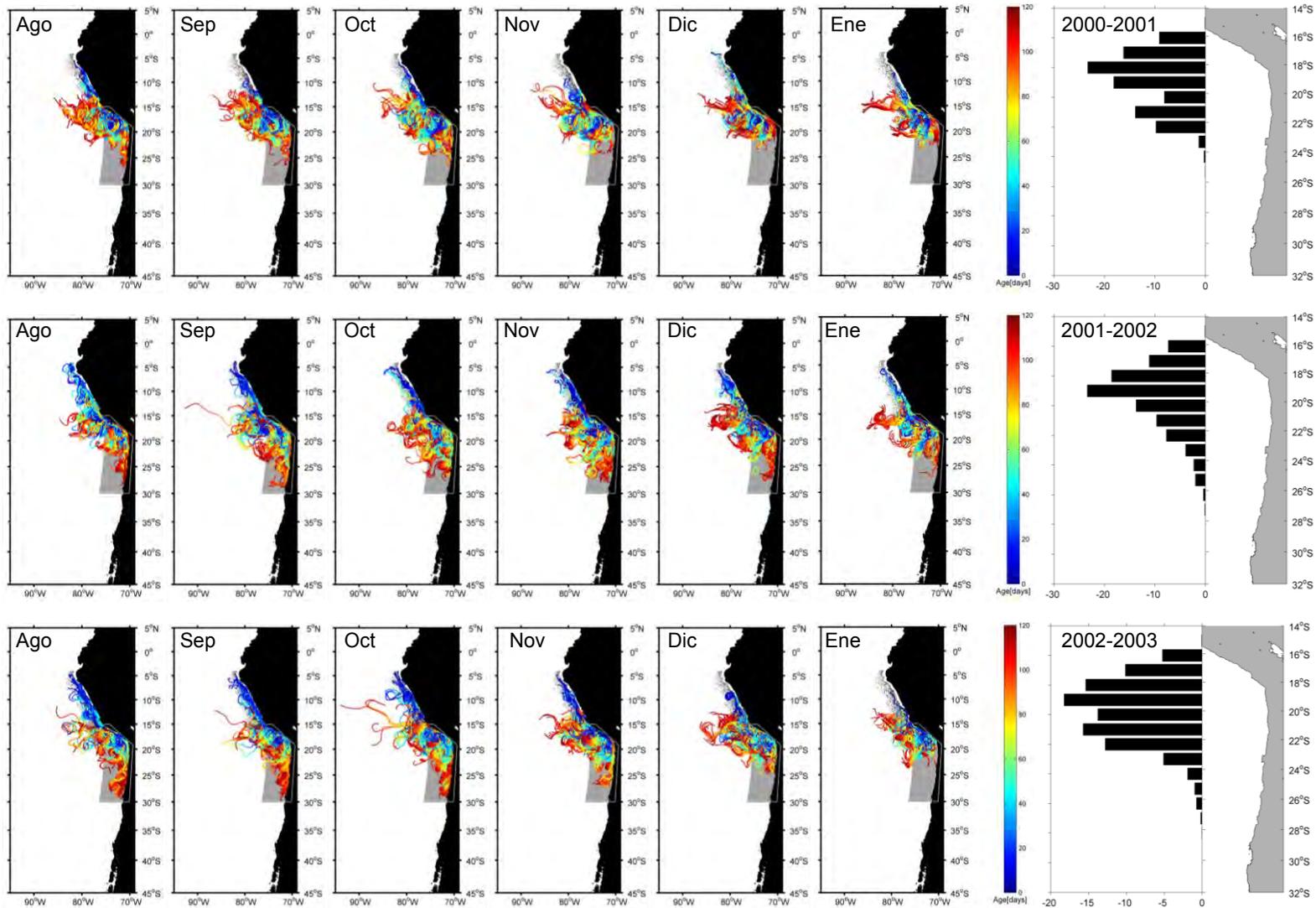
10

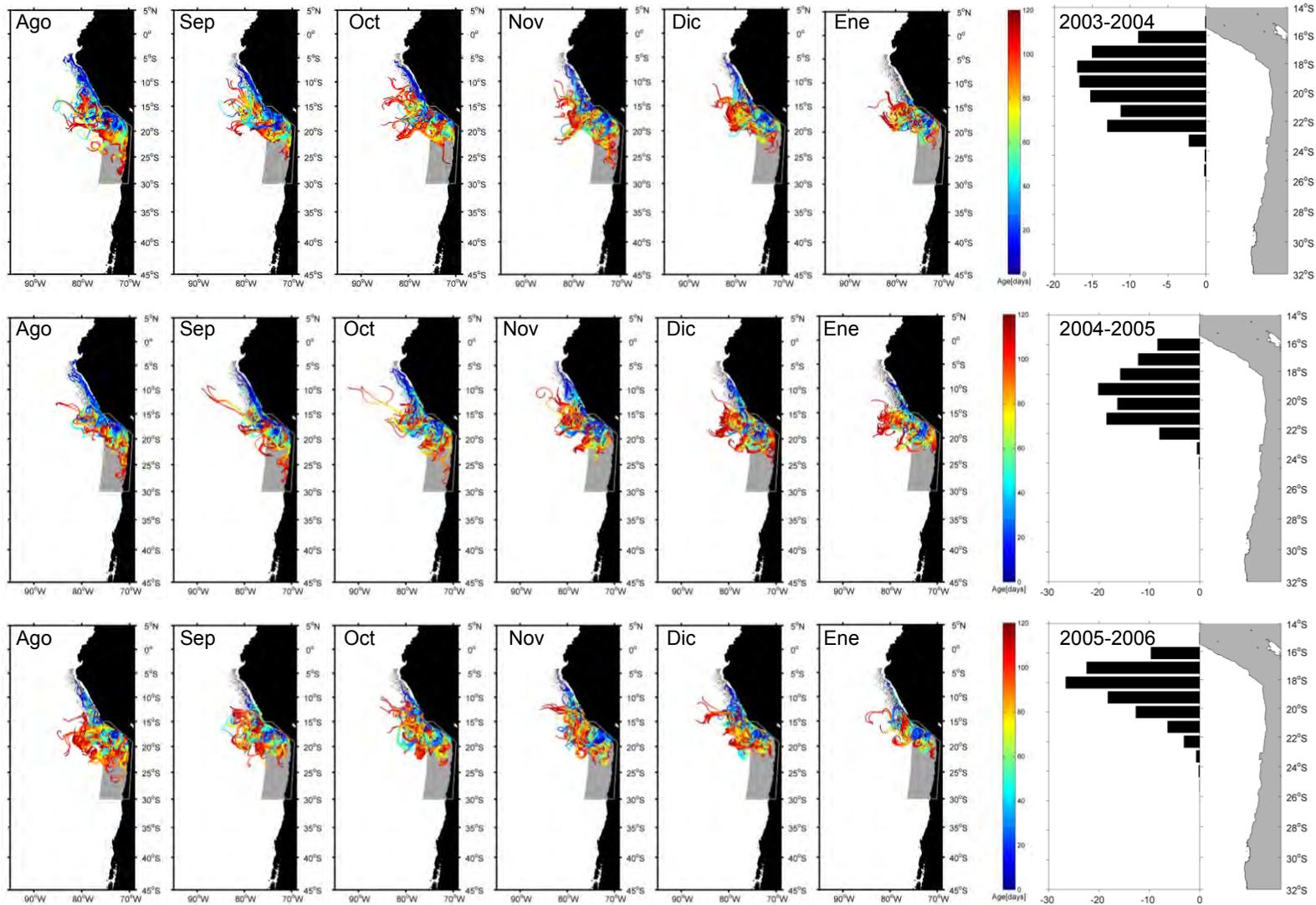
11

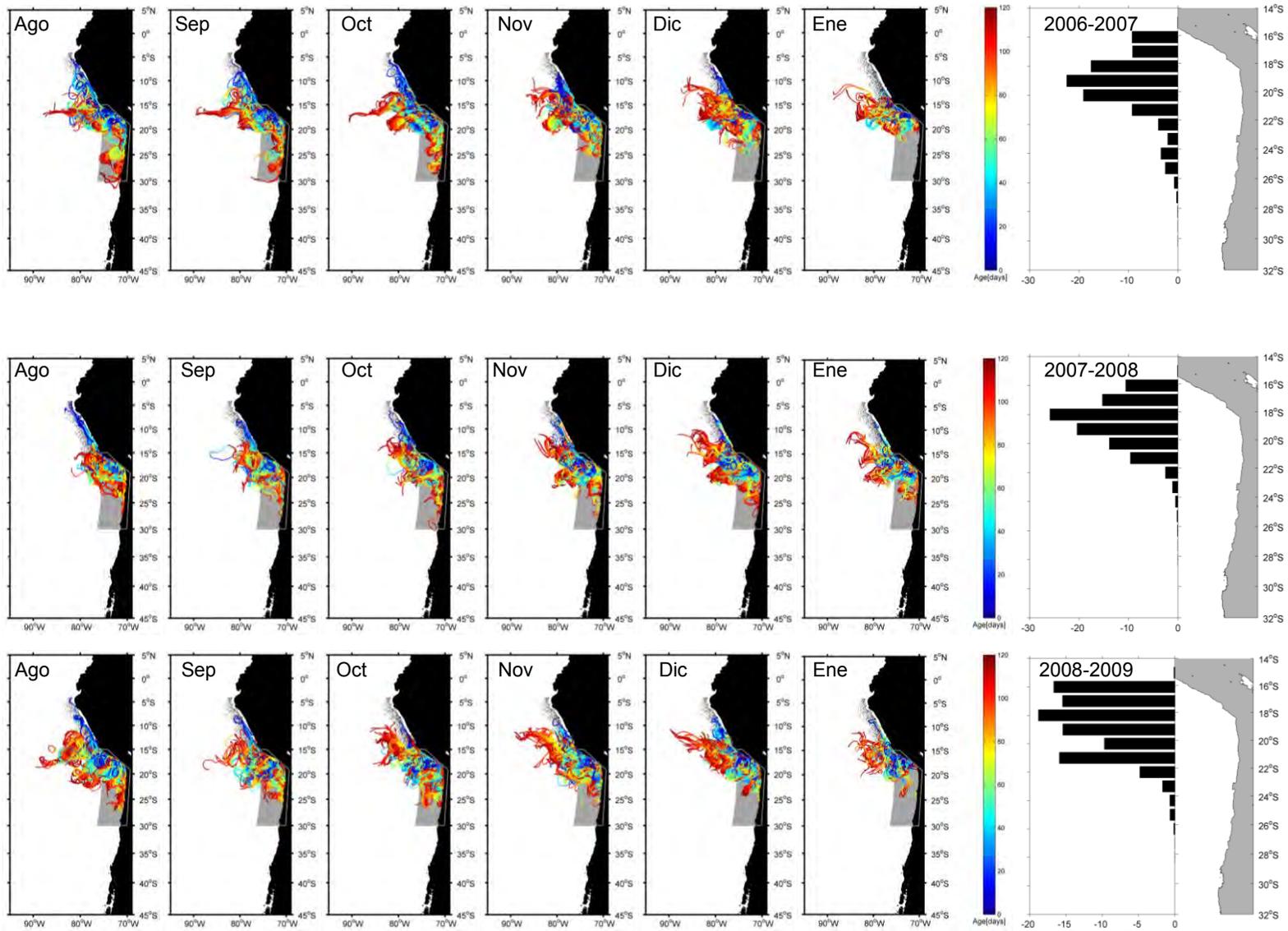
12       **Anexo I. Trayectorias de transporte de los individuos reclutados desde desoves**  
13 **mensuales (Agosto-Enero, de izquierda a derecha), periodo 1994-2013 (de arriba a**  
14 **abajo) ocurridos en la zona de desove de Perú y frecuencia de distribución**  
15 **latitudinal al interior de la zona de reclutamiento modelado (extremo derecho).**

