



**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**

---

**FIPA N° 2017-62**

**“Dinámica poblacional de  
juveniles y adultos de jurel  
basada en modelación biofísica”**

**Talcahuano, diciembre 2020**

**TITULO DEL PROYECTO**

Dinámica poblacional de juveniles y adultos de jurel basada en modelación biofísica

**REQUIRENTE**

Consejo de Investigación Pesquera y Acuicultura,  
Fondo de Investigación Pesquera y Acuicultura  
Presidente CIP: Román Zelaya Ríos

**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  
Av Colon 2780, Talcahuano, Chile  
Tel.: 56-41-2920410  
Fax: 56-41-2920411  
E-mail: [svasquez@inpesca.cl](mailto:svasquez@inpesca.cl)

---

**FIP N° 2017-62**

**"DINÁMICA POBLACIONAL DE JUVENILES Y ADULTOS DE  
JUREL BASADA EN MODELACIÓN BIOFÍSICA"**

**Jefe Proyecto**

**Sebastián Vásquez Pastene**

**AUTORES**

**Sebastián Vásquez Pastene**

**Cristian Salas Domínguez**

**Sergio Núñez Elías**

**Aquiles Sepúlveda Oróstica**

**Alexander Gretchina**

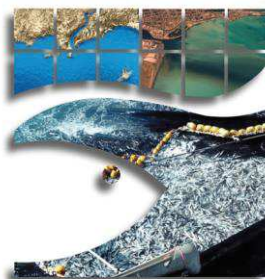
**Marcos Arteaga Vásquez**

**Claudio Gatica Molina**

**Carlos González Ayamante**

**Roberto San Martín Valdebenito**

**Vincent Echevin**



**Instituto de  
Investigación  
Pesquera  
Octava Región**

Talcahuano (Chile), 2020

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

|   |    |
|---|----|
| ÍNDICE DE CONTENIDOS .....  | 1  |
| INDICE DE TABLAS .....  | 5  |
| INDICE DE FIGURAS .....   | 7  |
| INDICE DE ANEXOS .....  | 15 |
| 1.- RESUMEN EJECUTIVO .....   | 16 |
| 2.- ANTECEDENTES .....  | 23 |
| i) Antecedentes del jurel y su estructura poblacional en el Pacífico suroriental .....  | 23 |
| ii) La población de jurel como objeto de estudio mediante modelación espacial .....   | 30 |
| 3.- DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES DEL EQUIPO DE TRABAJO .....  | 32 |
| 4.- OBJETIVOS DEL PROYECTO .....  | 44 |
| 5.- METODOLOGÍA DE TRABAJO .....  | 46 |
| 5.1. Revisión bibliográfica para la identificación de factores críticos del hábitat de jurel .....  | 49 |
| 5.1.1. Reunión-taller .....   | 49 |
| 5.1.2. Estrategia de búsqueda bibliográfica .....   | 50 |
| 5.2. Desarrollo e implementación de un sistema de modelación hidrodinámica y biogeoquímica validado para la región del Pacífico suroriental. .... | 51 |
| 5.2.1. Implementación de modelo hidrodinámico con forzantes mejorados .....   | 52 |
| 5.3. Desarrollo e implementación un modelo biofísico de juveniles y adultos de jurel para simular cambios espaciales. ....                        | 62 |
| 5.3.1. Información ambiental .....  | 63 |
| 5.3.2. Información espacial de jurel .....  | 63 |
| 5.3.3. Consideraciones hacia la modelación biofísica temprana, fase I. ....   | 65 |
| 5.3.4. Matriz biofísica para la modelación espacial .....   | 66 |
| 5.3.5. Aproximaciones metodológicas hacia la modelación biofísica predictiva .....  | 67 |
| 5.4. Plataforma computacional para la implementación de los modelos hidrodinámicos, biogeoquímicos y biofísicos .....                             | 75 |
| 6. RESULTADOS .....   | 82 |

|  |     |
|--|-----|
| 6.1. Objetivo específico 1. Identificar factores críticos del hábitat (físicos, químicos, ecológicos, biológicos) de jurel a lo largo de su historia de vida en énfasis en los estadios juveniles y adultos en base a una recopilación bibliográfica. ....   | 82  |
| 6.1.1. Reunión-Taller interna del Grupo de Trabajo .....   | 82  |
| 6.1.2. Búsqueda bibliográfica y determinación de factores críticos.....  | 84  |
| 6.2. Objtivo específico 2. Desarrollar e implementar un sistema de modelación hidrodinámica y biogeoquímico validado para la región del Pacífico suroriental que permita caracterizar cambios interanuales de factores críticos del hábitat de la población juvenil y adulta de jurel. ....  | 88  |
| 6.2.1. Implementación de modelo hidrodinámico con forzantes mejorados (ROMS2/PACSUR10) .....   | 88  |
| 6.2.2. Validación del modelo hidrodinámico del Pacífico suroriental, periodo 1994-2016 .....   | 93  |
| 6.2.3. Implementación del modelo hidrodinámico y biogeoquímico ROMS-PISCES.....  | 99  |
| 6.2.4. Enfoques hacia la versión final del modelo hidrodinámico y biogeoquímico ROMS-PISCES.....   | 100 |
| 6.2.5. Análisis de las variables del modelo ROMS-PISCES_PADRE .....  | 101 |
| 6.2.6. Modelo biogeoquímico hijo. ....   | 118 |
| 6.2.7. Análisis integrado modelación hidrodinámica y biogeoquímica .....   | 125 |
| 6.3. Objetivo específico 3. Desarrollar e implementar un modelo biofísico de juveniles y adultos de jurel que permita realizar un seguimiento de la distribución e historia de vida de esta especie en el Pacífico suroriental. ....   | 128 |
| 6.3.1. Modelación del hábitat potencial de desove de jurel en el Pacífico suroriental.....   | 134 |
| 6.3.2. Modelación biofísica de distribución de especies para jurel adulto.....   | 146 |
| 6.4. Objetivo específico 4. Definir escenarios de simulación con un forzamiento variable del ambiente de acuerdo a 4.1. (remolinos, corrientes, temperatura, oxígeno, nutrientes, disponibilidad de alimento entre otros) para evaluar la modulación del proceso de transporte y sobrevivencia de juveniles y adultos de jurel.....                                    | 161 |
| 6.5. Objetivo específico 5. Realizar simulaciones evaluando los escenarios de forzamiento contrastantes (4.4) y el modelo desarrollado (4.3), identificando los factores o hábitat críticos que pudieran modular la estructura poblacional del jurel en el Pacífico Sur. Los escenarios de concentraciones de oxígeno deben ser considerados en las simulaciones. .... | 171 |

|  |     |
|--|-----|
| 6.6. Objetivo específico 6. Identificar fortalezas y debilidades de todo el ámbito abarcado por el estudio, establecer líneas de desarrollo/necesidades de investigación para avanzar en el estudio de la estructura poblacional de la especie. .... | 175 |
| 6.6.1. Fase 1: Implementación de taller .....  | 176 |
| 6.6.1.1. Síntesis presentación Taller FIPA 2017-62.....  | 176 |
| 6.6.1.2. Síntesis presentación “Manejo integrado de jurel por medio de la OROP-PS: implicancias de la estructura poblacional” .....  | 177 |
| 6.6.2. Fase 2: Implementación de taller .....  | 183 |
| 6.6.2.1. Identificación de fortalezas en la implementación del estudio. ....   | 184 |
| 6.6.2.2. Actividad participativa 1: identificación debilidades visualizadas desde el estudio hacia la estructura poblacional .....   | 187 |
| 6.6.2.3. Priorización de las debilidades identificadas .....   | 189 |
| 6.6.2.4. Actividad participativa 2: propuestas de desarrollo en investigación hacia fortalecer estudios de estructura poblacional de jurel .....   | 194 |
| 6.6.2.5. Actividad 3: Ideas principales del plenario en relación a las líneas de investigación hacia la estructura poblacional del jurel .....   | 196 |
| 6.6.2.6. Consolidación participativa de debilidades, brechas y líneas de investigación .....   | 197 |
| 7. DISCUSIÓN.....  | 201 |
| 7.1. Aspectos biológicos.....  | 206 |
| 7.1.1. Patrón temporal del desove .....  | 207 |
| 7.1.2. Área de desove .....  | 207 |
| 7.1.3. Historia de vida temprana, transporte larval .....  | 210 |
| 7.1.4. Distribución espacial .....   | 211 |
| 7.1.5. Migración vertical .....  | 211 |
| 7.2. Indicadores poblacionales .....   | 212 |
| 7.2.1. Genética.....   | 212 |
| 7.2.2. Micro-química de otolitos .....   | 213 |
| 7.2.3. Parásitos .....   | 213 |
| 7.2.4. Crecimiento .....   | 214 |
| 7.3. Migraciones .....   | 214 |
| 7.4. Interacción con otras especies pelágicas .....  | 215 |

|   |     |
|---|-----|
| 7.5. Dinámica del hábitat y su relación con los patrones espaciales de jurel..... | 216 |
| 7.5.1. Temperatura .....  | 216 |
| 7.5.2. Productividad .....  | 217 |
| 7.5.3. Oxígeno disuelto .....   | 217 |
| 7.5.4. Dinámica ENSO .....  | 218 |
| 7.6. Estructura demográfica .....   | 219 |
| 7.7. Pesca.....   | 220 |
| 7.8. Estructura poblacional.....  | 226 |
| 8. TALLERES Y REUNIONES .....   | 234 |
| 9. PUBLICACIONES DERIVADAS DEL PROYECTO .....                                     | 237 |
| 10. REFERENCIAS .....   | 238 |

## INDICE DE TABLAS

|  |     |
|--|-----|
| Tabla I. Herramientas utilizadas en el proceso de modelación hidrodinámica, biogeoquímica y biofísica.....   | 46  |
| Tabla II. Descripción de los modelos hidrodinámicos y biogeoquímicas realizados por INPESCA en el marco de este proyecto.....  | 58  |
| Tabla III. Constantes y parámetros utilizados en el modelo biofísico para simular distribución de juveniles de jurel.....  | 70  |
| Tabla IV. Número de registros bibliográficos identificados para cada variable obtenida desde la literatura para la identificación de factores críticos del hábitat de jurel. ....  | 87  |
| Tabla V. Resumen de la información de capturas y registros acústicos colectadas para la modelación espacio-temporal de jurel en el Pacífico suroriental. ....  | 131 |
| Tabla VI. Estadísticas para el modelo aditivo generalizado aplicado al desove de jurel periodo 1999-2016, para la variable dependiente densidad de huevos respecto a las condiciones ambientales temperatura y energía cinética de mesoescala, además de la variable temporal año.....   | 135 |
| Tabla VII. Variables predictoras para modelar la ocurrencia de jurel en el Pacífico suroriental bajo un esquema de modelación jerárquica bayesiana. ....   | 147 |
| Tabla VIII. Comparación de los modelos más relevantes para la modelación jerárquica bayesiana de distribución de especies aplicada a jurel en el Pacífico suroriental. Acrónimos: Watanabe Akaike Information Criterion (WAIC); Logarithmic Cross Validated Score (LCPO). Para acrónimos de variables predictoras ver Tabla VII. ....                  | 150 |
| Tabla IX. Resumen numérico de la distribución marginal posterior de los efectos fijos para el modelo seleccionado. Para cada variable se informan la media, la desviación estándar y el intervalo de 95% de credibilidad ( $Q_{0.025} - Q_{0.975}$ ) que contiene el 95% de probabilidad de acuerdo a la distribución posterior.....                   | 151 |
| Tabla X. Temperatura superficial del mar, concentración de clorofila y concentración de oxígeno a 50 metros de profundidad estimados para cada fuente de información utilizada para la modelación de distribución de especies aplicada a jurel. ....   | 154 |
| Tabla XI. Comparación de los modelos más relevantes para la modelación jerárquica bayesiana de distribución de especies aplicada a jurel en el Pacífico suroriental. Acrónimos: Watanabe Akaike Information Criterion (WAIC); Logarithmic Cross Validated Score (LCPO). W=efecto espacial. Para acrónimos de variables predictoras ver Tabla VII. .... | 157 |
| Tabla XII. Resumen numérico de la distribución marginal posterior de los efectos fijos y del efecto aleatorio del campo espacial para el modelo seleccionado para la temporada de pesca 2009. Para cada variable se informan la media, la desviación estándar y el intervalo de 95%  |     |



|   |     |
|---|-----|
| de credibilidad ( $Q_{0.025} - Q_{0.975}$ ) que contiene el 95% de probabilidad de acuerdo a la distribución posterior. ....  | 158 |
| Tabla XIII. Identificación de asistentes que participaron primer día de taller. Acrónimos corresponden a: Subpesca, Subsecretaría de Pesca y Acuicultura; Ifop, Instituto de Fomento Pesquero; CIAM, Centro de Investigación Aplicada del Mar; Inpesca, Instituto de Investigación Pesquera. .... | 177 |
| Tabla XIV. Identificación de asistentes que participaron en el segundo día de taller. Acrónimos corresponden a: Subpesca, Subsecretaría de Pesca y Acuicultura; Ifop, Instituto de Fomento Pesquero; Inpesca, Instituto de Investigación Pesquera. ....   | 184 |
| Tabla XV. Identificación de fortalezas en relación al desarrollo del estudio.....   | 186 |
| Tabla XVI. Propuesta inicial de las debilidades y sus ámbitos para su validación participativa.   | 188 |
| Tabla XVII. Matriz que resume la frecuencia porcentual de respuestas de las asistentes para establecer mediante ranking su priorización de debilidades hacia la estructura poblacional de jurel en el Pacífico sur.....   | 192 |
| Tabla XVIII. Debilidades priorizadas junto a sus respectivas brechas identificadas.....   | 193 |
| Tabla XIX. Lineamiento de investigación junto a sus respectivas brechas priorizadas. ....   | 195 |
| Tabla XX. Cuadro de debilidades, brechas y lineamientos consolidado a partir de la priorización y las recomendaciones aportadas de forma consensuada por los distintos asistentes al taller. ....   | 198 |

## INDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Esquema de trabajo para el estudio de la dinámica espacial de juveniles y adultos de jurel en el Pacífico suroriental bajo un enfoque de modelación biofísica. ....  | 48 |
| Figura 2. Esquema descriptivo del modelo PISCES. No se muestran todos los flujos de interacción entre los diferentes compartimientos. Figura de Aumont & Bopp, 2006. ....  | 55 |
| Figura 3. Dominios de modelación ROMS-PISCES. El recuadro azul muestra el dominio padre correspondiente al modelo ROMS de 20 km de resolución espacial, en rojo el dominio hijo para el sector norte de Chile y sur de Perú, con resolución de ~7 km. El mapa de color de fondo presenta la batimetría ETOPO2 utilizada en la modelación. ....   | 62 |
| Figura 4. Modelo conceptual para la estructura poblacional del jurel (extraído de Vásquez et al., 2017; FIPA 2014-33): 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). .... | 66 |
| Figura 5. Sitio Web de R_INLA, modelo para configurar modelos espaciales utilizando inferencia Bayesiana ( <a href="http://www.r-inla.org">www.r-inla.org</a> ). En este sitio se encuentra disponible la documentación y descarga de archivos. ....   | 71 |
| Figura 6. Diagrama de Clúster INPESCA para la ejecución de modelos hidrodinámicos, biogeoquímicos y biofísicos: 128 núcleos de procesamiento y 48 TB de almacenamiento. ....   | 77 |
| Figura 7. Aporte porcentual de cada variable analizada para la determinación de factores críticos del hábitat de jurel, tanto para la fracción adulta como la juvenil. ....  | 87 |
| Figura 8. Temperatura superficial del mar promedio periodo 1994-2016 para a) datos satelitales PATHFINDER, b) climatología COADS, c) modelo ROMS NCEP2 PLUS 6hrs (ROMS1) y b) modelo ROMS NCEP2 PLUS FRC (ROMS2). ....   | 88 |
| Figura 9. Secciones verticales de la corriente meridional media promediada entre los 7°S y 13°S para a) modelo ROMS NCEP2 6hrs (ROMS1, periodo 1994-2014), b) modelo ROMS PLUS FRC (ROMS2, periodo 1994-2016), c) extraída de Cambon et al., 2013. Correspondiente a la secciones verticales de la corriente meridional modelada en la misma banda, forzada con datos de esfuerzo de viento observado ERS (escaterómetro). ....  | 89 |

Figura 10. Secciones verticales de la corriente meridional media promediada entre los 30°S y 35°S para a) modelo ROMS NCEP2 6hrs (ROMS1, periodo 1994-2014), b) modelo ROMS PLUS FRC (ROMS2, periodo 1994-2016), c) extraída de Cambon et al., 2013. Correspondiente a la secciones verticales de la corriente meridional modelada (en la misma banda), forzada con datos de esfuerzo de viento observado ERS (escaterómetro). .....90

Figura 11. Temperatura superficial del mar promedio periodo 1994-2016 para a) PACSUR10 (ROMS2, resolución 10 km); b) PACSUR20\_INTER (resolución 20 km); c) PACSUR30\_INTER (resolución 30 km).....91

Figura 12. Corrientes en la vertical a lo largo de costa a) 15°S y b) 30°S para los modelos ROMS: PACSUR10, PACSUR20 y PACSUR30.....92

Figura 13. Ciclo estacional de la anomalía de la temperatura superficial del mar para datos de satélite Pathfinder-ModisAqua (panel izquierdo), modelo ROMS2 (panel centro) y el error cuadrático medio espacial (panel derecho). Las estaciones desde arriba a abajo: verano, otoño, invierno, primavera.....94

Figura 14. FOE del primer modo de variabilidad de la Temperatura superficial del mar. Dominio espacial para a) Datos satélite Pathfinder-ModisAqua y b) modelo ROMS2, c) serie de tiempo 1994 – 2016 para datos de satélite y modelo ROMS2, d) significancia de la correlación entre series de tiempo basada en la función de densidad de probabilidad de los coeficientes de correlación cruzada .....96

Figura 15. Ciclo estacional de la anomalía el nivel del mar para datos de satélite AVISO (panel izquierdo), modelo ROMS2 (panel centro) y el error cuadrático medio espacial (panel derecho). Las estaciones desde arriba a abajo: verano, otoño, invierno, primavera.....97

Figura 16. FOE del primer modo de variabilidad de la Anomalía del nivel del mar. Dominio espacial para a) Datos satélite AVISO y b) modelo ROMS2, c) serie de tiempo 1994 – 2016 para datos de satélite y modelo ROMS2, d) significancia de la correlación entre series de tiempo basada en la función de densidad de probabilidad de los coeficientes de correlación cruzada. ....98

Figura 17. Profundidad de la mínima de oxígeno para todo el dominio padre, panel izquierdo promedio anual modelo ROMS-PISCES\_PADRE y panel derecho datos WOA (45 µmol/L). .....102

|   |     |
|---|-----|
| Figura 18. Profundidad de la mínima de oxígeno frente a Perú, panel izquierdo WOA y panel derecho ROMS-PISCES (45 $\mu\text{mol/L}$ ). .....  | 102 |
| Figura 19. Sección vertical meridional de oxígeno disuelto en los primeros 100 km de la costa entre los 5°N y 40°S proveniente de: a) el modelo ROMS-PISCES_PADRE y b) datos <i>World Ocean Atlas</i> . .....   | 103 |
| Figura 20. Promedio anual de clorofila superficial para Perú: a) información satelital SeaWifs, b) Modis Aqua y c) modelo ROMS-PISCES_PADRE. ....   | 104 |
| Figura 21. Promedio anual de clorofila superficial para Chile centro sur: a) información satelital SeaWifs, b) Modis Aqua y c) modelo ROMS-PISCES. ....   | 105 |
| Figura 22. Ciclo estacional de la concentración de oxígeno disuelto a los 200 metros de profundidad para datos observados del <i>World Ocean Atlas</i> (panel izquierdo), modelo ROMS-PISCES_PADRE (panel centro) y el sesgo (diferencia en la magnitud de la señal) (panel derecho). Las estaciones desde arriba a abajo: verano, otoño, invierno, primavera. .... | 106 |
| Figura 23. Ciclo estacional de la clorofila superficial satelital Modis-Aqua (panel izquierdo), modelo ROMS-PISCES_PADRE (panel centro) y el sesgo (diferencia en la magnitud de la señal) (panel derecho). Las estaciones desde arriba a abajo: verano, otoño, invierno, primavera. ....   | 107 |
| Figura 24. Ciclo estacional de la concentración de nitrato superficial ( $\text{NO}_3$ ) para datos observados del <i>World Ocean Atlas</i> (panel izquierdo), modelo ROMS-PISCES_PADRE (panel centro) y el sesgo (diferencia en la magnitud de la señal) (panel derecho). Las estaciones desde arriba a abajo: verano, otoño, invierno, primavera. ....            | 109 |
| Figura 25. Ciclo estacional de la concentración de fosfato superficial ( $\text{PO}_3$ ) para datos observados del <i>World Ocean Atlas</i> (panel izquierdo), modelo ROMS-PISCES (panel centro) y el sesgo (diferencia en la magnitud de la señal) (panel derecho). Las estaciones desde arriba a abajo: verano, otoño, invierno, primavera. ....                  | 110 |
| Figura 26. Ciclo estacional de la concentración de silicato superficial ( $\text{SO}_3$ ) para datos observados del <i>World Ocean Atlas</i> (panel izquierdo), modelo ROMS-PISCES_PADRE (panel centro) y el sesgo (diferencia en la magnitud de la señal) (panel derecho). Las estaciones desde arriba a abajo: verano, otoño, invierno, primavera. ....           | 111 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 27. Secciones para enero 2010 frente a Chile (32°30'S): a) oxígeno ROMS PISCES, b) oxígeno WOCE, c) salinidad ROMS PISCES, d) salinidad WOCE, e) temperatura ROMS PISCES, f) temperatura WOCE.....  | 112 |
| Figura 28. Secciones para mayo 2009 frente a Perú (-15°S): a) oxígeno ROMS PISCES, b) oxígeno WOCE, c) salinidad ROMS PISCES, d) salinidad WOCE, e) temperatura ROMS PISCES, f) temperatura WOCE.....  | 113 |
| Figura 29. Secciones para septiembre 2017 frente a Chile (-32.5°S): a) oxígeno ROMS PISCES, b) oxígeno WOCE, c) salinidad ROMS PISCES, d) salinidad WOCE, e) temperatura ROMS PISCES, f) temperatura WOCE .....  | 114 |
| Figura 30. Secciones para enero 2008 transecta norte-sur (105°W): a) oxígeno ROMS PISCES, b) oxígeno WOCE, c) salinidad ROMS PISCES, d) salinidad WOCE, e) temperatura ROMS PISCES, f) temperatura WOCE. ....  | 115 |
| Figura 31. Sección vertical de oxígeno a los 5°S a) ROMS-PISCES_PADRE, b) WOA, c) BIAS y a los 10°S d) ROMS-PISCES_PADRE, e) WOA, f) sesgo.....  | 116 |
| Figura 32. Sección vertical de oxígeno a los 15°S a) ROMS-PISCES_PADRE, b) WOA, c) BIAS y a los 20°S d) ROMS-PISCES_PADRE, e) WOA, f) sesgo (BIAS).....  | 117 |
| Figura 33. Sección vertical de oxígeno a los 25°S a) ROMS-PISCES_PADRE, b) WOA, c) BIAS y a los 30°S d) ROMS-PISCES_PADRE, e) WOA, f) sesgo (BIAS).....  | 118 |
| Figura 34. Promedio mensual de la temperatura superficial del mar, periodo 2007-2013. En un recuadro interno el dominio hijo anidado modelo ROMS_PISCES-HIJO.....  | 120 |
| Figura 35. Promedio mensual de la clorofila superficial del mar, periodo 2007-2013. En un recuadro interno el dominio hijo anidado modelo ROMS_PISCES-HIJO.....  | 122 |
| Figura 36. Promedio mensual del oxígeno disuelto, periodo 2007-2013. En un recuadro interno el dominio hijo anidado modelo ROMS_PISCES-HIJO.....   | 124 |
| Figura 37. Distribución espacial de los datos de capturas de jurel realizados por la flota chilena, peruana e internacional que sustentan al proceso de modelación espacio-temporal. ....  | 130 |
| Figura 38. Distribución espacial de los datos de capturas de jurel realizados por la flota chilena, peruana e internacional y los registros obtenidos desde cruceros de prospección acústica realizados en Chile y Perú que sustentan al proceso de modelación espacio-temporal .... | 131 |
| Figura 39. Distribución mensual de los registros de capturas de jurel registrados para la flota chilena, peruana e internacional en el periodo 2001-2016. ....   | 133 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 40. Diagramas de la respuesta del modelo aditivo generalizado para la densidad de huevos de jurel en la interacción entre la variable temporal Año y a) temperatura superficial del mar; b) energía cinética de meso escala.....   | 136 |
| Figura 41. Panel superior: series observadas y modeladas mediante GAM de la densidad de huevos de jurel en el área principal de desove; panel inferior: predicción de la densidad de huevos de jurel basados en la condiciones ambientales observadas para el periodo 1994-2016. ....   | 136 |
| Figura 42. Distribución espacial de la densidad de huevos de jurel modelada mediante GAM para el periodo 1994-2016. ....  | 138 |
| Figura 43. Área de desove efectivo de jurel para el periodo 1994-2016, la cual se desprende de la modelación espacial, acotada por la distribución espacial anual del stock adulto de jurel.  | 140 |
| Figura 44. Distribución modelada de juveniles de jurel bajo una aproximación biofísica, periodo 1994-2015. ....   | 144 |
| Figura 45. Distribución interanual de los registros de jurel adulto referenciado en tiempo y espacio para el periodo 2001-2018 (círculos azules: flota pesquera chilena; círculos verdes: flota pesquera internacional; círculos celestes: flota peruana; cruces negras: registros acústicos cruceros Chile; puntos rojos: registros acústicos cruceros Perú). .... | 146 |
| Figura 46. Correlación de Spearman entre las distintas variables predictoras consideradas para la modelación espacial de jurel en el Pacífico suroriental. ....   | 148 |
| Figura 47. Área de estudio que incluye el total de las observaciones referenciadas en tiempo y espacio para jurel sobre grilla de modelación INLA donde son generadas las predicciones espacio-temporales.....  | 149 |
| Figura 48. Distribución marginal posterior para los efectos fijos del modelo bayesiano jerárquico para ocurrencia de jurel en el Pacífico suroriental: temperatura superficial del mar ( $\beta_1$ ), concentración de clorofila ( $\beta_2$ ) y presencia de mínima de oxígeno ( $\beta_5$ ).....  | 151 |
| Figura 49. Climatología de la probabilidad media posterior para la ocurrencia de jurel en el Pacífico suroriental basada en modelación jerárquica bayesiana mediante INLA. Datos de las observaciones se indican en puntos negros. ....   | 153 |
| Figura 50. Detalle para el sector costero de Perú y el centro-norte de Chile de la climatología de la probabilidad media posterior para la ocurrencia de jurel en el Pacífico suroriental basada  |     |

|  |     |
|--|-----|
| en modelación jerárquica bayesiana mediante INLA. Datos de las observaciones se indican en puntos negros. ....   | 155 |
| Figura 51. Mapa del área de estudio con las capturas de jurel para el año 2009. Grilla de triangulación Delaunay utilizada para el cálculo del campo aleatorio Gaussiano de Markov para la aproximación SPDE. Las observaciones (presencias) se muestran en rojo y la pseudo-ausencias en azul. ....                                     | 156 |
| Figura 52. Distribución de los efectos fijos para el modelo jerarquico bayesiano de distribución de especies para jurel: $\beta_1$ = temperature superficial del mar; $\beta_2$ =concentración de clorofila-a; $\beta_3$ =turbulencia inducida por el viento, and; $\beta_4$ = presencia de concentración mínima de oxígeno (50 m). .... | 157 |
| Figura 53. a) Media y b) desviación estándar para la distribución posterior del efecto espacial ( $W$ ) para la distribución de jurel bajo un esquema de modelación jerárquica bayesiana. ....   | 159 |
| Figura 54. a) Media y b) desviación estándar posterior para la distribución de probabilidad predictiva de la presencia de jurel en el Pacífico suroriental. ....   | 160 |
| Figura 55. a) serie del índice de El Niño oscilación del sur en la región ecuatorial 3-4 para el período 1997-2017; b) diagrama espacio-tiempo de la temperatura superficial del mar en la banda de los primeros 100 km de la costa; c) diagrama-espacio tiempo interanual de la temperatura superficial del mar. ....                   | 163 |
| Figura 56. a) serie del índice de El Niño oscilación del sur en la región ecuatorial 3-4 para el período 1997-2017; b) diagrama espacio-tiempo de la anomalía del nivel del mar en la banda de los primeros 100 km de la costa; c) diagrama-espacio tiempo interanual de la anomalía del nivel del mar. ....                             | 164 |
| Figura 57. a) serie del índice de El Niño oscilación del sur en la región ecuatorial 3-4 para el período 1997-2017; b) diagrama espacio-tiempo de la profundidad de la termoclina en la banda de los primeros 100 km de la costa; c) diagrama-espacio tiempo interanual de la profundidad de la termoclina. ....                         | 165 |
| Figura 58. a) serie del índice de El Niño oscilación del sur en la región ecuatorial 3-4 para el período 1997-2017; b) diagrama espacio-tiempo de la profundidad de la nutriclina en la banda de los primeros 100 km de la costa; c) diagrama-espacio tiempo interanual de la profundidad de la nutriclina. ....                         | 166 |

Figura 59. a) serie del índice de El Niño oscilación del sur en la región ecuatorial 3-4 para el período 1997-2017; b) diagrama espacio-tiempo de la profundidad de la oxiclina en la banda de los primeros 100 km de la costa; c) diagrama-espacio tiempo interanual de la profundidad de la oxiclina. ....168

Figura 60. a) serie del índice de El Niño oscilación del sur en la región ecuatorial 3-4 para el período 1997-2017; b) diagrama espacio-tiempo de la clorofila superficial en la banda de los primeros 100 km de la costa; c) diagrama-espacio tiempo interanual de la clorofila superficial.....170

Figura 61. Probabilidad media posterior para la ocurrencia de jurel en el Pacífico suroriental basada en modelación jerárquica bayesiana mediante INLA para el evento El Niño 1997-1998. ....172

Figura 62. Probabilidad media posterior para la ocurrencia de jurel en el Pacífico suroriental basada en modelación jerárquica bayesiana mediante INLA para el evento La Niña 2007. ....174

Figura 63. Imágenes del desarrollo del primer día de Taller "Actualización del estado del conocimiento de la estructura poblacional de jurel en el Pacífico Suroriental". ....183

Figura 64. Tres esquemas de poblaciones espacialmente estructuradas, con curvas de dispersión para cada población local; a) red de poblaciones locales cerradas sin intercambio entre ellas; b) metapoblación, y; c) población con parches de alta densidad distribuidos en una "super-población" (modificada de Kritzer & Sale, 2004). ....205

Figura 65. Distribución general de huevos de jurel en el Pacífico suroriental con observaciones realizadas entre 1972 y 2005. Puntos azules indican estaciones de muestreo sin presencia de huevos de jurel y puntos rojos donde huevos fueron observados. Línea azul muestra la delimitación de registros con presencia de huevos (tomada de Gerlotto *et al.*, 2012). .....208

Figura 66. Escenarios de las operaciones espaciales de las flotas pesqueras asociadas a la distribución espacial de jurel en el Pacífico sur entre los años 1972-2017. ....223

Figura 67. Capturas anuales de jurel realizadas por flotas chilenas, peruanas e internacionales (base de datos del Servicio Nacional de Pesca de Chile, Instituto de Investigación Pesquera y Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). Se indican las regulaciones y medidas de manejo implementadas desde 1982. La línea roja corresponde a las capturas de la flota cerquera del centro-sur de Chile. ....224



Figura 68. 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; Grechina, 1998). .....227

Figura 69. Esquemas conceptuales de la estructura espacio-temporal de la población de jurel en el Pacífico Sur entre los años 1980-2017. ....230

Figura 70. Imágenes del desarrollo del Taller. ....360

## INDICE DE ANEXOS

---

|  |     |
|--|-----|
| Anexo I. Listado de registros bibliográficos para la determinación de factores críticos del hábitat de jurel en el Pacífico suroriental .....  | 251 |
| Anexo II. Acta de reunión de coordinación con Subsecretaría de Pesca y Fondo de Investigación Pesquera y Acuicultura .....   | 274 |
| Anexo III. Presentación Dr Vincent Echevin "The coastal impact of the 2015-2016 "El Niño" and 2017 "El Niño costero" events off Peru: analysis of in-situ measurements, satellite data and model experiments", Talcahuano 27 de julio de 2018..... | 281 |
| Anexo IV. Documentación elaborada para la implementación del taller de expertos "Taller de actualización del estado del conocimiento de la estructura poblacional de jurel en el Pacífico Suroriental".....  | 330 |
| Anexo V. Definición de stock hacia el manejo del jurel en el Pacífico sur: aspectos metodológicos para un manejo integrado .....   | 334 |
| Anexo VI. Informe Taller de presentación y discusión de resultados proyecto FIPA 2017-62 ..  | 348 |
| Anexo VII. Configuración del modelo hidrodinámico y biogeoquímico ROMS-PISCES.....   | 364 |
| Anexo VIII. Publicaciones derivadas del proyecto .....   | 409 |

## 1.- RESUMEN EJECUTIVO

---

En el presente informe, se entregan la totalidad de resultados obtenidos en el contexto del proyecto FIPA 2017-62 “Dinámica poblacional de juveniles y adultos de jurel basada en modelación biofísica”. Los principales focos de este informe son: i) la identificación de factores críticos del hábitat de jurel en su distribución en el Pacífico suroriental considerando distintas etapas de su ciclo de vida; ii) la implementación de un modelo hidrodinámico y biogeoquímico para el Pacífico suroriental; iii) la implementación de modelos espacialmente explícitos que aborden la dinámica espacial de jurel para el entendimiento de su estructura poblacional; iv) el análisis espacio temporal de las variables biofísicas que determinan la variabilidad del hábitat de jurel; v) el impacto de la variabilidad del hábitat en la estructuración espacial de jurel en el Pacífico suroriental; vi) la identificación de las fortalezas y debilidades de todo el ámbito abarcado por el estudio y el establecimiento de líneas de desarrollo/necesidades de investigación para avanzar en el estudio de la estructura poblacional de jurel en el Pacífico suroriental.

Se informan los resultados de una detallada revisión bibliográfica para la determinación de factores críticos del hábitat de jurel que actúan como forzantes de la distribucionales de jurel como respuesta a la variabilidad del hábitat. Se definieron los factores críticos como *aquellos factores, variables o índices, que representen procesos físicos, químicos, biológicos o ecológicos, que sean útiles para delimitar el hábitat efectivo de juveniles y adultos de jurel en el Pacífico suroriental, y que modulen significativamente su variabilidad espacio-temporal*. Desde el análisis realizado, se identificaron como factores críticos en distintos ámbitos, a saber: i) presas potenciales (ámbito ecológico): microzooplancton, mesozooplancton, clorofila-a; ii) variables hidrográficas (ámbito físico-químico): temperatura, oxígeno disuelto, salinidad, densidad del agua de mar, iii) variables hidrodinámicas y atmosféricas (ámbito físico-químico): corrientes, eddy kinetic energy, viento y turbulencia, altura del nivel del mar, y; iv) variables de posición: latitud, longitud, distancia de la costa.

Uno de los objetivos más ambiciosos de este proyecto fue la implementación de un modelo biogeoquímico acoplado a un modelo hidrodinámico para reproducir los proceso de circulación, enriquecimiento y productividad y su variabilidad interanual en el Pacífico suroriental. Se

implementó el modelo biogeoquímico PISCES (*Pelagic Interactions Scheme for Carbon and Ecosystem Studies*) acoplado al modelo hidrodinámico ROMS (*Regional Ocean Modeling System*) con 20 km de resolución espacial y temporal diaria para un dominio que cubrió todo el Pacífico suroriental y para el periodo 1994-2017. Una de las variables claves que proporciona el modelo ROMS-PISCES es el oxígeno disuelto, que constituye una variable clave para el ecosistema pelágico. Para una mejor representación de la zona de mínima se implementó un modelo anidado de mayor resolución (7 km) en la región costera del sur de Perú y el norte de Chile. El modelo ROMS-PISCES fue validado mediante diversos análisis comparativos evidenciando un buen desempeño en reproducir la variabilidad espacio-temporal tanto de las variables hidrodinámicas como de las biogeoquímicas. De esta manera, el modelo implementado constituyó la base para el estudio de hábitat de jurel, su variabilidad espacio temporal y los impactos sobre la distribución de la especie en el Pacífico suroriental.

A partir del acoplamiento de las variables biofísicas del hábitat de con información biológica de jurel se implementó un esquema de modelación para analizar procesos relacionados con: i) la extensión y variabilidad del área de desove de jurel en el Pacífico suroriental; ii) el proceso de transporte de estadíos tempranos hacia la distribución y sobrevivencia de juveniles de jurel; iii) la distribución hábitat basada de adultos de jurel mediante incorporación de información proveniente de todas las flotas que explotan a este recurso. En este contexto, los principales procesos identificados en este proyecto fueron:

i) el desove constituye un proceso clave para la mezcla poblacional. El área potencial de desove es extensa y asociada al frente subtropical, con mayor densidad en la zona oceánica frente a Chile centro-sur y menores densidades hacia el sector costero del norte de Chile y Perú. La ocupación del área potencial de desove estaría relacionada al tamaño poblacional, volviéndose más parchosa durante periodos de baja biomasa.

ii) La dispersión de huevos y larvas de jurel promueve a) el transporte desde el sector oceánico donde se desarrolla mayoritariamente desove, hacia el sector costero, b) este proceso establece conectividad de la zona de crianza con áreas de desove; c) finalmente provee un mecanismo para la mezcla poblacional.

iii) La temperatura, la biomasa fitoplanctónica (i.e. clorofila) son factores críticos que modulan la extensión del hábitat de jurel. Altas temperaturas y bajos contenidos de biomasa fitoplanctónica limitan la presencia de jurel. El jurel se distribuye mayoritariamente en aguas oxigenadas, aunque tiene el potencial de incursionar en regiones con ZMO somera.

iv) La mayor proporción de hábitat de jurel se encuentra en la zona centro-sur de Chile extendiéndose hacia la zona oceánica. Existe mayor grado de segregación espacial del hábitat de jurel durante verano con cierto nivel de discontinuidad entre  $\sim 18^{\circ}\text{S}$  y  $22^{\circ}\text{S}$ . En primavera existe una continuidad espacial del hábitat entre Ecuador y la zona oceánica frente a Chile centro-sur.

v) Eventos El Niño promueven cambios importantes en el hábitat de jurel afectando su estructuración espacial. Se establece una disminución del hábitat favorable a jurel en el extremo norte de distribución (costa de Ecuador y Perú) promoviendo movimientos hacia el sur. Además, se observa una disminución de la circulación hacia el norte impactando la conectividad mediada por el transporte de huevos y larvas.

Además, se informa el resultado de talleres participativos en los que se reunieron distintos estamentos involucrado en el estudio y manejo de jurel en Chile para definir las fortalezas y debilidades de este proyecto, además de delinear las necesidades de investigación para fortalecer el estudio de la estructura poblacional de la especie en el Pacífico suroriental.

Finalmente, se discuten extensamente los impactos que tienen los resultados de este proyecto en la definición de la estructura poblacional de la especie en el Pacífico suroriental en el marco de la asesoría hacia la contraparte técnica y su participación en el comité científico de la Organización Regional de Pesca del Pacífico suroriental. En este contexto y como recomendación al contrastar los antecedentes expuestos y los nuevos resultados emergentes de este proyecto hacia las diferentes hipótesis de la estructura poblacional se propone *la existencia de una población única de jurel distribuida tanto en las aguas costeras de Ecuador Perú y Chile como en las aguas oceánicas abiertas. Existe un ciclo biológico sincrónico para todo el Pacífico suroriental con desove primaveral, espacialmente asociado al frente subtropical. El transporte de huevos y larvas promueve la conectividad poblacional y sustenta un área de crianza situada entre el sur*

*de Perú y el norte de Chile. Los niveles de heterogeneidad espacial pueden estar vinculados a la ocupación del hábitat durante el proceso de alimentación y crecimiento.*

## EXECUTIVE SUMMARY

---

In this report, the results obtained in the FIPA 2017-62 project "Population dynamics of jack mackerel juveniles and adults based on biophysical modeling" are presented. The main objectives of this project were: i) the identification of environmental critical factors of the jack mackerel habitat in its entire range of distribution in the southeastern Pacific considering different stages of its life cycle; ii) the implementation of a hydrodynamic and biogeochemical model for the southeastern Pacific; iii) the implementation of spatially explicit models that address the spatial dynamics of jack mackerel in order to understand its population structure; iv) the spatio-temporal analysis of the biophysical variables that determine the variability of the jack mackerel habitat; v) the assessment of the likely impact of habitat variability on the spatial structure of the jack mackerel population in the southeastern Pacific; vi) the identification of the achievements and shortcomings of the entire scope covered by the study and the identification of lines of research to advance in the study of the population structure of jack mackerel in the southeastern Pacific.

The results of a detailed bibliographic review for the determination of critical habitat factors that would modulate the distribution of jack mackerel in response to environmental variability are reported. Critical factors were defined as those physical, chemical, biological or ecological processes that define the effective habitat of juvenile and adult jack mackerel in the southeastern Pacific, and that significantly modulate their spatio-temporal variability. From the analysis carried out, the following critical factors were identified as: i) potential preys (ecological environment): microzooplankton, mesozooplankton, chlorophyll-a; ii) hydrographic variables (physical-chemical range): temperature, dissolved oxygen, salinity, density of seawater, iii) hydrodynamic and atmospheric variables (physical-chemical range): currents velocity, eddy kinetic energy, wind and turbulence, height of the sea level and iv) position variables: latitude, longitude, distance from the coast.

One of the most ambitious objectives of this project was the implementation of a biogeochemical model coupled with a hydrodynamic model to reproduce the circulation, enrichment and productivity processes and their interannual variability in the southeastern Pacific. The biogeochemical model PISCES (Pelagic Interactions Scheme for Carbon and Ecosystem Studies)

coupled to the hydrodynamic model ROMS (Regional Ocean Modeling System) with 20 km of spatial resolution and daily temporal resolution was implemented for a domain that covered the entire southeastern Pacific for the period 1994-2017. One of the key variables provided by the ROMS-PISCES model is dissolved oxygen, which is a key variable for the pelagic ecosystem. For a better representation of the oxygen minimum zone, a higher resolution nested model (7 km) was implemented in the coastal region of southern Peru and northern Chile. The ROMS-PISCES model was validated through a suite of comparative analyzes revealing a good performance in reproducing the spatio-temporal variability of both the hydrodynamic and biogeochemical variables. In this way, the implemented model formed the basis for the study of jack mackerel habitat, its spatio-temporal variability and the impacts on the distribution of the species in the southeastern Pacific.

Through the coupling of the biophysical variables of the jack mackerel habitat with population biological information, a modeling scheme was implemented to analyze processes related to: i) the extension and variability of the jack mackerel spawning area in the southeastern Pacific; ii) transport of early stages and its impact on the distribution and survival of juvenile jack mackerel; iii) habitat-based distribution of jack mackerel adults by incorporating information from all fishing fleets. The main processes identified in this project were:

i) Spawning is a key process for population mixing. The potential spawning area is extensive and associated with the subtropical front, with higher density off central-southern Chile and lower densities in the coastal sector of northern Chile and Peru. The occupation of the potential spawning area would be related to the population size, becoming more patchy during periods of low biomass.

ii) The dispersal of jack mackerel eggs and larvae promotes: a) transport from the oceanic region where spawning occurs mostly to the coastal sector, b) this process promotes connectivity of the nursery grounds with spawning areas; c) finally provides a mechanism for population mixing suggesting a common larval pool.

iii) Temperature, phytoplankton biomass (i.e. chlorophyll) are critical factors that modulate the extent of jack mackerel habitat. High temperatures and low contents of phytoplankton biomass limit the presence of jack mackerel. The species is mainly distributed in oxygenated waters, although it has the potential to enter regions with shallow oxygen minimum zones.



- iv) The highest proportion of jack mackerel habitat occurs off central-southern Chile, extending towards the oceanic zone. Some degree of spatial segregation in jack mackerel hábitat is observed during summer with a certain discontinuity between  $\sim 18^{\circ}\text{S}$  and  $22^{\circ}\text{S}$ . In spring there is a spatial continuity of the habitat between Ecuador and the oceanic zone off central-southern Chile.
- v) El Niño events promote important changes in jack mackerel habitat, affecting its spatial structure. A decrease in habitat favorable to jack mackerel is registred in the northern edge of distribution (coast of Ecuador and Peru) promoting movements towards the south. In addition, a decrease in northward oceanic circulation is observed, impacting connectivity mediated by the transport of eggs and larvae.

The results from the stakeholders workshop of the Chilean jack mackerel fishery are reported. Shortcomings and strengths of the scope of the study were discussed. Research topics to advance the understanding of the structure of the jack mackerel population in the southeastern Pacific were acknowledged.

Finally, as part of the technical advice, the findings of this project towards the definition of the population structure of the species in the southeastern Pacific are extensively discussed. In this context, based on the literatura review and the new emerging results of this project, it is proposed: the existence of a unique population of jack mackerel distributed both in the coastal waters of Ecuador, Peru and Chile, as well as in open ocean waters. There is a synchronous biological cycle for the entire southeastern Pacific with spring spawning, spatially associated with the subtropical front. The transport of eggs and larvae promotes population connectivity and supports a nursery area located between southern Peru and northern Chile. The degrees of population spatial heterogeneity may be linked to the occupation of the habitat during the feeding and growth process.

## 2.- 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, Gretchina *et al.*, 1998). En esta misma región, luego de 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 se sugiere coincidente con el término de un régimen climático cálido y el inicio de un régimen climático frío en el Pacífico Suroriental (SWG-11-8a, SPRFMO, 2012). A contar del 2001 comienza un período de ordenamiento de la pesquería con la entrada en vigencia de la Ley de Capturas Máximas por Armador. En el período 2002-2006 los desembarques de jurel en la zona centro-sur bordearon en promedio los 1,2 millones de toneladas anuales, verificándose un incremento de su talla media de 26 cm de LH en el año 2002 a 32 cm de LH en el año 2006. El año 2007 si bien se mantuvo la magnitud del desembarque, la flota no logró capturar la totalidad de la cuota asignada, quedando un remanente superior a doscientas mil toneladas, producto principalmente de la baja disponibilidad del recurso en las áreas históricas (próximas a las costas) de pesca. Desde el año 2008, a pesar de inclusión activa de las zonas oceánicas a la pesquería, como fue ya indicado, la tendencia de quedarse con un remanente no capturado de la cuota asignada se mantiene, como se mantiene también una tendencia progresiva hacia la disminución de las capturas anuales totales en la zona centro-sur: desde 1,13 millones toneladas en 2007 hasta 195 mil toneladas en 2010 (SWG-03, SPRFMO, 2012); para estabilizarse en un nivel de 210 mil toneladas en 2012-2013, nivel de cuota regulada por la Subsecretaría de Pesca y en atención a las recomendaciones de la Organización Regional del Pacífico Sur (ORP-PS).

En base a la información disponible sobre la distribución espacial de los lances de pesca del jurel por la flota industrial de la zona centro-sur de Chile entre los años 1995-2012, es posible distinguir por lo menos 4 períodos diferenciados entre sí principalmente por la distancia entre las zonas de pesca y los puertos de desembarques y, por la cobertura espacial de áreas de operaciones de la flota durante la temporada anual de pesca. Estos períodos son: 1) período 1995-2002: con la distribución de operaciones de la flota próxima a las costas de las regiones de Valparaíso y Bío Bío durante todo el año; 2) período 2003-2007: con la distribución de lances de pesca durante la época de engorda (enero-mayo) en la zona costera y desde la costa hacia el océano abierto (hacia el noroeste) durante el período pre-desove (junio-octubre), para dispersarse en noviembre en una supuesta zona de desove en el sector entre 31°-34°S, al Oeste de los 80°-82°W; 3) período 2008-2011: caracterizado por la operación pesquera en la zona costera, principalmente entre las regiones de Valparaíso y Los Lagos, entre enero-marzo, y por la distribución casi completamente

oceánica, fuera de la ZEE de Chile centro-sur, entre marzo-abril y agosto-septiembre; ésta última con clara tendencia hacia el área de desove durante junio-septiembre, por una ruta más oceánica y paralela a la registrada durante el período anterior que, a su vez puede indicar un alejamiento del área de desove hacia el Oeste de los 84°-86°W; 4) período 2012-2013: las operaciones pesqueras se concentran exclusivamente dentro de la ZEE de Chile central, con una distribución espacial próxima a la costa principalmente entre enero y mayo-junio, sin registros de concentraciones comerciales de jurel para la pesca con red de cerco en las zonas oceánicas adyacentes.

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

Prácticamente el mismo comportamiento dentro de una temporada de pesca de los años 2009-2011 presentó la distribución espacial de las embarcaciones pesqueras (lances, zonas de pesca) de las flotas internacionales. Éstas operaron en los mismos sectores que la flota chilena, afectadas por la misma tendencia hacia la reducción de las zonas oceánicas de pesca y capturas de jurel, las que siguen durante el mismo período (junio-septiembre) a las concentraciones de peces que migran hacia el área de desove y abandonan la región con la dispersión de los cardúmenes predesovantes de jurel desde septiembre-octubre. La única diferencia entre el comportamiento intra-anual de ambas flotas (chilena e internacional) radica en que la flota internacional detectó agregaciones predesovantes en sectores ubicados más hacia el Oeste, prácticamente hasta los

120°W (2009) por la línea de los 34-35°S aproximadamente. Este último antecedente, en conjunto con lo precitado en base de análisis de la distribución espacial de jurel predesovante en áreas de operación de la flota nacional, puede indicar una extensión amplia meridionalmente del posible área de desove de jurel, posicionada por lo menos entre 82°-84° y 110°-120°W y al Norte de 37°-35°S.

La confirmación de tal distribución de las agregaciones de jurel dentro de una temporada anual de pesca, detectada en base de las operaciones pesqueras de las flotas nacional e internacional, fue obtenida durante los estudios continuos de INPESCA efectuados a bordo de un barco de búsqueda e investigación pesquera (BBIP) Biomar III durante los años 2009 y 2010. Destaca en estos estudios una similitud en el comportamiento espacial del recurso jurel (en base a estudios acústicos de biomasa instantánea y de la posición espacial de las zonas mensuales de pesca) tanto en la zona costera como oceánica, en la temporalidad de las migraciones de las concentraciones de peces desde la zona de engorda hacia la zona de desove (junio-septiembre), y en la dispersión de los cardúmenes a partir del mes de septiembre. Sin embargo, entre estos dos años destacan también diferencias importantes, a saber: en 2010 aumenta significativamente la distancia entre la distribución costera y oceánica de jurel al respecto de 2009, así como también se desplaza más al oeste la zona de dispersión del recurso durante septiembre, desde 85-86°W en 2009 hacia 88-90°W en 2010 lo que puede indicar un posible desplazamiento hacia el Oeste entre estos años de las zonas del desove próximo.

Por otra parte, durante agosto-noviembre de 2009 en el área oceánica frente las costas de Chile se desarrolló un crucero de investigación pesquera sobre jurel por el BIC Atlantida (AtlantNIRO, Rusia). En este crucero se delimitó un área continua y dispersa de jurel predesovante comprendida entre 33-38°S desde la ZEE de Chile hasta 125°W, con una densidad promedio de 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 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 (AtlantNIRO, 2003), concluyendo en una disminución significativa de la abundancia del recurso entre los años 2002 y 2009.

En base a la información sobre el área de distribución de jurel obtenida en el crucero de BIC Atlantida en 2009 y los desplazamientos mensuales de las zonas de operaciones pesqueras de la flota de Chile centro-sur y de la flota internacional durante la temporada de pesca 2009, se confeccionó un esquema del ciclo migratorio de jurel en el que se establece que las rutas operacionales de ambas flotas terminan (septiembre-noviembre) en el área delimitada por el BIC Atlantida y la cual puede ser un área de desove. Sin embargo, se debe considerar que a pesar que éste es bastante continuo, su extensión zonal es muy reducida. Basándose solo en los datos de la dinámica interanual de los desembarques de jurel en el Pacífico Suroriental durante los últimos 10-12 años, se ve claramente que el recurso presenta signos de disminución importante en su disponibilidad para las flotas pesqueras tanto en las zonas costeras de Chile como en aguas internacionales, y que puede relacionarse con una disminución generalizada y progresiva de su abundancia en nivel poblacional. Al mismo tiempo, analizando la dinámica interanual de las frecuencias de tamaños de jurel en las capturas de la flota nacional durante el período entre los años 2008-2013 (base datos de INPESCA), en la zona de distribución costera (de diciembre a abril-mayo) y la zona de distribución oceánica, fuera de la ZEE (de marzo a septiembre-octubre), es posible precisar unas importantes diferencias. En primer lugar, en la costera la pesquería de jurel está representada principalmente por los peces entre 23-25 y 40-42 cm de LH, sin embargo el mayor porcentaje de ejemplares son de tamaños entre 25-36 cm. Dentro de este rango es posible distinguir 2-3 clases de tamaños modales, de los cuales lo más repetitivos son 29-32 cm y 25-27 cm, además de 34-35 cm presente en 2012. La presencia relativamente frecuente de peces de menor tamaño (hasta 26-28 cm de LH) en las capturas de dicha zona, especialmente durante el año 2010, puede indicar la entrada relativamente constante de nuevos reclutamientos de peces. Sin embargo, éstos no siempre son reflejados de manera íntegra en las capturas de la flota que trata evitar los sectores con una alta presencia de peces menores a los 26 cm de LH.

Por el contrario, en la zona oceánica durante las temporadas de pesca de 2008-2011 (en 2012-2013 la flota nacional no ha operado en dicha zona), destaca la ausencia de peces menores a 32 (2008) – 35 (2011) cm LH y la presencia de los ejemplares hasta 50 cm y más. Por otro lado, entre los años (2008-2011) es posible observar un aumento gradual de tamaños modales en las capturas, desde los 34-35 cm en 2008 hasta los 39-40 cm en 2011, y esto sin ingreso a la pesquería oceánica de los peces de menor tamaño. De esta manera, lo anterior supone un

progresivo “envejecimiento” del grupo poblacional distribuido en aguas internacionales frente a Chile centro-sur, posiblemente debido a un aislamiento temporal durante el período analizado.

Una conclusión similar es posible establecer del análisis de la dinámica de las frecuencias de tallas desde la flota de la Unión Europea entre los años 2007-2011, que indica un progresivo aumento de los tamaños modales de peces desde 32 cm en 2007 hasta 40 cm de LH en 2011 (Corten & Janusz, 2010), confirmando que la operación de esta flota sobre peces de una a dos generaciones seguidas que en su tiempo colonizaron la parte oceánica del área de distribución y que han permanecido envejeciendo en ésta. Sin embargo, durante los años 2010-2011 se detecta también un grupo de peces de menor tamaño (modas 19-20 y 27-29 cm de LH respectivamente). Se supone que esta generación no está relacionada con la zona costera del Pacífico Suroriental, sino más bien es el producto del desove exitoso local en fines de 2008- inicio de 2009 en el área de los bajos submarinos ubicada entre 100-120°W (AtlantNIRO, 2010; Parada *et al.*, 2017; V. Anikeev *com pers*, AtlantNIRO) sobre los reportes de los capitanes de algunas embarcaciones de dicha flota). Sin embargo, los peces de esta generación no se reportan de las capturas de la flota oceánica del Perú en la temporada de pesca de 2012 (SC-01-12, SPRFMO, 2013) lo que puede indicar su bajo aporte a la formación de la abundancia total en la región. Al contrario, en 2012 ha continuado la tendencia generalizada de envejecimiento poblacional de jurel en aguas abiertas del Pacífico Sur; en las capturas se registraron solamente los peces de tamaños superiores a los 36 cm de LT, con una moda principal centrada a los 45 cm de LT (41-42 cm de LH) (SWG-11-08 (rev1), SPRFMO, 2012).

El jurel, es un pez pelágico de tamaño medio, que posee una amplia distribución en el océano Pacífico suroriental, habitando desde las costas de Chile y Perú hasta más allá de las 1000 millas frente a Chile centro-sur. Una fracción de este stock alcanza las aguas de Nueva Zelanda y Tasmania (Cárdenas *et al.*, 2009). De acuerdo a antecedentes biológico-pesqueros, *T. murphyi* muestra un fuerte patrón migratorio relacionado a procesos de alimentación y reproducción, con una migración hacia la zona oceánica durante primavera en donde se desarrolla el desove, y una migración hacia la costa durante la época otoñal relacionada con una mayor disponibilidad de alimento en el sector costero (Quiñones *et al.* 1997, Arcos *et al.*, 2001, Cubillos *et al.*, 2008). De acuerdo a lo reportado a la fecha, la estructura poblacional del jurel incluye tres hábitats

diferentes: i) un área de crianza situada en el sur de Perú y norte de Chile, ii) un área de alimentación ubicada en la zona centro-sur de Chile, en donde ocurre el reclutamiento (individuos de 2-3 años de edad) y finalmente, iii) una extensa área de desove situada en la zona oceánica frente a Chile en donde se lleva a cabo la reproducción durante la primavera (Arcos *et al.*, 2001). Dicha zona de desove es recurrente a través de los años y muestra una alta actividad reproductiva desde octubre a diciembre, con un máximo en noviembre. En este periodo el jurel, bajo condiciones de alta fecundidad, se dispersa hacia una vasta área en aguas oceánicas, sin formar cardúmenes o agregaciones comerciales (Konchina *et al.*, 1996; Barbieri *et al.*, 1999; Cubillos *et al.*, 2008). Incluir antecedentes sobre el desove en Perú

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



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

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

Durante las últimas décadas, la población del jurel ha disminuido en su tamaño poblacional, influenciando su estructura espacial (Zhu *et al.*, 2014; Gretchina *et al.*, 2015). Varios factores pueden ser atribuidos como causantes de estas variaciones, particularmente la sobrepesca. Sin embargo, estudios paleoceanográficos (Salvatecci, 2013) han demostrado que los niveles de biomasa han evidenciado fluctuaciones con anterioridad al comienzo de la pesquería comercial, sugiriendo que el ambiente es un factor clave en la modulación de los patrones poblacionales del jurel (Bertrand *et al.*, 2016). En este contexto la Organización de Pesca del Pacífico Sur (OROP-PS) tiene dentro de sus objetivos el manejo de la población de jurel y el establecimiento de niveles de capturas globales para el Pacífico sur, los cuales están estrechamente ligados al modelo conceptual de la dinámica poblacional de la especie, incluyendo la estructura poblacional. Considerando como hipótesis inicial que la población del jurel es sensible a los cambios del medio ambiente, el entendimiento de estas relaciones pueden entregar señales importantes respecto a la dinámica espacio-temporal de la especie y finalmente a la estructura de la población. En este contexto, en el marco de la OROP-PS han sido propuestas varias hipótesis respecto a la estructura poblacional del jurel en el Pacífico sur, variando desde una población única a varias poblaciones discretas (Gerlotto *et al.*, 2010). En este contexto, es aún una temática controversial y no resuelta aunque las hipótesis más plausibles han sido resumidas a la de meta-población pelágica (Gerlotto *et al.*, 2012; Hintzen *et al.*, 2014) y a la de población única (Gretchina *et al.*,

2015; Vásquez *et al.*, 2017). La continuidad de hábitat del jurel a lo largo de su área de distribución podría favorecer la ocurrencia de una población única, mientras que la presencia de discontinuidades ambientales o barreras físicas o de productividad biológica podrían propiciar la formación de múltiples poblaciones discretas (Bertrand *et al.*, 2016). De esta forma, es altamente necesario el establecimiento de la dinámica espacial del jurel bajo un escenario ambiental cambiante, para hacer emerger información que sustente la discusión respecto a la estructura poblacional para apoyar el manejo pesquero a nivel del Pacífico suroriental.

En las últimas dos décadas, en conjunto con el rápido crecimiento de la capacidad computacional, se han desarrollado modelos numéricos hidrodinámicos de escala regional, los que están disponibles para describir la circulación de distintas cuencas alrededor del mundo en forma realista (Haidvogel & Beckmann, 1998), los cuales más recientemente han sido acoplados con modelos biogeoquímico que simulan la productividad y los ciclos del carbono y de los principales nutrientes como el fósforo, nitrógeno, silicato y hierro), así como la dinámica del oxígeno disuelto (Aumont & Bopp, 2006; Aumont *et al.*, 2015). La disponibilidad de estos modelos permiten resolver tridimensionalmente los procesos bio-oceanográficos que constituyen el hábitat de las especies marinas y realizar inferencias respecto a sus cambios e impactos en las poblaciones (Pecuchet *et al.*, 2016). Además, estos modelos permiten disponer de un escenario continuo espacio-temporalmente para ser contrastados con información relativa a la distribución espacial de los recursos mediante modelos de predicción y simulación espacial. En consecuencia en el presente estudio, mediante herramientas de modelación y estadísticas, resolver preguntas relativas a: i) la variabilidad espacio-temporal del hábitat tridimensional de jurel en el Pacífico suroriental; ii) la influencia de cambios espaciales en la distribución de variables hidrográficas y biológicas sobre la dinámica espacial de juveniles y adultos de jurel; iii) la influencia de la dinámica espacio temporal de la relación ambiente-recurso en la estructura espacial de jurel en el Pacífico suroriental, y iv) los desafíos futuros de esta línea de investigación hacia la validación de las hipótesis de estructura poblacional y su impacto en el manejo pesquero integrado.

### 3.- DESCRIPCION DE ACTIVIDADES DEL EQUIPO DE TRABAJO

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

| Personal profesional | Título académico         | Función   |
|----------------------|--------------------------|---|
| Sebastián Vásquez P. | Magíster en Pesquerías   | Jefe Proyecto, coordinación general del proyecto. Reuniones consultivas con FIPA. Desarrollo e implementación del modelo biofísico espacial para jurel. Validación de los modelos hidrodinámicos y biogeoquímico. Asistencia logística en todos los talleres. Confección informes. Redacción de publicación.  |
| Aquiles Sepúlveda O. | PhD Oceanography         | Análisis bibliográfico para la determinación de factores críticos. Discusión del modelo conceptual de la historia de vida de jurel en el pacífico suroriental. Representante OROP-PS Inclusión de resultados provenientes de la modelación espacial en la discusión respecto a la estructura poblacional de jurel en el Pacífico suroriental. Gestión de datos hacia la secretaría ejecutiva de la SPRFMO. Participación en el panel de expertos del Taller incluido en el objetivo específico 6. |
| Cristian Salas D.    | Dr. en Ciencias Físicas  | Encargado de modelación hidrodinámica y biogeoquímica. Análisis de los forzantes físicos asociados a la distribución espacial de jurel. Descripción, análisis y validación de los modelos hidrodinámicos y biogeoquímico. Corridas de modelos interdecadales y generación de variables de salidas. Presentación en talleres. Confección de Informes.  |
| Sergio Núñez E.      | Magíster en Oceanografía | Análisis bibliográfico para la determinación de factores críticos. Discusión del modelo conceptual de la historia de vida de jurel en el pacífico suroriental. Oceanografía física e identificación de factores críticos para la distribución espacial de jurel. Coordinación logística del grupo de trabajo asociado al objetivo específico 1. Presentación en talleres. Confección de Informes. Participación en el panel de expertos del Taller incluido en el objetivo específico 6.          |

|                     |                        |   |
|---------------------|------------------------|---|
| Alexander Gretchina | PhD in Zoology         | Revisión bibliográfica hacia la identificación de factores críticos del hábitat de jurel. Discusión del modelo conceptual de la estructura poblacional de jurel en el Pacífico suroriental. Revisión y ordenamiento de datos referenciados espacio-temporalmente para ser incluidos en el proceso de modelación. Participación en el panel de expertos del Taller incluido en el objetivo específico 6.                   |
| Carlos González     | Tecnólogo Marino       | Revisión bibliográfica hacia la identificación de factores críticos del hábitat de jurel. Discusión del modelo conceptual de la estructura poblacional de jurel en el Pacífico suroriental. Revisión y ordenamiento de datos referenciados espacio-temporalmente de la flota industrial centro-sur para ser incluidos en el proceso de modelación. Coordinación del taller de expertos asociado al objetivo específico 6. |
| Nicolás Alegría L.  | Biólogo Marino         | Revisión bibliográfica hacia la identificación de factores críticos del hábitat de jurel. Análisis y ordenamiento de información acústica proveniente de cruceros de investigación, así como de la operación de la flota que opera sobre jurel en la zona centro-sur de Chile.  |
| Marcos Arteaga      | Magíster en Pesquerías | Análisis descriptivo de la dinámica poblacional de jurel en el Pacífico suroriental. Revisión del modelo de evaluación de stock conjunto para el Pacífico suroriental generado por la SPRFMO. Coordinación del taller de expertos asociado al objetivo específico 6.  |
| Claudio Gatica      | Magíster en Pesquerías | Análisis descriptivo de la dinámica poblacional de jurel en el Pacífico suroriental. Revisión del modelo de evaluación de stock conjunto para el Pacífico suroriental generado por la SPRFMO.   |

|                    |  |  |
|--------------------|--|--|
| Roberto San Martín | Magister en Ecología                                       | Diseño e implementación de talleres de discusión experta. Identificación de fortalezas y debilidades en todo el ámbito de desarrollo del proyecto. Discusión de la estructura poblacional de jurel.        |
| Patric Contreras   | Técnico en Administración de redes y soporte computacional | Implementación, mantenimiento y funcionamiento de las unidades computacionales necesarias para cumplir los distintos objetivos del proyecto asociados a la modelación hidrodinámica y modelación biofísica |

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

| Personal profesional  | Título académico       | Función  |
|-----------------------|------------------------|--|
| Vincent Echevin       | PhD., Climate Sciences | Experto internacional. Modelación hidrodinámica y biofísica. Implementación de modelo biogeoquímico PISCES para la zona de estudio. Participación en talleres de trabajo y discusión.  |
| Andrés Ospina-Álvarez | PhD. Marine Sciences   | Participación como experto especialista en modelación biofísica y en dinámica poblacional. Diseño e implementación de modelo espacial acoplado a PISCES para la simulación de la distribución espacial de jurel en el Pacífico suroriental. Revisión de desempeño de la configuración y validación del modelo. |

A continuación se definen las actividades definidas para el proyecto y los profesionales involucrados en cada una de ellas:

| <b>Plan de Actividades</b>   | <b>Profesionales involucrados</b>   |
|--|---|
| <b>1. Implementación del proyecto</b>  |   |
| Reuniones de coordinación científica y técnica del Grupo de trabajo (GT) local         | Sergio Núñez, Cristian Salas, Aquiles Sepúlveda, Alexander Gretchina, Carlos González, Marcos Arteaga, Claudio Gatica y Sebastián Vásquez |
| Reuniones de coordinación científica y técnica del Grupo de trabajo (GT) internacional | Cristian Salas, Aquiles Sepúlveda, Sebastián Vásquez, Andrés Ospina-Álvarez, Vincent Echevin  |
| Reunión de coordinación del proyecto con FIPA y SubPesca                               | Aquiles Sepúlveda, Mario Acevedo, Luis Carroza y Sebastián Vásquez  |
| <b>2. Objetivo específico 1</b>  |   |
| Reunión interna Grupo de Trabajo   | Sergio Núñez, Cristian Salas, Aquiles Sepúlveda, Alexander Gretchina, Carlos González, Marcos Arteaga, Claudio Gatica y Sebastián Vásquez |
| Definición de fuentes de información para la búsqueda bibliográfica                    | Sergio Núñez, Cristian Salas, Aquiles Sepúlveda, Alexander Gretchina, Carlos González, Marcos Arteaga, Claudio Gatica y Sebastián Vásquez |
| Categorización de escalas espaciales y temporales                                      | Sergio Núñez, Cristian Salas, Aquiles Sepúlveda, Alexander Gretchina, Carlos González, Marcos Arteaga, Claudio Gatica y Sebastián Vásquez |
| Generación de protocolo de jerarquización de la información                            | Sergio Núñez, Aquiles Sepúlveda, Alexander Gretchina, Carlos González y Sebastián Vásquez   |
| Recopilación bibliográfica identificación factores críticos del hábitat                | Sergio Núñez, Cristian Salas, Aquiles Sepúlveda, Alexander Gretchina, Carlos González, Marcos Arteaga, Claudio Gatica y Sebastián Vásquez |
| Generación de repositorio para albergar la información recopilada en el objetivo       | Sergio Núñez y Sebastián Vásquez  |
| <b>2. Objetivo específico 2</b>  |   |
| Reuniones de coordinación GT modelación hidrodinámica (MH) y biogeoquímica (BG)        | Cristian Salas, Sebastián Vásquez & Vincent-Echevin   |
| Recopilación de información para la validación del MH y BG                             | Cristian Salas, Sebastián Vásquez & Vincent-Echevin   |
| Actualización de banco de datos de los forzantes                                       | Cristian Salas  |

|  |   |
|--|---|
| Generación de grillas y subdominios del MH y BG  | Cristian Salas  |
| Preparación de forzantes del modelo  | Cristian Salas  |
| Preparación de condiciones de borde  | Cristian Salas  |
| Preparación de condiciones iniciales   | Cristian Salas  |
| Corrida climatológica del modelo biogeoquímico   | Cristian Salas, Vincent Echevin, Sebastián Vásquez  |
| Corrida interanual del modelo MH y BG, generación de archivos de salida, Dominio Padre | Cristian Salas, Vincent Echevin, Sebastián Vásquez  |
| Corrida interanual del modelo MH y BG, generación de archivos de salida, Dominio Hijo  | Cristian Salas, Vincent Echevin, Sebastián Vásquez  |
| Almacenamiento de la información para ser usada en actividad 3                         | Cristian Salas  |
| Validación del modelo hidrodinámico  | Cristian Salas, Vincent Echevin, Sebastián Vásquez  |
| Taller de revisión y validación del MH y BG  | Cristian Salas, Vincent Echevin, Sebastián Vásquez  |
| <b>3. Objetivo específico 3</b>  |   |
| Reuniones de coordinación GT modelación biofísica espacial                             | Sebastián Vásquez, Andrés Ospina-Álvarez, Aquiles Sepúlveda, Sergio Núñez y Alexander Gretchina |
| Revisión de literatura del modelo conceptual   | Sebastián Vásquez, Sergio Núñez, Aquiles Sepúlveda y Alexander Gretchina                        |
| Recopilación de datos georeferenciados para el modelo espacialmente explícito          | Sebastián Vásquez, Nicolás Alegría, Marcos Arteaga, Claudio Gatica y Aquiles Sepúlveda          |
| Estandarización información espacial   | Sebastián Vásquez, Nicolás Alegría, Marcos Arteaga, Claudio Gatica y Aquiles Sepúlveda          |
| Análisis exploratorio y definición modelo biofísico espacial                           | Sebastián Vásquez, Andrés Ospina-Álvarez, Aquiles Sepúlveda, Sergio Núñez y Alexander Gretchina |

|  |   |
|--|---|
| Diseño e implementación modelo biofísico espacial  | Sebastián Vásquez y Andrés Ospina-Álvarez.  |
| Generación matriz hábitat- estructurada con información georeferenciada de jurel, periodo 2007-2016  | Sebastián Vásquez y Andrés Ospina-Álvarez.  |
| Implementación modelo biofísico espacialmente explícito para juveniles y adultos de jurel  | Sebastián Vásquez y Andrés Ospina-Álvarez.  |
| <b>4. Objetivo específico 4</b>  |   |
| Reuniones de coordinación Grupo de trabajo escenarios de simulación  | Sebastián Vásquez, Cristian Salas, Aquiles Sepúlveda, Sergio Núñez y Alexander Gretchina  |
| Análisis integrado de factores críticos del hábitat para selección de escenarios   | Sergio Núñez, Cristian Salas, Aquiles Sepúlveda, Alexander Gretchina, Carlos González, Marcos Arteaga, Claudio Gatica y Sebastián Vásquez |
| Jerarquización de factores críticos del hábitat identificado en el Objetivo específico 1   | Sergio Núñez, Cristian Salas, Aquiles Sepúlveda, Alexander Gretchina, Carlos González, Marcos Arteaga, Claudio Gatica y Sebastián Vásquez |
| Análisis de factores críticos por medio de salidas de MH y BG para la selección de escenarios  | Sergio Núñez, Cristian Salas, Aquiles Sepúlveda, Alexander Gretchina, Carlos González, Marcos Arteaga, Claudio Gatica y Sebastián Vásquez |
| Taller de trabajo interno para consensuar la relación hábitat-recurso para selección de escenarios   | Sergio Núñez, Cristian Salas, Aquiles Sepúlveda, Alexander Gretchina, Carlos González, Marcos Arteaga, Claudio Gatica y Sebastián Vásquez |
| <b>5. Objetivo específico 5</b>  |   |
| Simulación interanual de la dinámica espacial de juveniles y adultos de jurel considerando escenarios contrastantes.                                       | Sebastián Vásquez y Andrés Ospina-Álvarez.  |
| Análisis de resultados de simulaciones espacialmente explícitas  | Sebastián Vásquez y Andrés Ospina-Álvarez.  |
| Taller de trabajo para la proposición de hipótesis de estructura poblacional de jurel en el Pacífico suroriental considerando los resultados del proyecto. | Sergio Núñez, Cristian Salas, Aquiles Sepúlveda, Alexander Gretchina, Carlos González, Marcos Arteaga, Claudio Gatica y Sebastián Vásquez |
| <b>6. Objetivo específico 6</b>  |   |



|  |  |
|--|--|
| <p>Taller de especialistas nacionales para la discusión de brechas, necesidades y desafíos de investigación para la asesoría en relación a la estructura poblacional de jurel bajo escenarios de hábitat variable.</p> | <p>Sergio Núñez, Cristian Salas, Aquiles Sepúlveda, Alexander Gretchina, Carlos González, Marcos Arteaga, Claudio Gatica y Sebastián Vásquez</p> |
| <p>Elaboración de documento con conclusiones del taller de especialistas</p>   | <p>Sergio Núñez, Aquiles Sepúlveda y Sebastián Vásquez</p>   |

A continuación se definen las horas hombre según objetivo específico y actividades definidas para el proyecto y los profesionales involucrados en cada una de ellas:

| Plan de Actividades   | Profesional participante | HH |
|---|--------------------------|----|
| <b>Objetivo específico 1</b>  |                          |    |
| Reunión interna Grupo de Trabajo  | Sebastián Vásquez        | 10 |
|   | Sergio Núñez             | 10 |
|   | Cristian Salas           | 10 |
|   | Aquiles Sepúlveda        | 10 |
|   | Alexander Gretchina      | 10 |
|   | Carlos Gonzalez          | 10 |
|   | Marcos Arteaga           | 10 |
|   | Claudio Gatica           | 10 |
| Definición de fuentes de información para la búsqueda bibliográfica     | Sebastián Vásquez        | 5  |
|   | Sergio Núñez             | 25 |
|   | Cristian Salas           | 5  |
|   | Aquiles Sepúlveda        | 5  |
|   | Alexander Gretchina      | 5  |
|   | Carlos Gonzalez          | 5  |
|   | Marcos Arteaga           | 5  |
|   | Claudio Gatica           | 5  |
| Categorización de escalas espaciales y temporales                       | Sebastián Vásquez        | 5  |
|   | Sergio Núñez             | 15 |
|   | Cristian Salas           | 10 |
|   | Aquiles Sepúlveda        | 10 |
|   | Alexander Gretchina      | 10 |
|   | Carlos González          | 5  |
|   | Marcos Arteaga           | 5  |
|   | Claudio Gatica           | 5  |
| Generación de protocolo de jerarquización de la información             | Sebastián Vásquez        | 10 |
|   | Sergio Núñez             | 25 |
|   | Cristian Salas           | 10 |
|   | Aquiles Sepúlveda        | 10 |
|   | Alexander Gretchina      | 10 |
|   | Carlos González          | 10 |
| Recopilación bibliográfica identificación factores críticos del hábitat | Sebastián Vásquez        | 20 |
|   | Sergio Núñez             | 90 |
|   | Cristian Salas           | 30 |
|   | Aquiles Sepúlveda        | 20 |

|  |                     |     |
|--|---------------------|-----|
|  | Alexander Gretchina | 60  |
|  | Carlos González     | 5   |
|  | Marcos Arteaga      | 10  |
|  | Claudio Gatica      | 10  |
| Generación de repositorio para albergar la información recopilada en el objetivo       | Sebastián Vásquez   | 5   |
|  | Sergio Núñez        | 10  |
| <b>Objetivo específico 2</b>   |                     |     |
| Reuniones de coordinación GT modelación hidrodinámica (MH) y biogeoquímica (BG)        | Sebastián Vásquez   | 25  |
|  | Cristian Salas      | 50  |
|  | Vincent Echevin     | 50  |
| Recopilación de información para la validación del MH y BG                             | Sebastián Vásquez   | 20  |
|  | Cristian Salas      | 30  |
|  | Vincent Echevin     | 30  |
| Actualización de banco de datos de los forzantes                                       | Cristian Salas      | 60  |
| Generación de grillas y subdominios del MH y BG  | Cristian Salas      | 60  |
| Preparación de forzantes del modelo  | Cristian Salas      | 60  |
| Preparación de condiciones de borde  | Cristian Salas      | 60  |
| Preparación de condiciones iniciales   | Cristian Salas      | 60  |
| Corrida climatológica del modelo biogeoquímico   | Sebastián Vásquez   | 50  |
|  | Cristian Salas      | 250 |
|  | Vincent Echevin     | 100 |
| Corrida interanual del modelo MH y BG, generación de archivos de salida, Dominio Padre | Sebastián Vásquez   | 50  |
|  | Cristian Salas      | 200 |
|  | Vincent Echevin     | 50  |
| Corrida interanual del modelo MH y BG, generación de archivos de salida, Dominio Hijo  | Sebastián Vásquez   | 50  |
|  | Cristian Salas      | 200 |
|  | Vincent Echevin     | 50  |
| Almacenamiento de la información para ser usada en actividad 3                         | Cristian Salas      | 30  |
| Validación del modelo hidrodinámico  | Sebastián Vásquez   | 60  |
|  | Cristian Salas      | 60  |
|  | Vincent Echevin     | 20  |
| Taller de revisión y validación del MH y BG  | Sebastián Vásquez   | 25  |
|  | Cristian Salas      | 50  |
|  | Vincent Echevin     | 50  |
| <b>Objetivo específico 3</b>   |                     |     |
| Reuniones de coordinación GT modelación biofísica espacial                             | Sebastián Vásquez   | 25  |
|  | Sergio Núñez        | 25  |

|   |                       |    |
|---|-----------------------|----|
|   | Andrés Ospina Álvarez | 25 |
|   | Aquiles Sepúlveda     | 25 |
|   | Alexander Gretchina   | 15 |
| Revisión de literatura del modelo conceptual  | Sebastián Vásquez     | 25 |
|   | Sergio Núñez          | 25 |
|   | Aquiles Sepúlveda     | 15 |
|   | Alexander Gretchina   | 60 |
| Recopilación de datos georeferenciados para el modelo espacialmente explícito                       | Sebastián Vásquez     | 60 |
|   | Aquiles Sepúlveda     | 30 |
|   | Marcos Arteaga        | 30 |
|   | Claudio Gatica        | 30 |
|   | Nicolás Alegría       | 60 |
| Estandarización información espacial  | Sebastián Vásquez     | 50 |
|   | Aquiles Sepúlveda     | 20 |
|   | Marcos Arteaga        | 20 |
|   | Claudio Gatica        | 20 |
|   | Nicolás Alegría       | 30 |
| Análisis exploratorio y definición modelo biofísico espacial  | Sebastián Vásquez     | 90 |
|   | Sergio Núñez          | 35 |
|   | Andrés Ospina Álvarez | 60 |
|   | Aquiles Sepúlveda     | 10 |
|   | Alexander Gretchina   | 10 |
| Diseño e implementación modelo biofísico espacial   | Sebastián Vásquez     | 90 |
|   | Andrés Ospina Álvarez | 60 |
| Generación matriz hábitat- estructurada con información georeferenciada de jurel, periodo 2007-2016 | Sebastián Vásquez     | 60 |
|   | Andrés Ospina Álvarez | 40 |
| Implementación modelo biofísico espacialmente explícito para juveniles y adultos de jurel           | Sebastián Vásquez     | 90 |
|   | Andrés Ospina Álvarez | 40 |
| <b>Objetivo específico 4</b>  |                       |    |
| Reuniones de coordinación Grupo de trabajo escenarios de simulación                                 | Sebastián Vásquez     | 25 |
|   | Sergio Núñez          | 25 |
|   | Cristian Salas        | 25 |
|   | Aquiles Sepúlveda     | 25 |
|   | Alexander Gretchina   | 15 |
|   | Roberto San Martín    | 25 |
| Análisis integrado de factores críticos del hábitat para selección de escenarios                    | Sebastián Vásquez     | 50 |
|   | Sergio Núñez          | 25 |
|   | Cristian Salas        | 50 |
|   | Aquiles Sepúlveda     | 30 |

|  |                       |     |
|--|-----------------------|-----|
|  | Alexander Gretchina   | 50  |
|  | Carlos González       | 25  |
|  | Marcos Arteaga        | 25  |
|  | Claudio Gatica        | 25  |
|  | Roberto San Martín    | 25  |
| Jerarquización de factores críticos del hábitat identificado en el Objetivo específico 1                             | Sebastián Vásquez     | 25  |
|  | Sergio Núñez          | 15  |
|  | Cristian Salas        | 25  |
|  | Aquiles Sepúlveda     | 10  |
|  | Alexander Gretchina   | 25  |
|  | Carlos González       | 10  |
|  | Marcos Arteaga        | 10  |
|  | Claudio Gatica        | 10  |
|  | Roberto San Martín    | 10  |
| Análisis de factores críticos por medio de salidas de MH y BG para la selección de escenarios                        | Sebastián Vásquez     | 50  |
|  | Sergio Núñez          | 20  |
|  | Cristian Salas        | 100 |
|  | Aquiles Sepúlveda     | 20  |
|  | Alexander Gretchina   | 10  |
|  | Carlos González       | 10  |
|  | Marcos Arteaga        | 10  |
|  | Claudio Gatica        | 10  |
|  | Roberto San Martín    | 10  |
| Taller de trabajo interno para consensuar la relación hábitat-recurso para selección de escenarios                   | Sebastián Vásquez     | 25  |
|  | Sergio Núñez          | 25  |
|  | Cristian Salas        | 25  |
|  | Aquiles Sepúlveda     | 25  |
|  | Alexander Gretchina   | 15  |
|  | Carlos González       | 25  |
|  | Marcos Arteaga        | 25  |
|  | Claudio Gatica        | 25  |
|  | Roberto San Martín    | 25  |
| <b>Objetivo específico 5</b>   |                       |     |
| Simulación interanual de la dinámica espacial de juveniles y adultos de jurel considerando escenarios contrastantes. | Sebastián Vásquez     | 90  |
|  | Andrés Ospina Álvarez | 60  |
| Análisis de resultados de simulaciones espacialmente explícitas  | Sebastián Vásquez     | 90  |
|  | Andrés Ospina Álvarez | 60  |
| Taller de trabajo para la proposición de hipótesis de estructura poblacional de jurel en el Pacífico suroriental     | Sebastián Vásquez     | 30  |
|  | Sergio Núñez          | 20  |

|   |                    |    |
|---|--------------------|----|
| considerando los resultados del proyecto.   | Cristian Salas     | 20 |
|   | Aquiles Sepúlveda  | 20 |
|   | Carlos González    | 40 |
|   | Marcos Arteaga     | 30 |
|   | Claudio Gatica     | 30 |
| <b>Objetivo específico 6</b>  |                    |    |
| Taller de especialistas nacionales para la discusión de brechas, necesidades y desafíos de investigación para la asesoría en relación a la estructura poblacional de jurel bajo escenarios de hábitat variable. | Sebastián Vásquez  | 40 |
|   | Sergio Núñez       | 20 |
|   | Cristian Salas     | 20 |
|   | Aquiles Sepúlveda  | 20 |
|   | Carlos González    | 50 |
|   | Roberto San Martín | 50 |
| Elaboración de documento con conclusiones del taller de especialistas   | Carlos González    | 50 |
|   | Roberto San Martín | 50 |

#### **4.- OBJETIVOS DEL PROYECTO**

---

El objetivo general del proyecto es "Implementar un modelo espacialmente explícito que permita caracterizar el hábitat-distribución de juveniles y adultos de jurel en el Pacífico Sur para entender la estructura poblacional de ésta especie".