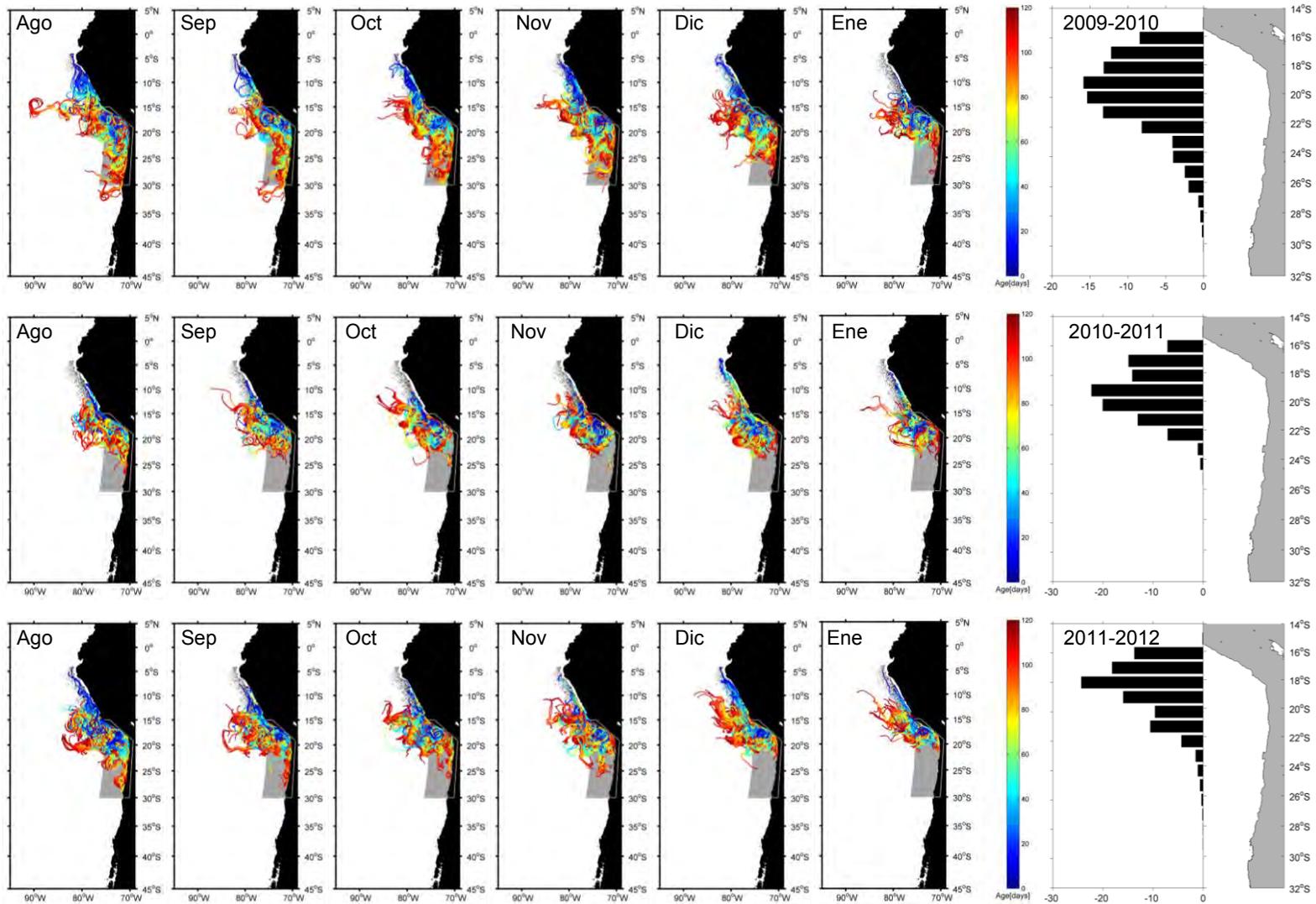


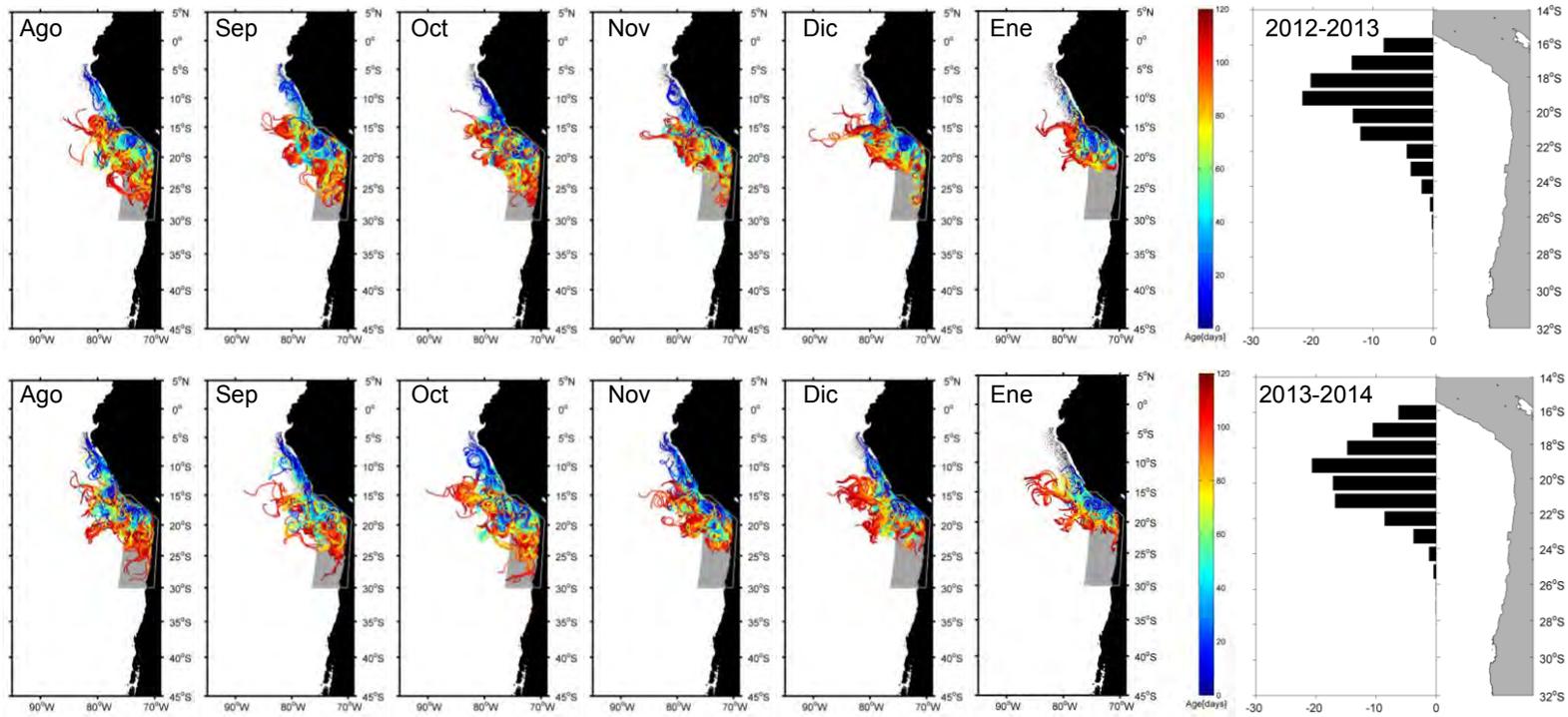




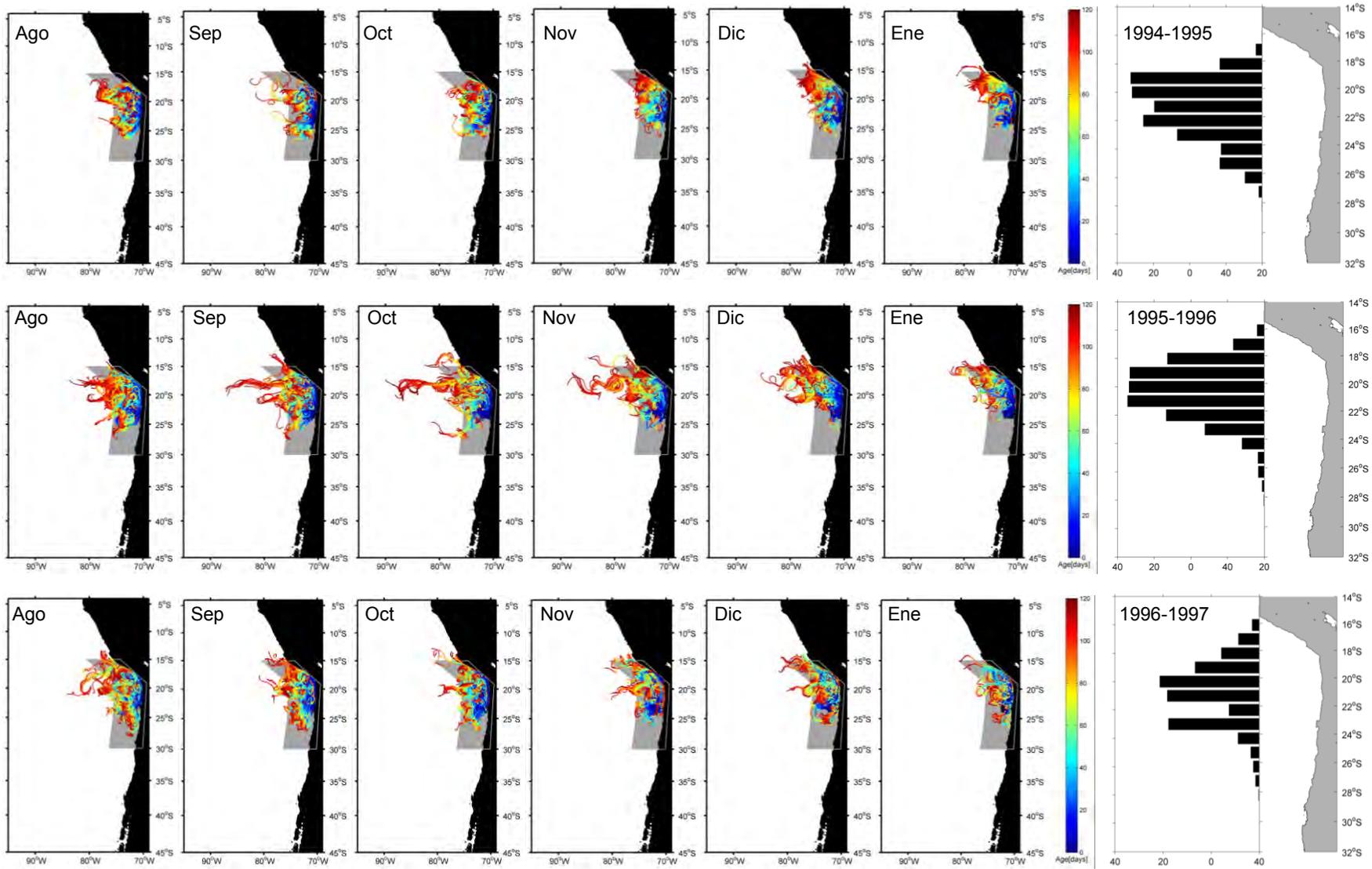


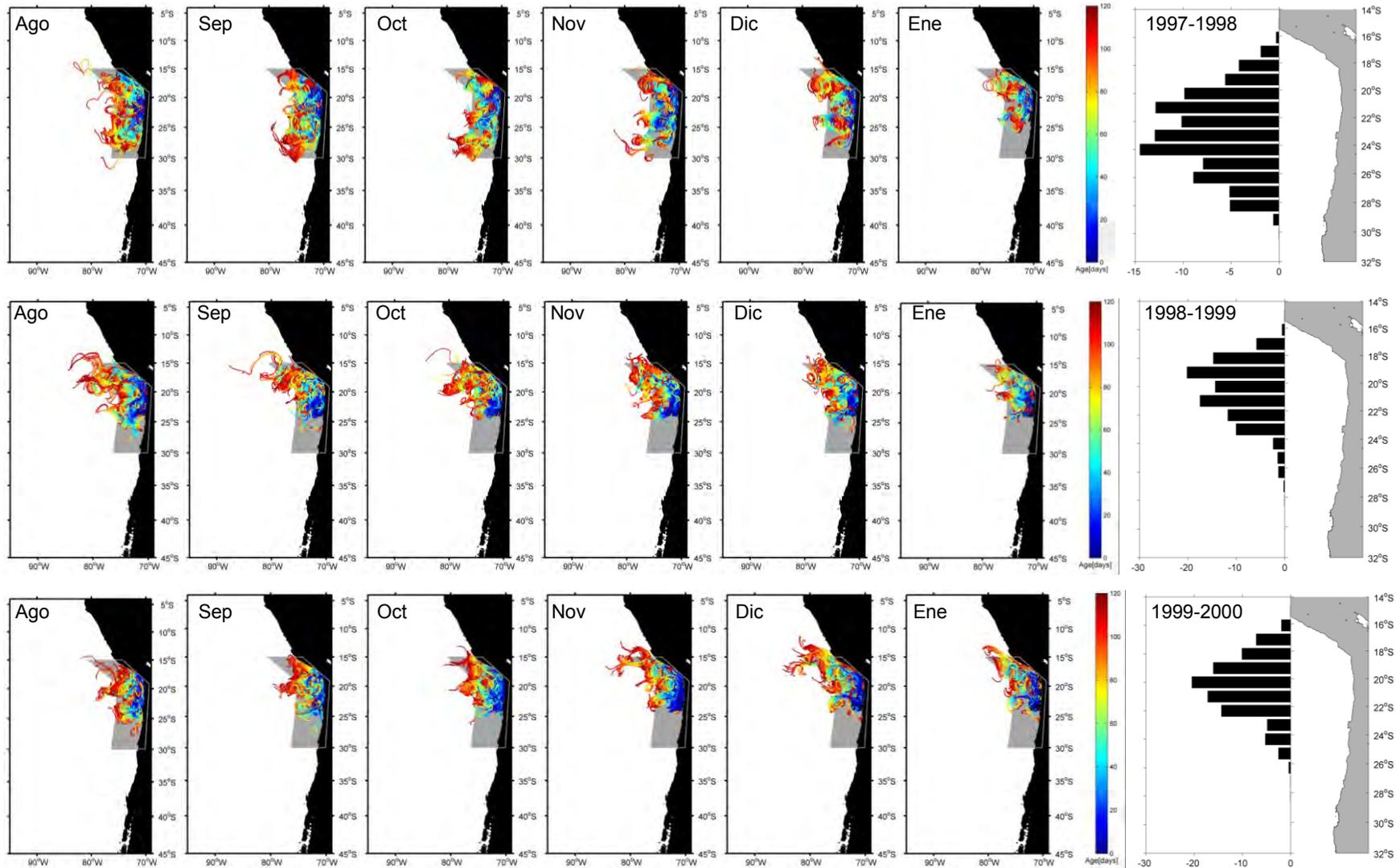


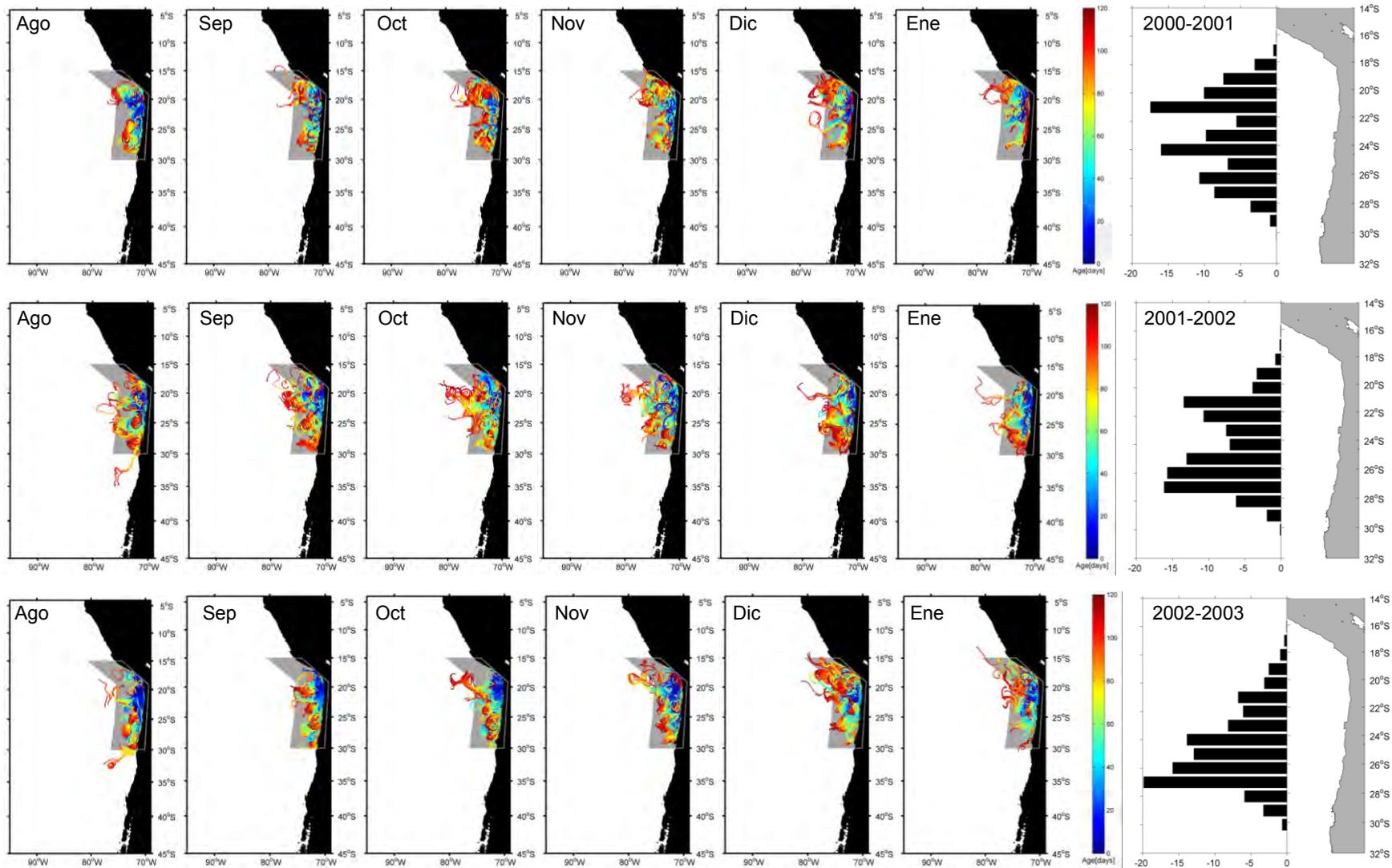


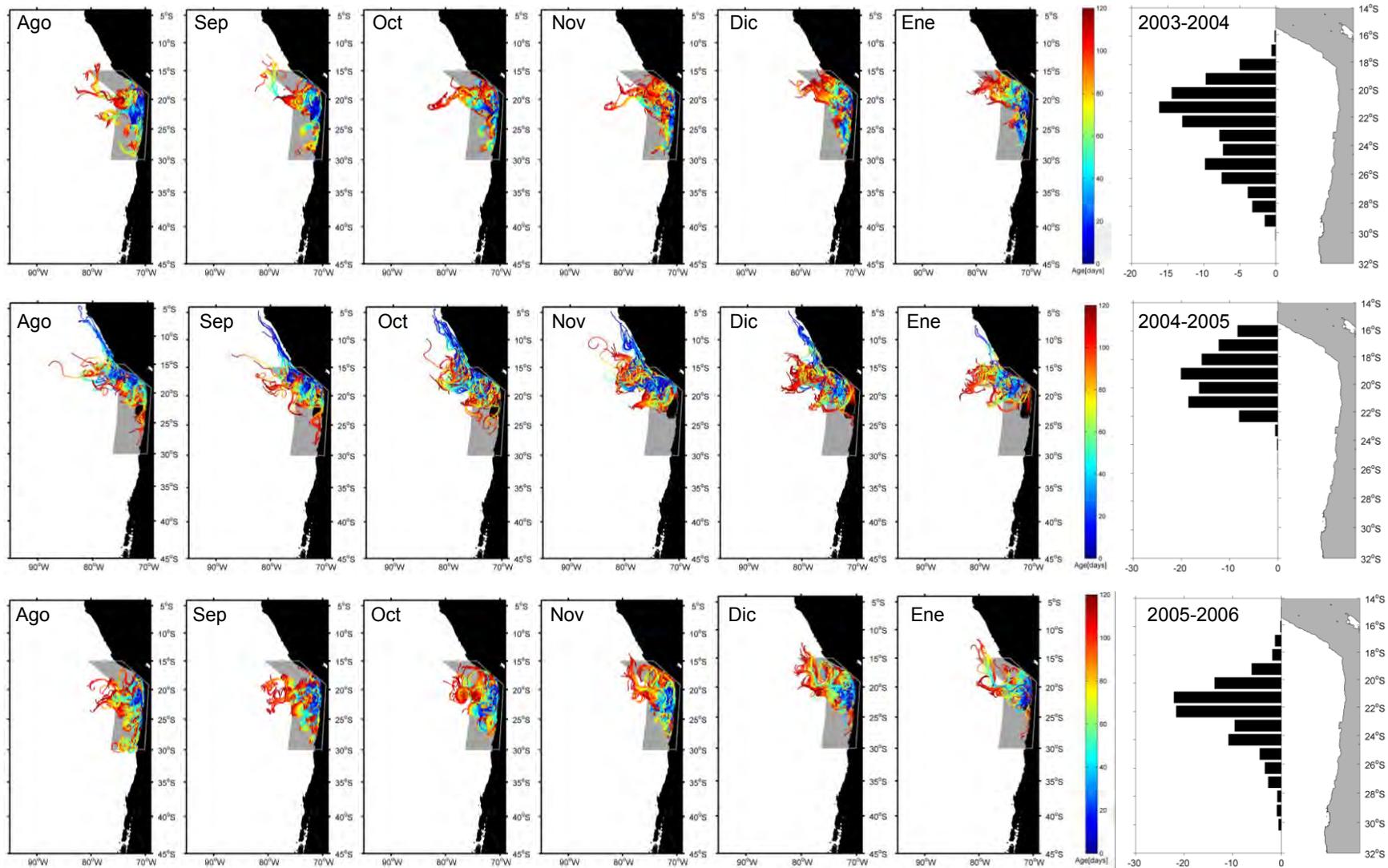


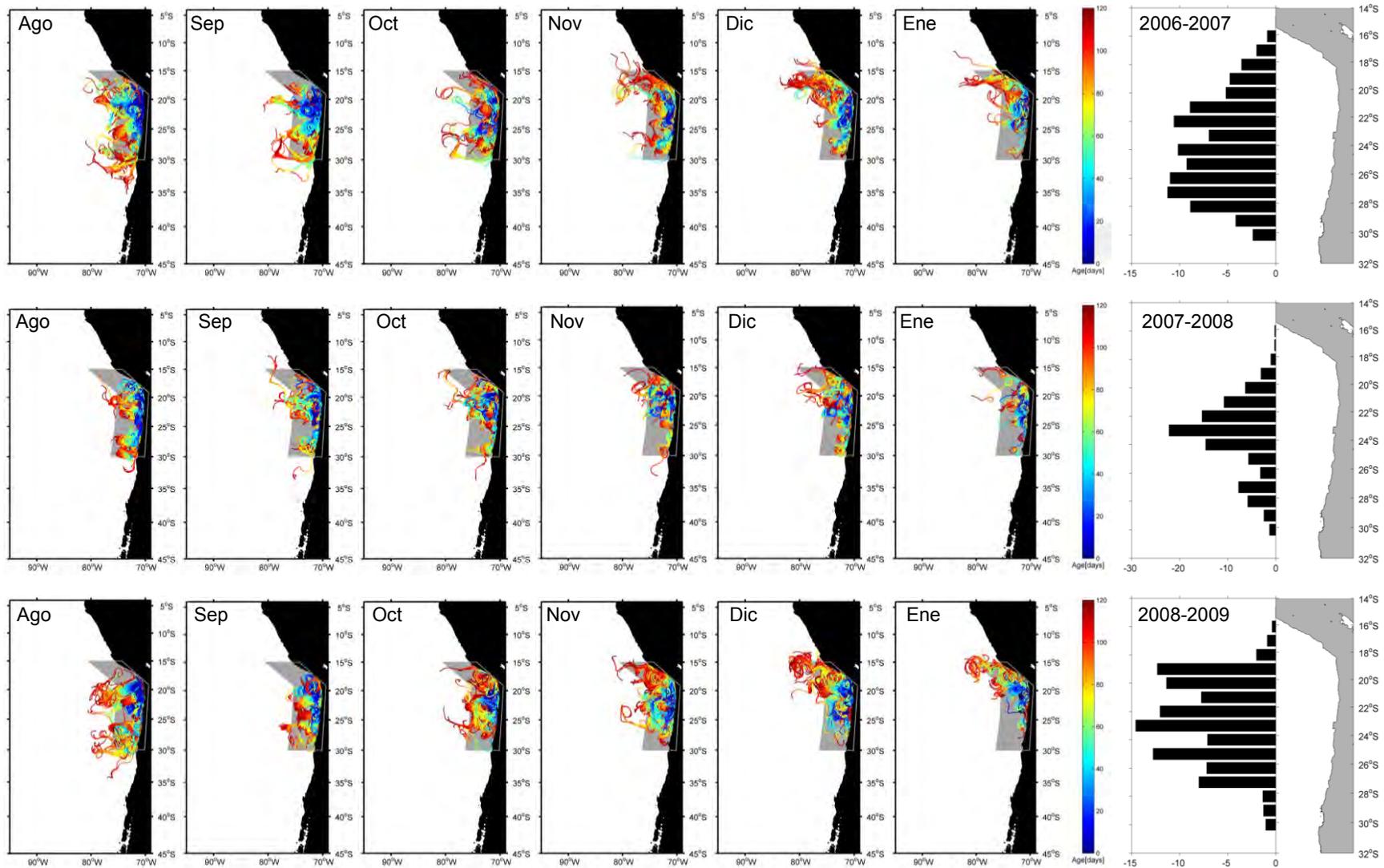
**Anexo II. Trayectorias de transporte de los individuos reclutados desde desoves mensuales (Agosto-Enero, de izquierda a derecha) , periodo 1994-2013 (de arriba a abajo) ocurridos en la zona de desove de Chile norte y frecuencia de distribución latitudinal al interior de la zona de reclutamiento modelado (extremo derecho).**

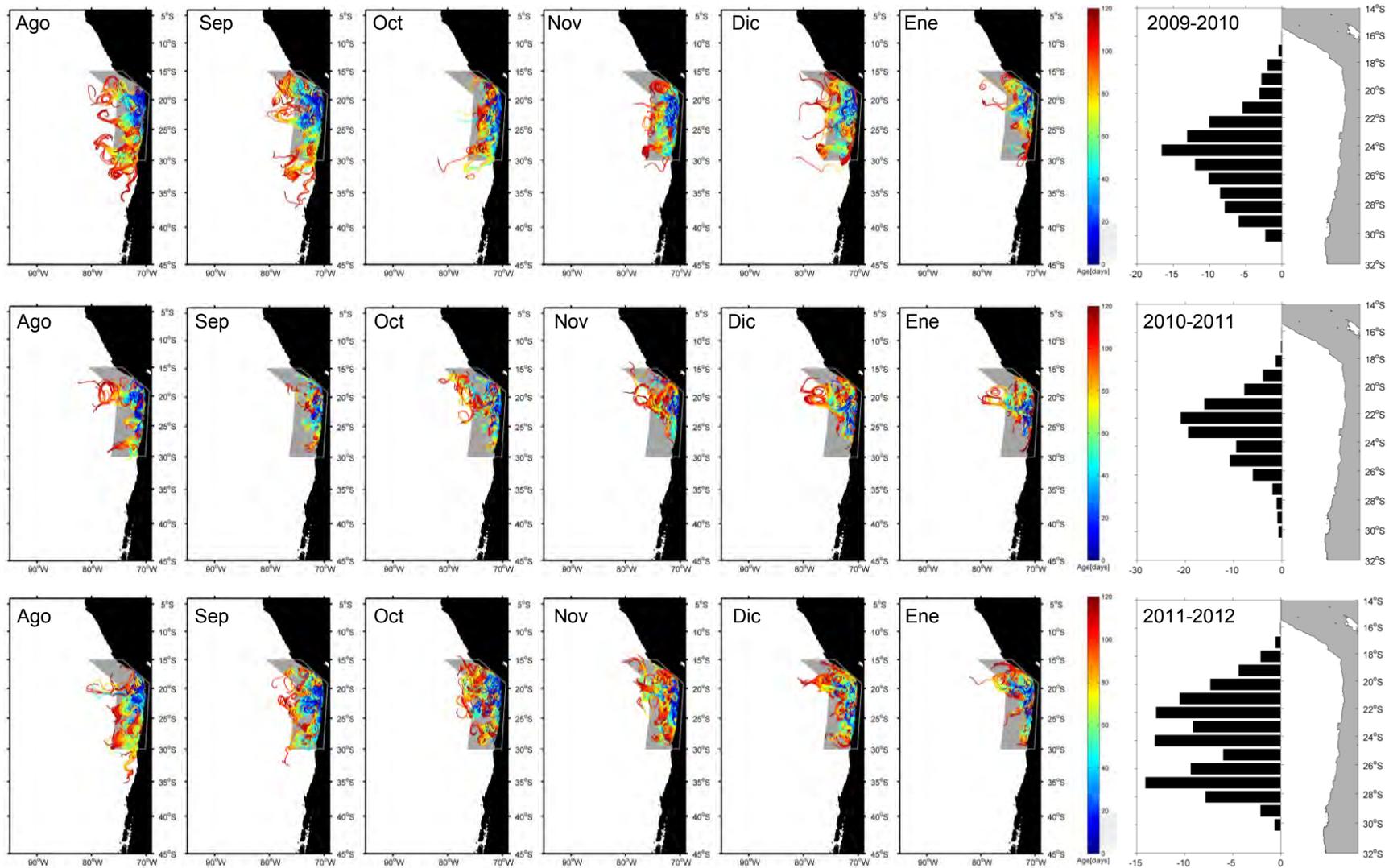


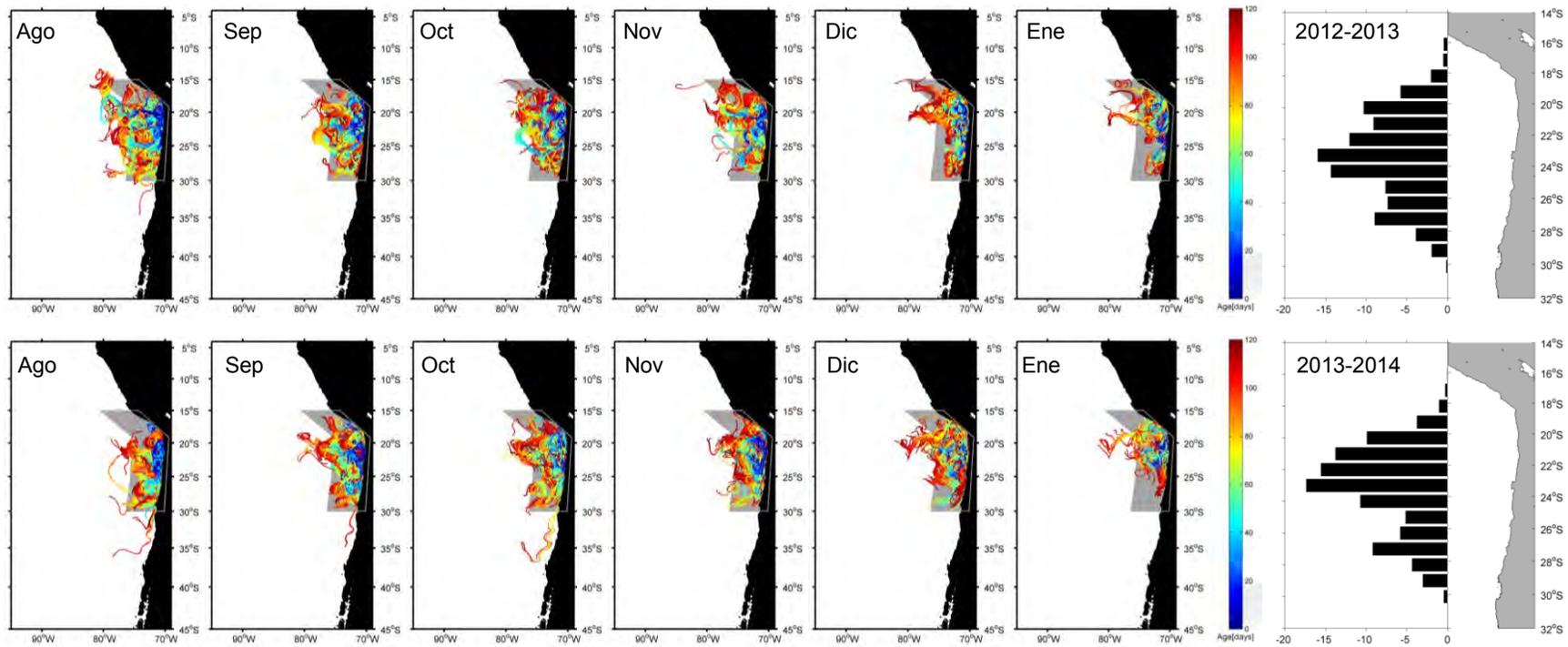




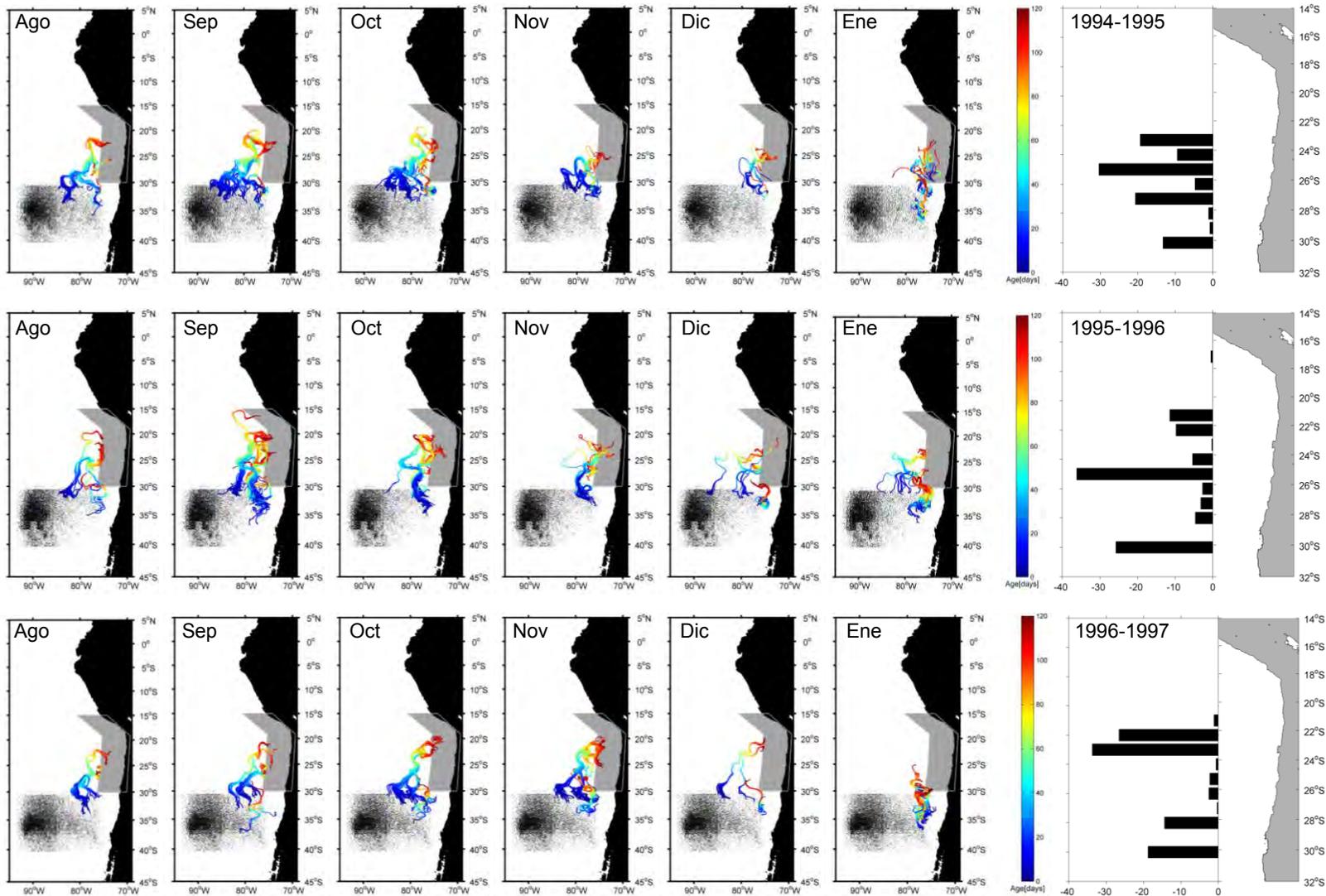


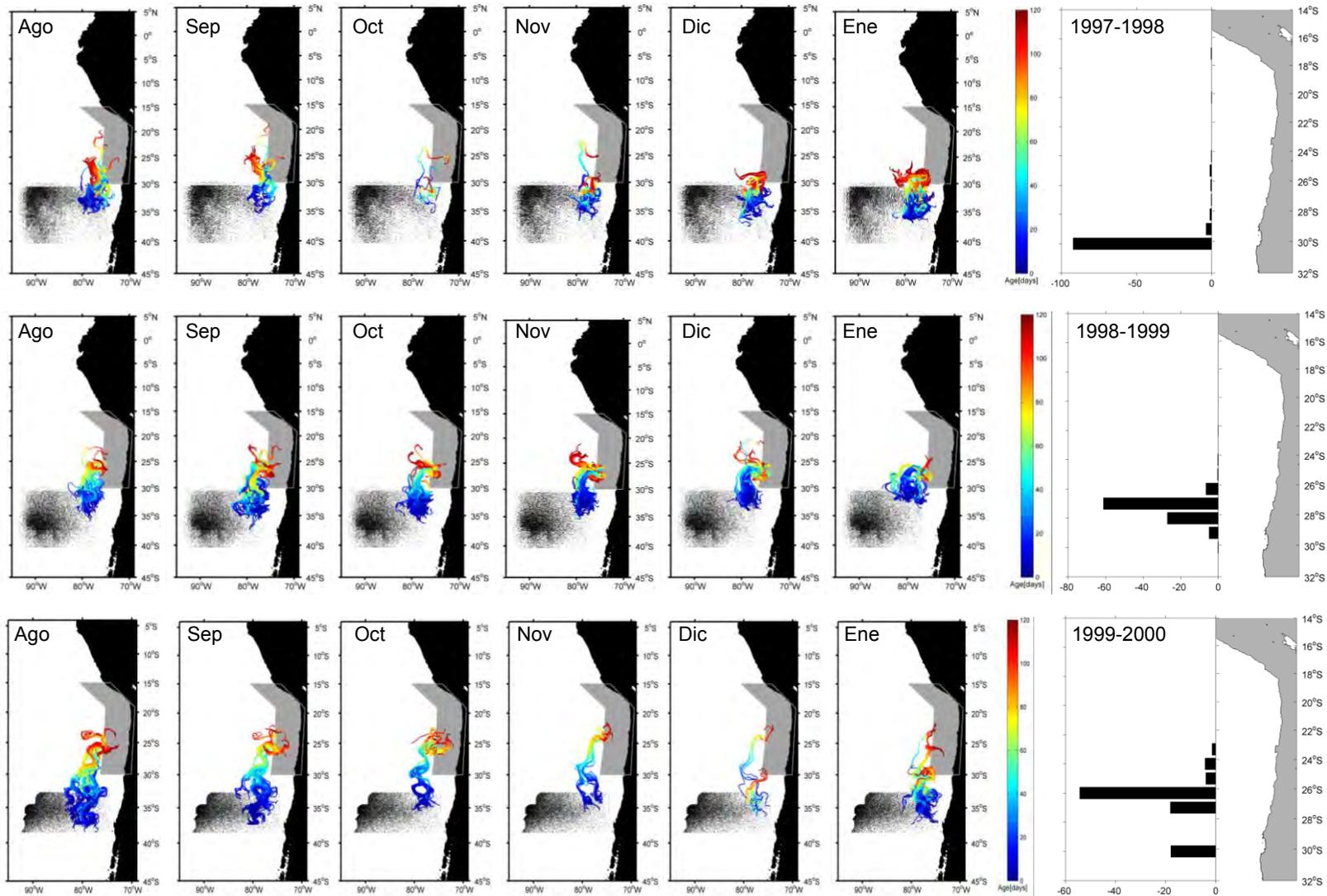


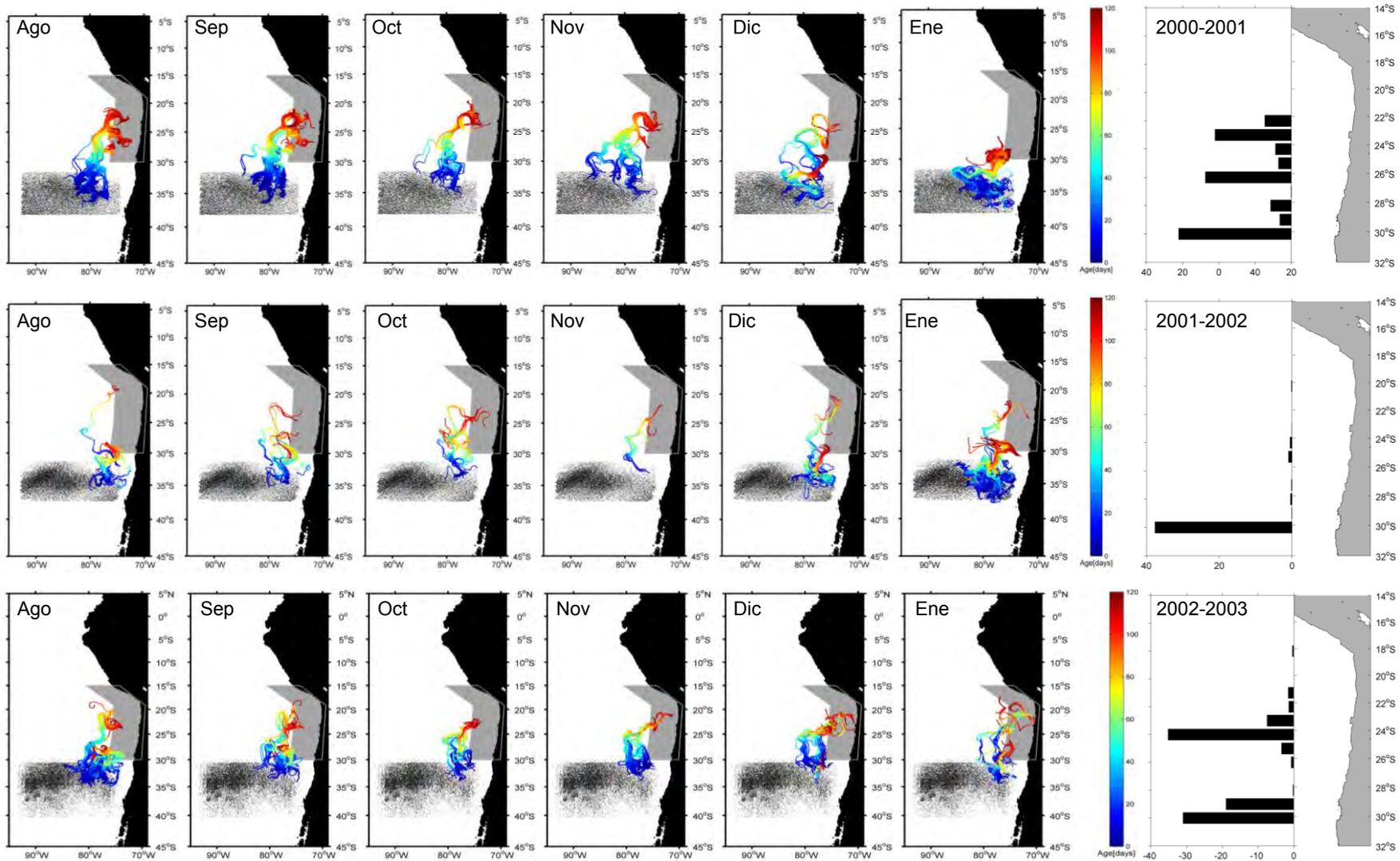


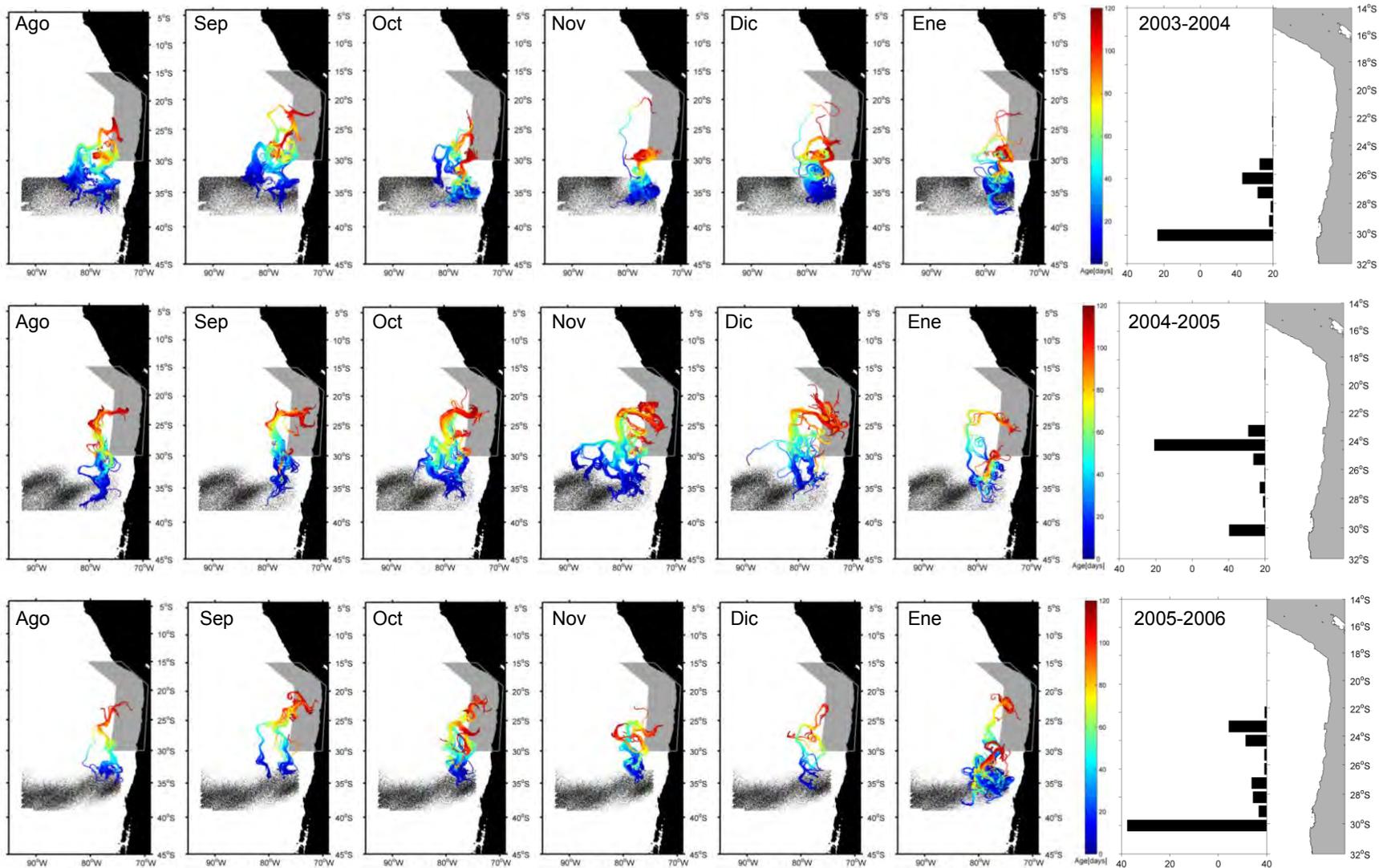


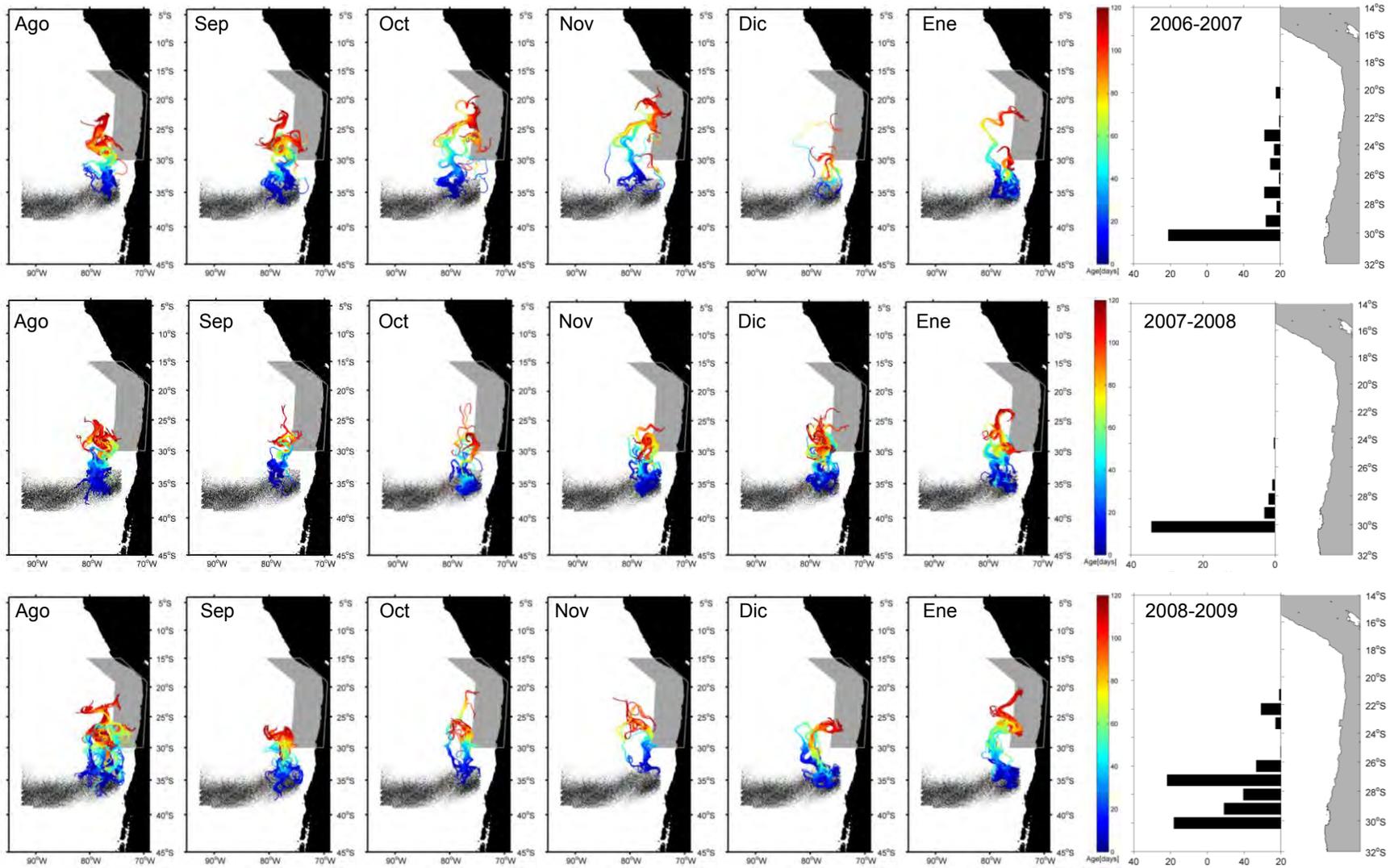
**Anexo III. Trayectorias de transporte de los individuos reclutados desde desoves mensuales (Agosto-Enero, de izquierda a derecha) , periodo 1994-2013 (de arriba a abajo) ocurridos en la zona de desove de Chile centro-sur y frecuencia de distribución latitudinal al interior de la zona de reclutamiento modelado (extremo derecho).**

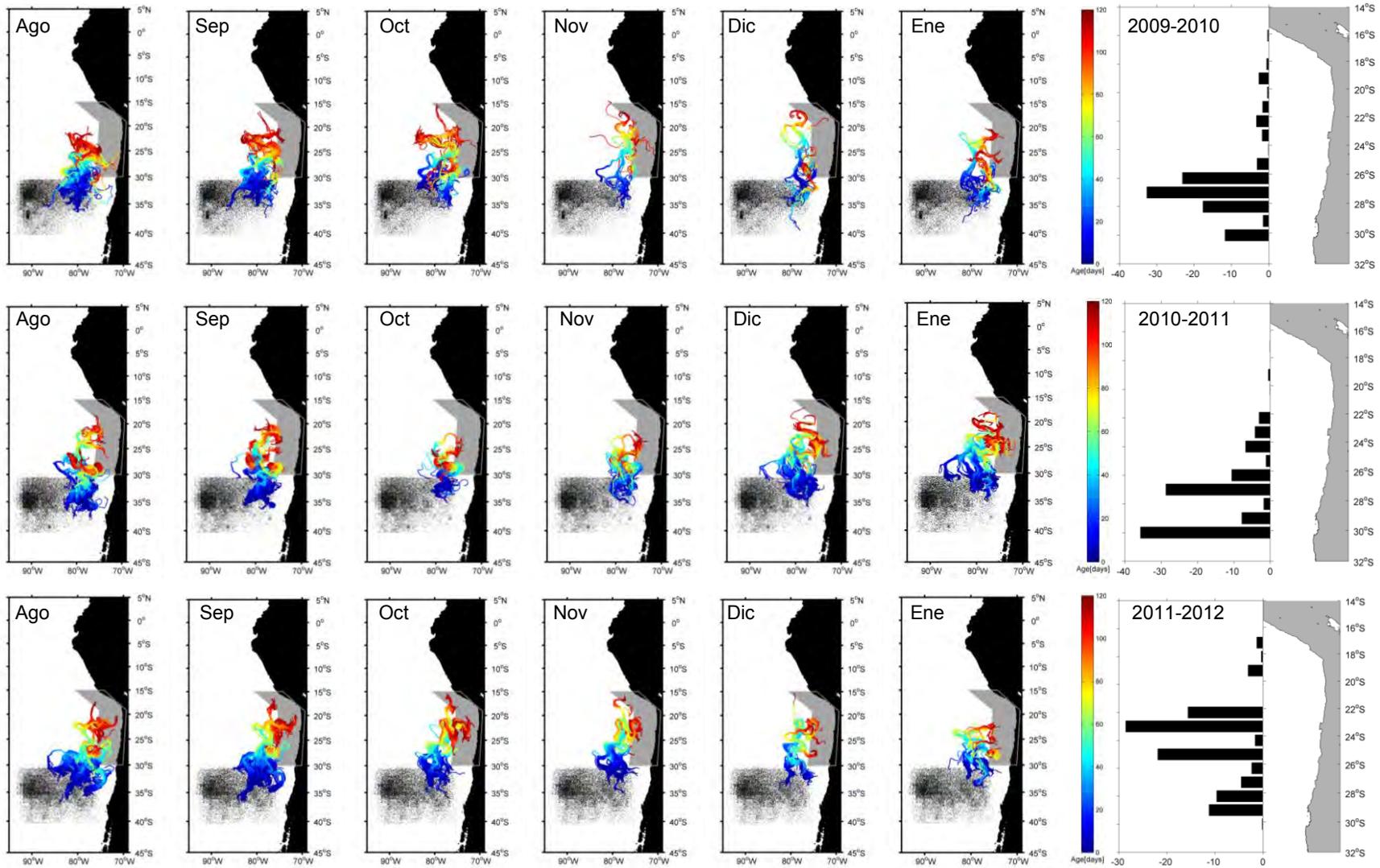


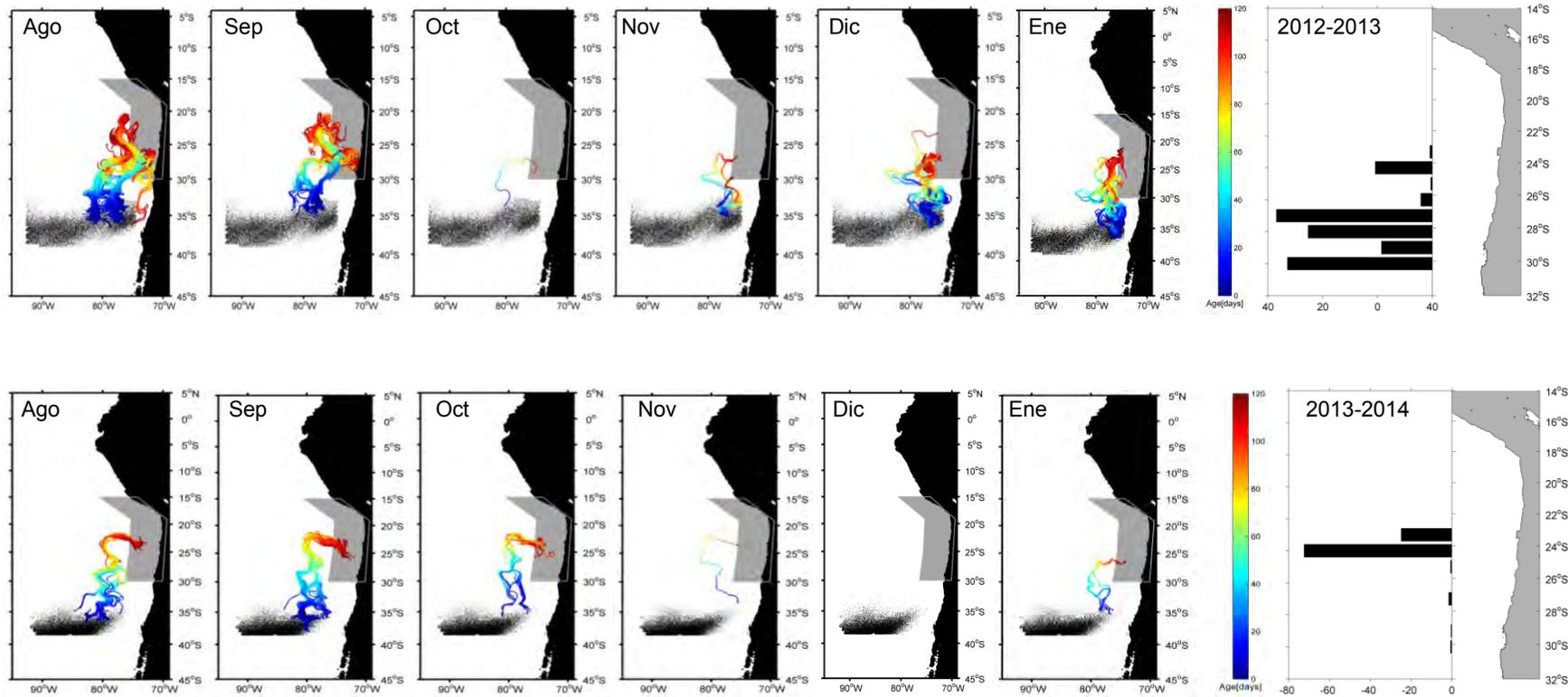












**ANEXO IV. Modelling the early life history of Jack mackerel in the Southeastern Pacific: an approach to population connectivity**

**3rd Meeting of the Scientific Committee**

**South Pacific Regional Fisheries Management Organisation**

**ANEXO V. Análisis climatológicos y Funciones ortogonales empíricas asociadas a la descripción oceanográfica del área de estudio**

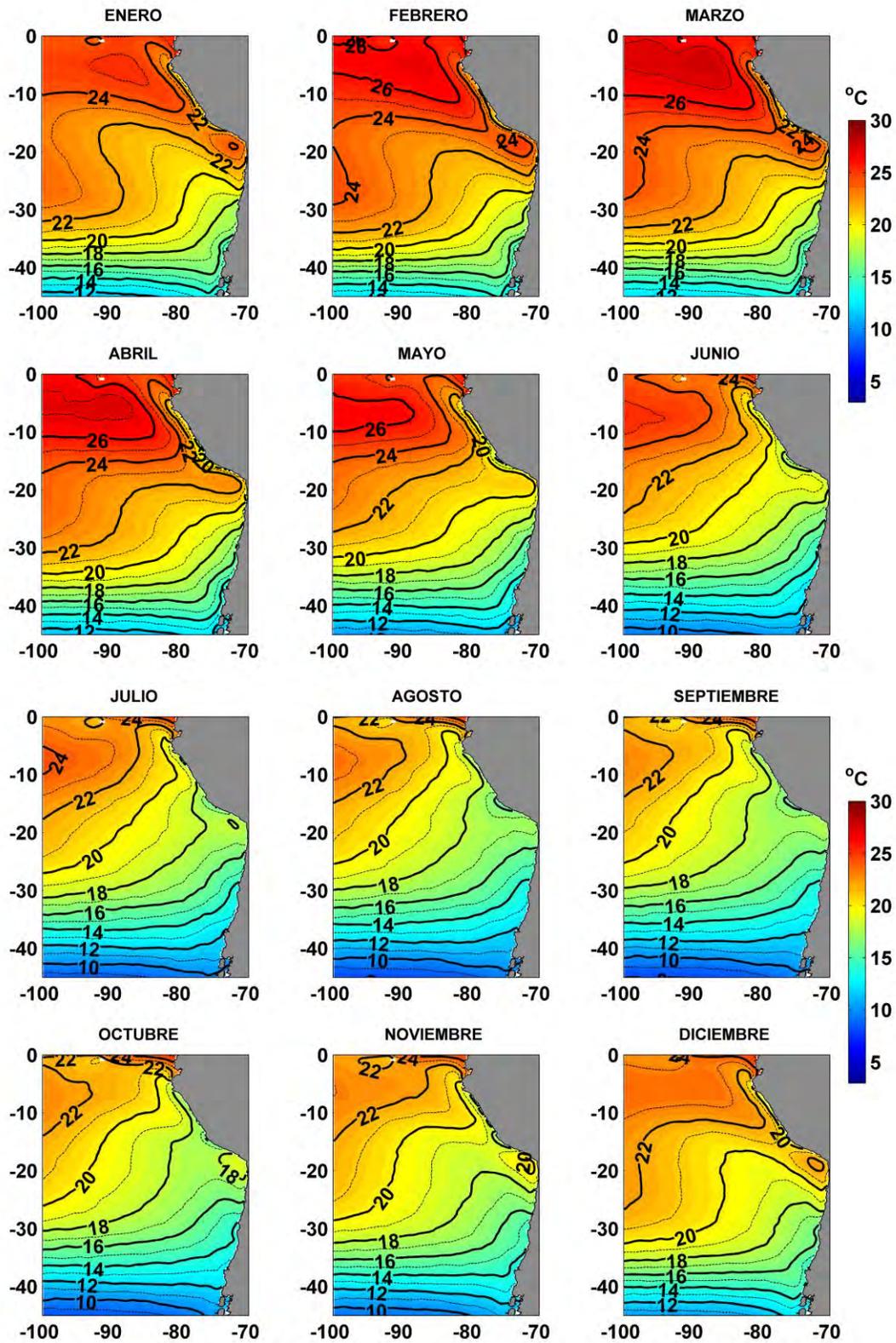


Figura A1-1. Climatología de Temperatura Superficial del Mar [1982-2008].

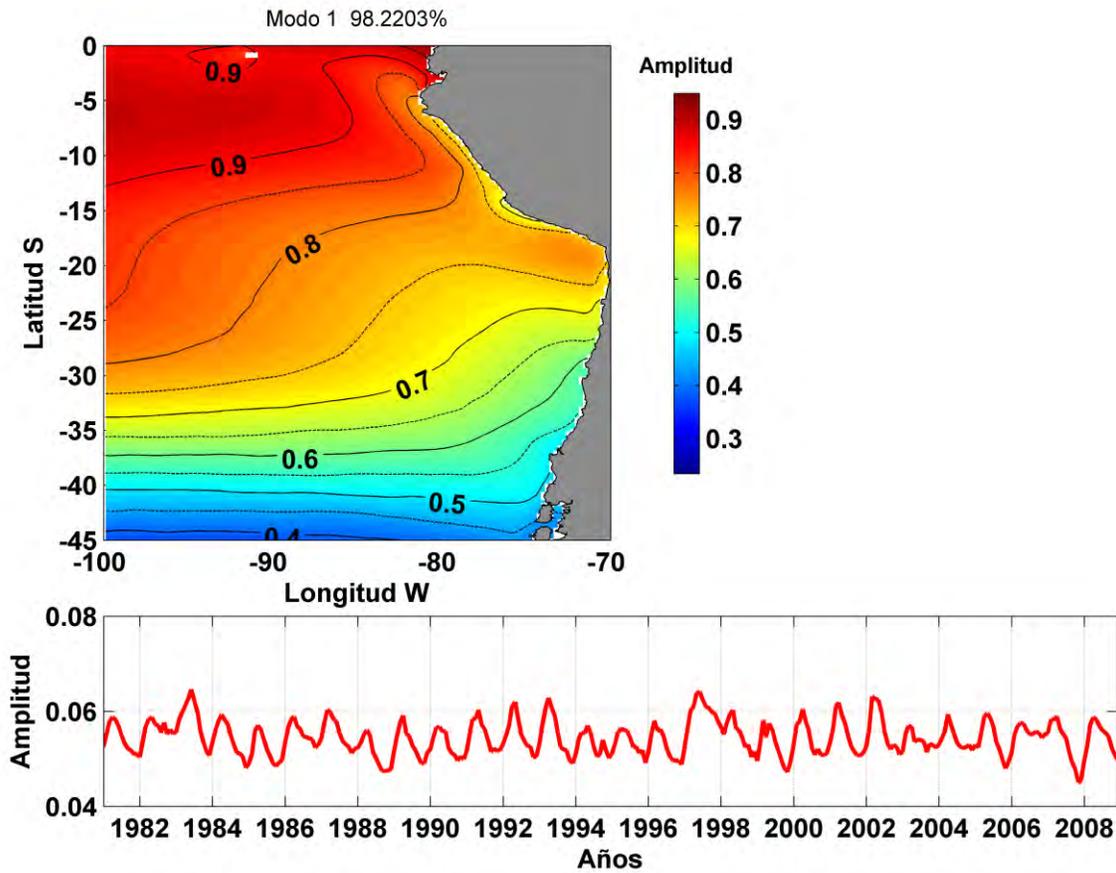


Figura A1-2. Funciones Empíricas Ortogonales de Temperatura Superficial del Mar. (a) Estructura espacial y (b) temporal del primer modo.