Para el cumplimiento del objetivo general, se aborda la problemática con un enfoque multidisciplinario que incluye la modelación hidrodinámica, biogeoquímica y de dinámica poblacional espacial de jurel, además de la oceanografía física, estadística y análisis espacial que permite abordar la problemática de forma integral en términos de hacer emerger información relevante para el estudio de la estructura poblacional del jurel en el Pacífico sur oriental.

Para satisfacer las necesidades del proyecto, los objetivos específicos son los siguientes:

2.1. Identificar factores críticos del hábitat (físicos, químicos, ecológicos, biológicos) de jurel a lo largo de su historia de vida en énfasis en los estadios juveniles y adultos en base a una recopilación bibliográfica.

2.2. Desarrollar e implementar un sistema de modelación hidrodinámica y biogeoquímico validado para la región del Pacífico suroriental que permita caracterizar cambios interanuales de factores críticos del hábitat de la población juvenil y adulta de jurel.

2.3. Desarrollar e implementar un modelo biofísico de juveniles y adultos de jurel que permita realizar un seguimiento de la distribución e historia de vida de esta especie en el Pacífico suroriental.

2.4. Definir escenarios de simulación con un forzamiento variable del ambiente de acuerdo a 4.1. (remolinos, corrientes, temperatura, oxígeno, nutrientes, disponibilidad de alimento entre otros) para evaluar la modulación del proceso de transporte y sobrevivencia de juveniles y adultos de jurel.

2.5. Realizar simulaciones evaluando los escenarios de forzamiento contrastantes (4.4) y el modelo desarrollado (4.3), identificando los factores o hábitat críticos que pudieran modular la estructura poblacional del jurel en el Pacífico Sur. Los escenarios de concentraciones de oxígeno debe ser considerado en las simulaciones.

2.6. Identificar fortalezas y debilidades de todo el ámbito abarcado por el estudio, establecer líneas de desarrollo/necesidades de investigación para avanzar en el estudio de la estructura poblacional de la especie.



## 5.- METODOLOGÍA DE TRABAJO

La implementación de un modelo espacialmente explícito que permita el estudio de la dinámica espacio-temporal de la fracción juvenil y adulta de jurel y probar hipótesis relacionadas a la estructura poblacional de la especie en el Pacífico suroriental requiere de la implementación de un sistema de modelación complejo (Figura 1). El sistema planteado en este estudio comprendió un modelo hidrodinámico que resuelve los procesos de circulación del área de estudio acoplado a un modelo biogeoquímico que simuló la productividad biológica (fito y zooplancton, detritus) y los ciclos biogeoquímicos del carbono, de los principales nutrientes (Fosfato, Nitrato, Amonio, Silicato y Hierro) además del oxígeno. Este modelo acoplado permitió simular las condiciones del hábitat de jurel incluyendo escenarios contrastantes al tratarse de un modelo con variabilidad interanual. Posteriormente, estas simulaciones fueron contrastadas con información georeferenciada observada y modelada para adultos y juveniles de jurel para establecer un sistema de modelación espacial que permitió analizar la respuesta dinámica de la población de jurel frente a cambios ambientales. Finalmente, los patrones espaciales obtenidos mediante modelación fueron utilizados para la discusión respecto a la estructura poblacional del jurel incluyendo la dimensión del hábitat variable. Las herramientas computacionales que fueron utilizadas en la modelación se enumeran en la Tabla I.

Tabla I. Herramientas utilizadas en el proceso de modelación hidrodinámica, biogeoquímica y biofísica.

| Herramienta | Función  | Sitio web   | Referencia  |
|-------------|--|---|---|
| ROMS agrif  | Modelación hidrodinámica   | <a href="http://romsagrif.org">http://romsagrif.org</a>   | Penven et al., 2006; Shchepetkin & McWilliams, 2005 |
| PISCES      | Modelación biogeoquímica   | <a href="http://www.geosci-model-dev.net/8/2465/2015/gmd-8-2465-2015.pdf">http://www.geosci-model-dev.net/8/2465/2015/gmd-8-2465-2015.pdf</a> | Aumont et al., 2003.                                |
| 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 que será utilizado en el 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   |

El trabajo estuvo organizado en función de un equipo de trabajo conformado por 3 grupos de trabajo: modelación hidrodinámica y biogeoquímica, modelación espacial biofísica y análisis georeferenciado de la población de jurel. Este trabajo estuvo apoyado por expertos internacionales de vasta experiencia, los que han contribuido de manera significativa en diferentes etapas de la investigación para el logro de los objetivos. Todos los grupos, en conjunto, definieron las hipótesis a probar respecto a la estructura poblacional del jurel en el Pacífico suroriental y generaron un análisis comprensivo final hacia las implicancias para el manejo pesquero de la especie.

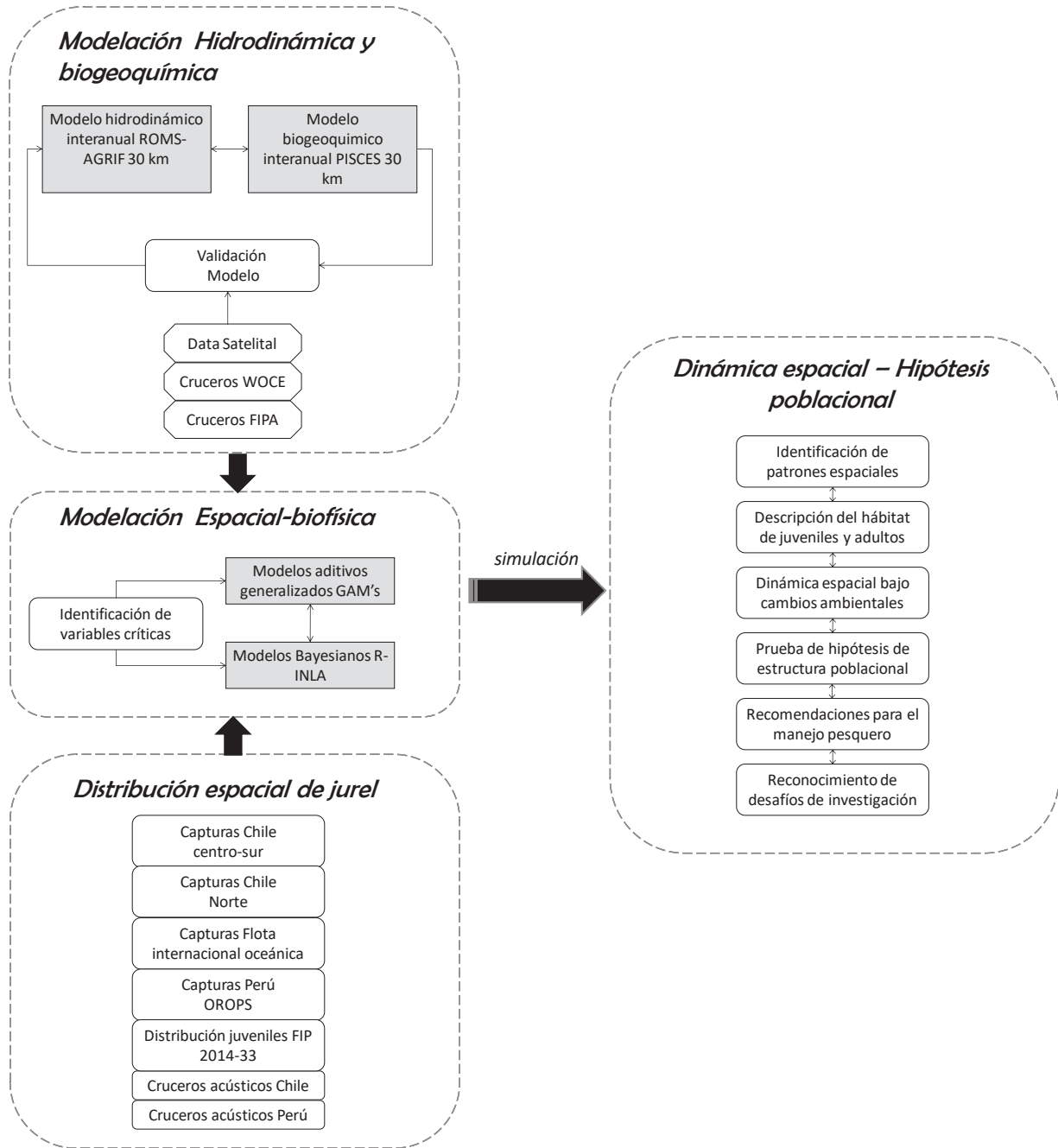


Figura 1. Esquema de trabajo para el estudio de la dinámica espacial de juveniles y adultos de jurel en el Pacífico suroriental bajo un enfoque de modelación biofísica.

## 5.1. Revisión bibliográfica para la identificación de factores críticos del hábitat de jurel

Se consideró que la identificación de factores críticos del hábitat de jurel en el Pacífico suroriental responde a un análisis que integra escalas espaciales y temporales distintas, y que se enmarcan en aspectos físicos, químicos, biológicos y ecológicos, tanto para las fases de juveniles como de adultos de jurel, las actividades en este objetivo se abordaron desde una perspectiva multifactorial e interdisciplinaria.

En el contexto del proyecto, se ha definido a los factores críticos del hábitat como *aquellos factores, variables o índices, que representen procesos físicos, químicos, biológicos o ecológicos, que sean útiles para delimitar el hábitat efectivo de juveniles y adultos de jurel en el Pacífico suroriental, y que modulen significativamente su variabilidad espacio-temporal.*

### 5.1.1. Reunión-taller

Con el propósito de protocolizar la revisión bibliográfica correspondiente al desarrollo de este objetivo, se llevó a cabo una reunión-taller interna del grupo de trabajo (GT) del proyecto, para integrar una mirada interdisciplinaria y consensuar aspectos relevantes para una búsqueda bibliográfica eficiente en tópicos como:

- a) La determinación de escalas relevantes en que los diferentes forzantes ambientales (físico-químicos y bio-ecológicos) pudieran modular la distribución y abundancia de adultos y juveniles de jurel en el Pacífico suroriental.
- b) La definición de las fuentes más significativas de información para la búsqueda bibliográfica.
- c) La definición de la estrategia de búsqueda bibliográfica más adecuada a este objetivo, basada en criterios que integran la experiencia del GT del proyecto.

d) Consensuar, bajo el conocimiento y la experiencia técnica del GT del proyecto (incluyendo la adquirida en el proyecto FIPA 2014-33), sobre aquellos factores ambientales que pudiesen resultar críticos hacia la variabilidad de la abundancia y distribución de juveniles y adultos de jurel, y que permitan ser incluidos en el patrón de búsqueda bibliográfica.

### 5.1.2. Estrategia de búsqueda bibliográfica

La búsqueda bibliográfica se realizó en forma sistemática, considerando en la mayoría de los casos: i) criterios de selección de las palabras claves o descriptores, ii) la aplicación de operadores lógicos que determinan la forma en que se agrupan los descriptores (intersección, adición o sustracción de conjuntos), lo que permitió recuperar información común entre varios descriptores o excluir los que se especifiquen negativamente, y iii) la aplicación de operadores sintácticos y técnicas para ampliar o reducir la búsqueda.

Cuando correspondió, la búsqueda bibliográfica digital realizada utilizó principalmente los motores de búsqueda de *google*, *scholar google* y *academia.edu*. Por su parte, el conocimiento y experiencia del GT orientó la búsqueda bibliográfica específica a: i) referencias científicas formalmente publicadas en revistas nacionales e internacionales (indexadas y no-indexadas) y sus artículos relacionados, ii) literatura gris (reportes e informes no formalmente publicados), iii) tesis de grado. Especial referencia se otorgó a la búsqueda de información relevante hacia el proyecto, en los repositorios científico-técnicos del Comité Científico de la SPRFMO.

En forma paralela a la búsqueda bibliográfica, se estableció un protocolo de clasificación y jerarquización de la información recopilada, según criterios basados en los diferentes ámbitos de búsqueda (físico, químico, biológico y ecológico), y su relevancia como agentes moduladores de la distribución de juveniles y adultos de jurel en el Pacífico suroriental, la que ha sido inicialmente evidenciada a través de la frecuencia de ocurrencia (%) de cada factor en la búsqueda bibliográfica. Por su parte, el conocimiento y experiencia del GT del proyecto también jerarquizó los resultados de la búsqueda desde criterios de calidad y confiabilidad de la información.

Finalmente, se generó un repositorio digital que alberga las referencias producto de la búsqueda bibliográfica hacia este objetivo del proyecto, el cual se ha sociabilizado con todos los participantes del proyecto.

### 5.2. *Desarrollo e implementación de un sistema de modelación hidrodinámica y biogeoquímica validado para la región del Pacífico suroriental.*

La modelación biogeoquímica consistió en el acoplamiento entre un modelo físico (modelo hidrodinámico) y un modelo biogeoquímico. El modelo hidrodinámico-biogeoquímico permite describir la variabilidad de diversos procesos oceanográficos y biológicos que existen en el ambiente marino donde habita el jurel. En consecuencia fue altamente necesario contar con modelos biogeoquímicos validados que representen los principales rasgos del sistema oceanográfico y biogeoquímicos donde se desarrolla la población a evaluar.

En el presente estudio se implementó un modelo biogeoquímico de gran escala para la zona del Pacífico suroriental, que se obtuvo del acoplamiento entre el modelo hidrodinámico ROMS (*Regional Oceanic Modeling System*) y el modelo biogeoquímico PISCES (*Pelagic Interaction Scheme for Carbon and Ecosystem Studies*). Este modelo biogeoquímico de gran escala ROMS-PISCES tiene una resolución espacial de 20 km, el cual fue utilizado para generar un modelo biogeoquímico anidado de ~7 km de resolución para la zona costera del norte de Chile y sur del Perú, de tal modo de tener una mayor resolución espacial que permita resolver los procesos costeros oceanográficos y biogeoquímicos de mejor manera. Los modelos ROMS hidrodinámicos entregaron información tales como, temperatura, salinidad, altura del nivel mar y corriente a diferentes profundidades, sin embargo al acoplarlos al modelo biogeoquímico ROMS\_PISCES permitió incorporar además variables biogeoquímicas tales como: Nitrógeno (NO<sub>3</sub> y NH<sub>4</sub>), Hierro (Fe), Silicato (SiO<sub>3</sub>), Oxígeno (O<sub>2</sub>), Fosfato (PO<sub>4</sub>), carbono orgánico disuelto (COD), carbono inorgánico disuelto (CID) y alcalinidad.

En el marco del proyecto FIP 2014-33 “Estructura poblacional y estimación de índices de reclutamiento de jurel basados en modelos biofísicos (fase I)”, se desarrolló un modelo hidrodinámico validado de 10 km de resolución para la zona del Pacífico suroriental (PACSUR10), el cual manifestó un buen desempeño en reproducir los principales rasgos

oceanográficos del área de estudio desde una perspectiva estacional e interanual. No obstante a este buen desempeño, en el marco del actual estudio (FIPA 2017-62) se han realizado talleres de revisión del modelo con expertos internacionales, en donde se diagnosticó el modelo y sus forzantes llevando a las siguientes conclusiones: i) el modelo hidrodinámico generado es una buena aproximación a la circulación general del Pacífico suroriental; ii) la variabilidad interanual de las principales variables evaluadas (temperatura, salinidad, altura del nivel del mar, *eddy kinetic energy*) rescata eventos extremos tipo El Niño; iii) el modelo tiene un muy buen desempeño en océano abierto; iv) el modelo manifiesta ciertas inconsistencias en el sector costero de Chile centro-norte y sur de Perú, principalmente en la estructura espacial de las corrientes y en la estimación de la extensión del frente de surgencia, v) las inconsistencias detectadas son atribuibles a problemas en los forzantes atmosféricos (principalmente viento) que, debido a las características orográficas del área, no reproducen la estructura del viento costero, vi) las inconsistencias identificadas pueden ser subsanadas mediante la aplicación de técnicas de incorporación de datos observados en los forzantes que aumenta su calidad hacia la modelación hidrodinámica. Consecuentemente, en el marco del actual proyecto y para la obtención de un modelo hidrodinámico de mayor precisión, se ha generado un esquema de diagnóstico de las inconsistencias y se han implementado los métodos de mejora sugeridos.

#### *5.2.1. Implementación de modelo hidrodinámico con forzantes mejorados*

Se implementó el modelo regional ROMS (Regional Ocean Model System), detalles del modelo en Shchepetkin & McWilliams (2003) y Shchepetkin & McWilliams (2005). Específicamente, la versión ROMS\_AGRIF v3.0 desarrollada por el IRD en Francia ([www.romsagrif.org](http://www.romsagrif.org)). El modelo ROMS ha sido ampliamente utilizado por la comunidad científica para realizar estudios de circulación del océano. El dominio correspondiente al modelo ROMS utilizado comprendió desde los 10°N hasta los 50°S y desde los 68°W hasta los 132°W.

La modificación y mejora de forzantes atmosféricos (etapa 1) ha involucrado la generación de múltiples corridas del modelo bajo distintos escenarios y su correspondiente diagnóstico, hasta llegar a una configuración satisfactoria para avanzar hacia las corridas interanuales del modelo hidrodinámico (etapa 2) cuyos forzantes fueron posteriormente utilizados para implementar el modelo de acoplamiento biogeoquímico e hidrodinámico ROMS-PISCES.

Se utilizaron forzante atmosféricos mejorados (descripción más abajo), cuya generación consistió básicamente en remover la climatología de NCEP2 y reemplazarla por climatologías de mayor resolución espacial y mejor desempeño en costa (Cambon *et al.*, 2013). El modelo ROMS interanual abarcó el periodo 1993-2017, con una resolución espacial de 20 km y una resolución temporal diaria. Las condiciones iniciales y de borde que utilizó el modelo ROMS corresponden al producto global ECCO que contiene datos de modelos de circulación general y asimilación de observaciones de las variables salinidad, temperatura, velocidad zonal y meridional, velocidad vertical y nivel del mar. La batimetría del fondo marino provino de ETOPO2 con una resolución espacial  $\sim 4$  km. Las variables de salida del modelo correspondieron a salinidad, temperatura, corrientes en la horizontal  $U$  (E-W) y  $V$  (N-S), corrientes en la vertical  $W$  y altura del nivel del mar.

El forzante atmosférico, mejorado en esta modelación, correspondió al producto NCEP-DOE Reanálisis 2, llamado de aquí en adelante NCEP2, cuya resolución temporal es de 6 hrs y espacial de  $2,5^\circ$ . Debido a su baja resolución espacial de NCEP2, sobre todo en la zona costera, fue necesario aumentar su calidad. Por otro lado, las variables de NCEP2 que se utilizaron en la modelación fueron: temperatura superficial de aire (*air*), la humedad relativa del aire (*shum*), la precipitación (*prate*), la radiación de onda corta (*radsw*), la radiación de onda larga (*radlw*), componentes del viento  $u$  (*uwnd*) y  $v$  (*vwnd*) y componentes del esfuerzo del viento  $u$  (*sustr*) y  $v$  (*svstr*).

El proceso de mejoramiento consistió en reemplazar la climatología del producto NCEP2 por productos observados de mejor calidad (mayor resolución espacial en el sector costero), manteniendo la variabilidad interanual de NCEP2. Para llevar a cabo esta mejora se utilizaron las climatologías mensuales provistas por el producto COADS (resolución espacial  $0.5^\circ$ ) para las variables temperatura del aire y radiación de onda larga y corta, mientras que se utilizó la climatología mensual SCOW (climatología de QuikSCAT de resolución espacial  $0.25^\circ$ ) para las variables componentes del viento ( $u$  y  $v$ ) y componentes del esfuerzo del viento ( $u$  y  $v$ ). El método utilizado para este mejoramiento consistió en los siguientes pasos:

- Calcular el promedio de cada variable para el periodo respectivo a la climatología escogida.



- Calcular las anomalías de cada variable respecto a su promedio anterior.
- Agregar la máscara de tierra propia del producto a los archivo de anomalías anteriores.
- Interpolar las anomalías y la climatología escogida a la grilla del modelo ROMS.
- Obtener el producto PLUS, mediante la suma de las anomalías con la climatología seleccionada previamente.

Se utilizaron los promedios diarios de las variables, de tal modo de disminuir el ruido que generaba la alta resolución temporal (6 horas). Además, se utilizó como forzante el esfuerzo del viento superficial en lugar de las componentes del viento.

Con el objeto de analizar la señal media, el ciclo anual y la variabilidad interanual del modelo respecto a información observada se obtuvo información de la temperatura superficial del mar desde los programas internacionales PATHFINDER ([www.pathfinder.nodc.noaa.gov](http://www.pathfinder.nodc.noaa.gov); periodo 1994-2012) y MODIS-AQUA ([oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/browse.pl](http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/browse.pl), periodo 2013-2016) y del nivel del mar desde AVISO (<https://www.aviso.altimetry.fr/en/home.html>, periodo 1993-2016). La validación y contraste de modelos hidrodinámicos se hizo mediante el uso del estadístico RMSE (*root mean square error*) y la variabilidad interanual por medio del uso de Funciones Ortogonales Empíricas (EOF) que permiten cuantificar el desempeño de los modelos en reproducir la variabilidad oceánica en tiempo y espacio (Vásquez, 2012, Vásquez *et al.*, 2013). 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 permite cuantificar la auto-correlación en las series de tiempo. Además, se analizó la estructura vertical de las corrientes meridionales promedio en la región norte de Chile y sur de Perú (entre los 7°S y 13°S) y en la región central de Chile (entre 30°S y los 35°S), que fue una de las principales inconsistencias detectadas en el taller de evaluación del modelo hidrodinámico inicial.

### 5.2.2. Implementación de modelo biogeoquímico para el Pacífico suroriental

El modelo ROMS-PISCES ha sido ampliamente utilizado por la comunidad científica. Destacado por ejemplo la modelación de la cuenca del Atlántico norte (Haidvogel *et al.*, 2000), el estudio de la corriente de California (Marchesiello *et al.*, 2003), el estudio de la corriente polar oriental (Peliz *et al.*, 2003), el estudio de la dinámica estacional de la circulación superficial de la

corriente de California (Di Lorenzo, 2003), la circulación y estudio biogeoquímico del océano (Dinniman *et al.*, 2012), la variabilidad oceanográfica (Budgell, 2005), estudio de turbulencias (Warner *et al.*, 2005), el estudio de ecosistemas marinos (Wilkin *et al.*, 2005), el estudio de circulación del océano frente a Nueva Zelanda (Hadfield *et al.*, 2007), el estudio de condiciones de bordes, iniciales y forzantes en la costa de Perú (Echevin *et al.*, 2011), así como en Chile. (Aguirre *et al.*, 2012, Colas *et al.*, 2012, Aguirre *et al.*, 2014, Vergara *et al.*, 2016).

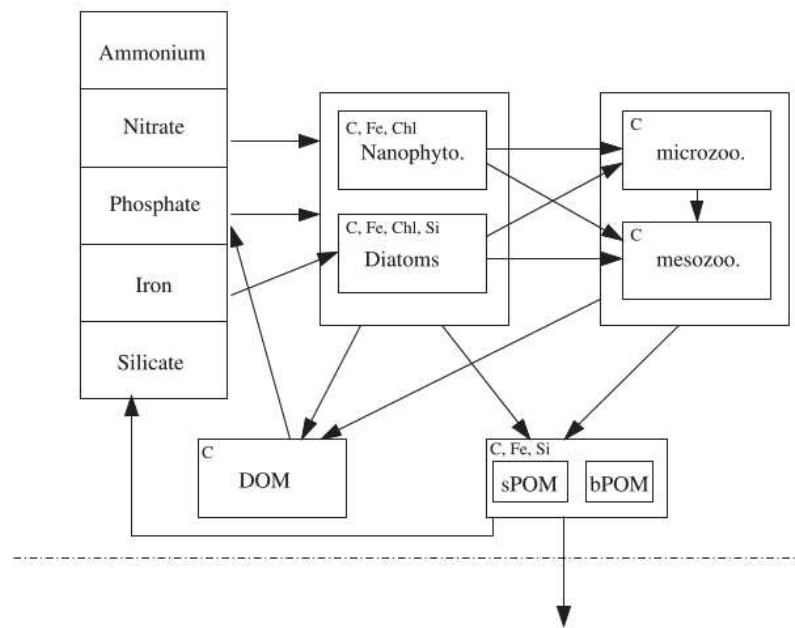


Figura 2. Esquema descriptivo del modelo PISCES. No se muestran todos los flujos de interacción entre los diferentes compartimentos. Figura de Aumont & Bopp, 2006.

El diseño e implementación de un modelo biogeoquímico requirió la generación de un modelo hidrodinámico acoplado a un módulo que incorpora los ciclos biogeoquímicos de gran escala que caracterizan el hábitat de jurel. Luego, fue posible avanzar a un dominio más acotado pero de alta resolución que se logró mediante un proceso de anidamiento, el dominio resultante entregó más detalles de la hidrodinámica y biogeoquímica que afectan a la población de jurel en sus diferentes estados. Se utilizó el modelo hidrodinámico regional ROMS descrito anteriormente (Shchepetkin & McWilliams, 2003; Shchepetkin & McWilliams, 2005). El acoplamiento biogeoquímico se realizó mediante el modelo PISCES (Aumont *et al.*, 2003; Aumont & Bopp 2006). El proceso de

acoplamiento entre el modelo hidrodinámico ROMS y el modelo PISCES se realizó siguiendo a Echevin *et al.* (2008), el modelo definitivo para este proyecto que se obtuvo luego de un largo proceso de mejoras y validaciones, al cual llamaremos modelo ROMS-PISCES\_PADRE. En la Tabla II se indican los diversos modelos desarrollados en el marco del proyecto para llegar al modelo definitivo.

Correr el modelo PISCES acoplado a ROMS produjo un aumento aproximado de cuatro veces el tiempo de cálculo que tarda solo el modelo hidrodinámico ROMS, debido al aumento en 24 variables más que debe calcular cuando se activa el modelo biogeoquímico PISCES. La modelación ROMS-PISCES desarrollada inicialmente en este proyecto incluyó los modelos PACSUR30\_CLIM1 y CLIM2 cuya diferencia estuvo en el archivo de configuración del aporte de hierro en el modelo PISCES llamado *namelist.trc.sms* (ver Tabla II) y tuvo una menor resolución espacial (30 km) con forzantes climatológicos de baja resolución provenientes de COADS. Sin embargo, este modelo mostró un desempeño insatisfactorio en la modelación tanto de las variables físicas como biogeoquímicas. Luego de analizar estos resultados con el experto internacional Dr. Vincent Echevin (*Laboratoire d'Océanographie et du Climat: Expérimentations et Approches Numériques*, LOCEAN), y con el fin de buscar el origen del mal desempeño, se procedió a realizar un modelo puramente hidrodinámico ROMS de 30 km de resolución, llamado PACSUR30\_INTER (ver Tabla II), este modelo utilizó forzantes atmosféricos climatológicos para la variable esfuerzo de viento provenientes de QuikSCAT para analizar su competencia en reproducir la dinámica física del ambiente, la cual tiene un impacto directo en los procesos biogeoquímicos. Los resultados de este análisis evidenciaron que el modelo PACSUR30\_INTER tuvo un pobre desempeño en cuanto a su habilidad de reproducir la hidrodinámica costera del dominio modelado, principalmente en la modelación del sistema de corrientes cercano a la plataforma continental. Lo anterior fue considerado como una fuente de error importante que podría haber sido heredada por los modelos acoplados PACSUR30\_CLIM1 y CLIM 2 impactando los niveles de las variables biogeoquímicas modeladas.

De acuerdo a lo anterior, y siguiendo los lineamientos propuestos por el Dr. Echevin, se procedió a aumentar la resolución de la grilla a 20 km, cuyos forzantes atmosféricos fueron mejorados mediante la aproximación metodológica descrita anteriormente en el punto 5.2.1. A este modelo

hidrodinámico ROMS se le llamó PACSUR20\_INTER, modelo interanual que abarcó el periodo 1993-2017 y utilizó condiciones de borde ECCO (ver Tabla II y Anexo VII). Este modelo finalmente logró describir de manera satisfactoria la hidrodinámica e hidrografía del Pacífico suroriental. Debido al aumento de los tiempos de cálculo del modelo acoplado ROMS-PISCES y considerando el buen desempeño evaluado se utilizó esta resolución espacial de 20 km para realizar el acoplamiento con PISCES. Una vez obtenido un modelo acoplado satisfactorio, al cual llamaremos ROMS-PISCES\_PADRE (ver Tabla II) se procedió a generar un modelo anidado de mayor resolución (~7 km) en el sector costero del sur de Perú y norte de Chile, el cual se denominó ROMS-PISCES\_HIJO, para describir en mayor detalle la dinámica de este sector por medio de un proceso de anidamiento de modelos. Para esto, se aplicó la metodología de anidamiento *off-line* llamada roms2roms (Mason *et al.*, 2010), donde se utilizaron las salidas del modelo ROMS-PISCES\_PADRE de gran escala (20 km de resolución espacial) como condiciones iniciales y de borde para el modelo ROMS-PISCES\_HIJO.

Tabla II. Descripción de los modelos hidrodinámicos y biogeoquímicas realizados en el marco de este proyecto.

| Nombre simulación | Modelo                                     | Dominio                    | Punto de grilla | Condiciones de borde                     | Forzantes atmosféricos   | Periodo                         | Resolución    |
|-------------------|--|----------------------------|-----------------|--|--|---------------------------------|---------------|
| ROMS1             | ROMS                                       | [130°-69°W]<br>[8°N-45°S]  | 610x586         | ECCO: 10 days, 1°x1° spatial resolution, | Wind NCEP2: 6-hourly forcing, 1.9°x1.9° spatial resolution   | 1993M01 - 2014M06               | 10 km, diario |
| ROMS2/PAC SUR10   | ROMS                                       | [132°-68°W]<br>[10°N-50°S] | 640x680         | ECCO: 10 days, 1°x1° spatial resolution, | Wind stress Montly QuikSCAT climatology and NCEP2 daily anomaly, Montly Sat COADS05 and NCEP2 daily anomaly, Montly Longrad and shortrad COADS05, prate and shum daily NCEP2.                  | 1993M01 - 2018M12               | 10 km, diario |
| PAC SUR30_CLIM1   | ROMS/PISCES<br>Default<br>namelist.trc.sms | [132°-68°W]<br>[10°N-50°S] | 213x227         | WOA, montly, 1°x1°                       | COADS, montly, 0.5°x0.5°   | Y1M01 – Y10M12                  | 30 km, diario |
| PAC SUR30_CLIM2   | ROMS/PISCES<br>Vincent<br>namelist.trc.sms | [132°-68°W]<br>[10°N-50°S] | 213x227         | WOA, montly, 1°x1°                       | COADS, montly, 0.5°x0.5°   | Y1M01 – Y10M12                  | 30 km, diario |
| PAC SUR30_INTER   | ROMS                                       | [132°-68°W]<br>[10°N-50°S] | 213x227         | ECCO: 10 days, 1°x1° spatial resolution, | Wind stress Montly QuikSCAT climatology, COADS for other variables   | 1993M01 – 2016M12               | 30 km, diario |
| PAC SUR20_INTER   | ROMS                                       | [132°-68°W]<br>[10°N-50°S] | 384x408         | ECCO: 10 days, 1°x1° spatial resolution, | Wind stress Montly QuikSCAT climatology and NCEP2 daily anomaly, Montly Sat COADS05 and NCEP2 daily anomaly, Montly Longrad and shortrad COADS05, prate and shum daily NCEP2                   | 1993M01 – 2017M12               | 20 km, diario |
| ROMS-PISCES_PADRE | ROMS/PISCES<br>Vincent<br>namelist.trc.sms | [132°-68°W]<br>[10°N-50°S] | 384x408         | ECCO: 10 days, 1°x1° spatial resolution, | Wind stress Montly QuikSCAT climatology and NCEP2 daily anomaly, Montly Sat COADS05 and NCEP2 daily anomaly, Montly Longrad and shortrad COADS05, prate and shum daily NCEP2.                  | 1993M01 – 2017M12               | 20 km, diario |
| ROMS-PISCES_HIJO  | ROMS/PISCES<br>Vincent<br>namelist.trc.sms | [90°-68°W]<br>[5° -25°S]   | 391x382         | ROMS2ROMS, JUREL-PISCES_V5               | Interpolation fo Wind stress Montly QuikSCAT climatology and NCEP2 daily anomaly, Montly Sat COADS05 and NCEP2 daily anomaly, Montly Longrad and shortrad COADS05, prate and shum daily NCEP2. | 2001M01 – 2013M01 (in progress) | 6 km, diario  |

Batimetría utilizada ETOPO2 (4 km)

El modelo biogeoquímico PISCES simuló la productividad biológica y los ciclos biogeoquímicos del carbono y de los principales nutrientes (fosfato, nitrato, amonio, silicato y hierro), donde se asume que el crecimiento del fitoplancton está directamente limitado por la disponibilidad externa de nutrientes, así mismo incluye dos clases de fitoplancton (nanoplancton y diatomeas), dos tipos de zooplancton (microzooplancton y mesozoplancton), dos tipos de detritus además del oxígeno. Este modelo biogeoquímico es derivado del modelo Hamburg para el ciclo de carbono, versión 5 HAMOCC5 (Aumont *et al.*, 2003). El modelo PISCES tiene 24 compartimientos (Figura 2), donde el crecimiento del fitoplancton está limitado por cinco nutrientes: nitrato, amonio, fosfato, silicato y fierro. También presenta dos tipos de fitoplancton (nanofitoplancton y diatomeas) así como dos tipos de zooplancton (micro y mesoplancton). Diatomeas difieren del nanofitoplancton por sus necesidades de silicio (Si) y hierro (Fe) respectivamente. Las relaciones Fe/C, Ch/C y Si/C para ambos tipos de fitoplancton son completamente predichos por el modelo. Para el zooplancton, solo la biomasa total es modelada. Para todas las especies, las relaciones entre C/N/P/O<sub>2</sub> son asumidas constantes y no se permiten variar (Aumont & Bopp 2006). En el modelo PISCES la relación de Redfield O/C/N/P es 172/122/16/1. Así mismo, la relación Fe/C para ambos tipos de zooplancton se mantiene constante. Por otro lado, los nutrientes son aportados al océano de diferentes maneras. El hierro es suministrado desde la atmósfera, el cual se estima desde mapas mensuales climatológicos de deposiciones simuladas mediante el modelo de Tegen & Fung (1995), asumiendo valores constantes para el contenido y solubilidad del fierro, además hay una fuente de hierro en la plataforma, con los sedimentos (Aumont *et al.*, 2003). El aporte de carbono mediante las descargas de ríos, se obtiene por medio del modelo global GEM (*Global Erosion Model*) (Ludwig *et al.*, 1996).

La modelación biogeoquímica mediante ROMS-PISCES para este proyecto consistió básicamente de seis etapas: i) Creación de grilla y máscara para el dominio ROMS-PISCES de gran escala (Figura 3; 20 km de resolución), se incorporó la batimetría del fondo marino; ii) preparación de forzantes mejorados atmosféricos del modelo (viento, esfuerzo del viento, flujo de calor, precipitación, humedad, entre otros), por otro lado las condiciones iniciales (CI) y las condiciones de bordes (CB) laterales abierta, esta información debe ser la más realista posible, INPESCA contó con información de campo valiosa para realizar esta etapa de configuración, las

CI y CB que utiliza el modelo ROMS; iii) compilación del modelo; entrelazando la información del pre-procesamiento con el algoritmo del código ROMS-PISCES; iv) realización de corridas ROMS-PISCES almacenando la información de las variables requeridas, para cada paso de tiempo y durante todo el periodo que se desea modelar. El algoritmo ROMS-PISCES estuvo paralelizado, por lo cual permitió correr los procesos en varios procesadores por medio de su memoria compartida o memoria distribuida. En esta etapa destacó el *clúster* computacional con que cuenta INPESCA, y que permitió cumplir con las exigentes demandas de estos procesos de modelación (ver detalles del *clúster* más adelante; Figura 5); v) realizar el proceso de anidamiento, donde a partir del modelo ROMS-PISCES\_PADRE de gran escala se genera la grilla y máscara para el modelo ROMS-PISCES\_HIJO anidado, el anidamiento es *off-line* mediante el método *roms2roms*, que permite aumentar la resolución espacial del dominio padre modelado de gran escala (20 km), pasando en este caso a un dominio hijo con una resolución espacial de  $\sim 7$  km (Figura 3); finalmente la etapa vi) correspondió a la observación de los resultados, donde se trabajó con los archivos de salida en formato NetCDF, los cuales fueron procesados para ejecutar los análisis de interés que permitieron realizar el diagnóstico y análisis que incluye el proceso de validación, comparando los resultados del modelo con datos empíricos disponibles desde diversas fuentes de información.

En resumen, en este proyecto se han desarrollado 6 modelaciones (Tabla II):

1. Una modelación biogeoquímica llamada PACSUR30\_CLIM1 tipo climatológica ROMS-PISCES de 30 km de resolución espacial y resolución temporal diaria, con 213x227 puntos de grilla, el dominio abarcó entre 132° - 68°W y 10°N - 50°S. Se modelaron 10 años y se utilizó el archivo *namelist.trc.sms* que viene por defecto en la configuración de PISCES.
2. Una modelación biogeoquímica llamada PACSUR30\_CLIM2 tipo climatológica ROMS-PISCES de 30 km de resolución espacial y resolución temporal diaria, con 213x227 puntos de grilla, el dominio abarcó desde 132° - 68°W y 10°N - 50°S. Se modelaron 10 años y se utilizó el archivo *namelist.trc.sms* propuesto por el experto internacional Dr. Vincent Echevin.
3. Una modelación hidrodinámica llamada PACSUR30\_INTER de 30 km de resolución espacial y resolución temporal diaria, con 213x227 puntos de grilla, cuyo dominio abarcó

- desde 132° - 68°W y 10°N - 50°S. El periodo de modelación fue 1993-2016, donde destacó la utilización de forzantes QuikSCAT para el esfuerzo del viento.
4. Una modelación hidrodinámica llamada PACSUR20\_INTER de 20 km de resolución espacial y resolución temporal diaria, con 384x408 puntos de grilla, cuyo dominio abarcó desde 132° - 68°W y 10°N - 50°S. El período de modelación fue 1993-2017, donde destacó la utilización de forzantes QuikSCAT para el esfuerzo del viento, variables NCEP2 y aumento de la resolución espacial de la grilla.
  5. Una modelación biogeoquímica interanual ROMS-PISCES\_PADRE de 20 km de resolución espacial y resolución temporal diaria, con 384x408 puntos de grilla, cuyo dominio (padre) abarcó desde 132° - 68°W y 10°N - 50°S. El período de modelación fue 1993-2017, destacó el acoplamiento biogeoquímico definitivo ROMS-PISCES (Echevin *et al.*, 2008).
  6. Una modelación biogeoquímica interanual ROMS-PISCES\_HIJO de 6 km de resolución espacial y resolución temporal diaria, con 391x382 puntos de grilla, cuyo dominio (hijo) abarcó desde 90° - 68°W y 5° - 25°S. El período a modelar es 2001-2017 (a la fecha 2001-2013), donde destacó el anidamiento *off line* mediante roms2roms (Mason *et al.*, 2010).

La configuración del modelo ROMS-PISCES tiene 32 niveles verticales *sigma*, niveles que siguen la forma del fondo marino y que se distribuyen de manera más densa en la superficie. Este modelo se corrió continuamente en el *clúster* del Instituto de Investigación Pesquera (INPESCA). Para los modelos tipo climatológicos se modelaron 10 años de tal forma de alcanzar la estabilidad (*spin-up*) en el modelo, y se procedió a analizar el último año de las salidas. Las condiciones de borde climatológicas para forzar, los diferentes modelos ROMS-PISCES expuestos anteriormente, se obtuvieron del *World Ocean Atlas* llamado WOAPISCES.



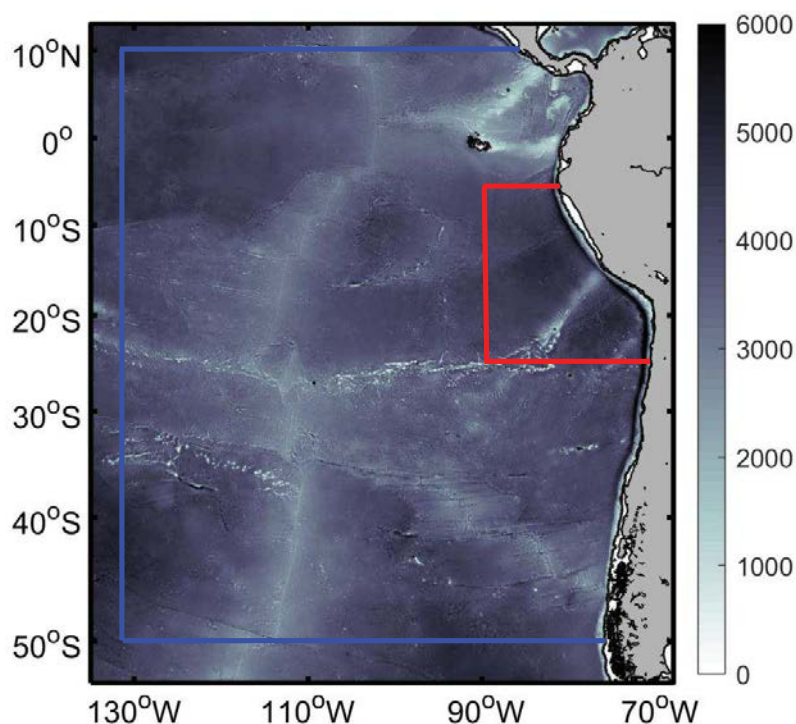


Figura 3. Dominios de modelación ROMS-PISCES. El recuadro azul muestra el dominio padre correspondiente al modelo ROMS de 20 km de resolución espacial, en rojo el dominio hijo para el sector norte de Chile y sur de Perú, con resolución de  $\sim 7$  km. El mapa de color de fondo presenta la batimetría ETOPO2 utilizada en la modelación.

Las variables de salida del modelo hidrodinámico ROMS corresponden a salinidad, temperatura, corrientes en la horizontal  $U$  (E-W) y  $V$  (N-S), corrientes en la vertical y elevación del nivel del mar. Las variables de salida biogeoquímicas del modelo acoplado ROMS-PISCES corresponden principalmente a salidas tridimensionales de Fosfato, nitrato, amonio, silicato, fierro, oxígeno disuelto, fitoplancton (nanofitoplancton y diatomeas) y zooplancton (micro y meroplancton). Para validar estas salidas del modelo, se realizará una comparación con variables de campo y satelitales.

### 5.3. Desarrollo e implementación un modelo biofísico de juveniles y adultos de jurel para simular cambios espaciales.

El desarrollo e implementación de un sistema de modelación biofísica espacialmente explícita, metodológicamente, comprendió el acoplamiento de información que describa las condiciones del hábitat de jurel respecto a información relativa a la distribución espacial de distintas etapas de

la historia de vida de la especie (acá juveniles y adultos) para identificar la respuesta de la dinámica espacial respecto a cambios en variables críticas del hábitat. A continuación de mencionan las fuentes de información para describir la dinámica espacial del jurel y las metodologías propuestas para modelarla respecto a variables críticas del hábitat.

### *5.3.1. Información ambiental*

En la aproximación propuesta las variables ambientales constituyen las variables explicatorias de la distribución espacial del jurel y sus cambios distribucionales en etapas de juveniles y adultos. Una de las ventajas de esta aproximación es contar con una base de información continua y tridimensional proporcionada por el modelo biogeoquímico validado para el Pacífico suroriental, desde el cual se obtienen variables explicatorias de la distribución de jurel. De esta manera, siguiendo las definiciones emanadas en la revisión bibliográfica, tres categorías de variables explicatorias fueron exploradas para construir los modelos estadísticos de acoplamiento biofísico: i) presas potenciales, ii) variables hidrográficas y atmosféricas y iii) variables de posición.

Todas estas variables fueron seleccionadas en función de conocimiento previo de la especie de acuerdo al protocolo de definición de factores críticos evaluado en la revisión bibliográfica, que han sido sugeridos como posibles moduladores de la dinámica espacial del jurel, incluyendo además un *set* de variables no exploradas hasta la fecha y que son proporcionadas por el modelo biogeoquímico propuesto. En particular, la concentración de oxígeno se propone como una variable fundamental en las bases técnicas de este proyecto, por su impacto en la distribución horizontal y vertical de las especies marinas, principalmente en el sector costero del norte de Chile y sur de Perú donde su influencia es mayor (Vergara *et al.*, 2016). Consecuentemente, se ha considerado explorar la necesidad de generación de un modelo anidado de mayor resolución en este último sector para describir más detalladamente las posibles relaciones del oxígeno con la distribución del jurel.

### *5.3.2. Información espacial de jurel*

La ocurrencia de jurel en el Pacífico suroriental como variable respuesta de la modelación es un insumo fundamental para el esquema planteado. Se identificaron varias fuentes de información para satisfacer este propósito: i) capturas desde la flota cerquera de Chile centro-sur; ii) capturas

desde la flota cerquera de Chile norte; iii) cruceros acústicos realizados en Chile norte y centro sur; iv) capturas desde la flota que opera en el extremo norte de la distribución (Perú, Ecuador), v) cruceros acústicos realizados en Perú; vi) capturas desde la flota internacional en altamar, vii) distribución espacial del desove desde cruceros MPDH en altamar frente a Chile central. En consecuencia con la disponibilidad temporal de esta información base para la modelación, el periodo propuesto evaluado es 2001-2016, el cual fue utilizado como fuente de información para el proceso de estimación de los modelos espaciales de distribución de especies, los cuales luego se utilizaron para realizar un análisis predictivo respecto a los cambios ambientales en el hábitat de jurel.

Las fuentes de información descritas, en la actualidad radican en distintas instituciones. Para la satisfactoria realización de este proyecto, se requirió del respaldo del Fondo de Investigación Pesquera y Acuicultura y de la Subsecretaría de Pesca y Acuicultura para la solicitud formal de los datos especificados. El Instituto de Investigación Pesquera cuenta con información georeferenciada de capturas de jurel correspondientes a la flota cerquera que opera en la zona centro-sur de Chile, las cuales han sido puestas a disposición del proyecto. Las capturas georeferenciadas correspondientes a la captura en Chile norte fueron solicitadas a la División de Investigación Pesquera del Instituto de Fomento Pesquero (IFOP), quienes a través del programa de seguimiento de pesquerías cuenta con un completo set de datos georeferenciados de la pesquería de jurel. La información proveniente de cruceros acústicos realizados en Chile, en el periodo 1997-2017, así como aquella obtenida por cruceros destinados a la evaluación de biomasa desovante mediante método MPDH, fueron solicitadas formalmente al Fondo de Investigación Pesquera y Acuicultura (FIPA) y a IFOP. Para la obtención de información georeferenciadas proveniente de Perú y Ecuador se realizaron consultas a la secretaría ejecutiva de la Organización Regional de Pesca del Pacífico Sur (OROP-PS) a través de los acuerdos de colaboración orientada a la evaluación de stock e investigación científica, sin tener éxito en la gestión debido a que estos países solo proveen de información agregada sin especificación espacio-temporal. Sin embargo, se contó con información reportada en informes de pesca locales y en publicaciones científicas específicas. La información correspondiente a la altamar fue obtenida de forma mixta, primero al igual que las capturas en Perú se solicitó la información entregada a la OROP-PS, las cuales fueron complementadas con información propia de

INPESCA obtenida a través de acuerdos de colaboración con la flota internacional. Para la obtención de la información asociada a la OROP-PS, se contó con el apoyo de la Subsecretaría de Pesca y Acuicultura, quienes han apoyado esta gestión realizada a través de vinculación internacional con este organismo.

### 5.3.3. Consideraciones hacia la modelación biofísica temprana, fase I.

Avances significativos en el entendimiento de la dinámica espacial de la historia de vida temprana del jurel en el Pacífico suroriental, han sido logrados en el proyecto FIP 2014-33 "Estructura poblacional y estimación de índices de reclutamiento de jurel basados en modelos biofísicos (fase I)" en el cual por medio de modelación biofísica se ha obtenido la distribución probable de juveniles de jurel para cada año del periodo 1995-2014 considerando tres sub-áreas de desove separadas espacialmente (costa de Perú, costa de Chile norte y zona oceánica Chile centro-sur). Ante la dificultad de observar juveniles en el campo, los resultados obtenidos por modelación son altamente útiles e informativos. En las consideraciones relativas a la estructura poblacional de jurel en el Pacífico suroriental, el proyecto FIPA 2014-33 plantea la existencia de un área de desove continua en el Pacífico suroriental, la cual presenta un gradiente de densidad alcanzando los máximos niveles en la región oceánica frente a Chile central y está modulada temporalmente por un periodo acotado de reproducción y por un hábitat óptimo para el desove asociado a la ubicación del frente subtropical (FST) y a estructuras dinámicas de mesoescala donde el desove se maximiza (Figura 4; Vásquez *et al.*, 2017). Además, no obstante las condiciones ambientales generan el hábitat potencial para la distribución espacial del desove, el hábitat efectivo de desove está definido por el nivel de ocupación de este hábitat potencial por el stock adulto reproductor, el cual en el caso de jurel, estaría relacionado con el tamaño poblacional (Gretchina *et al.*, 2015) definiendo así el hábitat efectivo o área efectiva de desove.

Bajo esta consideración, el presente proyecto recoge aquellos lineamientos propuestos en el proyecto FIPA 2014-33 (fase I) y considera la modelación del hábitat potencial de desove de jurel, la definición del área de desove efectivo basado en la distribución espacial del stock adulto hacia la reproducción y la modelación biofísica del transporte de huevos y larvas, la conectividad mediada por la dinámica oceanográfica y finalmente, la distribución de juveniles de jurel a nivel de la cuenca del Pacífico suroriental.

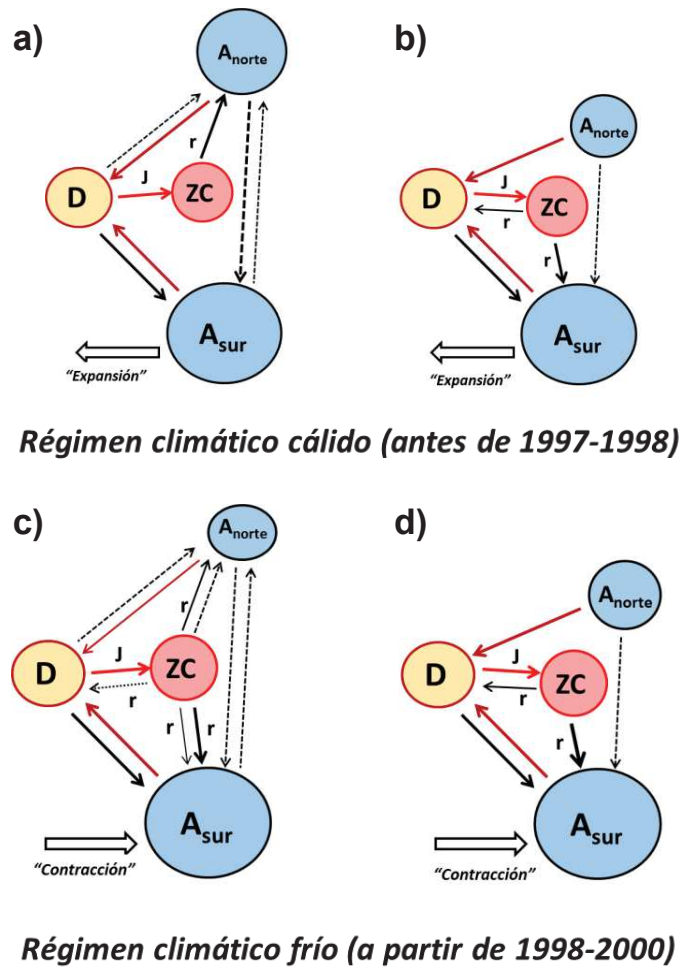


Figura 4. Modelo conceptual para la estructura poblacional del jurel (extraído de Vásquez et al., 2017; FIPA 2014-33): a) esquema espacial de distribución de las fracciones del ciclo de vida del jurel bajo un esquema de población única; b) esquema de las conexiones entre las fracciones de la población 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).

#### 5.3.4. Matriz biofísica para la modelación espacial

La distribución de jurel, al igual que otros peces pelágicos está caracterizada por altos niveles de agregación o parchosidad (Rivoirard *et al.*, 2000; Bertrand *et al.*, 2016) incluyendo áreas sin presencia o muy baja densidad en la distribución global, además debido a la amplitud del área de distribución las observaciones obtenidas constituyen solo una muestra probable de la distribución total y las áreas sin capturas pueden corresponder a una *falsa ausencia*. Esta característica genera un desafío para la modelación, pues se genera cuando una especie no está disponible a ser observada (o capturada) no obstante esté presente en un espacio geográfico. Esta característica

presenta una limitación para establecer modelos espaciales para la distribución de especies. En este proyecto, en primer lugar, consideró el establecimiento de matrices espacio-temporales ambiente-recurso por medio de una interpolación espacial en tres dimensiones del modelo hidrodinámico y biogeoquímico que permita obtener la magnitud de las variables de interés en cada punto de observación de jurel (huevos, juvenil o adulto), de manera de tener una base robusta de información de entrada para la modelación espacial. Para abordar la problemática de distribución parchosa de las variables se abordaron aproximaciones basadas en modelación presencia-ausencia con consideración de pseudo-ausencias (Hengl *et al.*, 2009; Hattab *et al.*, 2013). De esta manera se obtuvo la base para el establecimiento de un modelo predictivo espacialmente explícito para juveniles y adultos de jurel.

#### *5.3.5. Aproximaciones metodológicas hacia la modelación biofísica predictiva*

La organización de toda la información colectada respecto a la distribución espacial de jurel incluyó el manejo bajo un enfoque de VLDB (*very large data base*) compatible con las plataformas de modelación propuestas. Esta aproximación permitió: i) organizar toda la información en una única, pero gran base de datos para la posterior modelación y análisis; ii) analizar *a priori* potenciales áreas de distribución de jurel en el Pacífico suroriental. Para abordar la problemática de la distribución espacial de las especies, diferentes aproximaciones han sido propuestas (Guisan & Zimmerman, 2000; Opper *et al.*, 2012). Sin embargo todos estos métodos se basan en el hecho que las observaciones son independientes, mientras que los datos provenientes de observaciones biológicas y de la pesquería se inclinan a menudo por una importante auto-correlación espacial. Para abordar la modelación predictiva en este estudio se han considerado dos aproximaciones metodológicas estadísticamente robustas, las cuales serán exploradas para investigar la factibilidad y eficiencia para modelar el movimiento de los centros de distribución de juveniles y adultos de jurel: i) modelación espacial basada en inferencia bayesiana; ii) modelación espacial basada en modelos aditivos generalizados (GAM's).

#### *5.3.6. Modelación del área de desove potencial de jurel*

La modelación del área potencial de desove fue basada en modelos aditivos generalizados (GAM; Hastie & Tibshirani, 1990; Woods, 2006). Esta herramienta fue utilizada para realizar una modelación hábitat basada del desove potencial de jurel usando como variables predictivas las

condiciones físicas y biológicas de la columna de agua identificadas como críticas y como variable respuesta la distribución de huevos de la especie. Los GAMs ofrecen una manera objetiva de predecir la abundancia, biomasa o presencia en áreas geográficamente amplias, donde la resolución espacial de sus predicciones será equivalente a la resolución espacial de los factores incluidos como variables predictivas. Los GAMs se pueden considerar como un enfoque de tipo semi-paramétrico para predecir respuestas no lineales vinculadas a una serie de variables predictivas. En un contexto amplio, además de la predicción de la abundancia, los GAMs también pueden ser usados para identificar el hábitat óptimo de una especie usando variables ambientales espacialmente estructuradas. Los análisis de sensibilidad, realizados *a posteriori*, y las pruebas del modelo también pueden ser usados para identificar las variables ambientales más importantes y su rango de influencia. En estudios comparativos, a menudo se ha demostrado que los GAMs funcionan tan bien o mejor que otros tipos de modelos predictivos basados en condiciones ambientales. A pesar de su reconocimiento como una herramienta probada en análisis ecológicos, relativamente pocos estudios han aplicado este método para hacer predicciones fuera de las áreas muestreadas. Variadas investigaciones han probado la eficacia de este método en solucionar la presencia/ausencia de especies de peces pelágicos de importancia comercial y predecir la abundancia de sus adultos reproductivos, vinculando variables medioambientales claves que describen los patrones observados en la naturaleza. Igualmente, dichos investigadores han desarrollado métodos específicos para vincular la productividad de huevos obtenida mediante los muestreos de MPDH (Método de Producción Diaria de Huevos) con variables ambientales y datos de la fenología de las especies que permiten modelar la variabilidad espacio-temporal de la productividad de pequeños pelágicos sujetos a extracción pesquera y viviendo en ambientes complejos (Ospina-Álvarez *et al.*, 2013; Vásquez *et al.*, 2017).

Para la modelación espacial del hábitat potencial de desove de jurel, se generó un marco de modelación espacio-temporal basada en GAM's. Como información de entrada se utilizó información de los proyectos "Condición biológica de jurel en altamar" desarrollados los años 1999, 2000, 2001, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2012, 2013, 2014 y 2016 en los cuales se obtuvo la densidad de huevos de jurel en un esquema de muestreo sistemático, en cada posición de las estaciones de muestreo se obtuvo la temperatura superficial del mar (TSM) y la Eddy kinetic energy (EKE) las cuales han sido identificadas como variables críticas hacia la

distribución del desove. Además, la matriz espacial se amplificó espacialmente para la generación de *pseudo-ausencias* que permitieran obtener una correcta parametrización de la densidad de huevos en relación a las variables del hábitat. Algunos pasos previos fueron requeridos para desarrollar los modelos explícitos espaciales y ambientales: i) estandarización de las variables biológicas espaciales y ambientales; ii) preparación de una densa grilla de probabilidad dentro de los límites de los cruceros; iii) una predicción de la TSM y EKE para todos los puntos de la densa grilla de cada crucero; iv) la preparación de una grilla de predicción para todo el Pacífico suroriental (69° - 130°W y 0° - 50°S) de las variables TSM y EKE. El último punto fue realizado considerando las variables ambientales observadas en los meses de noviembre (máximo reproductivo de jurel) para el período 1994-2016. La estandarización de las variables espaciales y ambientales fue realizada para permitir que covaríen en el modelo usando aproximadamente los mismos grados de libertad dentro del rango de valores observados para cada variable (Bernal *et al.*, 2011). Modelos de abundancia fueron ajustados a los datos de cada crucero para predecir la probabilidad de observar huevos de jurel en una muestra dada como una función de variables temporales y ambientales. La metodología seguida fue similar a la utilizada por Bernal *et al.*, (2007) para desarrollar un modelo de desove para la sardina en las costas del Atlántico Europeo. En la aproximación utilizada las variables espaciales Latitud y Longitud, fueron dejadas libres dentro del modelo para permitir que la predicción se realizara más allá de los límites observados por los cruceros y de esta manera, analizar las hipótesis de continuidad espacial del área probable de desove de jurel a lo largo del Pacífico suroriental. Tanto el tratamiento de las variables, la generación de grillas como la generación de modelos predictivos fueron hechas en ambiente R (Dalgaard, 2008). De esta manera, el modelo utilizado correspondió a la siguiente ecuación:

$$egg.prod.m2 \sim s(SST.pred.norm) + s(EKE.pred.norm), family=quasipoisson)$$

Una vez que el modelo final fue seleccionado, se obtuvieron estimados de densidad de huevos para todos los años en una grilla regular que abarca el dominio situado entre 69° y 130°W y entre 0° y 50°S, que constituyeron las áreas potenciales de desove de jurel.

### 5.3.7. Modelación biofísica de la distribución de juveniles de jurel



En estudios previos se ha definido que el transporte de huevos y larvas desde el área de desove hacia las zonas de crianza constituyen un factor crítico que afecta la sobrevivencia larval y la subsecuente distribución de juveniles en especies pelágicas (Hare & Cowen, 1991; Nakata *et al.*, 2000). Utilizando la aproximación definida en la fase I (FIPA 2014-33; Vásquez *et al.*, 2017), pero considerando el área de desove estimada por el modelo espacio-temporal, la cual fue acotada en función de la distribución observada del stock adulto, se inicializó un modelo biofísico basado en el individuo para la predicción de la distribución de juveniles de jurel por medio de la plataforma Ichthyop (<http://www.ichthyop.org/>). El modelo biofísico cual utilizó como ambiente físico el provisto por el ROMS con resolución 10 km y forzantes mejorados (ver punto 5.2.1 para detalles). La configuración y descripción de módulos de este modelo se detallan en la Tabla II.

Tabla III. Constantes y parámetros utilizados en el modelo biofísico para simular distribución de juveniles de jurel.

| Constantes                     | Definición   |
|--------------------------------|--|
| Duración del desove            | El periodo desove es de 30 días situado en noviembre de cada año   |
| Duración del transporte        | El periodo de simulación es de 120 días desde la fecha de desove   |
| Número de individuos modelados | 50.000 por cada pulso de desove  |
| Temperatura letal para huevos  | Mortalidad para temperatura bajo 12 y sobre 26°C   |
| Temperatura letal para larvas  | Mortalidad para temperatura bajo 12 y sobre 26°C   |
| Hora de desove                 | El desove se asume ocurre a medianoche   |
| Parámetros de control          |  |
| Área de desove                 | Área de desove estimada mediante modelación espacial (sección 5.3.4.1.) y acotada según distribución stock adulto  |
| Año de simulación              | Modelo con variabilidad interanual derivado del ROMS 10 km con forzantes mejorados   |
| Mes de liberación              | Se asume que el desove ocurre en noviembre   |
| Pulso de desove                | Desoves ocurren cada 5 días, siendo la misma cantidad de individuos liberados  |
| Profundidad de desove          | Proporcional a lo observado en muestreos estratificados: 85%, 11%, 3% y 1% para estratos de 0-25, 25-50, 50-75 y 75-100 m respectivamente distribuidos aleatoriamente. |
| Migración vertical             | Esquema de migración diurno-nocturna con modelo sigmoideo entre 0 y 60m  |
| Esquema de abundancia          | Superindividuo, cada individuo modelado representa una abundancia análoga a la entregada por el modelo espacial de desove.   |

### 5.3.8. Modelo de distribución de especies para adultos de jurel

La modelación espacial basada en inferencia Bayesiana se realizó por medio del método *integrated nested Laplace approximations* (INLA; [www.r-inla.org](http://www.r-inla.org); Figura 5), un algoritmo determinista propuesto por Rue *et al.* (2009) en el cual la autocorrelación es modelada usando las propiedades Markovianas (dependencia solo de los vecinos, *sparse matrix*) y es ampliamente recomendado actualmente para ajustar modelos espaciales usando inferencia Bayesiana. Las ventajas de INLA es su capacidad de trabajo incluyendo grandes bases de datos caracterizadas por una alta resolución espacial y temporal, así como también por disponer de datos de distintas fuentes de información, como es el caso del presente estudio. Para la aplicación de esta aproximación utilizó la plataforma de programación R a través de su paquete de algoritmos R-INLA, el cual ha probado su capacidad de realizar modelos de dominios espacio-temporales amplios de forma precisa y más rápida que los modelos bayesianos que utilizan inferencia vía MCMC (Markov chain Monte Carlo) (Blangiardo *et al.*, 2012).

Figura 5. Sitio Web de R-INLA, modelo para configurar modelos espaciales utilizando inferencia Bayesiana ([www.r-inla.org](http://www.r-inla.org)). En este sitio se encuentra disponible la documentación y descarga de archivos.

#### 5.3.8.1. Base de datos presencia/ausencia de jurel en el Pacífico suroriental

La naturaleza de la información colectada para el área global del Pacífico suroriental incluyó solo datos positivos de jurel (i.e. presencias) en el set de datos. Para generar un set de datos para

modelar la presencia de jurel bajo un ambiente variable, pseudo-ausencias fueron generadas aleatoriamente para toda el área de estudio. El set de pseudo-ausencias fue generada usando la función *srswor* (muestreo aleatorio sin reemplazo) desde el paquete *sampling* (Tille & Matei, 2016) del software R (R Development Core Team, 2017). Para cada uno de los meses considerados en la base de datos de las observaciones (2001-2016) se consideraron 200 pseudo-ausencias distribuidas aleatoriamente en toda el área de estudio. Una vez generadas las pseudo-ausencias, estas se combinaron con las presencias reales para generar un único set de datos para ser usadas en un modelo de naturaleza binomial. Como ha sido destacado por Orue *et al.* (2020), la generación de set de datos que incluyen pseudo-ausencias es un tópico actual en la investigación de distribución de especies y es sujeto de debate (e.g. Hastie & Fithian, 2013), se prefirió el uso de una distribución binomial con un modelo espacial Bayesiano, en lugar de un modelo menos preciso que permita el uso de datos de sólo presencia (e.g. BIOCLIM, DOMAIN) (Roos *et al.*, 2015).

#### 5.3.8.2. Base de datos de la talla media de jurel

Dentro de las fuentes de información descritas en el punto 5.3.2., una fracción correspondiente a la pesquería chilena contó con muestreos de frecuencia de tallas provenientes de los programas de observadores a bordo implementados por IFOP e INPESCA. Para analizar la estructura espacial de la talla media de jurel y realizar inferencias respecto a su asociación con variables descriptoras del hábitat, se calculó la talla media para cada registro espacial y temporalmente referenciados. De esta forma, se estructuró un nuevo set de datos donde la variable dependiente fue la talla media. Para la selección de la familia de distribución a ser utilizada en la modelación espacial, se realizó una prueba de Kolmogorov-Smirnov para probar la bondad de ajuste de tres tipo de distribuciones respecto a la variable respuesta: normal, log-normal, gamma.

#### 5.3.8.3. Variables ambientales para INLA

De acuerdo al análisis bibliográfico orientado a determinar variables críticas para la distribución de jurel, las variables predictoras utilizadas en la modelación bayesiana de distribución de especies fueron:

i) presas potenciales (ámbito ecológico): clorofila-a superficial, zooplancton a 5 metros de profundidad.

ii) variables hidrográficas (ámbito físico-químico): temperatura superficial del mar y oxígeno disuelto: concentración de oxígeno a 50 metros de profundidad, presencia/ausencia de mínima de oxígeno ( $2 \text{ ml L}^{-1}$ ) en los primeros 50 metros de la columna de agua.

iii) variables hidrodinámicas y atmosféricas (ámbito físico-químico): eddy kinetic energy, turbulencia y altura del nivel del mar.

iv) variables de posición: latitud y longitud.

Para cada uno de los registros espacio y tiempo referenciados (presencia/ausencia jurel, talla media), las variables fueron extraídas en cada posición y para cada mes de análisis obteniendo una matriz de variables predictoras equivalente a las observaciones. Todas las variables ambientales fueron testeadas para correlación, colinearidad y registros faltantes. Las variables no evidenciaron correlaciones estadísticamente significativas (correlación de Pearson,  $r < 0,5$ ;  $p\text{-value} > 0,001$ ), a excepción de las variables concentración de oxígeno disuelto y presencia de mínima de oxígeno, como es esperable debido a su origen común ( $r = -0,69$ ;  $p\text{-value} < 0,001$ ). Todas las variables, a excepción de la zona mínima de oxígeno (binomial) fueron estandarizadas usando la función *decostand* mediante el paquete *vegan* (Oksanen *et al.*, 2013) del software R, en orden a facilitar la interpretación y permitir la comparación de los pesos relativos entre variables (Kinas & Andrade, 2017)

#### 5.3.8.4. Modelo de distribución de especies para jurel en el Pacífico suroriental

Modelos jerárquicos bayesianos de distribución de especies fueron utilizados para predecir la probabilidad de presencia de jurel respecto a las variables ambientales seleccionadas utilizando los datos de presencia y las pseudo-ausencias generadas. Siguiendo a Orue *et al.*, (2020), para propósitos de modelación la variable respuesta es una variable binaria que representa la presencia (1) o la ausencia (0) de jurel ( $Y_i$ ) en cada localidad  $i$ , y por tanto la ocurrencia es modelada de acuerdo a:

$$Y_i \sim \text{Bernoulli}(\pi_i) = 1, \dots, p$$

$$\log(\pi_i) = X_i\beta + W_i$$

$$\beta \sim N(\mu_\beta, q_\beta)$$

$$W_i \sim N(0, Q(k, \tau))$$

donde  $\pi_i$  representa la probabilidad de la presencia de una especie en una localidad dada  $i$  y  $X_i\beta$  representa la matriz de efectos fijos de los predictores lineales y  $W_i$  representa el efecto aleatorio espacialmente estructurado en la localidad  $i$ . Una distribución Gaussiana con media cero y matriz de covarianza  $Q$  se asumió para la componente espacial, la cual depende de los hiperparámetros  $k$  y  $\tau$  que determinan el rango del efecto espacial y su varianza total, respectivamente. Las hiper-priors para  $k$  y  $\tau$  son centradas en valores tales que el rango es aproximadamente un 20% del diámetro la región y la varianza es igual 1 (Lindgren *et al.*, 2011).

Se utilizó la aproximación *Integrated Nested Laplace Approximations (INLA)* (Rue *et al.*, 2009) y el paquete *INLA* (<http://www.r-inla.org>) implementado en software R para obtener los parámetros bayesianos para estimación y predicción. INLA tiene la potencialidad de calcular la correlación espacial de los datos o efecto espacial ( $W$ ), el cual es calculado usando ecuaciones parciales diferenciales estocásticas (SPDE, de su sigla en inglés) (Lindgren *et al.*, 2011), que asegura que el dominio espacial continuo sea discretizado en unidades parciales más pequeñas. En orden a maximizar la capacidad predictiva en todo el dominio modelado, y considerando que la naturaleza de los datos en la mayoría de los meses analizados presentan baja auto-correlación espacial (Moran test,  $p > 0.001$ ) debido a su origen desde múltiples fuentes (múltiples flotas y múltiples cruceros), el primer escenario desestimó el efecto espacial en el análisis predictivo de distribución de jurel, y consideró las variaciones del hábitat como predictores de la distribución potencial de jurel. Mientras que un segundo escenario consideró una temporada de pesca donde se contó con datos de todas las flotas donde existió auto-correlación en la información espacial (Moran test,  $p < 0.001$ ) incorporó el efecto espacial para analizar el proceso espacial multi-flota.

Se consideraron *priors* de bajo nivel informativo con distribución Gaussianas media-cero con una varianza de 100 para todos los parámetros involucrados en los efectos fijos, de acuerdo a lo recomendado por Held *et al.*, (2010). La selección del modelo para describir los cambios en el hábitat adecuado para la distribución de jurel se realizó mediante la configuración de tantos modelos como posibles interacciones entre las variables predictoras seleccionadas. La mejor combinación de variables fue seleccionada basada en el *Watanabe-Akaike Information Criterion* (WAIC; Watanabe, 2010) y el Log-Conditional Predictive Ordinations (LCPO; Roos & Held,

2011). Específicamente, un WAIC inferior indica un mejor ajuste, mientras un LCPO inferior representa una mejor calidad en la predicción. El mejor compromiso entre ajuste, parsimonia y calidad predictiva está relacionado con bajos niveles de WAIC y LCPO. Así, el mejor modelo fue seleccionado basado en dicho compromiso, conteniendo solo predictores relevantes (i.e. aquellos con intervalos de credibilidad del 95% que excluyeron el cero; Fonseca *et al.*, 2017)

Una vez que la inferencia fue llevada a cabo, se predijo la probabilidad de presencia de jurel en el área de interés usando *kriging* Bayesiano (Muñoz *et al.*, 2013). La predicción en INLA fue realizada simultáneamente con la inferencia. Los módulos SPDE de INLA permite la construcción de la grilla de triangulación Delaunay que cubre la región de estudio para la predicción. Una vez que la predicción es realizada, se utilizaron funciones adicionales que linealmente interpolan los resultados dentro de la grilla Delaunay hacia una grilla regular más fina.

Las aproximaciones descritas han sido diseñadas e implementadas para obtener resultados relativos a cambios estacionales e interanuales en los patrones de distribución del jurel. De esta manera, cambios simulados en la estructura del hábitat por el modelo hidrodinámico-biogeoquímico modularon la dinámica espacial de juveniles y adultos de jurel. En este sentido, los procesos modelados fueron vinculados con procesos importantes del ciclo de vida de jurel como el desove, la historia de vida temprana y la alimentación de adultos, para analizar la respuesta en la estructura espacial de jurel respecto a la variabilidad del hábitat. Por otra parte, las variaciones interanuales se han vinculado a cambios de baja frecuencia del hábitat (e.g. El Niño) que generen impacto en las condiciones del hábitat y que pudiesen impactar la distribución espacial y estructura de la población de jurel, dando origen en el corto plazo a cambios en los centros de gravedad de la población y en un plazo mayor a cambios en la estructura poblacional de la especie en el Pacífico suroriental.

#### 5.4. *Plataforma computacional para la implementación de los modelos hidrodinámicos, biogeoquímicos y biofísicos.*

Los requerimientos computacionales para implementar el modelo hidrodinámico, biogeoquímico y posteriormente el de predicción espacial son muy altos. Uno de los aspectos claves en este tipo

de estudio es la plataforma computacional, la cual debe tener los recursos necesarios para ejecutar modelos de alta complejidad como lo son los modelos hidrodinámicos y biofísicos. En este contexto, se ha contado con las capacidades técnicas propias para la implementación de modelos hidrodinámicos y biofísicos. En la actualidad el equipo ejecutor cuenta con un nodo de cálculo de última generación para dar cumplimiento a las demandas de estos modelos. El nodo de cálculo funciona en sistema de clúster (Figura 6) cuenta con:

- 8 Procesadores AMD Opteron 6376 de 16 núcleos de 2.3GHz/16MB (128 núcleos)
- 256GB de Memoria RAM (16x 8GB Dual Rank Registered)
- 1x Discos Duros SAS de 1TB en 7.2K rpm
- 2 Discos Duros 3.5" 1TB SAS 6Gb/s 7.2K RPM 128M
- Dispositivo DVD/RW Interno
- Incluye dos puertos Gigabit Ethernet e interfaz IPMI
- Fuente de Poder Redundante
- Tarjeta PCIe Infiniband Mellanox ConnectX-2 QDR, 1puerto, HCA Gen 2
- Sistema Operativo CentOS 6

Por otro lado INPESCA cuenta con un sistema de almacenamiento, el cual cuenta actualmente con:

- 4 procesadores Intel Xeon E5-2603 de 4 núcleos de 1.8GHz/10MB (16 núcleos)
- 64GB de Memoria RAM (8x 4GB Dual Rank Registered)
- 48x Discos Duros SATA de 1TB en 7.2K rpm (RAID 0, 1, 5, 6, 10, 50, 60)
- Incluye dos puertos Gigabit Ethernet e interfaz IPMI
- Tarjeta PCI controladora de discos RAID con capacidad de niveles: 0, 1, 10, 5.