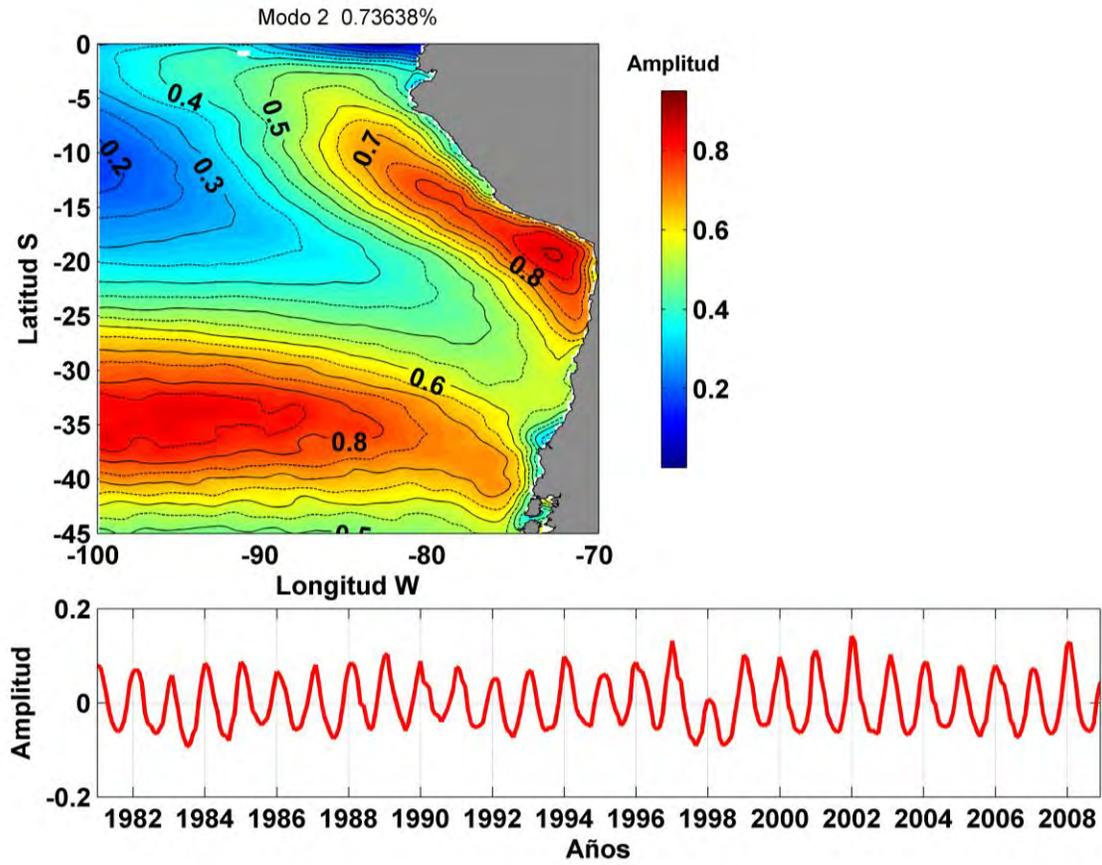


Figura A1-3. Funciones Empíricas Ortogonales de la Temperatura Superficial del Mar. (a) Estructura espacial y (b) temporal del segundo modo.

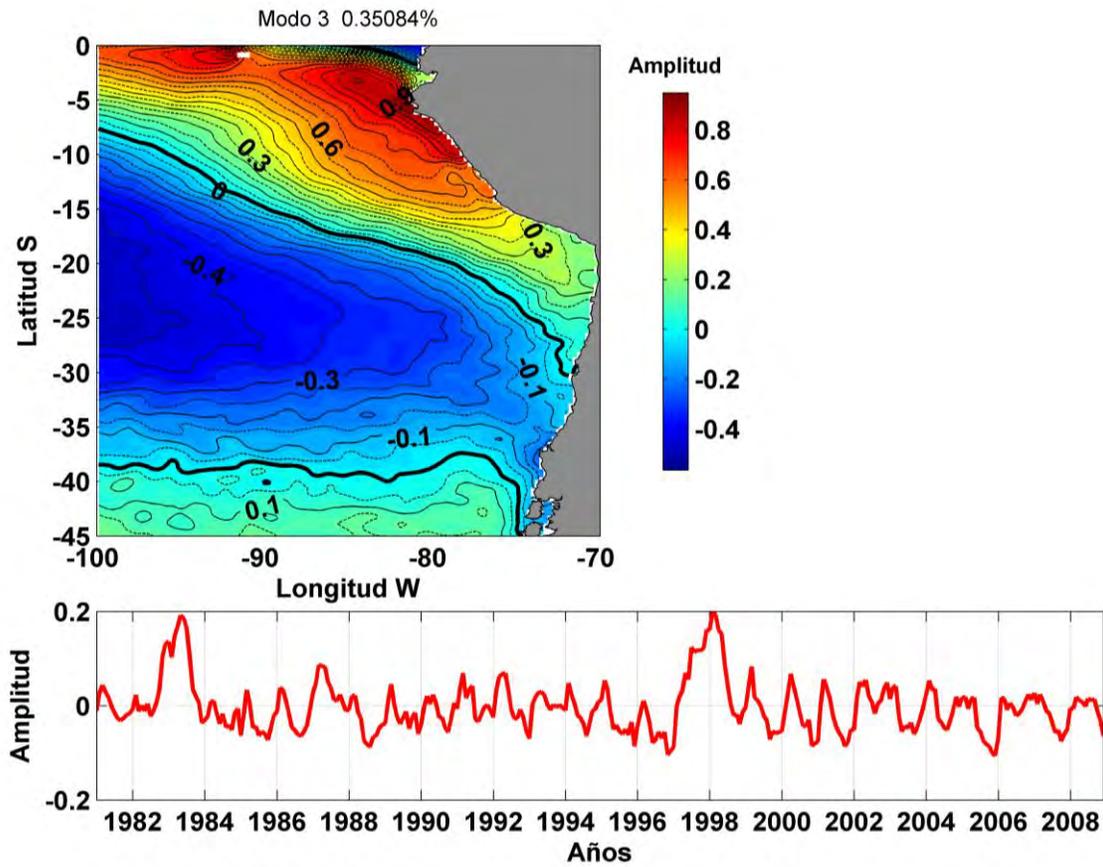


Figura A1-4. Funciones Empíricas Ortogonales de Temperatura Superficial del Mar. (a) Estructura espacial y (b) temporal del tercer modo.

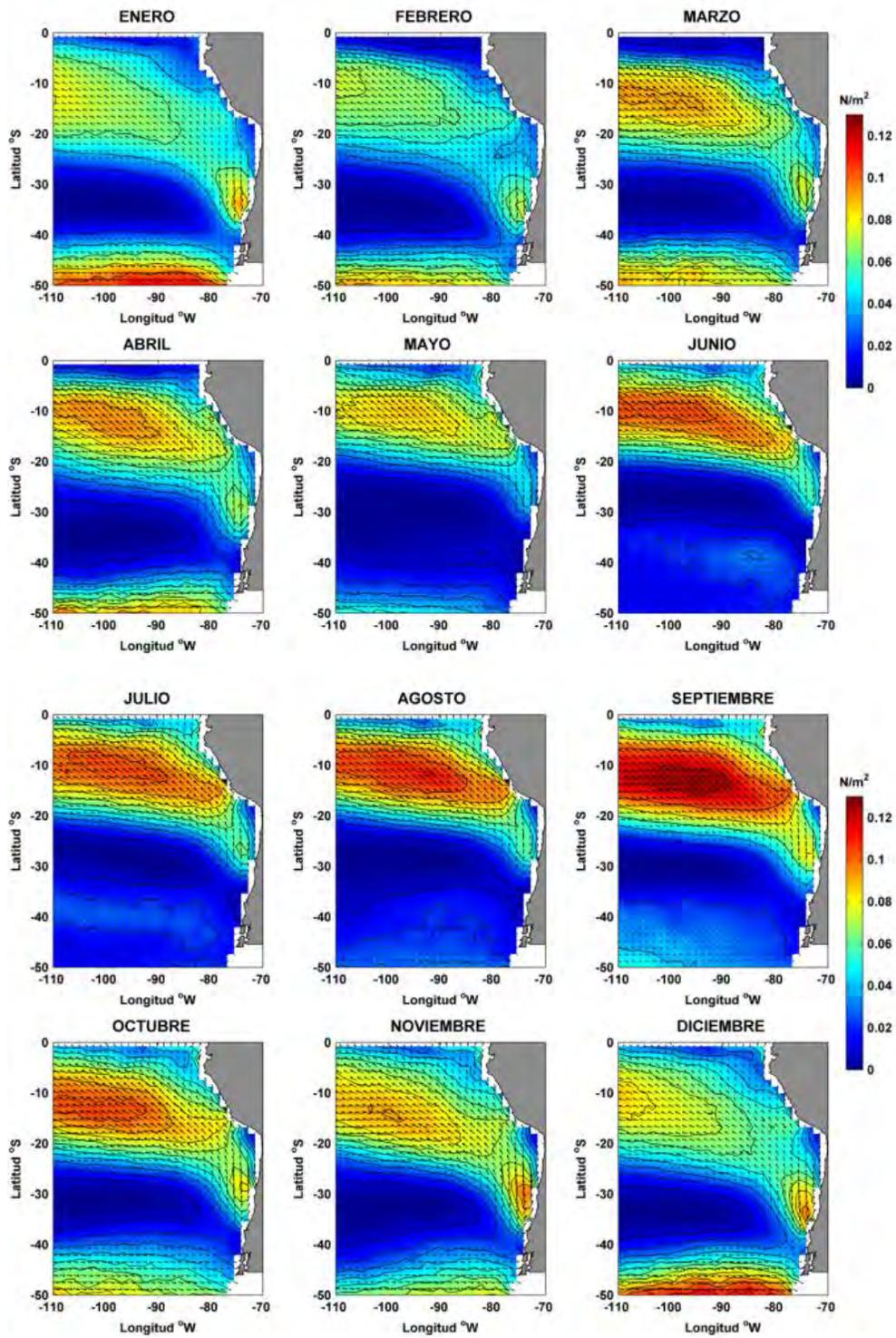


Figura A1-5. Climatología del esfuerzo del viento en el área de estudio [QuikSCAT].

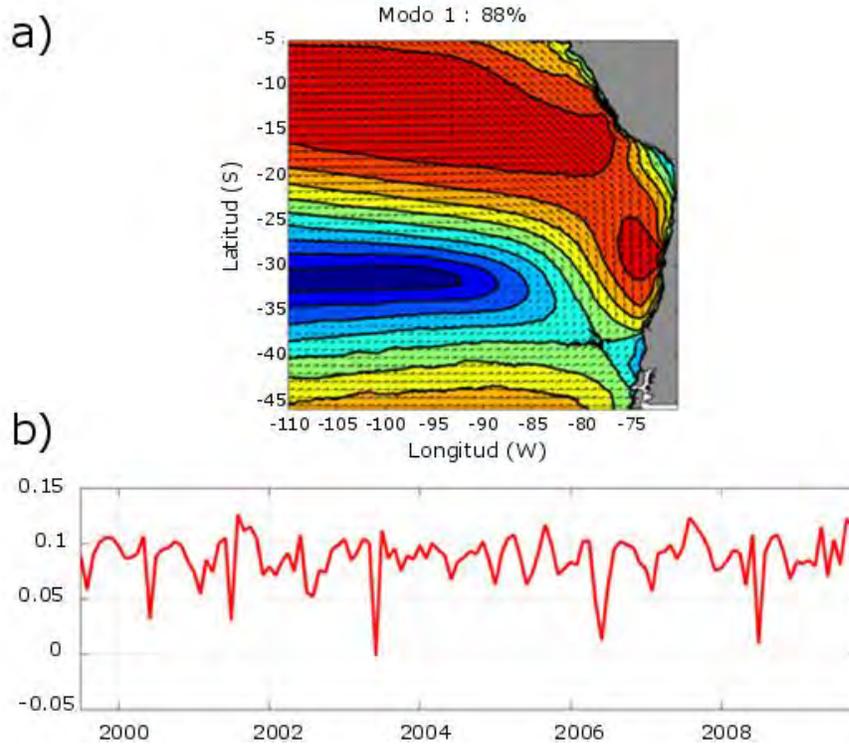


Figura A1-6. Funciones Empíricas Ortogonales Complejas del Esfuerzo del viento QuikSCAT. (a) Estructura espacial y (b) temporal del primer modo.

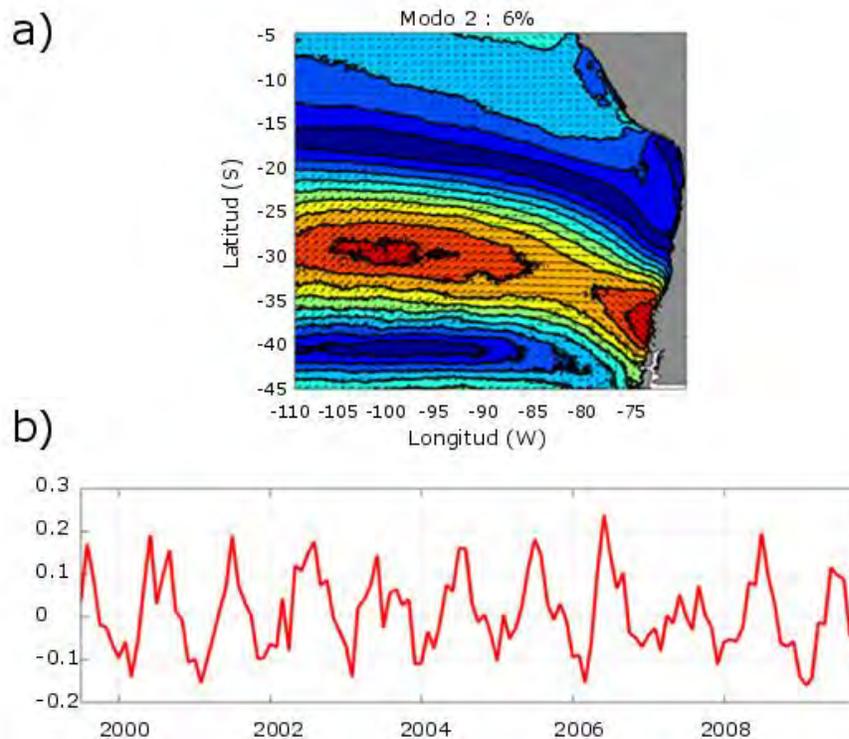


Figura A1-7. Funciones Empíricas Ortogonales Complejas del Esfuerzo del viento QuikSCAT. (a) Estructura espacial y (b) temporal del segundo modo.

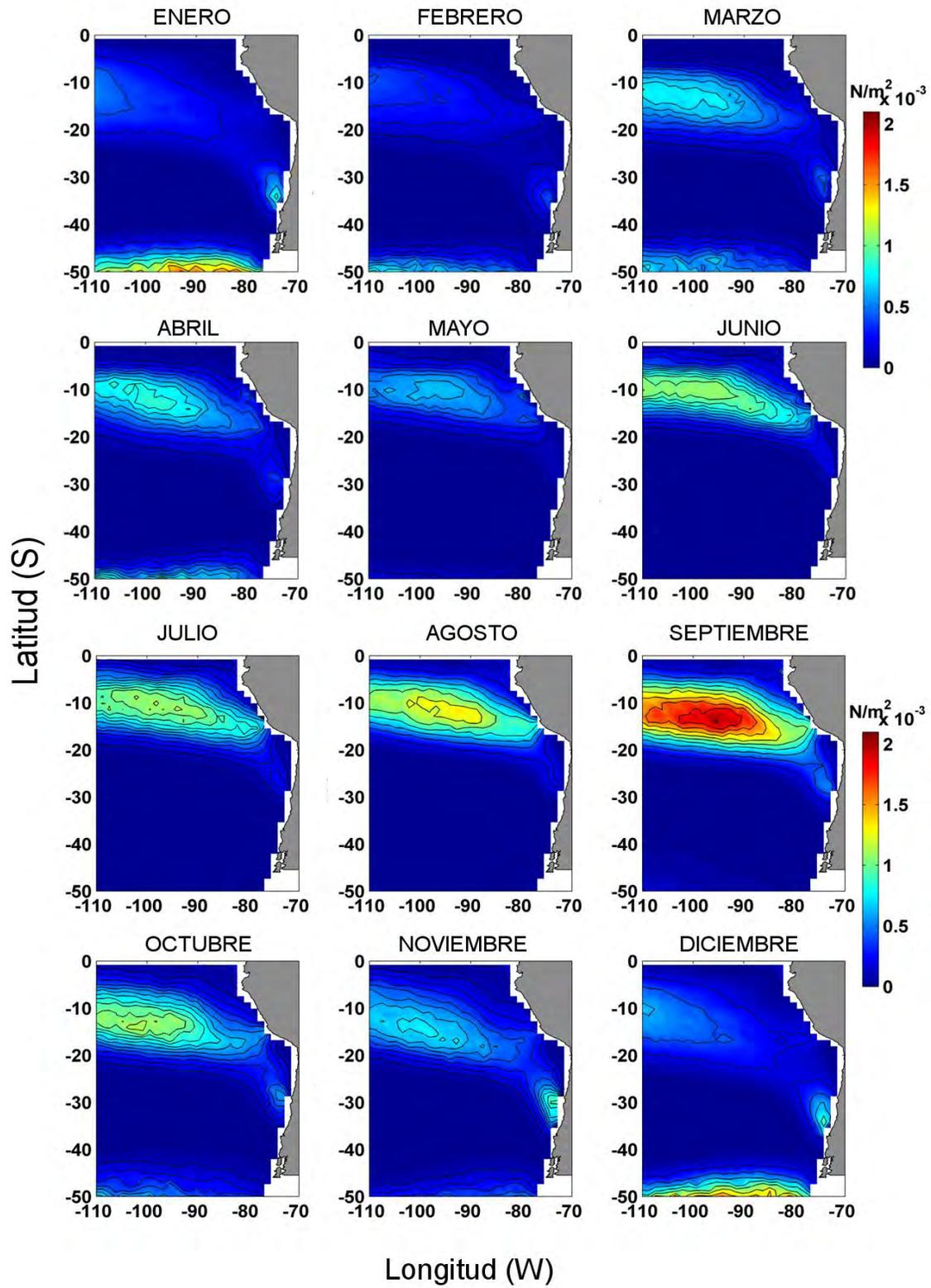


Figura A1-8. Climatología de la Turbulencia a partir del esfuerzo del viento en el área de estudio.

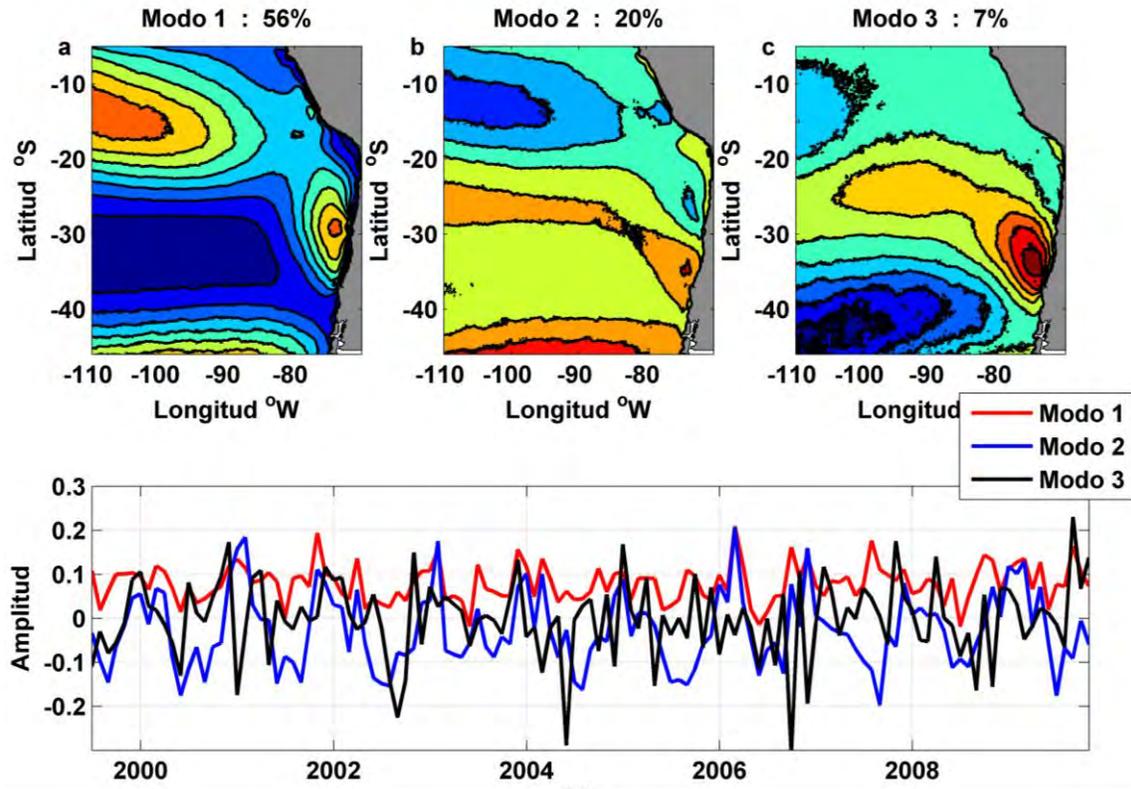


Figura A1-9. Funciones Empíricas Ortogonales de la Turbulencia. Estructuras espaciales (a) Modo 1, (b) Modo 2, (c) Modo 3 y (d) estructuras temporales de los tres modos.

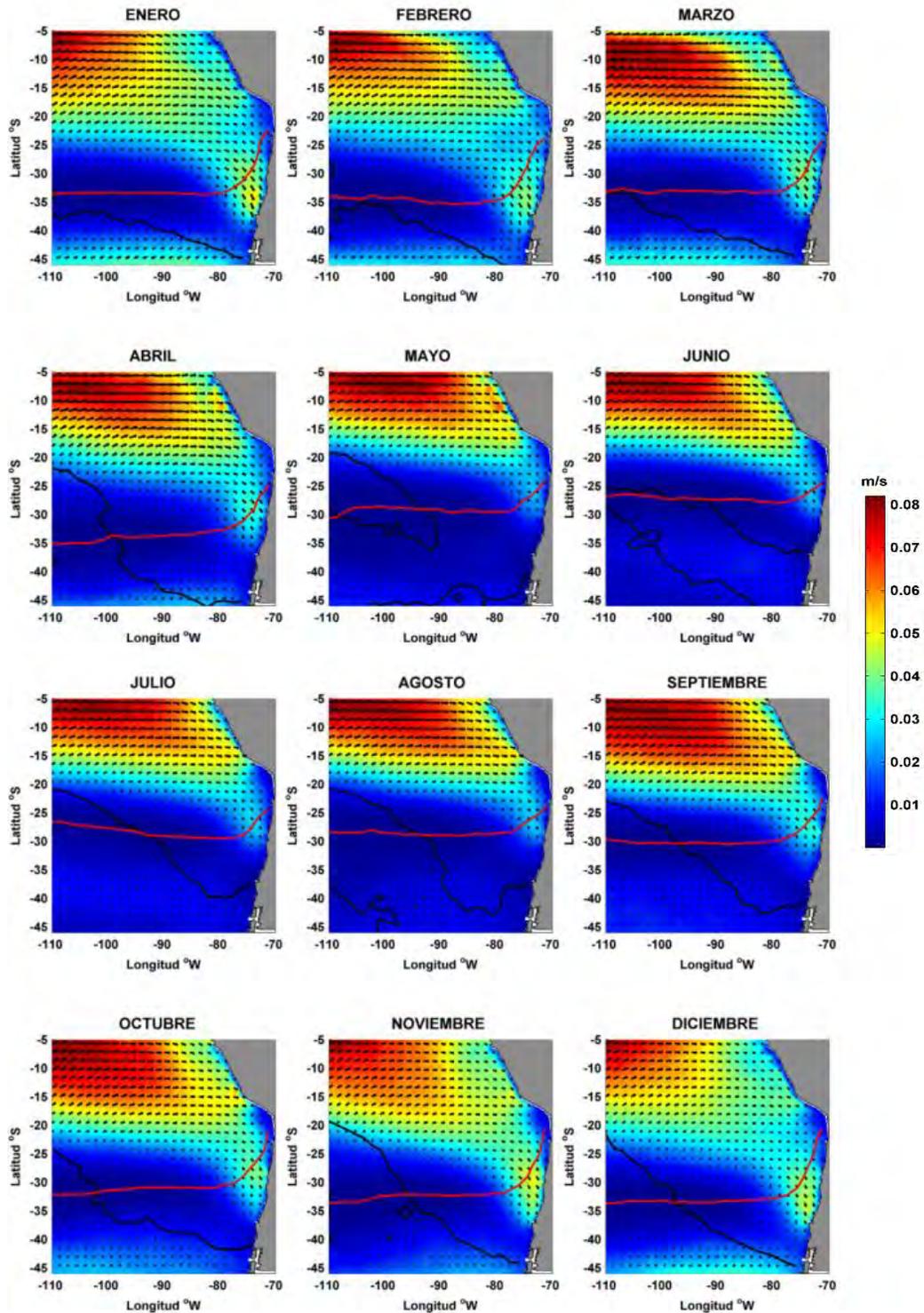


Figura A1-10. Climatología de la velocidad del transporte de Ekman en el estrato superficial.

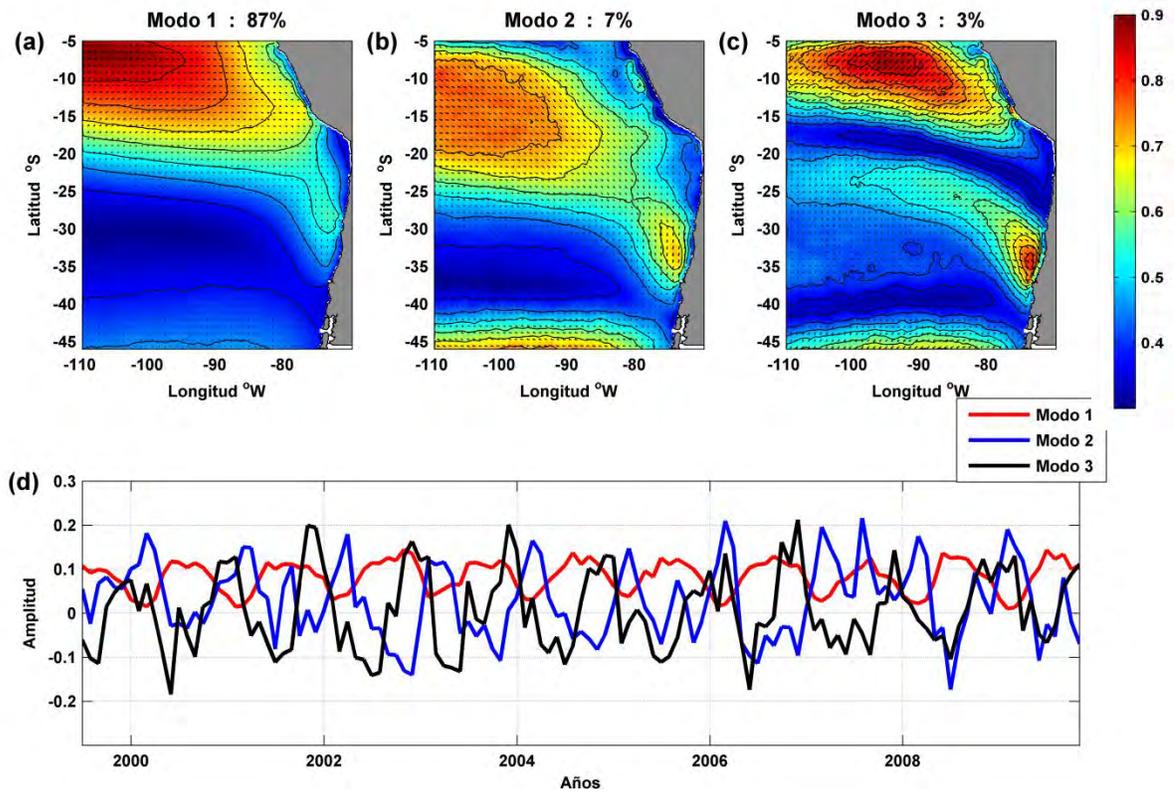


Figura A1-11. Funciones Empíricas Ortogonales Complejas de las velocidades del transporte de Ekman ( $z=0m$ ). Estructuras espaciales (a) Modo 1, (b) Modo 2, (c) Modo 3 y (d) estructuras temporales de los tres modos.

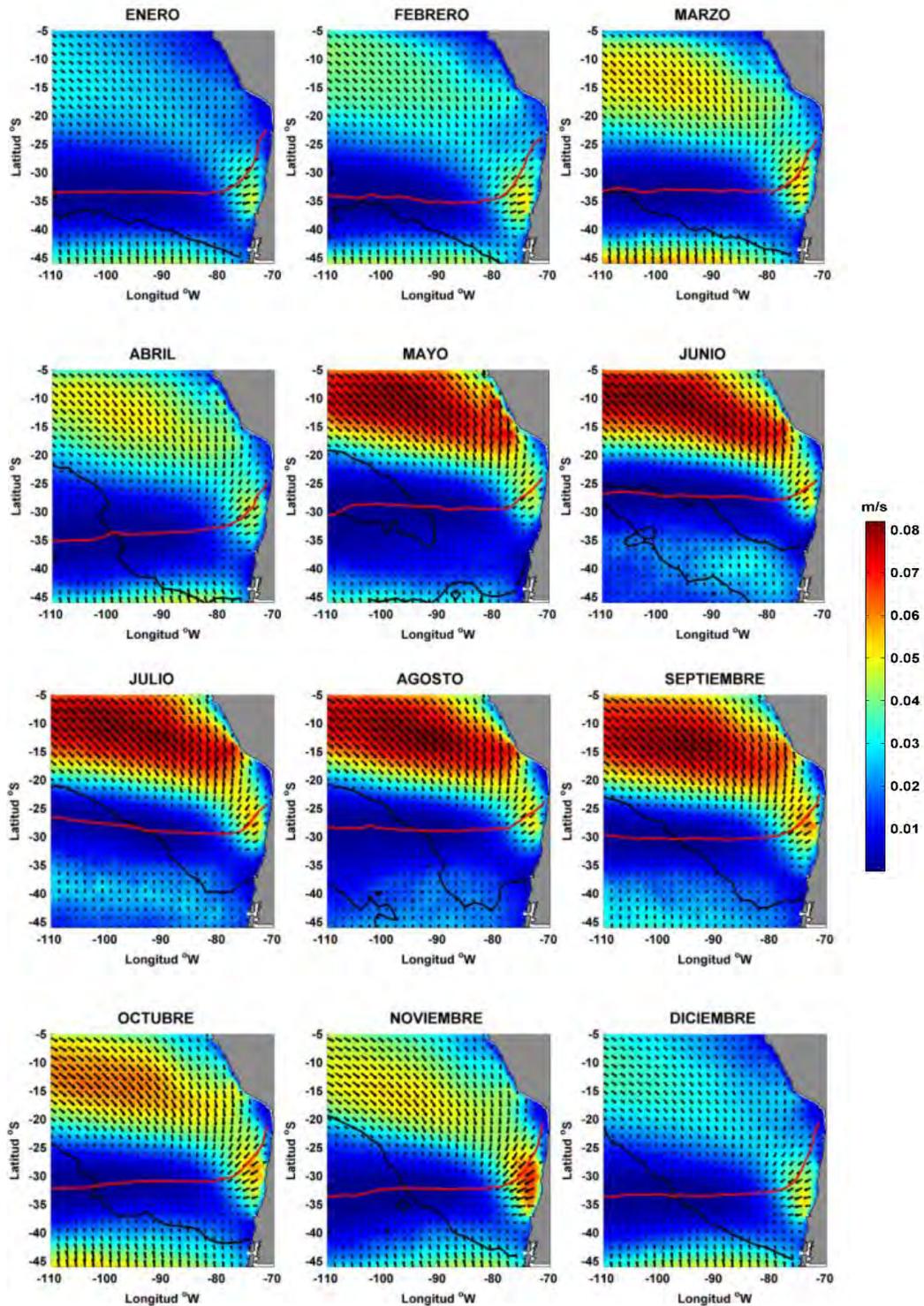


Figura A1-12. Climatología de la velocidad del transporte de Ekman en el estrato de 20 m de profundidad.

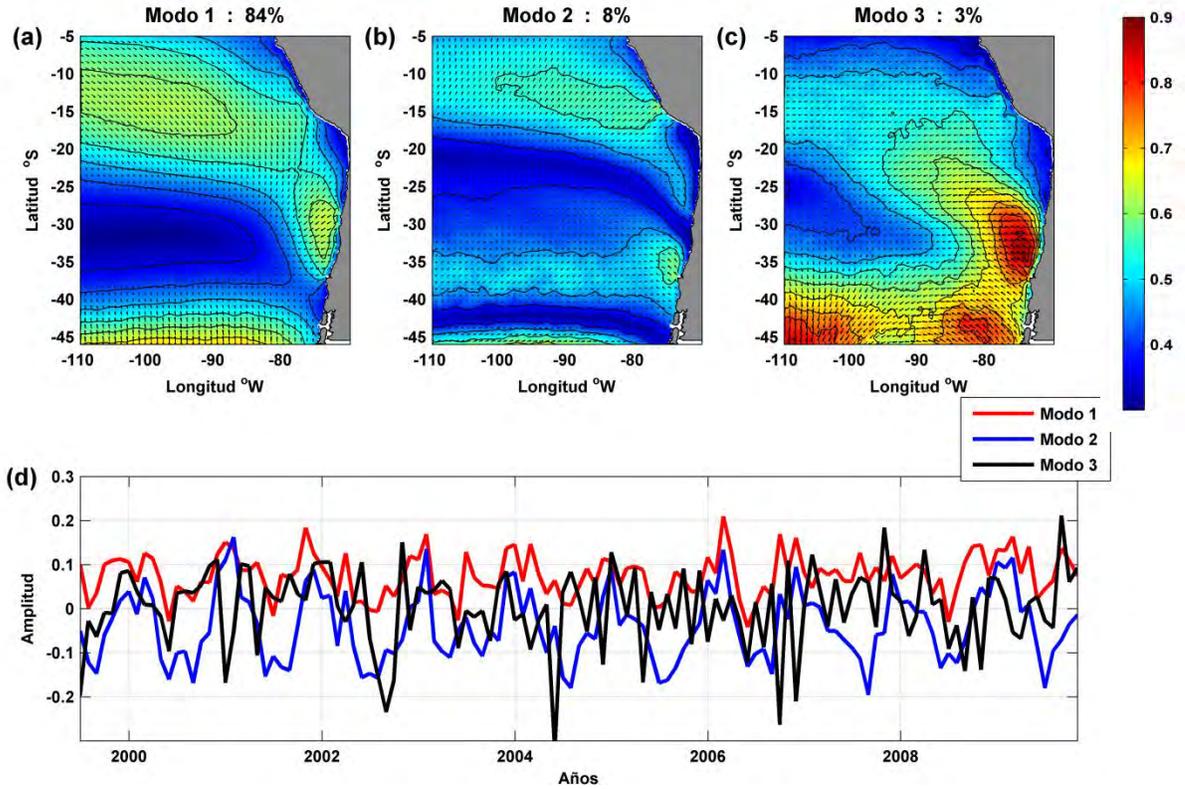


Figura A1-13. Funciones Empíricas Ortogonales Complejas de las velocidades del transporte de Ekman ( $z=20\text{m}$ ). Estructuras espaciales (a) Modo 1, (b) Modo 2, (c) Modo 3 y (d) estructuras temporales de los tres modos.

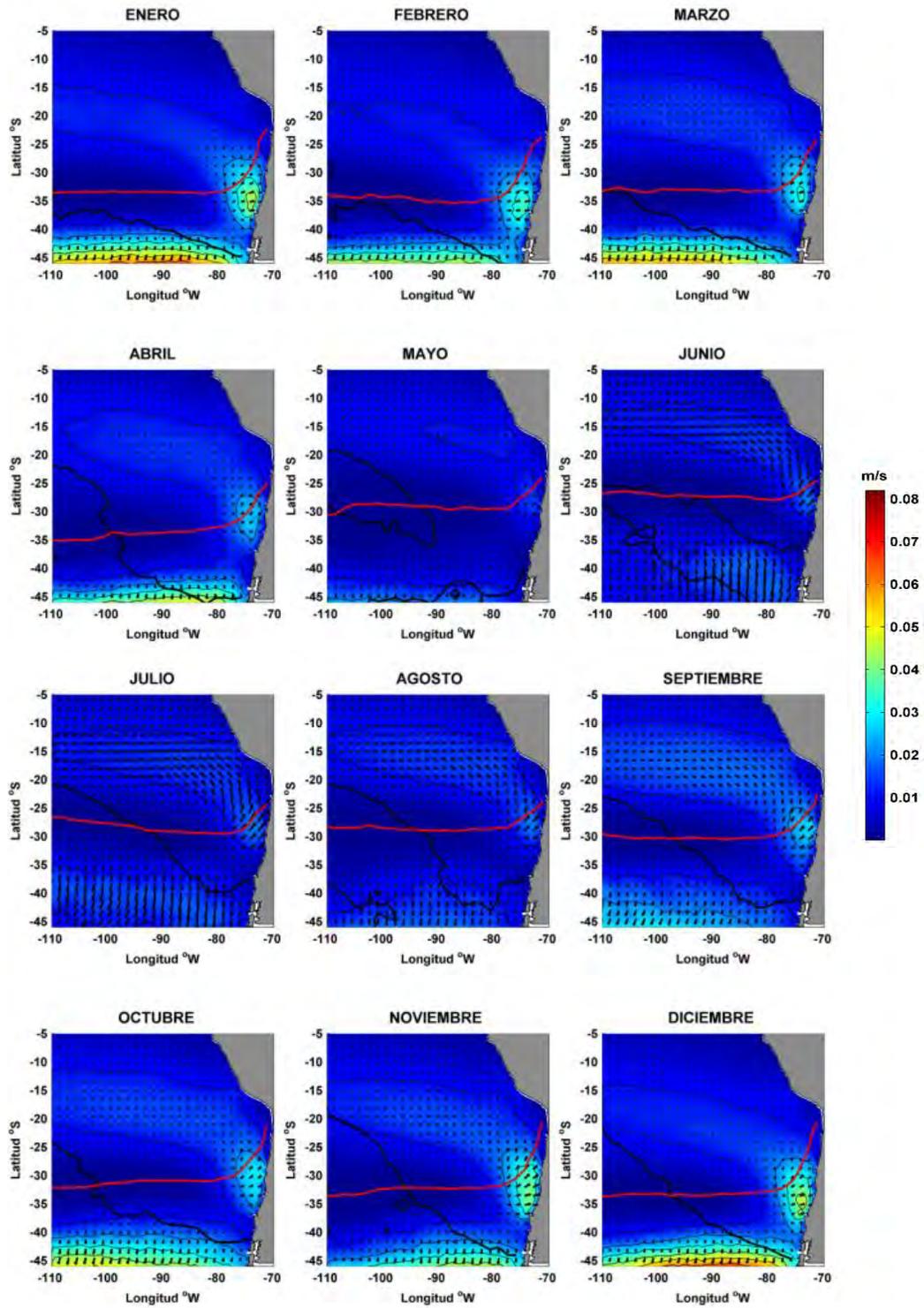


Figura A1-14. Climatología de la velocidad del transporte de Ekman en el estrato de 50 m de profundidad.

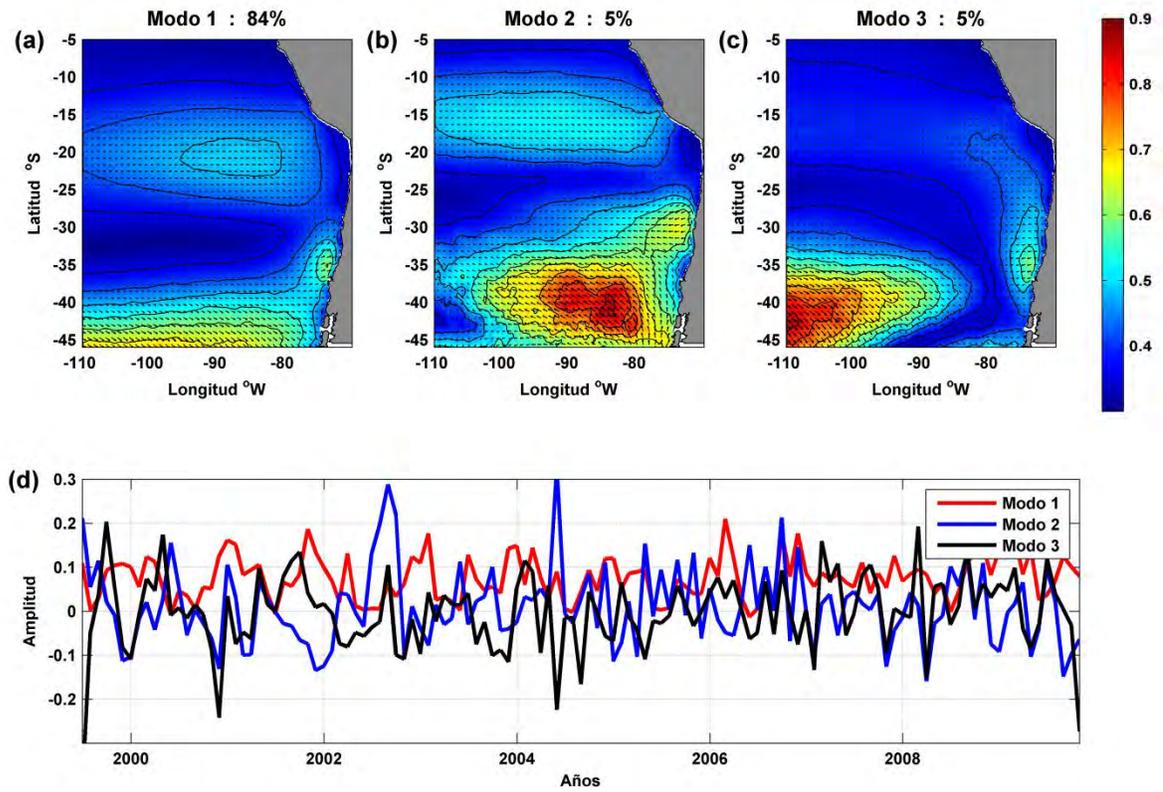


Figura A1-15. Funciones Empíricas Ortogonales Complejas de las velocidades del transporte de Ekman ( $z=50\text{m}$ ). Estructuras espaciales (a) Modo 1, (b) Modo 2, (c) Modo 3 y (d) estructuras temporales de los tres modos.

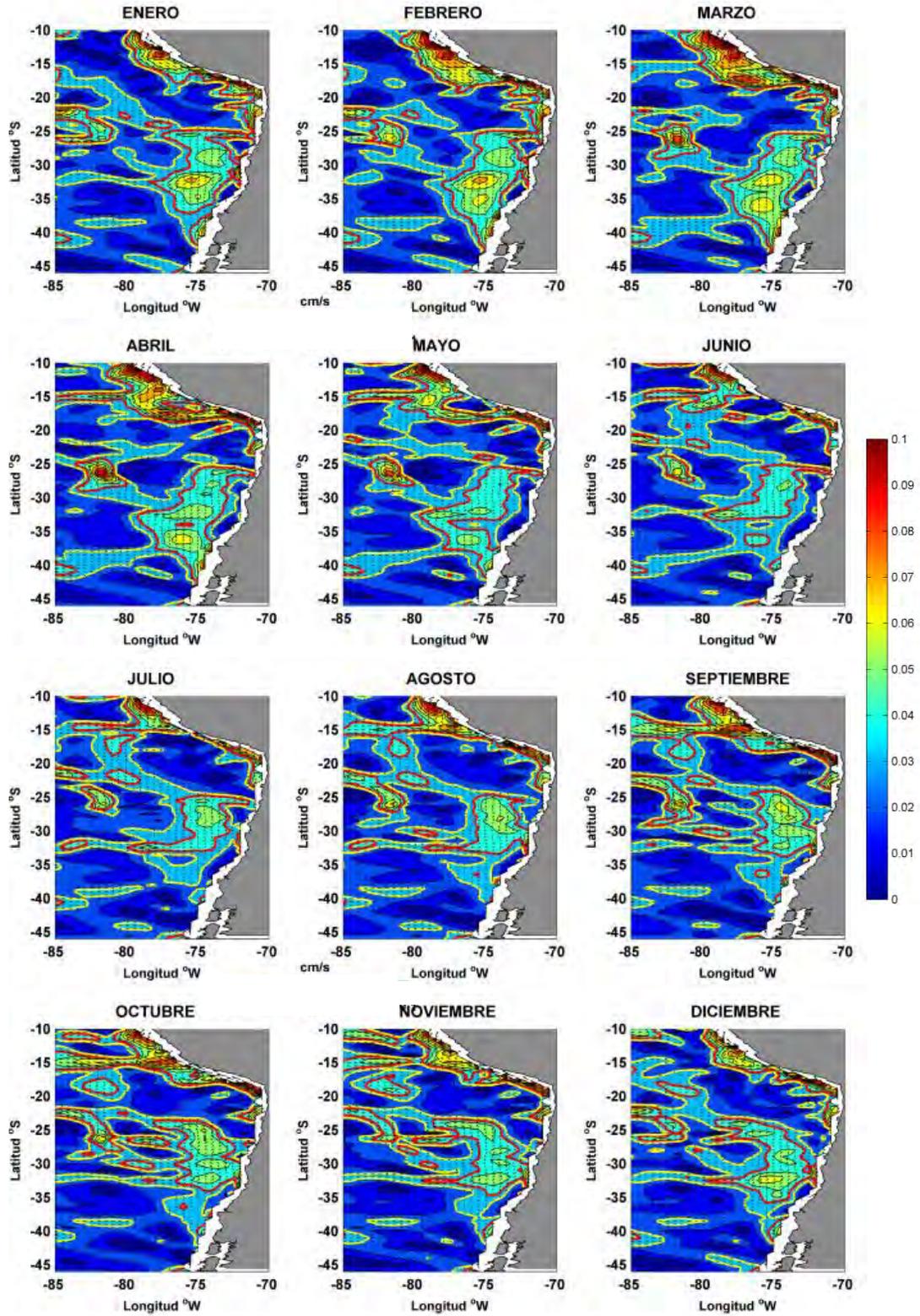


Figura A1-16. Climatología de velocidades geostróficas para el área de estudio, en el estrato superficial.

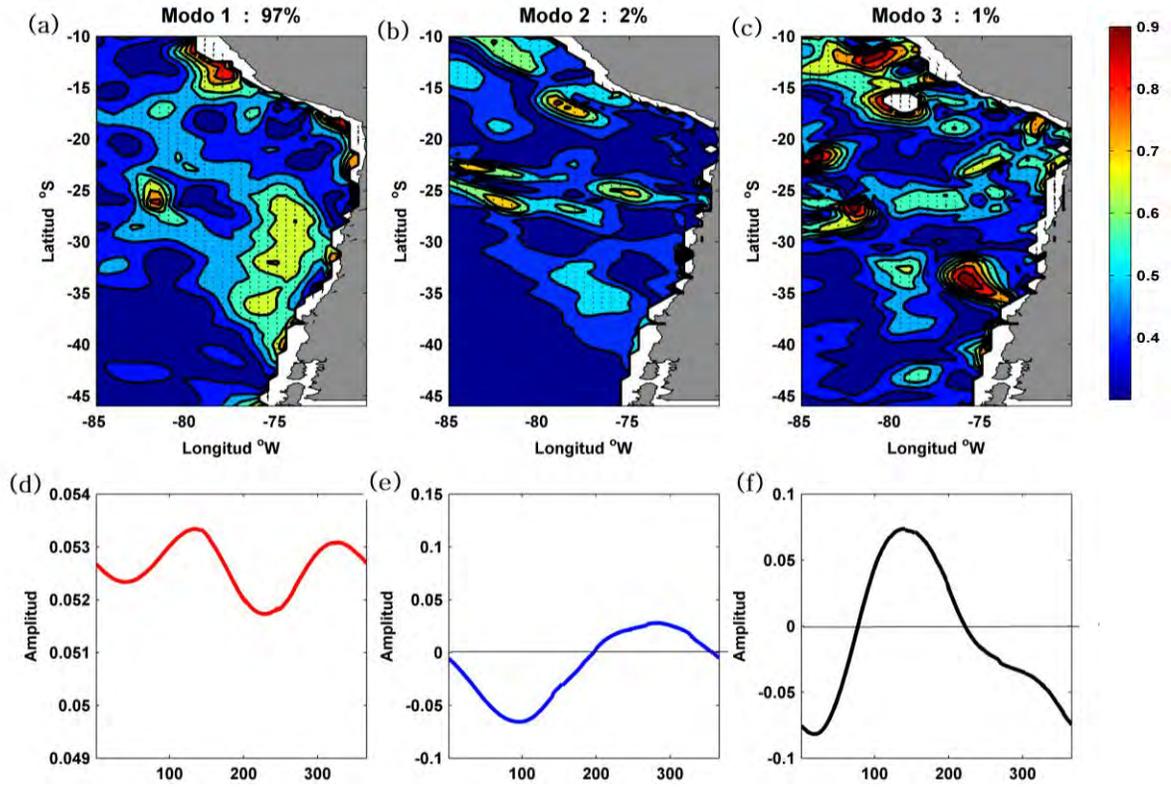


Figura A1-17. Funciones Empíricas Ortogonales Complejas de las velocidades geostróficas ( $z=0\text{m}$ ). Estructuras espaciales (a) Modo 1, (b) Modo 2, (c) Modo 3 y (d) estructuras temporales de los tres modos.