Kit Infiniband:

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

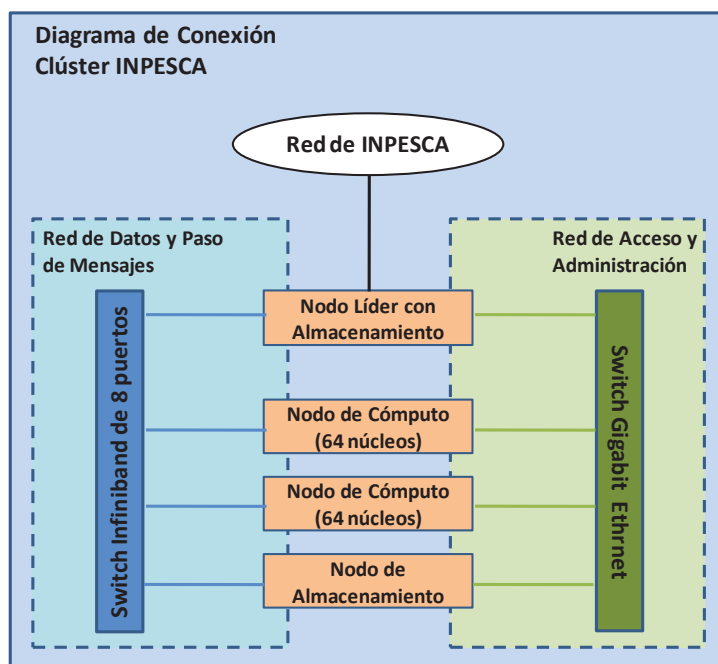


Figura 6. Diagrama de Clúster INPESCA para la ejecución de modelos hidrodinámicos, biogeoquímicos y biofísicos: 128 núcleos de procesamiento y 48 TB de almacenamiento.

### 5.5. Identificación de fortalezas y debilidades del proyecto.

Los estudios enmarcados en el ámbito de la modelación biofísica de especies que constituyen recursos pesqueros que se caracterizan por su carácter multifactorial, interdisciplinario, y muchas veces inter-institucional, han tenido un creciente interés en las últimas décadas, debido a la posibilidad que otorgan en la obtención de resultados independientes de la evaluación pesquera, y a la incorporación explícita de forzantes ambientales especialmente en las primeras fases de desarrollo de las especies (huevos, estados larvales y post-larvales y juveniles). Este enfoque, si bien ha sido recientemente muy utilizado para la comprensión integrada del recurso y la variabilidad ambiental con fines de manejo pesquero con aproximación en el ecosistema, es muy demandante de información, especialmente al considerar períodos y/o regiones extensas, tanto de aspectos relacionados con la hidrografía e hidrodinámica, como de factores relacionados con la biología y ecología de las especies.

De igual manera, este tipo de investigaciones revela una carencia importante de estudios vinculados con la modelación de estados adultos de peces y su asociación con procesos



oceanográficos en distintas escalas, especialmente en aquellas especies transzonales y de amplia distribución como es el caso del jurel. En este contexto, las investigaciones donde se ha alcanzado niveles significativos de éxito han sido aquellas que han dispuesto un alto nivel de insumos (en la multidisciplina), un financiamiento adecuado, y han atendido a la implementación de programas inter-institucionales de investigación en una escala al menos quinquenal.

En esta perspectiva, con el propósito de avanzar en el estudio de la estructura poblacional del jurel bajo un hábitat variable, se propuso la implementación de un análisis de juicio experto por medio de la realización de un taller que integre la participación de especialistas nacionales en diferentes disciplinas en el ámbito de la dinámica poblacional del jurel, con la finalidad de generar una dinámica de trabajo que posibilite identificar las debilidades, fortalezas y brechas de conocimiento de todo el ámbito abarcado por el estudio, junto con establecer, bajo consenso una validación y jerarquización de estos elementos, al mismo tiempo se analizó y consensuó una propuesta de líneas de desarrollo/necesidades de investigación para avanzar en el estudio de la estructura poblacional de la especie, logrando definir las prioridades.

Debido a la contingencia sanitaria existente durante la realización del actual proyecto vinculada a la pandemia por Covid-19, este taller fue realizado de manera telemática, a través de Google Meet, en acuerdo con la contraparte técnica y en consonancia a los requerimientos establecidos para estos efectos en la resolución exenta N°886 del Ministerio de Economía. Este cambio metodológico significó un desafío en relación a la adaptación de las técnicas de participación ideadas para los talleres presenciales inicialmente propuestos.

Es importante destacar que un grupo no es una suma de personas, sino las interrelaciones que ellas construyan (Careaga *et al.* 2006), desde esta perspectiva es relevante propiciar la interacción grupal y la conformación de lo grupal, para lo cual es necesario aplicar técnicas que faciliten esta interacción. De esta manera, se utilizó una adaptación de las técnicas participativas del Sistema de Análisis Social (SAS2), el cual plantea técnicas y herramientas que abordan los aspectos sociales de los problemas de desarrollo, estas técnicas y herramientas van más allá del enfoque de "solución técnica" para el desarrollo, tomando seriamente en cuenta la dimensión social a partir

del sistemas cognitivos de los usuarios en proyectos que requieran de un diálogo efectivo entre sus actores principales (Chevalier, 2009).

En esta perspectiva, la contrastación de hipótesis asociadas a la estructura poblacional del jurel requiere del mejor conocimiento integrado e interdisciplinario, especialmente en un recurso de muy amplia distribución en el Pacífico suroriental, siendo posible identificar en algunos casos información insuficiente en algunas escalas y/o carencia de datos en algunas regiones del área modelada, que puedan ser categorizadas como debilidades hacia el enfoque de modelación biofísica reseñado en esta oferta técnica. Con el propósito de determinar fortalezas y debilidades del ámbito abarcado por el estudio, en este caso las aproximaciones metodológicas orientadas al esclarecimiento de la estructura poblacional del jurel bajo un hábitat variable, se propuso implementar un análisis de juicio de experto por medio de la realización de un Taller multi-institucional con representación de distintas instancias involucradas en el estudio y manejo pesquero de jurel a nivel nacional, el cual fue titulado “Taller de actualización del estado del conocimiento de la estructura poblacional de jurel en el Pacífico Suroriental”.

#### *5.5.1. Estructura de los talleres de discusión experta*

El taller es concebido como una instancia de aprendizaje por sobre una de enseñanza, en donde se destaca el “aprender haciendo”, correspondiendo a una metodología participativa en la que se enseña y se aprende a través de una tarea conjunta. Es destacable que la interdisciplinariedad de los participantes planteó una ventaja para abordar de manera concreta el enfoque sistémico en el análisis de las debilidades, brechas y acciones a recomendar. El taller fue abordado en dos fases durante días distintos y se identificaron los siguientes puntos:

- a. Realización de exposiciones de los principales aspectos que consideró el desarrollo de las modelaciones y los resultados obtenidos.
- b. Plenario de discusión de los resultados y planteamientos consensuados en el ámbito de las hipótesis de estructura poblacional del jurel, con un enfoque participativo.
- c. Identificación de las debilidades, brechas y lineamientos de investigación, socialización y establecimiento de consensos mediante el desarrollo de un taller participativo.

- d. Plenario establecimiento de recomendaciones con un enfoque participativo.

*5.5.2. Implementación de taller: Actualización del estado del conocimiento de la estructura poblacional de jurel en el Pacífico suroriental.*

La definición de la estructura poblacional y la identificación stocks auto-sustentados en poblaciones naturales es un tema complejo, que debe ser abordado desde una mirada multidisciplinaria para generar definiciones hacia la evaluación de stocks y el manejo pesquero. Este taller se desarrolló como una oportunidad para revisar el estado del conocimiento en relación a la estructura espacial de la población de jurel y discutir como los resultados del presente proyecto se insertan en la discusión de las distintas hipótesis manejadas por la Organización Regional de Pesca del Pacífico Sur para el manejo integrado de la pesquería de jurel.

El equipo ejecutor presentó el marco general de la problemática, incluyendo los principales resultados del proyecto, los que fueron abordados en tres etapas de participación: i) un panel de discusión abierta mediada por un moderador; ii) una instancia de identificación de fortalezas y debilidades de las metodologías presentadas hacia el entendimiento de la estructura poblacional, y; iii) una instancia propositiva de líneas de desarrollo en investigación aplicada hacia la estructura poblacional de jurel. Particularmente, la primera fase del taller involucró la realización de presentaciones y un plenario de discusión, esta última parte se caracterizó por el carácter dialogante que se buscó fomentar entre los participantes y el equipo ejecutor del proyecto a través de un moderador, con la finalidad de dar respuesta y aclarar las consultas que se generaron en el transcurso de las presentaciones. La segunda fase, involucró la realización de tres actividades participativas caracterizadas por:

- i) La instalación de una propuesta inicial de las debilidades identificadas en la implementación del estudio hacia la estructura poblacional, planteada por el equipo ejecutor, esta propuesta fue dada a conocer a los participantes, desde los cuales se generaron aportes que permitieron la modificación de algunas debilidades propuestas y la incorporación de nuevas debilidades, esta actividad finalizó en el establecimiento de un consenso de las debilidades propuestas y los aportes generados en el taller. Esta actividad consideró la aplicación de una consulta individual a cada participante con la finalidad de priorizar las debilidades consensuadas, para ello se utilizó la

herramienta virtual Socrative (<https://www.socrative.com/>) que permitió la retroalimentación inmediata con los participantes al taller, esto es una vez que cada participante asignó un orden correlativo a cada debilidad y finalizó la consulta, se generó automáticamente un archivo Excel desde la aplicación con todas las respuestas que pudo ser analizado gráficamente por toda la audiencia para conocer las preferencias y determinar cuál o cuáles debilidades son las más prioritarias, en relación a las mayores preferencias expresadas, de tal modo de determinar la priorización de las debilidades identificadas

ii) La segunda actividad consideró la presentación de las brechas que emergieron de cada debilidad identificada y priorizada, las cuales fueron consensuadas por los participantes, posteriormente para cada brecha se presentó una línea de investigación las cuales fueron consensuadas con los participantes, en ambos casos las brechas y las líneas de investigación fueron identificadas previamente por el equipo ejecutor del proyecto bajo el desarrollo de trabajo intersesional.

iii) Como última actividad se realizó un plenario en el cual se produjo intercambio de opiniones entre los participantes que permitieron establecer algunos consensos y sugerencias.

## 6. RESULTADOS

---

### **6.1. Objetivo específico 1. Identificar factores críticos del hábitat (físicos, químicos, ecológicos, biológicos) de jurel a lo largo de su historia de vida en énfasis en los estadios juveniles y adultos en base a una recopilación bibliográfica.**

#### *6.1.1. Reunión-Taller interna del Grupo de Trabajo*

Esta reunión fue llevada a cabo con el propósito de protocolizar la revisión bibliográfica asociada a la determinación de factores críticos del hábitat de jurel, además de compartir y consensuar conocimientos y experiencias del grupo de trabajo del proyecto (GT), en relación a la identificación de agentes o factores críticos (o relevantes) que tanto en el ámbito físico-químico como bio-ecológico, tienen efecto en la abundancia y distribución espacio-temporal de juveniles y adultos de jurel, integrando una mirada interdisciplinaria y multifactorial, que es necesaria en este tipo de proyectos.

Durante el desarrollo del taller se discutió y consensuó sobre los siguientes temas principales:

- Escalas de variabilidad: La determinación de escalas relevantes en que los diferentes forzantes ambientales (físico-químicos y bio-ecológicos) pudieran ejercer sobre la distribución y abundancia de adultos y juveniles de jurel en la región norte de Chile. De acuerdo a la experiencia y conocimientos del GT, las escalas más relevantes hacia este objetivo corresponden a:

a) escala estacional, que responde a la variabilidad de las condiciones del hábitat especialmente en latitudes intermedias (>20-25°S), y a procesos biológicos de la especie (migración, reclutamiento).

b) escala interanual, que responde a la variabilidad de las condiciones del hábitat especialmente en relación a la variabilidad tropical (fases positivas y negativas del ENOS).

c) escala espacial local y regional, respondiendo a la distribución de ejemplares adultos y juveniles de jurel, que puede involucrar tanto la variabilidad espacial zonal (hábitat costero como

de alta mar, más allá de la Zona de Transición Costera), como la variabilidad meridional que incluye una región más septentrional (centro-sur de Perú y norte de Chile) así como latitudes intermedias (frente a Chile centro-sur).

Fuentes de información: de acuerdo a la experiencia y el conocimiento del GT del proyecto, y considerando tanto documentos primarios (publicaciones periódicas), como documentos secundarios (literatura gris), se consensó la necesidad de búsqueda bibliográfica en las siguientes fuentes:

- a) artículos en revistas indexadas de carácter ISI,
- b) artículos en revistas indexadas no-ISI,
- c) artículos en repositorios científicos (ORP-PS)
- d) literatura no formalmente publicada (literatura gris) que incluye tesis de grado, e informes técnicos principalmente del Fondo de Investigación Pesquera y Acuicultura, del Instituto de Fomento Pesquero, como reportes e informes especializados de la Subsecretaría de Pesca.

Factores críticos del hábitat de jurel: De acuerdo a la experiencia y conocimiento de los integrantes del GT del proyecto que participaron en la reunión-taller, se identificó y consensó *a priori* orientar la búsqueda una serie de factores físico-químicos y bio-ecológicos asociados al hábitat del jurel en el Pacífico suroriental, que pueden ser incorporados al patrón de búsqueda bibliográfica y agrupados de acuerdo a su posible relación funcional de acuerdo a:

- i) presas potenciales: representan las potenciales relaciones ecológicas predador-presa del jurel (e.g. zooplancton);
- ii) variables hidrográficas: potencial influencia directa en la fisiología o comportamiento de los individuos (e.g. temperatura);
- iii) variables hidrodinámicas y atmosféricas: potencial influencia directa en el movimiento de la especie por transporte o niveles de preferencia (e.g. velocidad de corrientes)
- iv) variables de posición: sin influencia directa en la fisiología o movimiento de la especie (e.g. posición geográfica, batimetría).

Así, entre los factores a explorar se identificaron:

a) Factores físicos:

- Temperatura (superficial y sub-superficial) del mar.
- Salinidad (superficial, sub-superficial).
- Esfuerzo del viento, deriva de Ekman, índice de turbulencia vertical.
- Corrientes geostróficas.
- Dinámica de estructuras de meso-escala (remolinos, meandros energéticos), sub-mesoescala (filamentos, remolinos locales). Índice EKE (*Eddy kinetic energy*).
- Regiones frontogénicas regionales y locales (Frente subtropical, Frentes de surgencia).
- Estructuras oceanográficas verticales (capa de mezcla, termoclina, pycnoclina).

b) Factores químicos:

- Concentración de oxígeno disuelto.
- Concentración de macronutrientes (nitritos, nitratos, amonio, fosfatos, silicatos).
- Concentración de micronutrientes (e g., hierro).
- Factores que incidan sobre la productividad primaria (PAR, turbidez)
- Estructuras verticales (oxiclina, nutriclina). Estrato de mínimo de oxígeno.

c) Factores biológicos:

- Clorofila-a (como estimador de la biomasa fitoplanctónica).
- Fitoplancton, microplancton y zooplancton.
- Producción primaria y secundaria (zooplancton)
- Potenciales predadores de las diferentes fases del ciclo de vida de jurel.

### 6.1.2. Búsqueda bibliográfica y determinación de factores críticos

La revisión de la bibliografía realizada para los objetivos del proyecto (objetivo específico 1) se realizó considerando: i) una estrategia de búsqueda desde la internet para información científica formalmente publicada, ii) análisis desde literatura gris correspondiente a sitios previamente identificados y consensuados en la reunión-taller.

De esta manera, se revisó todos los informes científicos provenientes del FIPA, del IFOP y de la Subpesca relacionados con jurel correspondientes a los últimos 20 años, que responden a las siguientes temáticas principales: i) evaluación acústica, ii) estimación de biomasa desovante por MPDH, iii) Estudios de dinámica trófica, iv) enfoques bio-oceanográficos, v) enfoques biofísicos, vi) estudios de migración regional, vii) distribución de reclutas.

Asimismo, la estrategia de búsqueda en internet de publicaciones indexadas y no-indexadas y de otra literatura gris, se realizó principalmente considerando el motor de búsqueda de Google Scholar. Las palabras clave más frecuentes para la búsqueda individual y combinada fueron: jurel, jurel chileno, jurel peruano, pesquerías, Chile centro-sur, Chile norte, hábitat, oceanografía, forzantes ambientales, forzantes biológicos, juveniles jurel, historia de vida, Pacífico suroriental, variables hidrodinámicas, variables hidrográficas, variables atmosféricas, variables hidrodinámicas, variables hidrográficas (todas las palabras tanto en idioma español como inglés).

Un particular énfasis se colocó en el análisis bibliográfico desde repositorios contenidos en el sitio web de la Organización Regional de Manejo Pesquero del Pacífico Sur, especialmente desde los artículos de información y presentación correspondientes a las 5 reuniones regulares del Comité Científico de la Organización, a saber:

- 1ra Reunión del Comité Científico de la SPFRMO. La Jolla, California, USA. 21-27 octubre de 2013.
- 2da Reunión de Comité Científico de la SPFRMO. Honolulu, USA. 1-7 octubre de 2014.
- 3ra Reunión de Comité Científico de la SPFRMO. Port Vila, Vanuatu. 28 septiembre-3 octubre de 2015.
- 4ta Reunión de Comité Científico de la SPFRMO. La Haya, Holanda. 10-14 octubre de 2016.
- 5ta Reunión de Comité Científico de la SPFRMO. Shanghai, China. 23-28 septiembre de 2017.



Asimismo, se revisó toda la información contenida en los 25 *working papers* y 25 *visual presentations*, correspondiente al *Workshop* sobre jurel desarrollado en Santiago entre el 30 de junio y el 4 de Julio de 2008.

Los resultados de esta búsqueda bibliográfica desde las fuentes ya mencionadas se muestran en la el Anexo I, sintetizando las variables analizadas para identificar los factores críticos del hábitat, tanto para el ámbito físico y químico como para el biológico y ecológico. Se analizó el nivel de jerarquización de cada variable/factor/índice correspondiente a las frecuencias de ocurrencias determinadas en la búsqueda para cada uno de los ámbitos, y para juveniles y adultos de jurel por separado.

De acuerdo a la búsqueda bibliográfica, un total de 138 referencias obtenidas desde publicaciones y reportes técnicos entregaron información aplicable a la determinación de factores críticos ambientales, de los cuales se logró establecer un total de 13 variables del ambiente físico-químico y bio-ecológico que tienen impacto en la modulación de la distribución espacio-temporal de la abundancia de jurel juvenil y adulto en el Pacífico suroriental. La Tabla IV muestra los resultados de las frecuencias de ocurrencia de cada variable obtenida desde la literatura, desde donde el 79% de los registros correspondió a la fracción adulta y el 21% restante a la fracción juvenil. La Figura 7 resume el aporte porcentual de cada variable identificada tanto para adultos como juveniles de jurel. De acuerdo a esto, los factores críticos fueron definidos adoptando la definición establecida anteriormente, y restringiéndola a aquellas variables factibles de ser integradas en un esquema de modelación espacial, hidrodinámica y biofísica. En consecuencia, los factores críticos determinados son los siguientes:

- i) presas potenciales (ámbito ecológico): microzooplancton, mesozooplancton, clorofila-a.
- ii) variables hidrográficas (ámbito físico-químico): temperatura, oxígeno disuelto, salinidad, densidad del agua de mar.
- iii) variables hidrodinámicas y atmosféricas (ámbito físico-químico): corrientes, *eddy kinetic energy*, viento y turbulencia, altura del nivel del mar.
- iv) variables de posición: latitud, longitud, distancia de la costa.

Tabla IV. Número de registros bibliográficos identificados para cada variable obtenida desde la literatura para la identificación de factores críticos del hábitat de jurel.

| Variable/Fracción    | Adultos | Juveniles |
|----------------------|---------|-----------|
| Temperatura          | 54      | 11        |
| Corrientes           | 5       | 5         |
| Altura nivel del mar | 1       | 0         |
| Clorofila-a          | 6       | 3         |
| Densidad             | 1       | 0         |
| Eddy kinetic energy  | 8       | 2         |
| Oxígeno disuelto     | 10      | 3         |
| Viento y turbulencia | 10      | 2         |
| Mesozooplancton      | 10      | 2         |
| Microzooplanton      | 3       | 3         |
| Presencia predadores | 2       | 0         |
| Salinidad            | 2       | 1         |
| Peces mesopelágicos  | 2       | 0         |

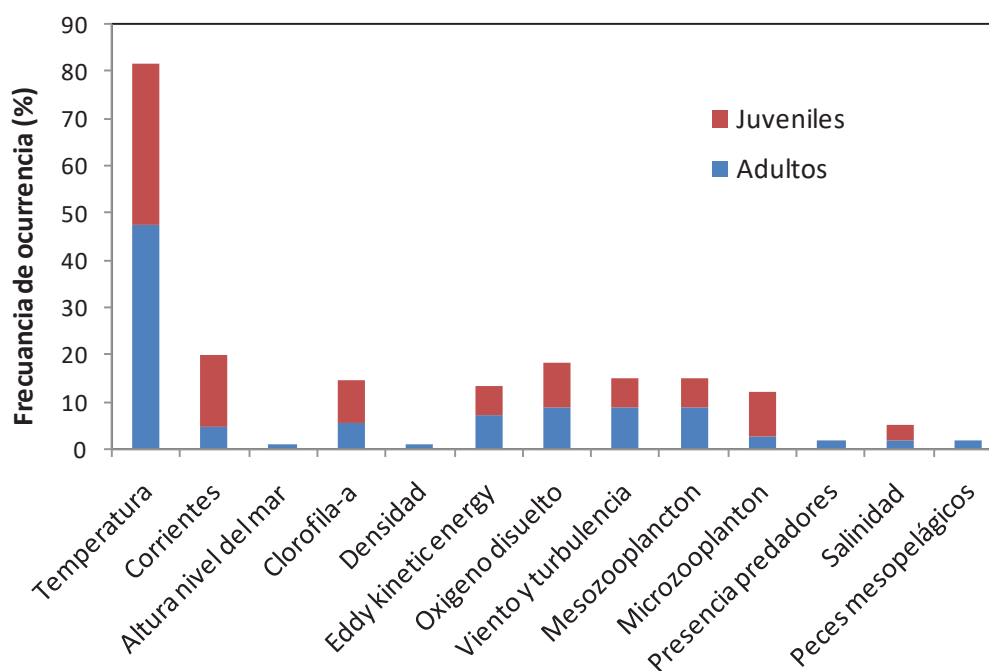


Figura 7. Aporte porcentual de cada variable analizada para la determinación de factores críticos del hábitat de jurel, tanto para la fracción adulta como la juvenil.

**6.2. Objetivo específico 2. Desarrollar e implementar un sistema de modelación hidrodinámica y biogeoquímico validado para la región del Pacífico suroriental que permita caracterizar cambios interanuales de factores críticos del hábitat de la población juvenil y adulta de jurel.**

*6.2.1. Implementación de modelo hidrodinámico con forzantes mejorados (ROMS2/PACSUR10)*

De acuerdo a lo recomendado en el taller de evaluación del modelo hidrodinámico del Pacífico suroriental, se implementó un sistema de mejora de forzantes para aumentar la precisión en la representación de los rasgos oceanográficos, principalmente asociados a sectores costeros, donde por efectos orográficos se identificaron limitaciones. En este proyecto se desarrollaron varios modelos hidrodinámicos los que se describen en la Tabla II. La generación de mejoras de los forzantes atmosféricos fue un punto fundamental a la hora de establecer un modelo que describa de manera realista los patrones característicos de las variables que describen a la zona del Pacífico suroriental.

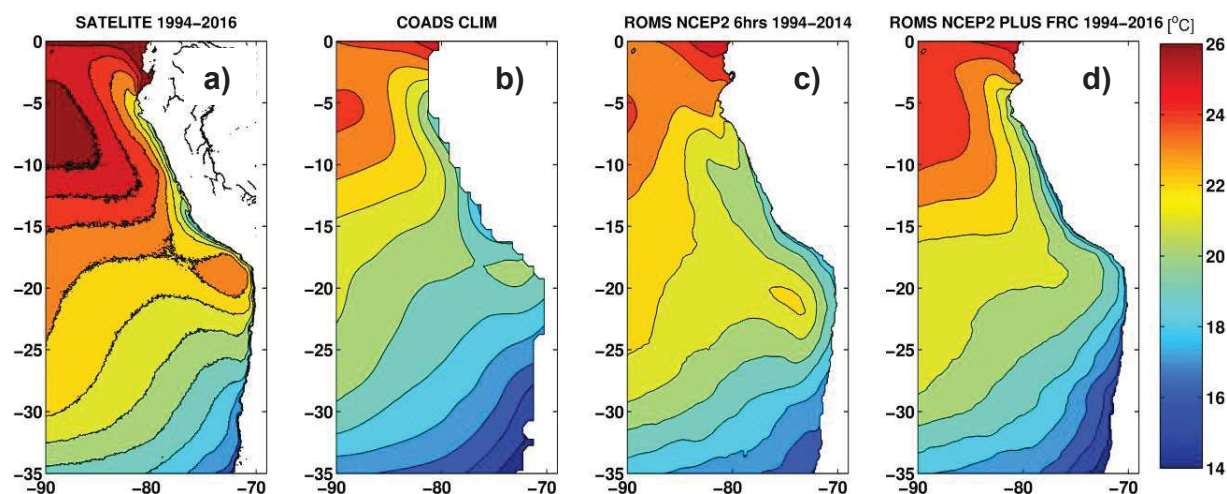


Figura 8. Temperatura superficial del mar promedio periodo 1994-2016 para a) datos satelitales PATHFINDER, b) climatología COADS, c) modelo ROMS NCEP2 PLUS 6hrs (ROMS1) y b) modelo ROMS NCEP2 PLUS FRC (ROMS2).

Al mismo tiempo del diagnóstico respecto de la TSM, se generó un análisis de la estructura vertical de la corriente meridional para ambos modelos. La Figura 9 muestra el promedio a lo largo de la costa entre 7°S y 13°S, para ambos casos del ROMS. La circulación en esta zona se caracteriza por una intensa corriente costera hacia el norte (valores positivos), denominada

corriente costera de Perú, inmediatamente bajo esta corriente se encuentra la contra corriente Perú-Chile con dirección hacia el polo (valores negativos), la cual se manifiesta adyacente al talud continental y tiene su núcleo en torno a los 150 m. Las diferencias en estos rasgos fue mucho más acentuada que la señal superficial, la dinámica de corrientes no fue reproducida por el ROMS1, debido a la calidad de sus forzantes (Figura 9a). Sin embargo se observa que el ROMS2 (Figura 9b), con mejoramiento de forzantes, exhibió un desempeño muy cercano al descrito en las observaciones (Figura 9c). En este modelo se utilizaron forzantes de viento y esfuerzo de viento mejorados en donde se reemplazó la media estacional NCEP2 por SCOW, lo que resulta relevante asumiendo que la dinámica de corrientes verticales es fuertemente modulada por la variabilidad estacional del viento (esfuerzo del viento).

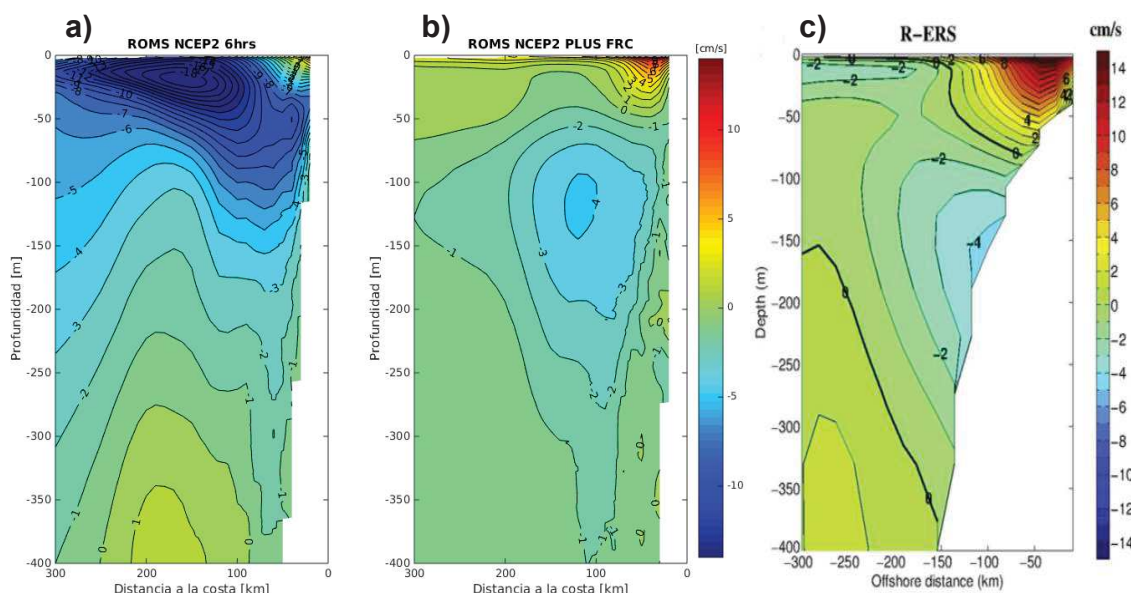


Figura 9. Secciones verticales de la corriente meridional media promediada entre los 7°S y 13°S para a) modelo ROMS NCEP2 6hrs (ROMS1, periodo 1994-2014), b) modelo ROMS PLUS FRC (ROMS2, periodo 1994-2016), c) extraída de Cambon et al., 2013. Correspondiente a la secciones verticales de la corriente meridional modelada en la misma banda, forzada con datos de esfuerzo de viento observado ERS (escaterómetro).

Un escenario similar, se obtuvo para la sección vertical para las corrientes meridionales en la zona de Chile central, promediadas a lo largo de la costa entre los 30°S hasta los 35°S (Figura 10). En esta zona se encuentra la contra corriente Perú-Chile, la cual está adyacente al talud continental y su núcleo está ubicado alrededor de los 250 m de profundidad, sin embargo se

extiende hasta los 400 m aproximadamente. Este comportamiento nuevamente no lo exhibe el ROMS1, sin embargo se observó que el ROMS2 muestra un desempeño cercano al descrito en las observaciones (Figura 10c).

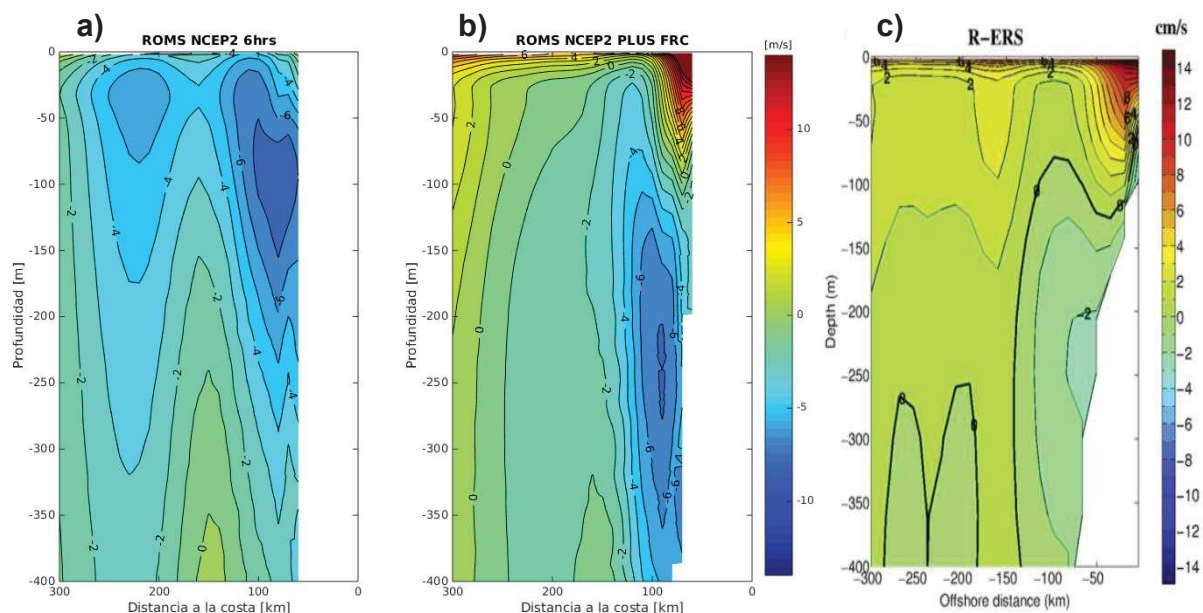


Figura 10. Secciones verticales de la corriente meridional media promediada entre los 30°S y 35°S para a) modelo ROMS NCEP2 6hrs (ROMS1, periodo 1994-2014), b) modelo ROMS PLUS FRC (ROMS2, periodo 1994-2016), c) extraída de Cambon et al., 2013. Correspondiente a la secciones verticales de la corriente meridional modelada (en la misma banda), forzada con datos de esfuerzo de viento observado ERS (escaterómetro).

De esta manera, el modelo hidrodinámico de 10 km de resolución: PACSUR10 (ROMS2), logró el mejor desempeño en la representación de los patrones que describen esta amplia zona modelada. No obstante, debido al aumento de los tiempos de cálculo en cuatro veces, al pasar del modelo puramente hidrodinámico ROMS al modelo biogeoquímico ROMS-PISCES, en una primera etapa, se generaron 3 modelos de 30 km de resolución con diferencias en la configuración del modelo PISCES: PACSUR30\_CLIM1 y CLIM2 y diferencias en los forzantes utilizados: PACSUR30\_INTER (Tabla II). Estos modelos manifestaron inconsistencias en reproducir la hidrodinámica del sistema Pacífico suroriental. Por lo anterior, y de acuerdo a lo indicado en el Taller de revisión de modelos, se implementó un modelo hidrodinámico ROMS de 20 km de resolución horizontal al cual se denominó PACSUR20\_INTER, este modelo utilizó los

forzantes atmosféricos de PACSUR10 (ROMS2). De esta manera se buscó resolver las inconsistencias hidrodinámicas intentando sincronizar los tiempos de cómputos a los tiempos del presente proyecto, no obstante este proceso involucró un tiempo mayor al previsto. Algunas diferencias entre los modelos hidrodinámicos ensayados son ilustradas en la Figura 11, donde se comparan los campos medios de temperatura superficial del mar, que permiten observar en particular la ubicación y extensión del área de surgencia en el borde del continente.

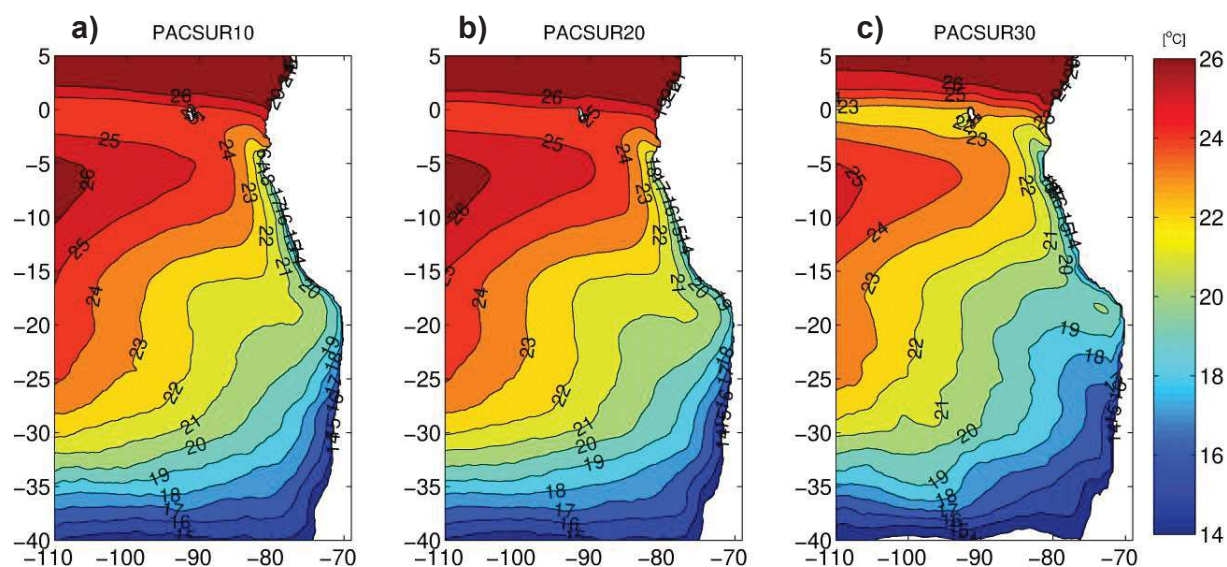


Figura 11. Temperatura superficial del mar promedio periodo 1994-2016 para a) PACSUR10 (ROMS2, resolución 10 km); b) PACSUR20\_INTER (resolución 20 km); c) PACSUR30\_INTER (resolución 30 km).

Por otro lado, se analizó la dinámica de los tres modelos, por medio de la comparación de la corriente a lo largo de la costa en las latitudes 15°S y 30°S (Figura 12). Se observó que el modelo de más baja resolución espacial PACSUR30\_INTER reprodujo corrientes muy diferentes de las simuladas por el modelo PACSUR10 (ROMS2), el cual fue considerado como el modelo de mejor desempeño. Sin embargo, el modelo PACSUR20 mostró un mejor desempeño, que el modelo PACSUR30\_INTER, al reproducir algunos patrones de los sistemas de corrientes esperables para el sector costero del Pacífico suroriental y similares a PACSUR10. Estos análisis comparativos evidenciaron que la resolución utilizada es una variable crítica al momento de obtener el buen desempeño de la modelación de corrientes. Luego de la revisión de estos

resultados en conjunto con el experto internacional, se decidió utilizar la configuración del modelo hidrodinámico PACSUR20\_INTER para acoplarlo al modelo PISCES, obteniendo finalmente el modelo ROMS-PISCES\_PADRE.

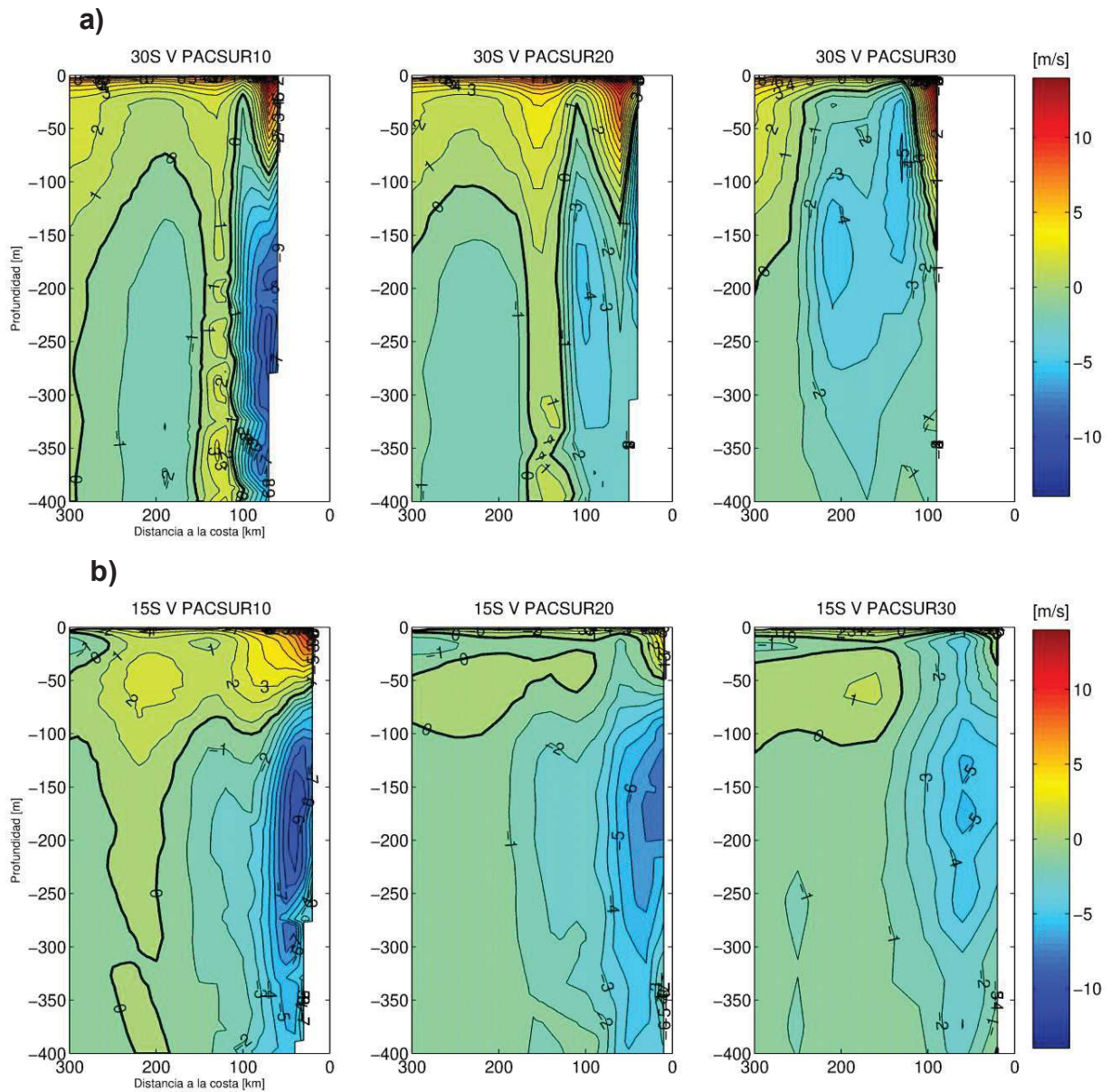


Figura 12. Corrientes en la vertical a lo largo de costa a) 15°S y b) 30°S para los modelos ROMS: PACSUR10, PACSUR20 y PACSUR30.

### *6.2.2. Validación del modelo hidrodinámico del Pacífico suroriental, periodo 1994-2016*

Una vez resuelta la problemática relativa a los forzantes atmosféricos y la resolución espacial del modelo ROMS-PISCES, se generó el modelo hidrodinámico ROMS2 (PACSUR10) bajo una configuración interanual para el periodo 1994-2016 cuyos forzantes también fueron utilizados para implementar el modelo hidrodinámico y biogeoquímico ROMS-PISCES. La primera etapa para evaluar el desempeño del modelo hidrodinámico respecto a observaciones realizadas por satélites involucró el análisis de las señales estacionales. De esta manera, para explorar el desempeño del modelo ROMS2 en la escala interanual se compararon datos observados por satélite y modelados de Temperatura superficial del mar (TSM) y Altura del nivel del mar (ANM). Primero, en el caso de la TSM el modelo ROMS2 evidenció un buen desempeño reproduciendo los principales rasgos estacionales a lo largo de todo el dominio modelado en el Pacífico suroriental (Figura 13).



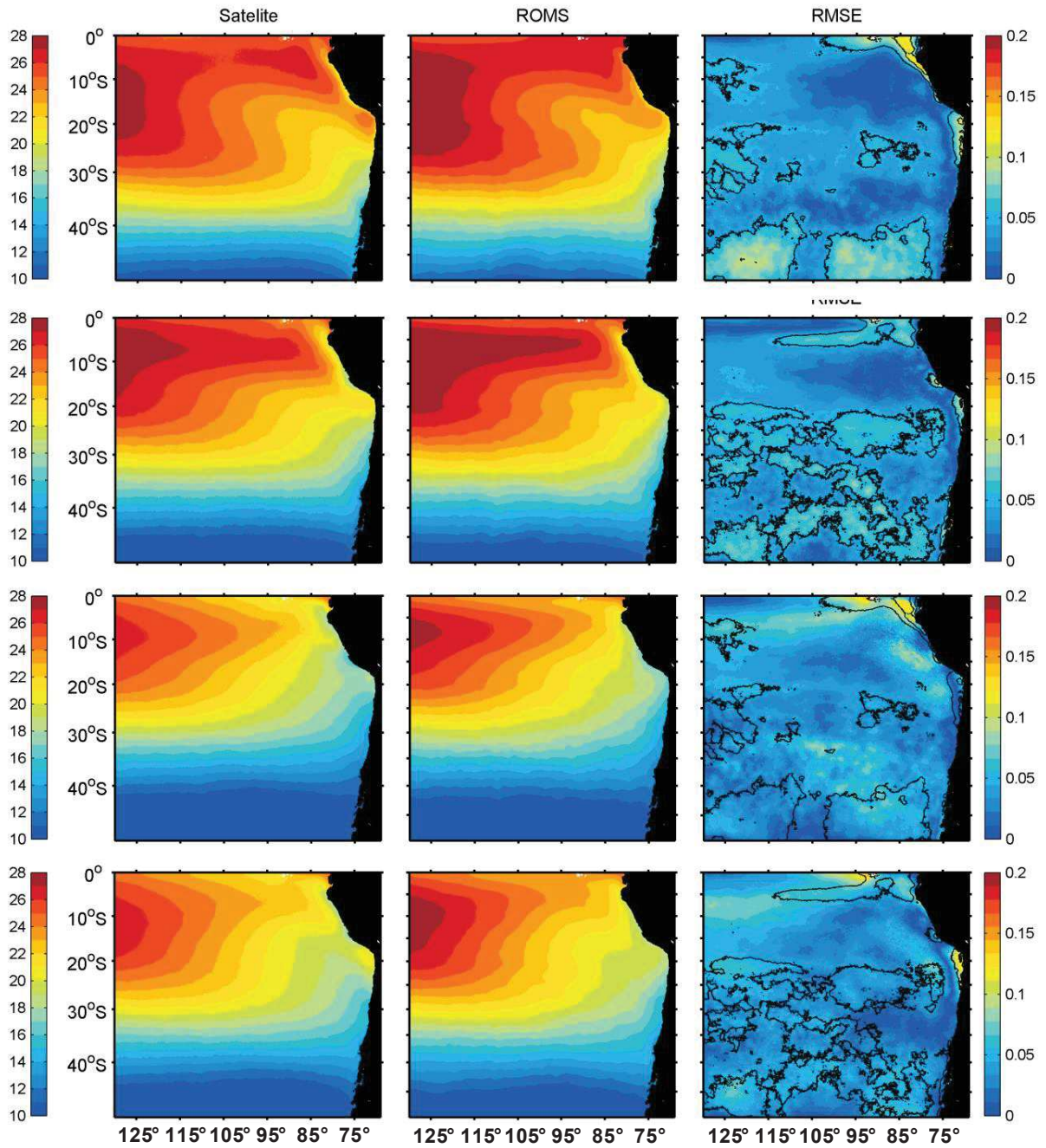


Figura 13. Ciclo estacional de la anomalía de la temperatura superficial del mar para datos de satélite Pathfinder-ModisAqua (panel izquierdo), modelo ROMS2 (panel centro) y el error cuadrático medio espacial (panel derecho). Las estaciones desde arriba a abajo: verano, otoño, invierno, primavera

El error cuadrático medio (ECM) es el segundo momento (sobre el origen) del error, y por lo tanto incorpora tanto la varianza del estimador así como su sesgo. En esta evaluación el modelo muestra niveles máximos de error que no sobrepasaron el 15%, los cuales estuvieron mayormente representados en la región ecuatorial en las temporadas de verano e invierno. En general, en mayor parte del dominio modelado se obtuvieron niveles de error por debajo del 5% para todas las estaciones sugiriendo un buen desempeño en reproducir el ciclo anual en todo el dominio.

Una vez evaluada la estacionalidad, se calcularon los modos de variabilidad espacial y temporal de la TSM en base a funciones ortogonales empíricas (FOEs) para ROMS2 y datos de satélite con el objetivo de analizar el comportamiento de ROMS2 en la escala interanual, los cuales fueron comparados posteriormente para cuantificar el desempeño del modelo reproduciendo las principales señales de variabilidad de esta variable a lo largo del dominio modelado. El primer modo de variabilidad para los componentes principales de la TSM explicó un alto porcentaje de la varianza para datos modelados y observados respectivamente (43% y 29%). El primer componente principal para la TSM en el modelo ROMS2 fue consistente con las observaciones en su patrón espacial y compartieron una significativa correlación en su evolución temporal. De esta manera, el primer modo de variabilidad del componente principal temporal de la TSM mostró un alto y significativo nivel de correlación entre los datos modelados y observados ( $R^2=0,82$ ; Figura 12c, d). La expresión espacial de los datos modelados y observados mostraron una alta coherencia, reproduciendo los principales rasgos térmicos del dominio analizado (Figura 14a, b). Sin embargo, el modelo mostró un desacople llamativo durante el primer año modelado, lo que influyó en la correlación entre las dos series. Este desacople sugiere que el modelo aún no alcanzaba su completa estabilidad en el primer año modelado (proceso de *spin-up*).

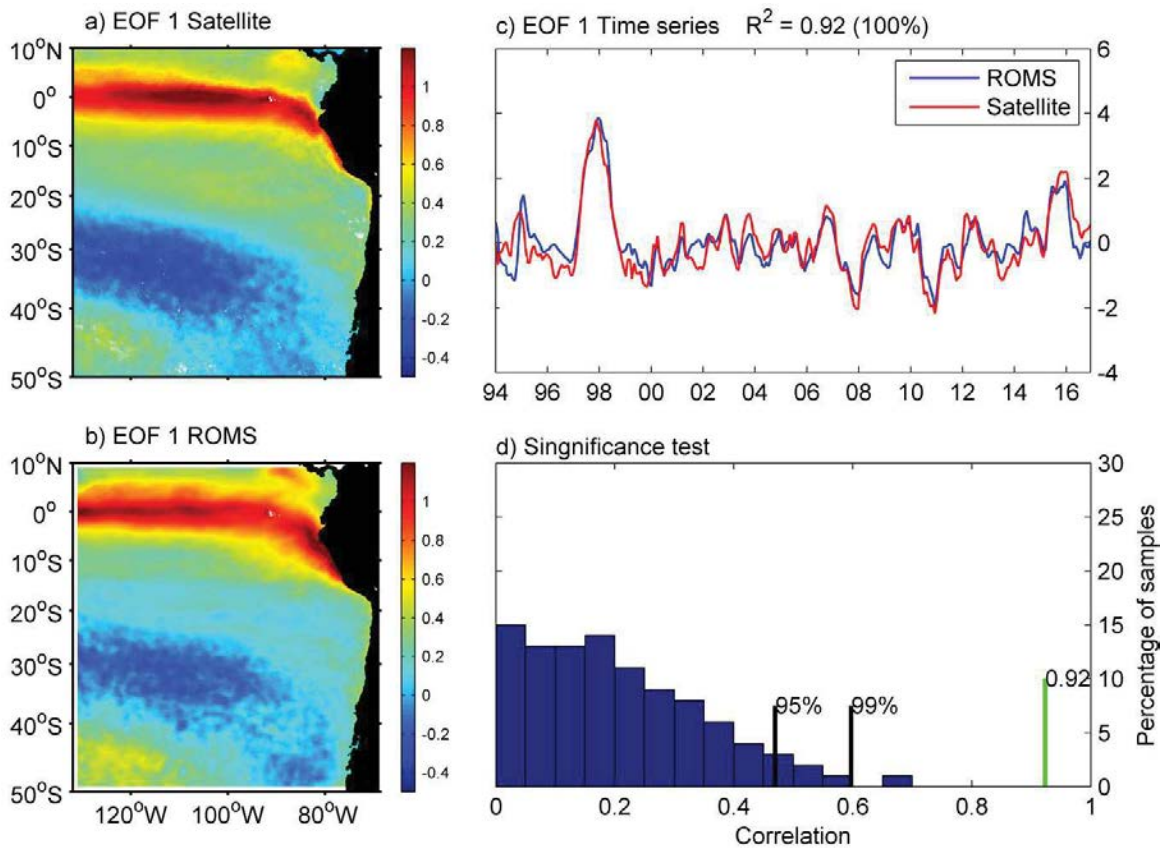


Figura 14. FOE del primer modo de variabilidad de la Temperatura superficial del mar. Dominio espacial para a) Datos satélite Pathfinder-ModisAqua y b) modelo ROMS2, c) serie de tiempo 1994 – 2016 para datos de satélite y modelo ROMS2, d) significancia de la correlación entre series de tiempo basada en la función de densidad de probabilidad de los coeficientes de correlación cruzada

De la misma manera que lo realizado anteriormente, se analizó la señal estacional desde la altura del nivel del mar observada y modelada. Esta comparación evidenció un buen desempeño reproduciendo los principales rasgos estacionales a lo largo de todo el dominio modelado en el Pacífico suroriental (Figura 15). En esta evaluación el ECM mostró niveles máximos de error que no sobrepasaron el 1%, mostrando un buen nivel de precisión por parte del modelo en reproducir la dinámica en todas las estaciones del año y a lo largo de todo el dominio modelado.

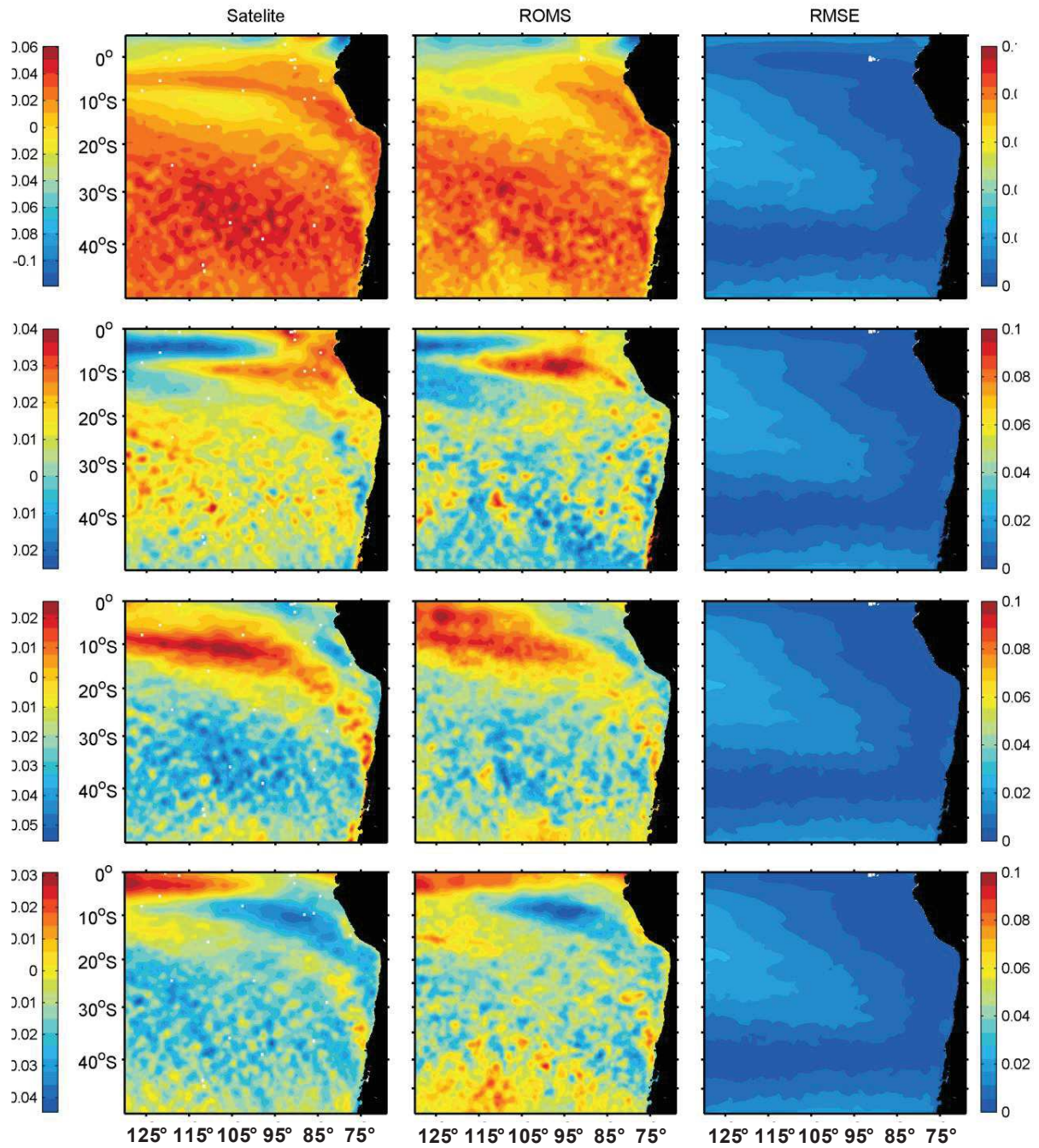


Figura 15. Ciclo estacional de la anomalía el nivel del mar para datos de satélite AVISO (panel izquierdo), modelo ROMS2 (panel centro) y el error cuadrático medio espacial (panel derecho). Las estaciones desde arriba a abajo: verano, otoño, invierno, primavera.

Al igual que en el caso de la TSM, el primer modo de variabilidad para los componentes principales explicó un alto porcentaje de la varianza para datos modelados y observados respectivamente (33% y 45%). El primer componente principal para la ANM en el modelo ROMS2 fue consistente con las observaciones en su patrón espacial y compartieron una significativa correlación en su evolución temporal. De esta manera, el primer modo de variabilidad del componente principal temporal de la ANM mostró un alto y significativo nivel de correlación entre los datos modelados y observados ( $R^2 = 0,93$ ; Figura 16c, d). La expresión espacial de los datos modelados y observados mostraron una alta coherencia, reproduciendo los principales rasgos térmicos del dominio analizado (Figura 16a, b). En este caso el modelo no presentó el desacople inicial evidenciado por la TSM, por lo que plantea un punto de análisis más riguroso antes de continuar hacia establecer el modelo biogeoquímico.

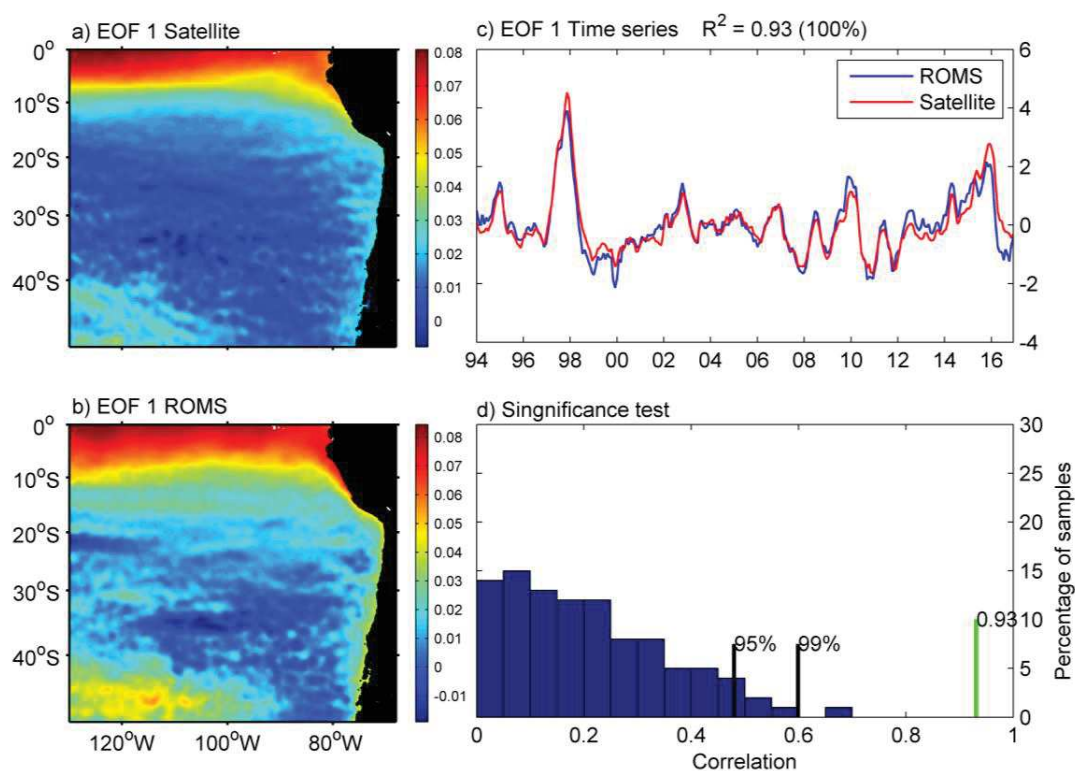


Figura 16. FOE del primer modo de variabilidad de la Anomalia del nivel del mar. Dominio espacial para a) Datos satélite AVISO y b) modelo ROMS2, c) serie de tiempo 1994 – 2016 para datos de satélite y modelo ROMS2, d) significancia de la correlación entre series de tiempo basada en la función de densidad de probabilidad de los coeficientes de correlación cruzada.

### 6.2.3. Implementación del modelo hidrodinámico y biogeoquímico ROMS-PISCES

En una etapa inicial de desarrollo, se implementaron 2 modelos climatológicos ROMS-PISCES (PACSUR30\_CLIM1 y CLIM de 30 km de resolución espacial) considerando período de estabilización del modelo de 10 años cuyas condiciones de borde fueron obtenidas del modelo WOAPISCES y forzantes climatológicos provinieron de COADS para el dominio 10°N hasta 50°S y entre 68°W hasta 132°W para modelar la dinámica espacio temporal de las variables biogeoquímicas y evaluar su desempeño, luego se desarrolló un modelo hidrodinámico de 20 km (PACSUR20\_INTER), ver detalles en Tabla II. Finalmente, se obtuvo un modelo definitivo interanual ROMS-PISCES\_PADRE (dominio padre) para el mismo dominio anterior, que abarcó el periodo 1993-2017, con resolución espacial 20 km y resolución temporal diaria. Además, se implementó un modelo ROMS-PISCES\_HIJO anidado, dominio hijo, con una resolución de espacial de 7 km y resolución temporal diaria.

La evolución de las diversas versiones de la modelación biogeoquímica se muestran en la Tabla II. Las diferencias mostradas por los modelos ROMS-PISCES climatológicos (PACSUR30\_CLIM1 y CLIM2) fueron analizadas en un Taller realizado para estos propósitos entre los días 23 y 27 de julio de 2018, donde las salidas del modelo se analizaron con la asistencia del experto internacional Dr. Vincent Echevin, quien sugirió las líneas de acción tendientes a resolver los problemas presentados hasta este punto de la modelación (ver detalles en sección Reuniones y Talleres). Los principales aspectos destacados en este taller como posibles fuentes iniciales de error hacia el modelo biogeoquímico fueron: i) la física del modelo ROMS-PISCES no está bien representada producto de los forzantes que este utiliza son de baja calidad; ii) la resolución espacial de ROMS-PISCES de 30 km es muy gruesa para reproducir los procesos de circulación costera, (no logra resolver la plataforma costera), impactando en el acoplamiento biofísico del sistema, y iii) la batimetría incorporada en el modelo, bajo la actual resolución, no es satisfactoria y genera procesos de circulación inadecuados en el sector costero.

De esta manera, en el taller se recomendó realizar un modelo sólo hidrodinámico interanual PACSUR30\_INTER, de 30 km de resolución espacial y resolución temporal diaria (Tabla II), desactivando los módulos biogeoquímicos, y utilizando como forzantes de esfuerzo de viento QuikSCAT de mejor calidad que los productos COADS usados en los modelos ROMS-PISCES

de 30 km de resolución PACSUR30\_CLIM1 y PACSUR\_CLIM2 (Tabla II), para analizar la respuesta física del modelo de 30 km de resolución bajo forzantes de esfuerzo de viento mejorado. Así mismo, para realizar un análisis comparativo del comportamiento de las variables hidrodinámicas frente a una grilla de mayor resolución y forzantes mejorados (ver sección 6.2.1. Implementación de modelo hidrodinámico con forzantes mejorados), se generó un modelo interanual hidrodinámico PACSUR20\_INTER de resolución espacial de 20 km (Tabla II).

#### *6.2.4. Enfoques hacia la versión final del modelo hidrodinámico y biogeoquímico ROMS-PISCES*

Luego de analizar los resultados del modelo biogeoquímico ROMS-PISCES, y de acuerdo a las sugerencias del experto internacional Dr. Vincent Echevin se realizó una exploración hacia la búsqueda de las posibles fuentes de error han afectado a la modelación de las variables biogeoquímicas. Para esto se corrió el modelo de 20 km de resolución PACSUR20\_INTER (Tabla II), luego del respectivo análisis se pudo concluir que la resolución (20 km), las mejoras de los forzantes atmosféricos y las condiciones de bordes utilizados ayudaron de manera significativa a reproducir en mejor medida la dinámica de las corrientes, sin embargo, aún mantiene diferencias respecto al modelo ROMS de 10 km de resolución espacial con forzantes mejorados (PACSUR10), cuya resolución espacial hace inviable utilizarlo como configuración para un modelo biogeoquímico ROMS-PISCES de resolución 10 km, debido a que los tiempo del cálculo sobrepasarían los tiempo para el desarrollo de este proyecto. Hay que mencionar que los tiempos de cálculo del modelo biogeoquímico ROMS-PISCES cuadruplican a un modelo netamente hidrodinámico ROMS. De esta manera, la siguiente etapa fue configurar y realizar una corrida del modelo biogeoquímico ROMS-PISCES (también llamado ROMS-PISCES\_PADRE, ver Tabla II) para el periodo 1993-2017 utilizando la última configuración del modelo físico ROMS-FÍSICO de 20 km de resolución o también llamado PACSUR20\_INTER, el cual presentó mejoras en la representación de las corrientes, el perfil batimétrico costero y finalmente en las variables biogeoquímicas modeladas. Todo el proceso descrito anteriormente involucró un tiempo de trabajo y cálculo numérico de 18 meses (inicio en marzo de 2018 y finalización en agosto de 2019) hasta la obtención del modelo ROMS-PISCES\_PADRE final. Posteriormente, se implementaron las corridas interanuales del modelo dominio hijo, ROMS-PISCES\_HIJO, para el periodo 2001-2017. Lo anterior, constituye un tiempo de trabajo efectivo para la modelación

biogeoquímica de 22 meses, lo cual excede largamente a los 12 meses considerados en el Plan de Actividades inicial del proyecto y que está directamente relacionado con consideraciones técnicas asociadas a la complejidad de esta metodología.

#### *6.2.5. Análisis de las variables del modelo ROMS-PISCES\_PADRE*

El principal desafío de esta aproximación es que los modelos ROMS-PISCES (dominio padre y dominio hijo), logren reproducir los patrones espacio-temporales de las variables biogeoquímicas más relevantes para el hábitat del jurel. Una de las principales variables de interés para este proyecto, y para la distribución de jurel, es el oxígeno disuelto y en particular, la habilidad del modelo en reproducir la extensión, ubicación y magnitud de la zona mínima de oxígeno (ZMO), la cual constituye un rasgo principal en el sistema oceanográfico del Pacífico suroriental y podría constituir una limitante para la distribución de especies pelágicas como el jurel. Para evaluar el desempeño del modelo ROMS-PISCES\_PADRE respecto a la extensión espacial de la zona de mínima de oxígeno (ZMO), definida con el valor de  $45 \mu\text{mol/L}$  ( $\sim 1 \text{ ml L}^{-1}$ ) se promedió el oxígeno disuelto modelado periodo 1994-2017 y se determinó la profundidad media de la ZMO, estos resultados se compararon con los datos provenientes del World Ocean Atlas (WOA; Figura 17). Se observó que el modelo padre ROMS-PISCES\_PADRE fue capaz de reproducir la ZMO en la mayor parte del dominio, mostrando un buen desempeño en la zona frente a Perú (Figura 18) y norte de Chile, sin embargo, al sur de los  $30^\circ$ , su extensión se comprime fuertemente hacia la costa, lo cual no se observa en los datos WOA analizados. El desajuste de la ZMO podría estar relacionado con el valor de hierro utilizado para esta modelación biogeoquímica y el nivel de agotamiento de oxígeno disuelto a través de la productividad primaria y secundaria, la cual fue parametrizada inicialmente para un dominio frente a Perú y norte de Chile. Esto último es un punto relevante en este tipo de estudios, donde se busca modelar extensas áreas con alta diversidad de ambientes, donde las configuraciones hacia la modelación pueden provocar un buen desempeño del modelo en ciertos ambientes, pero tener deficiencias en ambientes donde los procesos biogeoquímicos son distintos.



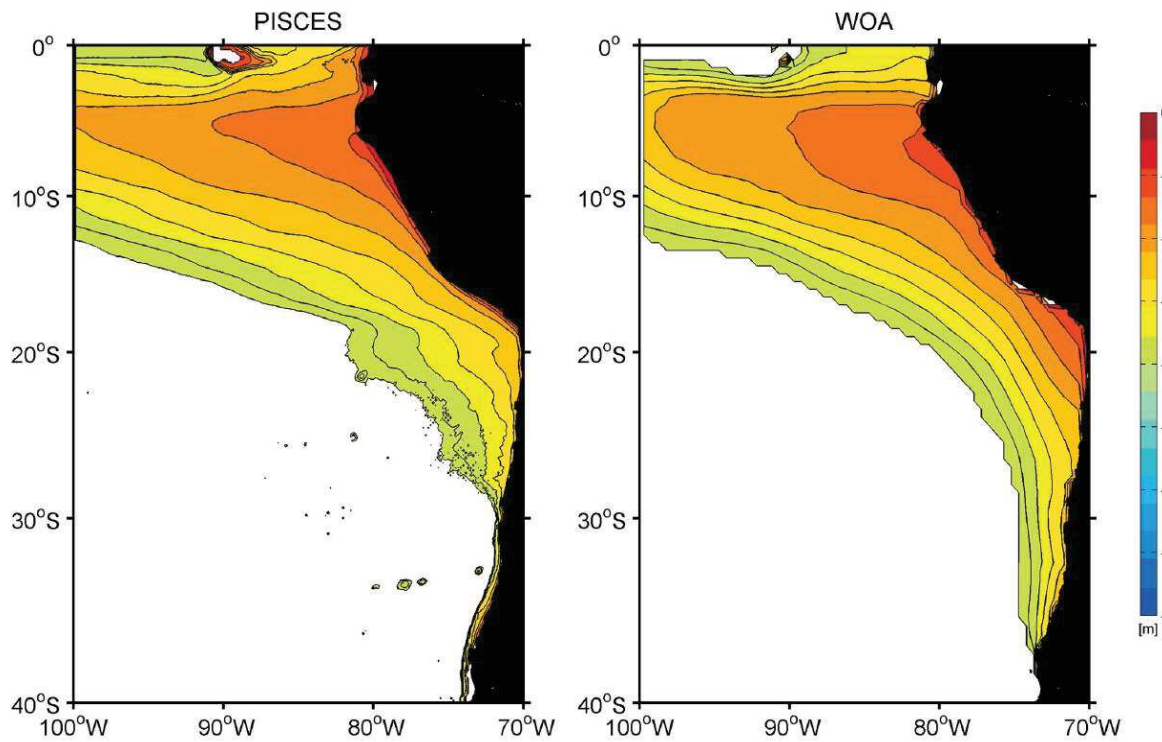


Figura 17. Profundidad de la mínima de oxígeno para todo el dominio padre, panel izquierdo promedio anual modelo ROMS-PISCES\_PADRE y panel derecho datos WOA ( $45 \mu\text{mol/L}$ ).

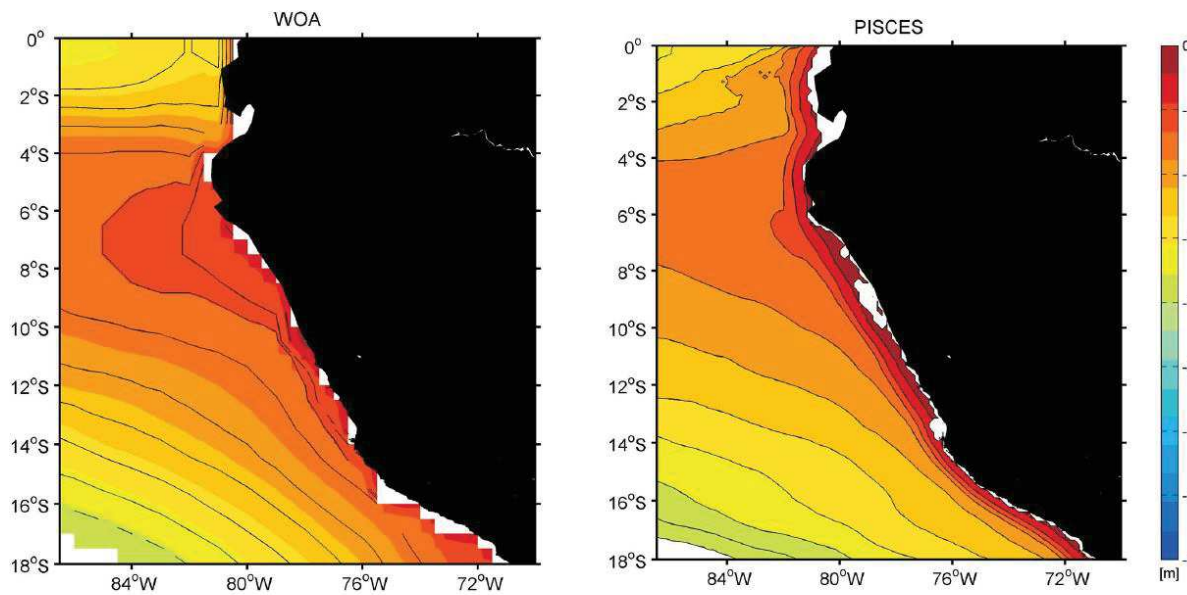


Figura 18. Profundidad de la mínima de oxígeno frente a Perú, panel izquierdo WOA y panel derecho ROMS-PISCES ( $45 \mu\text{mol/L}$ ).

La Figura 19 muestra en general una coherencia del patrón vertical del modelo ROMS-PISCES\_PADRE en cuanto a la extensión de la zona de mínima de oxígeno a lo largo de un perfil latitudinal, mostrando el núcleo a 300 m de profundidad como se detectó en las observaciones de campo, sin embargo, el modelo tiende a subestimar la extensión de la mínima de oxígeno hacia el sur evidenciando un desacople entre el modelo y las observaciones al sur de los 30°, por otro lado, el modelo mostró una correcta expresión del oxígeno en los primeros metros de profundidad (0-100 m) entre los 5°N y los 25°S, mostrando además un buen desempeño en reproducir lo gradientes verticales y la estructura general de la variable oxígeno en la columna de agua. La mínima de oxígeno es muy somera en la zona norte del dominio (Ecuador, Perú, norte de Chile) y se va profundizando hacia el sur (zona centro sur de Chile).

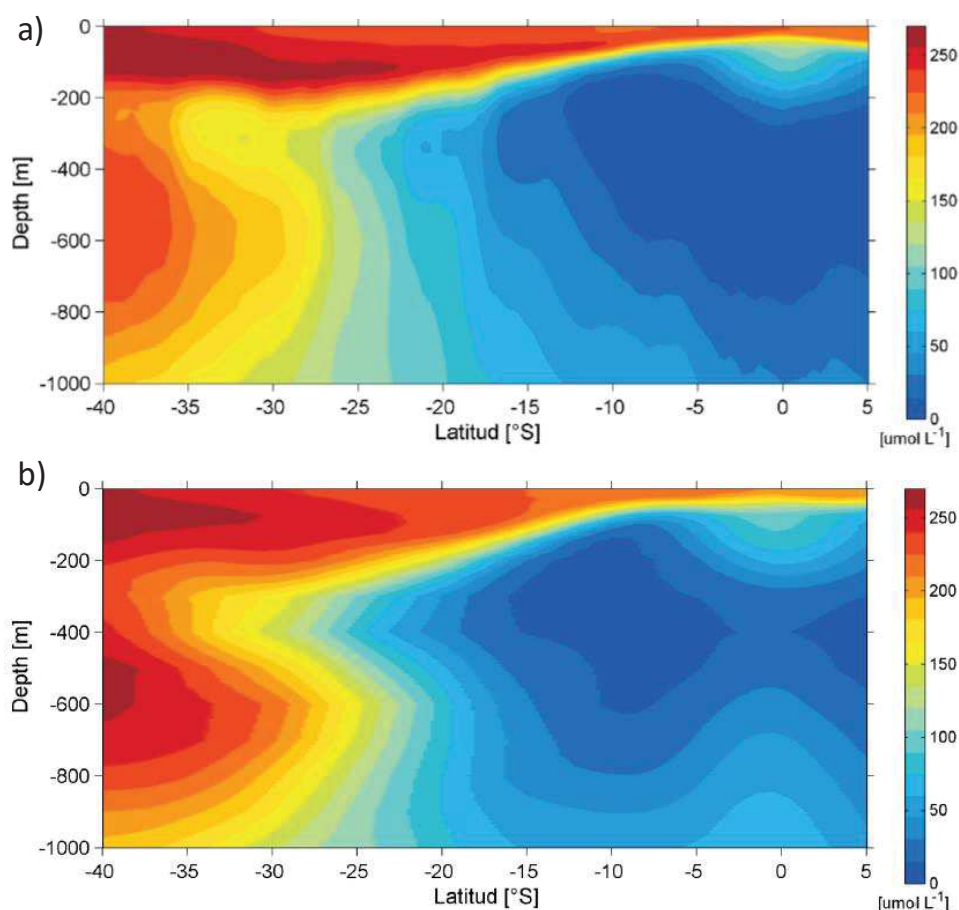


Figura 19. Sección vertical meridional de oxígeno disuelto en los primeros 100 km de la costa entre los 5°N y 40°S proveniente de: a) el modelo ROMS-PISCES\_PADRE y b) datos *World Ocean Atlas*.

El análisis de la clorofila superficial de ROMS-PISCES\_PADRE se realizó sobre dos zonas del dominio modelado, una zona frente a Perú (Figura 24) y una zona frente a Chile centro sur (Figura 20). En ambos casos se comparó el promedio anual de la clorofila entregada por el modelo ROMS-PISCES\_PADRE, con datos satelitales desde sensores SeaWiFS y MODIS Aqua. La clorofila superficial proveniente de ROMS-PISCES\_PADRE se obtuvo mediante la suma de nano-clorofila y clorofila en diatomeas (NCHL+DCHL). En la zona frente a Perú (Figura 20), el modelo ROMS-PISCES\_PADRE representa el patrón general de la clorofila superficial, con máximos valores entre los 4°S y 14°S, con algunos signos de sobreestimación en la región norte de Perú entre los 0° y 4°S (1.0-2.0 mg/m<sup>3</sup>). Por otro lado, este análisis ha permitido observar algunas diferencias entre los datos SeaWiFS y MODIS respecto a la clorofila máxima costera que afecta el nivel de sesgo estimado. En la zona frente a Chile centro sur (Figura 21) el patrón espacial general de la clorofila superficial del modelo ROMS-PISCES\_PADRE difiere de lo exhibido por los datos SeaWiFS y MODIS. El modelo muestra una compresión costera de las zonas de mayor biomasa fitoplanctónica (clorofila) con niveles inferiores en el borde costero, manifestando ciertos problemas por parte del modelo biogeoquímico para reproducir la intensidad de la productividad en la zona de surgencia al sur de los 32°S. Las diferencias que muestra el modelo en clorofila podrían estar relacionadas con la parametrización del hierro definido en la configuración inicial del modelo PISCES y constituyen una fuente de mejora hacia futuras versiones de este modelo.

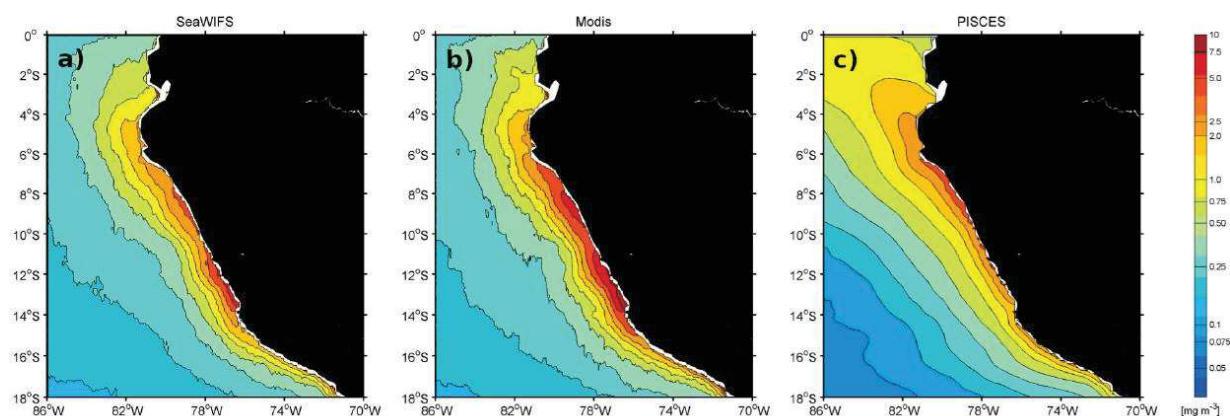


Figura 20. Promedio anual de clorofila superficial para Perú: a) información satelital SeaWifs, b) Modis Aqua y c) modelo ROMS-PISCES\_PADRE.

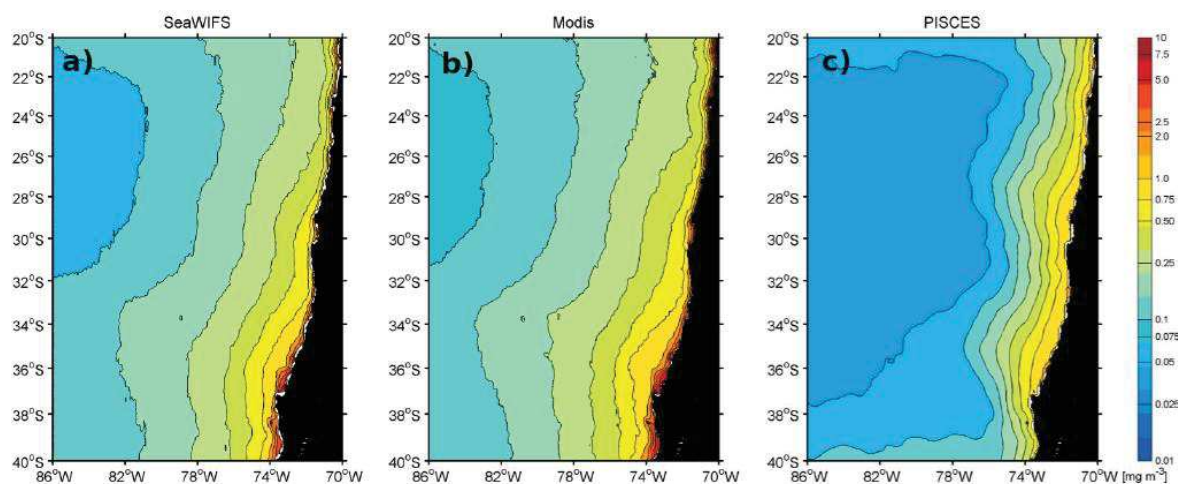


Figura 21. Promedio anual de clorofila superficial para Chile centro sur: a) información satelital SeaWifs, b) Modis Aqua y c) modelo ROMS-PISCES

Un análisis de la variabilidad estacional de las principales variables biogeoquímicas se muestran a continuación. La Figura 22 muestra la climatología estacional de la distribución de oxígeno disuelto a los 200 metros de profundidad, para el modelo ROMS-PISCES\_PADRE periodo 1994-2017 y el análisis comparativo respecto a la climatología histórica del *World Ocean Atlas* 2018 (periodo 1970-2017). El análisis reveló que el modelo biogeoquímico ROMS-PISCES\_PADRE representó de buena manera la extensión y magnitud de la zona de mínima concentración de oxígeno ( $\sim 45 \mu\text{mol L}^{-1}$ ) la cual se extiende desde la región ecuatorial hacia la costa del Pacífico suroriental disminuyendo su extensión costa afuera hacia el sur. En cuanto al análisis comparativo, las principales diferencias se observaron en la zona centro-sur de Chile donde la magnitud de la concentración de oxígeno excedió en torno a  $20 \mu\text{mol L}^{-1}$  principalmente en los meses de otoño e invierno. No obstante, el análisis comparativo es satisfactorio debido a que en la región donde la zona mínima de oxígeno resulta predominante en la zona subsuperficial de la columna de agua (región ecuatorial, región costera de Perú y norte de Chile), las diferencias resultan en magnitudes menores entre  $-5$  y  $5 \mu\text{mol L}^{-1}$ , las cuales pueden estar relacionadas con la magnitud del transporte del Ecuador hacia el polo por parte de la contracorriente subsuperficial Perú-Chile o con la extensión de los datos observados.

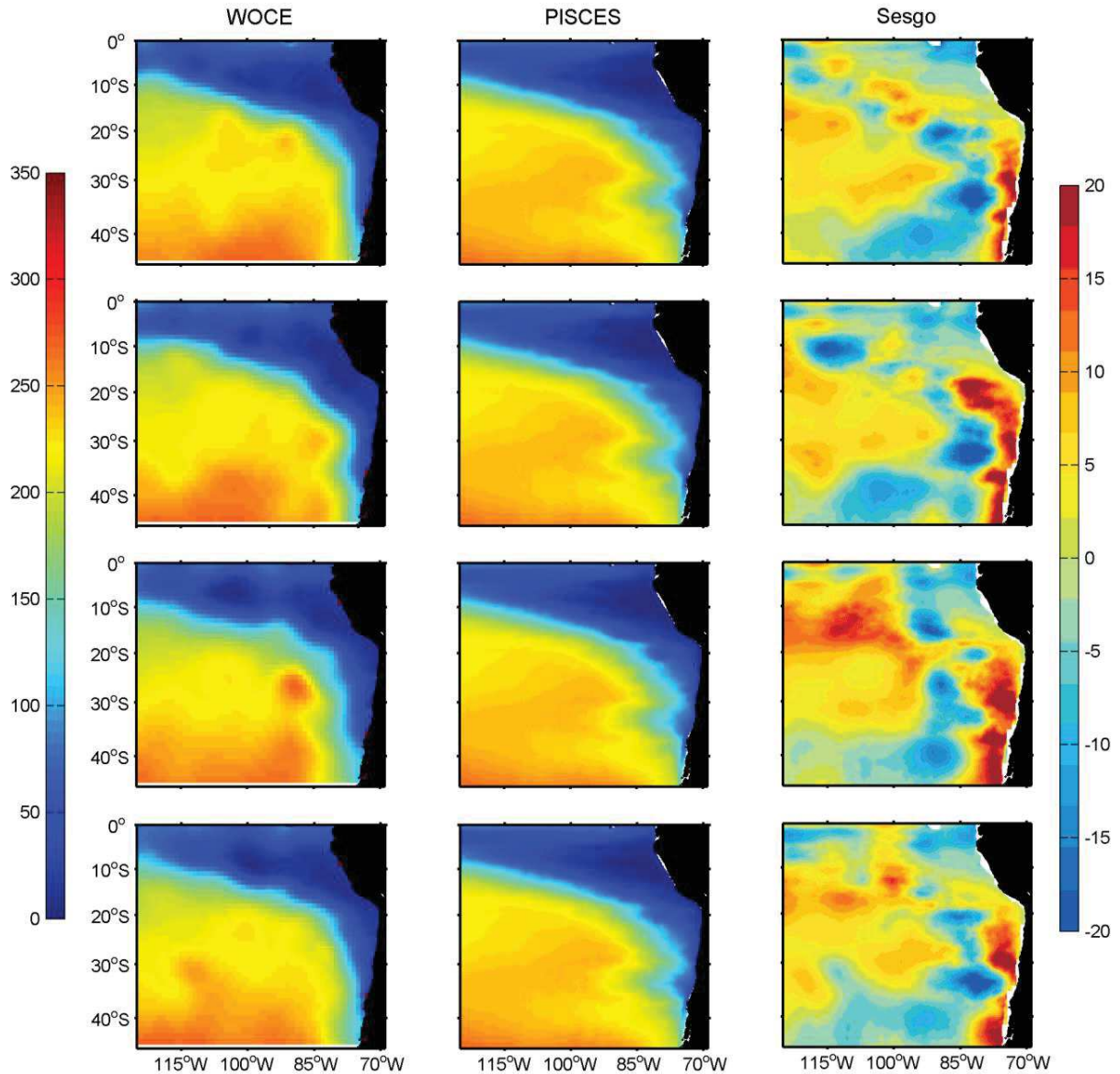


Figura 22. Ciclo estacional de la concentración de oxígeno disuelto a los 200 metros de profundidad para datos observados del World Ocean Atlas (panel izquierdo), modelo ROMS-PISCES\_PADRE (panel centro) y el sesgo (diferencia en la magnitud de la señal) (panel derecho). Las estaciones desde arriba a abajo: verano, otoño, invierno, primavera.

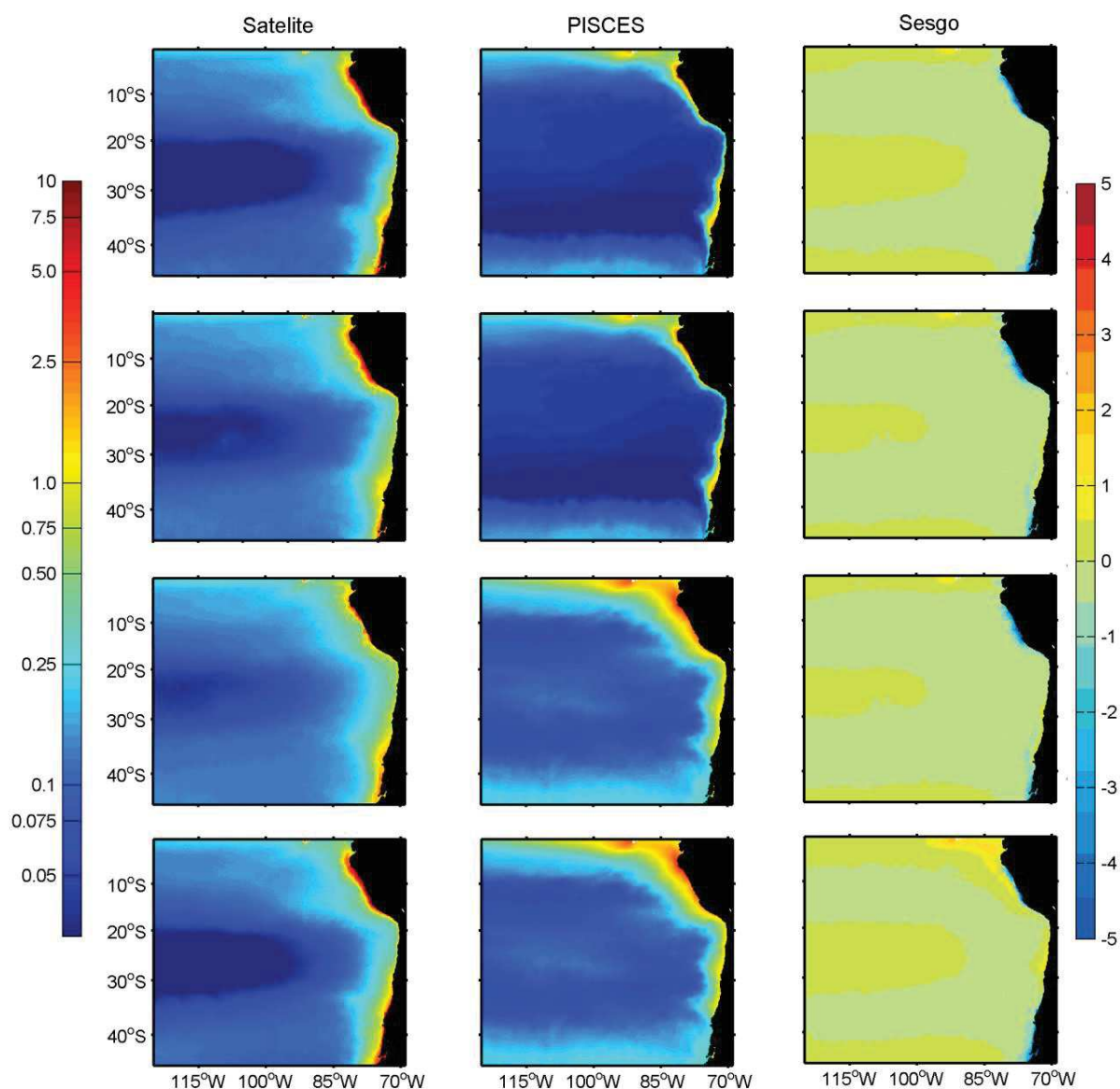


Figura 23. Ciclo estacional de la clorofila superficial satelital Modis-Aqua (panel izquierdo), modelo ROMS-PISCES\_PADRE (panel centro) y el sesgo (diferencia en la magnitud de la señal) (panel derecho). Las estaciones desde arriba a abajo: verano, otoño, invierno, primavera.

La Figura 24 muestra la variabilidad estacional de la clorofila superficial calculada por ROMS-PISCES\_PADRE respecto a la clorofila satelital proveniente del sensor Modis-Aqua para el periodo 2003-2016. En general, el modelo reproduce de buena manera los principales gradientes horizontales de la concentración de clorofila, asociados a los centros de productividad costera vinculados a los sistemas de surgencia característicos del sistema de Humboldt. Estacionalmente,

el modelo tiende a generar un sistema de productividad más restringido zonalmente (costa-oceano) durante verano y otoño generando un área de transición costera más abrupta que lo sugerido por el satélite, a diferencia de lo que se observa en invierno y otoño donde el gradiente tiende a ser más extendido zonalmente. En cuanto a las magnitudes de la concentración de clorofila superficial, el modelo ROMS-PISCES\_PADRE tiende a subestimar ligeramente los niveles en ciertas regiones bien delimitadas: el sector costero del centro-norte de Perú y el sector costero del sur de Chile, no obstante las diferencias no resultan críticas y no exceden los  $3 \text{ mg m}^{-3}$  y pueden estar relacionadas con la disponibilidad de hierro en la configuración del modelo.

Para la comprensión de los procesos de enriquecimiento, consumo y productividad primaria, se analizaron los macronutrientes principales, respecto a observaciones históricas. La Figura 24 muestra los campos estacionales de nitratos, los cuales evidencian un patrón similar durante todo el año, donde se evidencia que las principales diferencias se observan en la región ecuatorial y en el sur de Chile. Sin embargo, el modelo ROMS-PISCES\_PADRE en el sector costero de Chile y Perú, y su zona oceánica adyacente mostró diferencias menores y proporcionan un nivel global satisfactorio. Las diferencias en las regiones extremas deben ser analizadas en término de la calidad de los datos del WOA, los cuales pueden ser limitados en cuanto a su frecuencia de observación por tratarse de regiones aisladas.

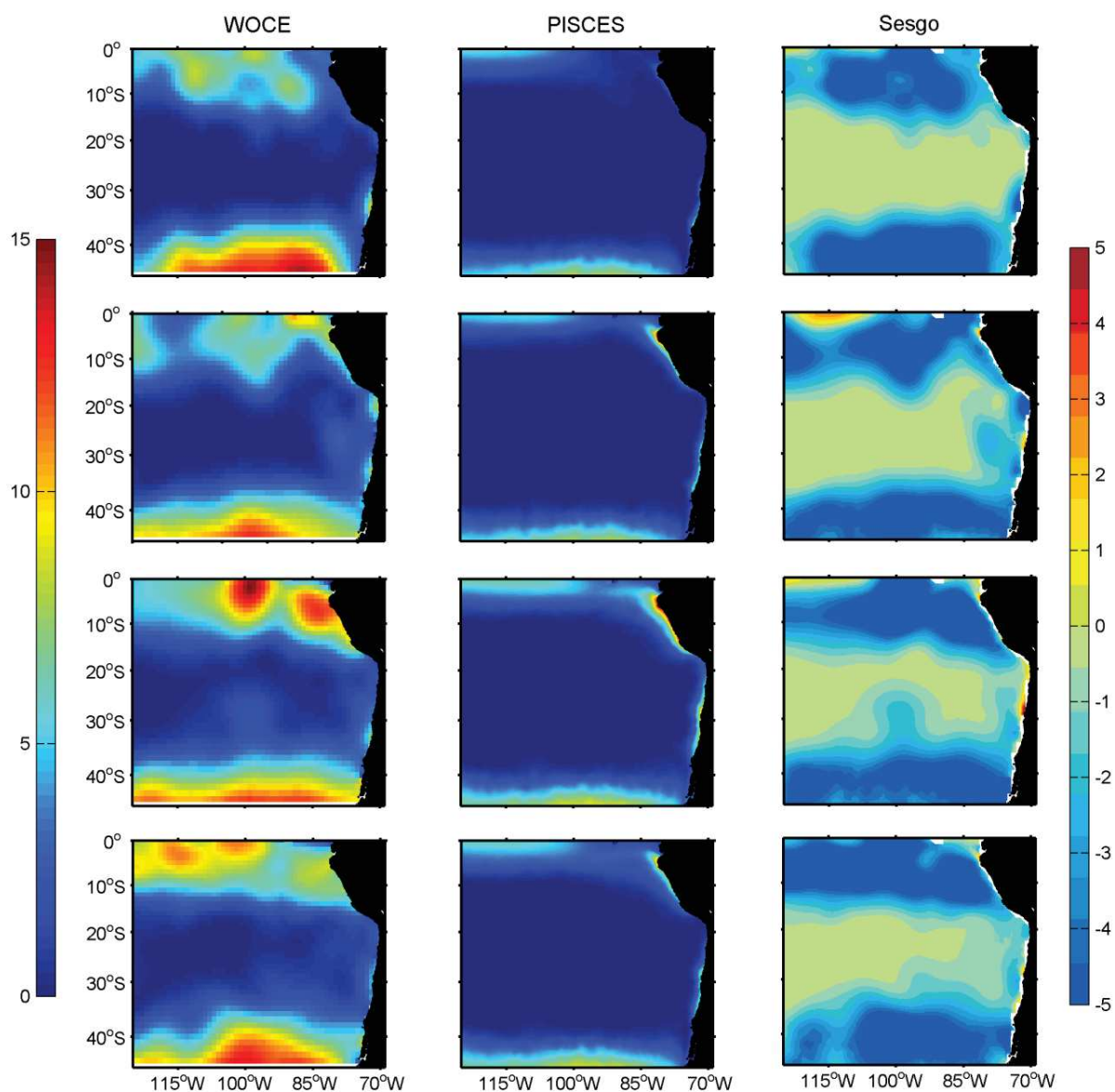


Figura 24. Ciclo estacional de la concentración de nitrato superficial ( $\text{NO}_3$ ) para datos observados del *World Ocean Atlas* (panel izquierdo), modelo ROMS-PISCES\_PADRE (panel centro) y el sesgo (diferencia en la magnitud de la señal) (panel derecho). Las estaciones desde arriba a abajo: verano, otoño, invierno, primavera.

En relación al fosfato superficial (Figura 25), el patrón estacional muestra una variabilidad intra-anual similar del modelo con un enriquecimiento costero en otoño-invierno en la región costera de Chile y Perú. Sin embargo cierto sesgo negativo se observa en los extremos del dominio modelado, al igual que en el nitrato. Durante invierno, se observa un sesgo positivo en la zona costera centro-sur de Chile.



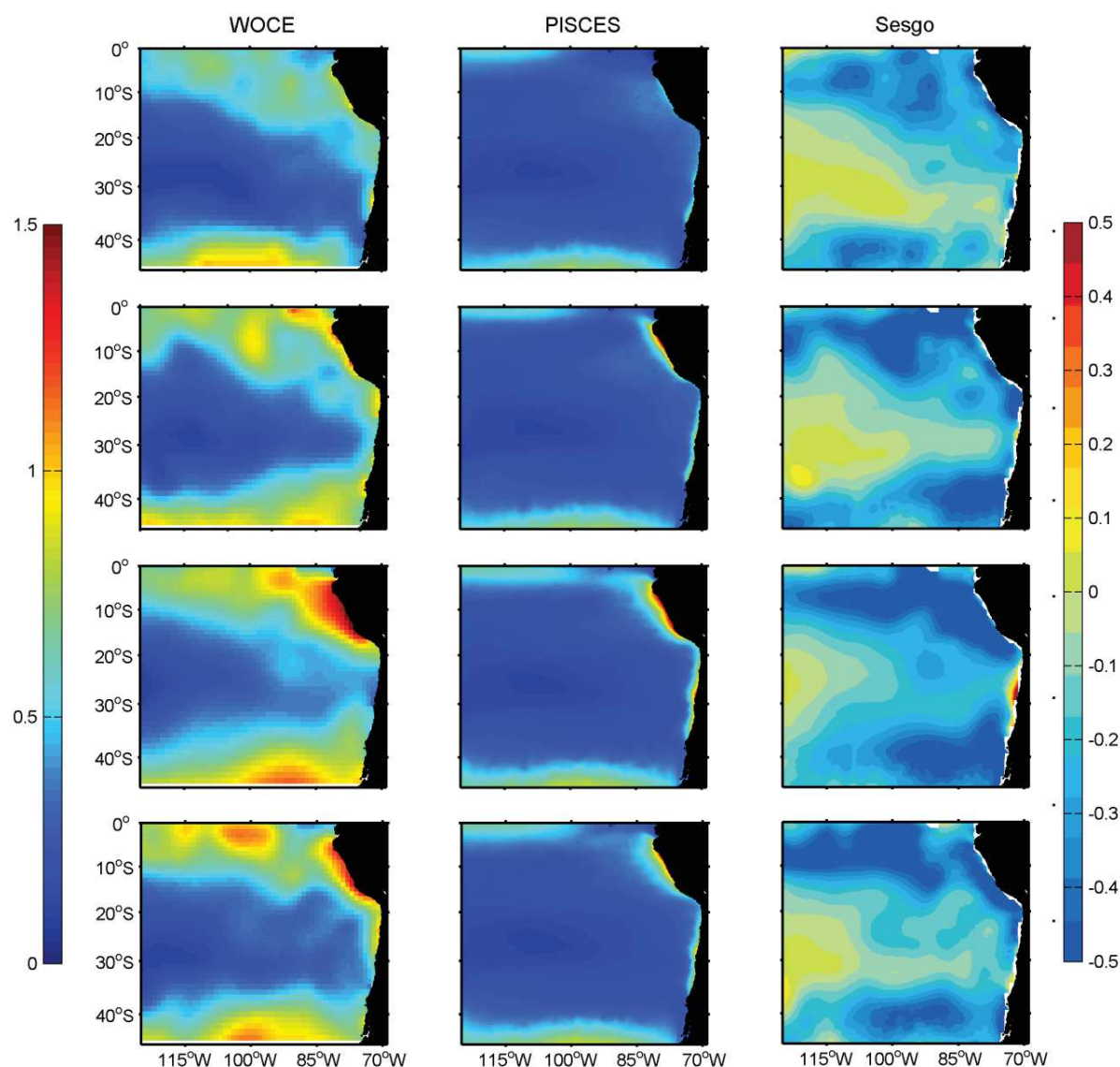


Figura 25. Ciclo estacional de la concentración de fosfato superficial ( $PO_3$ ) para datos observados del *World Ocean Atlas* (panel izquierdo), modelo ROMS-PISCES (panel centro) y el sesgo (diferencia en la magnitud de la señal) (panel derecho). Las estaciones desde arriba a abajo: verano, otoño, invierno, primavera.

Finalmente, se analizó la distribución estacional de silicato simulado por ROMS-PISCES\_PADRE respecto a las observaciones globales de WOA (Figura 30). En general, el sector costero y el área de transición costera mostraron un sesgo negativo del modelo respecto a la observación y un sesgo positivo en la zona oceánica. Este resultado es interesante, en términos de la productividad primaria, la cual mostró ciertos sesgos negativos menores en los centros de

surgencia, los cuales podrían ser producto de una limitación en el crecimiento del fitoplancton en el modelo producto de una carencia de silicatos en el sistema, lo cual podría estar relacionado con el aportes de nutrientes terragénicos (efecto de los ríos en el sector costero).

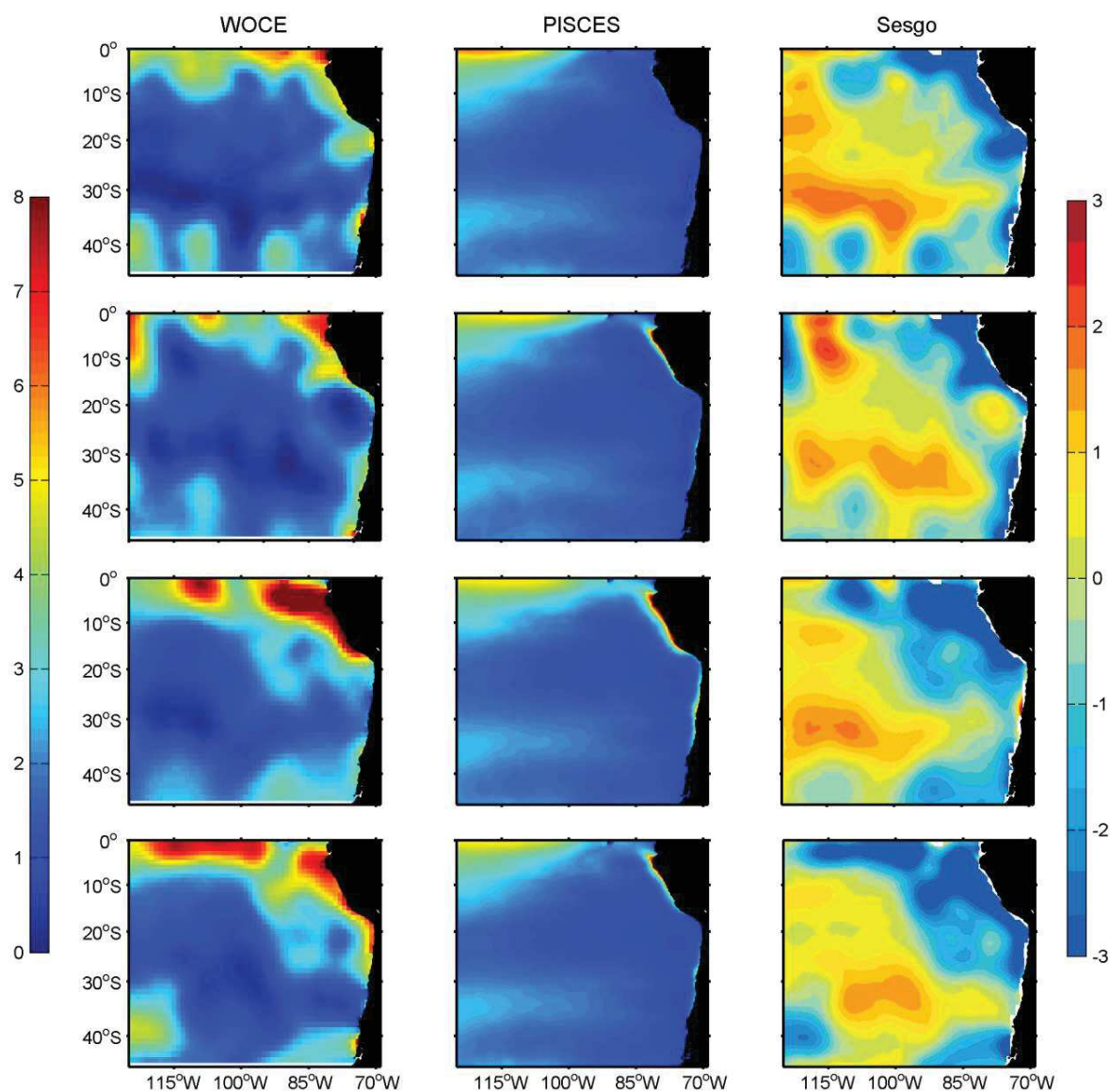


Figura 26. Ciclo estacional de la concentración de silicato superficial ( $SO_3$ ) para datos observados del *World Ocean Atlas* (panel izquierdo), modelo ROMS-PISCES\_PADRE (panel centro) y el sesgo (diferencia en la magnitud de la señal) (panel derecho). Las estaciones desde arriba a abajo: verano, otoño, invierno, primavera.

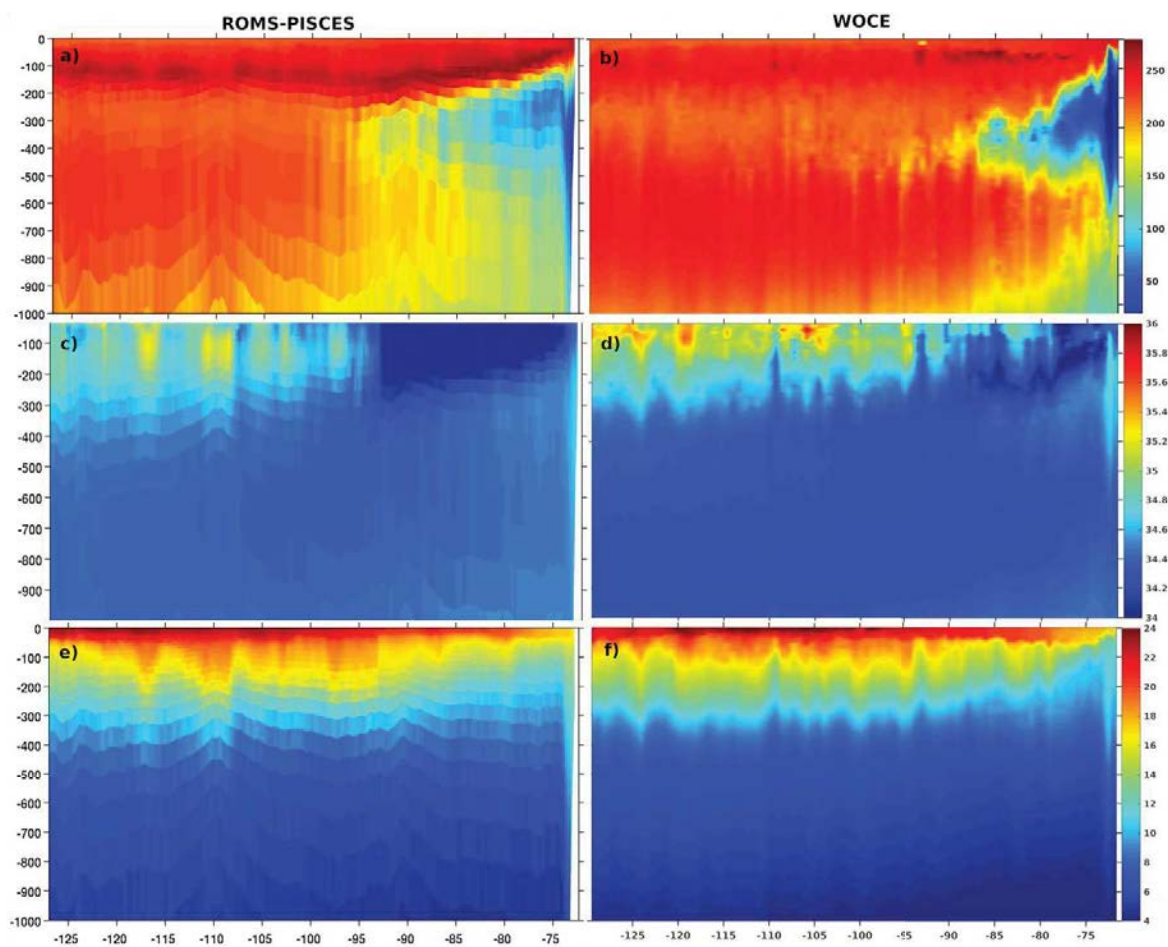


Figura 27. Secciones para enero 2010 frente a Chile ( $32^{\circ}30'S$ ): a) oxígeno ROMS PISCES, b) oxígeno WOCE, c) salinidad ROMS PISCES, d) salinidad WOCE, e) temperatura ROMS PISCES, f) temperatura WOCE.

A través del uso de información proveniente de perfiladores CTDO desplegados por el *World Ocean Circulation Experiment* (WOCE) transectas ubicadas frente a las costas de Chile y Perú, así como una transecta norte-sur a los  $105^{\circ}W$ , se realizó un análisis comparativo de la estructura vertical del modelo ROMS-PISCES\_PADRE respecto a observaciones locales. La Figura 27 muestra las secciones de oxígeno disuelto, salinidad y temperatura obtenidas desde ROMS PISCES y de las observaciones para la transecta realizada frente a las costas de Chile durante enero, la Figura 28 muestra la comparación respecto a la transecta realizada frente a las costas de Perú durante mayo, y finalmente la Figura 29 muestra el análisis compartido respecto a las observaciones realizadas por la transecta frente a las costas de Chile durante septiembre

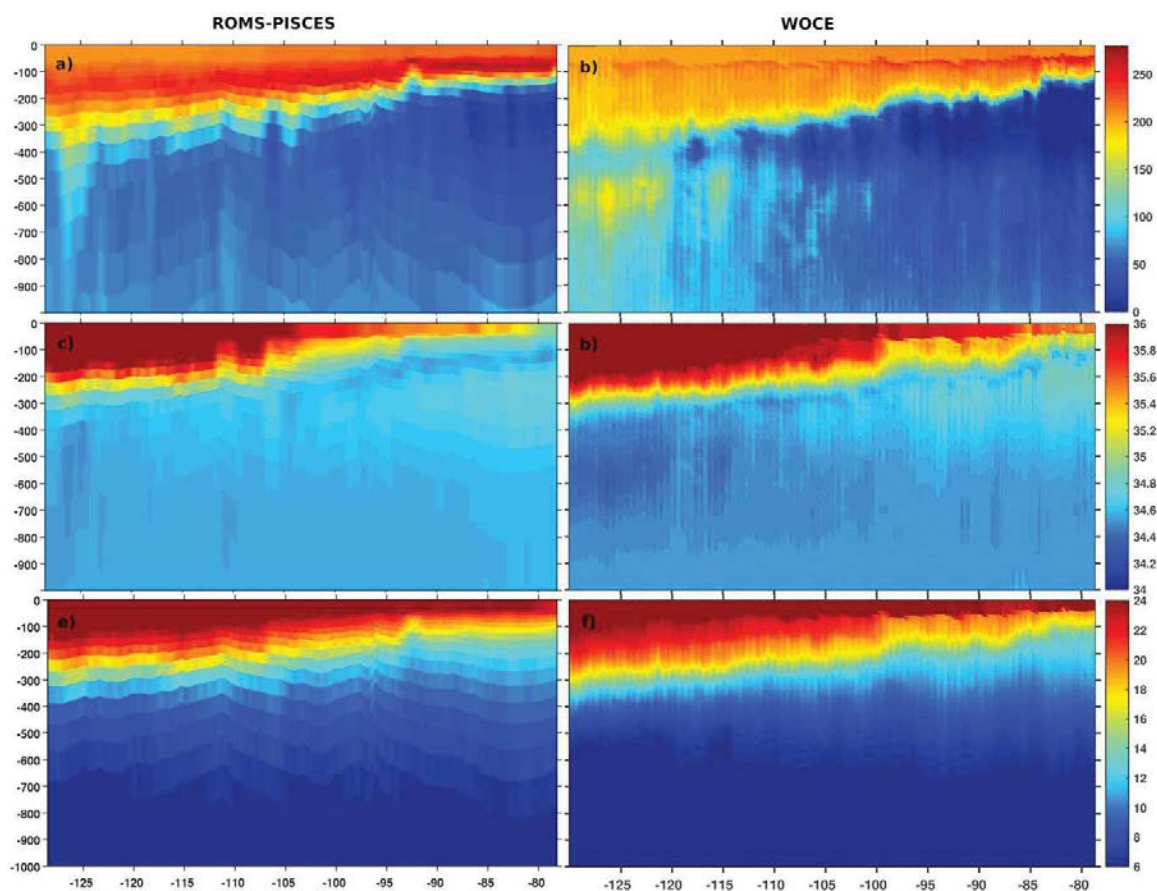


Figura 28. Secciones para mayo 2009 frente a Perú ( $-15^{\circ}\text{S}$ ): a) oxígeno ROMS PISCES, b) oxígeno WOCE, c) salinidad ROMS PISCES, d) salinidad WOCE, e) temperatura ROMS PISCES, f) temperatura WOCE.

En general, para todas las secciones se obtuvo una respuesta consistente en el modelo en relación a las observaciones de campo. Respecto a la variable oxígeno (Figura 27, 28 y 29a-b) destaca la coherencia del patrón vertical del modelo ROMS PISCES en cuanto a la extensión de la zona de mínima de oxígeno presente en la zona más costera, mostrando el núcleo a 200-300 metros de profundidad como se apreció en la observación, sin embargo el modelo tiende a subestimar el oxígeno en la zona justo por debajo de la zona de mínima de oxígeno, por otro lado, el modelo mostró una mayor extensión costa afuera de la zona con bajos valores de oxígeno, sin embargo, el modelo mostró un buen desempeño en reproducir los gradientes entre la costa y el océano, demostrando que el modelo replicó la estructura general de la variable oxígeno en la columna de agua. En el caso de la salinidad (Figura 27, 28 y 29c-d), se obtuvo un menor nivel de desempeño del modelo respecto a las observaciones. El modelo mostró una tendencia a subestimar la

salinidad en aproximadamente 1 psu principalmente en los primeros 200 metros de la columna de agua, sin embargo, el modelo representó el patrón del gradiente con mayor salinidad costa afuera y un ascenso de las isohalinas hacia el sector costero. Las Figuras 27, 28 y 29e-f, mostraron un eficiente desempeño del modelo para reproducir el patrón espacial de la temperatura señalando una alta efectividad en la magnitud térmica del modelo ROMS PISCES.

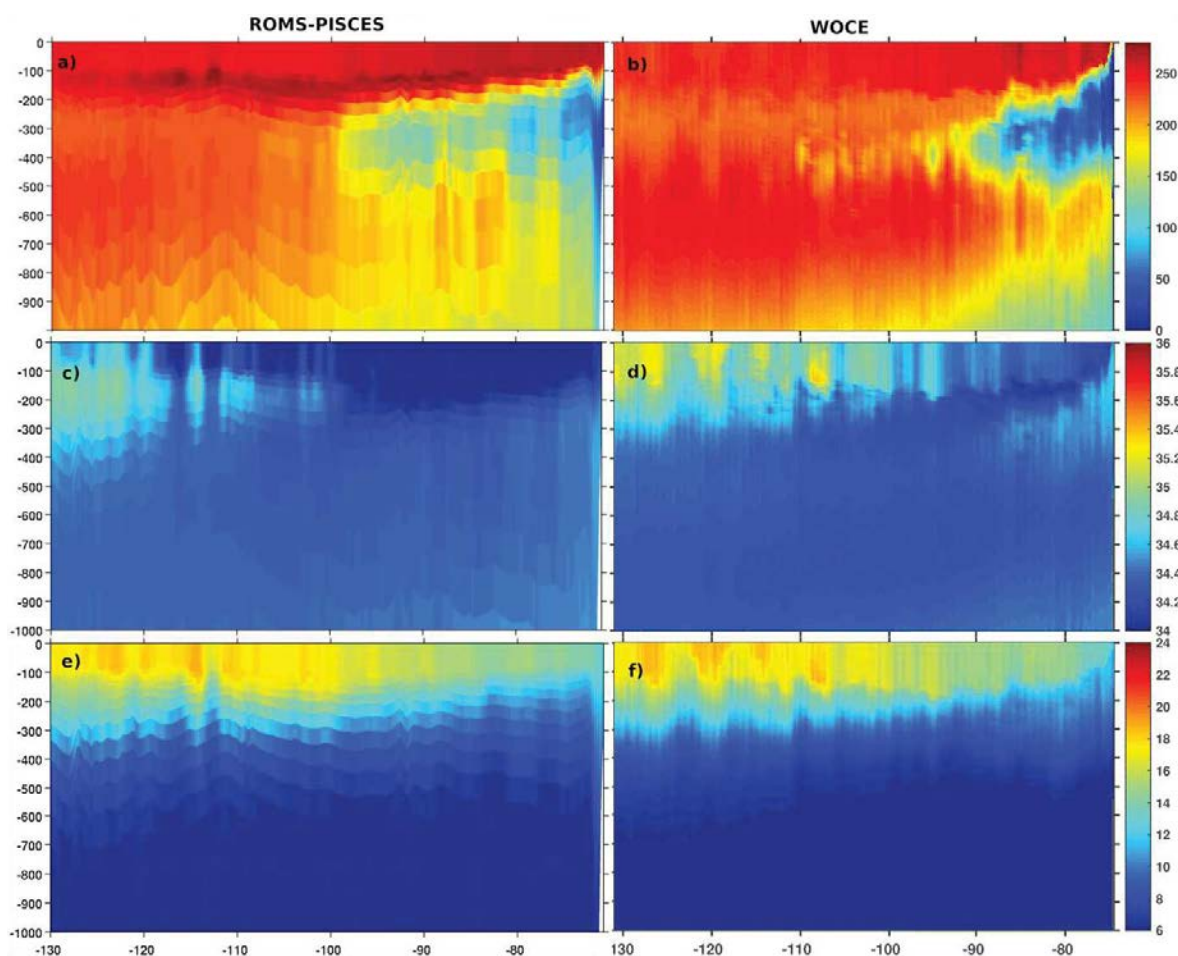


Figura 29. Secciones para septiembre 2017 frente a Chile (-32.5°S): a) oxígeno ROMS PISCES, b) oxígeno WOCE, c) salinidad ROMS PISCES, d) salinidad WOCE, e) temperatura ROMS PISCES, f) temperatura WOCE

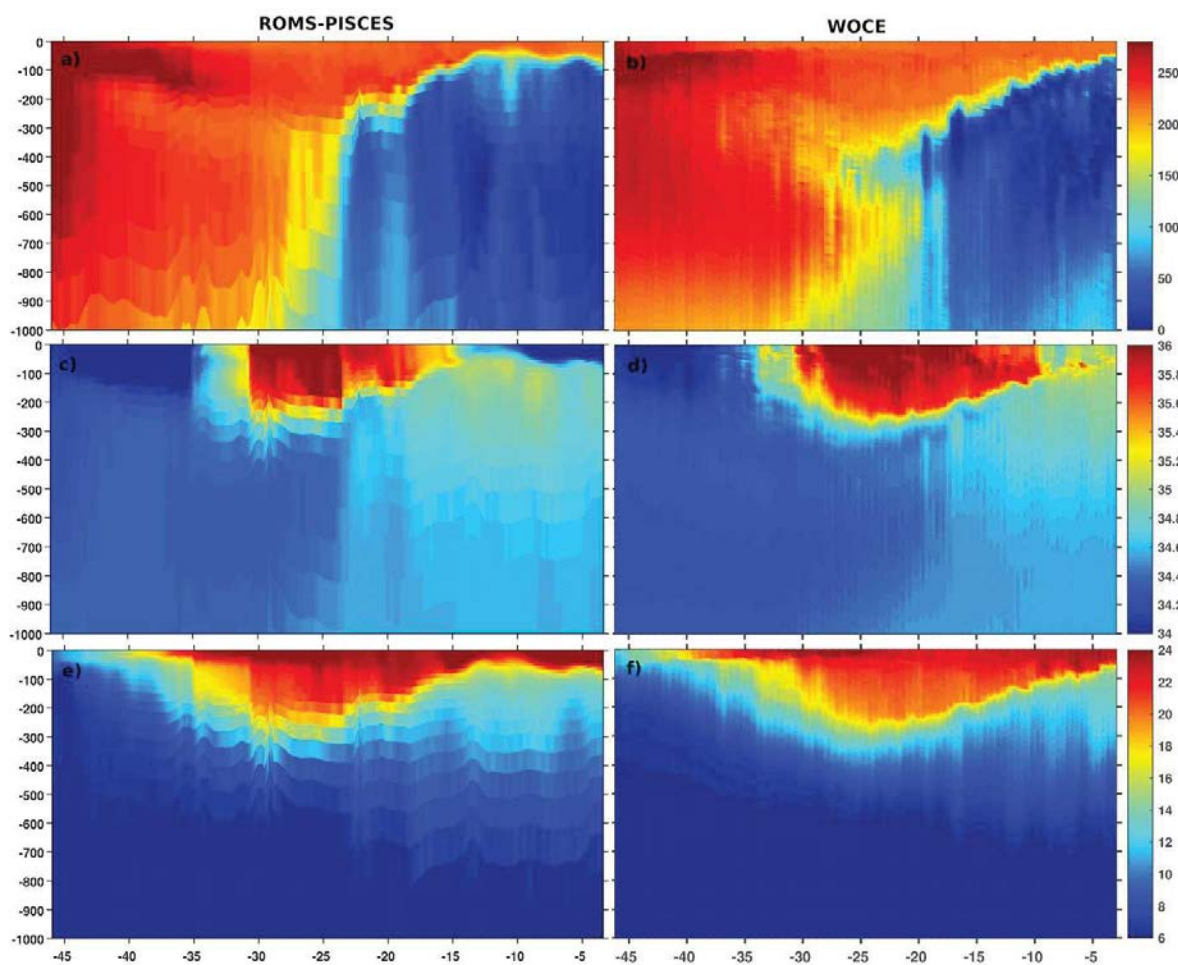


Figura 30. Secciones para enero 2008 transecta norte-sur ( $105^{\circ}\text{W}$ ): a) oxígeno ROMS PISCES, b) oxígeno WOCE, c) salinidad ROMS PISCES, d) salinidad WOCE, e) temperatura ROMS PISCES, f) temperatura WOCE.

Por otra parte, la Figura 30 muestra las secciones de oxígeno, salinidad y temperatura obtenidas desde ROMS PISCES y de las observaciones para la transecta norte-sur ( $105^{\circ}\text{W}$ ). Respecto a la variable oxígeno (Figura 30a-b) destaca la coherencia del patrón vertical del modelo ROMS PISCES en cuanto a la extensión latitudinal de la zona de mínima de oxígeno. En el caso de la salinidad (Figura 30c-d), se obtuvo un buen nivel de desempeño del modelo respecto a las observaciones, el modelo mostró una tendencia a subestimar la salinidad en aproximadamente 0.5 psu principalmente en la parte norte de la transecta. Las Figuras 30e-f, mostraron un eficiente desempeño del modelo para reproducir el patrón espacial de la temperatura, reafirmando una alta efectividad en reproducir la estructura térmica por parte del modelo ROMS PISCES.

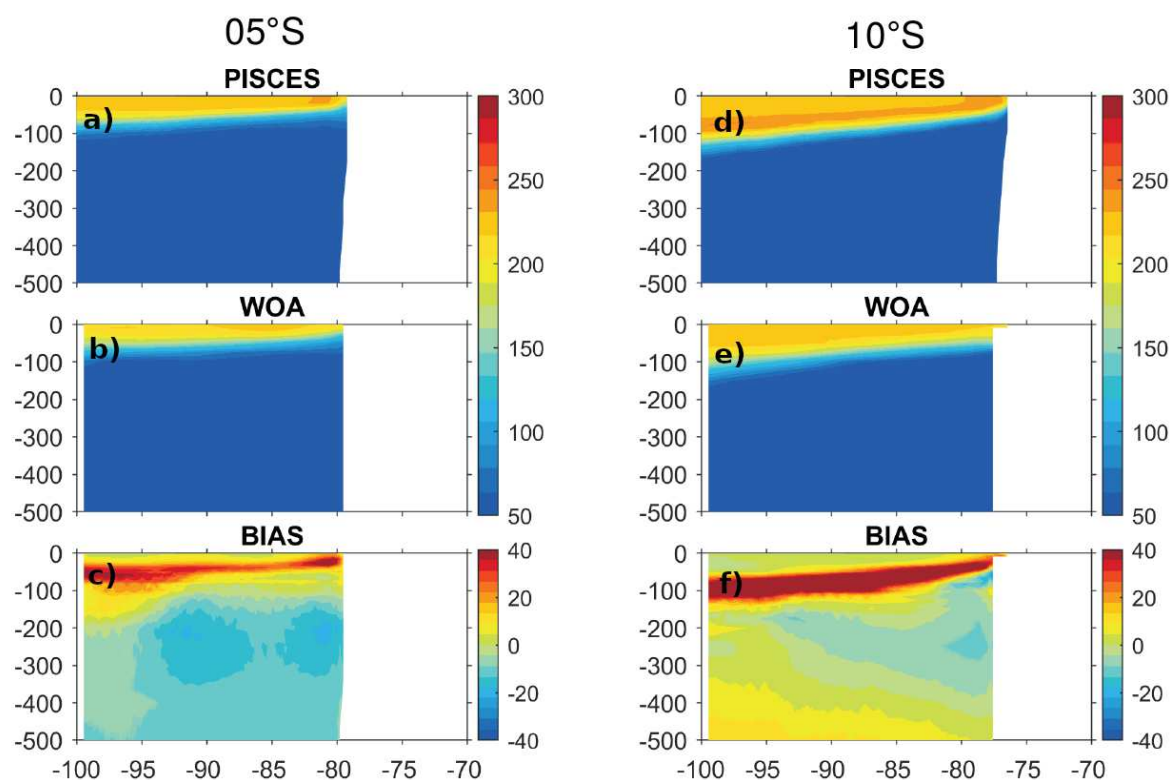


Figura 31. Sección vertical de oxígeno a los 5°S a) ROMS-PISCES\_PADRE, b) WOA, c) BIAS y a los 10°S d) ROMS-PISCES\_PADRE, e) WOA, f) sesgo.

Finalmente, la Figuras 31-33 muestran las secciones verticales de oxígeno provenientes del modelo ROMS-PISCES\_PADRE (promedio periodo 2008-2017) y datos WOA en las transectas ubicadas en las latitudes: 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30° y 35°S respectivamente. La Figura 31 muestra secciones a los 5° y 10°S, destaca la coherencia del patrón vertical del modelo ROMS-PISCES\_PADRE (Figura 31a-d) en cuanto a la extensión del gradiente vertical del oxígeno y la extensión tanto en la vertical como costa afuera de la zona de mínima de oxígeno presente en toda la zona analizada y sesgos menores en la zona subsuperficial (Figura 31b-e), así mismo el modelo mostró un buen desempeño en reproducir los gradientes entre la costa y el océano. El sesgo (*BIAS*) fue mayor en torno a los 100 m de profundidad, donde se genera el mayor gradiente vertical de oxígeno. La sección a los 10°S mostró un sesgo más extenso que la sección de los 5°S.

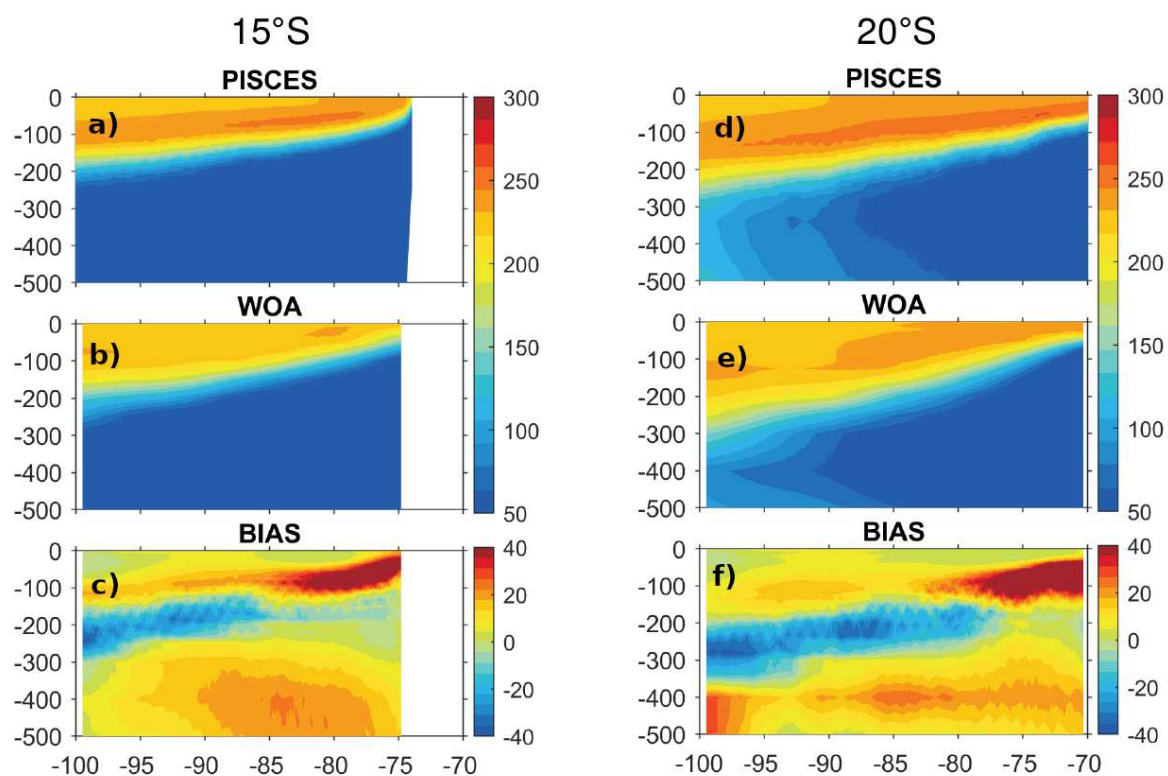


Figura 32. Sección vertical de oxígeno a los 15°S a) ROMS-PISCES\_PADRE, b) WOA, c) BIAS y a los 20°S d) ROMS-PISCES\_PADRE, e) WOA, f) sesgo (BIAS).

La Figura 32 muestra secciones verticales de oxígeno a los 15° y 20°S, donde se observó una coherencia del patrón vertical del modelo ROMS-PISCES\_PADRE (Figura 36a-d) en cuanto a la extensión del gradiente vertical del oxígeno y la extensión en la vertical y costa afuera de la zona de mínima de oxígeno presente en toda la zona analizada, como se apreció en los datos WOA (Figura 32b-e). Así mismo el modelo mostró un buen desempeño en reproducir los gradientes en el océano (al oeste de los 85°W), demostrando que es capaz de replicar eficientemente la estructura de la variable oxígeno en su extensión más bien oceánica. Sin embargo, el sesgo fue mayor entre los 0 y 100 m de profundidad desde la costa hasta los 85°W, ambas secciones mostraron este comportamiento.



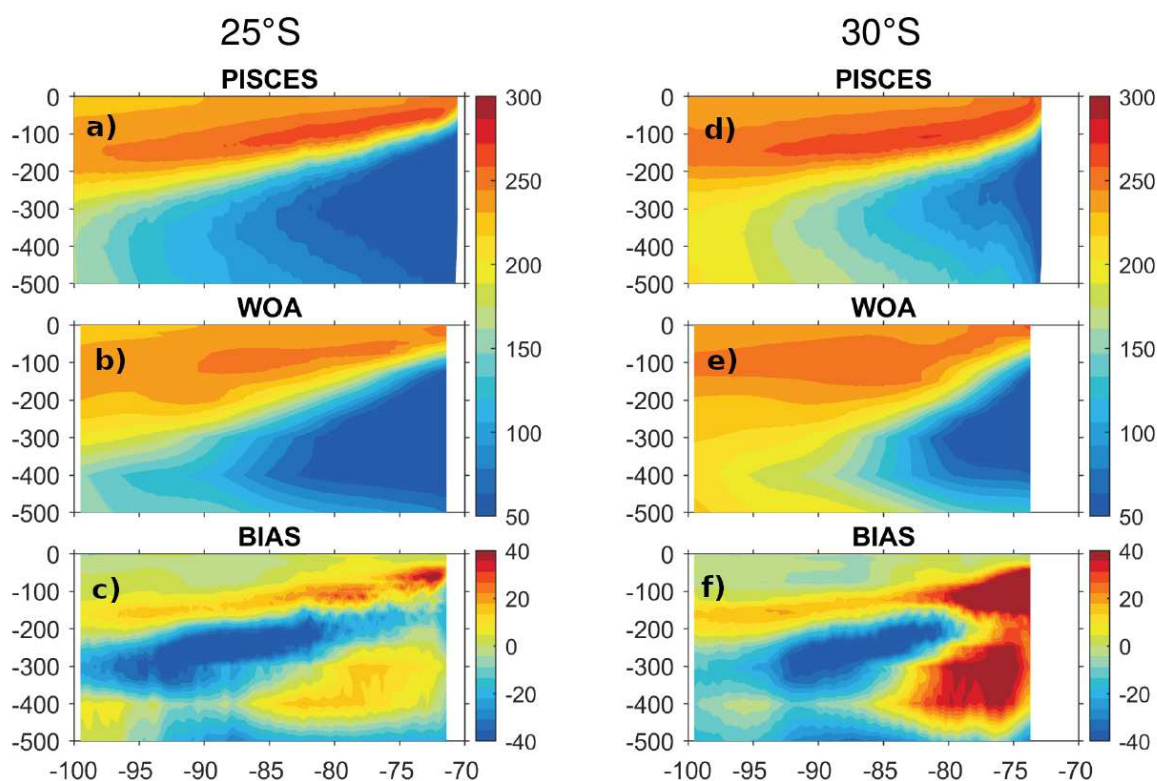


Figura 33. Sección vertical de oxígeno a los 25°S a) ROMS-PISCES\_PADRE, b) WOA, c) BIAS y a los 30°S d) ROMS-PISCES\_PADRE, e) WOA, f) sesgo (BIAS).

La Figura 33 muestra secciones verticales de oxígeno a los 25° y 30°S. La sección a los 25°S mostró una coherencia del patrón vertical del modelo ROMS-PISCES\_PADRE (Figura 33a), sin embargo, la sección a los 30°S del modelo mostró mayores diferencias, no logrando simular correctamente el núcleo de la mínima de oxígeno, así mismo no es capaz de describir el patrón vertical de oxígeno (Figura 33e). El sesgo muestra sus mayores diferencias en la zona costera a los largo del talud continental. En general el modelo mostró un desempeño menor hacia latitudes altas del dominio. El mejor desempeño del modelo se observó en el norte de Chile y frente a Perú.

#### 6.2.6. Modelo biogeoquímico hijo.

Este modelo tiene resolución espacial 7 km y temporal diaria (ver Tabla II). El modelo hijo utilizó las salidas del modelo padre para generar las condiciones de borde e iniciales, los forzantes atmosféricos son interpolados a la grilla de mayor resolución del dominio hijo. Las

Figuras 34 a 36 muestran las expresiones espaciales de las variables del modelo ROMS-PISCES\_HIJO: temperatura superficial del mar, clorofila superficial y oxígeno disuelto a 100 m de profundidad. En estas figuras el recuadro interior corresponde al dominio hijo anidado ( $5^{\circ}\text{S}$ - $25^{\circ}\text{S}$ ,  $90^{\circ}\text{W}$ - $71^{\circ}\text{W}$ ), el dominio mayor corresponde a las salidas del modelo padre ( $5^{\circ}\text{N}$ - $45^{\circ}\text{S}$ ,  $130^{\circ}\text{W}$ - $71^{\circ}\text{W}$ ). La Figura 34 muestra los cambios estacionales en la temperatura superficial del mar (TSM) donde el modelo hijo mostró una alta coherencia, reproduciendo los principales rasgos térmicos del dominio analizado, tales como la variabilidad estacional de la TSM observándose un aumento de la temperatura superficial, producto de la radiación solar (un forzante atmosférico del modelo ROMS) en los meses de primavera-verano y una disminución durante otoño-invierno, por otro lado se identifica el sistema de surgencia costera semi-permanente en las costas de Perú. Estos patrones generales están presentes también en el modelo padre anteriormente validado respecto a esta variable.

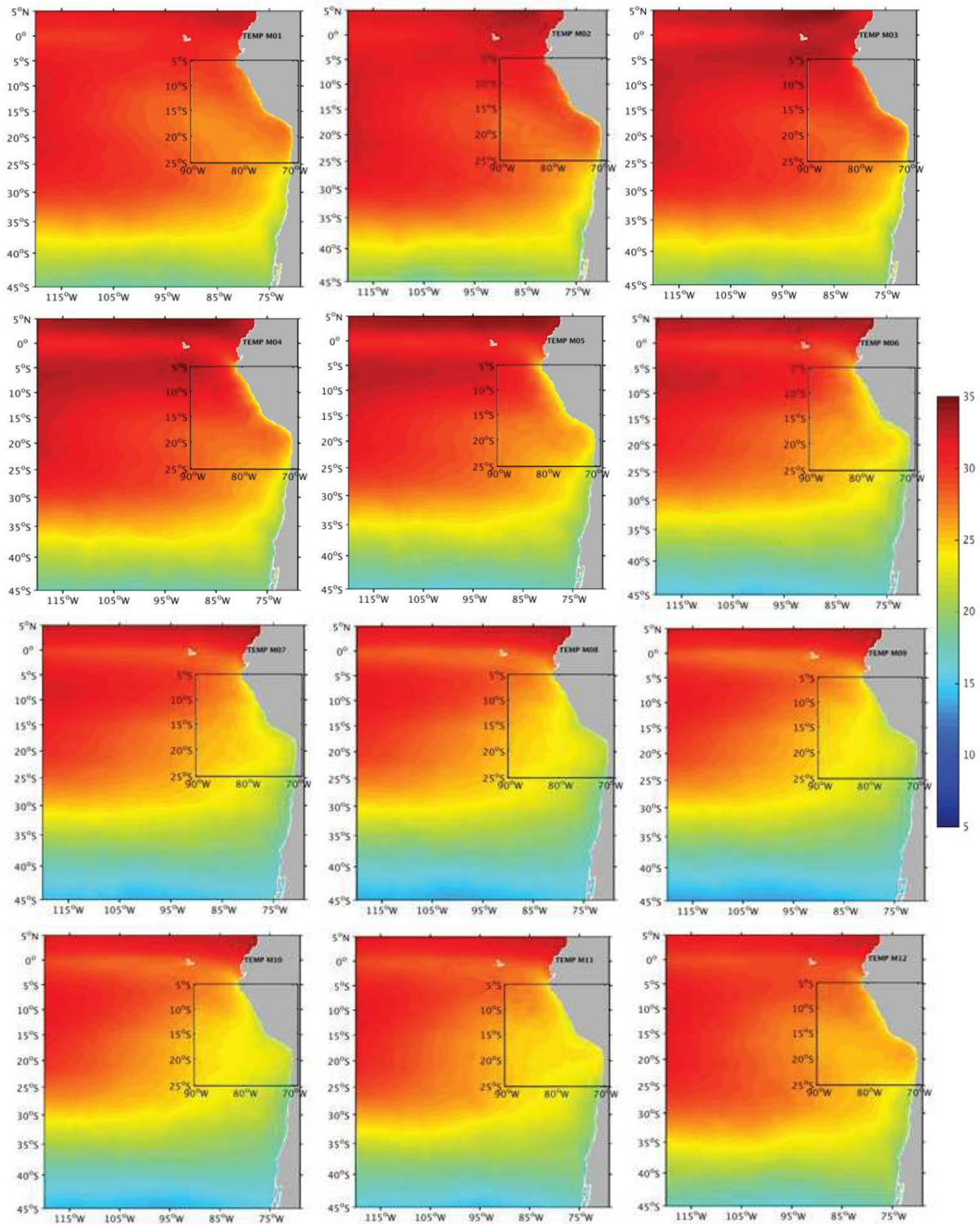


Figura 34. Promedio mensual de la temperatura superficial del mar, periodo 2007-2013. En un recuadro interno el dominio hijo anidado modelo ROMS\_PISCES-HIJO.

La Figura 35 muestra la clorofila superficial mensual promedio (2001-2013) proveniente del modelo ROMS-PISCES\_HIJO, la cual se descompone en nano-clorofila y clorofila en diatomeas (NCHL + DCHL), como módulos de productividad fraccionada por tamaño. Debido a la mayor resolución del modelo hijo (6 km) respecto del modelo padre (20 km), se observan estructuras de sub mesoescala que promueven la exportación de clorofila superficial costa afuera. El modelo hijo reproduce de buena manera los principales gradientes horizontales de concentración de clorofila, asociados a los centros de productividad costera vinculados a los sistemas de surgencia característicos del sistema de Humboldt. Estos patrones generales están presentes también en el modelo padre anteriormente validado respecto a esta variable.

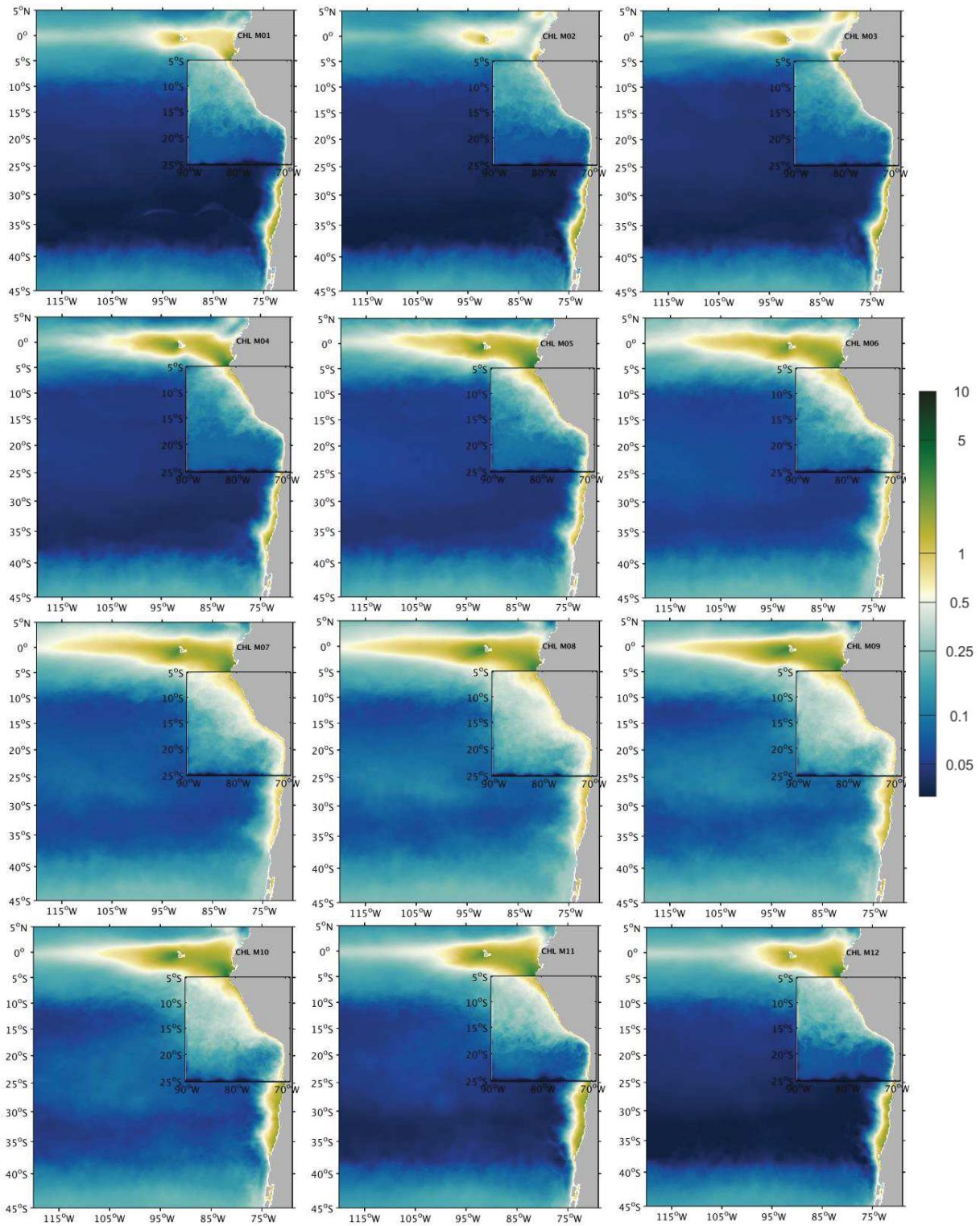


Figura 35. Promedio mensual de la clorofila superficial del mar, periodo 2007-2013. En un recuadro interno el dominio hijo anidado modelo ROMS\_PISCES-HIJO.

La Figura 36 muestra el oxígeno disuelto a 100 m de profundidad mensual promedio proveniente del modelo ROMS-PISCES\_HIJO. Debido a la mayor resolución del modelo hijo (6 km) respecto del modelo padre (20 km), se observan estructuras de sub mesoescala que muestran la variabilidad espacial del oxígeno disuelto a 100 m. Se observó la extensión espacio temporal de esta variable tanto del dominio hijo como el dominio padre, la cual se extiende desde la región ecuatorial hacia la costa del Pacífico suroriental disminuyendo su extensión costa afuera hacia el sur. El resultado del modelo hijo comprende una región donde la zona mínima de oxígeno resulta predominante en la zona subsuperficial de la columna de agua (región costera de Perú y norte de Chile), la cual como se vio en el análisis previo es bien representado por modelo biogeoquímico ROMS-PISCES\_PADRE.

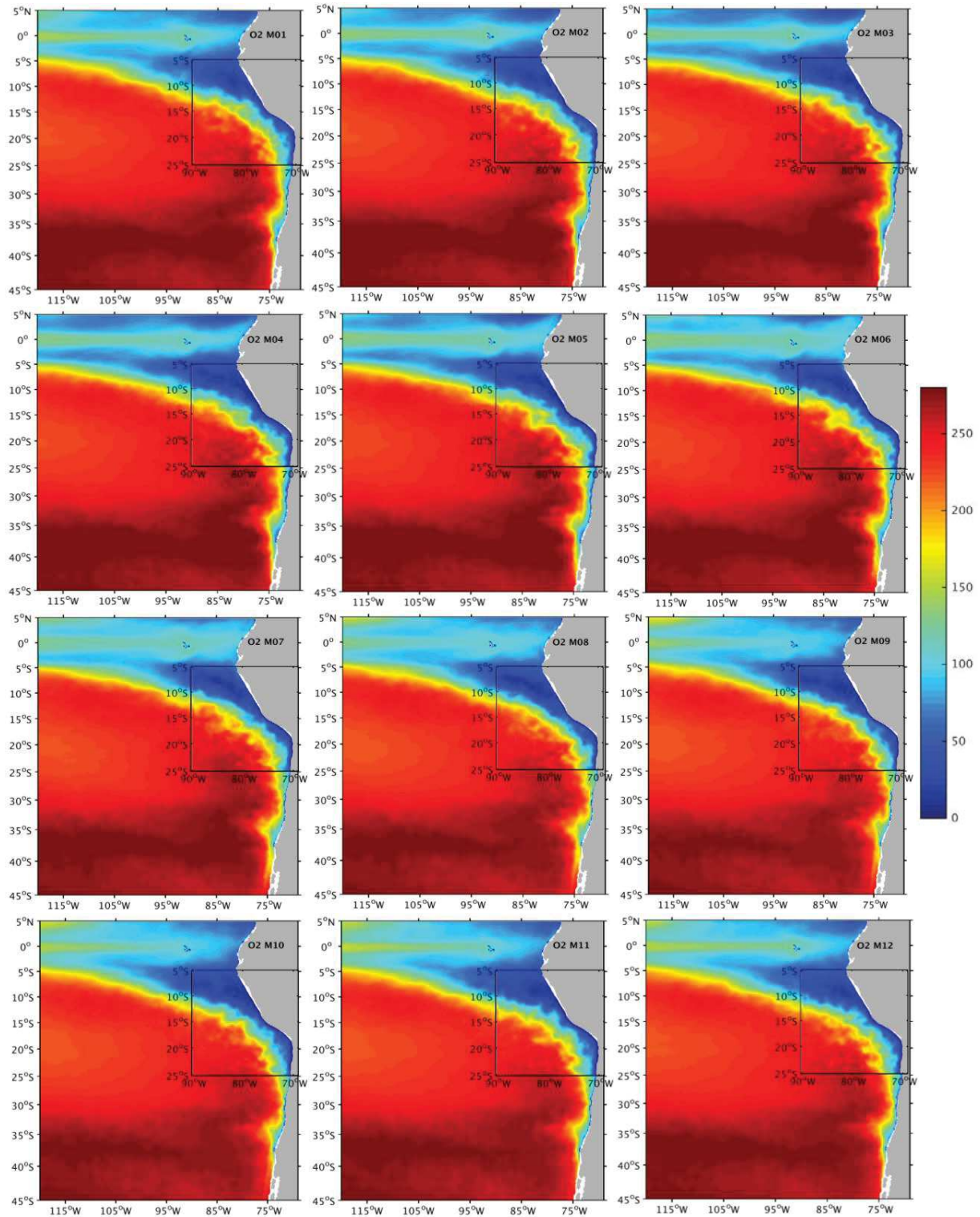


Figura 36. Promedio mensual del oxígeno disuelto, periodo 2007-2013. En un recuadro interno el dominio hijo anidado modelo ROMS\_PISCES-HIJO.

### 6.2.7. Análisis integrado modelación hidrodinámica y biogeoquímica

El desarrollo de un modelo biogeoquímico validado para la zona del Pacífico suroriental representó uno de los objetivos más ambiciosos de este estudio, consumiendo más tiempo del presupuestado originalmente en la ejecución del presente proyecto. Se realizaron 6 modelaciones (hidrodinámicas y biogeoquímicas, Tabla II) a fin de obtener el mejor resultado dentro de los tiempos requeridos. El análisis de cada modelo se realizó junto al experto internacional Dr. Vincent Echevin. Los resultados de la validación mostraron un buen desempeño de las variables críticas para este proyecto, a saber:

- Variables hidrográficas (ámbito físico-químico): temperatura, oxígeno disuelto, salinidad, densidad del agua de mar.
- Variables hidrodinámicas y atmosféricas (ámbito físico-químico): corrientes, *eddy kinetic energy*, viento y turbulencia, altura del nivel del mar.

Además, el modelo ROMS-PISCES\_PADRE mostró variabilidad tanto estacional como interanual de sus variables y logró reproducir los eventos extremos tipo El Niña/La Niña. No obstante, el oxígeno disuelto y la clorofila fueron las variables que presentaron un mayor desajuste con los datos observados, principalmente en el sector costero centro sur de Chile. La extensión latitudinal del dominio modelado genera dificultades al momento de configurar los parámetros del modelo. Esto está relacionado con la parametrización inicial del modelo (archivo *namelist.trc.sms*) que permite indicar la disponibilidad de hierro hacia el sistema modelado. La parametrización utilizada del modelo PISCES resolvió bien los procesos en gran parte del sistema modelado. Tener una parametrización para zonas del océano con distintas características del ecosistema (i.e. áreas con influencia de ríos) surge como un nuevo desafío a abordar en futuras versiones de la modelación. No obstante, la extensión de la zona de mínima de oxígeno frente a Perú y norte de Chile fue bien representada por el modelo ROMS\_PISCES\_PADRE, área de gran relevancia para el presente proyecto debido a que el oxígeno se presenta como una variable crítica para la distribución de organismos pelágicos como el jurel en dicho sector. Por otro lado, la alta productividad observada frente a la región centro norte de Perú podría generarse debido al ensanchamiento de la plataforma continental en esta zona, lo cual contribuiría con una gran cantidad de hierro a la columna de agua. El hierro es generalmente un elemento limitante



clave para el fitoplancton (Bruland *et al.*, 2005) y su disponibilidad podría variar dependiendo de la extensión de la plataforma continental. No obstante, la clorofila que entregó el modelo ROMS\_PISCES\_PADRE mostró un buen desempeño en la extensión de los niveles de máxima productividad, en futuras versiones del modelo será recomendable sintonizar de mejor manera aportes de micro-nutrientes como el hierro, o el aporte de nutrientes a través de la escorrentía de ríos (i.e. silicatos). Así mismo los forzantes atmosféricos cumplen un rol fundamental en forzar la dinámica asociada a los primeros 50 m de profundidad correspondiente al sistema de corrientes del Pacífico suroriental, específicamente el esfuerzo del viento es una forzante crítica para activar el sistema de surgencia de borde costero que se encuentra en Chile y Perú. La surgencia está relacionada con la intensificación de clorofila en la zona costera, donde el modelo parece ser que no logra reproducir la extensión e intensidad frente a la zona centro sur de Chile, lo cual podría estar relacionado con la calidad del esfuerzo de viento utilizado.

El proceso de modelación biogeoquímica consideró tanto la parametrización de variables hidrodinámicas como biogeoquímicas, esto debido a que el modelo biogeoquímico PISCES se implementa acoplado al modelo hidrodinámico ROMS. Por este motivo, se realizaron varios experimentos numéricos (Tabla II) con diferentes configuraciones y parámetros que permitieron obtener la mejor configuración para dar respuesta a los tiempos y objetivos del presente proyecto. Uno de los principales parámetros que se sensibilizó dentro del modelo numérico hidrodinámico fue la resolución espacial, esto consistió en establecer el tamaño óptimo de la grilla, sobre la cual se resuelven las ecuaciones de la hidrodinámica, que permitió describir de mejor manera variables hidrográficas y el sistema de corrientes costeras que caracteriza el borde oriental del Pacífico sur. La dinámica descrita por ROMS fue sensible a la resolución del modelo, el modelo inicial de 30 km de resolución no fue capaz de resolver los sistemas de corrientes, sin embargo el modelo de 20 km logró rescatar los patrones más generales de circulación. Utilizar un modelo de 10 km era lo más recomendable, pero resultaba poco viable por el tiempo que tomaría su ejecución y los plazos establecidos en el proyecto. Otro parámetro sensible del modelo hidrodinámico correspondió a la calidad de los forzantes atmosféricos que básicamente modulan las corrientes y temperaturas superficiales del océano. Los forzantes que mostraron mejor desempeño en reproducir las variables provistas por el modelo hidrodinámico fueron los que se generaron mediante la climatología de QuikSCAT y anomalías de NCEP2.

Por otro lado, uno de los principales parámetros sensibles en la modelación biogeoquímica ROMS-PISCES fue la disponibilidad de hierro en la plataforma continental. Se realizaron modificaciones en el archivo de configuración de PISCES: *trcini.pisces.h*, donde se controla el valor del parámetro *cmask*, el cual está relacionado con la fuente de hierro en el fondo del océano, de acuerdo a lo sugerido por el experto internacional se escogió el valor  $cmask=0,1$ . Para una batimetría muy profunda y cerca de la costa (casi sin plataforma continental) es necesario utilizar  $cmask=0,1$ , en caso contrario sólo se tendrá una fuente de hierro muy profunda y sin hierro cerca de la capa superficial costera, esto generaría una gran limitación para el hierro y por consecuencia el plancton no podría crecer y habría más nitrato disponible, puesto que el plancton no podría crecer por falta de hierro. La otra fuente de hierro que tiene el modelo proviene de la atmósfera, pero su aporte es menor. Esta parametrización del hierro que trae el modelo PISCES es bastante simple y es difícil que permita describir el comportamiento del hierro a lo largo de toda la plataforma continental del modelo desarrollado producto de lo extenso y variable de esta estructura a lo largo del dominio modelado. Un escenario para futuros modelos sería utilizar valores levemente más altos de *cmask* y sensibilizar esta variación respecto al balance de nutrientes y productividad primaria. Por otro lado, se incorporó otro archivo de configuración (*namelist.trc.sms*) del modelo PISCES facilitado por el experto internacional, donde destacó la configuración de la entrada del hierro mediante la atmósfera (*bdustfer = .TRUE.*) y a través de sedimentos (*bsedinput = .TRUE.*).