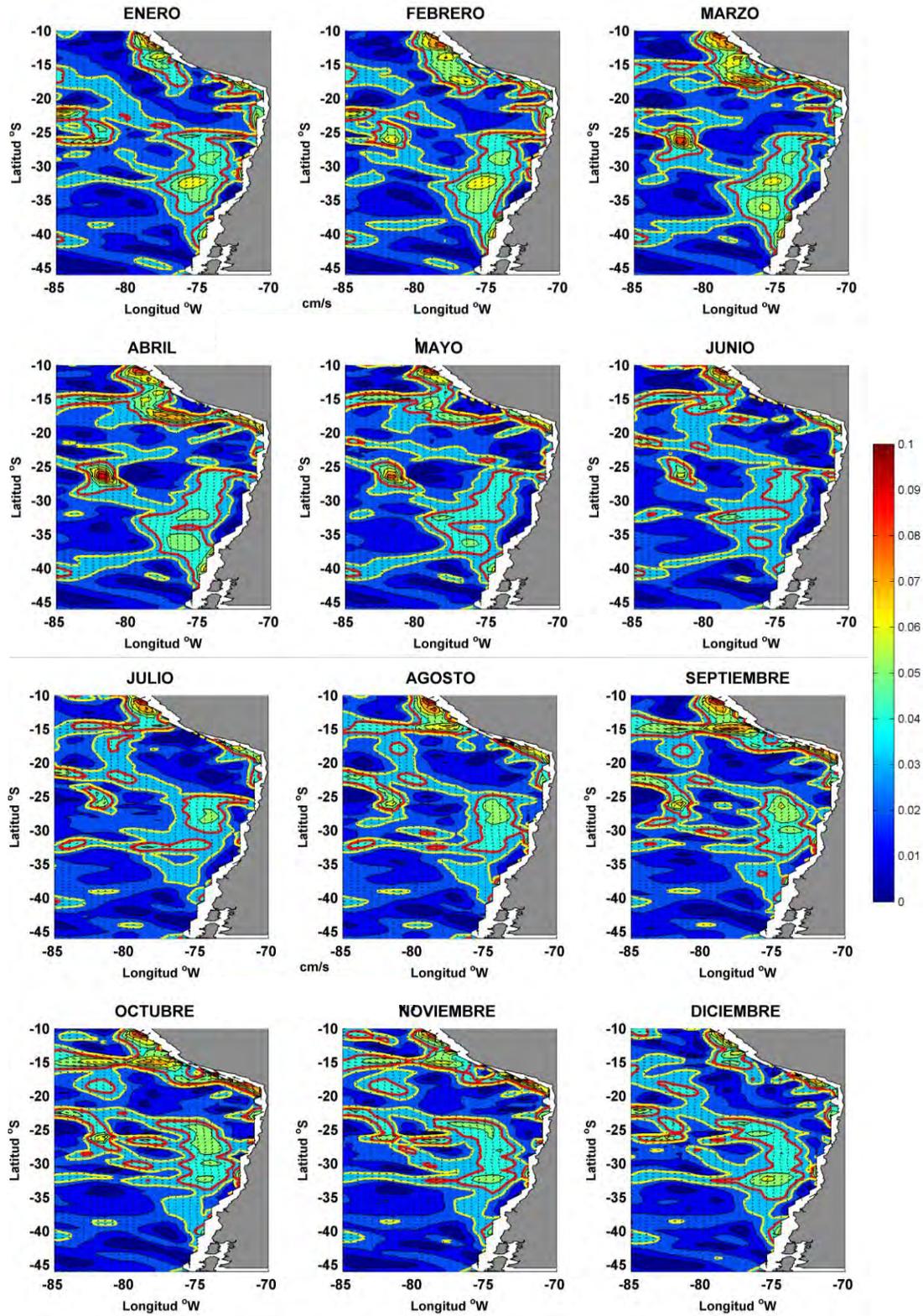


Figura A1-18. Climatología de velocidades geostróficas en el área de estudio para el estrato de 20 m de profundidad.

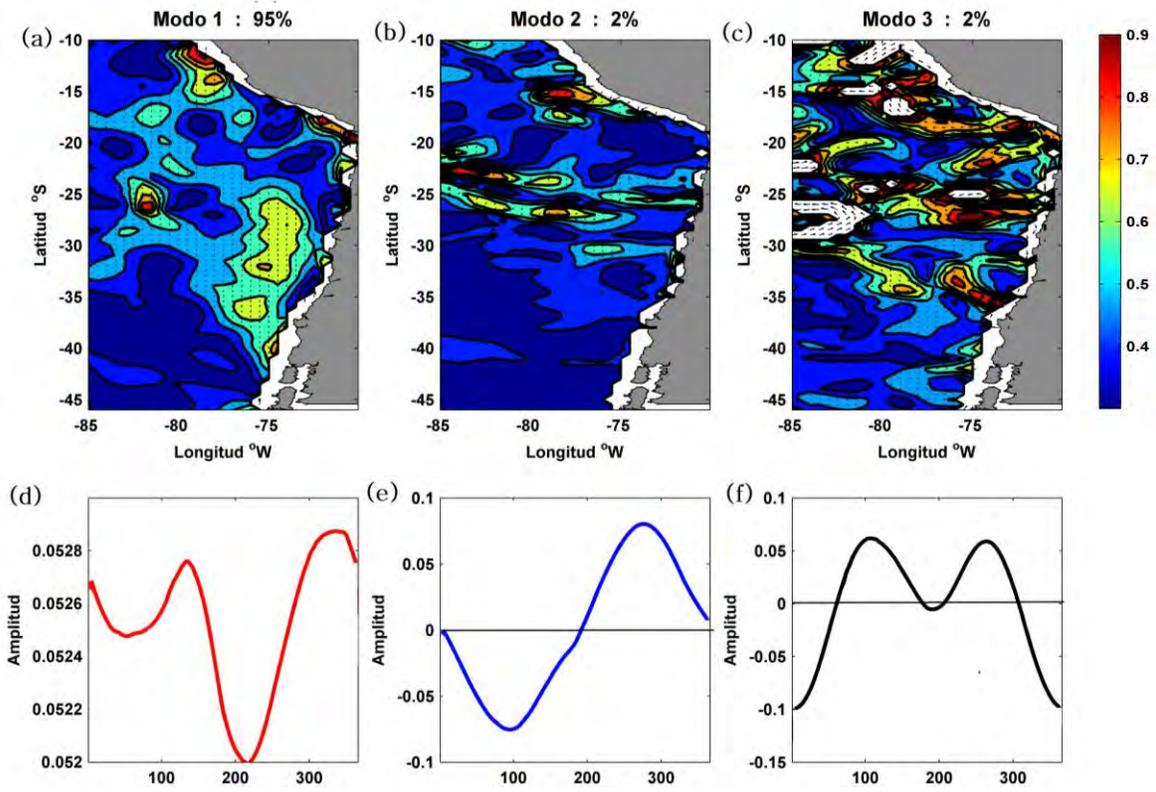


Figura A1-19. Funciones Empíricas Ortogonales Complejas de las velocidades geostróficas ( $z=20\text{m}$ ). Estructuras espaciales (a) Modo 1, (b) Modo 2, (c) Modo 3 y (d) estructuras temporales de los tres modos.

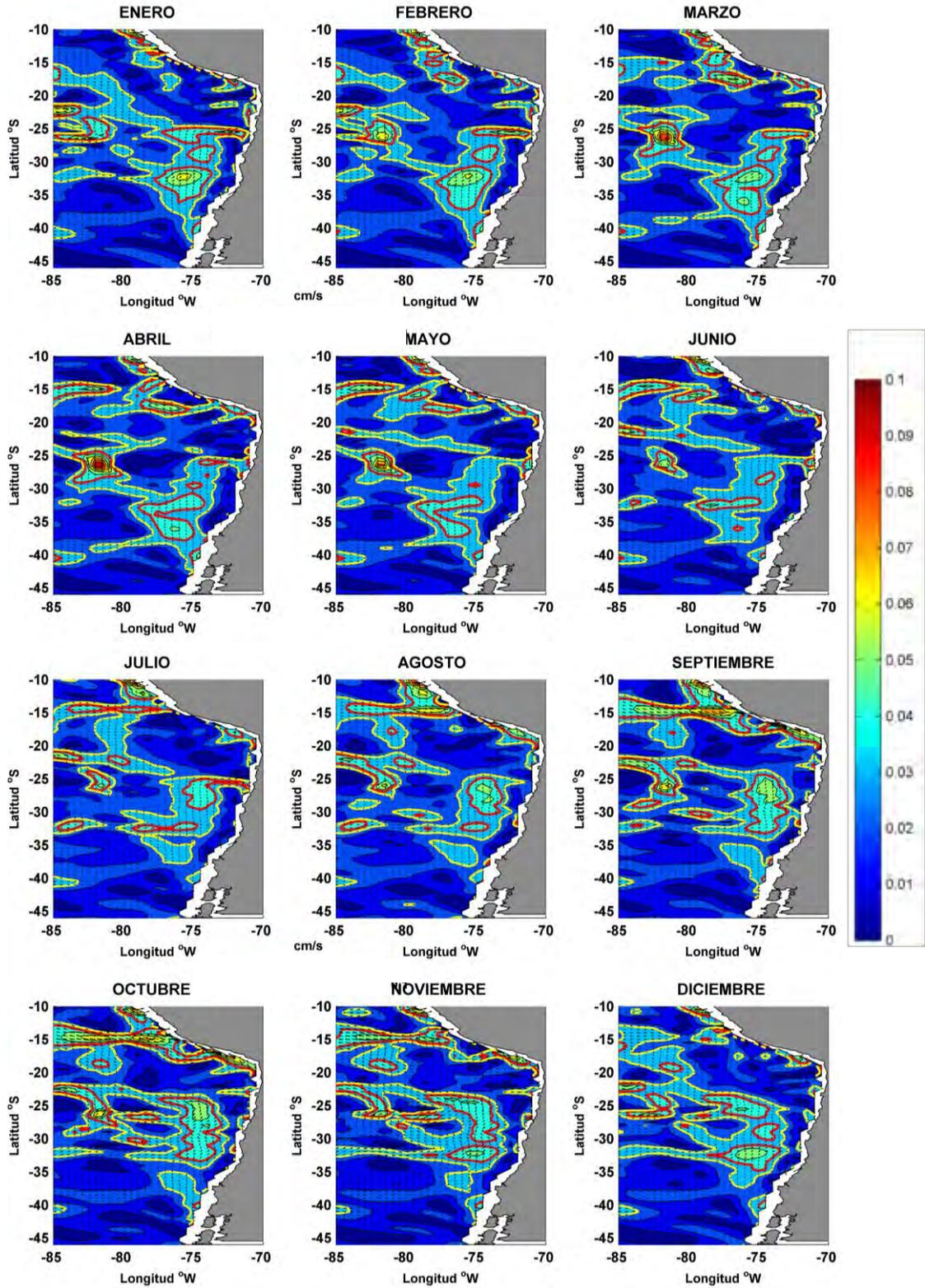


Figura A1-20. Climatología de velocidades geostróficas en el área de estudio para el estrato de 50 m de profundidad.

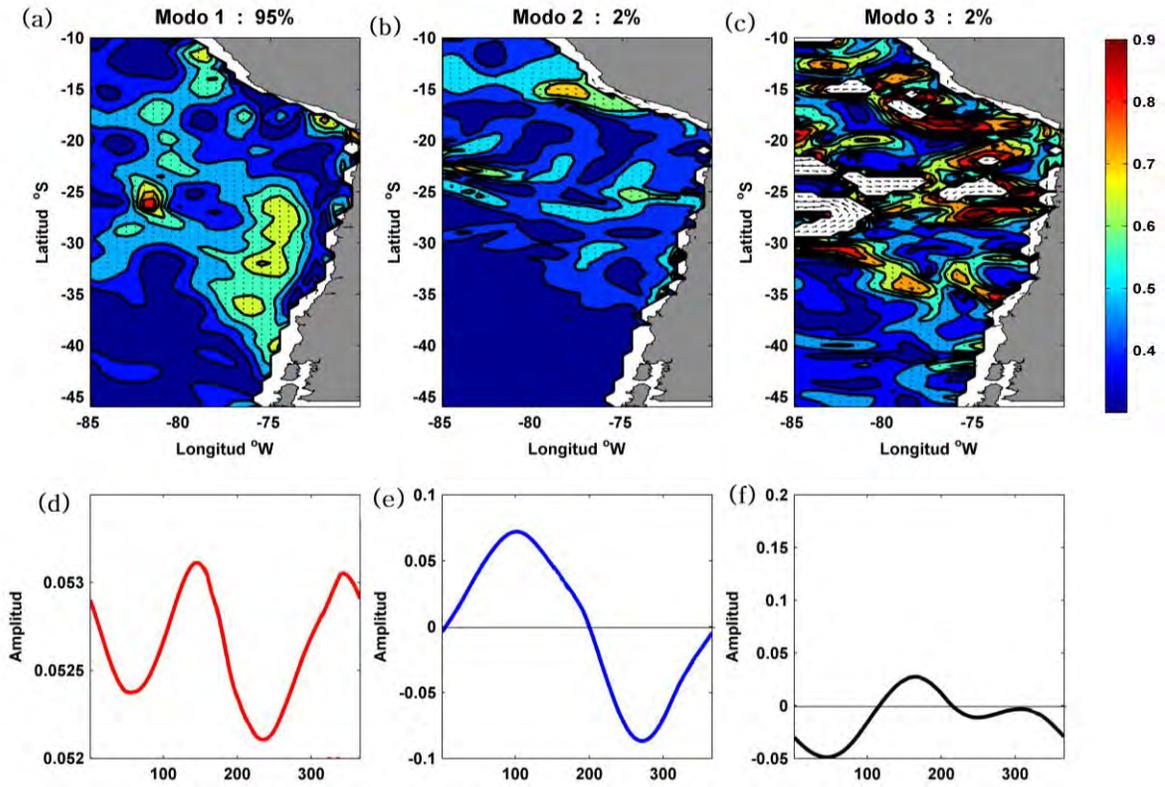


Figura A1-21. Funciones Empíricas Ortogonales Complejas de las velocidades geostróficas ( $z=50\text{m}$ ). Estructuras espaciales (a) Modo 1, (b) Modo 2, (c) Modo 3 y (d) estructuras temporales de los tres modos.

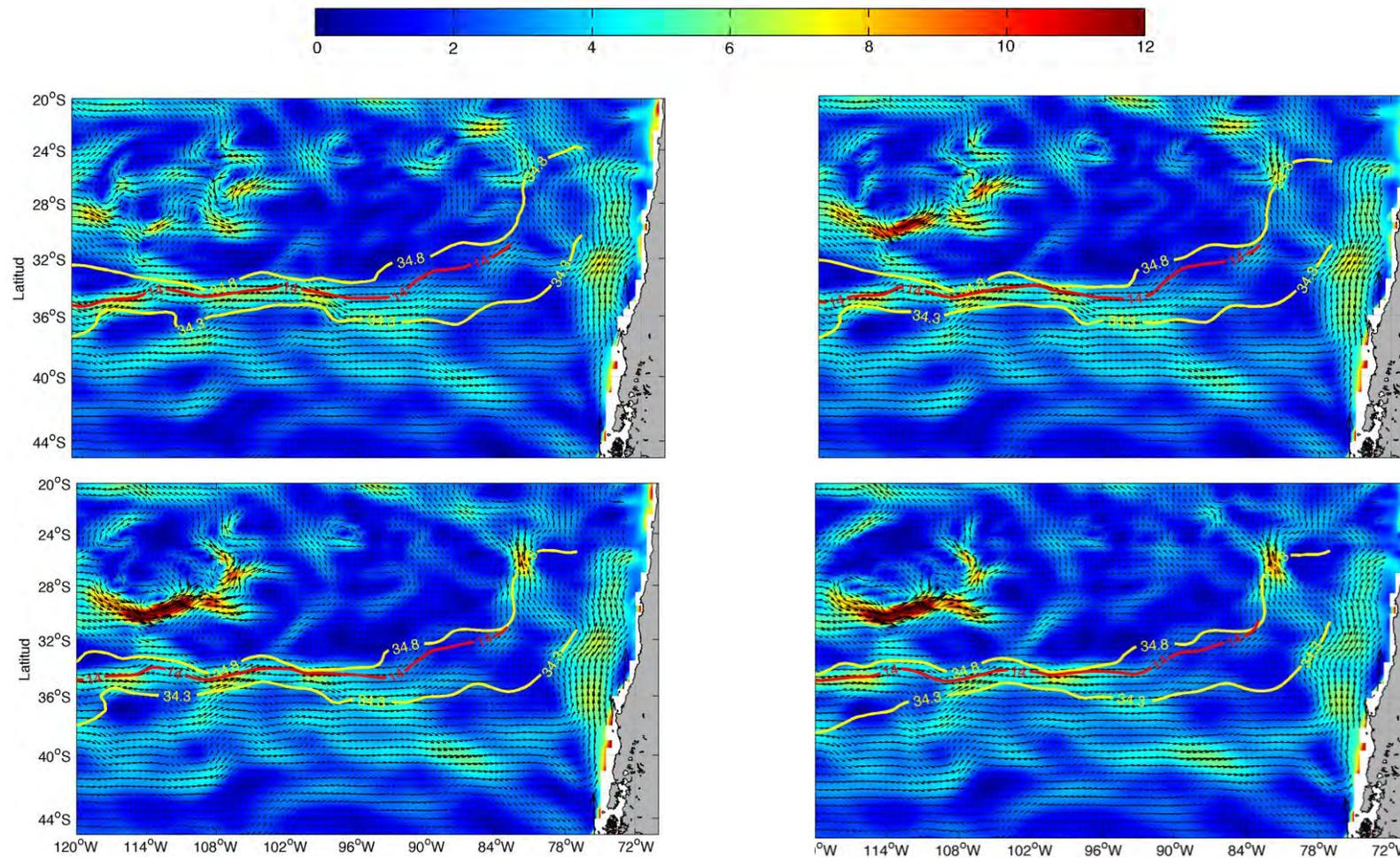


Figura A1-22. Climatología de las corrientes geostrófica ( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) superficiales en el PSO para enero (a), febrero (b), marzo (c) y abril (d). La línea de color rojo indica la isoterma de 14°C a 150 m de profundidad y las líneas de color amarillo indican las isohalinas de 34,3 y 34,8 (Fuente: CARS).

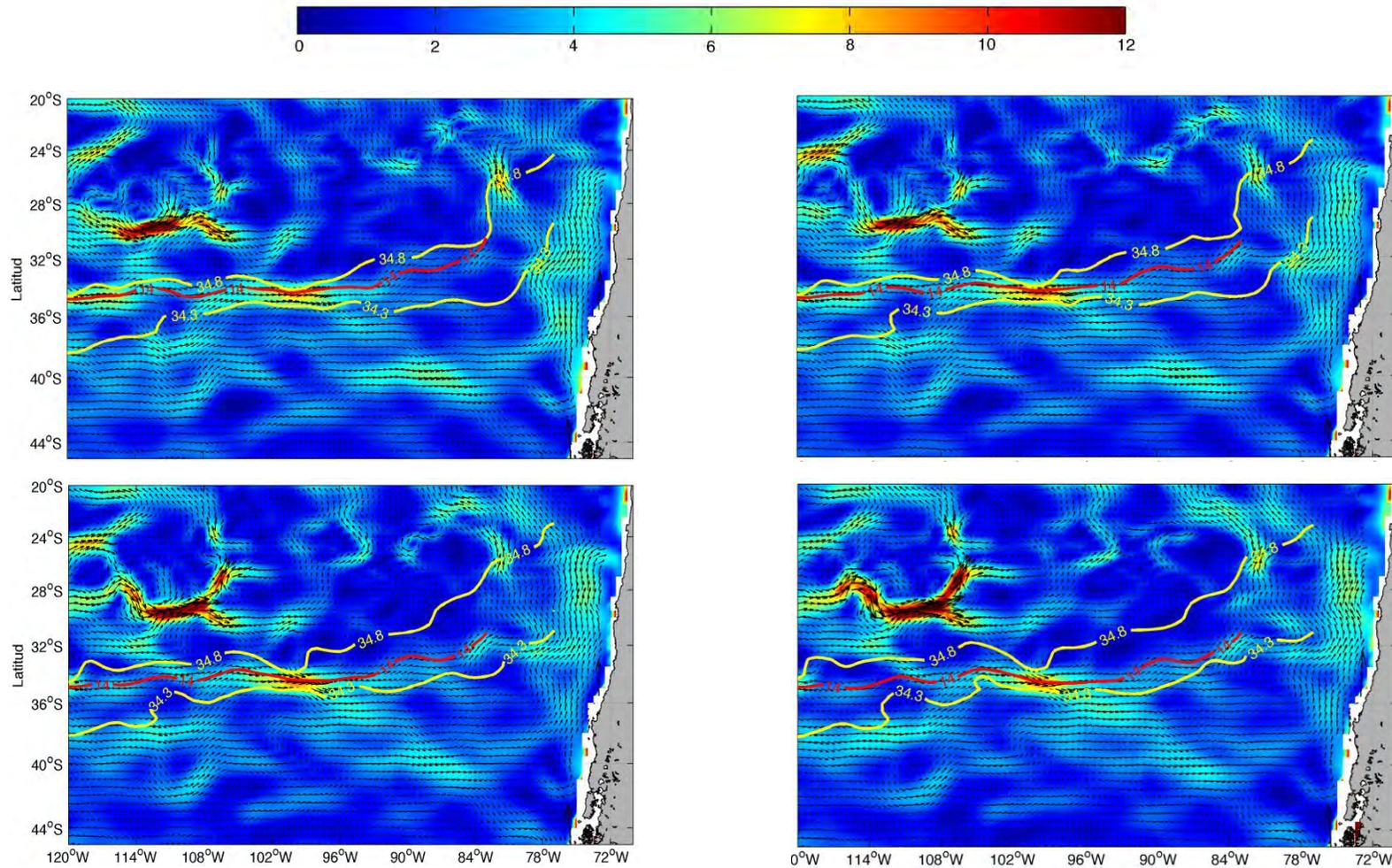


Figura A1-23. Climatología de las corrientes geostrofica ( $\text{cm s}^{-1}$ ) superficiales en el PSO mayo (a), junio (b), julio (c) y agosto (d). La línea de color rojo indica la isoterma de 14°C a 150 m de profundidad y las líneas de color amarillo indican las isohalinas de 34,3 y 34,8 (Fuente: CARS).

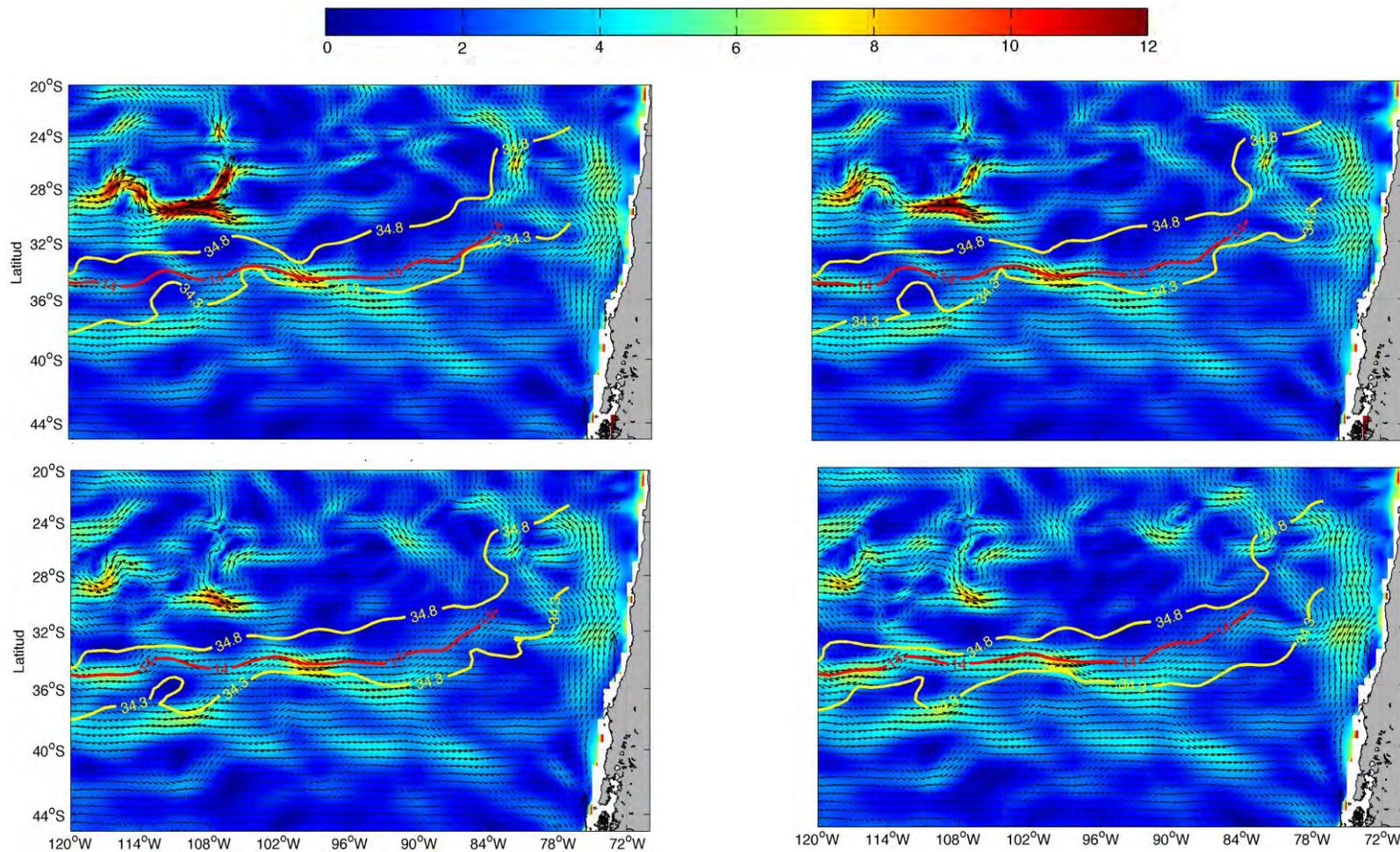


Figura A1-24. Climatología de las corrientes geostrofica ( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) superficiales en el PSO para septiembre (a), octubre (b), noviembre (c) y diciembre (d). La línea de color rojo indica la isoterma de  $14^{\circ}\text{C}$  a 150 m de profundidad y las líneas de color amarillo indican las isohalinas de 34,3 y 34,8 (Fuente: CARS).

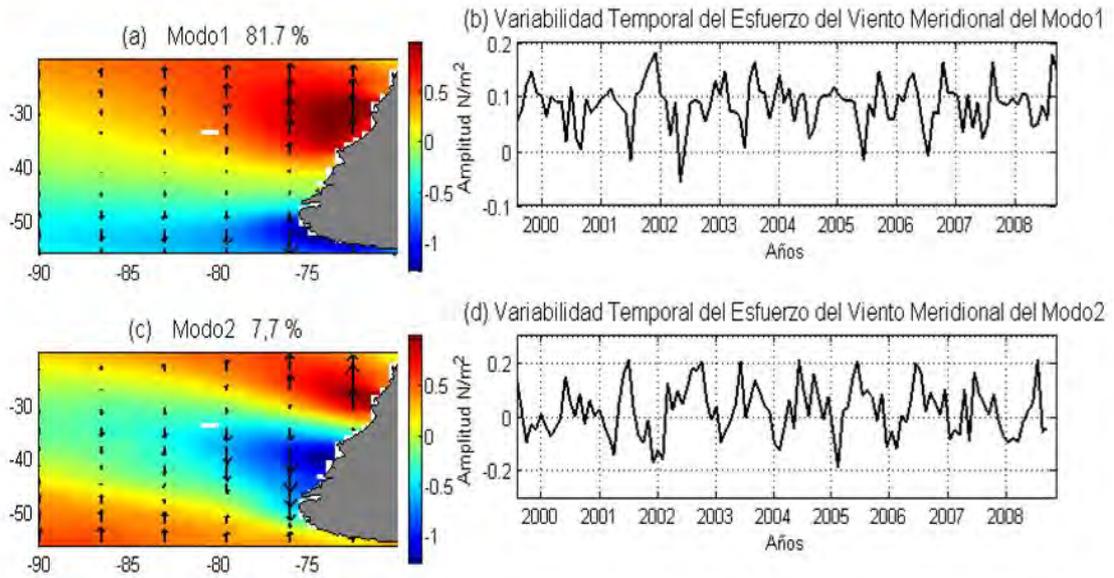


Figura A1-25. Funciones empíricas ortogonales para el esfuerzo del viento meridional, zona sur. Estructura espacial (a y c) y temporal (b y d) de los dos primeros modos.

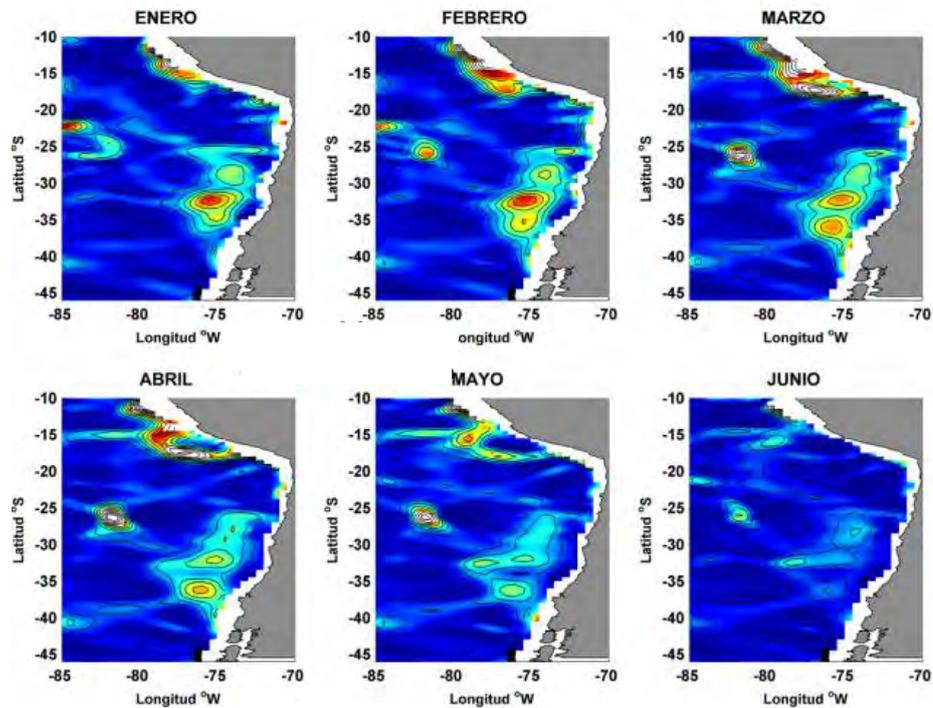


Figura A1-26. Climatología de la energía cinética asociada a remolinos de meso-escala en el sector oriental del Pacífico Sur.

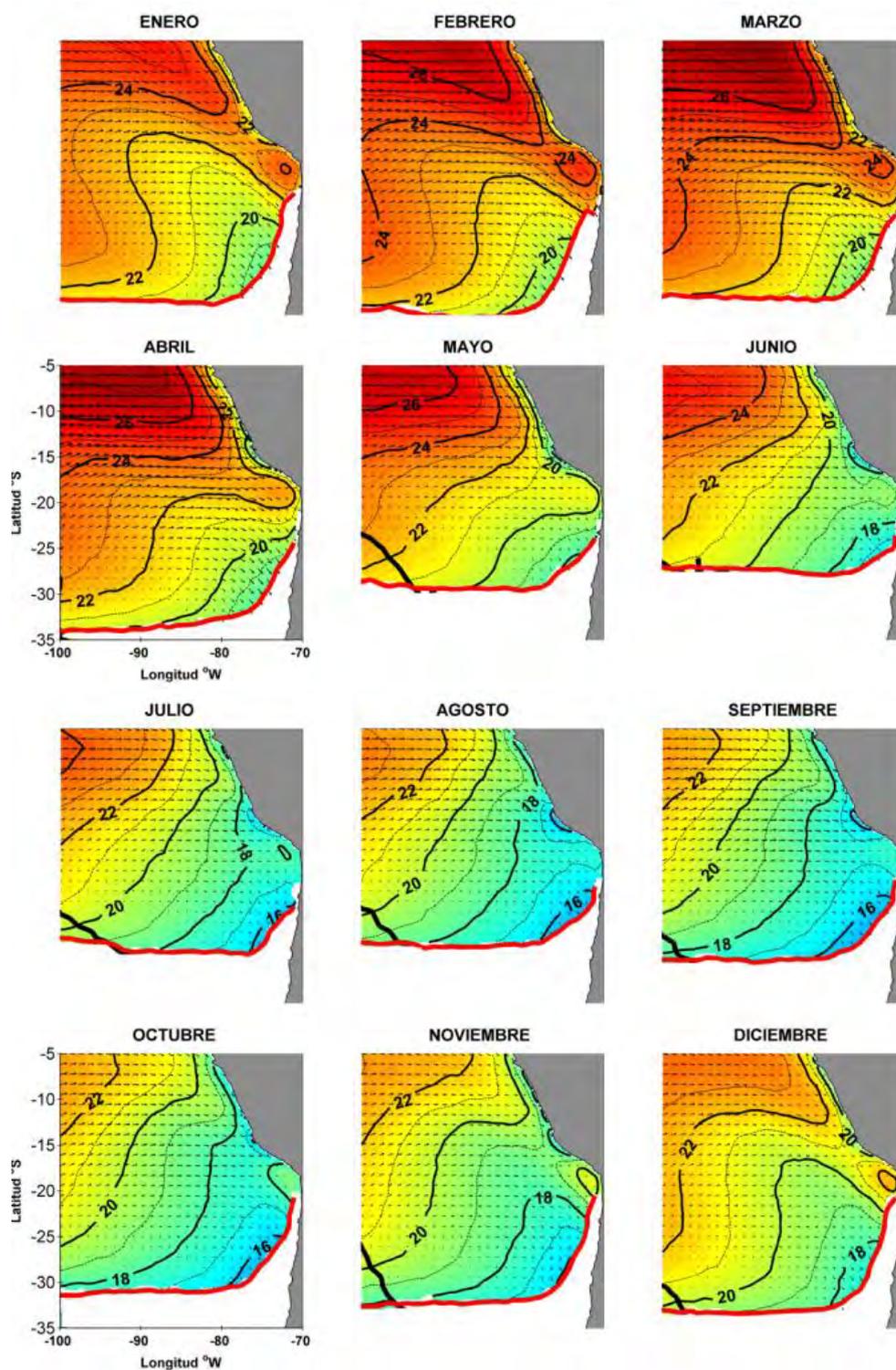


Figura A1-27. Distribución espacial de la temperatura superficial del mar y la velocidad del transporte de Ekman en la región costera y oceánica del norte de Chile y centro-sur de Perú (zona de curvatura).

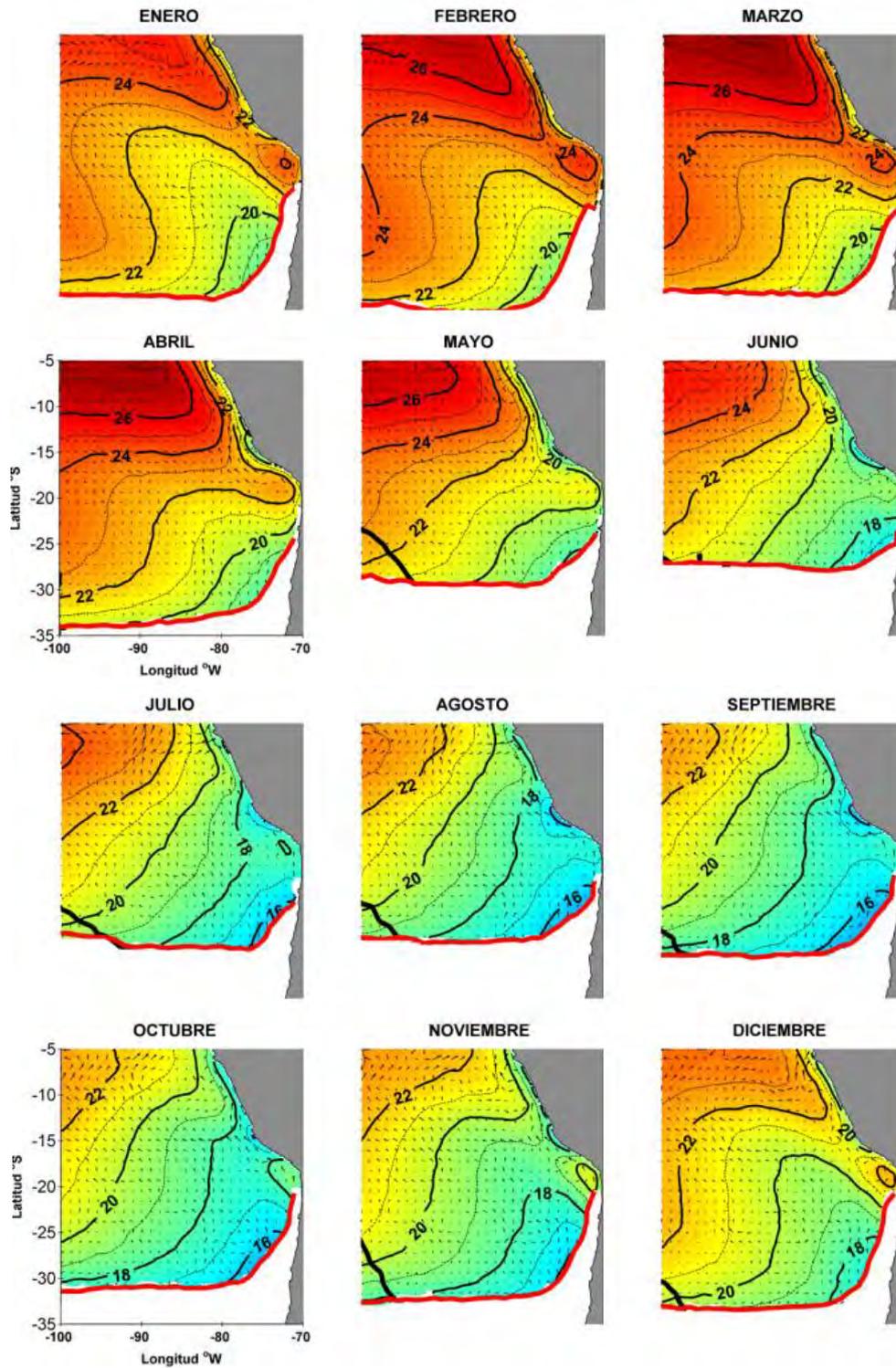


Figura A1-28. TSM versus Velocidad Geostróficas en la Zona de la curvatura y la costa del Perú.

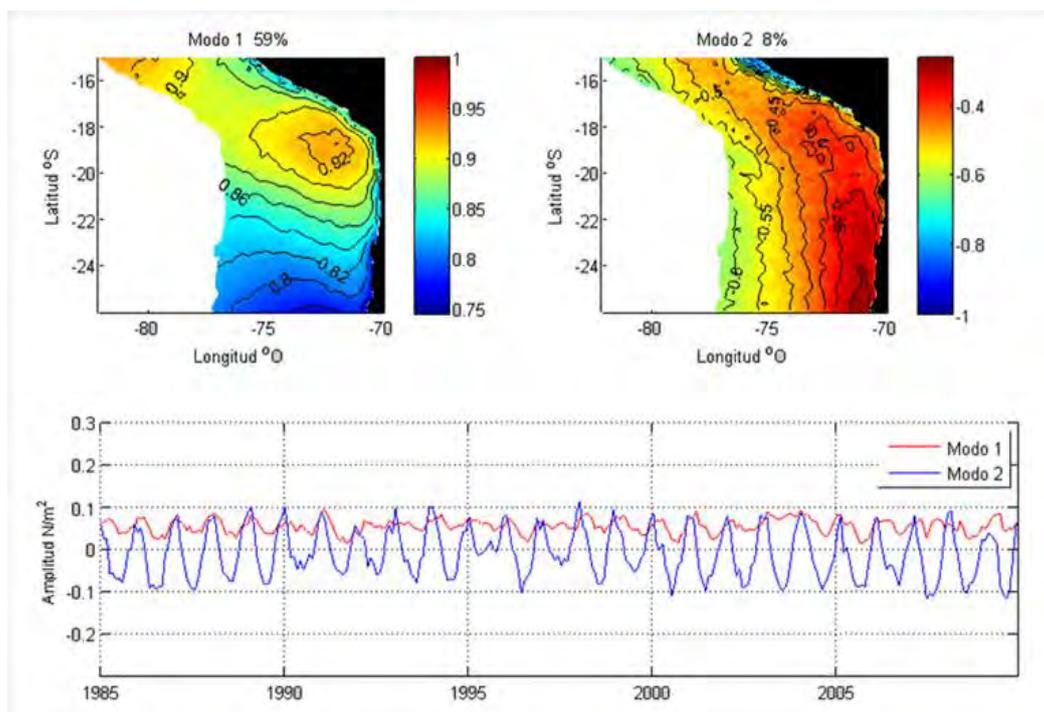


Figura A1-29. Funciones Empíricas Ortogonales aplicadas a las series [1985-2010] de la Temperatura Superficial del Mar. Estructura espacial para el primer (a) y segundo (b) modo, y temporal (c) de los dos primeros modos.

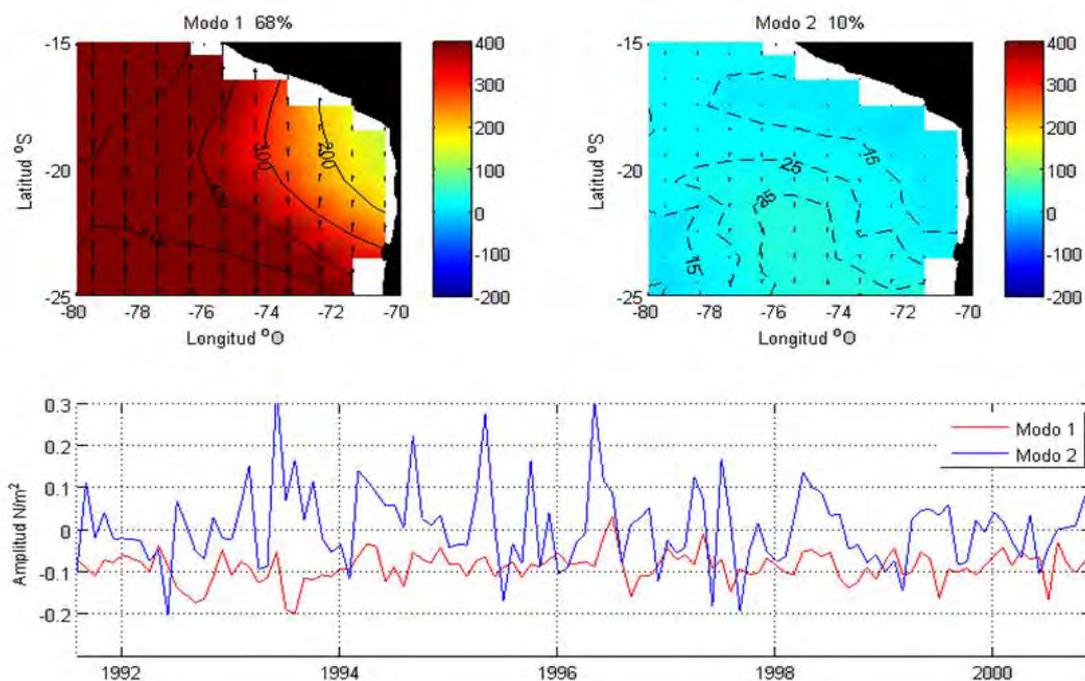


Figura A1-30. Funciones Empíricas Ortogonales aplicadas a las series [1991-2000] del esfuerzo del Viento Meridional de los satélites ERS1 y 2. (a) Estructuras superficiales y (b) temporales de los modo 1 y 2.

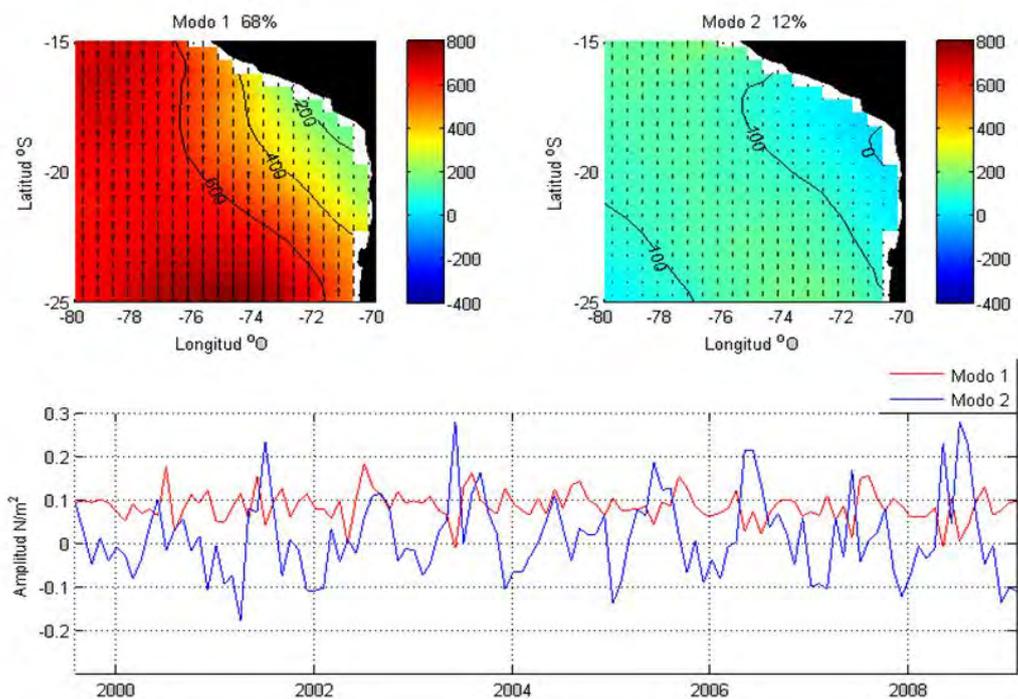


Figura A1-31. Funciones Empíricas Ortogonales aplicadas a las series [1999-2009] del esfuerzo del Viento Meridional de satélites QuikSCAT. (a) Estructuras superficiales y (b) temporales de los modo 1 y 2.

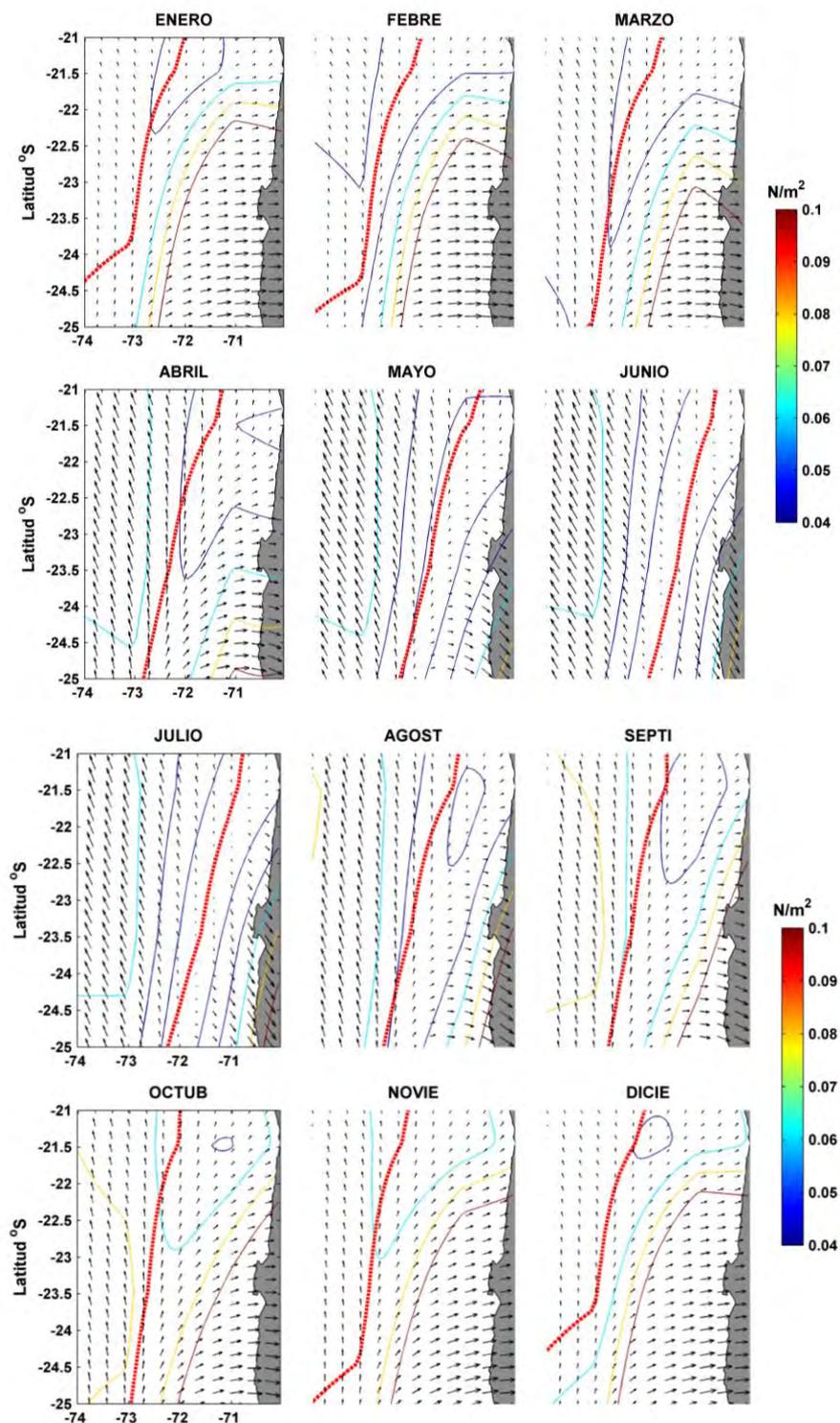


Figura A1-32. Climatología del esfuerzo del viento meridional y zonal entre los 21°S y los 25°S (zona costera). Los contornos de colores son las magnitudes del esfuerzo del viento y el contorno negro es el esfuerzo del viento zonal de magnitud cero.