### **6.3. Objetivo específico 3. Desarrollar e implementar un modelo biofísico de juveniles y adultos de jurel que permita realizar un seguimiento de la distribución e historia de vida de esta especie en el Pacífico suroriental.**

La ocurrencia de jurel en el Pacífico suroriental como variable respuesta de la modelación espacial es un insumo fundamental para el esquema planteado. Se han identificado las principales fuentes de información para satisfacer este propósito. A continuación se reporta un resumen del proceso de obtención de esta información:

i) capturas desde la flota cerquera de Chile norte: obtenidas desde IFOP vía ley de transparencia, con el respaldo de Subpesca. Esta base de datos proviene de registros tanto de pesca orientada a jurel como de pesca acompañante en la operación orientada a anchoveta.

ii) cruceros acústicos realizados en Chile norte y centro sur: obtenidas desde el FIPA desde las bases de datos de cruceros acústicos desarrollados en las regiones centro-sur y norte de Chile hasta el año 2013. Se han obtenido desde IFOP vía ley de transparencia los cruceros posteriores a 2013.

iii) capturas desde la flota que opera en el extremo norte de la distribución (Perú, Ecuador): inicialmente, se consideró la obtención de esta información vía secretaría ejecutiva de la OROP-PS. No obstante se contó con el apoyo estatal para la gestión de esta información, la información respecto a la distribución de las capturas no ha sido provista por Perú a la OROP-PS. Para subsanar esta carencia de información, se obtuvieron capturas mensuales de jurel realizadas en la ZEE de Perú (periodo 2011-2015) desde los informes anuales PRODUCE generados por el Instituto del Mar del Perú (IMARPE).

iv) cruceros acústicos realizados en la ZEE de Perú: esta pieza de información se ha obtenido vía gestión directa con investigadores de IMARPE, recopilándose las distribuciones generales de los cruceros para el periodo 2001-2014 desde Segura & Aliaga (2014) y desde Informes PRODUCE de Desarrollo de la pesquería de jurel y caballa.

v) capturas desde la flota que opera en aguas internacionales: se gestionó la información desde la secretaría ejecutiva de la OROP-PS. Se ha obtenido una fracción relevante de esta información,

correspondiente a las capturas de la Unión Europea en el periodo 2009-2011. No se reporta a la OROP-PS la información de las capturas de China, por lo que ha sido hasta la fecha imposible de incorporar en la base de datos del proyecto.

vi) capturas desde la flota cerquera de Chile centro-sur: estas capturas han sido compiladas y analizadas y desde la base de datos de INPESCA. Además, han sido complementadas con las provenientes de las bases de datos proporcionadas desde IFOP. No obstante ambas constituyen piezas de información relevantes, en el proceso de análisis se ha detectado que puede existir duplicidad de información por tratarse ambos de seguimientos de la misma pesquería. Se generó un protocolo de cruzamiento de información de ambas fuentes para eliminar datos duplicados.

vi) distribución del desove de jurel: se obtuvieron las bases de datos de la distribución espacial de la densidad de huevos de jurel registrados en los cruceros destinados a la evaluación de la biomasa desovante desde el FIPA, los cuales fueron utilizados para la modelación espacio-temporal del desove y para inicializar la modelación biofísica de juveniles.

La Figura 37 resume la información colectada para el establecimiento de un modelo de distribución de especies para la fracción adulta de jurel en el Pacífico suroriental, la cual acoplada con la información provista por el modelo hidrodinámico y biogeoquímico ROMS-PISCES fue utilizada para probar hipótesis de cambios espaciales en la distribución de jurel bajo un ambiente variable. El resumen de la cantidad de registros por flota y fuente de información se entrega en la Tabla V. En general se observa una amplia cobertura del área de distribución de jurel con capturas que se restringen a las primeras 200 millas náuticas desde la costa en el sector norte de Chile y meridionalmente hasta los 5°S en la región centro-norte de Perú. La zona centro-norte de Chile (entre 24° y 30°S) y la Zona Económica Exclusiva de Perú, se caracterizan por presentar capturas más restringidas al sector costero con una baja extensión costa afuera. Luego entre los 30° y 47°S se observa una mayor cobertura zonal de las capturas generándose una extensión costa afuera superando los 110°W, siendo la flota chilena y la internacional la que han desplegado sus operaciones por fuera de la zona económica exclusiva de Chile, extendiéndose mayormente entre los 80° y 120°W (Figura 37). La Figura 38 muestra además los registros positivos obtenidos por los cruceros de evaluación acústica realizados a lo largo de Chile y Perú. Meridionalmente, la mayor cantidad de registros georeferenciados se obtuvieron en dos centros

bien definidos, el primero entre 21° y 26°S donde opera la flota chilena exclusivamente, y el segundo entre 34° y 41°S donde se mezclan los registros de las flotas chilena centro-sur e internacional (Figura 38b). Zonalmente, la mayor cantidad de registros de capturas se obtuvieron en las primeras 200 mn donde opera la flota chilena y peruana al interior de las respectivas Zonas Económicas Exclusivas, luego un segundo máximo en los 75° para ir disminuyendo sostenidamente hacia altamar donde se ha obtenido un menor número de registros (Figura 38c).

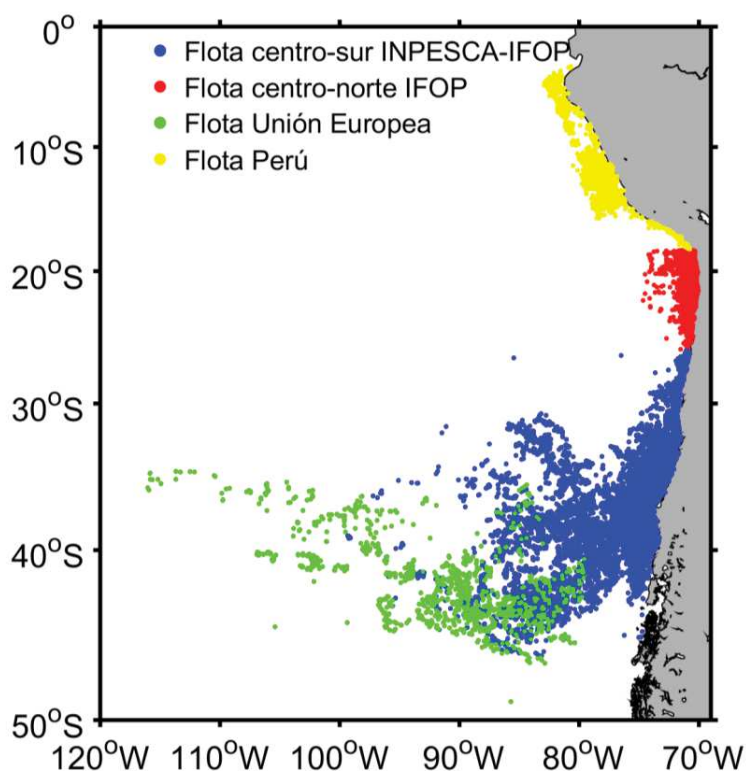


Figura 37. Distribución espacial de los datos de capturas de jurel realizados por la flota chilena, peruana e internacional que sustentan al proceso de modelación espacio-temporal.

Tabla V. Resumen de la información de capturas y registros acústicos colectadas para la modelación espacio-temporal de jurel en el Pacífico suroriental.

| Flota                       | Fuente                | Tipo de información | Período   | Numero de registros | Resolución temporal |
|-----------------------------|-----------------------|---------------------|-----------|---------------------|---------------------|
| Chile centro-sur            | INPESCA-IFOP          | Capturas            | 2001-2017 | 23765               | Diaria              |
| Chile centro-norte          | IFOP                  | Capturas            | 2001-2016 | 29575               | Diaria              |
| Internacional-Unión Europea | OROP-PS               | Capturas            | 2009-2011 | 1157                | Mensual             |
| Perú                        | PRODUCE               | Capturas            | 2011-2015 | 1216                | Mensual             |
| Chile                       | FIPA                  | Presencia acústica  | 2001-2017 | 10591               | Diaria              |
| Perú                        | Segura & Aliaga, 2014 | Presencia acústica  | 2001-2014 | 560                 | Mensual             |

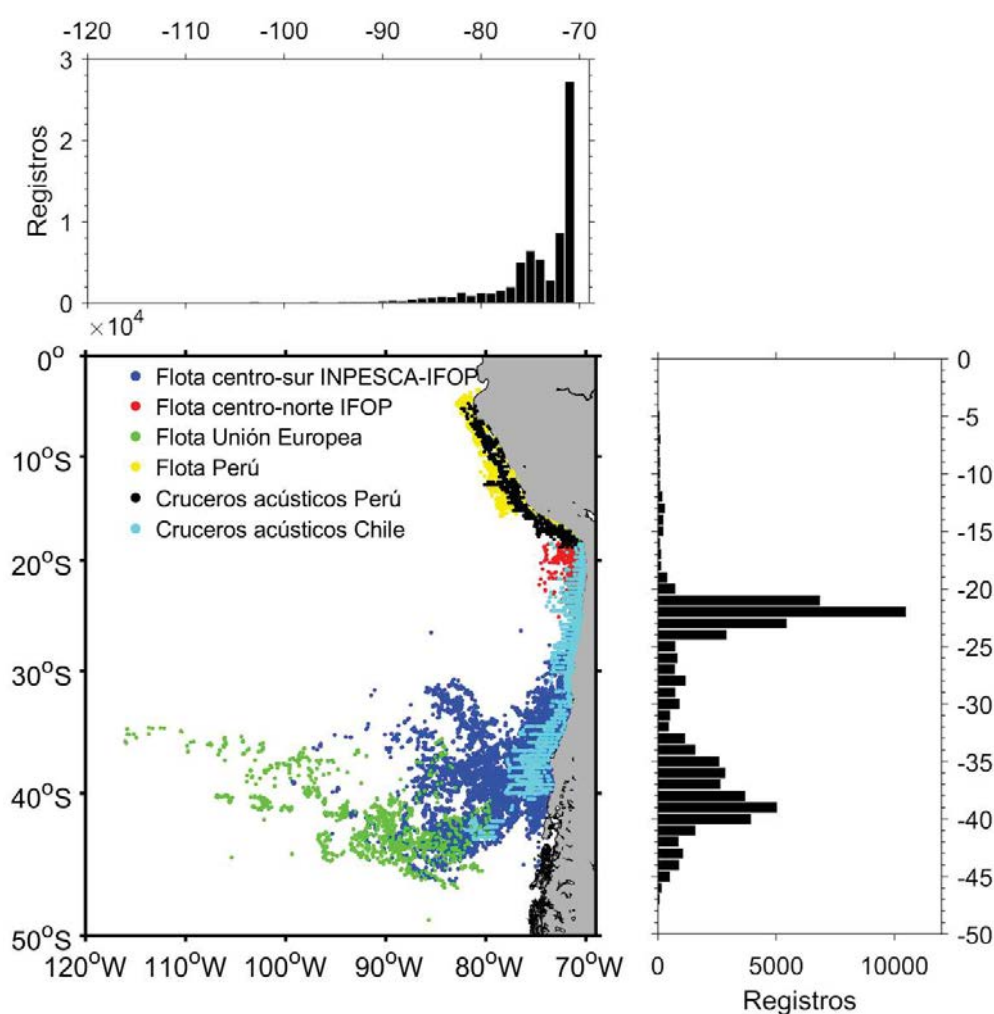
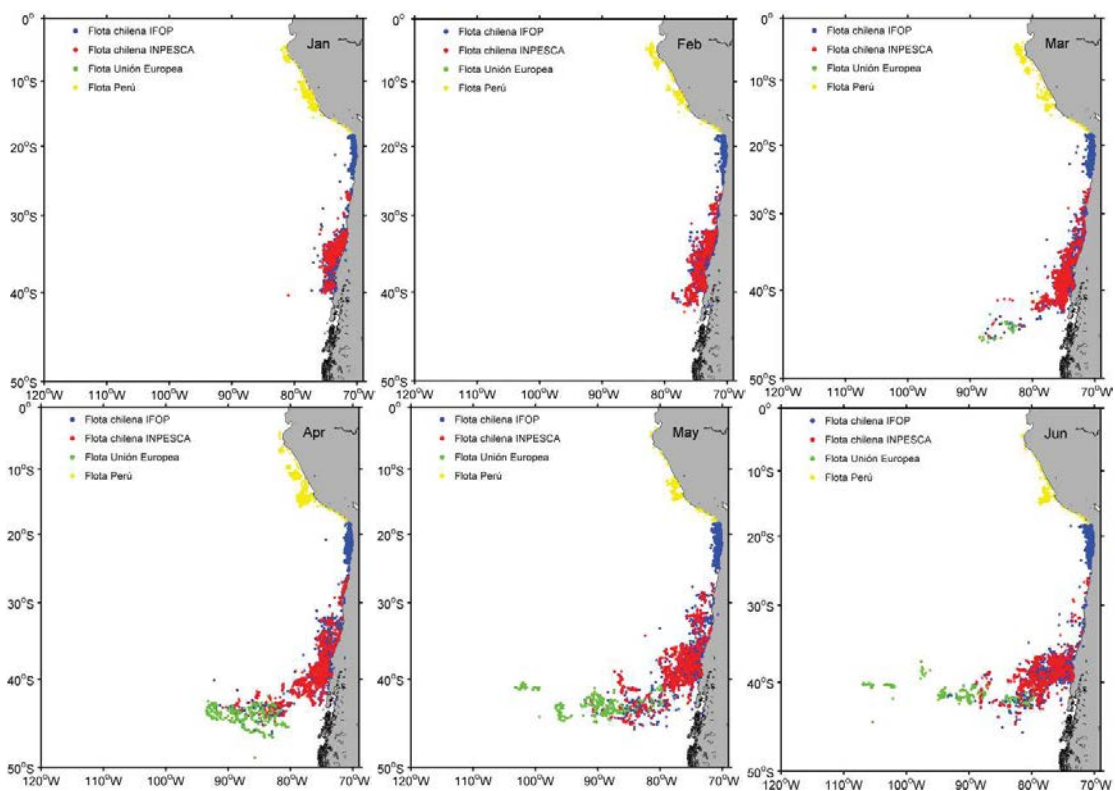


Figura 38. Distribución espacial de los datos de capturas de jurel realizados por la flota chilena, peruana e internacional y los registros obtenidos desde cruceros de prospección acústica realizados en Chile y Perú que sustentan al proceso de modelación espacio-temporal

El establecimiento de esta base de datos general de los registros históricos con referencia espacio-temporal de la presencia de jurel, constituye un avance significativo hacia el entendimiento de la variabilidad en su distribución y de la asociación con variables críticas del hábitat. Hasta la fecha, los estudios relacionados con la distribución espacial de jurel (e.g. Li *et al.*, 2016; Bertrand *et al.*, 2016) han considerado información parcial y discontinua en espacio y tiempo, por lo que los esfuerzos realizados en este proyecto resultan auspiciosos hacia el enfoque estructural de la población de jurel en el Pacífico suroriental.



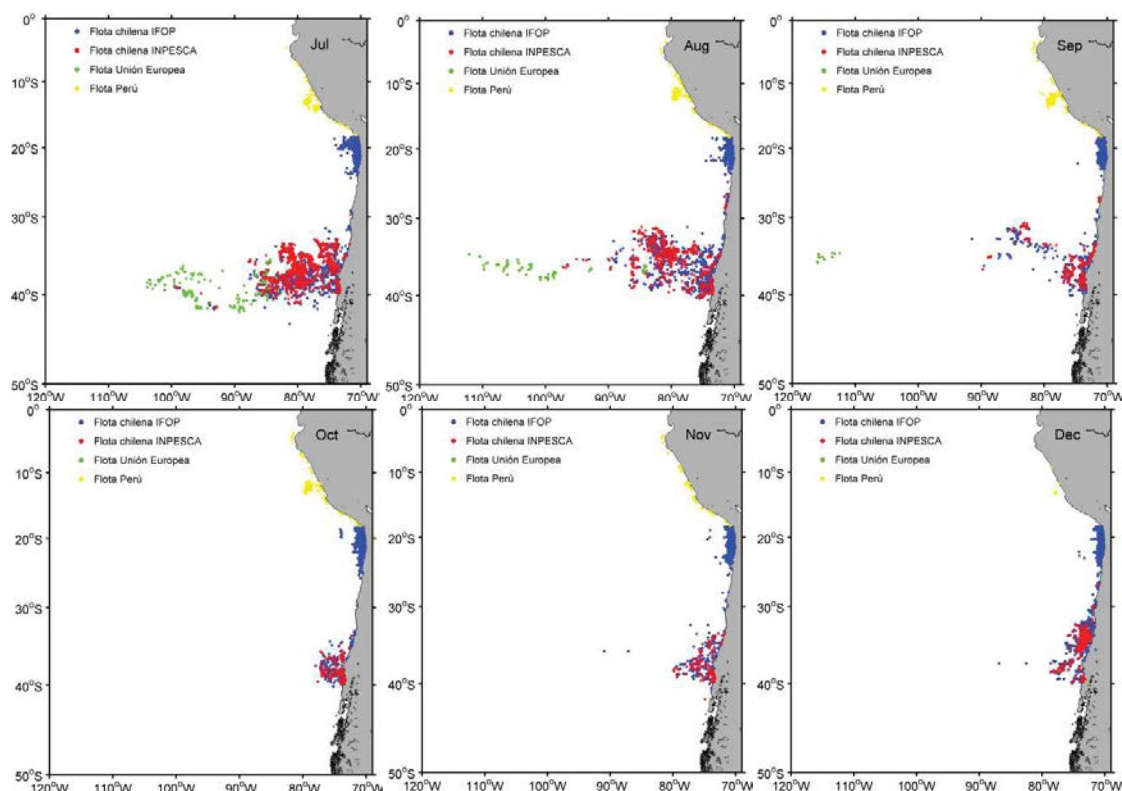


Figura 39. Distribución mensual de los registros de capturas de jurel registrados para la flota chilena, peruana e internacional en el periodo 2001-2016.

La Figura 39 muestra la distribución mensual de la información de capturas colectadas para sustentar la modelación espacial, la que describe la variabilidad estacional que presenta la distribución de las capturas de jurel: primero, los registros de captura en la ZEE peruana muestran actividad más intensa en el primer semestre con capturas más frecuentes en la región centro norte, las cuales se mueven hacia el sur durante el segundo semestre. La fracción del extremo norte de Chile muestra operaciones a lo largo de todo el año, al tratarse de una pesquería principalmente orientada a anchoveta su actividad es mayoritariamente costera, sin embargo entre julio y diciembre se observa una mayor extensión costa afuera. La operación de la flota que opera en la zona centro-sur de Chile muestra un patrón histórico de capturas cercanas a la costa durante el primer trimestre del año, que paulatinamente se aleja a partir de abril para terminar fuera del área económica exclusiva chilena en el mes de septiembre siguiendo el proceso migratorio de jurel que se desarrolla con fines reproductivos. El último trimestre muestra un marcado descenso en la actividad pesquera producto de la dispersión del recurso en la zona oceánica,



incrementándose hacia fin de año donde el recurso comienza a acercarse nuevamente al sector costero con fines alimenticios para comenzar la temporada de engorda. Esto último podría ser fuente de sesgo en la observación basada en capturas, considerando que, bajo condiciones de desove, el jurel no desarrolla agregaciones que sustenten actividad pesquera.

### 6.3.1. Modelación del hábitat potencial de desove de jurel en el Pacífico suroriental

El primer foco de la modelación espacial de jurel fue la estimación del hábitat potencial para el desove, el que se asume está modulado por condiciones ambientales favorables o de mayor preferencia del stock adulto hacia el desove. De esta manera, se desarrolló un modelo espacio-temporal basado en Modelos Aditivos Generalizados (GAM) donde las variables predictivas del desove de jurel fueron la temperatura y la energía cinética de mesoescala como variables ambientales y el año como variable temporal, la variable respuesta la densidad de huevos de jurel observados en cruceros de evaluación directa mediante el método de producción diaria de huevos (MPDH). Dentro de los modelos probados, el que obtuvo un mejor desempeño fue aquel que consideró una distribución de tipo *quasipoisson* para la variable respuesta, lo que permitió abordar datos con exceso de ceros, los que se vieron incrementados al utilizar la estrategia de *pseudo-ausencias* para una mejor parametrización de las variables ambientales. La Tabla VI muestra los principales estadísticos del modelo GAM utilizado para la modelación espacial del desove de jurel. Tanto las variables ambientales ensayadas como la variable temporal año resultaron estadísticamente significativas y aportaron a la reducción de la varianza del modelo y por lo tanto informativas del proceso espacial de la distribución de huevos de jurel ( $p < 0.001$ ). Se destaca que el modelo espacio-temporal final, utilizado para la simulación del desove de jurel compartió un 42,2% de la varianza con lo observado.

La relación funcional entre las variables predictoras y la densidad de huevos de jurel se muestra en la Figura 40. En los primeros años analizados la densidad de huevos de jurel muestra una relación en forma de domo respecto a la temperatura con respuesta positiva en temperaturas amplias entre 12° y 20°C y máximo en 16°C. Esta relación mantuvo su forma, sin embargo en años posteriores se vio restringida en el rango de temperaturas con respuesta positiva entre 15° y 18°C (máximo en 16,5°C) al mismo tiempo que se registró un decaimiento de la densidad media, evidenciando una ocupación más restringida del hábitat (Figura 40a). En el caso de la energía

cinética de mesoescala (*Eddy Kinetic Energy*), la distribución de huevos de jurel estuvo principalmente asociada a altos niveles de EKE ( $>400 \text{ cm}^2 \text{ s}^2$ ), situación que en período reciente de menores densidades se radicalizó, al igual que en el caso de la temperatura lo que sugiere una contracción hacia el ambiente óptimo por parte del desove de jurel en bajos niveles poblacionales. Los niveles de energía cinética elevadas están asociados principalmente a la ocurrencia de remolinos de mesoescala y corrientes de meandro, las que han sido señaladas como elementos importantes para la acumulación de materia y la fertilización superficial en regiones lejanas a los centros de surgencia costera (Correa-Ramírez *et al.*, 2007), sugiriendo un importante acoplamiento biofísico en la actividad de desove de jurel.

Tabla VI. Estadísticas para el modelo aditivo generalizado aplicado al desove de jurel periodo 1999-2016, para la variable dependiente densidad de huevos respecto a las condiciones ambientales temperatura y energía cinética de mesoescala, además de la variable temporal año.

| Model GAM: Densidad huevos ~ Año + Temperatura + EKE, family = quasipoisson |       |        |         |          |     |
|---|-------|--------|---------|----------|-----|
| Model deviance explained: 42.20%  |       |        |         |          |     |
|   | Edf   | Ref.df | F value | Pr (>F)  |     |
| Año   | 8.921 | 8.998  | 77.237  | <2e-16   | *** |
| Temperatura   | 8.631 | 8.951  | 40.91   | <2e-16   | *** |
| Eddy Kinetic Energy   | 7.145 | 8.152  | 5.43    | 6.38E-07 | *** |
| N   | 21187 |        |         |          |     |
| Sign. Codes: *** p<0.001  |       |        |         |          |     |

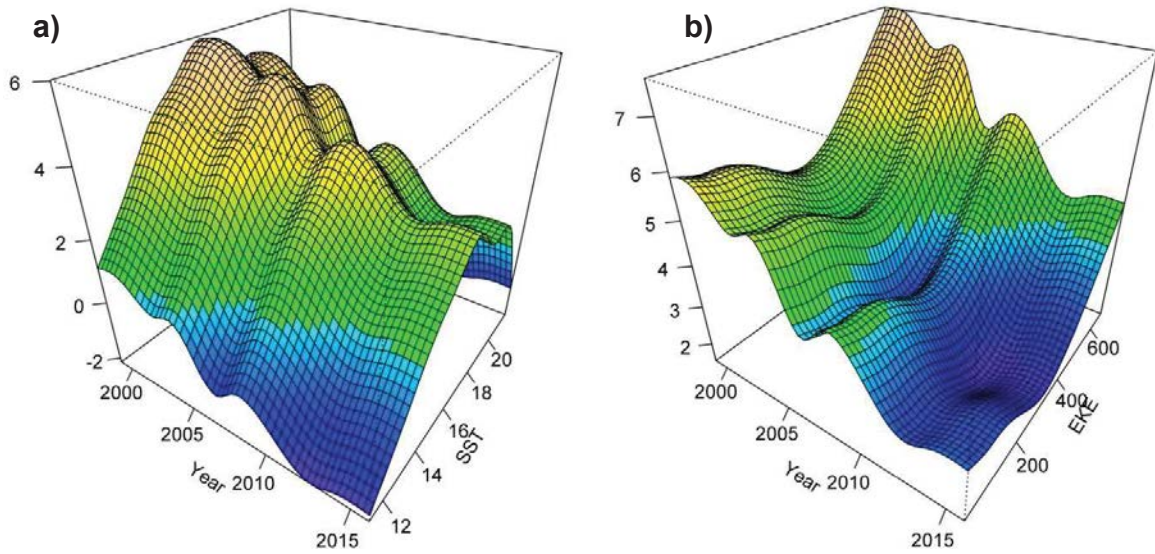


Figura 40. Diagramas de la respuesta del modelo aditivo generalizado para la densidad de huevos de jurel en la interacción entre la variable temporal Año y a) temperatura superficial del mar; b) energía cinética de meso escala.

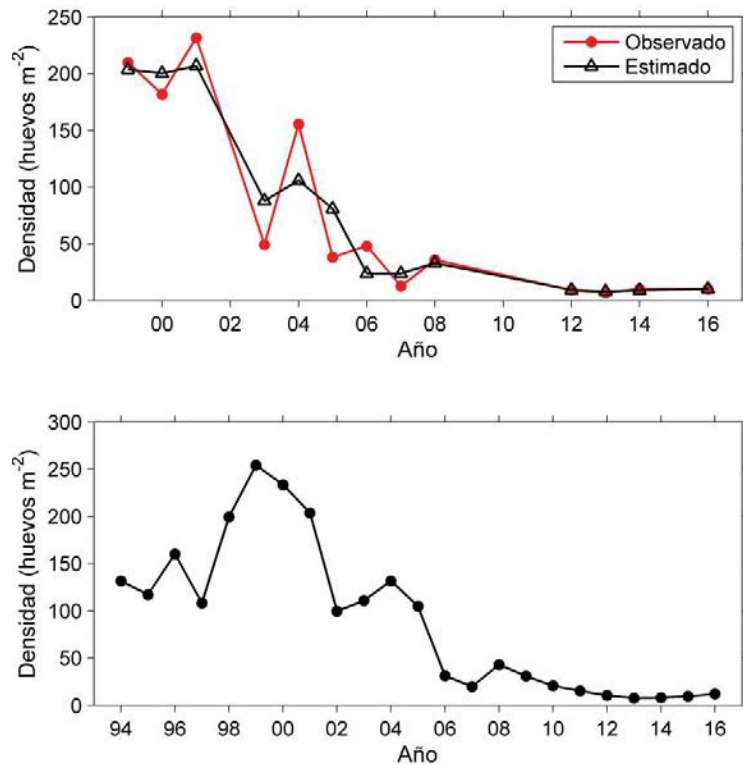


Figura 41. Panel superior: series observadas y modeladas mediante GAM de la densidad de huevos de jurel en el área principal de desove; panel inferior: predicción de la densidad de huevos de jurel basados en la condiciones ambientales observadas para el periodo 1994-2016.

Así, en base al modelo obtenido se realizó un análisis predictivo que en base a las condiciones ambientales de los meses de noviembre de cada año, donde toma lugar el desove principal de jurel a lo largo de toda su área de distribución, el cual simuló la distribución espacial y reconstruyó la trayectoria temporal de la densidad de huevos de jurel. La Figura 41 muestra el resultado de la serie predicha por la dimensión temporal del modelo GAM para la densidad anual del desove de jurel en la temporada de máxima actividad reproductiva. El modelo fue capaz de reproducir la trayectoria general de la serie observada mostrando un buen nivel de ajuste ( $R^2=0,62$ ) reproduciendo el decaimiento sostenido en las densidades posterior al año 2001, y siendo particularmente preciso en los últimos 5 años evaluados. No obstante, el modelo presentó algunas dificultades en reproducir cambios bruscos detectados en años sucesivos, como lo observado entre los años 2003 y 2004 (Figura 41, panel superior). De esta manera, considerando el desempeño estadístico del modelo ensayado, este fue utilizado con fines predictivos, para prolongar la serie hacia años anteriores al inicio de las evaluaciones directas del desove, donde si se cuenta con las condiciones ambientales. La Figura 41 panel inferior muestra el resultado de la serie global 1994-2016 que evidencia que el modelo simula densidades menores para los años previos a 1999 donde se observó el máximo nivel de desove en la historia de las evaluaciones directas.

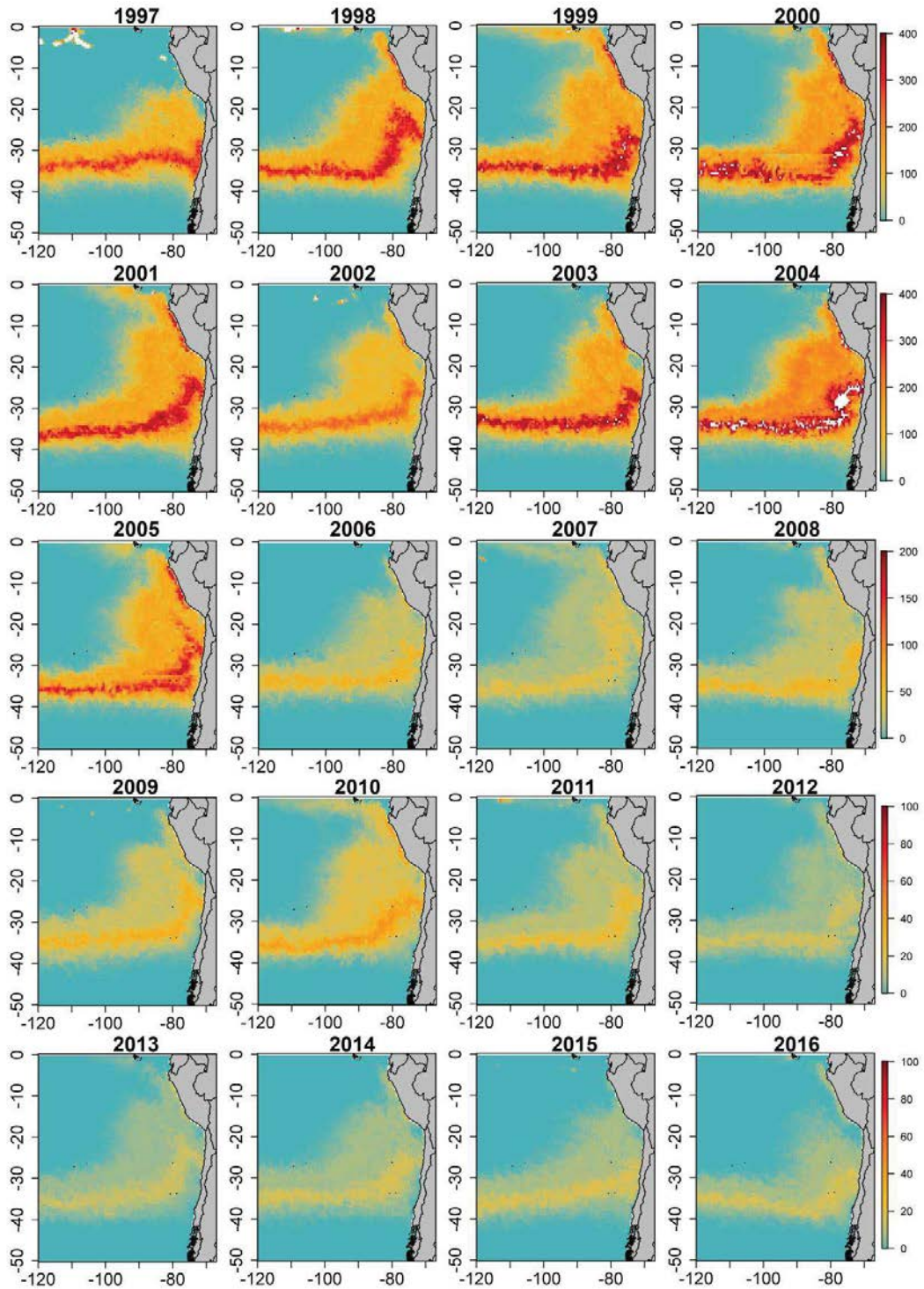


Figura 42. Distribución espacial de la densidad de huevos de jurel modelada mediante GAM para el periodo 1994-2016.

La Figura 42 muestra el resultado de la expresión espacial del modelo predictivo de la densidad del desove de jurel para el periodo de máxima actividad reproductiva. Uno de los resultados relevantes de esta aproximación es la extensa región predicha bajo un esquema de condiciones ambientales preferentes para el desove, además de la inexistencia aparente de discontinuidades espaciales. Los resultados sugieren que el desove de jurel se desarrolla con mayor densidad en una banda situada entre los 30° y 40°S, la cual se defleca hacia el norte en el sector situado al este de 80°W cuya extensión al norte alcanza el sector costero de Perú. Las densidades modeladas sugieren un máximo en la zona oceánica frente a Chile centro sur, las cuales van disminuyendo en su extensión al norte. La zona oceánica frente a Chile centro-sur manifiesta una mayor área de condiciones apropiadas para el desove con recurrencia temporal, mientras en el extremo norte estas condiciones se restringen al sector costero con menor recurrencia temporal. Este último punto resulta relevante, pues a diferencia de lo observado más al sur esta zona de desove no manifiesta una persistencia en el tiempo, sugiriendo que las condiciones ambientales propicias en dicho sector presentan una mayor variabilidad interanual. De esta manera, no obstante el modelo sugiere una continuidad espacial en el área potencial de desove de jurel, muestra cierto nivel de segregación en su extensión al norte mediada por las condiciones del hábitat. En el periodo 1994-2005 la aparición de zonas potenciales de desove en la zona costera de Perú resultó más frecuente que en el periodo 2006-2016. Una particularidad que debe ser analizada en detalle, la constituye el año 1997 donde bajo condiciones El Niño, el área de desove potencial de jurel se repliega hacia el sur sin manifestar deflexión hacia el norte por el sector costero de Chile y Perú. Otro rasgo a ser profundizado es la persistencia de un área poco favorable situada en la curvatura del continente sudamericano, donde podrían existir condiciones particulares. Finalmente, el modelo presentado sugiere que en el sector oceánico (oeste de 80°W) los límites meridionales de la zona histórica de jurel la establecen los 30°S por el norte y los 41°S por el sur. Al mismo tiempo al norte de los 20°S la extensión costa afuera no excede los 85°W en ninguno de los años modelados.

No obstante, el modelo muestra una buena capacidad predictiva y entrega un sustento estadístico para la hipótesis de continuidad espacial y extensión al norte del área potencial de desove de jurel, la ocupación de esta área potencial resulta dependiente del tamaño del stock reproductor que ha mostrado señales de extensión y contracción en su ocupación espacial, las cuales afectan

los niveles de conectividad poblacional. En este contexto, la Figura 43 muestra el área hipotéticamente ocupada para el desove dentro del área potencial evaluada. Esta hipótesis de ocupación del espacio para el desove se depende de un análisis histórico del comportamiento del stock adulto hacia el desove realizado (Gretchina *et al.*, 2018). El sustento teórico de estas distribuciones supuestas se presenta en el Capítulo 7.

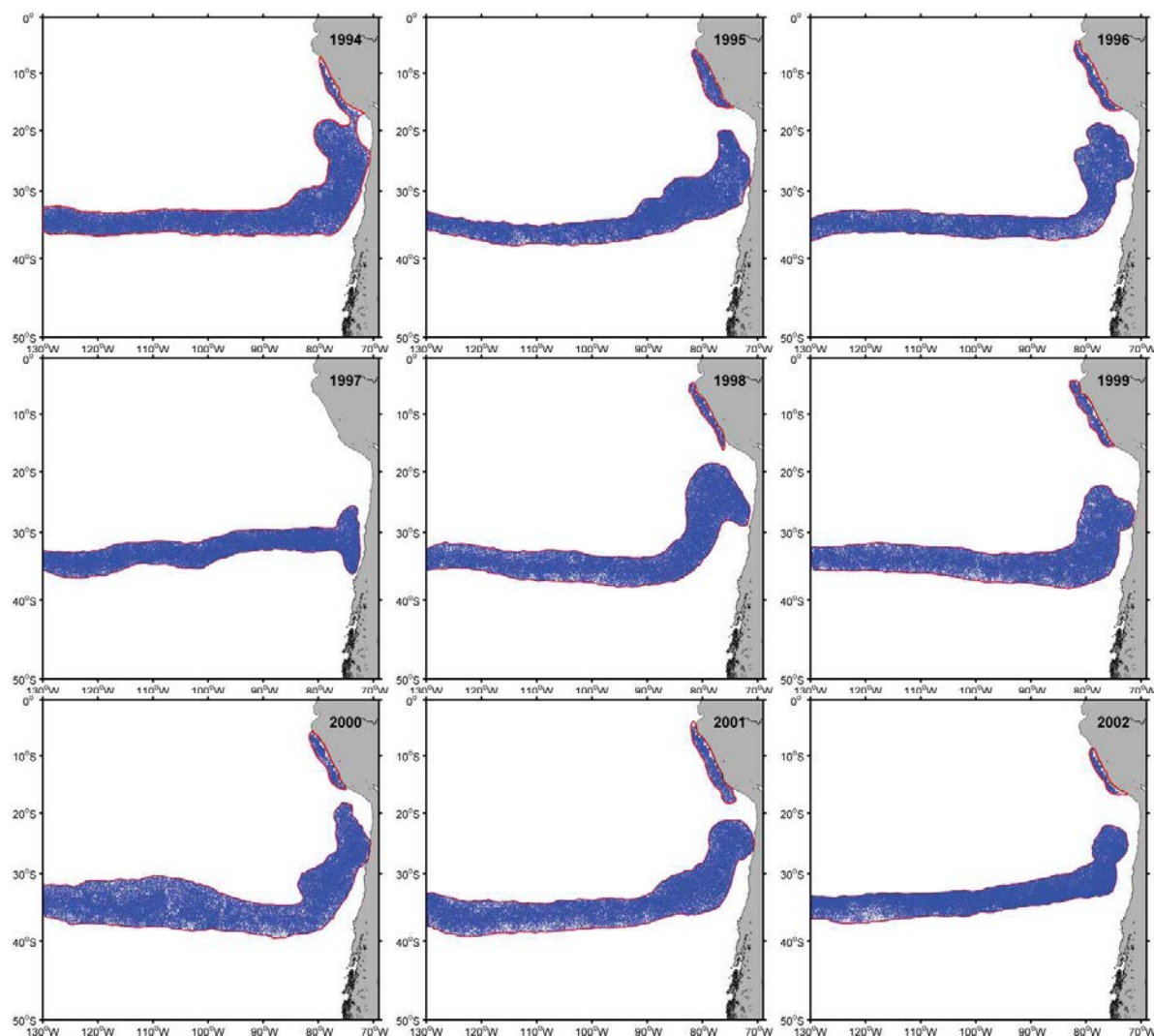


Figura 43. Área de desove efectivo de jurel para el periodo 1994-2016, la cual se desprende de la modelación espacial, acotada por la distribución espacial anual del stock adulto de jurel.

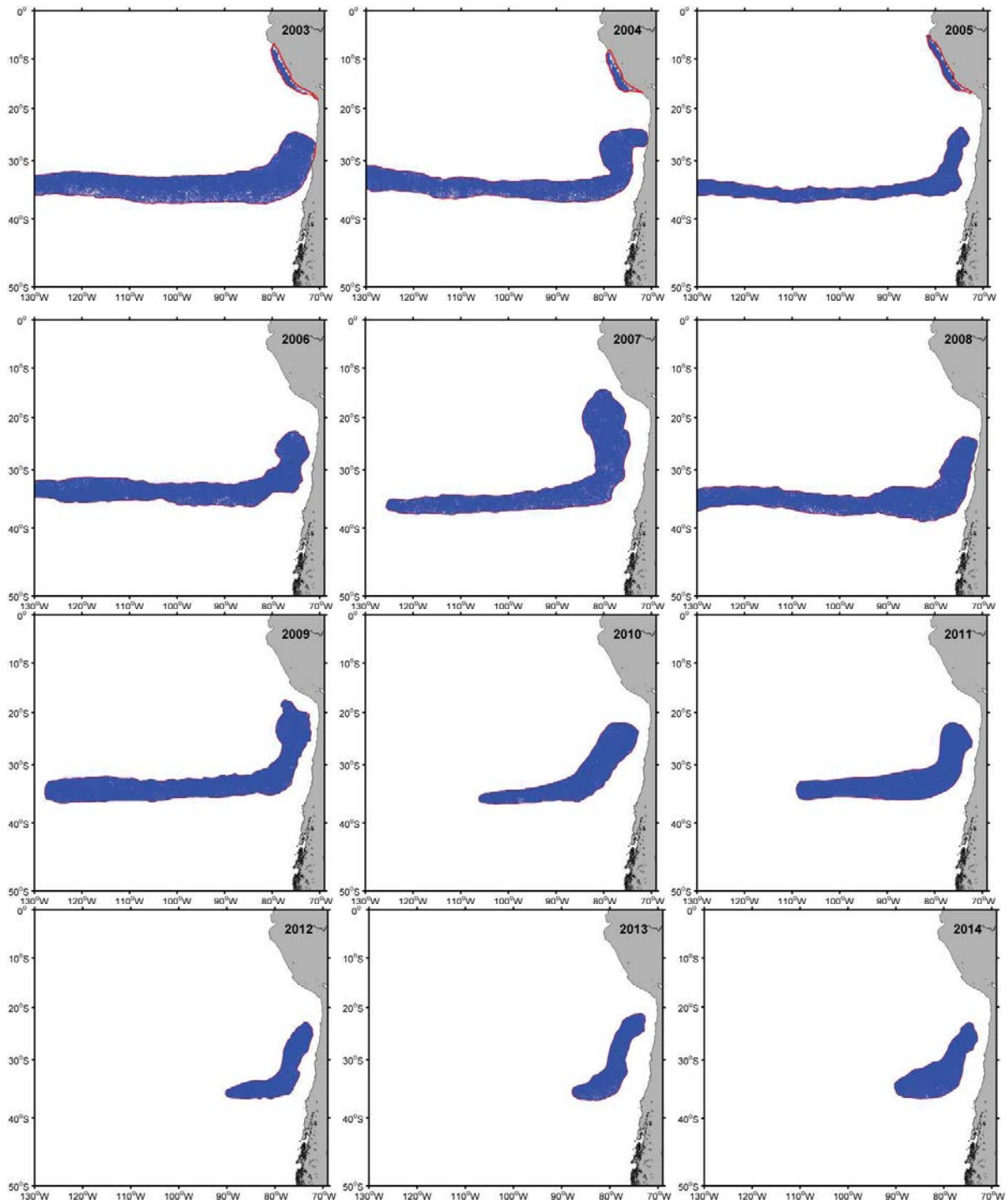


Figura 43 (cont...). Área de desove efectivo de jurel para el periodo 1994-2016, la cual se desprende de la modelación espacial, acotada por la distribución espacial anual del stock adulto de jurel.



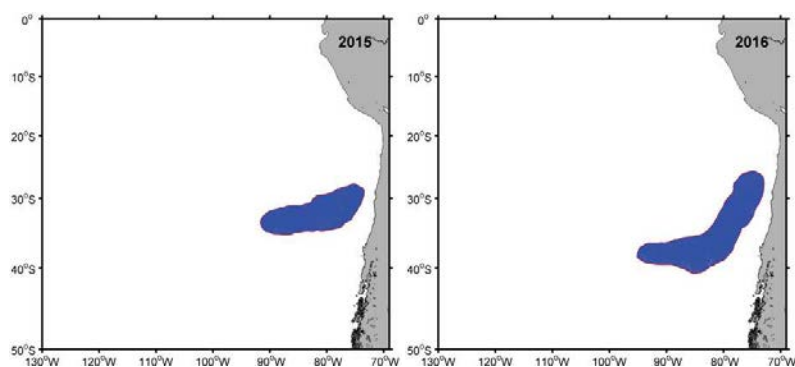


Figura 43 (cont...). Área de desove efectivo de jurel para el periodo 1994-2016, la cual se desprende de la modelación espacial, acotada por la distribución espacial anual del stock adulto de jurel.

Considerando, el área de desove efectiva que se obtiene acotando el área potencial obtenida por modelación mediante el análisis de la distribución anual del stock adulto, se inicializó un modelo biofísico que simula la dispersión de huevos y el movimiento de larvas y juveniles de jurel hasta los 4 meses de edad. De esta manera, por medio del acoplamiento del ROMS con los aspectos conocidos de la historia de vida temprana de jurel se modela la distribución de juveniles en una perspectiva interanual. La Figura 44 muestra la distribución modelada de juveniles de jurel donde el primer resultado relevante obtenido es el rasgo de continuidad espacial que esta manifiesta, no obstante algunos años (1994-2005, a excepción de 1997) el desove que inicializó el modelo manifestó sub-zonas separadas espacialmente (Figura 44). Excepcionalmente en algunos años se generan núcleos de menor densidad aislados espacialmente (e.g. 1999, 2003), sin embargo la segregación en parches es poco frecuente. De esta manera, el modelo establece que el sistema oceanográfico y el patrón de circulación no presentan discontinuidades que promuevan la formación de sub-áreas de distribución de juveniles de jurel, sugiriendo de esta manera que una vía principal de conectividad poblacional la establece la dispersión de estadios tempranos de desarrollo.

Por otra parte, el desarrollo del modelo biofísico permite analizar los patrones espaciales de conectividad, donde resalta que las vías de transporte son preferentemente noreste, generando una aproximación de larvas y post-larvas hacia la zona de transición costera, acercándose a las zonas de alimentación temprana y crianza, ubicadas principalmente en el área costera del norte de Chile y sur de Perú. Además, el modelo sugiere que en periodos de bajo tamaño poblacional donde el

área de desove se restringe espacialmente y las sub-zonas norte tienden a desaparecer, el área principal de desove se conecta vía transporte físico con las regiones norte de Chile y sur de Perú, funcionando como una fuente de posibles juveniles que se distribuyen luego en dichas regiones.

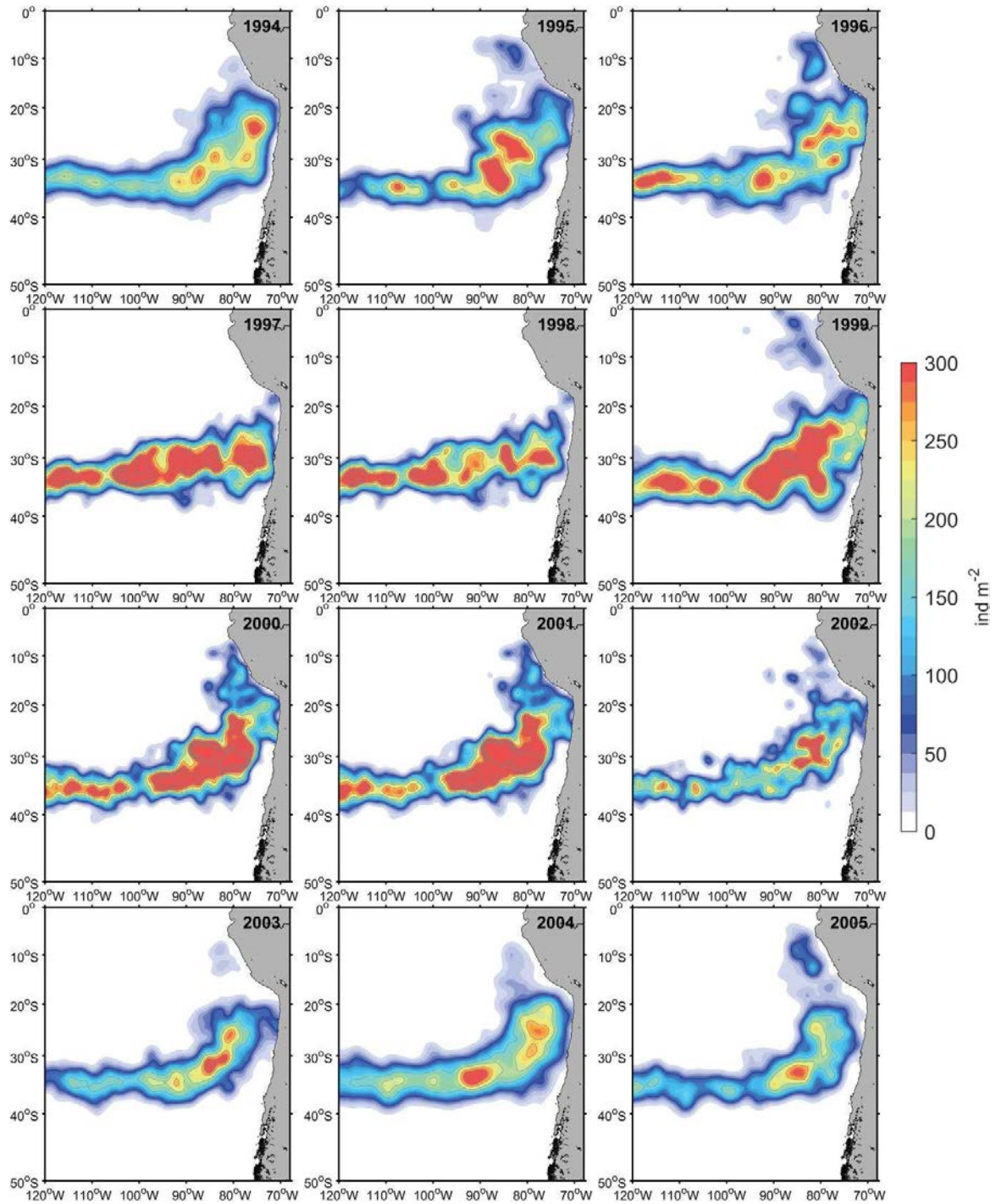


Figura 44. Distribución modelada de juveniles de jurel bajo una aproximación biofísica, periodo 1994-2015.

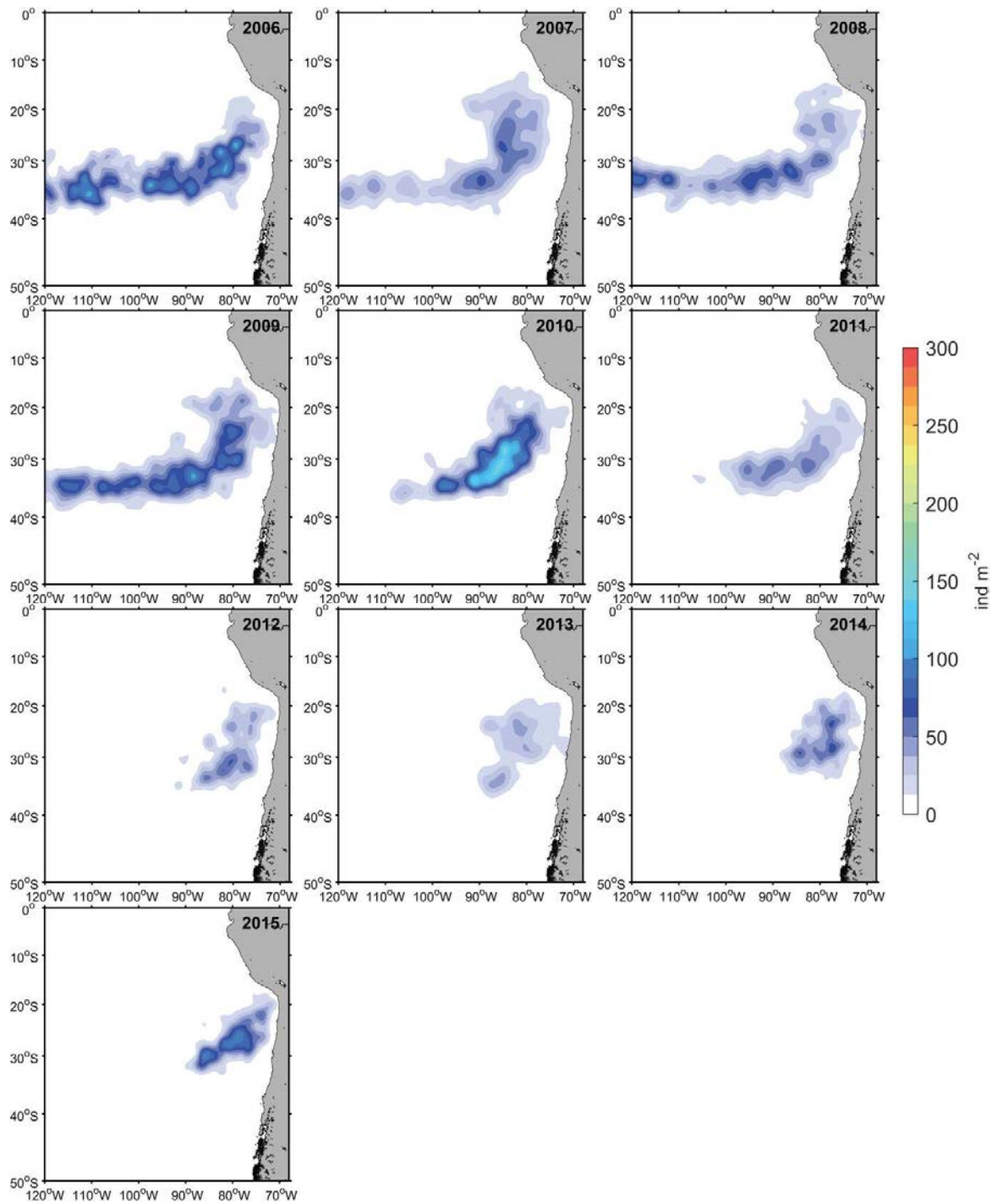


Figura 44 (cont...). Distribución modelada de juveniles de jurel bajo una aproximación biofísica, periodo 1994-2015.

### 6.3.2. Modelación biofísica de distribución de especies para jurel adulto

Se presenta la distribución espacio-temporal de las observaciones de jurel adulto en el Pacífico suroriental para analizar los cambios interanuales en la disponibilidad de jurel en el sector costero de Chile y Perú (Figura 45). Tres periodos son identificables: a) 2001-2003, donde se observó presencia de jurel de forma continua desde el centro-norte de Perú hasta la zona centro-sur de Chile; ii) 2004-2011, donde las observaciones en Perú se vuelven eventuales y la disponibilidad en la zona centro sur de Chile disminuye; y iii) 2012-2016, donde se mantienen bajos registros en Perú y aumenta la disponibilidad en la zona centro-sur de Chile.

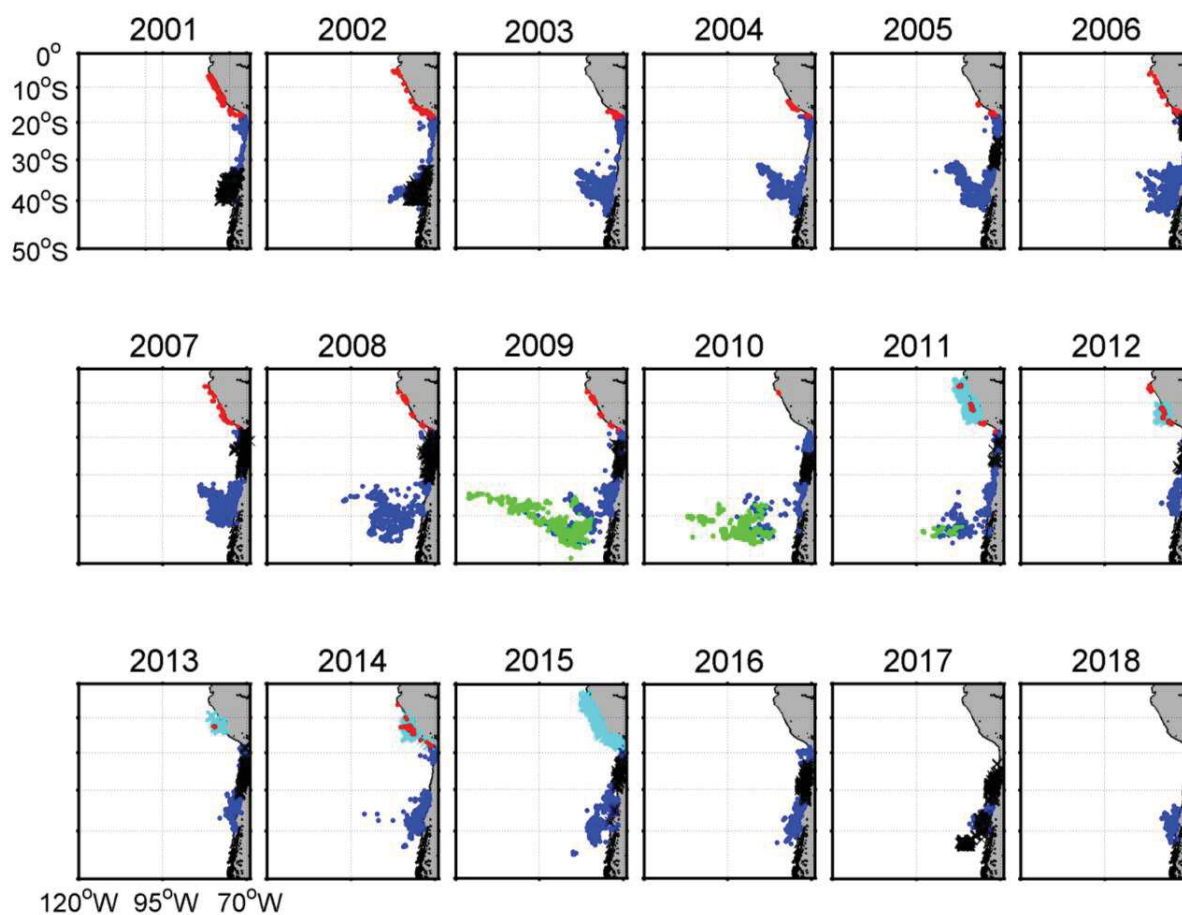


Figura 45. Distribución interanual de los registros de jurel adulto referenciado en tiempo y espacio para el periodo 2001-2018 (círculos azules: flota pesquera chilena; círculos verdes: flota pesquera internacional; círculos celestes: flota peruana; cruces negras: registros acústicos cruceros Chile; puntos rojos: registros acústicos cruceros Perú).

La primera etapa para el establecimiento de un modelo bayesiano jerárquico de distribución de especies es el establecimiento de la matriz de presencias y pseudo-ausencias asociadas a las variables predictoras medioambientales. La Tabla VII muestra los distintos predictores lineales considerados, los cuales incluyeron la máxima cantidad de variables reconocidas como críticas para la distribución de jurel a través de la revisión bibliográfica (ver punto 6.1). No obstante, la resolución temporal de las variables predictoras es diaria, en consideración de la naturaleza de los datos de ocurrencia de jurel en el extremo norte de distribución (Perú), las variables ambientales fueron llevadas a una resolución mensual tanto para la estimación como para la predicción. Para cada registro espacial, se obtuvo la variable predictora en la posición y mes correspondiente. Todas las variables fueron testeadas para correlación, co-linearidad, datos escapados y registros faltantes para ser utilizados en la modelación. Como es de esperar, el mayor nivel de correlación se observó entre la concentración de oxígeno y la presencia de zona mínima de oxígeno en los primeros 50 metros de profundidad ( $r = 0.69$ ;  $p\text{-value} < 0,001$ ), por lo que estas variables no pudieron ser incorporadas en un mismo modelo como predictores (Figura 46).

Tabla VII. Variables predictoras para modelar la ocurrencia de jurel en el Pacífico suroriental bajo un esquema de modelación jerárquica bayesiana.

| Acronimo | Variable                        | Unidad          | Resolución espacial | Resolución temporal |
|----------|---------------------------------|-----------------|---------------------|---------------------|
| SST      | Temperatura Superficial del Mar | °C              | 4 km                | Diaria              |
| SLA      | Anomalía Nivel del Mar          | m               | 20 km               | Diaria              |
| EKE      | Eddy Kinetic Energy             | $m^2 s^{-2}$    | 20 km               | Diaria              |
| CHL      | Concentración de clorofila      | $mg m^{-3}$     | 20 km               | Diaria              |
| OXI      | Oxígeno disuelto subsuperficial | $mmol m^{-3}$   | 20 km               | Diaria              |
| ZOO      | Densidad de zooplancton         | $mmol C m^{-3}$ | 20 km               | Diaria              |
| TUR      | Turbulencia producto de viento  | $m^3 s^{-3}$    | 25 km               | Diaria              |
| ZMO      | Presencia mínima oxígeno 50 m   | binaria: 1/0    | 20 km               | Diaria              |

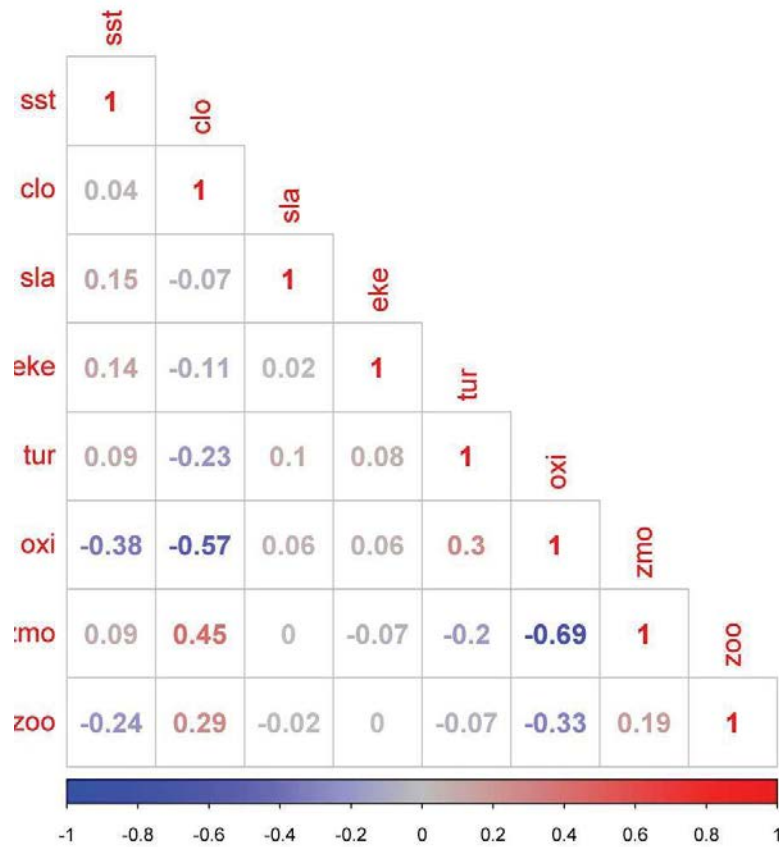


Figura 46. Correlación de Spearman entre las distintas variables predictoras consideradas para la modelación espacial de jurel en el Pacífico suroriental.

Así, con el fin de analizar el proceso de continuidad espacial en la distribución, determinar el hábitat preferente de jurel y verificar limitaciones estacionales e interanuales en el hábitat, se realizó una modelación de la presencia de jurel considerando todo el dominio modelado obteniéndose la probabilidad de observación de la especie y cuantificando la influencia de las distintas variables ensayadas en los cambios de distribución de la especie en el Pacífico suroriental mediante el modelo seleccionado. Los modelos para describir la distribución de jurel fueron ajustados (i.e. computo de la distribución posterior de los parámetros) utilizando la *Integrated Nested Laplace Approximation* (INLA) de acuerdo a (Rue *et al.*, 2009). Los sistemas de ecuaciones diferenciales para INLA fueron resueltas mediante la construcción de una grilla de triangulación Delaunay del área de estudio (Figura 47), la cual dentro de sus ventajas cuenta: i) mayor precisión de estimación y predicción al ser más densa en regiones con mayor cobertura de información; ii) eficiencia en el cómputo con menor cantidad de nodos de predicción; iii) evita

efectos de borde al tener menor resolución en áreas fuera del dominio deseado; iv) posterior a la predicción permite interpolación a grilla regular para fines gráficos. Luego se aplica el método de elementos finitos como es explicado en Bakka *et al.* (2019).

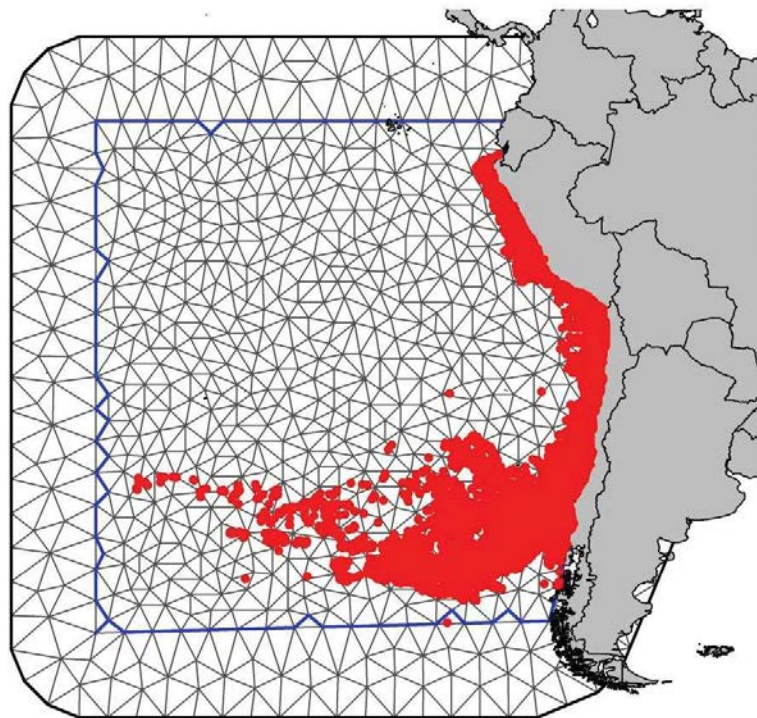


Figura 47. Área de estudio que incluye el total de las observaciones referenciadas en tiempo y espacio para jurel sobre grilla de modelación INLA donde son generadas las predicciones espacio-temporales.

De acuerdo a las combinaciones de variables posibles, se ensayaron 254 modelos, de los cuales la Tabla VIII muestra los 10 modelos que mostraron un mejor desempeño estadístico de acuerdo a los WAIC y LCPO. El modelo que mostró mejor comportamiento estadístico fue aquel que incluyó la temperatura superficial del mar, la clorofila, la presencia de zona mínima de oxígeno a los 50 metros de profundidad y la densidad de zooplancton a 10 metros de profundidad como predictores de la presencia de jurel en el Pacífico suroriental. Sin embargo, y por recomendación del experto asesor del proyecto Dr. Vincent Echevin, la variable densidad de zooplancton es una variable terminal del modelo ROMS-PISCES y al no tener consumo (i.e. organismos consumidores secundarios) su expresión espacial es sólo referencial y no es recomendable su



incorporación como variable predictora por lo que puede llevar a relaciones espurias. En consecuencia, se utilizará el segundo modelo seleccionado, que no incluyó esta variable (Tabla IX).

Tabla VIII. Comparación de los modelos más relevantes para la modelación jerárquica bayesiana de distribución de especies aplicada a jurel en el Pacífico suroriental. Acronimos: Watanabe Akaike Information Criterion (WAIC); Logarithmic Cross Validated Score (LCPO). Para acrónimos de variables predictoras ver Tabla VII.

| ID | Model  | WAIC            | LCPO        |
|----|--|-----------------|-------------|
| 1  | resp ~ beta0 + sst + clo + zmo + zoo             | 94504.98        | 0.42        |
| 2  | <b>resp ~ beta0 + sst + clo + zmo</b>            | <b>97942.98</b> | <b>0.44</b> |
| 3  | resp ~ beta0 + sst + tur + oxi                   | 98634.07        | 0.44        |
| 4  | resp ~ beta0 + clo + sla + oxi + zmo             | 98799.28        | 0.64        |
| 5  | resp ~ beta0 + sst + clo + tur + zmo             | 98816.01        | 0.61        |
| 6  | resp ~ -beta0 + clo + eke + oxi + zmo            | 98831.96        | 0.52        |
| 7  | resp ~ beta0 + sst + clo + eke + oxi + zmo + zoo | 98837.51        | 0.25        |
| 8  | resp ~ beta0 + sst + sla + tur + oxi + zoo       | 98838.17        | 0.25        |
| 9  | resp ~ beta0 + eke + tur + zmo + zoo             | 98844.13        | 0.67        |
| 10 | resp ~ beta0 + clo + tur + zmo + zoo             | 98845.77        | 0.70        |

Específicamente, los resultados del modelo 2 mostraron una relación negativa entre la SST (media posterior = -0.125; 95% IC = [-0.132, -0.1193]) y la probabilidad de ocurrencia de jurel. Por el contrario, la CLO (media posterior = 0.183; 95% IC = [0.176, 0.190]) y la ZMO (media posterior = 0.156; 95% IC = [0.133, 0.179]) mostraron una relación positiva respecto a la ocurrencia de jurel en el Pacífico suroriental (Tabla IX). La distribución marginal posterior para cada uno de los efectos fijos (variables predictoras) se muestra en la Figura 48.

Tabla IX. Resumen numérico de la distribución marginal posterior de los efectos fijos para el modelo seleccionado. Para cada variable se informan la media, la desviación estándar y el intervalo de 95% de credibilidad ( $Q_{0.025} - Q_{0.975}$ ) que contiene el 95% de probabilidad de acuerdo a la distribución posterior.

| Model                                      | Variable | Mean    | SD     | $Q_{0.025}$ | $Q_{0.975}$ |
|--|----------|---------|--------|-------------|-------------|
| <b>resp ~ -1 + beta0 + sst + clo + zmo</b> | SST      | -0.1254 | 0.0031 | -0.1315     | -0.1193     |
|  | CLO      | 0.1833  | 0.0036 | 0.1763      | 0.1903      |
|  | ZMO      | 0.156   | 0.0116 | 0.1333      | 0.1786      |

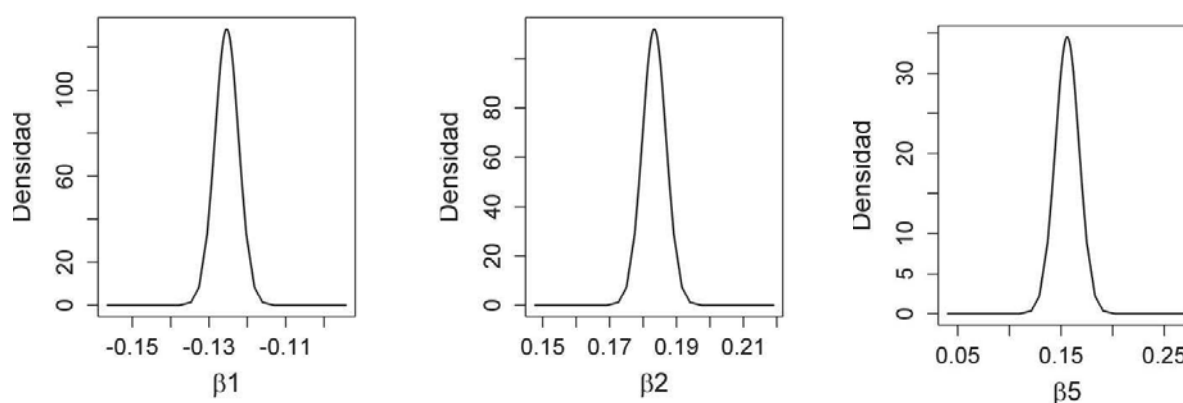


Figura 48. Distribución marginal posterior para los efectos fijos del modelo bayesiano jerárquico para ocurrencia de jurel en el Pacífico suroriental: temperatura superficial del mar ( $\beta_1$ ), concentración de clorofila ( $\beta_2$ ) y presencia de mínima de oxígeno ( $\beta_5$ ).

Para cada uno de los sets de datos utilizados para fines de modelación (flota pesquera Chile centro-norte, Chile centro-sur, Perú y flota internacional; cruceros acústicos Chile y Perú) se presenta en la Tabla X la distribución de los estimados de la temperatura superficial del mar, la concentración de clorofila y la concentración de oxígeno a 50 metros de profundidad. Las aguas más cálidas del hábitat de jurel fueron registradas para la flota pesquera que opera en Perú con un rango entre 15.0° y 27.8°C. La flota pesquera de Chile centro-norte presentó un rango entre 14.0° y 25.1° C, mientras que la flota centro-sur de Chile varió entre 9.8° y 21.3°C y finalmente la flota internacional que opera en altamar mostró un rango entre 9.1° y 15.3°C, evidenciando un gradiente norte-sur en las condiciones del hábitat y un rango térmico de presencia de jurel entre 9° y 28°C. En el caso de la concentración de clorofila-a en registros de Perú, esta varió entre 0.12

mg m<sup>-3</sup> y 29.3 mg m<sup>-3</sup>, mientras que el mayor rango se obtuvo para la flota de Chile centro-sur entre 0.07 mg m<sup>-3</sup> y 38.4 mg m<sup>-3</sup> con mayores niveles registrados en los núcleos de surgencia en el extremo costero. Los registros obtenidos para la flota de arrastre de media-agua de la flota europea que opera en altamar se distribuyeron en aguas menos productivas con presencia de jurel entre 0.08 mg m<sup>-3</sup> y 0.36 mg m<sup>-3</sup>. Finalmente, en este esquema de modelación se abordó la presencia de mínima de oxígeno a los 50 metros de profundidad (Oxi<sub>50m</sub>) provisto por ROMS-PISCES para probar hipótesis de limitación vertical de la distribución producto de ambientes poco oxigenados. En este contexto, los registros de jurel en Perú (capturas y registros acústicos) evidenciaron un amplio rango de distribución de Oxi<sub>50m</sub> con cuantiles de distribución de 2.5% de 67.7 μmol L<sup>-1</sup> y 69.0 μmol L<sup>-1</sup> para capturas y cruceros respectivamente, sugiriendo la presencia habitual de jurel en aguas de zona de mínima de oxígeno somera. Esta situación fue similar para los registros de la zona centro-norte de Chile donde se observó un cuartil del 2.5% de 68.7 μmol L<sup>-1</sup>. En la flota Chile centro-sur, no obstante se observó un mínimo de Oxi<sub>50m</sub> de concentraciones mínimas de oxígeno, el cuartil de 2.5% fue de 240.2 μmol L<sup>-1</sup> sugiriendo que en esta zona el jurel se distribuye mayoritariamente en aguas con una columna de agua mas oxigenadas, al igual que lo registrado para la flota pesquera internacional que opera en altamar donde el cuartil 2,5% fue de 270.3 μmol L<sup>-1</sup>.

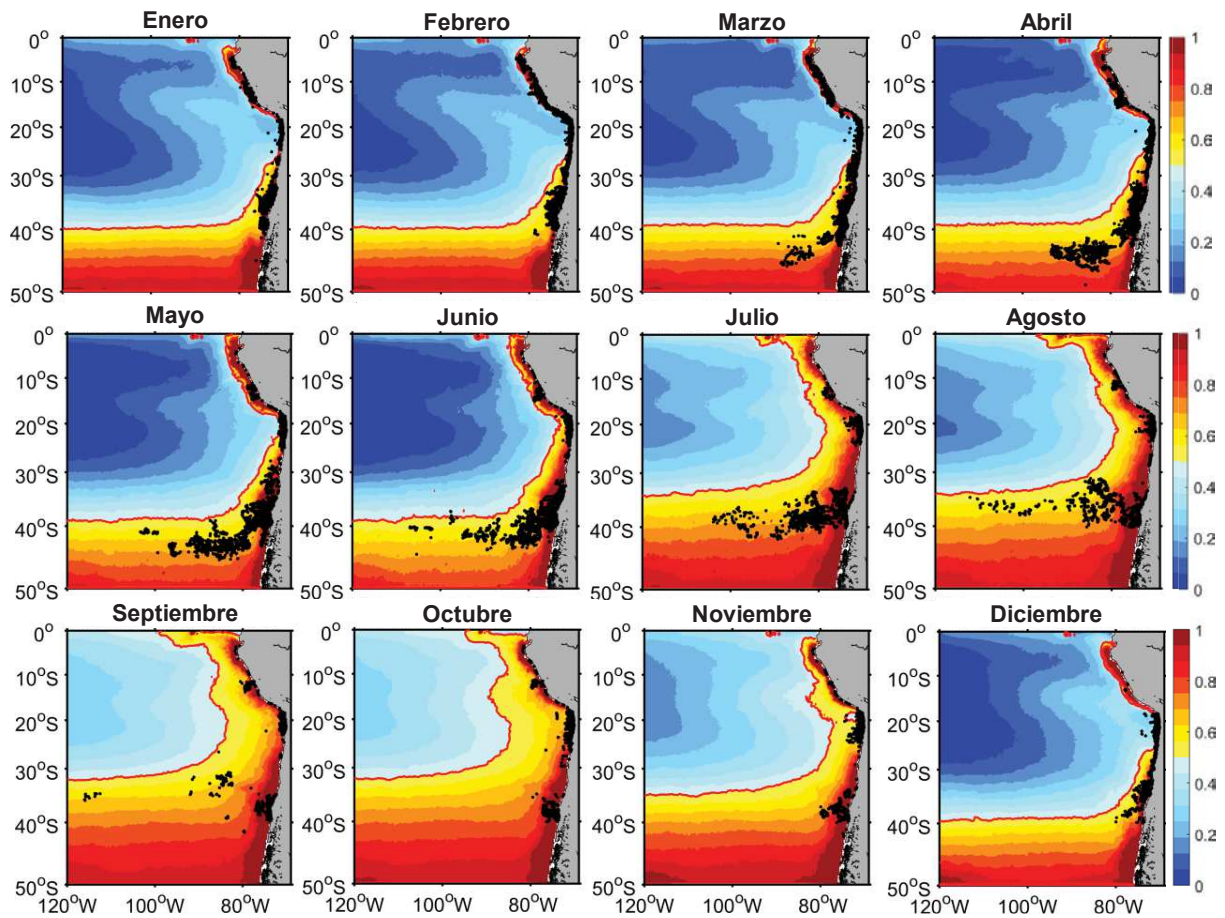


Figura 49. Climatología de la probabilidad media posterior para la ocurrencia de jurel en el Pacífico suroriental basada en modelación jerárquica bayesiana mediante INLA. Datos de las observaciones se indican en puntos negros.

De acuerdo a esta descripción, se configura la distribución de jurel en un amplio rango de condiciones ambientales, las que van desde: i) aguas cálidas y productivas en su extremo norte de distribución, donde además es común obtener registros de jurel bajo una columna de agua con niveles de oxígeno de mínima de oxígeno a los 50 metros de profundidad, y; ii) aguas de baja productividad, menor temperatura y niveles de oxígeno altos en los primeros 50 metros de la columna de agua; característicos de la región de altamar frente a Chile centro-sur. Así, este análisis sugiere un rango de distribución de jurel entre 9° y 28°C, incursión en aguas con columna de agua oxigenada menor a 50 metros en su extremo norte de distribución (costa del norte de Chile y Perú) y límites inferiores de clorofila de  $\sim 0.07 \text{ mg m}^{-3}$  característicos de aguas oligotróficas descritas para los giros oceánicos subtropicales (Polovina *et al.*, 2008). Estos

resultados evidencian la plasticidad fisiológica de jurel frente a las condiciones ambientales, con áreas de distribución con mayor ocurrencia en centros activos de surgencia (zonas de alimentación) y posibilidades de extensión hacia aguas oceánicas de menor productividad y menor temperatura (i.e. zona de desove).