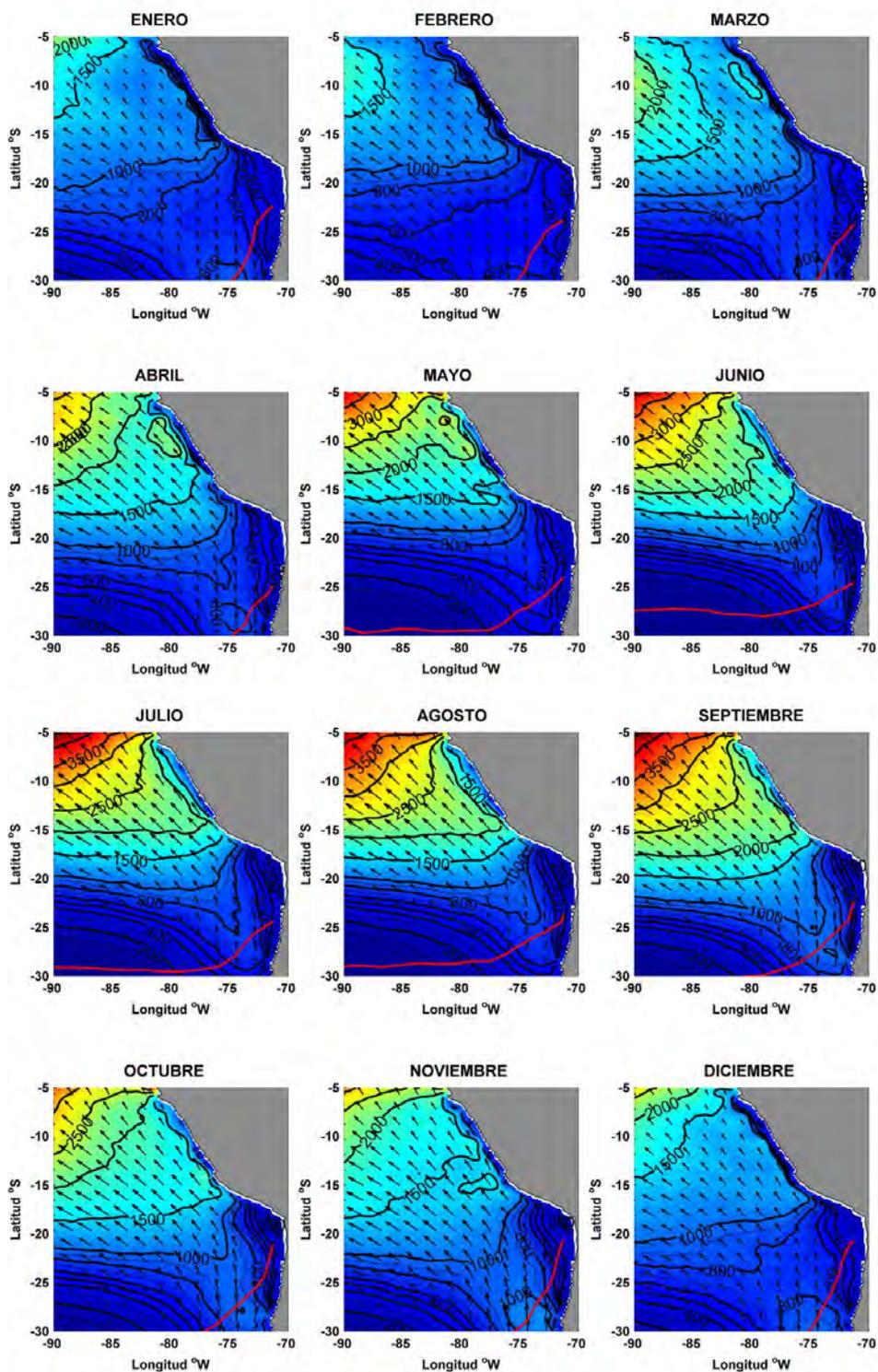


Figura A1-33. Climatología del transporte de Ekman ( $m^2/s$ ) en el sector costero del norte de Chile y centro-sur de Perú.

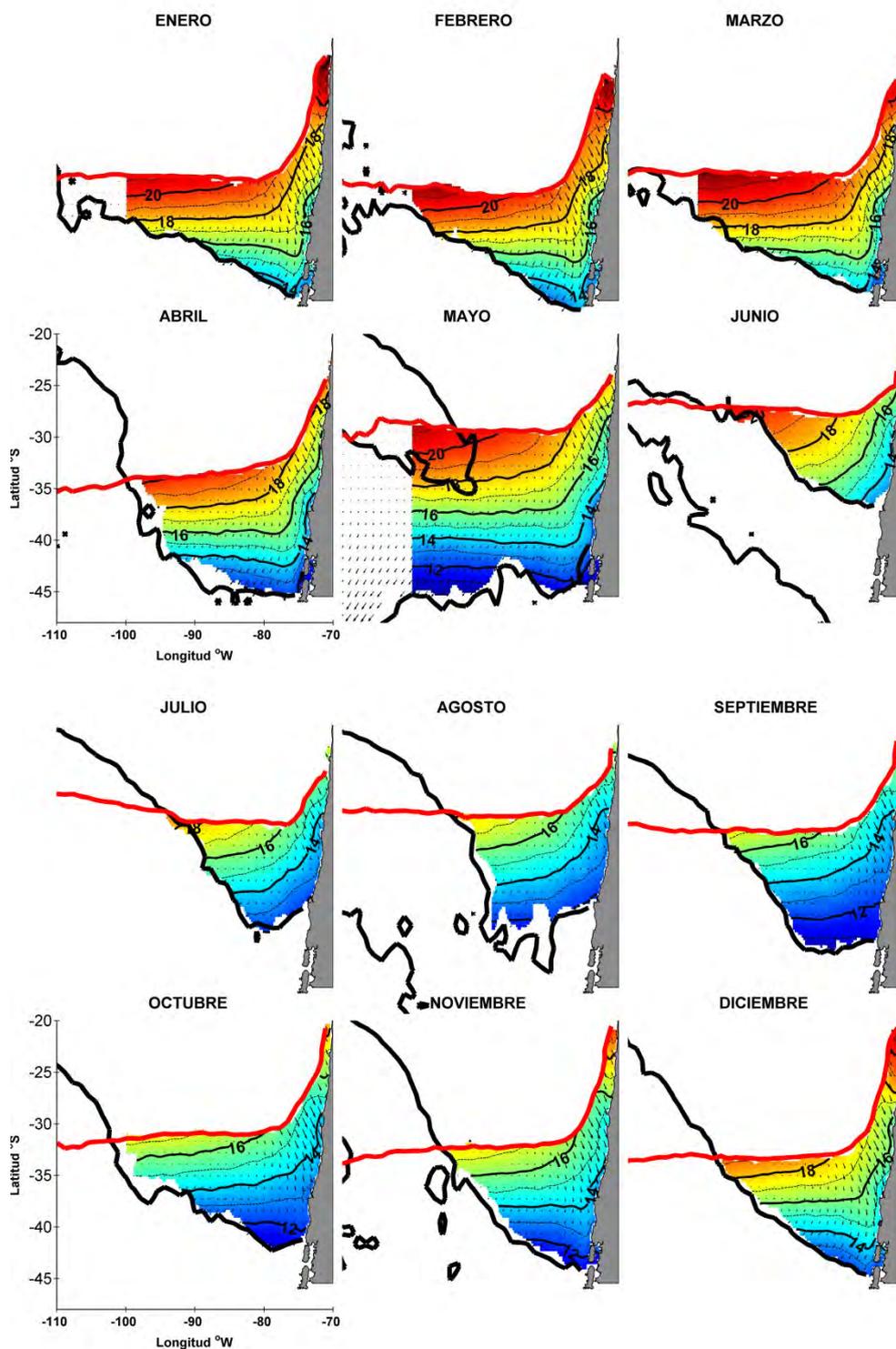


Figura A1-34. Distribución espacial de la temperatura superficial del mar en conjunto con la velocidad del transporte de Ekman en la región oceánica de desove principal de jurel, frente a Chile central (entre isolíneas de Tau-0, meridional y zonal).

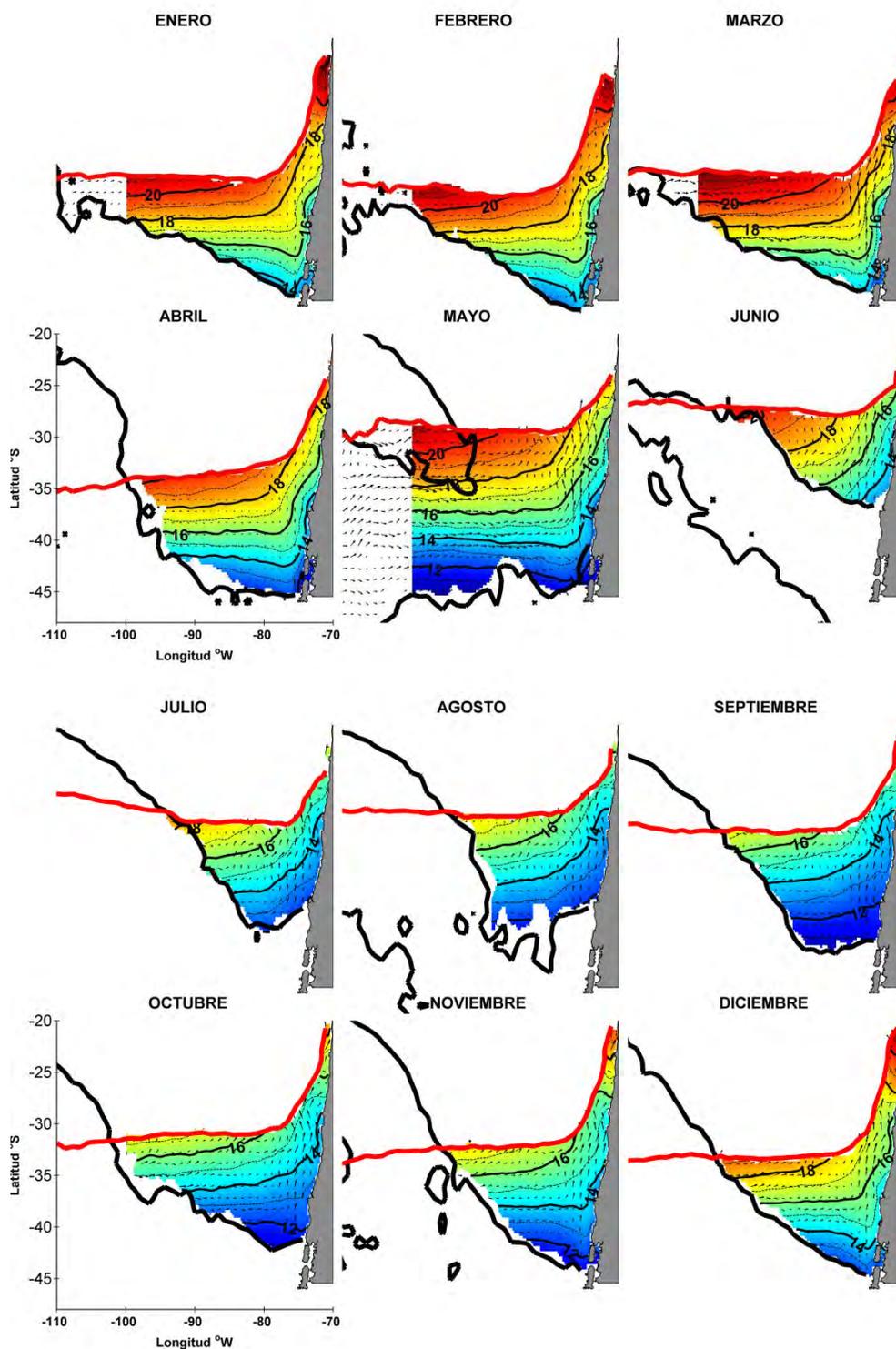


Figura A1-35. Distribución espacial de la temperatura superficial del mar en conjunto con la velocidad geostrófica en la región oceánica de desove principal de jurel, frente a Chile central (entre isóneas de  $\tau=0$ , meridional y zonal).

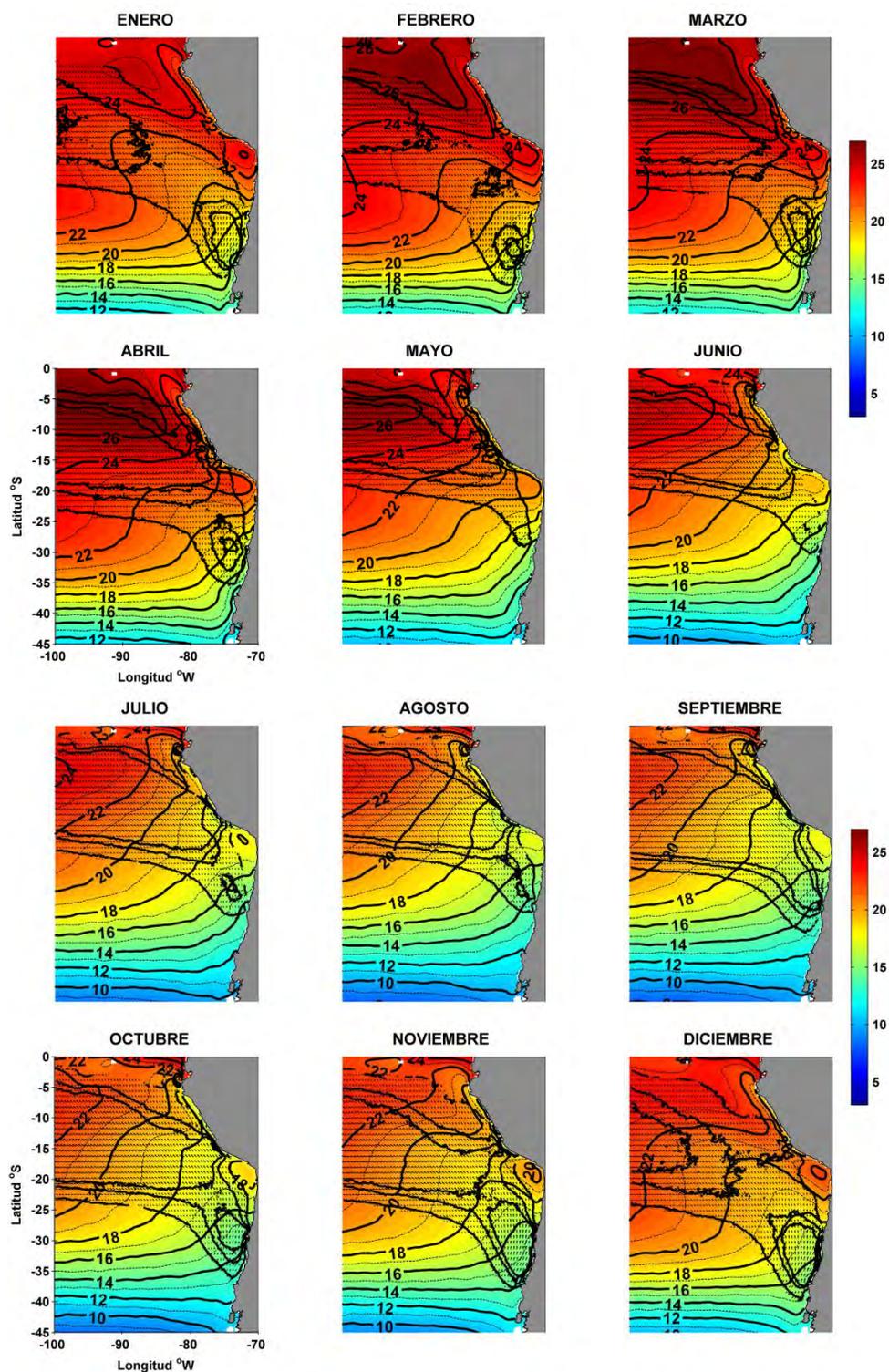


Figura A1-36. Climatología de la distribución espacial de la temperatura superficial del mar en conjunto con los vectores de esfuerzo del viento (flechas y contornos negros).

## **ANEXO VI. Taller de Difusión y Discusión de resultados**



## Proyecto

# "Estructura poblacional y estimación de índices de reclutamiento de jurel basados en modelos biofísicos (fase I)"

**Financia:** Fondo de Investigación Pesquera

**Ejecuta:** Instituto de Investigación Pesquera

**Jefe de proyecto:** Sebastián Vásquez Pastene

**Valparaíso, Viernes 22 de enero de 2016**

**Lugar:** Hotel Diego de Almagro , Salón Tunken. Molina 76, Valparaíso, Chile

## Programa

09:30 – 09:45:	Presentación del Proyecto FIP 2014-33 <b>Sebastián Vásquez P. (INPESCA)</b>	11:55 – 12:25:	Modelación Biofísica II: Proceso de transporte, patrones de conectividad y dinámica del reclutamiento de jurel en el Pacífico suroriental. <b>Sebastián Vásquez P. (INPESCA)</b>
09:50 – 10:20:	Modelación Biofísica I: Esquema de modelación e implicancias hacia la estructura poblacional del jurel en el Pacífico suroriental. <b>Sebastián Vásquez P. (INPESCA)</b>	12:30 – 13:00:	Modelo conceptual de la estructura poblacional del jurel asociado a forzantes biofísicos en el Pacífico suroriental. <b>Aquiles Sepúlveda O. (INPESCA)</b>
10:25 – 10:50:	Modelación hidrodinámica del Pacífico suroriental. <b>Cristián Salas D. (INPESCA)</b>	13:05 – 13:35:	Larval transport and dispersal in the coastal ocean and consequences for spatial management of marine fisheries. <b>Andrés Ospina-Álvarez (CCM-PUC)</b>
10:55 – 11:15:	PAUSA CAFÉ	13:40 – 14:00:	Discusión y Conclusiones.
11:20 – 11:50:	Caracterización oceanográfica del Pacífico suroriental asociada al transporte de estadíos tempranos de jurel. <b>Sergio Núñez E. (INPESCA)</b>		

**Lista de Participantes en Taller de Difusión FIP 2014-33**

<b>Nombre</b>	<b>Institución</b>	<b>mail</b>
José Raúl Cañón	CIAM	<a href="mailto:jcanon@ciamchile.cl">jcanon@ciamchile.cl</a>
Roberto Contreras	BLUMAR	<a href="mailto:Roberto.Contreras@blumar.com">Roberto.Contreras@blumar.com</a>
Andrés Ospina-Álvarez	CCM-PUC	<a href="mailto:aospina.co@me.com">aospina.co@me.com</a>
José Córdova	IFOP	<a href="mailto:jose.cordova@ifop.cl">jose.cordova@ifop.cl</a>
Luis Soto	U. del Bío Bío	<a href="mailto:lsoto@ubiobio.cl">lsoto@ubiobio.cl</a>
Carolina Lang	IFOP	<a href="mailto:carolina.lang@ifop.cl">carolina.lang@ifop.cl</a>
Maximiliano Alarma	Orizon	<a href="mailto:alarmam@gmail.com">alarmam@gmail.com</a>
Cristian Canales	IFOP	<a href="mailto:cristian.canales@ifop.cl">cristian.canales@ifop.cl</a>
Fernando Espíndola	IFOP	<a href="mailto:fernando.espíndola@ifop.cl">fernando.espíndola@ifop.cl</a>
Jaime Letelier	IFOP	<a href="mailto:jaime.letelier@ifop.cl">jaime.letelier@ifop.cl</a>
Ignacio Payá	IFOP	<a href="mailto:ignacio.paya@ifop.cl">ignacio.paya@ifop.cl</a>
Sebastián Vásquez	INPESCA	<a href="mailto:svasquez@inpesca.cl">svasquez@inpesca.cl</a>
Antonio Aranís	IFOP	<a href="mailto:antonio.aranis@ifop.cl">antonio.aranis@ifop.cl</a>
Sergio Lillo	IFOP	<a href="mailto:sergio.lillo@ifop.cl">sergio.lillo@ifop.cl</a>
Sergio Núñez	INPESCA	<a href="mailto:snunez@inpesca.cl">snunez@inpesca.cl</a>
Jorge Castillo	IFOP	<a href="mailto:jcastillo@ifop.cl">jcastillo@ifop.cl</a>
Alejandra Ordenes	SUBPESCA	<a href="mailto:aordenes@subpesca.cl">aordenes@subpesca.cl</a>
Cristian Salas	INPESCA	<a href="mailto:csalas@inpesca.cl">csalas@inpesca.cl</a>
Aquiles Sepúlveda	INPESCA	<a href="mailto:asepulveda@inpesca.cl">asepulveda@inpesca.cl</a>
Héctor Bacigalupo	SONAPESCA	<a href="mailto:estudios@sonapesca.cl">estudios@sonapesca.cl</a>

ASISTENCIA TALLER DE RESULTADOS



Proyecto:

"Estructura poblacional y estimación de índice de reclutamiento de jurel basados en modelos biofísicos (Fase I)"

- Viernes 22 de enero de 2016
- Salón Tunken del Hotel Diego de Almagro de la ciudad de Valparaíso

N°	NOMBRE	INSTITUCIÓN	MAIL	TELÉFONO	FIRMA
1	José Raúl Carrasco	CIAM	jaunec@ciamchile		[Firma]
2	Roberto Carstensen	BWmer	roberto.carstensen@bwmer.cl	33162	[Firma]
3	Andrés Ospina	PUC	aospina@bio.puc.cl		[Firma]
4	José Andrés M.	IFOP	josandres@ifop.cl	2151477	[Firma]
5	Luis Soto M.	UBIP	lsoto@ubipbio.cl	311741	[Firma]
6	Carolina Longo	IFOP	carolina.longo@ifop.cl		[Firma]
7	Maximiliano Acuña	ORIZON	maximiliano@orizon.cl		[Firma]
8	Walter Cruz	IFOP	walter.cruz@ifop.cl	66497728	[Firma]
9	Fernando Espinosa	IFOP	fernando.espinosa@ifop.cl	2151418	[Firma]
10	Jaime Letelier	IFOP	jaime.letelier@ifop.cl	22151551	[Firma]
11	IGNACIO AYAYA	IFOP	ignacio.ifop		[Firma]
12	António Aramis	IFOP	antonio.aramis@ifop.cl	2151412	[Firma]
13	Sergio Vásquez P	IMPESCA	svasquez@impesca.cl	2920410	[Firma]
14	Sergio Lillo	IFOP	sergio.lillo@ifop.cl	2151720	[Firma]
15	Sergio Navea	IMPESCA	snavea@impesca.cl		[Firma]
16	Yvonne Castillo	IFOP	yvonne.castillo@ifop.cl		[Firma]
17	Alejandro	SUBPESCA	alejandro.subpesca.cl		[Firma]
18	Cristian Solos	IMPESCA	csolos@impesca.cl		[Firma]
19					
20					
21					
22					
23					
24					
25					

**ANEXO VII. Biophysical modelling of jack mackerel in the south-eastern Pacific Ocean: a step forward in understanding recruitment dynamics**

**Presentación Oral**

**The 7<sup>th</sup> World Fisheries Congress. Challenge to Sustainable Fisheries and Safe Seafoods**

**23 - 27 de Mayo de 2016, Busan. Korea del Sur.**



S34-04

#### Biophysical Modelling of Jack Mackerel in the South-Eastern Pacific Ocean: A Step Forward in Understanding Recruitment Dynamics

##### Author(s)

1. Sebastián Vázquez, Instituto de Investigación Pesquera, Av. Colón 2780, Talcahuano, Región del Bio-Bio, Chile, svazquez@impesca.cl
2. Aquiles Sepúlveda, Instituto de Investigación Pesquera, Av. Colón 2780, Talcahuano, Región del Bio-Bio, Chile, asepulveda@impesca.cl
3. Cristian Salas, Instituto de Investigación Pesquera, Av. Colón 2780, Talcahuano, Región del Bio-Bio, Chile, csalas@impesca.cl
4. Andrés Ospina-Alvarez, Centro de Conservación Marina, facultad de ciencias biológicas, Pontificia Universidad Católica de Chile, Departamento de Ecología Pontificia, Universidad Católica de Chile Casilla 199, Correo 22 Santiago, C.P. 6513677, Chile, aospina@bio.puc.cl
5. Alexander Gretchina, Instituto de Investigación Pesquera, Av. Colón 2780, Talcahuano, Región del Bio-Bio, Chile, agretchina@impesca.cl
6. Núnmez Sergio, Instituto de Investigación Pesquera, Av. Colón 2780, Talcahuano, Región del Bio-Bio, Chile, snunmez@impesca.cl
7. Nicolás Alegria, Instituto de Investigación Pesquera, Av. Colón 2780, Talcahuano, Región del Bio-Bio, Chile, nalegria@impesca.cl
8. Lilian Cisterna, Instituto de Investigación Pesquera, Av. Colón 2780, Talcahuano, Región del Bio-Bio, Chile, lcisterna@impesca.cl
9. Luis Soto, Universidad del BioBio, Avda. Collao 1202, Casilla 5-C - CP, 4051351 Isoto@ubiobio.cl
10. Jaime Letelier, Instituto de Fomento Pesquero, Alameda Marmel Blanco Encalada 839 Valparaíso, Chile, jaime.letelier@gmail.com

##### Presenter

Sebastián Vázquez, Instituto de Investigación Pesquera, Av. Colón 2780, Talcahuano, Región del Bio-Bio, Chile, svazquez@impesca.cl

##### Abstract

The jack mackerel (*Trachurus murphyi*) population has historically supported one of the most important fisheries in the south-eastern Pacific Ocean, with a maximum catch around five million tons in 1995. However, catches, biomass and recruitment levels have decreased steadily over the last decade to a minimum in 2008. In addition, jack mackerel displays a complex population structure in the Pacific Ocean, including long seasonal migrations, spawning areas extending from the coast of Peru to the oceanic area off central Chile and main nursery ground in the coastal region of northern Chile and southern Peru. In order to

study the patterns of connectivity between different areas of spawning and the nursery ground and its effect on the recruitment dynamics, an individual-based model was coupled to a validated hydrodynamic model to simulate the early life history of jack mackerel for the period 1994-2014. Results showed that the surface circulation pattern associated with the subtropical gyre supports connectivity between the main spawning area located in the oceanic area off central-southern Chile and the nursery ground. On the other hand, the coastal system in northern Chile and southern Peru showed high levels of retention and intrazonal dynamics associated with equatorial El Niño signals that promote inter-annual variability in the exchange between the two areas, which was tested by acoustic records of juvenile jack mackerel from the study area. The proposed modelling scheme reasonably simulates the early life history of jack mackerel and can also be considered to understanding relative stock structure hypotheses.

**Keywords:** Chilean jack mackerel, biophysical model, connectivity

**ANEXO VIII. 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**

**South Pacific Regional Fisheries Management Organisation**