Tabla X. Temperatura superficial del mar, concentración de clorofila y concentración de oxígeno a 50 metros de profundidad estimados para cada fuente de información utilizada para la modelación de distribución de especies aplicada a jurel.

| Zona    | Dataset/parametro                         | TSM [°C] |      |       |      | CLO [mg m <sup>-3</sup> ] |      |       |      | OXI <sub>50m</sub> [umol L <sup>-1</sup> ] |       |       |       |
|---------|---|----------|------|-------|------|---------------------------|------|-------|------|--|-------|-------|-------|
|         |   | Min      | 2.5% | 97.5% | Max  | Min                       | 2.5% | 97.5% | Max  | Min  | 2.5%  | 97.5% | Max   |
| Perú    | Flota pesquera Perú 2011-2015             | 15.0     | 19.2 | 24.2  | 27.8 | 0.12                      | 0.8  | 8.2   | 29.3 | 2.3  | 67.7  | 254.8 | 282.9 |
|         | Cruceros de evaluación acústica 2001-2014 | 18.9     | 21.7 | 25.1  | 25.7 | 0.18                      | 0.8  | 12.2  | 19.6 | 1.0  | 69.0  | 271.3 | 283.1 |
| Chile   | Flota pesquera centro-norte 2001-2017     | 14.0     | 17.6 | 22.8  | 25.1 | 0.12                      | 0.5  | 7.9   | 25.9 | 1.1  | 68.7  | 249.7 | 293.2 |
|         | Flota pesquera centro-sur 2001-2017       | 9.8      | 13.1 | 18.5  | 21.3 | 0.07                      | 0.2  | 3.1   | 38.4 | 17.0                                       | 240.2 | 295.8 | 311.8 |
|         | Cruceros de evaluación acústica 2001-2017 | 9.7      | 13.2 | 21.3  | 23.4 | 0.11                      | 0.3  | 9.2   | 31.8 | 0.0  | 131.4 | 283.4 | 295.5 |
| Altamar | Flota pesquera internacional 2009-2011    | 9.1      | 11.7 | 14.6  | 15.3 | 0.08                      | 0.11 | 0.16  | 0.36 | 254.9                                      | 270.3 | 306.4 | 311.5 |

Una vez que el proceso de inferencia fue realizado, se abordó la predicción de la probabilidad mensual de presencia de jurel en el área de estudio mediante el uso de *kriging* bayesiano (Muñoz et al., 2013). Los valores de temperatura superficial del mar, concentración de clorofila y la presencia/ausencia de mínima de oxígeno ( $45 \mu\text{mol L}^{-1}$ ) a los 50 metros de profundidad para el periodo 2001-2017 fueron utilizados como inputs de predicción en INLA para así inferir los cambios en el hábitat potencial de jurel en el Pacífico suroriental. La predicción estacional muestra patrones espaciales claros a lo largo del área de estudio (Figura 49): i) el mayor volumen de hábitat favorable para jurel se ubica al sur de  $30^{\circ}\text{S}$  extendiéndose desde la costa hacia el océano abierto; ii) el límite norte del hábitat favorable en la región oceánica ( $>85^{\circ}\text{W}$ ) frente a Chile central varía estacionalmente de norte a sur alcanzando su mayor extensión sur durante el verano; iii) zonalmente, el patrón estacional muestra una contracción hacia la costa del hábitat favorable en el verano y otoño (diciembre-abril) y una máxima expansión durante invierno y primavera (junio-noviembre); iv) dicha contracción zonal ocurre en el sector costero entre  $18^{\circ}$  y  $22^{\circ}\text{S}$  limitando el hábitat favorable a una banda más estrecha de aproximadamente 150 km de extensión costa afuera donde se registra jurel (Figura 50)

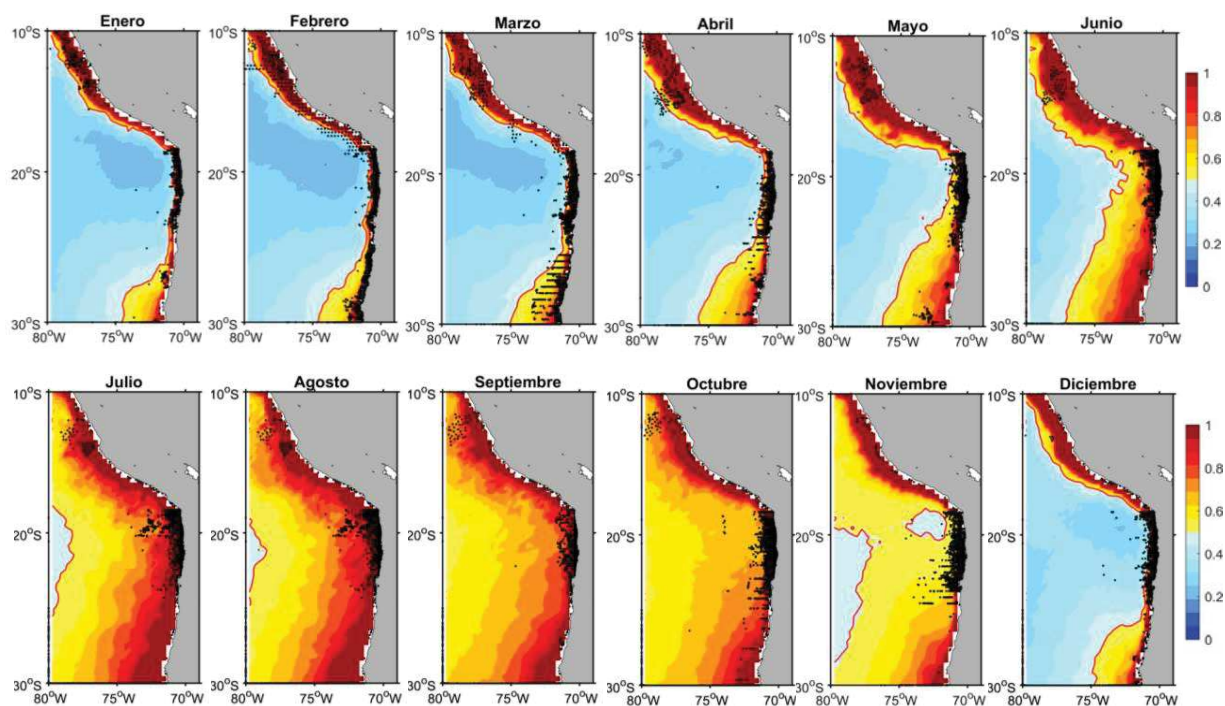


Figura 50. Detalle para el sector costero de Perú y el centro-norte de Chile de la climatología de la probabilidad media posterior para la ocurrencia de jurel en el Pacífico suroriental basada en modelación jerárquica bayesiana mediante INLA. Datos de las observaciones se indican en puntos negros.

Con el objetivo de analizar la distribución de jurel incorporando la correlación espacial de los datos, se utilizó información de la temporada de pesca 2009 donde se contó con información de todas las flotas involucradas en la captura de jurel (ver Figura 45) cubriendo una amplia zona del Pacífico suroriental (Figura 51).

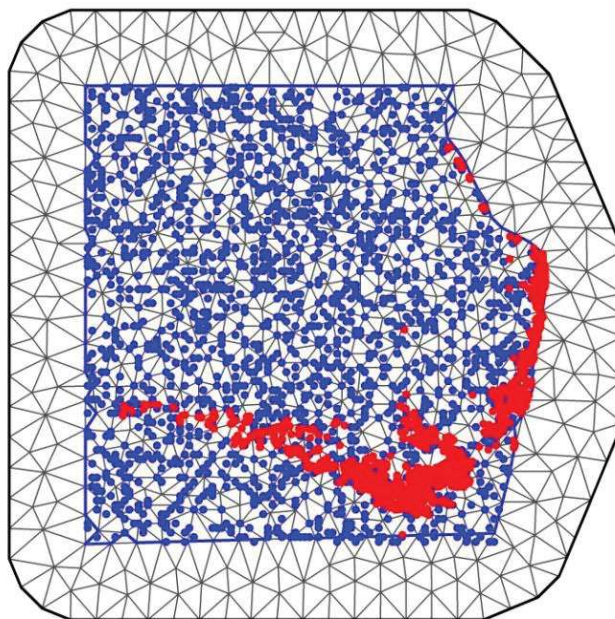


Figura 51. Mapa del área de estudio con las capturas de jurel para el año 2009. Grilla de triangulación Delaunay utilizada para el cálculo del campo aleatorio Gaussiano de Markov para la aproximación SPDE. Las observaciones (presencias) se muestran en rojo y la pseudo-ausencias en azul.

Al igual que en la aproximación anterior, todos los modelos resultantes de la combinación de las covariables fueron ajustados y comparados. El WAIC fue utilizado como una medida de la bondad de ajuste mientras el LCPO como una medida de la calidad predictiva de los modelos. Como se muestra en la Tabla XI y en la Figura 52, ambas medidas son concordantes en la selección del modelo, con razonable calidad predictiva. En particular la comparación de modelos indica que (además del efecto espacial incorporado) la temperatura superficial del mar, la concentración de clorofila, la turbulencia inducida por el viento, (TIV) la presencia de mínima de oxígeno (menor significancia estadística) juegan un rol determinante hacia la distribución de jurel. Estos resultados son concordantes con el esquema de modelación que incluyó todos los datos sin incluir el efecto espacial, sin embargo se agrega la TIV como variable relevante, lo que no fue detectado en dicho esquema.

Tabla XI. Comparación de los modelos más relevantes para la modelación jerárquica bayesiana de distribución de especies aplicada a jurel en el Pacífico suroriental. Acrónimos: Watanabe Akaike Information Criterion (WAIC); Logarithmic Cross Validated Score (LCPO). W=efecto espacial. Para acrónimos de variables predictoras ver Tabla VII.

| ID | Model                                   | WAIC       | LCPO       |
|----|---|------------|------------|
| 1  | beta0 + sst + clo + tur + zmo + W       | 1876.02996 | 0.56423327 |
| 2  | beta0 + sst + clo + tur + W             | 1876.10477 | 0.55674368 |
| 3  | beta0 + sst + clo + eke + tur + W       | 1876.42977 | 0.53756811 |
| 4  | beta0 + sst + clo + eke + tur + zmo + W | 1878.62428 | 0.54303407 |
| 5  | beta0 + sst + tur + zmo + W             | 1883.76859 | 0.6119793  |
| 6  | beta0 + sst + eke + tur + zmo + W       | 1886.46385 | 0.61817065 |
| 7  | beta0 + sst + tur + W                   | 1896.30608 | 0.71220925 |
| 8  | beta0 + clo + tur + W                   | 1896.82713 | 0.48600369 |
| 9  | beta0 + sst + eke + tur + W             | 1899.20714 | 0.71779017 |
| 10 | beta0 + clo + eke + tur + W             | 1899.50565 | 0.49008257 |

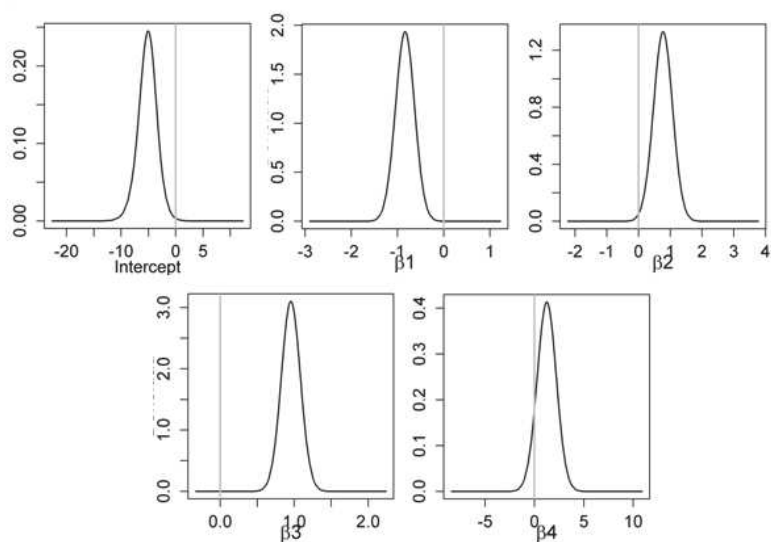


Figura 52. Distribución de los efectos fijos para el modelo jerarquico bayesiano de distribución de especies para jurel:  $\beta_1$ = temperature superficial del mar;  $\beta_2$ =concentración de clorofila-a;  $\beta_3$ =turbulencia inducida por el viento, and;  $\beta_4$ = presencia de concentración mínima de oxígeno (50 m).



Como se evidencia en la Tabla XI y en la Figura 52, la mayoría de las covariables tiene una influencia significativa como forzantes de la distribución de jurel. La Tabla XII muestra el resumen numérico de la distribución posterior de los efectos fijos mostrados en la Figura 52. Estos resultados re-afirman que la temperatura superficial del mar afecta negativamente sobre la distribución de la especie, mientras que la concentración de clorofila-a, la turbulencia inducida por el viento y la presencia de concentración mínima de oxígeno presentan un efecto positivo. Estos resultados indican que la ocurrencia de jurel fue mayor en aguas costeras y de transición costa-océano debido a la presencia de centros productivos de surgencia donde se presentan aguas más frías y con mayor concentración de clorofila en comparación con aguas de altamar. Como se ha señalado, la presencia de jurel es mayor en zonas donde la mínima de oxígeno está presente de forma frecuente en los 50 metros de profundidad, lo que está asociado a la presencia de aguas ecuatoriales subsuperficiales en el sector costero desde Perú a Chile central. Esto último sugiere que una columna de agua oxigenada de 50 metros es apropiada para la ocurrencia de jurel y que, de existir una limitación del hábitat respecto a esta variable, deberá ser a profundidades aún más someras.

Tabla XII. Resumen numérico de la distribución marginal posterior de los efectos fijos y del efecto aleatorio del campo espacial para el modelo seleccionado para la temporada de pesca 2009. Para cada variable se informan la media, la desviación estándar y el intervalo de 95% de credibilidad ( $Q_{0.025} - Q_{0.975}$ ) que contiene el 95% de probabilidad de acuerdo a la distribución posterior.

|                        | Mean  | SD   | $Q_{0.025}$ | $Q_{0.5}$ | $Q_{0.975}$ |
|------------------------|-------|------|-------------|-----------|-------------|
| <i>Parameters</i>      |       |      |             |           |             |
| beta0                  | -5.16 | 1.75 | -8.76       | -5.13     | -1.78       |
| sst                    | -0.84 | 0.21 | -1.24       | -0.84     | -0.43       |
| clo                    | 0.77  | 0.30 | 0.18        | 0.77      | 1.36        |
| tur                    | 0.96  | 0.13 | 0.70        | 0.95      | 1.21        |
| zmo                    | 1.24  | 0.96 | -0.65       | 1.25      | 3.14        |
| <i>Hyperparameters</i> |       |      |             |           |             |
| $r$                    | 13.69 | 2.17 | 9.96        | 13.51     | 18.48       |
| $\sigma$               | 5.37  | 0.62 | 4.28        | 5.33      | 6.69        |

La Figura 53 muestra el efecto espacial que indica la variabilidad intrínseca de la distribución de jurel, excluyendo las variables ambientales. Este componente muestra un efecto fuerte al incorporar información desde las múltiples flotas que operan sobre jurel, con efecto positivos desde la costa norte de Perú (~8°S) hasta la costa del sur de Chile (~41°S) extendiéndose hacia altamar en una banda que alcanzó los 115°W centrada en 40°S. Los valores más altos se obtuvieron para la región del sur de Perú y el norte de Chile, además de la zona oceánica frente a Chile centro-sur donde opera la flota industrial chilena, además de la flota internacional de altamar. Además, este análisis indica que el rango medio del efecto espacial del área normal ( $r$ ) estuvo en torno a los 13 grados geográficos, resultando un amplio campo de correlación espacial de las observaciones para la ocurrencia de jurel (Tabla XII). El significado físico de este valor es que los registros de jurel que se encuentran a dicha distancia o superior no están espacialmente correlacionados.

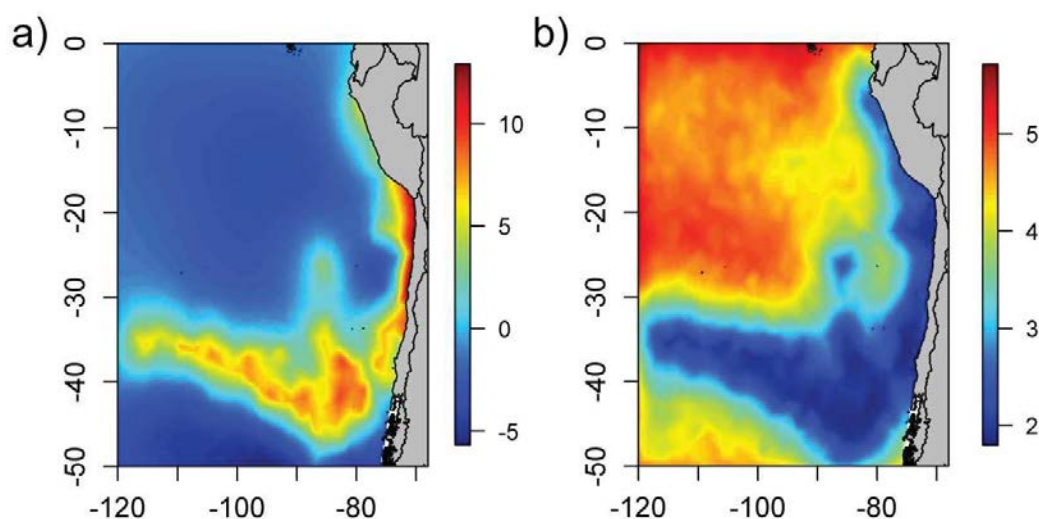


Figura 53. a) Media y b) desviación estándar para la distribución posterior del efecto espacial ( $W$ ) para la distribución de jurel bajo un esquema de modelación jerárquica bayesiana.

Así, el campo de predicción espacial para la ocurrencia de jurel utilizando datos conjuntos multi-flota de captura muestra una alta agregación y continuidad de los focos de distribución. Una banda costera angosta se observa entre 8°S y 30°S donde la probabilidad de ocurrencia de jurel cae abruptamente costa-afuera en respuesta a aguas más cálidas y menos productivas en la región oceánica. Luego, en torno a los 40°S se observa una extensión costa afuera del área de alta

probabilidad de ocurrencia de jurel, lo que está estrechamente ligado a la extensión costa afuera del hábitat favorable propuesto por el modelo de predicción-hábitat basada (ver Figura 40). En esta región, una pequeña discontinuidad se obtiene en los 79°W, no obstante la probabilidad de ocurrencia se extiende hacia una vasta región frente a Chile centro-sur (Figura 54a). El mapa de desviación estándar (Figura 54b) muestra valores muy bajos en las áreas donde los datos han sido colectados, mientras que el error incrementa hacia los bordes y fuera del dominio modelado. Finalmente, uno de los resultados más importantes es la continuidad en el área de probabilidad de alta ocurrencia de jurel (rango estimado alto) mediante la incorporación de información proveniente de todas las flotas que operan sobre jurel en un procedimiento de modelación espacial. Esto último reafirma la necesidad de avanzar en el uso de bases de datos conjuntas para estudiar la estructura espacial de la población de jurel en el Pacífico suroriental y su relación con la variabilidad del hábitat, lo que ha realizado en este proyecto con esfuerzos múltiples por establecer una base de datos global para jurel.

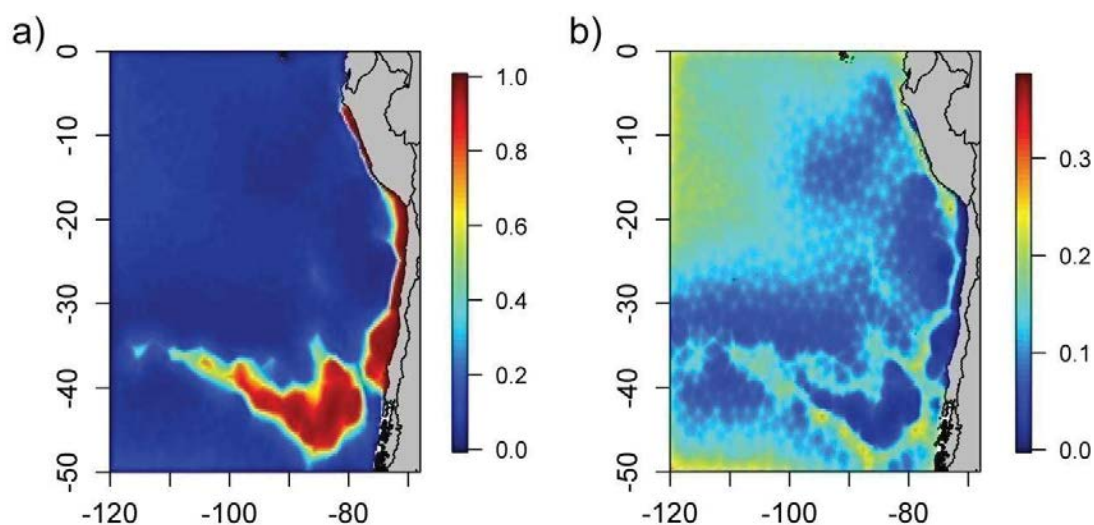


Figura 54. a) Media y b) desviación estándar posterior para la distribución de probabilidad predictiva de la presencia de jurel en el Pacífico suroriental.

**6.4. Objetivo específico 4. Definir escenarios de simulación con un forzamiento variable del ambiente de acuerdo a 4.1. (remolinos, corrientes, temperatura, oxígeno, nutrientes, disponibilidad de alimento entre otros) para evaluar la modulación del proceso de transporte y sobrevivencia de juveniles y adultos de jurel.**

Uno de los objetivos de este estudio es la definición de escenarios de simulación de la distribución espacial de jurel en sus distintas etapas bajo la consideración de una hipótesis de estructura poblacional hábitat basada. De esta manera, dicho objetivo debe explorar explícitamente la relación escenarios-tipo de hábitat-estructura poblacional considerando la variabilidad temporal y espacial de las condiciones del hábitat. De esta forma, las simulaciones de modelación biofísica-biogeoquímica deben reproducir las distintas fuentes de variabilidad, por lo que la modelación es de naturaleza interanual y ha manifestado su habilidad para reproducir la ocurrencia de eventos ambientalmente variables (ver punto 6.2.2.). Uno de los principales moduladores de la variabilidad espacio-temporal del Pacífico suroriental es el El Niño Oscilación del Sur (ENOS), el cual a través de teleconexiones puede modificar las condiciones oceanográficas en distintas escalas. En la serie de tiempo consideradas por este estudio (1994-2017) se han apreciado al menos cuatro periodos que constituyen escenarios alternantes en la variabilidad ENSO (Figura 55a): el primero es el evento de fase positiva (El Niño) del año 1997-1998, el cual estuvo seguido por un evento compensatorio de fase negativa (La Niña) que se desarrolló entre el año 1998 y 1999. Posteriormente y después de un período alternante entre fases positivas y negativas de baja amplitud, se registró un evento La Niña durante 2007, la que se replicó en intensidad durante 2010 y 2011. Finalmente, a partir de 2015 y hasta 2016 se registró uno de los eventos El Niño más extremos de las últimas décadas tanto en intensidad como en extensión temporal en la región ecuatorial.

Las Figuras 55b y 55c muestra la variabilidad de la temperatura superficial del mar en el Pacífico suroriental desde una perspectiva espacio-temporal, donde se observa la respuesta del ecosistema a lo largo del Pacífico suroriental frente a los eventos extremos identificados, los cuales a través de tele-conexión atmosférica y oceanográfica modula las anomalías térmicas. El primer evento identificado en fase positiva, El Niño 1997-1998, se caracterizó por un marcado calentamiento ocurrido en la región ecuatorial la cual se propagó a través de toda la región costera de

Sudamérica impactando al ecosistema de Humboldt desde el Ecuador hasta el sur de Chile. La Figura 55b muestra la serie espacio-temporal de la TSM evidenciando el gradiente térmico desde el Ecuador al polo y la marcada estacionalidad de esta variable, la cual durante el Niño 1997-1998 se interrumpe presentando anomalías positivas durante un periodo pronunciado. Esta situación fue distinta a lo observado en El Niño 2015-2016 donde en la región ecuatorial (Niño 3-2) se observó una anomalía térmica mayor ( $> 2^{\circ}\text{C}$ ), la cual no se propagó con esta intensidad hacia el sur, manteniéndose además la estacionalidad del proceso. Estas situaciones se observan con claridad en la Figura 55c donde se muestran las anomalías térmicas (remoción del ciclo estacional) y se identifica que durante 1997-1998 anomalías por sobre  $2^{\circ}\text{C}$  se observan a lo largo de toda la costa sudamericana que se mantuvieron por un prolongado periodo de tiempo ( $\sim 18$  meses). Por otro lado, la fuerte anomalía positiva registrada en el Ecuador durante El Niño 2015-2016 mostró un fuerte efecto hasta  $\sim 15^{\circ}\text{S}$  con anomalías en torno a  $1,5^{\circ}\text{C}$  atenuándose su efecto hacia el sur manteniendo anomalías cálidas durante un período prolongado, pero con una amplitud menor que en 1997-1998. En contraste, períodos caracterizados por fases negativas de ENOS (La Niña) se identificaron entre 1999 y 2001, identificándose anomalías negativas en gran parte del pacífico suroriental, situación similar a lo observado en el año 2011 y en particular durante 2007 donde se observa un marcado enfriamiento (anomalías  $< -1^{\circ}\text{C}$ ) en toda la banda costera del continente sudamericano (Figura 55c).

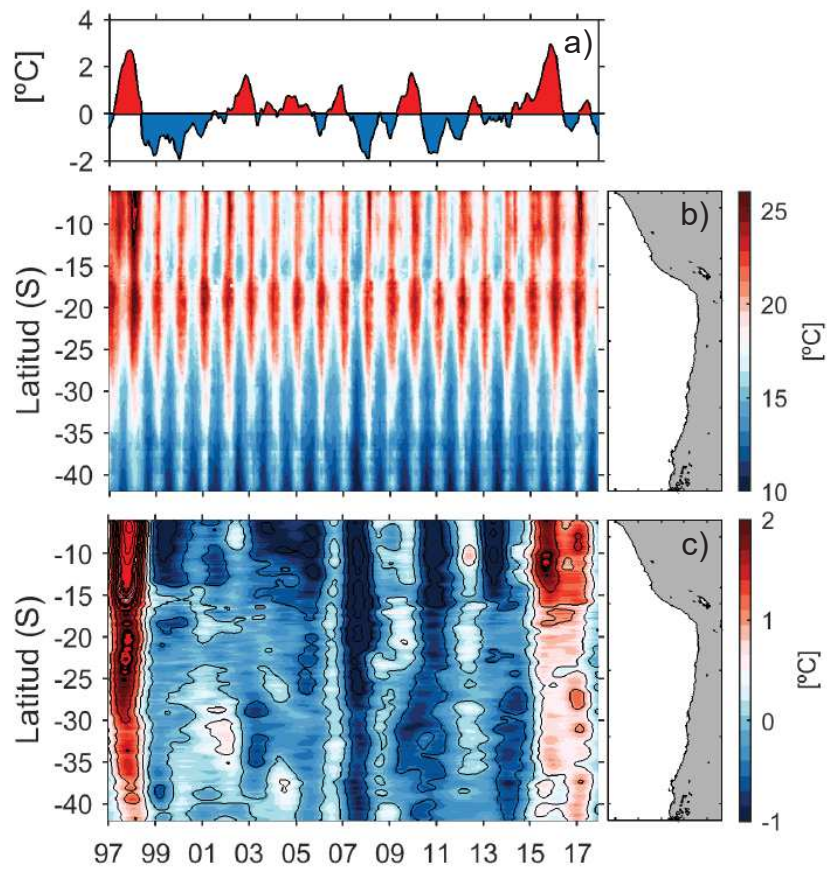


Figura 55. a) serie del índice de El Niño oscilación del sur en la región ecuatorial 3-4 para el período 1997-2017; b) diagrama espacio-tiempo de la temperatura superficial del mar en la banda de los primeros 100 km de la costa; c) diagrama-espacio tiempo interanual de la temperatura superficial del mar.

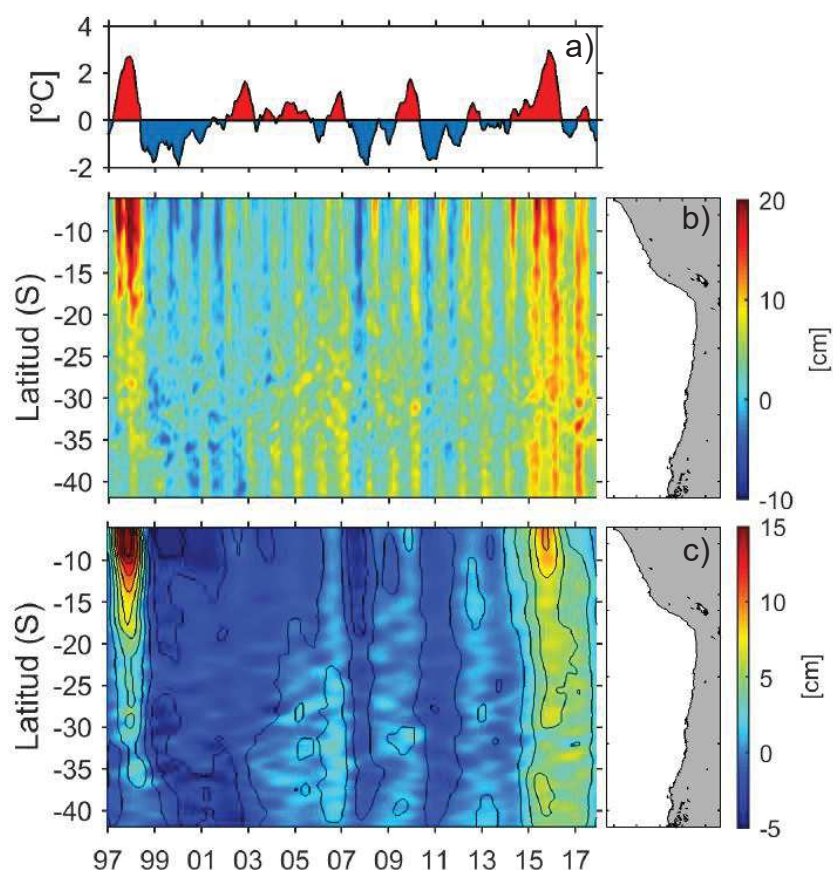


Figura 56. a) serie del índice de El Niño oscilación del sur en la región ecuatorial 3-4 para el período 1997-2017; b) diagrama espacio-tiempo de la anomalía del nivel del mar en la banda de los primeros 100 km de la costa; c) diagrama-espacio tiempo interanual de la anomalía del nivel del mar.

La Figura 56 evidencia los cambios en una variable dinámica, la anomalía del nivel del mar, durante los eventos extremos identificados. De forma similar a lo ya descrito para la TSM, las anomalías del nivel del mar evidenciaron alturas significativamente mayores durante los eventos ENSO positivos. Mientras que durante El Niño 1997-1998 las anomalías del nivel de mar superaron los 15 cm de amplitud en la región ecuatorial, como respuestas a las ondas generadas en el ecuador que se propagan hacia la costa sudamericana y hacia el sur durante estos eventos, el evento 2015-2016 mostró anomalías menos amplias, pero con mayor duración provocando alturas entre 5 – 10 cm a lo largo de todo el continente las cuales se extendieron hasta avanzado el año 2017. Por otra parte, durante los eventos La Niña se observan anomalía negativas que

modificaron todo el sistema costero, pero con amplitudes menores a las apreciadas en fase positiva (Figura 56c).

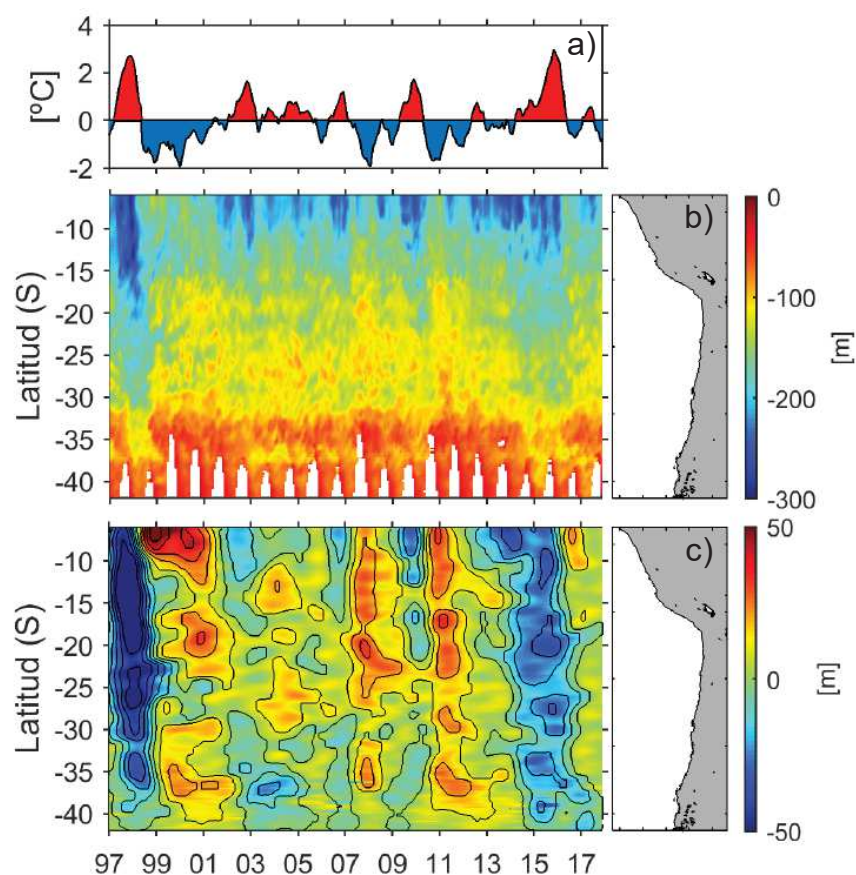


Figura 57. a) serie del índice de El Niño oscilación del sur en la región ecuatorial 3-4 para el período 1997-2017; b) diagrama espacio-tiempo de la profundidad de la termoclina en la banda de los primeros 100 km de la costa; c) diagrama-espacio tiempo interanual de la profundidad de la termoclina.

Una de las ventajas de la implementación de un modelo hidrodinámico y biogeoquímico de gran escala para el estudio de la variabilidad del hábitat de jurel en el Pacífico suroriental, es la posibilidad de analizar el sistema desde un punto de vista tridimensional. La Figura 57 muestra una aproximación para identificar la profundidad de la termoclina (isoterma de 10°C) desde una perspectiva interanual. En este análisis, evidencia que los aspectos descritos en la capa superficial tienen impactos que se extienden en toda la columna de agua, mostrando una notable profundización de la termoclina durante los eventos ENOS en fase positiva y siguiendo la



tendencia observada en las variables previamente descritas: un evento de mayor intensidad y menos duración que se extendió en todo el dominio analizado durante 1997-1998 y un evento de mayor duración y menor amplitud durante 2015-2016. En los años con eventos ENOS fase negativa o La Niña, se observa una distribución más somera de la termoclina lo que fue claramente identificable en los años 1999, 2007 y 2011 lo que es una respuesta sistémica de los forzantes atmosféricos y oceanográficos contrastantes, dentro de los cuales destacan la propagación de ondas que profundizan la termoclina y una mayor acción atmosféricas que puede aumentar la acción de la surgencia durante eventos La Niña (Figura 57c).

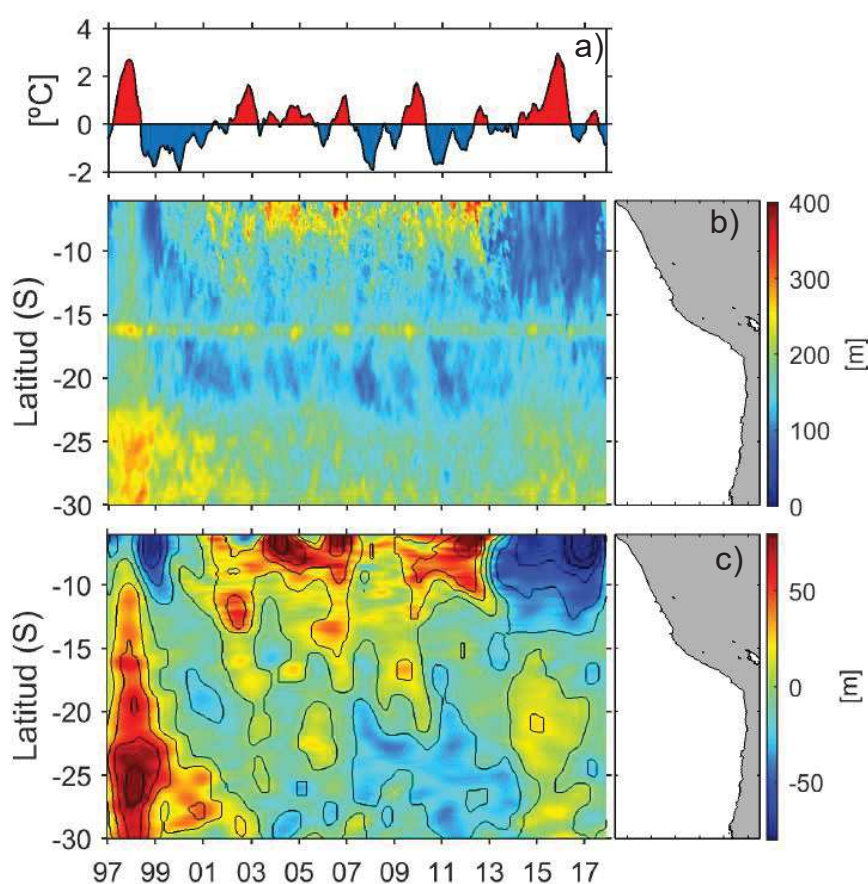


Figura 58. a) serie del índice de El Niño oscilación del sur en la región ecuatorial 3-4 para el período 1997-2017; b) diagrama espacio-tiempo de la profundidad de la nutriclina en la banda de los primeros 100 km de la costa; c) diagrama-espacio tiempo interanual de la profundidad de la nutriclina.

Para explorar posibles cambios los acoplamientos físico-químicos durante los periodos contrastantes, se analizó la estructura vertical de los nutrientes reproducidos por el modelo ROMS-PISCES. La Figura 58 muestra un *proxy* para la profundidad de la nutriclina mediante el análisis de los nitratos simulados por el modelo biogeoquímico (profundidad de la isolínea de 50  $\mu\text{mol L}^{-1}$ ). Estos resultados, sugieren una modulación vertical análoga lo observado para la termoclina con una nutriclina de mayor profundidad durante los años ENSO en fase positiva, siendo mucho más acentuado durante El Niño 1997-1998 con mayor amplitud a medida que aumenta la latitud. En años ENSO en fase negativa, los resultados sugieren una distribución más somera de la nutriclina con una amplitud menor a las fases positivas. Esta situación resulta relevante para el enriquecimiento superficial, que mediante acción de la surgencia lleva nutrientes desde la capa subsuperficial (Aguas Ecuatoriales Subsuperficiales), la cual al ubicarse en estratos más profundos podría impactar en la efectividad de la acción de la surgencia en su enriquecimiento superficial. Estas aguas de alto contenido en nutrientes y salinidad, bajo contenido en oxígeno y menor temperatura, se van atenuando y profundizando hacia el polo (ver Figura 19) lo que podría explicar las mayores anomalías evidenciadas en el análisis (Figura 58c).

Este mismo análisis se realizó para la profundidad de la oxiclina, tomando como *proxy* la ubicación vertical de la isolínea de 60  $\mu\text{mol L}^{-1}$ . La Figura 59 evidencia una profundización evidente de la oxiclina durante eventos El Niño, siendo mucho más acentuado este proceso durante El Niño 1997-1998 y aumentando con la latitud de forma similar a lo obtenido para los nutrientes. Este proceso es relevante en función del control vertical del hábitat, aumentando la extensión vertical del hábitat oxigenado durante estos periodos y siendo más somero durante eventos fríos La Niña. Este proceso de profundización (elevación) de la zona de mínima de oxígeno (ZMO) durante El Niño (La Niña) es una respuesta a de intensas ondas atrapadas costeras forzadas remotamente, las cuales se propagan perdiendo intensidad hacia el sur (Figura 59c). La ubicación de la oxiclina, además estuvo fuertemente correlacionada con la ubicación de la termoclina en la banda costera, realizando el rol de los procesos físicos en el control de la extensión de la columna de agua oxigenada principalmente en regiones aledañas al Ecuador (Ecuador, Perú y norte de Chile), las cuales se transportan mediante la acción de la corriente subsuperficial Perú-Chile que amplifican los cambios provocados por estos eventos sobre la circulación zonal Ecuatorial. Otros procesos que controlan la mayor oxigenación de la ZMO

están ligados a la variabilidad de los flujos verticales y horizontales asociados la energía cinética de mesoescala (promotora de remolinos de mesoescala), los cuales se reducen durante la fase positiva del ENSO debido a una reducción del gradiente vertical de oxígeno en la capa superficial.

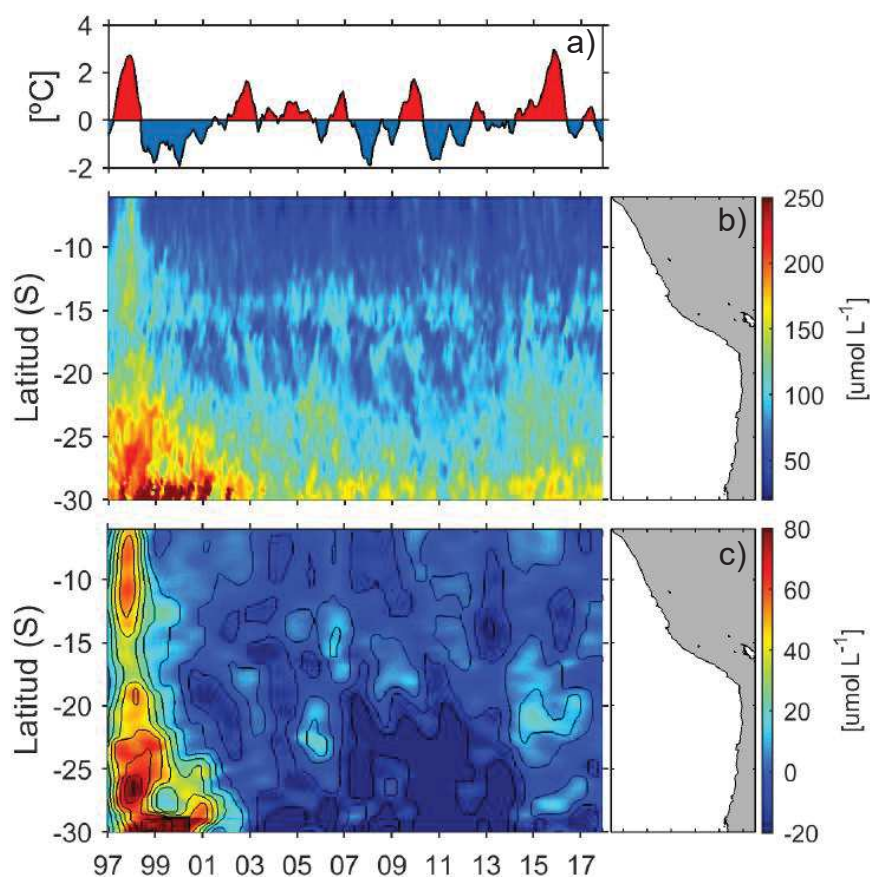


Figura 59. a) serie del índice de El Niño oscilación del sur en la región ecuatorial 3-4 para el período 1997-2017; b) diagrama espacio-tiempo de la profundidad de la oxiclina en la banda de los primeros 100 km de la costa; c) diagrama-espacio tiempo interanual de la profundidad de la oxiclina.

Finalmente, en el contexto de la variabilidad interanual observada en los procesos físico-químicos antes descritos, se analizó la variabilidad de la clorofila en la capa superficial para indagar en posibles cambios en la disponibilidad de biomasa fitoplanctónica, acá entendida como un *proxy* de la productividad biológica hacia la trama trófica pelágica que sustenta al jurel. La Figura 60a muestra la variabilidad de la clorofila superficial, donde se observa con claridad el ciclo anual de

esta variable que se fortalece durante el verano austral asociado con el fortalecimiento de los principales centros de surgencia y el ciclo anual de la radiación solar que promueve el florecimiento de primavera y verano. Un punto a destacar es la discontinuidad en la magnitud de la producción de biomasa fitoplanctónica destacando dos centros de mayor productividad, el primero al norte de los 20°S y el segundo al sur de 32°S. La variabilidad interanual de la clorofila está estrechamente asociada a las perturbaciones asociadas a la dinámica ENSO, cuyos efectos físicos se han detallado previamente a partir del modelo biogeoquímico ROMS-PISCES. La Figura 60c ilustra dicha variabilidad interanual destacando el debilitamiento de la expresión de la clorofila a lo largo de toda la costa del Pacífico suroriental durante los eventos ENSO positivos. Al igual que el resto de las variables analizadas, este efecto se ve acentuado durante El Niño 1997-1998 donde las anomalías negativas se extendieron desde el Ecuador hasta el sur de Chile, situación que se prolongó en los años venideros en regiones del norte de Chile. Durante El Niño 2015-2016 este efecto no se apreció de forma tan marcada e incluso se observan anomalías positivas en algunas regiones del sur de Chile. De la misma manera, durante La Niña, las anomalías de la clorofila no son del todo consistentes y pueden alternar entre anomalías positivas y anomalías negativas débiles. Así, durante eventos extremos El Niño la propagación de ondas Kelvin hacia el polo genera ondas de Rossby hacia el oeste en el sector costero de Perú, generando la profundización de las clinas ya observadas y generando anomalías del nivel del mar y de la clorofila superficial, atribuibles a un menor enriquecimiento superficial producto de los procesos descritos.

La variabilidad asociada con ENOS que llega a la costa centro-sur de Chile puede, en cambio, ser transmitida en gran parte a través de teleconexiones atmosféricas con el Pacífico ecuatorial (Shaffer *et al.*, 1999). El debilitamiento de los vientos costeros en la región centro-sur de Chile durante los eventos ENOS cálidos puede condicionar una menor actividad de surgencia y, por lo tanto, un debilitamiento de la actividad de mesoescala en la zona de transición costera. Esto podría promover a una posible disminución de las concentraciones de clorofila en las zonas costeras y oceánicas. Considerando que el forzamiento atmosférico ha sido foco de estudio relevante en el proceso de modelación hidrodinámica y biogeoquímica, dichas respuestas actuarían sinérgicamente para modelar la variabilidad del hábitat.

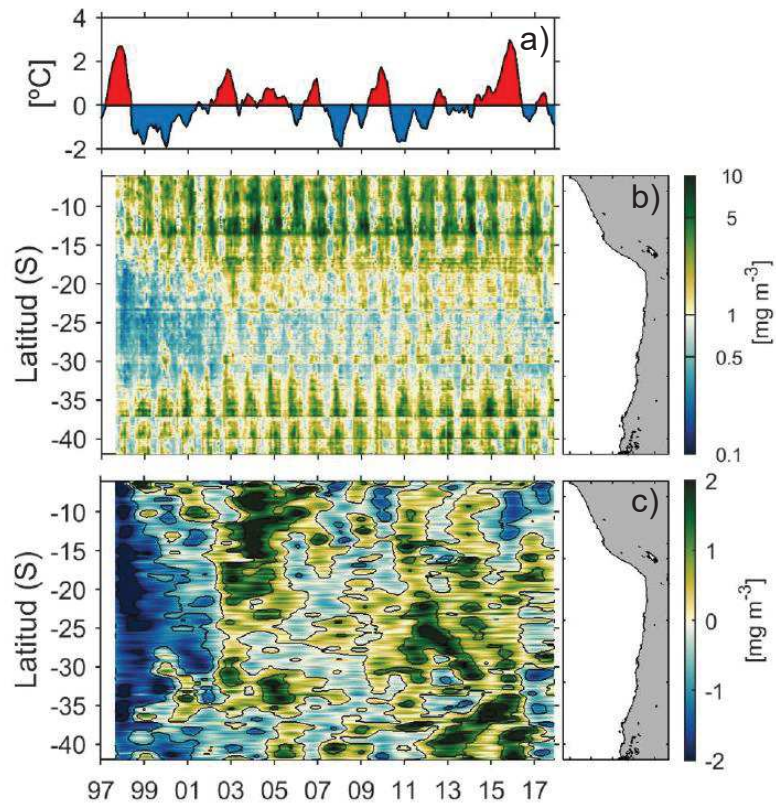


Figura 60. a) serie del índice de El Niño oscilación del sur en la región ecuatorial 3-4 para el período 1997-2017; b) diagrama espacio-tiempo de la clorofila superficial en la banda de los primeros 100 km de la costa; c) diagrama-espacio tiempo interanual de la clorofila superficial.

**6.5. Objetivo específico 5. Realizar simulaciones evaluando los escenarios de forzamiento contrastantes (4.4) y el modelo desarrollado (4.3), identificando los factores o hábitat críticos que pudieran modular la estructura poblacional del jurel en el Pacífico Sur. Los escenarios de concentraciones de oxígeno deben ser considerados en las simulaciones.**

De acuerdo a lo descrito en el objetivo específico previo, se configura una variabilidad interanual en las condiciones físico-químicas del hábitat de jurel (principalmente en su expresión más cercana al borde oriental), marcada por la variabilidad en escala ENSO donde se visualizan: i) un calentamiento (enfriamiento) superficial durante ENSO en fase positiva (negativa); ii) una profundización (ascenso) de la termoclina durante ENSO en fase positiva (negativa), que estuvo estrechamente relacionada con la variabilidad vertical de la zona mínima de oxígeno; iii) una profundización (ascenso) de la nutriclina durante ENSO en fase positiva (negativa), al igual que el punto anterior, como respuesta a la generación de ondas atrapadas a la costa en su desplazamiento hacia el polo, y; iv) una disminución marcada de la biomasa fitoplanctónica (clorofila) durante eventos El Niño, asociada primariamente a las acciones físicas ya descritas, sobretodo en regiones cercanas al Ecuador, y secundariamente a tele-conexiones atmosféricas que podrían impactar sinérgicamente a la zona centro sur de Chile impactando a la surgencia costera. De esta manera, los escenarios de simulación con forzamiento variable del ambiente para adultos de jurel se enfocaron en periodos contrastantes El Niño - La Niña. En consecuencia, el modelo bayesiano de distribución de especies basado en la variabilidad del hábitat e implementado mediante INLA (ver punto 6.3.2) fue forzado con las condiciones del hábitat asociadas a El Niño 1997-1998 y a La Niña 2007 para analizar la configuración del hábitat propicio para la ocurrencia de jurel bajo escenarios ambientalmente contrastantes.

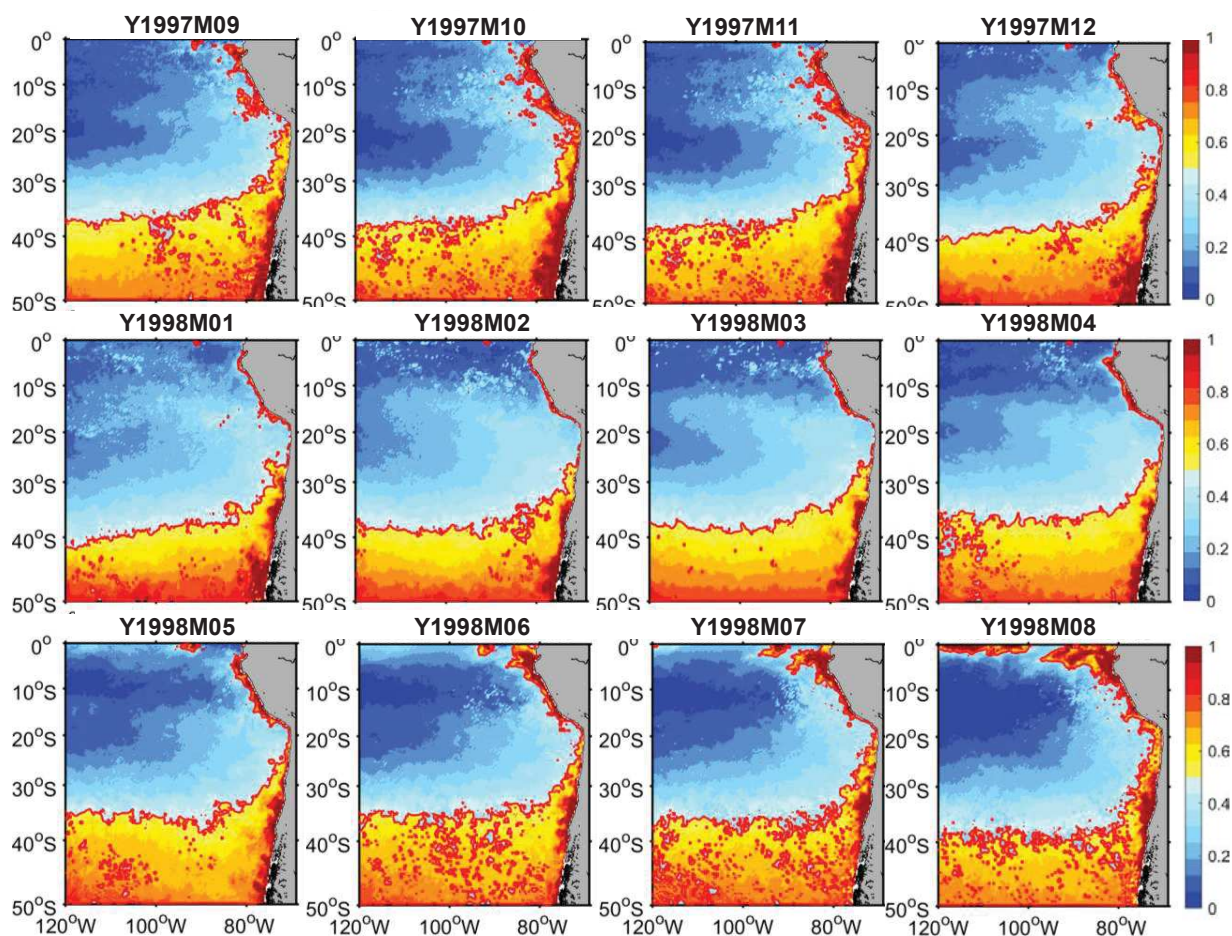


Figura 61. Probabilidad media posterior para la ocurrencia de jurel en el Pacífico suroriental basada en modelación jerárquica bayesiana mediante INLA para el evento El Niño 1997-1998.

La Figura 61 muestra la respuesta del modelo predictivo frente al escenario ambiental El Niño 1997-1998, evidenciando una contracción desde norte a sur del área de mayor probabilidad de ocurrencia de jurel, segregando el hábitat y restringiéndolo zonalmente hasta una banda costera muy restringida o inexistente en el extremo norte de distribución. De esta manera, la zona de mayor probabilidad de ocurrencia se contrae en el extremo norte aumentando progresivamente desde los 23°S al sur y extendiéndose hacia la región oceánica en torno a 35°S. De acuerdo a la inferencia realizada mediante modelación bayesiana y al análisis de forzantes, este escenario de re-estructuración del hábitat responde principalmente al ingreso de aguas de alta temperatura desde la región subtropical hacia la región costera de Perú y el norte de Chile, además de la importante disminución de la biomasa fitoplanctónica como respuesta a las distintas alteraciones

atmosféricas y oceanográficas ya descritas. Las implicancias de esta configuración del hábitat favorable para jurel tiene implicancias en su posible estructuración espacial, disminuyendo la posibilidad de formar agregaciones de altas biomásas en el extremo norte de distribución e impactando la zona de crianza reconocida entre el sur de Perú y norte de Chile, donde se distribuyen mayoritariamente individuos inmaduros con menor capacidad migratoria. Así, este escenario promueve que los centros de masa de individuos inmaduros se muevan al sur pudiendo coexistir espacialmente con las regiones de distribución de adultos en alimentación e interactuando con las zonas de pesca habituales de jurel. Además, la restricción espacial del hábitat de adultos en primavera es coincidente con el análisis predictivo del desove, el cual se presentó desplazado al sur durante el evento El Niño 1997-1998 (ver Figura 42).

En contraste, la Figura 62 muestra la respuesta del modelo predictivo frente a las condiciones ambientales predominantes en el evento La Niña 2007. En estos campos de predicción se destaca la mayor continuidad del hábitat probable para la ocurrencia de jurel y la mayor extensión del hábitat durante primavera-verano, la cual durante El Niño se sugiere alterada por las condiciones anómalas. La extensión del hábitat durante este periodo es mayor a la climatología modelada inicialmente con fines predictivos, contrario a lo observado durante El Niño donde el área se sugiere significativamente menor. Al mismo tiempo destaca la alta probabilidad de ocurrencia de jurel en el extremo norte durante gran parte del año que coinciden con las observaciones que se obtienen para este periodo, sugiriendo una mayor probabilidad de distribución de agregaciones de jurel en aguas de Perú e incluso Ecuador. Durante los meses de primavera-verano, la región de mayor probabilidad de ocurrencia de jurel es amplia proporcionando un escenario más favorable para la conectividad poblacional, lo que resulta particularmente válido por tratarse de la época de máxima actividad reproductiva de la especie y coincidiendo con los escenarios de modelación del desove presentados en este estudio (ver Figura 42).



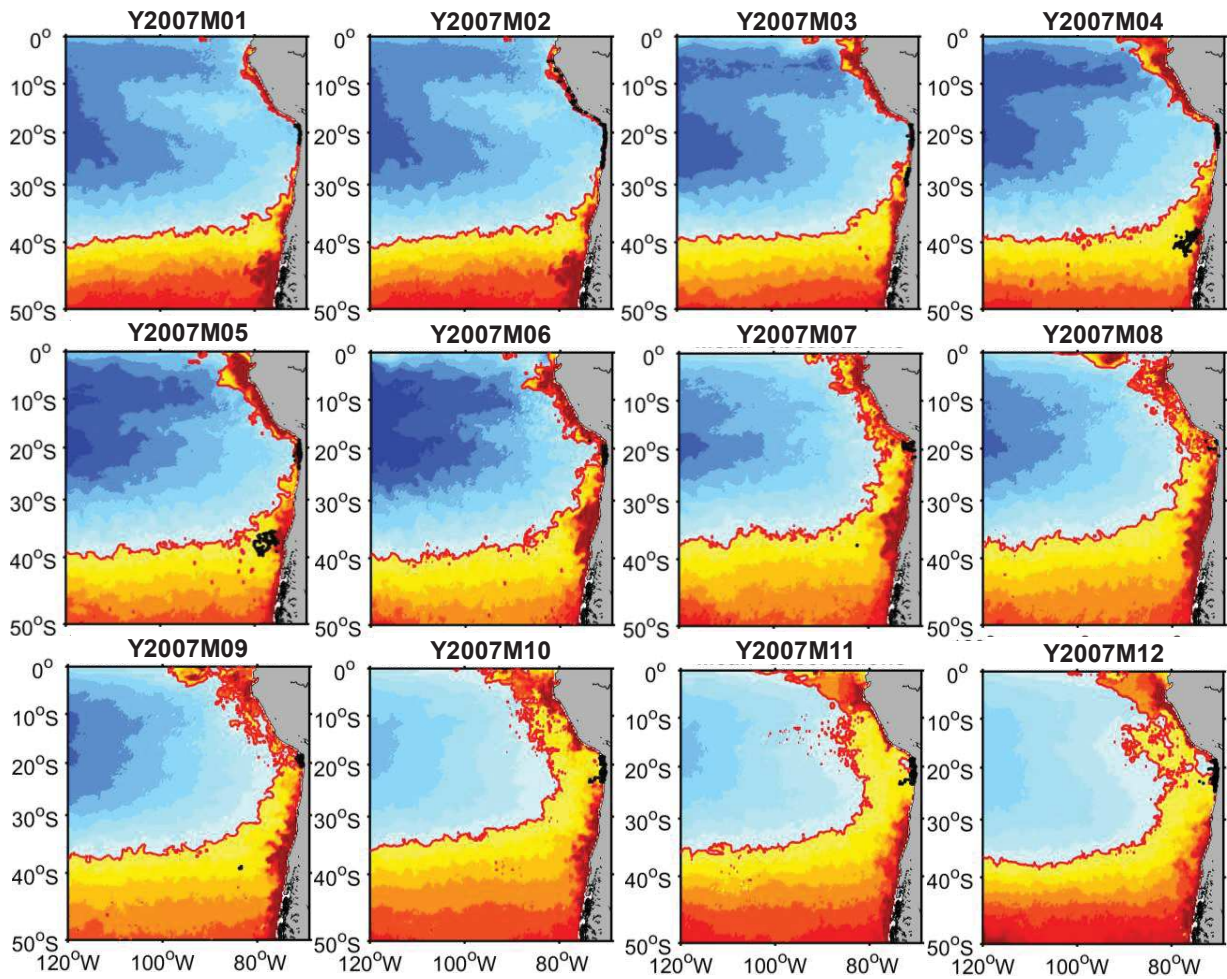


Figura 62. Probabilidad media posterior para la ocurrencia de jurel en el Pacífico suroriental basada en modelación jerárquica bayesiana mediante INLA para el evento La Niña 2007.

**6.6. Objetivo específico 6. Identificar fortalezas y debilidades de todo el ámbito abarcado por el estudio, establecer líneas de desarrollo/necesidades de investigación para avanzar en el estudio de la estructura poblacional de la especie.**

Este objetivo específico del proyecto constituyó una etapa final de desarrollo en la cual se busca establecer líneas de desarrollo/necesidades de investigación para avanzar en el estudio de la estructura poblacional de jurel a nivel sub-regional, incorporando los hallazgos del proyecto e integrándolos con conocimiento proveniente de otras líneas de investigación asociadas a jurel. Se ha planteado abordar este objetivo específico mediante la realización de un taller de expertos a nivel nacional para generar lineamientos comunes para el desarrollo de perfiles de investigación para el estudio de la dinámica poblacional de jurel que apoye el manejo integrado de la especie en el Pacífico sur. El establecimiento de este taller implicó la revisión y discusión de los resultados y hallazgos del proyecto y sus implicancias en el contexto de las hipótesis de estructura poblacional y hacia el manejo integrado de la especie en el Pacífico sur en el contexto de la Organización Regional de Pesca del Pacífico sur (OROP-PS).

En esta perspectiva, con el propósito de avanzar en el estudio de la estructura poblacional del jurel bajo un hábitat variable, se propuso la implementación de un análisis de juicio experto por medio de la realización de un taller que integre la participación de especialistas nacionales en diferentes disciplinas en el ámbito de la dinámica poblacional del jurel, con la finalidad de generar una dinámica de trabajo que posibilite identificar las debilidades, fortalezas y brechas de conocimiento de todo el ámbito abarcado por el estudio, junto con establecer, bajo consenso una validación y jerarquización de estos elementos, al mismo tiempo se analizó y consensuó una propuesta de líneas de desarrollo/necesidades de investigación para avanzar en el estudio de la estructura poblacional de la especie, logrando definir en consenso las prioridades.

En esta modalidad de taller telemático para obtener un buen desarrollo de las actividades indicadas, se establecieron las siguientes consideraciones a los participantes:

- Mantener apagado el micrófono, mientras no se realice alguna intervención.
- Pedir la palabra por el chat, para evitar generar interrupciones.

- Cada intervención que realice algún participante tendrá una duración máxima de 5 minutos.
- Las consultas surgidas durante las presentaciones, deberán ser escritas en el chat para el expositor las pueda contestar al finalizar.
- 

#### *6.6.1. Fase 1: Implementación de taller*

Esta primera fase del taller fue realizada el 3 de agosto de 2020 entre las 9.30 y 13.30 horas, por medio la plataforma virtual Gogle Meet. El objetivo de esta parte del taller, fue discutir los alcances enfoque basado en modelación biofísica hacia el estado de conocimiento de la estructura poblacional de jurel en el Pacífico Suroriental. Los contenidos tratados en el taller fueron los siguientes:

- Presentación del Taller FIPA 2017-62 (Sebastián Vásquez, Inpesca).
- Manejo integrado de jurel por medio de la OROP-PS: implicancias de la estructura poblacional (Aquiles Sepúlveda, Inpesca).
- Estado del conocimiento hacia la estructura poblacional del jurel y las evidencias del proyecto FIPA 2017-62 (Sebastián Vásquez, Inpesca).
- Plenario y discusión: estructura poblacional del jurel. Fortalezas y debilidades para su definición (Moderador Sergio Núñez, Inpesca).

Se contabilizó una asistencia de 23 personas, incluyendo el equipo de investigadores de Inpesca, provenientes de distintas entidades gubernamentales, académicas y de investigación (Tabla XIII).

##### *6.6.1.1. Síntesis presentación Taller FIPA 2017-62*

Esta presentación tuvo por finalidad dar a conocer a los participantes el objetivo general y los objetivos específicos desarrollados en el marco del estudio, además de los objetivos y contenido del taller, refiriéndose para eso al programa de trabajo (Ver Anexo V). Desde la Subsecretaría de Pesca y Acuicultura, se destacó la relevancia del aporte de éste estudio en el ámbito de la discusión sobre la estructura poblacional del jurel en el Pacífico Sur Oriental, planteándose la necesidad de consolidar una posición científica única ante la OROP-PS, bajo la consideración de que en el año 2021 en el marco de un *benchmark* de la evaluación integrada de jurel, se re-analizarán aspectos relativos a la estructura espacial de jurel y las hipótesis de estructura poblacional hacia la evaluación de stock y el manejo pesquero.

Tabla XIII. Identificación de asistentes que participaron primer día de taller. Acrónimos corresponden a: Subpesca, Subsecretaría de Pesca y Acuicultura; Ifop, Instituto de Fomento Pesquero; CIAM, Centro de Investigación Aplicada del Mar; Inpesca, Instituto de Investigación Pesquera.

| ID | Nombre              | Institución             |
|----|---------------------|-------------------------|
| 1  | Alejandra Hernández | Subpesca                |
| 2  | Andrés Daroch       | Comité de Manejo        |
| 3  | Francisco Contreras | Ifop                    |
| 4  | Francisco Fernández | Sernapesca              |
| 5  | Gabriela Bohm       | Ifop                    |
| 6  | Ignacio Paya        | Ifop                    |
| 7  | Jorge Oliva         | CIAM                    |
| 8  | Joyce Méndez        | Subpesca                |
| 9  | Juan Carlos Quiroz  | Ifop                    |
| 10 | Jurgen Betzhold     | Subpesca                |
| 11 | Karin Mundnich      | Subpesca                |
| 12 | Leonardo Caballero  | Ifop                    |
| 13 | Marcelo Oliva       | Universidad Antofagasta |
| 14 | Mauro Urbina        | Subpesca                |
| 15 | Patricio Hernández  | Comité de Manejo        |
| 16 | Silvia Hernández    | Subpesca                |
| 17 | Víctor Espejo       | Subpesca                |
| 18 | Sebastián Vásquez   | Inpesca                 |
| 19 | Cristian Salas      | Inpesca                 |
| 20 | Aquiles Sepúlveda   | Inpesca                 |
| 21 | Sergio Núñez        | Inpesca                 |
| 22 | Carlos González     | Inpesca                 |
| 23 | Roberto San Martín  | Inpesca                 |

#### 6.6.1.2. Síntesis presentación "Manejo integrado de jurel por medio de la OROP-PS: implicancias de la estructura poblacional".

Esta presentación se inició destacando los aspectos relacionados al manejo integrado de jurel en el marco de la OROP-PS indicándose que la asesoría pesquera y el marco de decisiones de la organización está basada en el modelo de evaluación de stock implementado bajo la hipótesis de un stock para toda la región del Pacífico Suroriental. Los énfasis de esta presentación visibilizaron el trabajo que ha desempeñado la ORP-PS sobre el jurel los últimos 13 años, destacándose el tipo de modelación involucrada sobre la base de la estructura poblacional del recurso como hoja de ruta, los objetivos y las reglas de control planteadas para lograr llegar al

actual estado de situación poblacional del recurso en el Pacífico Sur Oriental. Se indicó que actualmente la biomasa desovante de jurel se encuentra por sobre el límite de recuperación (5 millones de toneladas). Además, se destacó la complejidad de manejo del jurel, debido a los distintos tipos de flotas nacionales (Flota Norte y Centro Sur de Chile) e internacionales que operan en su captura, que han logrado un alto grado de cumplimiento sobre las cuotas de captura recomendadas las que se han mantenido por debajo de la captura en el máximo rendimiento sostenible. No obstante, se manifestó la preocupación de los efectos que podrían evidenciarse sobre la sustentabilidad del recurso si Perú no evita el sobre consumo de las cuotas recomendadas, como los excesos ocurridos en 2011, 2012, y recientemente durante 2019 (75.845 ton) lo cual hace que se aleje del principio de compatibilidad y cooperación. En este caso, para visualizar los efectos reales de esta situación sobre la biomasa de jurel se indicó que se necesita considerar la revisión de procedimientos de manejo bajo la hipótesis de estructura poblacional de dos stocks.

#### *6.6.1.3. Síntesis presentación “Estado del conocimiento hacia la estructura poblacional del jurel y las evidencias del proyecto FIPA 2017-62”*

Esta presentación se enfocó principalmente en el estado del conocimiento hacia la estructura poblacional del jurel por medio de las evidencias científicas surgidas del proyecto. En la parte inicial, se hizo un resumen de las principales conclusiones de los hallazgos científicos del proyecto, relacionados a procesos y variables críticas del hábitat potencial del jurel que modularían las distintas fases de su ciclo de vida por medio de patrones espaciales del recurso. En este caso, se destacó que en el plano histórico de la pesquería de jurel se han observado cambios en la ocupación espacial del recurso modulados por periodos de alta y baja abundancia. Posteriormente, se dieron a conocer las distintas hipótesis de la estructura poblacional de jurel que están vigentes en el contexto del manejo integrado de la OROP-PS, las cuales van desde un stock único para todo el Pacífico sur hasta múltiples stocks discretos a lo largo de toda el área de distribución de jurel.

Luego, se detallaron los principales resultados obtenidos en los distintos objetivos del proyecto relacionados a la modelación hidrodinámica, biogeoquímica, y biofísica asociada principalmente a los estadios tempranos del recurso jurel (gradientes de desoves, conectividad de transporte,

zonas de retención), y de modelación espacialmente explícita para la fracción de adultos, junto a las salidas de los modelos predictivos de la distribución espacial del recurso frente a eventos disruptivos como El Niño. Específicamente de esta síntesis se destacaron como relevantes los siguientes resultados por objetivos:

*Objetivo 1:* de la revisión bibliográfica, se identificaron las variables más influyentes en la distribución del jurel, como la temperatura, corrientes, oxígeno disuelto, concentración de clorofila.

*Objetivo 2:* se destacó la validación y buen desempeño del modelo hidrodinámico y biogeoquímico ROMS-PISCES sobre los eventos extremos como El Niño/La Niña en relación a variables como: la altura del nivel del mar, la clorofila, la zona de la mínima de oxígeno y su extensión. Además, se presentan las dificultades relacionadas con este tipo de modelación.

*Objetivo 3:* a partir del modelo biofísico, sobre estadios tempranos del jurel, se obtuvieron de forma significativa 3 variables predictoras. Se observó un gradiente de desove potencial que disminuye hacia el norte, sin discontinuidades importantes. La conectividad vía transporte temprano está modulado por el frente Subtropical que genera un patrón de movimiento hacia la costa y hacia el norte, con una alta probabilidad de retención en ciertos sectores y conectividad a áreas adyacentes. Se destaca la modelación espacialmente explícita mediante modelos bayesianos jerárquicos implementados en INLA para adultos (capturas y acústicas).

*Objetivo 4:* como resultado relevante, se indicó a los cambios que se pueden registrar en el ecosistema del Pacífico Sur Costero, debido a la variabilidad interanual principalmente enfocada en la dinámica de El Niño Oscilación del Sur afectando el modelo predictivo espacial del recurso. Finalmente se destacó que los resultados de la modelación son consistentes a antecedentes previos en estudios orientados a la estructura poblacional de jurel (ver Discusión general).

#### *6.6.1.4. Ideas principales del plenario y de las consultas a las presentaciones*

Los innumerables aportes entregados por los participantes al taller que surgieron del diálogo generado a partir de las consultas y aclaraciones de la etapa de las presentaciones y de la

discusión llevada a cabo en el plenario (Figura 63), se resumieron y clasificaron en tres temas relevantes:

*i) Aspectos del desarrollo metodológico de la modelación del proyecto:*

Los esquemas de modelación presentados se sustentaron en una base de datos rica, pero asimétrica respecto a la distribución espacial de jurel. Dicha información provino de un periodo de baja abundancia poblacional (2001-2017). Se indicó la necesidad de reforzar estas bases de datos con información histórica de periodos previos de la pesquería de jurel para un mejor entendimiento de la estructuración espacial de la población, particularmente referente al sector costero y oceánico del norte de Chile, considerando que en su momento fue una zona de alta abundancia y captura de jurel, incluyendo la evidencia de desove costero.

Por otra parte, se planteó que sería interesante ensayar otras variables físicas sobre la modelación predictiva espacio-temporal del desove de jurel, para ver cuál es su contribución sobre este indicador, considerando que las variables ensayadas son significativas, pero no necesariamente contribuyen en gran porcentaje a la reducción de la varianza, la cual es en gran medida explicada por la variable temporal año (varianza explicada del modelo global 42.2%).

Se valoró el aporte del proyecto hacia la definición del hábitat potencial de jurel y como este puede verse modificado bajo eventos extremos como El Niño. Sin embargo, se estableció la necesidad de avanzar hacia la definición del hábitat realizado por jurel y su variabilidad interanual, de lo cual este proyecto hizo un avance significativo, pero se debe seguir progresando en esta línea de investigación. Se indicó que es necesario aumentar la capacidad de acceso a información de jurel referenciada en tiempo y espacio desde distintas regiones para este propósito.

*ii) Razones biológicas y ecológicas ante asociaciones recurso-ambiente.*

Se planteó que es necesario ahondar sobre una explicación biológica y ecológica para la separación espacial, entre los juveniles y adultos de jurel e identificar bajo qué mecanismos o condiciones se mezclarían potenciales stocks separados (nivel de mezcla poblacional). Se argumentó que lo discutido hasta ahora es que habría mayor estabilidad ambiental para las

fracciones juveniles y reclutas, y que operaría la “ley de familia” como un comportamiento ontogenético del recurso en donde los padres le dan espacio a los juveniles en un lugar apto para el crecimiento.

Se indicó que es de consenso que este tipo de proyectos son integradores de información desde distintas fuentes (biológicas, ambientales y pesqueras) hacia la definición de los rangos ambientales que definen el hábitat ocupado por jurel y su modificación en escenarios extremos como El Niño. Se destacó la necesidad de complementar este tipo de aproximaciones, con estudios locales (estudios de campo) para determinar posibles niveles de tolerancia del jurel a situaciones extremas (e.g. presencia de mínima de oxígeno) y su impacto sobre la distribución y conectividad poblacional. En este caso se destacó, que el jurel se caracteriza por una alta plasticidad, debido a que tolera un amplio rango de condiciones ambientales y que potencialmente puede incursionar en zonas en donde hay aguas con baja concentración de oxígeno. Esto último constituye una línea de desarrollo donde se debería realizar un análisis más específico entre estas relaciones (baja oxígeno y presencia de jurel).

Como otro aspecto a considerar, se planteó que es importante conocer qué factores han propiciado que, en estos últimos años, el jurel esté volviendo a poblar y concentrarse en la costa. Algunas de las explicaciones surgidas estarían relacionadas a procesos de desplazamientos del recurso para alimentación de eufáusidos o evitar la depredación de recursos como la jibia, pero que de todas formas deben ser validados en el marco de estudios específicos.

### *iii) Estructura poblacional y sustentabilidad del jurel*

La Subsecretaría de Pesca y Acuicultura manifiesta la necesidad de establecer una visión cohesionada y consensuada de parte de todos los actores involucrados en la pesquería de jurel hacia la estructura poblacional de la especie. Esta visión debe estar basada en evidencias científicas hacia el fortalecimiento de la representación nacional en la OROP-PS. Se estableció que el foco de la administración es la sustentabilidad a largo plazo de la pesquería. Las acciones que estén fuera de los principios de compatibilidad y cooperación a nivel regional podrían afectar dicha sustentabilidad y debiesen ser discutidos en el marco de la OROP-PS.



Existe la necesidad de abordar las implicancias del manejo bajo distintas hipótesis de estructura de stocks (i.e. un stock, más de un stock) en la sustentabilidad poblacional. Esto requiere el desarrollo de un marco de análisis basado en evaluación de estrategias de manejo (MSE). Se destaca que los antecedentes planteados en el presente proyecto, pueden resultar de utilidad para estructurar las bases teóricas para definir las hipótesis a ser contrastadas mediante un MSE. Es preciso generar un análisis crítico a nivel nacional que genere consenso en las distintas fuentes de información relativas a la estructura poblacional de jurel y los efectos de explotación alejada de los principios de compatibilidad regional. Se reconoce la necesidad establecer un grupo de trabajo que establezca las evidencias para la definición de una postura única hacia la estructura poblacional de jurel. En esta instancia debe incorporarse una visión crítica considerando los argumentos y contra-argumentos asociados a dichas definiciones.

Finalmente, el equipo ejecutor indicó que los resultados del actual proyecto se orientan y favorecen el planteamiento de la hipótesis de la existencia de una población única distribuida, tanto en las aguas costeras de Ecuador Perú y Chile, como en las aguas oceánicas abiertas. En este caso, existe un ciclo biológico común para todo el Pacífico suroriental con desove sincrónico primaveral asociado al frente subtropical. El transporte de huevos y larvas promueve la conectividad poblacional y sustenta un área de crianza situada entre el sur de Perú y el norte de Chile. Los niveles de heterogeneidad espacial pueden estar vinculados a la ocupación del hábitat durante el proceso de alimentación y crecimiento.

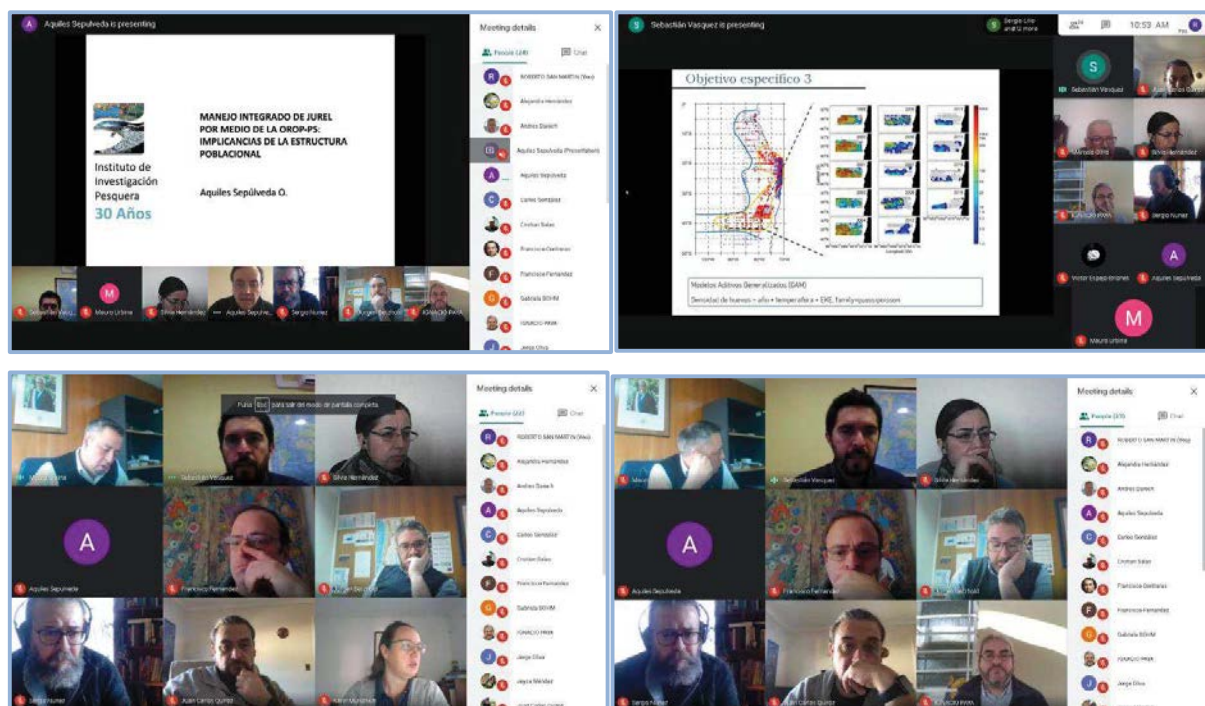


Figura 63. Imágenes del desarrollo del primer día de Taller "Actualización del estado del conocimiento de la estructura poblacional de jurel en el Pacífico Suroriental".

### 6.6.2. Fase 2: Implementación de taller

Esta segunda parte del taller fue realizada el 7 de agosto de 2020 entre las 9:30 y 13:30 horas, mediante la plataforma telemática Google Meet. El objetivo de esta parte del taller, fue Identificar las debilidades, fortalezas de todo el ámbito abarcado por el estudio establecer líneas de desarrollo/necesidades de investigación para avanzar en el estudio de la estructura poblacional de la especie. Los contenidos tratados en el taller fueron los siguientes:

- Resumen plenario y discusión día 1 (Sebastián Vásquez, Inpesca).
- Actividad participativa 1: identificación de fortalezas y debilidades en el ámbito del estudio (Carlos González, Inpesca).
- Actividad participativa 2: priorización de las debilidades y presentación de resultados (Carlos González, Inpesca).

- Actividad participativa 3: propuestas de líneas de desarrollo en investigación hacia fortalecimiento de estudios en estructura poblacional de jurel (Carlos González, Inpesca).
- Cierre taller (Aquiles Sepúlveda, Inpesca)

Se contabilizó una asistencia de 16 personas, incluyendo el equipo de investigadores de Inpesca, provenientes de distintas entidades gubernamentales, académicas y de investigación (Tabla XIV).

Tabla XIV. Identificación de asistentes que participaron en el segundo día de taller. Acrónimos corresponden a: Subpesca, Subsecretaría de Pesca y Acuicultura; Ifop, Instituto de Fomento Pesquero; Inpesca, Instituto de Investigación Pesquera.

| ID | Nombre             | Institución                              |
|----|--------------------|--|
| 1  | Andrés Daroch      | Comité de Manejo                         |
| 2  | Jorge Oliva        | Centro de Investigación Aplicada del Mar |
| 3  | Juan Carlos Quiroz | Ifop                                     |
| 4  | Karin Mundnich     | Subpesca                                 |
| 5  | Leonardo Caballero | Ifop                                     |
| 6  | Marcelo Oliva      | Universidad Antofagasta                  |
| 7  | Mario Tapia        | Comité de manejo de jurel                |
| 8  | Sergio Lillo       | Ifop                                     |
| 9  | Silvia Hernández   | Subpesca                                 |
| 10 | Víctor Espejo      | Subpesca                                 |
| 11 | Sebastián Vásquez  | Inpesca                                  |
| 12 | Cristian Salas     | Inpesca                                  |
| 13 | Aquiles Sepúlveda  | Inpesca                                  |
| 14 | Sergio Núñez       | Inpesca                                  |
| 15 | Carlos González    | Inpesca                                  |
| 16 | Roberto San Martín | Inpesca                                  |

#### 6.6.2.1. Identificación de fortalezas en la implementación del estudio.

En esta parte se realizó un breve resumen de las principales ideas discutidas y consensuadas el primer día de realización del Taller hacia el estado de conocimiento que contribuyen al planteamiento de hipótesis de la estructura poblacional de jurel en el Pacífico suroriental, incluyendo el planteamiento de la hipótesis que se ve mayormente favorecida a la luz de los resultados del presente proyecto. Por otro lado, fueron dadas a conocer las fortalezas y los principales procesos poblacionales identificados por el proyecto FIPA 2017-62 hacia el estado de

conocimiento que contribuyen al planteamiento de hipótesis de la estructura poblacional las cuales se plantean a continuación:

- La mayor proporción del hábitat adecuado para la especie se encuentra en la zona centro sur de Chile y su zona oceánica adyacente.
- La reproducción es un proceso importante para la mezcla poblacional. El área favorable para el desove es extensa, asociada al frente subtropical y sin discontinuidades espaciales identificables.
- La temporada de desove presenta un máximo primaveral (octubre-diciembre) en todas las zonas estudiadas coincidente con la máxima extensión del hábitat favorable a jurel.
- La mayor heterogeneidad del hábitat de jurel se registra en verano-otoño, con una discontinuidad parcial identificable entre 18°S y 22°S.
- Área principal de crianza se sitúa en el sur de Perú y norte de Chile donde se distribuyen peces inmaduros. Esta zona está conectada con la zona de desove a través del transporte pasivo de huevos y larvas, además de eventuales migraciones activas de juveniles.
- Eventos extremos El Niño generan una re-distribución poblacional restringiendo el hábitat de norte a sur promoviendo mayor homogeneidad espacial (i.e. presencia de individuos inmaduros en la pesquería centro sur de Chile)

No obstante, en las reuniones internas del equipo de trabajo del proyecto, se reconoció una amplia variedad de fortalezas detectadas en el estudio (Tabla XV), solamente fueron compartidas a los asistentes aquellas relacionadas con el conocimiento de la estructura poblacional de jurel resumidas anteriormente. En este caso, la mayor parte de las fortalezas estuvieron relacionadas con productos de la magnitud de las fuentes de información y bases de datos obtenidas, e integralidad y bondad de los modelos.

Tabla XV. Identificación de fortalezas en relación al desarrollo del estudio.

| <b>Fortalezas identificadas</b>   |
|---|
| Robusta revisión bibliográfica, desde distintas fuentes de información para identificar procesos relevantes para la estructuración espacial de la población de jurel.   |
| Desarrollo científico y tecnológico de frontera. Único modelo biogeoquímico generado con capacidades propias en Chile. Modelo de gran escala espacio-temporal.  |
| Modelación biogeoquímica PISCES abre nuevas posibilidades para el desarrollo de modelos biofísicos acoplado para especies pelágicas (i.e. modelos bioenergéticas para estadios tempranos, análisis de mortalidad asociada a ventanas ambientales optimas, etc).                                       |
| La modelación biogeoquímica posibilita complementar el análisis de procesos atmosféricos-oceanográficos en distintas escalas (intra-estacional, estacional, interanual, El Niño). Enfoque tridimensional para el estudio de procesos de acoplamiento biofísico y de distribución de especies.         |
| Consolidación de una amplia base de datos con registros de presencia de jurel en todas las zonas de interés y serie de tiempo consistente de la zona de desove oceánica Chile central.  |
| Enfoque de modelación en base al ciclo de vida de la especie (desove, historia de vida temprana distribución de adultos) con análisis estadísticos apropiados para la modelación de distribución de especies. Potenciales aplicaciones para predecir modelos bajo cambios ambientales de largo plazo. |
| Enfoque del estudio es complementario a evidencias previas para la discusión de hipótesis de estructura poblacional en jurel.   |
| Estudios integrados y multidisciplinario hacia la aplicación de un manejo con enfoque ecosistémico, como mandato nacional a través de la Ley de Pesca.  |
| Herramienta de modelación biofísica para prueba de hipótesis de conectividad poblacional y de inferencias respecto a la respuesta poblacional bajo un ambiente variable.  |

Algunas consideraciones relevantes fueron rescatadas desde la audiencia respecto a los resultados de este proyecto con evidencias que sustentarían la hipótesis de un solo stock de jurel:

- Las observaciones estuvieron dadas principalmente en el planteamiento de un enunciado muy estricto para sustentar una hipótesis de estructura poblacional en jurel. Por ejemplo se indicó que se debe evaluar que tan constante es la heterogeneidad espacial de jurel entre 18°S a 22°S, considerando que existen años muy variables que generan mayor o menor concentración del recurso en esa zona. Además se indica que es difícil demostrar que el jurel tiene un único ciclo común, ya que ha sido difícil identificar las diferencias morfométricas entre zonas. Sin embargo, se acogieron las distintas observaciones al planteamiento considerándose hacer una precisión del enunciado.

- Se destacó que los estudios relacionados a la estructura poblacional de jurel han seguido una secuencia estratégica en los últimos 15 años, los cuales abarcan esta problemática desde diversas perspectivas. No obstante, se señaló que aunque existen particularidades y líneas de investigación aun por desarrollar, existe información suficiente para consolidar una postura común donde la recomendación de considerar el manejo integrado bajo un stock único se realice con la mejor información disponible.

#### *6.6.2.2. Actividad participativa 1: identificación debilidades visualizadas desde el estudio hacia la estructura poblacional*

El equipo de trabajo de manera previa realizó un análisis de la implementación del estudio, desde el levantamiento de la información hasta la ejecución de la modelación, con la finalidad de levantar las debilidades en relación a distintos ámbitos identificados, el resultados de este análisis fueron presentados a los participantes del taller con la finalidad de sugerir mejoras o propuestas de otras debilidades, y finalmente establecer un consenso de estas.

Se realizó una introducción para otorgar contexto a la realización de las actividades participativas, además por medio de algunos ejemplos sencillos fueron estandarizados los conceptos de “debilidad” y “brecha”. Luego fue presentada y explicada a los asistentes, cada una de las “debilidades” identificadas previamente por el equipo ejecutor, haciendo hincapié en el horizonte que cada una de ellas posee y de cómo se vincula con el análisis de la estructura poblacional de jurel en el Pacífico Suroriental. Además fue presentado el “ámbito” en el que se argumentó la identificación de la respectiva debilidad hacia la definición de la estructura poblacional (Tabla XVI). En este caso, se dejó el espacio para que los participantes pudiesen modificar algunas de estas debilidades o incorporasen otras que fuesen relevantes para analizar en el taller, la pregunta realizada para dar lugar a esto fue ¿Hay alguna otra debilidad que es necesario mencionar?

Tabla XVI. Propuesta inicial de las debilidades y sus ámbitos para su validación participativa.

| Ámbito  | Debilidad   |
|---|---|
| El proyecto aborda el hábitat potencial de jurel (desove, juveniles y adultos). Es necesario avanzar hacia el estudio del hábitat realizado para evidenciar cambios temporales en la distribución espacial.   | La asimetría actual de la información referenciada en tiempo y espacio es una limitante importante (1).   |
| Existe la necesidad de evaluar de forma directa la conectividad dentro del área de distribución en distintas etapas del ciclo de vida (i.e. alimentación, desove, migración de juveniles) para validar la modelación del uso potencial del hábitat. | La modelación basada en el hábitat potencial entrega el marco ambiental de distribución de jurel, sin embargo no resuelve el nivel de mezcla y sus migraciones entre distintas regiones del área de distribución y en distintas etapas del ciclo de vida (2). |
| La modelación basada en el hábitat sugiere la incorporación de jurel en regiones donde la mínima de oxígeno es superficial (sobre de 50 m de profundidad). Existe la necesidad de evaluar estos escenarios mediante estudios de campo.              | La modelación basada en el hábitat potencial entrega el marco ambiental de distribución de jurel, en este caso la mínima de oxígeno es considerada una variable crítica, sin embargo requiere de evaluación de escenarios con estudios de campo (3).          |
| La modelación de la historia de vida temprana de jurel no incluye procesos bioenergéticos hacia la sobrevivencia (i.e. crecimiento, alimentación) ni campos de predadores como fuente de mortalidad.  | Los patrones de distribución de pre-reclutas de jurel mediante modelación biofísica no incluyen fuentes de mortalidad asociadas a procesos de alimentación o interacción interespecífica (4).   |
| El actual estudio ha sido realizado para un período de baja abundancia poblacional puede plantear dificultades de extrapolación de los procesos a periodos previos (altos niveles de abundancia poblacional).                                       | El hábitat potencial de jurel podría haber sido distinto previo al año 2001 (inicio de estudio) y por lo tanto los patrones modelados ser informativos de diferentes procesos poblacionales (5).  |
| Modelos espaciales no incorporan relaciones predador-presa que podrían potencialmente modular la distribución de adultos de jurel. Es preciso mejorar la modelación de la distribución de zooplancton en modelación biogeoquímica.                  | Modelos espaciales no incorporan la mortalidad asociada a relaciones interespecífica de predador-presa, ni la de alimentación, que podrían potencialmente modular los patrones de distribución de adultos de jurel (6).                                       |
| Evaluar mediante evaluación de estrategias de manejo el impacto en la sustentabilidad poblacional del manejo mediante distintas hipótesis de stocks.  | No existe una aproximación modelo-basada que aborde las implicancias hacia la sustentabilidad poblacional bajo distintas hipótesis de estructura poblacional (7).   |

### 6.6.2.3. Priorización de las debilidades identificadas

A partir de la discusión llevada a cabo, solamente surgió una recomendación a la propuesta inicial presentada por el equipo técnico, definida por el siguiente enunciado: "*Es necesario establecer una instancia que analice de forma crítica las evidencias acumuladas hacia la definición de una hipótesis de estructura poblacional*".

Una vez incorporada y validada esta debilidad fue realizada telemáticamente la priorización de estas debilidades mediante el uso de la aplicación *Socrative*. Para facilitar este trabajo interactivo, primero fueron entregadas instrucciones por medio de un tutorial que fue elaborado especialmente para guiar a los asistentes y hacer eficiente el trabajo de priorización de las distintas debilidades. En este caso el tutorial especificó los pasos para que los participantes pudieran ingresar a la aplicación, y una vez que todos pudieron acceder al instrumento se les solicitó que leyeran comprensivamente todo el listado de debilidades presentadas, y que identificaran por medio de números en orden consecutivo las debilidades más prioritarias para ellos. Se otorgó un tiempo de 15 minutos para cada uno resolviera la secuencia de mayor a menor.

La información de las respuestas de cada asistente fue obtenida simultáneamente en la plataforma *Socrative*, posteriormente fue exportada a una hoja de cálculo para ser analizada. Para esto fue generada una matriz inicial con la individualización de las respuestas priorizadas por medio de ranking en una escala ordinal (de 1 a 8). Las debilidades que obtuvieron las mayores frecuencias porcentuales por nivel de ranking fueron seleccionadas, siendo las debilidades más prioritarias las contenidas en los primeros lugares del ranking (1, 2, 3, 4) y las menos prioritarias en los últimos lugares del ranking (5, 6, 7, 8). Posteriormente fue presentada la tabla con las debilidades priorizadas instalándose las brechas detectadas por el equipo de trabajo, para su consenso. Específicamente, se solicitó la participación de los presentes mediante aviso en el chat de *Google Meet*, para opinar sobre cada brecha detectada, mediante la identificación de las opiniones contrarias y estableciendo la atingencia para mejorar la propuesta, de esta manera fue consolidada la tabla de brechas bajo consenso.



La priorización fue realizada por ocho personas y el resultado de este trabajo se resume en la Tabla XVII. Las mayores preferencias (38%) para el nivel 1 de prioridad correspondieron a la debilidad: *“No existe una aproximación modelo-basada que aborde las implicancias hacia la sustentabilidad poblacional bajo distintas hipótesis de estructura poblacional”*. Seguidamente las mayores preferencias (50%) para el nivel 2 de prioridad correspondieron a la debilidad: *“Es necesario establecer una instancia que analice de forma crítica las evidencias acumuladas hacia la definición de una hipótesis de estructura poblacional”*. Para el nivel 3 de prioridad, la mayoría (38%) seleccionó la debilidad: *“La asimetría actual de la información referenciada en tiempo y espacio es una limitante importante”*. Para el nivel 4 de prioridad, la mayoría de los participantes seleccionó dos debilidades (25% respectivamente): *“Los patrones de distribución de pre-reclutas de jurel mediante modelación biofísica no incluyen fuentes de mortalidad asociadas a procesos de alimentación o interacción interespecífica”* y *“El hábitat potencial de jurel podría haber sido distinto previo al año 2001 (inicio de estudio) y por lo tanto los patrones modelados ser informativos de diferentes procesos poblacionales”*. En términos generales se indicó que todas las debilidades son importantes, sin embargo, se reconoció que sólo dos tienen la “urgencia” de ser abordadas en el corto plazo, ya que son más prioritarias para abordarlas en el ámbito del manejo de stocks y porque será un insumo directo a los temas a tratar en OROP-PS en el siguiente año (como la debilidad 7 “aproximación modelo-basada”; y debilidad 8 la “instancia crítica sobre estructura stock”, esta última incorporada en el taller) y el resto de largo plazo.

Posteriormente se presentó una tabla con las debilidades priorizadas, incorporándose las brechas que el equipo de trabajo detectó de manera previa para cada una de las debilidades. En este caso hubo consenso en acordar lo propuesto, pero además los participantes pudieron recomendar la brecha para la debilidad incorporada por ellos anteriormente, la cual se indicó como *“No existe una instancia de reunión para conducir un análisis crítico de las evidencias acumuladas”* (Tabla XVIII). Por otro lado, un integrante del equipo de trabajo indicó que en la debilidad *“El hábitat potencial de jurel podría haber sido distinto previo al año 2001 (inicio de estudio) y por lo tanto los patrones modelados ser informativos de diferentes procesos poblacionales”* se debe modificar “hábitat potencial” por “hábitat realizado” bajo ese concepto será importante recopilar información previa. En este caso, se identificó como primera brecha prioritaria el *“Establecimiento de un grupo de trabajo inter-institucional inclusiva de los distintos actores de*

*la pesquería que aborde esta problemática de forma conjunta”, seguido por “No existe una instancia de reunión para conducir un análisis crítico de las evidencias acumuladas”, y como tercera brecha prioritaria al “Conocimiento de cambios espacio-temporales en el hábitat realizado de jurel a lo largo de toda su distribución espacial”.*

Tabla XVII. Matriz que resume la frecuencia porcentual de respuestas de las asistentes para establecer mediante ranking su priorización de debilidades hacia la estructura poblacional de jurel en el Pacífico sur.

| Ranking       | Asimetría información | Nivel de mezcla y migraciones | Evaluación mínima de oxígeno | Patrones de distribución de pre-reclutas | Hábitat potencial jurel distinto antes 2001 | Mortalidad asociada a relaciones interespecíficas | Aproximación modelo-basada | Instancia crítica sobre estructura stock | % Total |
|---------------|-----------------------|-------------------------------|------------------------------|--|---|---|----------------------------|--|---------|
| Primer lugar  | 12,5                  | 25,0                          | 0,0                          | 0,0                                      | 0,0   | 0,0   | <b>37,5</b>                | 25,0                                     | 100     |
| Segundo lugar | 12,5                  | 0,0                           | 0,0                          | 0,0                                      | 12,5  | 0,0   | 25,0                       | <b>50,0</b>                              | 100     |
| Tercer lugar  | <b>37,5</b>           | 25,0                          | 12,5                         | 12,5                                     | 0,0   | 0,0   | 0,0                        | 12,5                                     | 100     |
| Cuarto Lugar  | 0,0                   | 12,5                          | 0,0                          | <b>25,0</b>                              | <b>25,0</b>                                 | 12,5  | 12,5                       | 12,5                                     | 100     |
| Quinto lugar  | 12,5                  | 0,0                           | 25,0                         | 12,5                                     | 0,0   | <b>37,5</b>                                       | 12,5                       | 0,0                                      | 100     |
| Sexto lugar   | 16,7                  | <b>33,3</b>                   | 0,0                          | <b>33,3</b>                              | 0,0   | 16,7  | 0,0                        | 0,0                                      | 100     |
| Séptimo lugar | 0,0                   | 0,0                           | <b>33,3</b>                  | <b>33,3</b>                              | <b>33,3</b>                                 | 0,0   | 0,0                        | 0,0                                      | 100     |
| Octavo lugar  | 0,0                   | 0,0                           | 33,3                         | 0,0                                      | 16,7  | <b>50,0</b>                                       | 0,0                        | 0,0                                      | 100     |

Tabla XVIII. Debilidades priorizadas junto a sus respectivas brechas identificadas.

| N° | Debilidad priorizada  | Brecha   |
|----|---|--|
| 1  | No existe una aproximación modelo-basada que aborde las implicancias hacia la sustentabilidad poblacional bajo distintas hipótesis de estructura poblacional.   | Establecimiento de un grupo de trabajo inter-institucional inclusiva de los distintos actores de la pesquería que aborde esta problemática de forma conjunta.                                  |
| 2  | Es necesario establecer una instancia que analice de forma crítica las evidencias acumuladas hacia la definición de una hipótesis de estructura poblacional.  | No existe una instancia de reunión para conducir un análisis crítico de las evidencias acumuladas.   |
| 3  | La asimetría actual de la información referenciada en tiempo y espacio es una limitante importante.   | Conocimiento de cambios espacio-temporales en el hábitat realizado de jurel a lo largo de toda su distribución espacial.   |
| 4  | Los patrones de distribución de pre-reclutas de jurel mediante modelación biofísica no incluyen fuentes de mortalidad asociadas a procesos de alimentación o interacción interespecífica.   | Conocimiento sobre los factores críticos que fomentan la sobrevivencia temprana del jurel hacia el reclutamiento.  |
| 4  | El hábitat realizado de jurel podría haber sido distinto previo al año 2001 (inicio de estudio) y por lo tanto los patrones modelados ser informativos de diferentes procesos poblacionales.  | Conocimiento de información referenciada en tiempo y espacio para el periodo previo a 2001.  |
| 5  | Modelos espaciales no incorporan la mortalidad asociada a relaciones interespecífica de predador-presa, ni la de alimentación, que podrían potencialmente modular los patrones de distribución de adultos de jurel.                                       | Conocimiento sobre niveles de mortalidad asociadas a la relación predador-presa y tasas de alimentación.   |
| 6  | La modelación basada en el hábitat potencial entrega el marco ambiental de distribución de jurel, sin embargo no resuelve el nivel de mezcla y sus migraciones entre distintas regiones del área de distribución y en distintas etapas del ciclo de vida. | Conocimiento de patrones de conectividad poblacional (vía migraciones) dentro del rango de distribución espacial bajo un ambiente variable y en distintas fases del ciclo de vida.             |
| 7  | La modelación basada en el hábitat potencial entrega el marco ambiental de distribución de jurel, en este caso la mínima de oxígeno es considerada una variable crítica, sin embargo requiere de evaluación de escenarios con estudios de campo.          | Conocimiento de los niveles de tolerancia de jurel frente a condiciones extremas como la mínima de oxígeno mediante estudios de campo de regiones con presencia de ZMO como el norte de Chile. |

#### 6.6.2.4. *Actividad participativa 2: propuestas de desarrollo en investigación hacia fortalecer estudios de estructura poblacional de jurel*

Con las brechas consensuadas y validadas por los participantes, se avanzó en la discusión de los lineamientos investigación hacia la estructura poblacional de jurel. Para ello se realizó una presentación de los lineamientos establecidos previamente por el equipo técnico para su consenso, y se dejó el espacio para que los participantes pudiesen agregar de forma consensuada una propuesta de lineamiento para las debilidades y brechas que fueron recomendadas por los asistentes. Específicamente se solicitó la participación de los presentes mediante aviso en el chat de Google *Meet*, para opinar sobre cada lineamiento propuesto, mediante la identificación de las opiniones contrarias y estableciendo la atingencia para mejorar la propuesta fue consolidada la tabla de lineamientos bajo consenso.

Se presentó la Tabla XIX con los lineamientos que el equipo de trabajo detectó de manera previa para cada una de las brechas. En este caso hubo consenso en acordar lo propuesto, pero además los participantes pudieron recomendar el lineamiento para la debilidad y brecha incorporada por ellos anteriormente, la cual se relacionó a *“Propender una instancia de reunión científica regional para desarrollar análisis crítico de las evidencias acumuladas en el análisis de estructura poblacional de jurel”*. En este caso, se identificó como primer lineamiento prioritario al *“Desarrollo de una estrategia que permita la formalización de un grupo de trabajo hacia la modelación basada en estrategias de manejo hacia el jurel”*, seguido por *“Propender una instancia de reunión científica regional para desarrollar análisis crítico de las evidencias acumuladas en el análisis de estructura poblacional de jurel”*. Y como tercer lineamiento prioritario fue identificado el *“Trabajo conjunto a nivel regional (Pacífico Suroriental) donde se incorpore información de presencia de jurel e información auxiliar para distintas fases del ciclo de vida (i.e. capturas, cruceros de investigación, juveniles u otros)”*.

Tabla XIX. Lineamiento de investigación junto a sus respectivas brechas priorizadas.

| Brecha   | Lineamiento  |
|--|--|
| Establecimiento de un grupo de trabajo inter-institucional inclusiva de los distintos actores de la pesquería que aborde esta problemática de forma conjunta.                                  | Desarrollo de una estrategia que permita la formalización de un grupo de trabajo hacia la modelación basada en estrategias de manejo hacia el jurel.   |
| No existe una instancia de reunión para conducir un análisis crítico de las evidencias acumuladas.   | Propender una instancia de reunión científica regional para desarrollar análisis crítico de las evidencias acumuladas en el análisis de estructura poblacional de jurel.   |
| Conocimiento de cambios espacio-temporales en el hábitat realizado de jurel a lo largo de toda su distribución espacial.   | Trabajo conjunto a nivel regional (Pacífico suroriental) donde se incorpore información de presencia de jurel e información auxiliar para distintas fases del ciclo de vida (i.e. capturas, cruceros de investigación, juveniles, u otros).  |
| Conocimiento sobre los factores críticos que fomentan la sobrevivencia temprana del jurel hacia el reclutamiento.  | Diseñar un estudio de campo que aborde procesos bioenergéticas hacia la sobrevivencia temprana de jurel (e.g. alimentación, crecimiento, predación).   |
| Conocimiento de información referenciada en tiempo y espacio para el periodo previo a 2001.  | Reconstrucción espacio y tiempo referenciada de la pesquería histórica de jurel para periodos previos a 2001.  |
| Conocimiento sobre niveles de mortalidad asociadas a la relación predador-presa y tasas de alimentación.   | Consolidación de un programa de seguimiento ecosistémico del hábitat de jurel que incluya las relaciones densodependientes e independientes interespecíficas entre la disponibilidad de alimento, depredadores, competidores y condiciones ambientales. Y avanzar en el desarrollo e implementación de modelos endtoend.   |
| Conocimiento de patrones de conectividad poblacional (vía migraciones) dentro del rango de distribución espacial bajo un ambiente variable y en distintas fases del ciclo de vida.             | Desarrollo de un programa de marcaje y recaptura en jurel coordinado regionalmente (Pacífico suroriental).   |
| Conocimiento de los niveles de tolerancia de jurel frente a condiciones extremas como la mínima de oxígeno mediante estudios de campo de regiones con presencia de ZMO como el norte de Chile. | Monitoreo del área de distribución de jurel en el extremo norte de Chile y su relación con procesos de cambio en la distribución vertical de variables críticas (i.e. oxígeno disuelto, oferta de alimento, nutrientes, etc). Que consideren estudios que complementen registros de presencia de jurel y muestreo oceanográfico (e.g. acústica + perfiladores) para analizar posibles incursiones de jurel en rangos extremos de tolerancia (i.e. zona mínima de oxígeno). |

#### 6.6.2.5. Actividad 3: Ideas principales del plenario en relación a las líneas de investigación hacia la estructura poblacional del jurel

A partir de la discusión y diálogo llevado a cabo en torno a las líneas de investigación propuesta sobre la base debilidades y brechas validadas y consensuadas previamente, se extrajeron las ideas principales de las consultas, consideraciones y recomendaciones, las cuales se resumen a continuación.

- Hubo consenso respecto a la posibilidad de realización de estudios de marcaje en jurel, se indicó que hay que considerar los resultados de experiencias anteriores utilizando tipos de marcas que sean viables (*e.g.*, marcas internas), siendo una ventaja que el destino actual de la pesca sea mayoritariamente el consumo humano, ya que las marcas más visibles pueden ser detectadas en las plantas de proceso y alta mar. Se destacó que existe una buena disposición a nivel nacional e internacional para apoyar el tema y capacidad para hacer recuperación de marcas. Sin embargo, lo importante es asegurar el financiamiento y hacer convenios internacionales para rescatar marcas, mediado por un análisis de factibilidad.
- Se valoró como un punto muy importante la posibilidad de que se desarrolle una instancia de análisis crítico hacia la estructura poblacional. Los resultados de este proyecto son un buen punto de partida además se indicó que se debieran realizar esfuerzos en la búsqueda de un sistema que pueda clasificar con argumentos científicos las hipótesis de forma insesgada, indicándose por ejemplo cuáles son los supuestos básicos para utilizar cada técnica en relación a la estructura poblacional del recurso. En este caso, se indicó apropiado que se mejore la calidad del arbitraje de los documentos científicos generados en el área.
- Una conclusión transversal obtenida de este taller, fue que se debe trabajar en un relato común poniendo la evidencia al servicio de una postura frente a la estructura poblacional de jurel, otorgándole fortaleza a los datos presentes, e integrando todas las piezas de información. Se indicó que hay un desafío al año 2021, para preparar un producto contundente con toda la información disponible para plasmar una posición común para la OROP-PS, y este taller se aprovechó como instancia para aglutinar visiones de distintos sectores y *expertise* para aunar una línea en este tema.

Finalmente la parte ejecutora del proyecto agradeció a todos su participación, destacándose que esta instancia fue una iniciativa única en donde han coincidido distintos actores como, científicos, administradores, miembros de comités de manejo, para construir entre todos y de forma integral el conocimiento frente a una posición país.

#### *6.6.2.6. Consolidación participativa de debilidades, brechas y líneas de investigación*

Finalmente en la Tabla XX, se consolidó el cuadro priorizado de debilidades, brechas y lineamientos de investigación y consensado de forma participativa por los distintos asistentes al taller, además quedaron incorporadas en estos textos las recomendaciones que mejoraron su definición y entendimiento hacia la estructura poblacional del recurso jurel.



Tabla XX. Cuadro de debilidades, brechas y lineamientos consolidado a partir de la priorización y las recomendaciones aportadas de forma consensuada por los distintos asistentes al taller.

| N° | Ámbito   | Debilidad   | Brecha  | Lineamiento   |
|----|--|---|---|---|
| 1  | Evaluar mediante evaluación de estrategias de manejo el impacto en la sustentabilidad poblacional del manejo mediante distintas hipótesis de stocks  | No existe una aproximación modelo-basada que aborde las implicancias hacia la sustentabilidad poblacional bajo distintas hipótesis de estructura poblacional. | Establecimiento de un grupo de trabajo inter-institucional inclusiva de los distintos actores de la pesquería que aborde esta problemática de forma conjunta. | Desarrollo de una estrategia que permita la formalización de un grupo de trabajo hacia la modelación basada en estrategias de manejo hacia el jurel.  |
| 2  | Existen diversos grupos de investigación sobre la dinámica poblacional de jurel, sin embargo no existe una instancia de trabajo conjunto para analizar el peso de las evidencias acumuladas para la adopción de hipótesis de estructura poblacional. | Es necesario establecer una instancia que analice de forma crítica las evidencias acumuladas hacia la definición de una hipótesis de estructura poblacional.  | No existe una instancia de reunión para conducir un análisis crítico de las evidencias acumuladas.  | Propender una instancia de reunión científica regional para desarrollar un análisis crítico de las evidencias acumuladas en el análisis de estructura poblacional de jurel.   |
| 3  | El proyecto aborda el hábitat potencial de jurel (desove, juveniles y adultos). Es necesario avanzar hacia el estudio del hábitat realizado para evidenciar cambios temporales en la distribución espacial.  | La asimetría actual de la información referenciada en tiempo y espacio es una limitante importante.   | Conocimiento de cambios espacio-temporales en el hábitat realizado de jurel a lo largo de toda su distribución espacial.                                      | Trabajo conjunto a nivel regional (Pacífico suroriental) donde se incorpore información de presencia de jurel e información auxiliar para distintas fases del ciclo de vida (i.e. capturas, cruceros de investigación, juveniles, etc). |
| 4  | La modelación de la historia de vida temprana de jurel no incluye procesos bioenergéticos hacia la sobrevivencia (i.e. crecimiento, alimentación) ni campos de predadores como fuente de mortalidad.   | Los patrones de distribución de pre-reclutas de jurel mediante modelación biofísica no incluyen fuentes de mortalidad asociadas a procesos de alimentación o  | Conocimiento sobre los factores críticos que fomentan la sobrevivencia temprana del jurel hacia el reclutamiento.   | Diseñar un estudio de campo que aborde procesos bioenergéticas hacia la sobrevivencia temprana de jurel (e.g. alimentación, crecimiento, predación).  |

|   |   |   |  |  |
|---|---|---|--|--|
|   |   | interacción interespecífica.  |  |  |
| 4 | El actual estudio ha sido realizado para un período de baja abundancia poblacional puede plantear dificultades de extrapolación de los procesos a periodos previos (altos niveles de abundancia poblacional).                                       | El hábitat realizado de jurel podría haber sido distinto previo al año 2001 (inicio de estudio) y por lo tanto los patrones modelados ser informativos de diferentes procesos poblacionales.  | Conocimiento de información referenciada en tiempo y espacio para el periodo previo a 2001.  | Reconstrucción espacio y tiempo referenciada de la pesquería histórica de jurel para periodos previos a 2001.  |
| 5 | Modelos espaciales no incorporan relaciones depredador-presa que podrían potencialmente modular la distribución de adultos de jurel. Es preciso mejorar la modelación de la distribución de zooplancton en modelación biogeoquímica.                | Modelos espaciales no incorporan la mortalidad asociada a relaciones interespecíficas de depredador-presa, ni la de alimentación, que podrían potencialmente modular los patrones de distribución de adultos de jurel.                                    | Conocimiento sobre niveles de mortalidad asociadas a la relación depredador-presa y tasas de alimentación.   | Consolidación de un programa de seguimiento ecosistémico del hábitat de jurel que incluya las relaciones densodependientes e independientes interespecíficas entre la disponibilidad de alimento, depredadores, competidores y condiciones ambientales. Y avanzar en el desarrollo e implementación de modelos endtoend. |
| 6 | Existe la necesidad de evaluar de forma directa la conectividad dentro del área de distribución en distintas etapas del ciclo de vida (i.e. alimentación, desove, migración de juveniles) para validar la modelación del uso potencial del hábitat. | La modelación basada en el hábitat potencial entrega el marco ambiental de distribución de jurel, sin embargo no resuelve el nivel de mezcla y sus migraciones entre distintas regiones del área de distribución y en distintas etapas del ciclo de vida. | Conocimiento de patrones de conectividad poblacional (vía migraciones) dentro del rango de distribución espacial bajo un ambiente variable y en distintas fases del ciclo de vida. | Desarrollo de un programa de marcaje y recaptura en jurel coordinado regionalmente (Pacífico suroriental).   |
| 7 | La modelación basada en el hábitat sugiere la incorporación de jurel en regiones donde  | El estudio del comportamiento de jurel  | Conocimiento de los niveles de tolerancia de jurel frente  | Monitoreo del área de distribución de jurel en el extremo norte de   |

|  |  |  |   |  |
|--|--|--|---|--|
|  | <p>la mínima de oxígeno es superficial (sobre de 50 m de profundidad). Existe la necesidad de evaluar estos escenarios mediante estudios de campo.</p> | <p>bajo condiciones extremas como la presencia de mínima de oxígeno requiere de evaluación de escenarios locales con estudios de campo. La modelación basada en el hábitat potencial entrega el marco ambiental de distribución de jurel, en este caso la mínima de oxígeno es considerada una variable crítica,</p> | <p>a condiciones extremas como la mínima de oxígeno mediante estudios de campo de regiones con presencia de ZMO como el norte de Chile.</p> | <p>Chile y su relación con procesos de cambio en la distribución vertical de variables críticas (i.e. oxígeno disuelto, oferta de alimento, nutrientes, etc). Que consideren estudios que complementen registros de presencia de jurel y muestreo oceanográfico (e.g. acústica + perfiladores) para analizar posibles incursiones de jurel en rangos extremos de tolerancia (i.e. zona mínima de oxígeno).</p> |
|--|--|--|---|--|

## 7. DISCUSIÓN

---

De acuerdo a las bases técnicas y a los objetivos de este proyecto, uno de los principales focos de interés corresponde al levantamiento y unificación de información para la definición de la estructura poblacional del jurel en el Pacífico suroriental. La definición de la estructura poblacional en especies pelágicas es un tema complejo y su conceptualización no es trivial. Para identificar las distintas herramientas y metodologías utilizadas para estas definiciones, en este proyecto se elaboró el documento “Definición de stock hacia el manejo del jurel en el Pacífico sur: aspectos metodológicos para un manejo integrado” el cual se presenta en el Anexo V. Este documento fue diseñado como una herramienta de asesoría para la contraparte técnica de este proyecto y fue sociabilizada como información base para la discusión relacionada con los resultados de este proyecto y su implicancia hacia la asesoría científica en el marco de la OROP-PS.

Como ha sido descrito en el Anexo V, la definición de la estructura poblacional en especies pelágicas es un tema complejo y su conceptualización no es trivial. La naturaleza altamente variable de las poblaciones pelágicas, los cambios drásticos en sus niveles de abundancia, su sensibilidad a los cambios ambientales, sus ciclos de vida complejos y el ser sustento de importantes pesquerías alrededor del mundo son aspectos que dificultan la estructuración espacio temporal de las poblaciones y constituyen un desafío en el diseño de modelos poblacionales que rescaten todos estos aspectos.

En este punto, el jurel representa una especie de alta complejidad. Desde el punto de vista de la explotación pesquera, ha sustentado una actividad industrial desde la década de los '70 y durante las dos décadas posteriores la especie se convirtió en uno de los stocks más explotados en el mundo, con capturas en torno a los 5 millones de toneladas y biomasa total evaluada en más de 22 millones de toneladas (SPRFMO, 2018). Durante este periodo, la población ocupó vastas áreas en aguas subtropicales del Pacífico sur en donde fue explotado desde la costa sudamericana, entre Ecuador y el sur de Chile, hasta Nueva Zelanda por diferentes flotas nacionales e internacionales. Después de este fuerte incremento, los desembarques manifestaron una caída sustancial desde fines de los '90, cuando en los extremos de distribución las pesquerías

disminuyeron dramáticamente (Gretchina, 2015). En los años recientes, las capturas han permanecido por debajo de las 500 mil toneladas, con leves incrementos desde 2016. Dichas fluctuaciones, asociadas a cambios en la disponibilidad pesquera producto de cambios espaciales de la población, han generado altos niveles de incertidumbre respecto al estado global del stock y a su estructuración poblacional a lo largo del Pacífico sur. Para analizar estos aspectos, en 2006 se creó la Organización Regional de Pesca del Pacífico Sur (OROP-PS), la que tiene dentro de sus principales objetivos el manejo del stock de jurel en el Pacífico sur.

En consideración de su naturaleza fluctuante, su amplia distribución espacial, su ciclo de vida complejo, y como es común a muchas poblaciones pelágicas, el conocimiento disponible para la población de jurel resulta insuficiente y constituye un desafío hacia la modelación de su dinámica poblacional. En particular, continua siendo un desafío el entendimiento de las interacciones entre la distribución de jurel y los principales procesos ambientales, y finalmente la estructura y organización poblacional del jurel a lo largo de su distribución.

El rol del hábitat como modulador de la estructura espacial de las poblaciones de peces pelágicos ha sido ampliamente destacado en las últimas décadas (Barange *et al.*, 2009). Como ha sido destacado por Gerlotto *et al.*, (2012), nuevas perspectivas emergen cuando la SPRFMO adoptó el concepto de “hábitat potencial” (Zwolinski *et al.*, 2010) para definir la distribución del jurel en el Pacífico sur. De acuerdo a lo descrito, este concepto tiene tres aplicaciones prácticas principales: i) permite generar definiciones *a priori* respecto al área de distribución de una especie con el objetivo de definir diseños para la exploración o muestreo de una pesquería para restringir el área y optimizar el esfuerzo en la evaluación (Zwolinski & Demer, 2012); ii) permite extrapolar la abundancia evaluada directamente por un crucero en una sub-área para obtener estimados de abundancia y/o biomasa a lo largo de toda su área de distribución (SPRFMO,2012), y; iii) provee de una herramienta para analizar como la expansión o contracción del hábitat puede afectar la abundancia y distribución de una población pelágica (Bertrand *et al.*, 2016).

De esta forma, el entendimiento de la estructura poblacional del jurel supone un problema complejo debido a su amplia distribución geográfica y a la consideración que la mayor proporción de su población habita el sistema de corriente de Humboldt, el cual es uno de los

sistemas con mayor variabilidad ambiental (Parada *et al.*, 2013), donde fluctuaciones de distintas escalas espacio-temporales que impactan sobre las condiciones hidrológicas (Escribano & Morales, 2012), la disponibilidad de alimento (Thomas, 1999) y la estructura de la trama trófica pelágica (Thiel *et al.*, 2007); pueden finalmente inducir cambios importantes en la abundancia y distribución de poblaciones de peces como el jurel, las cuales además sustentan importantes actividades humanas en zonas económicas exclusivas de los países ribereños y en aguas internacionales de altamar (Thiel *et al.*, 2007).

Para conceptualizar la estructura de los stocks de jurel en el Pacífico sur hacia un manejo pesquero integrado, la SPRFMO ha desarrollado hipótesis estructurales, las cuales han evolucionado con el paso del tiempo y han estado basadas en información existente y en información nueva presentada al comité científico de la SPRFMO. Las hipótesis planteadas inicialmente (SPRFMO, 2008) pueden ser resumidas de la siguiente manera:

- i) Hipótesis 1: existen dos stocks separados, uno distribuido en la costa de la zona centro-sur de Chile y su zona oceánica adyacente; el otro distribuido en las costas de Perú y su zona oceánica adyacente.
- ii) Hipótesis 2: existe un stock para el Pacífico sur que se distribuye entre las costas de Ecuador y el sur de Chile y se extiende hacia la zona oceánica alcanzando las costas de Nueva Zelanda y Australia.
- iii) Hipótesis 3: existe un stock para el Pacífico sur que se distribuye entre las costas de Ecuador y el sur de Chile y que se extiende hacia la zona oceánica hasta aproximadamente los 120°W.
- iv) Hipótesis 4: existen múltiples stocks distribuidos en i) costa de Perú y su zona oceánica adyacente; ii) zona centro sur de Chile y su zona oceánica adyacente; iii) stock del Pacífico sur central distribuido solamente en altamar; iv) stock del extremo oeste, distribuido en las costas de Nueva Zelanda, Tasmania y Australia.

En reuniones posteriores del grupo científico de la SPRFMO (Gerlotto *et al.*, 2010; Gerlotto & Dioses, 2013) y por medio de publicaciones científicas (Gerlotto *et al.*, 2012) se analizan diferentes conceptos teóricos de la dinámica y los posibles escenarios de evolución en la estructura poblacional del jurel en términos ecológicos. Para lo anterior, se utilizó el marco teórico conceptual desarrollado por Kritzer & Sale (2004) (Figura 64), quienes sintetizaron en tres opciones las posibilidades de estructuración espacial de las poblaciones:

i) una red de poblaciones cerradas, donde cada población dentro de su área de distribución global (en este caso el "cinturón de jurel") es independiente y no existe intercambio de individuos entre las poblaciones. Las poblaciones son completamente independientes y habitan segregadas espacialmente. Este patrón, en el largo plazo, podría conducir a especiación.

ii) una población parchosa, donde hay un ciclo único para toda la población y donde los individuos se mueven frecuentemente entre parches del hábitat y pueden reproducirse en varios parches durante su vida (Ovaskainen & Hanski 2004 *fide* Gerlotto *et al.*, 2012). Este esquema considera la existencia de una zona de desove común para toda la población o la posibilidad de que cualquier individuo de la población desove en cualquier área de desove, lo que implica que los "parches" son principalmente áreas de alimentación y crecimiento. Este esquema se ajusta, a su vez, a la hipótesis de "superpoblación" planteada por Gretchina *et al.* (2013) que considera un esquema conectado para todo el Pacífico sur.

iii) una metapoblación, donde las sub-unidades poblacionales tienen ciclos particulares, pero donde algunos intercambios ocurren entre ellas. Los individuos permanecen todo su ciclo de vida en su población natal, y los movimientos entre poblaciones son infrecuentes, aunque la tasa de migración es lo suficientemente alta como para permitir la eventual recolonización de parches de hábitat donde una población local se ha extinguido (Ovaskainen & Hanski 2004 *fide* Gerlotto *et al.*, 2012). Cada sub-unidad es autónoma pero unos pocos individuos mantienen contacto entre las sub-unidades manteniendo la mezcla genética.

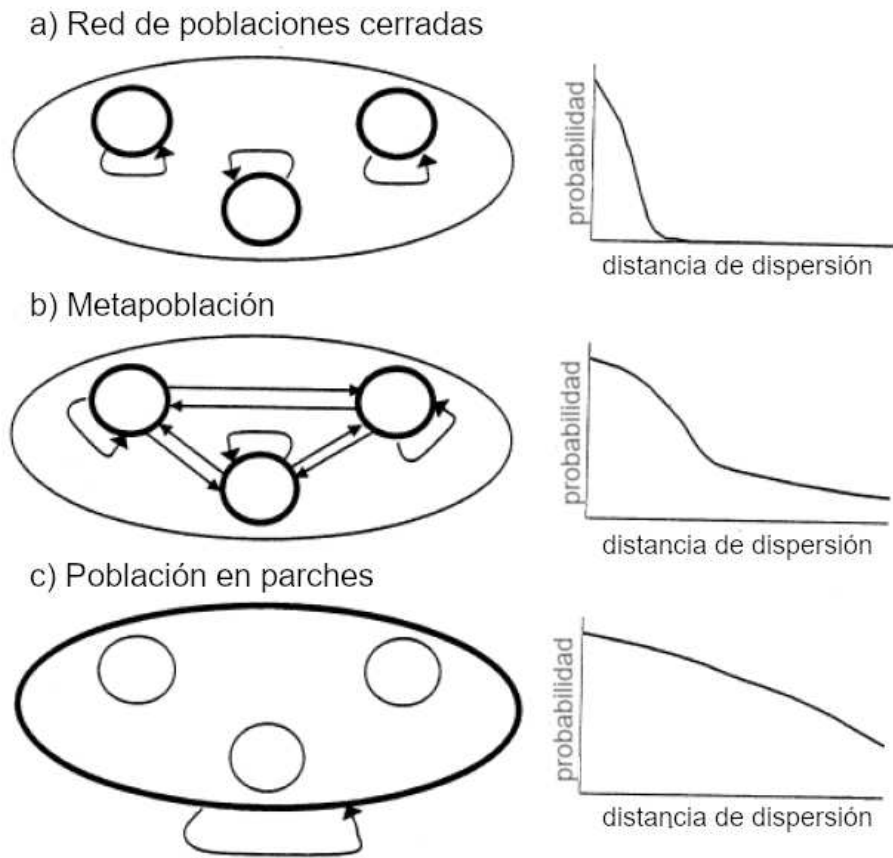


Figura 64. Tres esquemas de poblaciones espacialmente estructuradas, con curvas de dispersión para cada población local; a) red de poblaciones locales cerradas sin intercambio entre ellas; b) metapoblación, y; c) población con parches de alta densidad distribuidos en una "superpoblación" (modificada de Kritzer & Sale, 2004).

Uno de los aspectos a destacar de los esquemas propuestos por Kritzer & Sale (2004) resumidos en la Figura 2 son las escalas de correlación y conectividad poblacional, así como las distancias de dispersión. En este esquema, los círculos representan unidades discretas, dentro de una región de distribución circunscrita por el ovalo exterior. Las líneas de mayor grosor definen la escala espacial en las cuales las fluctuaciones poblacionales están correlacionadas. Las flechas conectan la fuente de progenie con sus eventuales destinos (i.e. reclutamiento). Las poblaciones locales cerradas experimentan dinámicas independientes sin intercambio ecológico significativo de individuos. Una metapoblación puede verse como una red de poblaciones parcialmente cerradas. Existe cierto grado de autoabastecimiento y dinámica independiente, pero esto se combina con un intercambio no trivial con otras poblaciones. Las distancias de dispersión son



predominantemente localizadas, pero con niveles identificables de exportación a otras poblaciones locales. Una población parchosa es efectivamente una única población cerrada, dentro de la cual los individuos se distribuyen entre grupos discretos. Las distancias de dispersión se distribuyen de manera más uniforme, y las poblaciones locales se basan esencialmente en un conjunto larval común.

El adoptar una definición de la estructura de stocks para especies pelágicas requiere de un entendimiento las condiciones ambientales que estructuran el hábitat y de las principales relaciones biofísicas asociadas a los ciclos biológicos de la especie, así como el entendimiento de los rasgos que definen la dinámica poblacional. De esta manera, a continuación se revisarán los principales rasgos biológicos del jurel y su relación con las variabilidad espacio-temporal de su hábitat, considerando hallazgos previos y los resultados que emanan del presente proyecto, y sus impactos hacia la adopción de un esquema de estructura poblacional para el jurel en el Pacífico sur, con énfasis en su margen oriental de distribución.

### 7.1. Aspectos biológicos

El jurel *Trachurus murphyi* (Nichols, 1920), como la mayoría de las especies del género *Trachurus*, se caracteriza por una distribución amplia en áreas tropicales y subtropicales de los océanos. Morfológicamente, el jurel tiene características anatómicas muy similares al holotipo *Trachurus trachurus* (Gerlotto *et al.*, 2012). Estas especies se caracterizan por una esperanza de vida media-alta alcanzando en promedio entre 15 y 30 años de edad ([www.fishbase.org](http://www.fishbase.org)). La madurez sexual es alcanzada a los 20-30 cm de longitud corporal equivalente a 2-4 años de edad (Abramov & Kotlyar, 1980; Adrianov, 1985; Nekrasov, 1994; Leal *et al.*, 2013; Perea *et al.*, 2013), existiendo antecedentes de madurez más temprana en machos que en hembras (Adrianov, 1985; Leal *et al.*, 2013) lo que se ha asociado a diferencias en el costo energético entre la reproducción y crecimiento entre sexos. El jurel es un desovante parcial asincrónico (Leal *et al.*, 2013) con frecuencia de desove media de 7 días (Sepúlveda *et al.*, 2005) y fecundidad parcial de >50.000 ovocitos (Perea *et al.*, 2013). El desove de jurel es pelágico (Santander & De Castillo, 1983) con tiempos desarrollos que van entre 3 y 8 días dependiendo de la temperatura del medio, los cuales generan larvas de desarrollo lento con una duración larval pelágica media en torno a los 90 días (Santander & Flores, 1983). Las especies de este género manifiestan migraciones

verticales diurno-nocturno, pudiendo ser observadas en capas profundas durante el día (hasta 150-300 m; Hancock *et al.*, 1995; Bertrand *et al.*, 2004) dependiendo de la profundidad del fondo, aunque también se sugiere que la profundidad de la oxiclina limita su extensión vertical (Bertrand *et al.*, 2004). La alimentación de las especies de este género es mayoritariamente compuesta de crustáceos, micronecton, larvas de peces y pequeños cefalópodos (Gerlotto *et al.*, 2012).

#### 7.1.1. Patrón temporal del desove

El jurel manifiesta un desove pelágico con fertilización externa, sin dimorfismo sexual y desove parcial asincrónico. La proporción sexual ha sido descrita 1:1 en la mayoría de los estudios específicos (Adrianov, 1985; Sepúlveda *et al.*). En general, los estudios reproductivos histológicos coinciden en que la temporada reproductiva de *T. murphyi* ocurre en la transición primavera-verano austral con probabilidad de desove entre agosto y marzo (Dioses *et al.* 1989; Ruiz *et al.*, 2008; Leal *et al.*, 2013; Vásquez *et al.*, 2016). El periodo de octubre-diciembre es identificado como el máximo en términos de actividad reproductiva, lo que es común para estudios realizados en Perú (Santander & De Castillo 1971; Perea *et al.*, 2013), norte de Chile (Perea *et al.*, 2013), la zona centro-sur de Chile (Aracena *et al.*, 1998; Oyarzún *et al.*, 1998; Leal *et al.*, 2013) y la zona oceánica en altamar (Adrianov *et al.*, 1994). Este es un primer punto a considerar respecto a aspectos poblacionales de jurel: existe una sincronía en el ciclo reproductivo anual, el cual considera un desove en primavera-verano con máximo en octubre-diciembre.

#### 7.1.2. Área de desove

De acuerdo a los preceptos establecidos anteriormente (ver Figura 64), una característica clave para la discusión de la estructura poblacional de especies pelágicas es la conformación espacial de las áreas de desove. La existencia de múltiples áreas de desove, independientes entre sí, es uno de los principales promotores de la existencia de poblaciones cerradas o de la eventual existencia de metapoblaciones. En relación a la actividad de desove, los registros históricos de estadíos tempranos de jurel muestran una amplia cobertura a lo largo del Pacífico suroriental, abarcando las zonas costeras de Perú, Chile norte y central; y la zona oceánica frente a Chile centro-sur. De acuerdo a las densidades registradas, existe un gradiente sur a norte en la

magnitud del desove con niveles en la zona oceánica frente a Chile centro-sur que exceden en un orden de magnitud a lo reportado en el norte de Chile (Braun & Valenzuela, 2008) y en el sector costero de Perú (Ayon & Correa, 2013), incluso considerando que esta última información se trata en una integración decadal de densidades de huevos y larvas registradas (Vásquez *et al.*, 2016). Desde un punto de vista histórico, observaciones de estadios tempranos de jurel en el Pacífico suroriental entre 1972 y 2005 muestran una amplia distribución y cobertura. Estas observaciones provenientes de registros de la flota pesquera rusa, de cruceros de evaluación de biomasa desovante realizados en Chile (Proyectos Condición Biológica de jurel, FIPA) y cruceros de evaluación realizados en Perú son resumidas en la Figura 65.

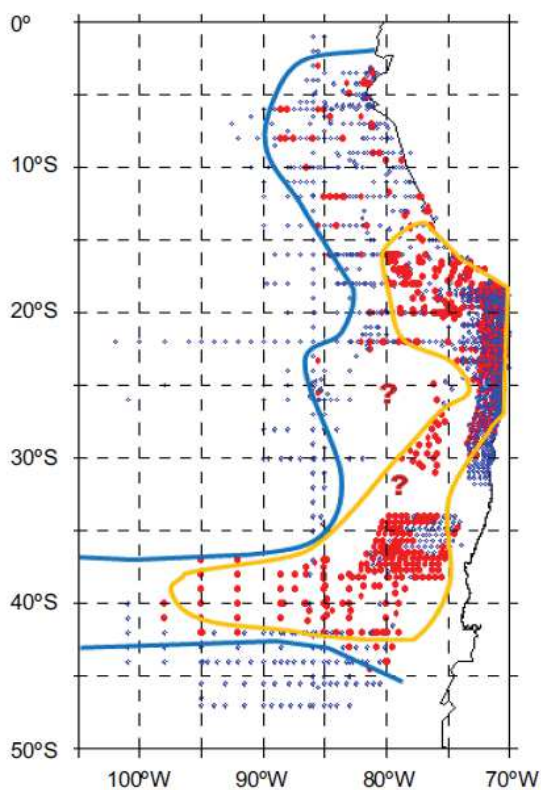


Figura 65. Distribución general de huevos de jurel en el Pacífico suroriental con observaciones realizadas entre 1972 y 2005. Puntos azules indican estaciones de muestreo sin presencia de huevos de jurel y puntos rojos donde huevos fueron observados. Línea azul muestra la delimitación de registros con presencia de huevos (tomada de Gerlotto *et al.*, 2012).

Los registros históricos manifiestan una continuidad espacial en el área donde se pueden encontrar huevos de jurel en el Pacífico suroriental, sugiriendo una extensa área de reproducción, donde el desove es efectivamente realizado en los sitios en que los adultos se distribuyan. Sin embargo, algunos autores han sugerido la ocurrencia de dos áreas principales de desove situadas en Perú y Chile central (Evseenko, 1987; Serra, 1991; Nesterov *et al.* (2007). En la zona oceánica de Chile centro-sur el desove de jurel ha sido ampliamente descrito (e.g. Barbieri *et al.*, 2004; Cubillos *et al.*, 2008; Vásquez *et al.*, 2016) con actividad persistente en el tiempo, consistencia espacial con una ubicación media entre 30°S y 40°S, y variabilidad interanual de la abundancia del desove consistente con el tamaño poblacional de jurel. La presencia de actividad de desove en Perú ha sido descrita por diversos autores, la cual se manifestó de forma persistente en las décadas de 1980 y 1990 (Santander & Flores 1983; Gorbunova *et al.* 1985) y con menor recurrencia de reportes en los años posteriores, aunque existen registros de larvas de jurel en bajas densidades a lo largo de todo el sector costero de Perú (Ayón & Correa, 2013). Finalmente, en el norte de Chile existen reportes de actividad de desove de jurel en las décadas de 1990 y 2000 con variabilidad entre años, pero persistencia de observaciones positivas en el sector costero (Braun & Valenzuela, 2008). El desove de jurel se encuentra estrechamente ligado a la presencia del Frente Subtropical que migra al sur durante la primavera austral y la variabilidad latitudinal del centroide de desove se encuentra asociado a la variabilidad interanual del frente (Gretchina *et al.*, 1998; Cubillos *et al.*, 2008; Vásquez *et al.*, 2013). En el presente estudio, se establece un esquema de modelación hábitat-basada del desove de jurel el cual establece que el desove de jurel se desarrolla preferentemente en aguas entre 14 y 18°C las cuales durante la época principal de desove se extienden desde el sector oceánico frente a Chile central, hasta las costas de Perú siguiendo la ubicación del frente subtropical, generando una extensa franja de "condiciones favorables" para el desove, la cual no muestra discontinuidades espaciales a lo largo del área de distribución.

De esta forma, en relación al área de desove se puede establecer que: i) el jurel tiene la potencialidad de desovar en un amplio rango latitudinal que va desde el sector costero de Perú hasta la zona oceánica frente al centro-sur de Chile; ii) las condiciones para el desove de jurel están estrechamente relacionadas al frente subtropical, el cual durante la época de desove se extiende desde la zona oceánica frente a Chile centro-sur hasta la zona costera del norte de Chile

y Perú; iii) la densidad de huevos y el tamaño del área de desove presenta un gradiente sur-norte con los máximos niveles registrados en la zona oceánica frente a Chile centro-sur; iv) el nivel de ocupación del área favorable al desove parece estar relacionada con el tamaño poblacional, volviéndose más parchosa ante tamaños poblacionales bajos.

### 7.1.3. *Historia de vida temprana, transporte larval*

De acuerdo a las definiciones establecidas por Kritzer & Sale (2004), uno de los aspectos clave para adoptar una hipótesis de estructura poblacional es la conectividad entre poblaciones o parches locales a lo largo del rango de distribución de una especie. Los mecanismos poblacionales a través de los cuales se puede generar el intercambio de individuos en un sistema pelágico son las migraciones activas de individuos adultos o la dispersión de estadíos tempranos mediante transporte advectivo. En el caso de jurel, la historia de vida temprana es un aspecto no completamente comprendido y la observación de los patrones espaciales de post-larvas y juveniles adquiere una dificultad superior. Sin embargo, las primeras descripciones de la zona de desove principal de jurel en la zona oceánica frente a Chile centro sur sugerían un patrón de transporte pasivo desde la zona oceánica hacia el sector costero asociado al patrón de corrientes predominante (Gretchina, 1998). De acuerdo a esto, investigaciones posteriores evidenciaron un patrón espacial edad-específico para larvas de jurel hasta 45 días con larvas de mayor edad más cercanas al sector costero y larvas recién eclosionadas más cercanas al núcleo de desove (Vásquez *et al.*, 2013). Dicho patrón espacial estuvo asociado a la dirección y magnitud de corrientes que se incrementa en la ubicación del frente subtropical, y se orienta hacia la costa en la zona oceánica, deflectándose al norte en la zona de transición costera (Chaigneau & Pizarro, 2005; Vásquez *et al.*, 2013). Este patrón de corrientes fue consistente con la secuencia de observación de una cohorte originada en el sector oceánico frente a Chile centro-sur y detectada por la flota Europea en sus actividades de captura comercial (Corten & Janusz, 2011; Corten, 2014). Por otra parte, bajo la consideración de tres áreas de desove discretas (Perú, norte de Chile y centro-sur de Chile) estudios posteriores basados en modelación biofísica evidenciaron que los procesos de circulación oceánica promueven conectividad e intercambio de individuos entre distintas regiones de distribución de jurel en el Pacífico sur-oriental, sugiriendo una superposición de la distribución probable de juveniles de jurel originados en distintas regiones de desove (Vásquez *et al.*, 2016; este estudio). En consecuencia, respecto a la historia de vida

temprana de jurel es posible establecer que i) los procesos de circulación oceánica asociados al frente subtropical (zona de desove) promueven el transporte de huevos, larvas y juveniles de jurel desde la región oceánica frente a Chile centro sur hacia el sector costero; ii) la dispersión de estadios tempranos de desarrollo en jurel desde distintas regiones de desove promueve el intercambio de individuos y extiende la zona de distribución probable de juveniles, las cuales estarían conectadas con una zona de crianza ubicada en la región costera del norte de Chile y sur de Perú.

#### *7.1.4. Distribución espacial*

Durante el periodo de máxima abundancia el jurel fue registrado ocupando una amplia área en aguas subtropicales del océano Pacífico sur. En este contexto, las primeras aproximaciones al análisis de distribución fue realizada a partir de información de flota pesquera y cruceros de investigación realizados soviéticos realizadas entre 1977 y 1990 (Gretchina, 1998). Siguiendo el movimiento de la flota pesquera y analizando los registros oceanográficos y de ictioplancton, dichas investigaciones definieron que la extensión del jurel iba desde la zona costera de Ecuador, Perú y Chile, extendiéndose hasta Nueva Zelanda y Tasmania frente a Chile centro-sur. Además, establecieron que el límite sur del jurel estaba limitada por las aguas sub-antárticas de baja temperatura, con variabilidad interanual del límite sur entre 40° y 45°S (Gretchina, 1998). En periodos de baja abundancia, la distribución se reduce y las agregaciones tienden a concentrarse en el Pacífico suroriental y su extensión hacia el oeste tiende a desaparecer (Gretchina, 2008). Al mismo tiempo, se ha propuesto que la distribución espacial de jurel se contrae bajo escenarios de baja abundancia, volviéndose altamente parchosa y concentrándose en el área oceánica frente a Chile centro-sur, la cual sería la fuente de individuos bajo una perspectiva metapoblacional (Gerlotto *et al.*, 2012).

#### *7.1.5. Migración vertical*

El proceso de migración vertical de jurel ha sido asociado a migraciones diurno-nocturno con mayor agregación durante la noche, cuando se distribuye más superficial y más desagregado durante el día donde puede migrar a profundidades >100 metros (Betrand *et al.*, 2004). Este comportamiento ha sido vinculado a distribución y disponibilidad de presas que se profundizan durante el día, ingresando incluso a la zona de mínima de oxígeno (ver punto 5 para detalles). La

amplitud de las migraciones verticales está generalmente relacionada con la distancia de la costa, mientras que a distancias menores a 10 mn la extensión máxima es de 50 metros, en la zona oceánica puede alcanzar 100-200 metros de extensión. La presencia de la mínima de oxígeno también puede condicionar la extensión vertical, lo que puede explicar las mayores amplitudes observadas en la zona centro sur de Chile.

## 7.2. Indicadores poblacionales

### 7.2.1. Genética

Uno de las principales herramientas para analizar la estructuración poblacional son los estudios genéticos. En jurel, varios estudios han sido orientados en esta línea utilizando diversos marcadores genéticos, estableciendo que debido a su naturaleza migratoria que promueve intercambios de individuos, no se detectan diferencias genéticas en su distribución geográfica. Así, Galleguillos & Torres (1988) analizaron muestras de jurel provenientes desde Chiloé, Talcahuano, Juan Fernández, Iquique, Perú y muestras oceánicas (39°24'S; 76°45'W) mediante *loci* enzimáticos polimórficos no se detectan diferencias significativas entre ellas, lo que fue ratificado por Arancibia *et al.* (1996) con marcadores de la misma naturaleza. Posteriormente, mediante una técnica con mayor nivel de polimorfismo (PCR RFLP – ITS2) y con muestras que adicionan muestras del Pacífico sur occidental (Nueva Zelanda y Australia) se ratifica la homogeneidad genética (Sepúlveda *et al.*, 1996). Posteriormente, mediante ADN mitocondrial y nuclear (*loci* microsatélites heterólogos), Cárdenas *et al.*, (2009) analiza muestras provenientes de todo el Pacífico sur con resultados que no dieron cuenta de diferencias genéticas entre las zonas analizadas. Finalmente, Serra *et al.* (2010) mediante utilizaron *loci* micro-satélites heterólogos utilizados a lo largo de toda su distribución y no fueron determinantes para encontrar diferencias entre las diferentes zonas analizadas, corroborando los resultados encontrados en estudios anteriores. En consecuencia, estudios genéticos establecen que no existen antecedentes de heterogeneidad genética en el Pacífico sur, sugiriendo que existe una población genética de origen único en el Pacífico sur.

### 7.2.2. Micro-química de otolitos

Bajo la consideración de que pueden existir diferencias entre sub-unidades poblacionales o stocks que no se expresan genéticamente, estudios han analizado las propiedades biogeoquímicas de los otolitos para diferenciar stocks en jurel utilizando información desde Perú, norte de Chile, zona oceánica frente a Chile centro-sur y Nueva Zelanda (Serra *et al.*, 2010; Ashford *et al.*, 2011). Los resultados mostraron diferencias entre los periodos de alimentación y reproducción y evidencia de heterogeneidad espacial entre las áreas muestreadas. Sin embargo, no se encontraron evidencias que indiquen heterogeneidad poblacional regional entre el sur de Chile, norte de Chile y norte del Perú durante el período de desove cuando cualquier grupo subyacente es probable esté más segregado. Hubo fuerte evidencia de estructuración regional durante el período de alimentación entre el sur de Chile y centro-norte del Perú, pero ninguna entre los peces muestreados en el codo de Arica con el sur de Chile o el centro-norte de Perú. Además, estos estudios concluyen que no existen señales de segregación en la microquímica del otolito en su fase de desarrollo temprana entre peces capturados en Perú, Chile y Nueva Zelanda, sugiriendo una historia de vida temprana común. De acuerdo a lo anterior, los análisis de microquímica de otolitos señalan que existe evidencia de una historia de vida temprana común para peces colectados en Perú Chile y Nueva Zelanda y cierto nivel de segregación de peces adultos, la que se establece principalmente durante la época de alimentación.

### 7.2.3. Parásitos

Como ha sido descrito en el capítulo anterior, el parasitismo presenta dos características interesantes para discriminar unidades poblacionales o stocks: i) algunos parásitos son altamente selectivos a nivel de especies o incluso poblaciones; ii) algunos parásitos son muy selectivos en su ubicación geográfica con bajo nivel de sobrevivencia fuera de su área endémica. Parásitos metazoarios han sido analizados para el jurel con muestras provenientes de la costa de Chile y Perú norte (Oliva *et al.*, 1999), desde Iquique a Valdivia (George-Nascimento, 2000) y; desde norte y sur de Perú, norte y centro-sur de Chile y Nueva Zelanda (Serra *et al.*, 2010). Los resultados basados en análisis univariados sugieren dos poblaciones: centro-norte de Perú y Chile (con migración norte sur), además de un stock diferenciado en Chiloé; mientras que el segundo estudio sugiere diferencias entre el norte y sur de Chile. Sin embargo, al agregar la talla de los peces muestreados como variable explicatoria, los resultados parecen estar más relacionados con



la talla de los peces que con los sitio de muestreo. Los resultados univariados relacionados con la carga parasitaria sugieren ciertas diferencias entre los peces capturados en el norte de Perú y los capturados desde el sur de Perú al sur, sin embargo dichas diferencias no son concluyentes cuando se analizan especímenes de la misma talla, pareciendo ser este factor detonante de las diferencias.

#### 7.2.4. Crecimiento

Estudios asociados al crecimiento de jurel y la obtención de los parámetros de crecimiento han sido llevados a cabo principalmente mediante análisis de otolitos y estudios de progresión modal (e.g. Castillo & Arrizaga, 1987; Nosov & Kalguchin 1990; Arcos & Gretchina 1994; Cubillos & Arancibia 1995; Li *et al.* 2011; Dioses 2013; Cisterna & Arancibia, 2017; Cerna & Moyano, 2016). Los resultados muestran una amplia gama de curvas de crecimiento atribuibles a aspectos metodológicos y a la región donde se realizaron los estudios. De acuerdo a Goicochea *et al.*, (2013), Diaz (2013) y Dioses (2013) resultados provenientes del margen norte de distribución de jurel (Perú) muestran que los jureles crecerían entre 20% y 30% más rápido que lo propuesto para el margen sur (centro-sur de Chile). Estas diferencias han sido atribuidas a un mayor metabolismo asociado a aguas más cálidas en la zona norte. Sin embargo, aspectos metodológicos señalan que existen diferencias en la asignación de anillos de crecimiento lo que podría impactar en las curvas propuestas y los parámetros estimados. Así, estudios asociados al crecimiento son altamente dependiente de la metodología empleada y de la región donde se realicen las investigaciones, no obstante los resultados sugieren que podrían existir diferencias entre 20% y 30% en el patrón de crecimiento entre peces capturados en Perú y Chile sugiriendo una historia de vida distinta en peces del margen norte que crecerían más rápido por las condiciones más cálidas del medio ambiente.

#### 7.3. Migraciones

Pocas iniciativas han sido reportadas respecto al marcaje y recaptura de jurel (e.g. Torres, 1986) y ninguna con resultados consistentes respecto a patrones migratorios de individuos. Así, los resultados más importantes provienen de movimientos registrados por la flota pesquera. A partir de las observaciones de pesca comercial y cruceros de investigación, investigaciones soviéticas generaron los primeros esquemas conceptuales de migración con movimientos cíclicos de norte

(desove) a sur (alimentación) y un patrón de deriva hacia el oeste de individuos a medida que aumentaban su edad (Gretchina, 1998). Posteriormente, Arcos *et al.*, (2001) presentan un esquema migratorio basado en capturas realizadas en Chile y su zona oceánica adyacente, el cual sigue el triangulo migratorio de Harden-Jones (1968) con desoves costa-afuera frente a Chile central, área de crianza en la costa del norte de Chile (y probablemente el sur de Perú) y zona de alimentación en la zona centro-sur de Chile. Recientemente, Corten & Janusz (2011) y Corten (2014) con datos de la flota de la Unión Europea reportan la ocurrencia de una fuerte clase anual atribuible al año 2008 que apareció en la pesquería en 2010 y fue observada nuevamente en 2011 en menor abundancia, coincidentemente con la aparición de peces atribuibles a esta misma cohorte en Perú y Ecuador entre 2010 y 2011. En base a dichos hallazgos Corten (2014) sugiere que los juveniles de jurel se reclutan al stock adulto donde quiera que estén al momento de la madurez siendo el mecanismo de movimiento temprano el que determina esta patrón y que puede ser el responsable de intercambios entre las distintas regiones de pesca. Al mismo tiempo Parada *et al* (2017) respaldan esta hipótesis evidenciando que posibles mecanismos de retención y enriquecimiento oceánico podrían dar origen a cohortes de juveniles en regiones lejanas a las áreas de crianza establecidas previamente. Otros antecedentes de movimientos activos de jurel son presentados por Vásquez *et al* (2016) quienes informan migraciones activas de peces juveniles de tamaños modales de 10 a 15 cm LH, que 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 entre 33°-37°S en la cercanía de la ZEE de Chile (79°-77°W) con rumbo este-noreste, la cual coincidió con las modas detectadas posteriormente en el sector costero entre 33° y 27°S con rumbo norte.

#### 7.4. Interacción con otras especies pelágicas

El jurel es una especie con hábitos predatorios oportunistas que se alimenta de una amplia variedad de presas que pertenecen a la comunidad mesopelágica, en particular sobre peces mesopelágicos y eufáusidos (Konchina *et al.* 1996; Medina & Arancibia, 2002; Alegre *et al.* 2015). Estos últimos constituyen la presa principal del jurel con *Euphausia mucronata* como el principal ítem alimenticio, cuya distribución va desde los 3°S a 42°S y entre la costa y la zona de transición costera (~300 km) disminuyendo en la zona oceánica y concentrándose en torno a los centros de surgencia (Antezana, 2010) donde el jurel se alimenta activamente (Quiñones *et al.*,

2007). Una característica importante de *E. mucronata* es su habilidad de realizar importantes migraciones verticales día/noche con máximas extensiones durante el día y comportamiento adaptativo que le permite ingresar y permanecer en la zona mínima de oxígeno, lo que ha sido atribuido a una estrategia de evasión de predadores y disminución de competidores hacia el alimento (Antezana, 2002) y que puede estimular las incursiones del jurel hacia aguas de bajo contenido de oxígeno durante su alimentación. Respecto a los potenciales predadores, peces mayores como atunes y albacoras han sido indicados como potenciales predadores (Bailey, 1989). La distribución de estos peces es mayoritariamente tropical, mientras que el jurel se distribuye en aguas subtropicales, lo que podría ser atribuible a una ocupación del espacio que evita la superposición con especies mayores que pueden ser potenciales predadores. Otra especie que podría ser considerada un posible predador de jurel es el calamar gigante (*Dosidiscus gigas*), aunque estudios relacionados con la dieta de este calamar han revelado una baja ocurrencia de jurel como presa (< 1%; Chong *et al.*, 2005; Alegre *et al.*, 2013), lo que podría sugerir una relación de competición por el espacio más que una de predador-presa.

## 7.5. Dinámica del hábitat y su relación con los patrones espaciales de jurel

### 7.5.1. Temperatura

En este estudio, la relación entre el jurel y su hábitat se analizó mediante una perspectiva de modelación bayesiana que definió amplios límites de tolerancia de jurel, que en su fase adulta parece aumentar su plasticidad frente a esta variable abarcando un rango térmico amplio. Las aguas más cálidas a lo largo del hábitat de jurel estuvieron asociadas a los registros de Perú con un rango térmico entre 15,0° y 27,8 °C, los cuales fueron similares a los obtenidos para el norte de Chile con un rango entre 14,0° y 25,1°C. Los registros para la zona centro sur de Chile mostraron un rango térmico 9,8° y 21,3°C, coincidentes con los de la flota pesquera internacional que fue de 9,1° a 15,3°C. Los resultados de la modelación muestran un rango de mayor probabilidad de distribución ( $P > 0,8$ ) entre 10,9° y 25,8°C para todo el dominio modelado. Estos resultados son concordantes con lo reportado por Li *et al.* (2016) y Bertrand *et al.* (2016) quienes utilizaron distintas aproximaciones metodológicas, con un número inferior de variables predictoras y set de datos menos abundantes. Se establece que el rango de tolerancia térmica del hábitat de jurel es de 9°C a 27°C, con una mayor asociación a aguas entre 11°C y 26°C.

### 7.5.2. Productividad

La productividad primaria en el Pacífico sur oriental se caracteriza por presentar un marcado gradiente horizontal, asociado a los centros de surgencia observados a lo largo de todo el continente sudamericano y a niveles de menor productividad oceánica en centro del giro subtropical del Pacífico sur (Polovina *et al.*, 2008). En consecuencia, en este estudio los mayores niveles de clorofila-a estuvieron asociados a los registros costeros con niveles máximos entre  $19,6 \text{ mg m}^{-3}$  y  $38,4 \text{ mg m}^{-3}$ , mientras que los niveles observados en la zona oceánica frente a Chile centro sur, donde opera la flota de cerco chilena y la flota arrastrera internacional, evidenciaron un rango entre  $0,07 \text{ mg m}^{-3}$  y  $0,36 \text{ mg m}^{-3}$ . Los resultados de la modelación sugieren un rango de mayor probabilidad de distribución ( $P > 0,8$ ) con niveles de clorofila mayores a  $0,18 \text{ mg m}^{-3}$ . Estos resultados son parcialmente concordantes con lo reportado por Li *et al.* (2016) quienes realizaron un modelo de hábitat con datos exclusivos para la zona oceánica (flota internacional) sugiriendo un rango óptimo  $> 0,1 \text{ mg m}^{-3}$ ; mientras que Bertrand *et al.* (2016) quienes utilizaron datos de la misma naturaleza que los utilizados en este estudio, sugieren un nivel mínimo de  $0,07 \text{ mg m}^{-3}$  para la distribución de jurel. Se establece un amplio rango de distribución de jurel respecto al nivel de productividad el hábitat con un umbral mínimo de concentración de clorofila de  $0,1 \text{ mg m}^{-3}$ .

### 7.5.3. Oxígeno disuelto

Uno de los aspectos que han sido señalados como clave en relación a la limitación del hábitat para jurel es la concentración de oxígeno disuelto, el cual juega un rol principal en el sistema pelágico del Pacífico suroriental. El sistema de Humboldt alberga una zona de mínima de oxígeno (ZMO) cuyo límite superior alcanza sus niveles más superficiales en la región centro-norte de Perú (Fuenzalida *et al.*, 2009). En esa zona, el oxígeno es un regulador importante del sistema pelágico y ha sido señalado como un modulador de la distribución de especies como la sardina española y la anchoveta (Bertrand *et al.*, 2011), y también el jurel, el cual muestra una distribución preferencial por aguas oxigenadas (Bertrand *et al.*, 2006). En este contexto, Bertrand *et al.* (2016) propone un modelo conceptual para la distribución de jurel, el cual establece que el oxígeno contribuye en una escala estacional al fraccionamiento del hábitat de jurel, y en una escala decadal a la variabilidad del tamaño poblacional. En el presente estudio, se incorporó explícitamente, por primera vez, al oxígeno en un modelo de distribución de especies para el

jurel en el Pacífico suroriental, tomando como hipótesis que la presencia de aguas de bajo contenido de oxígeno ( $\sim 2 \text{ ml L}^{-1}$ ) en la capa superficial de la columna de agua (50 m) limitaría la ocurrencia de jurel. En este contexto, la información utilizada sugiere, como es esperable, que los registros de jurel asociados a la zona centro-sur de Chile y altamar estuvieron asociados a condiciones sin presencia de mínima de oxígeno en el estrato superficial con niveles estimados a los 50 metros de profundidad entre  $2,4 \text{ ml L}^{-1}$  y  $6,9 \text{ ml L}^{-1}$ . Sin embargo, en la zona costera del norte de Chile (rango  $<0,05 - 6,5 \text{ ml L}^{-1}$ ) y en la costa de Perú (rango  $<0,05 - 6,3 \text{ ml L}^{-1}$ ) el jurel estuvo asociado de forma más recurrente a aguas con baja concentración de oxígeno disuelto en la capa superficial. En efecto, las simulaciones realizadas sugieren que las capturas y los registros acústicos de jurel en estas zonas serían realizados habitualmente en condiciones de mínima de oxígeno superficial, la cual alcanza su nivel más somero en el borde costero entre  $4^\circ$  y  $18^\circ\text{S}$ . Así, la modelación sugiere que el jurel se distribuye ampliamente en áreas sin limitación de oxígeno, pero tiene la potencialidad de incursionar en zonas donde la mínima de oxígeno es permanentemente superficial. Además, este estudio ha establecido que existe una segregación espacial en las tallas observadas en la pesquería de jurel, con individuos inmaduros ( $< 26 \text{ cm}$ ) registrados casi exclusivamente en el sector costero del norte de Chile permanentemente asociados a condiciones de mínima de oxígeno superficial, mayores temperaturas, niveles de alta productividad costera y bajos niveles de turbulencia. Lo anterior, podría ser una ilustración de restricciones fisiológicas que indican que los requerimientos de oxígeno aumentan con el tamaño del pez y significativamente incrementan al alcanzar la madurez sexual, cuando existe un mayor consumo de oxígeno asociado al metabolismo reproductivo (Pauly, 1984).

#### 7.5.4. Dinámica ENSO

Como ha sido señalado anteriormente, la dinámica ecuatorial asociada a El Niño Oscilación del Sur es uno de los principales moduladores del sistema costero del Pacífico suroriental. En este contexto, Gretchina (2008) muestra que la dinámica del jurel y sus patrones de conectividad están influenciados por eventos el Niño extremos. Un efecto de ello son los cambios de distribución de juveniles, los cuales aparecen masiva y anómalamente en la pesquería de la zona centro-sur durante eventos El niño (Arcos *et al.*, 2001). En este contexto, Segura & Aliaga (2013) evidencian un cambio importante a partir de 1998 cuando los niveles de detección acústica de jurel decaen significativamente en mar peruano, manteniéndose esta condición a los

años posteriores. En este estudio, a través de un esquema de modelación hidrodinámica y biogeoquímica, se estableció que durante años El Niño, una serie de eventos ocurren a nivel ecuatorial, impactando mayoritariamente al sector costero de Perú y el norte de Chile: i) una profundización de la termoclina producto de las ondas oceánicas originadas en el ecuador; ii) un debilitamiento de la fertilización superficial producto de la profundización de la nutriclina; iii) una disminución de la productividad (i.e. clorofila superficial), como respuesta a los eventos anteriores; iv) una profundización de la oxiclina. Como respuesta a lo anterior el modelo de distribución de especies muestra una desagregación del hábitat en el extremo norte de distribución, sugiriendo la ocurrencia de un hábitat poco apropiado que impacta en la conectividad poblacional hacia el Perú y Ecuador. Al mismo tiempo, durante años El Niño el transporte de huevos y larvas hacia la zona de crianza se atenúa (Vásquez *et al.*, 2016) como probable respuesta al debilitamiento de la circulación anticiclónica durante estos periodos (Ancapichún & Garcés, 2015). En definitiva, los eventos El Niño generan impactos secuenciales sobre el hábitat de jurel, sugiriendo una respuesta a nivel poblacional que afecta la dinámica espacial de la especie en el Pacífico suroriental.

#### 7.6. Estructura demográfica

Análisis respecto a la estructura demográfica pueden ser realizados a partir de la composición de edad de las capturas comerciales. Aunque esta información puede tener sesgos asociados a las medidas regulatorias de las distintas pesquerías, esta información puede proveer de señales relativas a la existencia de stocks explotados más que a unidades poblacionales propiamente tal. Así, la SPRFMO calcula la estructura de edad y dinámica siguiendo una estrategia flota/zona cubriendo toda el área de la convención de acuerdo a: i) Flota 1/ zona1, flota cerco zona norte de Chile dentro de la ZEE; ii) Flota 2/ zona2, flota cerco zona centro-sur de Chile dentro de la ZEE; iii) Flota 3/ zona3, flota del extremo norte dentro y fuera de la ZEE de Perú y dentro de la ZEE de sur de Ecuador; iv) Flota 4/zona 4, flota internacional de arrastre de media agua en la zona oceánica afuera de la ZEE de Chile, siendo las flotas de China y la Comunidad Europea como las más persistentes. El análisis de la composición de tallas muestra diferencias demográficas asociadas al tamaño poblacional (ver detalles en Vásquez *et al.*, 2016), que puede ser dividido en distintos periodos de acuerdo a:

i) periodo previo a 1997: período de alta abundancia poblacional de la especie el cual coincide con un régimen climático cálido. Se observó una baja ocurrencia de peces juveniles en las capturas de la Flota 1 (norte de Chile) y que; los peces juveniles (<26 cm LH) aparecieron en las capturas de las flotas de Chile centro-sur y oceánica solo durante los años de El Niño, como en 1982-1983, 1986-1987 y 1992.

ii) periodo posterior a 1998: periodo de disminución drástica de la biomasa total y desovante en todo el Pacífico sur, coincidente con un régimen climático frío, especialmente en aguas de Perú (Espinoza *et al.*, 2008; SWG-11-08; SPRFMO, 2012; Ñiquen *et al.*, 2013). Además, la baja abundancia de jurel en el Perú se distribuye muy dispersa espacialmente, con preferencia hacia las zonas central y sur del país y, además, presenta fuertes variaciones interanuales, de un aumento relativo en algunos años hasta prácticamente desaparecer en otros (Dioses, 2013; Segura & Aliaga, 2013); la estructura de tamaños anuales en las aguas peruanas se presenta por pulsos el cual sustenta a la pesquería por 3-4 años con disminución sostenida de la abundancia hasta el ingreso de un nuevo pulso, a diferencia del periodo anterior que presentó continuidad interanual en el pulso de reclutamiento; en las zonas costeras del norte de Chile la estructura anual de jurel se ve presentada casi exclusivamente por peces juveniles (<26 cm LH); mayor influencia de peces juveniles (reclutas) hacia las pesquerías de centro-sur de Chile (años 1995-2004, 2007, 2009-2011, 2015-2016) y oceánica capturada por la flota extranjera (2002-2005, 2010, 2014-2015) (SPRFMO, 2010-2015). A diferencia del período previo a 1997-1998, el último periodo carece la información biológico-pesquera del área oceánica fuera de las 100 mn frente las costas de Perú y del norte de Chile, área donde se propone ocurre el desove de jurel en sus migraciones desovantes desde el norte hacia el sur-suroeste del Pacífico suroriental, constituyendo un componente faltante (e importante) para el análisis de aspectos demográficos.

### 7.7. Pesca

La estructura espacial de la población de jurel ha evidenciado cambios asociados a diferencias demográficas y principalmente a su tamaño poblacional. En este contexto, una amplia distribución espacial y alta disponibilidad del recurso jurel permitió el crecimiento de la flota, de esfuerzo pesquero de los países ribereños (de Ecuador, Perú y Chile), pero también un arribo a las regiones oceánicas de las flotas internacionales como de la ex URSS en las décadas de 80'-

90' y de otras, como China, Corea, UE, Vanuatu, Islas Faroe, Rusia, Perú, etc., a partir de los años 1999-2002. La ubicación espacial de todas las flotas pesqueras involucradas a la extracción de jurel entre los años 1972-2017 se presenta esquemáticamente en la Figura 66, de ésta manera confirmando los límites del área de distribución máxima del recurso y que se estabiliza en las décadas 80'-90' (dentro del período de "expansión", entre los años 1972-2002) junto con alcance de los máximos desembarques (Figura 66).

De acuerdo a la historia de la pesquería, este período de expansión observado en las estuvo caracterizado por un aumento en el esfuerzo pesquero a través de la llegada de flota extranjera a operar en altamar, así como un crecimiento en el tamaño de la flota del centro-sur de Chile que aumentó sostenidamente hasta 1990 cuando se establece una medida de manejo que cerró el ingreso de nuevas naves a la flota comercial (Figura 67). El aumento del esfuerzo pesquero y de los desembarques se reflejó en un importante aumento de la mortalidad por pesca, la cual de acuerdo al modelo integrado de evaluación de stock de la OROP-PS (SPRFMO, 2020) se encontró por sobre el objetivo de manejo (mortalidad por pesca en el RMS) desde mediados de los años 80'. Al mismo tiempo, y no obstante a buenos niveles de reclutamiento previo al año 2000, los niveles de biomasa desovante y biomasa total disminuyeron sustancialmente hasta alcanzar su mínimo en 2010 donde se posicionó por debajo de los objetivos de manejo. A partir del año 2010 el manejo de jurel se realiza siguiendo los lineamientos de la OROP-PS, donde uno de los principales objetivos ha sido la reconstrucción de la pesquería, generando un marco de manejo que conllevó a una disminución significativa en la mortalidad por pesca que en conjunto con reclutamientos positivos posterior al 2015 han llevado a un aumento en la biomasa total y en la biomasa desovante de jurel en el Pacífico suroriental a partir del año 2017. De esta manera, el periodo de expansión espacial de la población estuvo seguida de una presión por pesca alta que contribuyó a la disminución de la biomasa total a lo largo del Pacífico suroriental, que a su vez se correlacionó con cambios en la estructura espacial de la población que se evidencia en la actividad y movimiento de las flotas que operan sobre jurel.

Durante el periodo de altas biomásas y expansión espacial, las áreas de operaciones pesqueras sobre el recurso jurel de las flotas de Ecuador, Perú y el Norte de Chile se encontraron exclusivamente en las zonas próximas a las costas, dentro de las primeras 100 mn y, sus



variaciones espaciales fluctúan en un rango bastante estrecho (en comparación con el resto del área total de la hábitat de jurel) lo que resulta consistente con los resultados de la modelación de probabilidad de ocurrencia presentados en este proyecto. Al analizar la distribución espacial de las flotas pesqueras frente a Chile central y centro-sur y en aguas abiertas (fuera de las ZEE del Perú y Chile) del Pacífico Sur, dentro del período de la historia reciente (1972-2017) de la pesquería de jurel, es posible precisar unos cambios estacionales e interanuales bastante importantes, dependientes, como se supone, tanto de la distribución, abundancia y disponibilidad del recurso como de estímulos económicos (desplazamiento de flotas hacia regiones distantes).

De acuerdo a la historia de la pesquería, desde los años 2000-2002 se destaca una notable reducción de los desembarques totales del jurel, asociada a distintos aspectos de regulación de esta pesquería por parte de Chile desde los años 2001-2002 (país con mayor esfuerzo pesquero en esta época) y del establecimiento de la Organización Regional de Pesca del Pacífico Sur (OROP-PS) desde el año 2010 (Figura 67), también debido a una drástica disminución en la biomasa total y la disponibilidad del recurso para las flotas del Perú y Chile en aguas próximas a las costas e internacional en aguas abiertas. Además, existió un incremento del esfuerzo pesquero por parte de la flota internacional y de la flota centro-sur de Chile en aguas oceánicas fuera de la ZEE de Chile, no obstante se logró un incremento significativo de las capturas y la flota internacuional limita sus operaciones solamente en el área del Pacífico suroriental (SPRFMO, 2012). De esta manera se supone un cambio en el “cinturón de jurel” hacia el Pacífico suroriental estructurando una “contracción” y/o “reestructuración” del área oceánica de la distribución del recurso jurel desde el Pacífico suroccidental (Penny *et al.*, 2011) hacia el Pacífico suroriental (Gretchina, 2008; Gretchina *et al.*, 2010; Gonzalez & Gretchina, 2017) (Figura 66b; años 2002-2011) y que alcanza su mínimo histórico hacia el año 2012 (Figura 66c), el proceso contrario a lo registrado en las décadas 80'-90' y determinado como la “expansión” y/o “colonización” hacia áreas de las aguas oceánicas del Pacífico Suroccidental (Figura 66a).

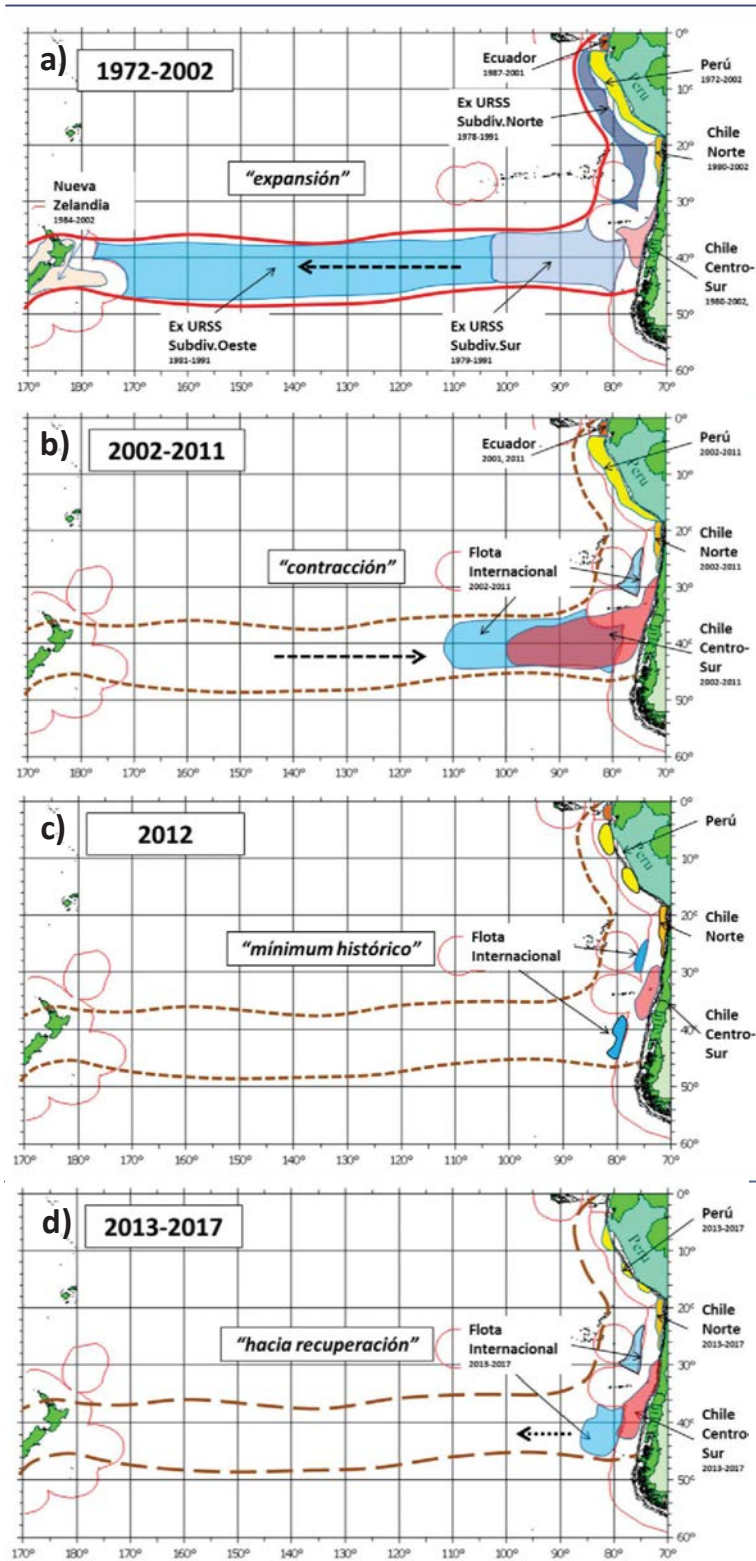


Figura 66. Escenarios de la distribución espacial de jurel asociadas a la operación de las flotas pesqueras que operan en el Pacífico sur entre los años 1972-2017.

El recambio en los procesos de la *expansión* hacia la *contracción*, se sugiere ocurre durante los últimos años de la década de 90' en paralelo a una drástica disminución de la biomasa total del jurel en aguas peruanas (de más de 5 millones antes de 1997 hasta menos de 500 mil de toneladas a partir de 2000; Ñiquen *et al.*, 2013), que a su vez coincide con la ocurrencia en el Pacífico ecuatorial del evento El Niño 1997-1998. Al mismo tiempo, este evento supone un cambio de regímenes climáticos y la transición de la época *cálida* iniciada después de un fuerte El Niño de 1972-1973 hacia una época *fría* a escala regional (Espino, 2013; Flores *et al.*, 2013; Parada *et al.*, 2013). El año 2002 se presenta como un año intermedio entre dos períodos donde la dinámica espacial del recurso de jurel (de las flotas) en el Pacífico sur se caracteriza por una menor ocurrencia en el sector costero y una superposición en la distribución de la flota nacional con la flota internacional en aguas abiertas de la zona centro-sur de Chile (Figura 66).

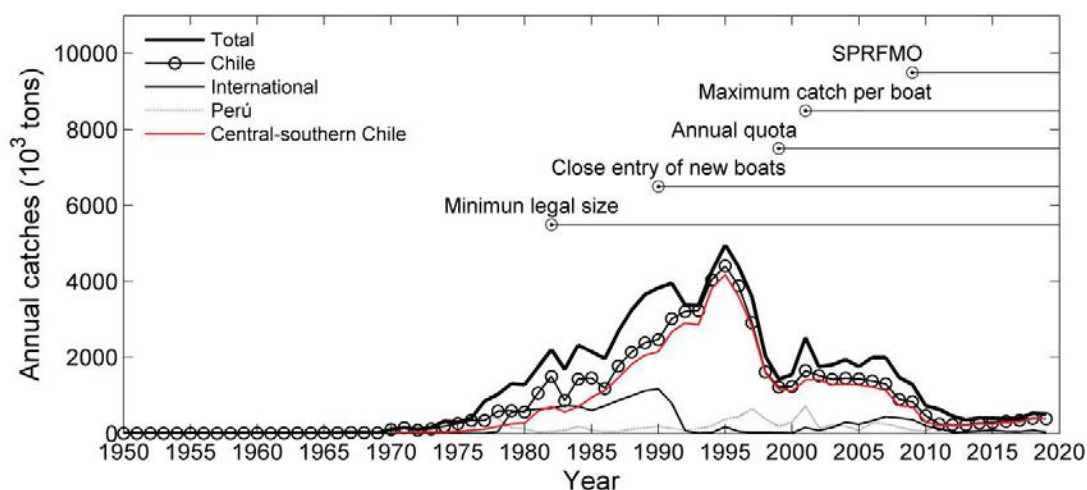


Figura 67. Capturas anuales de jurel realizadas por flotas chilenas, peruanas e internacionales (base de datos del Servicio Nacional de Pesca de Chile, Instituto de Investigación Pesquera y Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). Se indican las regulaciones y medidas de manejo implementadas desde 1982. La línea roja corresponde a las capturas de la flota cerquera del centro-sur de Chile.

La notoria disminución de la biomasa de jurel en el Pacífico sur fue registrada en investigaciones rusas del recurso en BIC *Atlantida* frente las costas de Chile centro-sur en finales de los años 2002 y 2009 (AtlantNIRO, 2003, 2010). En éstas, prácticamente en la misma área entre los 34°S y 40°S y desde la ZEE de Chile hasta los 106°W (superficie de 289.000 y 274.000 mn<sup>2</sup>

respectivamente), la biomasa total de jurel calculada en el año 2002 ascendió a 6.717.000, mientras que en 2009 disminuyó en 2009 a 698.000 toneladas. Sin embargo, durante el período actual (2012-2019; Figura 66d), y posterior a una década de funcionamiento de la OROP-PS, la población de jurel ha presentado signos hacia su recuperación, después de alcanzar su biomasa mínima y área reducida de distribución en el año 2012 (Figura 66c) lo que se ha reflejado en mayores niveles de captura para todas las flotas (Figura 67). Esto se refleja en una creciente disponibilidad para la flota pesquera de Chile en sus costas, en la aparición de fuerzas anuales fuertes (reclutamientos) en sus áreas de operación. Los mismos procesos ocurren en las zonas de operación de la flota internacional fuera de la ZEE de Chile, no obstante esta aún se encuentra asociada al Pacífico suroriental, no sobrepasando el 82-85°W, sin observarse migraciones activas hacia el Pacífico sur central y/u oeste.

De esta manera, la estructuración espacial de la población de jurel tiene una no sería independiente de la actividad pesquera, la cual impacta de forma directa en el tamaño poblacional. Así, una expansión poblacional sustentó un aumento en el esfuerzo pesquero, el que incrementó de forma significativa la mortalidad por pesca. Posterior a este aumento en la mortalidad existió un decaimiento significativo en la biomasa desovante, lo que llevó a la población a un estado de sobrepesca y sobre-explotación (SPRFMO, 2020). En conjunto con lo anterior desde comienzos de la década del 2000 se registraron bajos niveles de reclutamiento, reflejando un bajo nivel de productividad poblacional. En conjunto con estos cambios en el tamaño poblacional, se registró una reconfiguración espacial de la población que varió desde una población altamente conectada con una ocupación amplia de su hábitat hacia una población parchosa donde los niveles de conectividad se mantuvieron a través de procesos claves como el transporte de estadíos tempranos, la reproducción y la migración de fracciones adultas (Figura 66). Esta configuración parchosa provocó cambios en la disponibilidad pesquera, en algunas regiones históricas de pesca. Es así como los rendimientos pesqueros en la zona centro-sur de Chile disminuyeron y los viajes de pesca debieron aumentar su duración temporal y expandir su extensión espacial hacia altamar hacia fines de la década de 2010, y al mismo tiempo la operación en aguas peruanas disminuyó significativamente. En el periodo reciente, se ha registrado una mejora en la condición del stock de jurel en el Pacífico suroriental, encontrándose actualmente en plena-explotación y con indicadores positivos de rendimientos de pesca e

indicadores de cruceros acústicos (SPRFMO, 2020). En conjunto con estas mejoras, se han observado cambios espaciales asociados a una mayor disponibilidad de pesca en la región costera de la zona centro-sur de Chile y en aguas peruanas a partir de 2016. Al mismo tiempo, se han observado algunas clases anuales fuertes que han progresado a través de la pesquería aumentando la biomasa desovante.

### 7.8. Estructura poblacional

Una primera aproximación hacia la estructuración espacial de la población de jurel en el Pacífico sur fue presentada por Elizarov *et al.* 1993 considerando el período de *expansión* (Figura 68). De esta manera se presenta un esquema de migraciones considerando: i) los parámetros operacionales de la flota y el comportamiento estacional e interanual de las concentraciones de jurel en diferentes sub-áreas (períodos de desove y engorda); ii) la distribución espacio-temporal de los peces por los grupos de tamaños (~edad); iii) la posición espacial del área de desove y las zonas de alta intensidad de desove; iv) la distribución espacial de juveniles del jurel por tamaño (rangos hasta los 20 cm de LH); v) las fluctuaciones interanuales y estacionales en las condiciones oceanográficas.

En base de estos componentes principales de esquema generalizado de migraciones del jurel y su análisis, se concluyó que en el sector oriental del área de distribución habitaban individuos de menor tamaño y edad que en el sector occidental. Los peces maduros, de 3 años y más de edad, crecen mientras migran en dirección general Sur, suroeste y oeste. Esto en parte explicaba predominio en aguas costeras de Nueva Zelanda de ejemplares de edades avanzadas y de tamaños superiores a los 45-50 cm de LH, los cuales representan un bajo porcentaje en las capturas en las zonas de pesca ubicadas en los sectores más orientales del Pacífico Sur. En general, las migraciones del jurel se caracterizaron como progresivas (en dirección N-S-SW en la región próxima a las costas de Sudamérica y E-W en la región oceánica frente Chile centro-sur) y en espiral (cada círculo corresponde a un ciclo anual) que quedaban condicionadas por las peculiaridades de la distribución de las agregaciones en las temporadas anuales de engorda y desove.

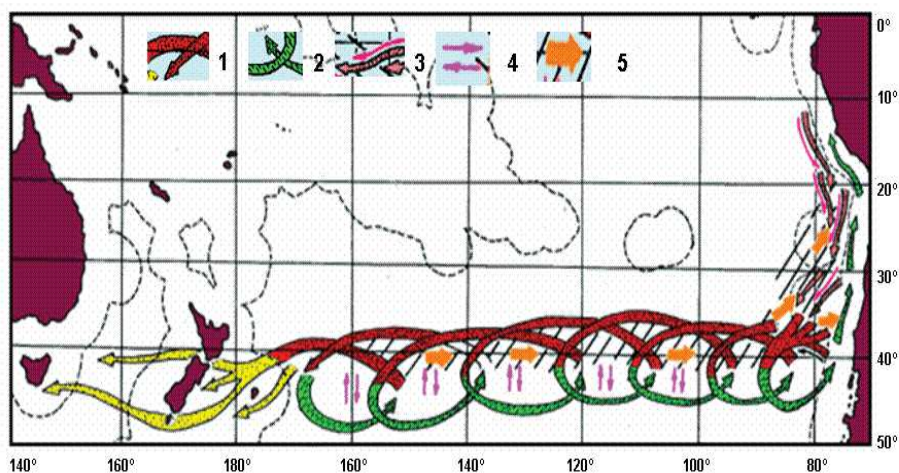


Figura 68. Esquema generalizado de migraciones oceánicas de jurel en el Océano Pacífico Sur durante su ciclo de vida. 1 – peces adultos desovantes; 2 – peces adultos en engorda; 3 – peces juveniles hasta 2-3 años de edad; 4 – peces adultos entre zonas de desove y engorda; 5 – distribución y migración de alevines y juveniles de hasta un año de edad (Elizarov et al., 1992; Grechina, 1998).

De acuerdo a estas observaciones, en invierno y otoño el jurel forma concentraciones de engorda más al sur de 40°S, en las aguas subantárticas de mayor productividad. El desove de jurel, basándose en las investigaciones rusas en aguas abiertas del Pacífico Sur es más intenso (y exitoso) en primavera y verano en las aguas subtropicales, lo que se realiza prácticamente en los límites de todo el “cinturón del jurel”, entre los 35° y 40°S (Evseenko, 1987; Evseenko et al., 1984; Dejnjk & Nevinskiy, 1987; Elizarov et al., 1993; Grechina et al., 1998). Esta última conclusión en gran parte coincide con los resultados del análisis de las investigaciones ictioplanctónicas realizados en diferentes épocas entre los años 1972 y 1995 frente las costas del Perú y de Chile por el IMARPE (Perú), VNIRO-AtlantNIRO (Rusia), IFOP e INPESCA (Chile) (ver Figura 65). Este análisis de recopilación indica que con la mayor frecuencia los huevos y larvas del jurel se registraron tanto por la costa como en las aguas oceánicas al sur del paralelo de los 16°S, sin embargo, la masiva presencia de los productos de desove de esta especie se encontraba en aguas oceánicas frente a Chile centro-sur por fuera de las 100-150 millas de la costa (Grechina et al., 1998).

Posterior al desove, los juveniles hasta un año de edad migran pasivamente, pasando a los desplazamientos activos, ayudados por las corrientes del Pacífico Sur cuya dirección es de oeste

a este y noreste, hasta el límite de la Corriente Humboldt en el sector de aguas oceánico-costeras del norte de Chile y sur del Perú. En la región oceánica de esta corriente, casi por completo dentro de las ZEE del Perú y Norte de Chile, se encuentran zonas de alta productividad biológica y es ahí donde, en el segundo y tercer año de vida, los ejemplares de jurel alcanzan la madurez sexual, a la vez que ocurre la engorda. Luego, ya maduros, vuelven a migrar al oeste hacia las zonas de desove y engorda oceánicas, formando su primer círculo anual de migración (Serra et al., 1994; Grechina, 1998). El análisis de las estructuras anuales de tamaños del jurel, en capturas realizadas en diferentes sub-áreas del Pacífico Sur y de la distribución espacial de los individuos juveniles (hasta los 20 cm de LH) en la región del Pacífico Suroriental permitió establecer que las mayores concentraciones de peces juveniles se encuentran con mayor frecuencia en aguas oceánicas adyacentes a las costas del norte de Chile y sur del Perú (Gretchina et al., 1998; Sepúlveda et al., 1998; Dioses, 2013).

De esta forma, al interior de la ZEE del norte de Chile y sur del Perú se desarrolla la única zona confirmada dentro de toda área de distribución que posee mayores concentraciones de ejemplares juveniles y pre-reclutas, reafirmando la etapa juvenil de ciclo de vida de jurel propuesta por Elizarov et al (1993). Esta zona ha sido denominada como *la zona (área) de crianza* de jurel (Arcos et al., 2001, 2004). El *área de crianza* es la que posee la mayor importancia dentro del circuito migratorio regional, considerando el modelo conceptual de la estructura espacial del stock del jurel frente a las costas de Chile (Arcos et al., 2001), pues es donde provienen nuevos reclutamientos del jurel a la pesquerías de Chile centro-sur y de la región oceánica del Pacífico suroriental, especialmente y con mayor fuerza durante los años con condiciones oceanográficas más cálidas de lo normal (eventos El Niño). De mismo modo, que esta zona sustenta las agregaciones comerciales de jurel aguas costeras del Perú, con un proceso que se evidencia mejor durante los años con las condiciones oceanográficas normales y/o frías (eventos La Niña) (Grechina, 1998; 2008).

Posteriormente, Gretchina, 2008 y Gretchina *et al.*, 2010, al incorporar información biológica-pesquera disponible de las aguas adyacentes al Perú y Chile proponen que al interior del área de distribución de jurel en el Pacífico sur (cinturón de jurel) habita solo una población denominada *superpoblación de jurel* dentro de la cual existen distintas zonas identificadas en la explotación

comercial de este recurso: la zona costera del Perú (la flota peruana de cerco); frente las costas de Norte y centro-sur de Chile (la flota chilena de cerco) y las aguas abiertas del Pacífico Sur (la flota internacional de arrastre de media agua). El concepto de *superpoblación* alcanza su mayor expresión durante el periodo de altas biomasa de jurel con su máxima expansión espacial a lo largo de todo el Pacífico sur (años 80'-2000'). De esta manera dichas contribuciones establecen que *se aplica el concepto de una población única que al interior de su área de distribución presenta peces en todas etapas de su ciclo de vida, desde el nacimiento hasta la muerte natural: huevos, larvas, juveniles (pre-reclutas y reclutas), adultos en engorda y desove.*

Así, resumiendo la información biológica-pesquera sobre la dinámica espacio-temporal del recurso jurel en el Pacífico Sur durante su historia de vida comprendida entre los años 70' y el año 2017, e incorporando las diversas piezas de información derivada de este y previos proyectos de investigación, es posible proponer esquemas conceptuales para analizar los cambios en la estructura espacial de la población de jurel, los cuales muestran mayor nivel de variabilidad durante los años 2000' asociado a un período de drástica disminución de su abundancia y que además, coincidiría con cambios ambientales de largo plazo (Figura 69).

Durante los años 1980-2000 (Figura 69a), el jurel alcanza su máxima biomasa total y su distribución espacial, por la costa desde el sur de Ecuador hasta el sur de Chile y, desde las costas chilenas hacia el Pacífico Suroccidental para llegar hacia las aguas costeras de Nueva Zelandia y Tasmania en el extremo Oeste. Luego, al inicio de los años 2000' (hasta 2007 aproximadamente; Figura 69b), se presentan los primeros signos hacia la contracción de su área de distribución: la presencia de jurel en las aguas peruanas presenta en forma de parches y en baja abundancia, se traslada masivamente hacia las costas de Chile y las aguas oceánicas adyacentes. En éste período, además, se produce la juvenilización poblacional de jurel en las la osta de Chile al igual que en la región oceánica (hasta 90-105°W) debido a los ingresos anuales de reclutamientos hacia éstas regiones entre los años 1997-2004 aproximadamente. En el mismo tiempo se reducen los flujos de emigraciones de jurel adulto hacia la región del Pacífico suroccidental y el límite oeste de distribución se contrae paulatinamente hacia el Pacífico suroriental.



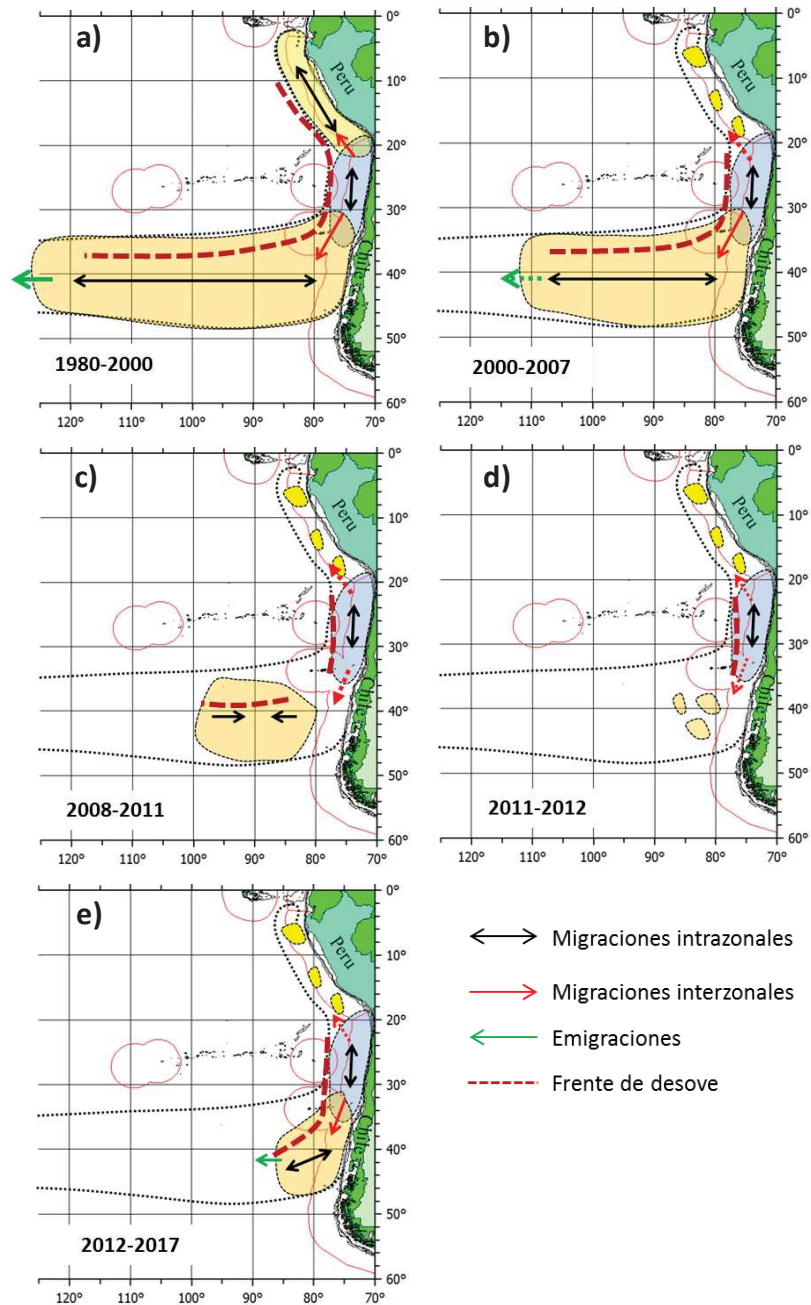


Figura 69. Esquemas conceptuales de la estructura espacio-temporal de la población de jurel en el Pacífico Sur entre los años 1980-2017.

Durante los años 2008-2011 (Figura 69c), el proceso de contracción del área de distribución de jurel hacia el Pacífico Suroriental se profundiza aún más debido que desde años 2004-2005 no se registran las entradas masivas de nuevos reclutamientos de peces desde la zona de crianza tanto

hacia el sur por la costa como hacia el océano abierto, el proceso que ha determinado un envejecimiento poblacional, especialmente en las aguas oceánicas, y acelera reducción de área oceánica de distribución, como también en las aguas costeras de Chile. Esto promueve hacia los años 2009-2011, una separación temporal entre las zonas de hábitat de jurel costero y oceánico.

En los años 2011-2012 (Figura 69b) el área oceánica de distribución de jurel se reduce hasta su mínimo histórico, hacia el límite de la ZEE de Chile distribuyéndose muy disperso en zonas más reducidas y parchosas. En estos años las capturas de la flota internacional bajan a sus niveles mínimos para el período de 2002-2012. Al mismo tiempo, el área de distribución de jurel en las costas chilenas se reduce hacia altamar ubicándose por la costa hacia el norte del paralelo de 37-38°S. Sin embargo, en el año 2011 se produce un pulso de agregaciones de jurel desde el sur hacia las aguas costeras del Perú, incluso de Ecuador (Corten, 2013). Es probable que la emigración de jurel desde Perú hacia el sur (Chile y aguas oceánicas) en los años 2012-2013 ha aportado la entrada importante de peces juveniles hacia la zona de crianza desde el desove próximo a ésta y ubicada en las aguas costeras del norte de Chile. Estos peces reclutaron hacia la pesquería de Chile en los años siguientes dando el inicio a un nuevo período en la dinámica espacial de jurel a lo largo de las costas sudamericanas. En los años 2012-2018 (Figura 69e) el área de distribución retoma la continuidad desde el norte de Chile (de la zona de crianza) hacia Chile centro-sur y con extensiones hacia el mar abierto, sugiriendo el inicio en la recuperación de biomasa de jurel aumentando su cobertura espacial dentro de su área de distribución hacia aguas oceánicas del Pacífico sur.

Finalmente, en base de los resultados del presente proyecto y en complemento a antecedentes poblacionales previos provenientes de distintas fuentes de información emergen los siguientes patrones a considerar hacia la definición de una propuesta de estructura poblacional de jurel en el Pacífico suroriental:

- Área de desove continua producto de condiciones de hábitat homogéneo en un área extensa durante la temporada de máxima actividad reproductiva, con un gradiente de magnitud y superficie de desove de sur a norte. Esta configuración del área de desove coincide con un hábitat predicho de adultos de jurel que alcanza su máxima extensión especial durante los meses

de octubre a diciembre, favoreciendo la dispersión de adultos y promoviendo la mezcla poblacional. Esta definición daría sustento a un *pool* larval común para todo el Pacífico suroriental (e incluso suroccidental en alta abundancia poblacional), coincidente con los hallazgos de microquímica de otolito (Serra *et al.*, 2010, Ashford *et al.*, 2011) y antecedentes genéticos que sugieren homogeneidad poblacional (Galleguillos & Torres 1988; Arancibia *et al.* (1996; Sepúlveda *et al.*, 1996; Cárdenas *et al.* 2009).

- La temporada de desove presenta un máximo primaveral (octubre-diciembre) en todas las zonas estudiadas (Perú, norte de Chile y centro-sur de Chile) coincidente con la máxima extensión del hábitat favorable a jurel, promoviendo la mezcla poblacional. Esto concuerda con las evidencias registradas en micro-química de otolitos (Serra *et al.*, 2010, Ashford *et al.*, 2011), fauna parasita (Oliva 1999; George-Nascimento, 2000; Serra *et al.*, 2000) y antecedentes genéticos (baja estructuración especial en el desove) (Galleguillos & Torres 1988; Arancibia *et al.* (1996; Sepúlveda *et al.*, 1996; Cárdenas *et al.* 2009).
- Dos áreas de distribución de peces en alimentación: frente a Perú y Chile central, separadas parcialmente entre  $\sim 18^{\circ}\text{S}$  y  $22^{\circ}\text{S}$  durante verano con migraciones restringidas de sur a norte en otoño-invierno a través del sector costero. Esta estructuración espacial coincide con las evidencias de segregación en periodo de alimentación encontradas en microquímica de otolitos (Serra *et al.*, 2010, Ashford *et al.*, 2011) y fauna parasite (Oliva 1999; George-Nascimento, 2000; Serra *et al.*, 2000), y podrían sustentar diferencias temporales en el crecimiento (Goicochea *et al.*, 2013, Diaz, 2013 y Dioses, 2013). La incorporación de peces hacia las áreas de alimentación ocurre en distintas proporciones de abundancia, cuyos forzantes aun son indeterminados.
- Área principal de crianza se sitúa en el sur de Perú y norte de Chile ( $\sim 15^{\circ}$ - $30^{\circ}\text{S}$ ) donde se distribuyen peces inmaduros. Esta zona de desove está conectada con la(s) zona(s) de desove a través del transporte pasivo de huevos y larvas, además de eventuales migraciones activas de juveniles (este estudio; Vásquez *et al.*, 2012; Vásquez *et al.*, 2013; Parada *et al.*, 2017; )
- Migraciones activas desde área de crianza a área de distribución de adultos es un proceso a ser estudiado, aunque de acuerdo a la composición de tallas observadas podrían estar

asociados, en el largo plazo, a variaciones climáticas decadales; y en menor escala a eventos El Niño que desplazan a los juveniles hacia la zona central y centro-sur de Chile.

Como ha sido establecido en el comienzo de este capítulo, en el Comité Científico de la SPRFMO se han desarrollado hipótesis de la estructura de stocks para el jurel, las que han evolucionado con el paso del tiempo. El desarrollo de estas hipótesis ha estado basado en información presentada en las reuniones del grupo científico de la SPRFMO o previamente publicada, de las cuales en la actualidad se discuten preferentemente dos de ellas:

i) Hipótesis 1: existen dos stocks separados, uno distribuido en la costa de la zona centro-sur de Chile y su zona oceánica adyacente; el otro distribuido en las costas de Perú y su zona oceánica adyacente.

ii) Hipótesis 2: existe un stock para el Pacífico sur que se distribuye entre las costas de Ecuador y el sur de Chile y se extiende hacia la zona oceánica alcanzando las costas de Nueva Zelanda y Australia.

En este contexto y como recomendación al contrastar los antecedentes expuestos y los nuevos resultados emergentes de este proyecto hacia las diferentes hipótesis de la estructura poblacional se propone *la existencia de una población única distribuida tanto en las aguas costeras de Ecuador Perú y Chile como en las aguas oceánicas abiertas. Existe un ciclo biológico sincrónico para todo el Pacífico suroriental con desove primaveral, espacialmente asociado al frente subtropical. El transporte de huevos y larvas promueve la conectividad poblacional y sustenta un área de crianza situada entre el sur de Perú y el norte de Chile. Los niveles de heterogeneidad espacial pueden estar vinculados a la ocupación del hábitat durante el proceso de alimentación y crecimiento.*

## 8. TALLERES Y REUNIONES

---

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

**Reunión de coordinación con Subsecretaría de Pesca.** El día 04 de abril de 2018 se llevó a cabo la reunión de coordinación con la Subsecretaría de Pesca y Fondo de Investigación Pesquera y Acuicultura donde se presentó formalmente el proyecto y se coordinaron las principales actividades asociadas. En dicha reunión participaron el Sr. Luis Carroza, Director ejecutivo del FIPA; el Sr. Mario Acevedo, Subsecretaría de Pesca y Acuicultura; el Sr. Aquiles Sepúlveda, Director de INPESCA y el Sr. Sebastián Vásquez, Jefe de proyecto. El Acta de dicha reunión se entrega en el Anexo II.

**Taller de revisión del modelo hidrodinámico.** Los días 24 de diciembre de 2017 y 29 de marzo de 2018 se realizaron jornadas de trabajo para evaluar el desempeño del modelo hidrodinámico y diseñar la estrategia de implementación del modelo biogeoquímico. De estas reuniones emanaron las bases para la mejora del ROMS presentadas en este Informe de Avances. Se contó con la participación del experto internacional Dr. Vincent Echevin del Laboratoire d'Océanographie et du Climat (LOCEAN, Francia) vía teleconferencia, el Dr. Cristian Salas de INPESCA y Sebastián Vásquez, jefe de proyecto.

**Taller de organización y protocolo de determinación de factores críticos del hábitat.** Los días 02 de enero y 22 de marzo de 2018 se realizaron talleres asociados a la identificación de factores críticos del hábitat de jurel. Dichas reuniones fueron llevadas a cabo con el propósito de protocolizar la revisión bibliográfica asociada al objetivo específico #1, y compartir y consensuar conocimientos y experiencias del grupo de trabajo del proyecto, en relación a la identificación de agentes o factores críticos (o relevantes) que tanto en el ámbito físico-químico como bioecológico, tienen efecto en la abundancia y distribución espacio-temporal de juveniles y adultos de jurel, integrando una mirada interdisciplinaria y multifactorial, que es necesaria en este tipo de proyectos. Participaron los señores Sergio Núñez, Cristian Salas, Nicolás Alegría, Carlos González, Alexander Gretchina, Aquiles Sepúlveda y Sebastián Vásquez de INPESCA.

**Reunión de datos.** El día 13 de marzo de 2018 en dependencias de INPESCA se realizó esta reunión para identificar las fuentes de información necesarias para alimentar al modelo espacial de simulación de distribución de jurel en el pacífico suroriental. En esta reunión se identificaron las necesidades de información, las cuales fueron planteadas al mandante en la reunión de coordinación del proyecto. Participaron los señores Sergio Núñez, Carlos González, Aquiles Sepúlveda y Sebastián Vásquez de INPESCA.

**Taller de análisis de modelo biogeoquímico.** Entre los días 23 y 27 de julio de 2018 se contó con la visita a INPESCA del Dr. Vincent Echevin, experto internacional en materias de modelación hidrodinámica y biogeoquímica. En el marco de esta visita se desarrolló el Taller de análisis y validación del modelo biogeoquímico ROMS-PISCES donde se analizaron las problemáticas asociadas a este objetivo del proyecto, se identificaron las posibles vías de error y se delinearon las acciones a seguir para lograr satisfacer los objetivos planteados. En el mismo contexto, el Dr. Echevin brindó la charla "The coastal impact of the 2015-2016 "El Niño" and 2017 "El Niñocostero" events off Peru: analysis of in-situ measurements, satellite data and model experiments" a la cual asistieron profesionales de INPESCA, estudiantes y académicos de la Universidad de Concepción, profesionales vinculados a la actividad pesquera y público en general. La presentación y material fotográfico de la actividad se presenta en el Anexo III.

**Estadía asociada a los objetivos del proyecto.** Dentro de las actividades derivadas del proyecto, el jefe de proyecto Sebastián Vásquez realizará una estadía de tres semanas (19/11 - 07/12) en la Universidad Miguel Hernández de Elche, España, donde realizará trabajo colaborativo con el Dr. Josep Barber-Valles especialista en estadística bayesiana de dicha casa de estudios, y con la Dra. María Grazia Pennino, especialista en modelos estadísticos de distribución de especies del Instituto Español de Oceanografía. En dicha estadía, se abordarán temas relacionados con el desarrollo de modelos predictivos para jurel. Esta estadía ha sido co-financiada entre una beca otorgada a S. Vásquez por el Fondo de Movilidad en Investigación de la Universidad de Elche y, en menor medida, por fondos asociados al proyecto FIPA 2017-62. No obstante, el mayor financiamiento fue externo, es una actividad que se utilizará en beneficios del presente proyecto.

**Presentación comité científico-técnico de jurel.** El día 24 de abril de 2019, el jefe de proyecto Sebastián Vásquez, jefe de proyecto, asistió como invitado a la sesión ordinaria del comité

científico técnico de jurel. En esta oportunidad se presentaron los avances del proyecto, haciendo hincapié en las dificultades presentadas para el desarrollo del mismo, principalmente asociadas a la modelación hidrodinámica y biogeoquímica del Pacífico suroriental, así como las relacionadas con la recopilación de información referenciada espacio-temporalmente de la presencia de jurel en la ZEE de Perú. Además, se presentaron las hipótesis a ser contrastadas y los plazos considerados para la realización del taller de expertos y el taller de presentación de resultados.

**Talleres internos de análisis de resultados.** Durante los meses de julio y junio de 2020 se realizaron 8 sesiones de discusión del equipo ejecutor en relación a los resultados del proyecto y en preparación para el taller de discusión experta titulado “Actualización del estado del conocimiento de la estructura poblacional de jurel en el Pacífico Suroriental”.

**Taller de discusión experta.** Los días 3 y 7 de agosto de 2020, en el marco del desarrollo del objetivo específico 6 de esta estudio se desarrolló el taller “Actualización del estado del conocimiento de la estructura poblacional de jurel en el Pacífico Suroriental” con profesionales de distintas entidades relacionadas con el estudio y el manejo de la pesquería de jurel en Chile. Este taller fue estructurado como una instancia participativa, donde el equipo ejecutor presentó el marco general de la problemática asociada a la estructura poblacional de jurel, incluyendo los principales resultados del proyecto FIPA 2017-62 los que dieron contexto a tres etapas de participación: i) un panel de discusión abierta mediada por un moderador; ii) una instancia de identificación de fortalezas y debilidades de las metodologías presentadas hacia el entendimiento de la estructura poblacional, y; iii) una instancia propositiva de líneas de desarrollo en investigación aplicada hacia la estructura poblacional de jurel.

**Taller de presentación y discusión de resultados.** El día 26 de agosto de 2020 se realizó el taller de presentación y discusión de resultados del proyecto FIPA 2017-62 con participación de distintos actores asociados a la pesquería de jurel. Un informe de este taller se encuentra en el Anexo VI.

## 9. PUBLICACIONES DERIVADAS DEL PROYECTO

---

Como parte del proceso de asesoría de este proyecto hacia su contra parte técnica de la Subsecretaría de Pesca y Acuicultura y en particular en la participación nacional en el comité científico de la Organización Regional de Pesca del Pacífico Sur OROP-PS, se elaboraron dos publicaciones, las que a su vez sustentaron presentaciones en las reuniones del comité científico de los años 2019 y 2020, las que se adjuntan en el Anexo VIII. Las publicaciones derivadas de este proyecto fueron:

Sebastián Vásquez, Aquiles Sepúlveda & Sergio Núñez. 2019. **Spatio-temporal distribution pattern of Chilean jack mackerel (*Trachurus murphyi*) fishing grounds and environmental variability off southern-central Chile**. South Pacific Regional Fisheries Management Organization. 7th Meeting of the Scientific Committee. 7 to 12 October 2019, La Havana, Cuba.

Sebastián Vásquez, Cristian Salas, Aquiles Sepúlveda & Maria Grazia Pennino. 2020. **Estimation and prediction of the spatial occurrence of jack mackerel (*Trachurus murphyi*) using Bayesian Hierarchical spatial models**. South Pacific Regional Fisheries Management Organization. 8th Meeting of the Scientific Committee. 02 to 07 October 2020, Wellington, New Zealand.



## 10. REFERENCIAS

- Abramov, A.A. & A.N. Kotlyar. 1980. Some biological features of the Peruvian jack mackerel, *Trachurus symmetricus murphyi*. J. Ichthyol., 80: 25-31.
- Aguirre, C., Garreaud, R. & J. Rutllant. 2014. Surface ocean response to synoptic-scale variability in wind stress and heat fluxes off south-central Chile. Dynamics of Atmospheres and Oceans 65 (2014) 64–85
- Aguirre, C., Pizarro, O., Strub, P.T., Garreaud, R., Barth, J., 2012. Seasonal dynamics of the near-surface alongshore flow off central Chile. J. Geophys. Res. 117, C01006
- Alegre A., Espinoza, P., Espino, M. 2013. Trophic ecology of Jack mackerel *Trachurus murphyi* (Nichols 1920) in Peru, 1977 – 2011 In Csirke, J. (Ed), Ecología del jurel (*Trachurus murphyi*) en el Perú. Revista Peruana de biología, número especial 20(1), pp 075- 082
- Andrianov, D.P. 1985. Study on the reproduction of Peruvian scad, *Trachurus murphyi* (Carangidae), of the Peruvian shelf. J. Ichthyol., 25: 32-40.
- Antezana, T. 2002b. Adaptive migratory behavior of *Euphausia mucronata* in the oxygen minimum layer of the Humboldt Current. En: J. Farber (ed.). Oceanography of the Eastern Pacific II. CICESE, Ensenada, pp. 29-40.
- Aracena O, R Alarcón, S Collado, I Lepe & D Arriagada. 1998. Aspectos reproductivos del jurel (*Trachurus symmetricus murphyi*) de la pesquería de cerco de la octava región, Chile 1994-1995. En: Arcos D (ed). Biología y ecología del jurel en aguas chilenas, pp. 101-114. Instituto de Investigación Pesquera, Talcahuano.
- Arancibia, H., Cubillos, L., Alay, F., González, F., Gavilán, J., Hernández, A., Alarcón, R., Núñez, S., Miranda, L., George-Nascimento, M. 1996. Unidades de stock en el recurso jurel de la I a XI Regiones. Informe Final Proyecto FIP 1994-19: 165 pp.
- Arcos, D., Cubillos, L. & S. Núñez. 2001. The jack mackerel fishery and El Niño 1997-98 effects off Chile. Progress in Oceanography, 49: 597-617.
- Arcos, D.F. and Grechina, A.S. (Eds.) (1994) Biología y pesca comercial del jurel en el Pacífico Sur. Ed. Aníbal Pinto, Concepción, Chile, 203 pages
- Ashford, J., Serra, R., Saavedra, J.-C., Letelier, J. 2011 Otolith chemistry indicates large-scale connectivity in Chilean jack mackerel (*Trachurus murphyi*), a highly mobile species in the Southern Pacific Ocean. Fisheries Research, 107 (2011) pp 291-299.
- AtlantNIRO, 2003. Informe de expedición científica al Pacífico Suroriental en STM-8390 "Atlantida" (crucero 32). 14 agosto 2002 – 03 marzo 2003. Archivos de AtlantNIRO, Kaliningrado, Rusia.

- AtlantNIRO, 2003. Informe de expedición científica al Pacífico Suroriental en STM-8390 —Atlantidal (crucero 32). 14 agosto 2002 – 03 marzo 2003. Archivos de AtlantNIRO, Kaliningrado, Rusia.
- AtlantNIRO, 2010. Informe de la expedición científica de STM K-1704 "Atlantida" (crucero 53) a las regiones del Atlántico Norte y del Pacífico Sur fuera de las Zonas Económicas Exclusivas de los países ribereños. 15 Julio-28 Diciembre 2009. Archivos de AtlantNIRO, Kaliningrado, Rusia.
- AtlantNIRO, 2010. Informe de la expedición científica de STM K-1704 —Atlantidal (crucero 53) a las regiones del Atlántico Norte y del Pacífico Sur fuera de las Zonas Económicas Exclusivas de los países ribereños. 15 Julio-28 Diciembre 2009. Archivos de AtlantNIRO, Kaliningrado, Rusia.
- AtlantNIRO, 2010. Informe de la expedición científica de STM K-1704 —Atlantidal (crucero 53) a las regiones del Atlántico Norte y del Pacífico Sur fuera de las Zonas Económicas Exclusivas de los países ribereños. 15 Julio-28 Diciembre 2009. Archivos de AtlantNIRO, Kaliningrado, Rusia.
- Aumont, O. and Bopp, L. 2006. Globalizing results from ocean in-situ iron fertilization studies, *Global Biogeochem. Cy.*, 20, GB2017, doi:10.1029/2005GB002591.
- Aumont, O., Bopp, L., 2006. Globalizing results from ocean in situ iron fertilization studies. *Global Biogeochemical Cycles* 20 (2). doi:10.1029/2005GB00259.
- Aumont, O., Ethé, C., Tagliabue, A., Bopp, L., and Gehlen, M. 2015. PISCES-v2: an ocean biogeochemical model for carbon and ecosystem studies, *Geosci. Model Dev.*, 8, 2465–2513, doi:10.5194/gmd-8-2465-2015.
- Aumont, O., Maier-Reimer, E., Blain, S., Monfray, P., 2003. An ecosystem model of the global ocean including Fe, Si, P colimitations. *Global Biogeochemical Cycles* 17 (2), 1060.
- Aumont, O., Maier-Reimer, E., Blain, S., Monfray, P., 2003. An ecosystem model of the global ocean including Fe, Si, P colimitations. *Global Biogeochemical Cycles*
- Ayón, P. & Correa, J. 2013. Variabilidad espacial y temporal de larvas de jurel *Trachurus murphyi* en el Perú entre 1966 – 2010. *Rev. peru. biol.* número especial 20(1): 083- 086
- Bakka, H., Krainski, E., Bolin, D., Rue, H., and Lindgren, F. 2019. A class of interpretable and computationally efficient non-separable space-time models based on stochastic partial differential equations.
- Barange, M., Coetzee, J., Takasuka, A., Hill, K., Gutierrez, M., Oozeki, Y., van der Lingen, C., Agostini, V. 2009. Eastern Boundary Upwelling Ecosystems: Integrative and Comparative Approaches. *Eastern Boundary Upwelling Ecosystems Volume 83, Issues 1–4, December 2009 pp 251–260*

- Barbieri, M.A., Córdova, J., Lillo, S., Peña, H., Grechina, A., Núñez, S., Sepúlveda, A., Miranda, L y Rebolledo, H. 1999. Análisis de la estructura del stock de jurel fuera de las aguas jurisdiccionales. Informes Técnicos FIP-IT/97-05B, 121 pp.
- Barbieri., M.A., Córdova, J.,& M. Espejo. 2001. Condiciones biológicas del jurel. Informe Final FIP99-14. Fondo de Investigación Pesquera, Instituto de Investigación Pesquera – Instituto de Fomento Pesquero 245 pp + Anexos y Figuras.
- Bernal, M., Stratoudakis, Y., Coombs, S., Angelico, M., Lago deLanzo's, A., Porteiro, C., Sagarminaga, Y.,et al.2007. Sardinespawning off the European Atlantic coast: characterization of andspatio-temporal variability in spawning habitat. Progress in Oceanography, 74: 210 – 227
- Bernal, M., Stratoudakis, Y., Wood, S., Ibaibarriaga, L., Uriarte, A.,Valde's, L., and Borchers, D. 2011. A revision of daily egg pro-duction estimation methods, with application to Atlanto-Iberiansardine. 1. Daily spawning synchronicity and estimates of egg mor-tality. ICES Journal of Marine Science, 68: 519 – 527.
- Bertrand A., Barbieri M.A., Gerlotto F., Leiva F., Córdova J. (2006) Determinism and 975 plasticity of fish schooling behaviour as exemplified by the South Pacific jack mackerel *Trachurus murphyi*. Marine Ecology Progress Series 311 pp 145–156
- Bertrand, A., Barbieri, M.A., Córdova, J., Hernández, C., Gómez, F., Leiva, F. 2004. Diel vertical behaviour, predator-prey relationships and occupation of space by jack mackerel (*Trachurus murphyi*) off Chile. ICES Journal of Marine Science 61 pp 1105-1112.
- Bertrand, A., Habasque, J., Hattab, T., Hintzen, N. T., Oliveros-Ramos, R.,Gutierrez, M., & Gerlotto, F. 2016. 3-D habitat suitability of jackmackerel*Trachurus murphyi*in the Southeastern Pacific, a comprehensive study.Progress in Oceanography,146, 199-211.
- Blangiardo,M., Cameletti,Baio, G and H. Rue. 2012. Spatial and Spatio-Temporal Epidemiology, 4, 33-49.
- Blangiardo,M., Cameletti,Baio, G and H. Rue. 2012. Spatial and Spatio-Temporal Epidemiology, 4, 33-49.
- Braun, M. & Valenzuela, V. 2008. Seasonal distribution and abundance of jack mackerel (Septiembre 2013) Ecología, pesquería y conservación del jurel (*Trachurus murphyi*) en el (*Trachurus murphyi*) eggs and larvae off northern Chile 1981-2007. In: Chilean jack mackerel workshop, Santiago, Chile, SPRFMO Scientific papers, SWG/Jack Mackerel
- Budgell, W.P., 2005: Numerical simulation of ice-ocean variability in the Barents Sea region, Ocean Dynamics, Volume 55, 370-387
- Cambon, G., Goubanova, K., Marchesiello, P., Dewitte, B., Illig, S. & V. Echevin. 2013. Assessing the impact of downscaled winds on a regional ocean model simulation of the Humboldt system. Ocean Modelling, 65: 11–24.

- Cardenas, L., Silva, A., Magoulas, A., Cabezas, J., Poulin, E. & P. Ojeda. 2009. Genetic population structure in the Chilean jack mackerel, *Trachurus murphyi* (Nichols) across the South-eastern Pacific Ocean. *Fisheries research*. 100(2), 109-115.
- Careaga A., Sica R., Cirillo A. y S. Da Luz. 2006. Aportes para diseñar e implementar un taller. Octavo Seminario-Taller en Desarrollo de Profesional Médico continuo (IDMC). Segundas Jornadas de Experiencias Educativas en DPMC Octubre 5,6 y 7, 2006, 28 pp.
- Castillo, G. and Arizaga, A. (1987) Edad y crecimiento del jurel *Trachurus symmetricus murphyi* (Nichols,1920) en aguas de Chile Central. *Biología Pesquera*, Pont. Univ. Católica de Chile (Talcahuano) 16 pp
- Chaigneau A. & O. Pizarro. 2005. Eddy characteristics in the eastern South Pacific. *Journal of Geophysical Research*, 110, doi:10.1029/2004JC002815
- Chevalier J. & D. Buckles 2009. SAS2 Guía para la Investigación Colaborativa y la Movilización Social. Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo, Ottawa, Canada. 364 pp.
- Colas, F., J. C. McWilliams, X. Capet, and J. Kurian. 2012. Heat balance and eddies in the Peru-Chile current system, *Clim. Dyn.*, 39(1-2), 509–529, doi:10.1007/s00382-011-1170-6.
- Correa-Ramirez, M, Hormazabal S&G. Yuras. 2007. Mesoscale eddies and high chlorophyll concentrations off central Chile (29°–39°S). *Geophysical Research Letters* Vol 34, L12604
- Corten, A., & Janusz, J., 2010. National Report of the European Union to the 2010 SPRFMO Science Working Group. Ninth Science Working Group of SPRFMO, 21–29 October 2010, Viña del Mar, Chile
- Corten, A. 2014. Possible recruitment of jack mackerel (*Trachurus muphyi*) from oceanic waters off Chile to the stock in Peruvian and Ecuadorian waters in 2010. SPRFMO, 2nd Meeting of the Scientific Committee, Honolulu, Hawaii, USA, 1-7 October 2014 SC-02-JM-03 19 pages.
- Cubillos, L., Arancibia, H. (1995) Comparative growth performance of horse mackerel of the genus *Trachurus*, with emphasis on *T. symmetricus murphyi* in Chile. *Scientia Marina*, 59 (3-4) pp 647-652
- Cubillos, L.A., Paramo, J., Ruiz, P., Núñez, S. & A. Sepúlveda. 2008. The spatial structure of the oceanic spawning of jack mackerel (*Trachurus murphyi*) off central Chile (1998–2001). *Fisheries Research*, 90: 261 - 270.
- Dalgaard, P. 2008. *Introductory Statistics with R*. Introductory Statistics with R. Series: Statistics and Computing. 2nd ed., 2008, XVI, 364 p. SpringerLink. ISBN 978-0-387-79053-4.
- Dejnik, T.V. & M.M. Nevinskyi. 1987. Distribución y abundancia de huevos y larvas. En "Recopilación: Biología y pesca del jurel Peruano", Moscú, VNIRO: 56-70 (en ruso).

- Di Lorenzo, E., 2003: Seasonal dynamics of the surface circulation in the Southern California Current System, *Deep-Sea Res. II*, 50, 2371-2388
- Dinniman, M. S., J. M. Klinck, and E. E. Hofmann, 2012: Sensitivity of Circumpolar Deep Water transport and ice shelf basal melt along the west Antarctic Peninsula to changes in the winds. *J. Climate*, 25, 4799–4816, doi
- Dioses, T., V. Alarcón, M.H. Nakama y A. Echeverría. 1989. Desarrollo ovocitario, fecundidad parcial y distribución vertical de los cardúmenes en desove del jurel *Trachurus murphyi* (N). En: R. Jordán, R. Kelly, O. Mora, A. de Vildoso y N. Henríquez (eds.). *Memorias del Simposio internacional sobre recursos vivos y pesquerías en el Pacífico sudeste*. Rev. Com. Perm. Pacífico Sur, Número especial, pp. 287-294.
- Echevin V, Colas F, Chaigneau A, Penven P. 2011. Sensitivity of the Northern Humboldt Current system nearshore modelled circulation to initial and boundary conditions. *J Geophys Res*
- Echevin, V., O. Aumont, J. Ledesma, and G. Flores. 2008. The seasonal cycle of surface chlorophyll in the Peruvian upwelling system: A modeling study, *Prog. Oceanogr.*, 79, 167–176.
- Elizarov, A.A., Grechina A.S., Kotenev B.N., Kuznetsov A.N. 1993. Peruvian Jack mackerel, *Trachurus symmetricus murphyi*, in the open waters of the South Pacific. *J. Ichthyol.* 33, 86-104.
- Escribano, R., Morales, C.E., 2012. Spatial and temporal scales of variability in the coastal upwelling and coastal transition zones off central-southern Chile (35–40°S). *Prog. Oceanogr.* 92–95, 1–7.
- Evseenko, S.A. 1987. Reproduction of Peruvian jack mackerel, *Trachurus symmetricus murphyi*, in the southern Pacific, *Journal of Ichthyology*, 27: 151 – 160.
- Evseenko, S.A. 1987. Reproduction of Peruvian jack mackerel, *Trachurus symmetricus murphyi*, in the southern Pacific. *J. Ichthyol.*, 27: 151-160.
- Galleguillos, R., Torres, A., 1988. Identificación de unidades poblacionales pelágicas. Tercera etapa. Informe final. Subsecretaría de Pesca. 67 p
- George-Nascimento, M. (2000) Geographical variations in the jack mackerel *Trachurus symmetricus murphyi* populations in the southeastern Pacific Ocean as evidenced from the associated parasite communities. *The Journal of Parasitology*. 86 (5) pp 929-32.
- Gerlotto F., M. Gutiérrez & A. Bertrand. 2010. The distribution of Jack mackerel *Trachurus murphyi* in the South Pacific Ocean: a metapopulation hypothesis. FAST-ICES-WG annual meeting. SWNFS, NOAA, San Diego, April 2010.
- Gerlotto, F., & T. Dioses. 2013. Bibliographical synopsis on the main traits of life of *Trachurus murphyi* in the South Pacific Ocean 1st Meeting of the Scientific Committee. 21-27

October 2013, La Jolla, United States of America.

- Gerlotto, F., Gutiérrez, M., And Bertrand, A. 2012. Insight On Population Structure Of The Chilean Jack Mackerel (*Trachurus murphyi*). Aquatic Living Resources, 25: 341-355.
- Gerlotto, F., Gutiérrez, M., Bertrand, A. 2012. Insight on population structure of the Chilean jack mackerel (*Trachurus murphyi*). Aquatic Living Resources, 25 pp 341–355 (2012)
- Gorbunova, N.N., Evseenko, S.A. and Garetsky, S.V. 1985. Distribution of ichthyoplankton in the frontal zones of the Peruvian waters, Journal of Ichthyology. 25: 67–79.
- Gretchina A., A. Sepúlveda & S. Núñez. 2015. Cambios espacio-temporales de las principales pesquerías de jurel en el Pacífico Sur: años 1970-2015. Simposio "El jurel, *Trachurus murphyi*: Un análisis poblacional con integración de diferentes metodologías". Congreso de Ciencias del Mar, Mayo 2015, Universidad Católica del Norte Coquimbo.
- Gretchina, A., Núñez, S. & D. Arcos. 1998. El desove del recurso jurel (*Trachurus symmetricus murphyi* (Nichols)), en el Océano Pacífico Sur. In Biología y Ecología del Jurel en Aguas Chilenas, pp. 117-140. Ed. By D. Arcos. Instituto de Investigación Pesquera, Talcahuano.
- Gretchina. A., A. Arkhipkin & S. Vásquez. 2017. Nuevos antecedentes preliminares sobre el crecimiento diario de jurel, hasta los 2 años de edad, frente las costas de Chile centro-sur. XXXVII Congreso de Ciencias del Mar, Mayo 2017, Pontificia Universidad Católica Valparaíso.
- Guisan, A. and Zimmermann, N. E. 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. Ecol. Model. 135: 147– 186.
- Guisan, A., Zimmermann, N.E., 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. Ecological Modelling.
- Hadfield, M.G, G.J. Rickard, M.J. Uddstrom. 2007. A hydrodynamic model for Chatham Rise, New Zealand N. Z. J. Mar. Freshw. Res., 41 (2), pp. 239-264
- Hadfield, MG, Rickard, GJ, and Uddstrom MJ, 2007. A hydrodynamic model of Chatham Rise, New Zealand, New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research, 41, 239-264.
- Haidvogel, D. B., H. G. Arango, K. Hedstrom, A. Beckmann, P. Malanotte-Rizzoli, and A. F. Shchepetkin, 2000. Model evaluation experiments in the North Atlantic Basin: Simulations in nonlinear terrain-following coordinates, Dyn. Atmos. Oceans, 32, 239–281.
- Haidvogel, D.B. & A. Beckmann. 1998. Numerical modelling of the coastal ocean. In: Brink, K.H., Robinson, A.R. (Eds.). The Sea, vol. 10. Harvard University Press, Cambridge, pp. 457–482.

- Hancock, J., Hart, J.B., Antezana, T. 1995. Searching behaviour and catch of horse mackerel (*Trachurus murphyi*) by industrial purse-seiners off south-central Chile. ICES Journal of Marine Science 52 pp.
- Harden-Jones, F. (1968) Fish Migration. Edward Arnold Ltd, London
- Hare, J. A., & Cowen, R. K. 1993. Ecological and evolutionary implications of the larval transport and reproductive strategy of bluefish *Pomatomus saltatrix*. Marine Ecology Progress Series, 98(1-2), 1-16.
- Hare, J. A., & R. K. Cowen. 1991. Expatriation of *Xyrichtys novacula* (Pisces: Labridae) larvae: Evidence of rapid crossslope exchange. J. Mar. Res. 49: 801-823.
- Hastie, T., Fithian, W., 2013. Inference from presence-only data; the ongoing controversy. Ecography 36, 864-867.
- Hastie, T.J. and Tibshirani, R.J., 1990. Generalized Additive Models. Chapman & Hall.
- Hattab, T., Ben Rais Lasram, F., Albouy, C., Sammari, C., Romdhane, M.S., Cury, P., Leprieur, F. & Le Loc'h, F. 2013. The use of a predictive habitat model and a fuzzy logic
- Hengl, T., Sierdsema, H., Radovic, A., Dilo, A., 2009. Spatial prediction of species' distributions from occurrence-only records: combining point pattern analysis, ENFA and regression-kriging. Ecological Modelling 220, 3499–3511.
- Hengl, T., Sierdsema, H., Radovic, A., Dilo, A., 2009. Spatial prediction of species' distributions from occurrence-only records: combining point pattern analysis, ENFA and regression-kriging. Ecological Modelling 220, 3499–3511.
- Hengl, T., Sierdsema, H., Radovic, A., Dilo, A., 2009. Spatial prediction of species' distributions from occurrence-only records: combining point pattern analysis, ENFA and regression-kriging. Ecological Modelling 220, 3499–3511.
- Hintzen, N.T., Corten, A.A.H.M., Gerlotto, F., Habasque, J., Bertrand, A., Lehodey, P., Brunel, T.P.A., Dragon, A.C., Senina, I., 2014. Hydrography and Jack mackerel stock in the South Pacific - Final report. IJmuiden, IMARES C176/14, 65 pp.
- Hormazabal, S., Shaffer, G., & O. Leth. 2004. Costal transition zone off Chile. . J. Geophys. Res. 109, C01021.
- Kinas, P.G., Andrade, H.A., 2017. Introdução à análise bayesiana (com R). Consultor Editorial.
- Konchina, Y.V., Nesin, A.V., Onishchik, N.A. & , Y.P. Pavlov. 1996. On the migration and feeding of the jack mackerel *Trachurus symmetricus murphyi* in the Eastern Pacific. J. Ichthyol. 36, 753–766.

- Kritzer J.P. and Sales P.F. 2004. Metapopulation ecology in the sea: from Levin's model to marine ecology 1167 and fisheries science. *Fish and Fisheries*. 5, pp 131–140.
- Leal E., E. Díaz, J.C. Saavedra-Nievas & G. Claramunt. 2013. Ciclo reproductivo, longitud y edad de madurez de jurel *Trachurus murphyi*, en la costa de Chile. *Revista de Biología Marina y Oceanografía* Vol. 48, No3: 601-611.
- Leth, O. & G. Shaffer. 2001. A numerical study of seasonal variability in the circulation off central Chile. *J. Geophys. Res.*, 106, 22229-22248.
- Li G., Cao J., Zou X., Chen X., Runnebaum J. (2016) Modeling habitat suitability index for Chilean jack mackerel (*Trachurus murphyi*) in the South East Pacific. *Fisheries Research* 178 (2016) pp 47–60
- Lindgren, F., Rue, H., Lindström, J., 2011. An explicit link between Gaussian fields 577 and Gaussian Markov random fields: the stochastic partial differential equation approach. *J. R. Stat. Soc.* 73, 423-498.
- Loc'h, F., 2013. The use of a predictive habitat model and a fuzzy logic approach for marine management and planning. *PLoS ONE* 8, e76430.
- Ludwig, W., J. L. Probst, and S. Kempe. 1996., Predicting the oceanic input of organic carbon by continental erosion, *Global Biogeochem. Cycles*, 10, 23 – 41.
- Ludwig, W., Probst, J. L. & Kempe, S. 1996. Predicting the oceanic input of organic carbon by continental erosion. *Global Biogeochem. Cycles* 10, 23-41.
- Marchesiello, P. J. McWilliams, A. Shchepetkin. 2003. Equilibrium structure and dynamics of the California Current system *J. Phys. Oceanogr.*, 33, pp. 753-783
- Mason, E.; Molemaker, M. J.; Colas, F.; Shchepetkin, A. F.; McWilliams, J.C. Sangra, P. 2010. Procedures for offline grid nesting in regional ocean models *Ocean Modell.*, 35, 1-15
- Models using Integrated Nested Laplace Approximations (with discussion). *Journal of the*
- Moler, 1984. *MATLAB Version 1.0*. Meeting of the IEEE Conference on Decision and Control, the CDC, Las Vegas, United States.
- Morales, C., Torreblanca, M., Hormazábal, S., Correa-Ramírez, M., Núñez, S. & P Hidalgo. 2010. Mesoscale structure of copepod assemblages in the coastal transition zone and oceanic waters off central-southern Chile. *Progress in Oceanography* 84: 158-173.
- Muñoz, F., Pennino, M.G., Conesa, D., López-Quílez, A., Bellido, J.M., 2013. Estimation and prediction of the spatial occurrence of fish species using Bayesian latent Gaussian models. *Stoch. Env. Res. Risk A*. 27, 1171-1180.



- Nakata, H., S. Kimura, Y. Okazaki & A. Kasai. 2000. Implications of meso-scale eddies caused by frontal disturbances of the Kuroshio Current for anchovy recruitment. *ICES Journal of Marine Science*, 57: 143-152.
- Nekrasov, V.V. 1994. Mackerel of the World Ocean (genus *Trachurus*) VNIRO, Moscow, pp 1-228.
- Ñiquen M., M. Bouchon, D. Ulloa & A. Medina. 2013. Análisis de la pesquería del jurel *Trachurus murphyi* en el Perú. *Rev. Perú, biol. Número especial 20(1): 097-106*. En: *Ecología, pesquería y conservación del jurel (Trachurus murphyi) en Perú*. Ed.: Csirke J., R. Guevara-Carrasco & M. Espino.
- Nosov, E.V and Kalchugin, P.V. (1990) New data on distribution of Peruvian horse mackerel *Trachurus symmetricus murphyi* (Nichols, 1920) in waters of the New Zealand plateau. Express information of VNIIEK. Series Utilization of fisheries resources of the World Ocean, 2 pp 8-14.
- Oksanen, J., Blanchet, F.G., Kindt, R., Legendre, P., Minchin, P.R., O'hara, R., Simpson, G.L., Solymos, P., Stevens, M.H.H., Wagner, H., 2013. Package 'vegan'. Community ecology package, version 2.
- Oliva, M.E. (1999) Metazoan parasites of the jack mackerel *Trachurus murphyi* (teleostei, Carangidae) in a latitudinal gradient from South America (Chile and Peru). *Parasite* 6 pp 223-230.
- Oppel, S., Meirinho, A., Ramirez, I., Gardner, B., O'Connell, A., Miller, P. & Louzao, M. (2012) Comparison of five modelling techniques to predict the spatial distribution and abundance of seabirds. *Biological Conservation*, 156,94–104.
- Oppel, S., Meirinho, A., Ramírez, I., Gardner, B., O'Connell, A.F., Miller, P.I. & Louzao, M. 2012. Comparison of five modelling techniques to predict the spatial distribution and abundance of seabirds. *Biological Conservation*, 156, 94– 104.
- Orúe, B., Pennino, M.G., Lopez, J., Moreno, G., Santiago, J., Ramos, L. & H. Murua. 2020. Seasonal Distribution of Tuna and Non-tuna Species Associated With Drifting Fish Aggregating Devices (DFADs) in the Western Indian Ocean Using Fishery-Independent Data. *Front. Mar. Sci.*, 17 June 2020 | <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00441>
- Ospina-Alvarez, A., Bernal M., Catalán I. A., Roos D., Bigot J.-L. & I. Palomera. 2013. Modeling Fish Egg Production and Spatial Distribution from Acoustic Data: A Step Forward into the Analysis of Recruitment. *PLoS ONE* 8(9), p. e73687. doi:10.1371/journal.pone.0073687
- Ovaskainen, O. and Hanski, I. 2004. From Individual Behavior to Metapopulation Dynamics: Unifying the Patchy Population and Classic Metapopulation Models. *The American Naturalist* vol. 164, no. 3 1208 september 2004

- Oyarzún C, J Chong & M Malagueño. 1998. Fenología reproductiva en el jurel, *Trachurus symmetricus* (Ayres, 1855) (Perciformes, Carangidae) en el área de Talcahuano-Chile: 1982-1984. En: Arcos D (ed). *Biología y ecología del jurel en aguas chilenas*, pp. 67-75. Instituto de Investigación Pesquera, Talcahuano.
- Parada C, Yannicelli B, Hormazábal S, Vásquez S, Porobic J, Ernst B, Gatica C, Arteaga M, Montecinos A, Núñez S, Gretchina A. Environmental variability and fisheries in the southeastern Pacific: research status and challenges for fisheries management. *Lat. Am. J. Aquat. Res.* 2017;41(1): 1-28.
- Parada, C., Gretchina, A., Vasquez, S., Belmadani, A., Combes, V., Ernst, B., Di Lorenzo, E., Porobic, J., and Sepulveda, A. Expanding the conceptual framework of the spatial population structure and life history of jack mackerel in the eastern South Pacific: an oceanic seamount region as potential spawning/nursery habitat. – *ICES Journal of Marine Science*, 74: 2398–2414.
- Pecuchet, L., A. Tornroos, and M. Lindegren. 2016. Patterns and drivers of fish community assembly in large marine ecosystem. *Marine Ecology Progress Series* 546:239–248.
- Peliz, A., J. Dubert, D. B. Haidvogel, and B. Le Cann. 2003. Generation and unstable evolution of a density-driven Eastern Poleward Current: The Iberian Poleward Current, *J. Geophys. Res.*, 108(C8), 3268, doi:10.1029/2002JC001443.
- Penny, A.J., C.J. Loveridge & K. Gorge. 2011. Estimation of New Zealand monthly purse-seine and midwater trawl catches of *Trachurus novaezelandiae*, *T. declinis* and *T. murphyi* by fisheries management area from October 1985 to December 2010. *SWG-10-INF-02*: 59
- Penven, P., N. Chang, and F. Shillington. 2006. Modelling the Agulhas Current using SAfE (Southern Africa Experiment), *Geophys. Res. Abstr.*, 8, Abstract 04225.
- Perea, Á., Mori, J., Buitrón, B., Sánchez, J. (2013) Reproductive aspects of Jack mackerel *Trachurus murphyi*. In: Csirke J., Guevara-Carrasco, R., Espino, M. (Eds.). *Ecología, pesquería y conservación del jurel (*Trachurus murphyi*) en el Perú*. *Revista Peruana de Biología*, número especial, 20(1) pp 29–34.
- Polovina, J.J., Howell, E.A., Abecassis, M., 2008. Ocean's least productive waters are expanding. *Geophysical Research Letters* 35, L03618.
- Quiñones, R., Serra, R., Núñez, S., Arancibia, H., Córdova, J. & F. Bustos. 1997. Relación espacial entre el jurel y sus presas en la zona centro-sur de Chile. In: Tarifeño, E. (Ed.), *Gestión de sistemas oceanográficos del Pacífico oriental*. UNESCO COI/INF – 1046, pp. 187–202.
- Rivoirard, J., Simmonds, E.J., Foote, K.G., Fernandes, P., Bez, N., 2000. *Geostatistics for Estimating Fish Abundance*. John Wiley.

- Roos, M., Held, L., 2011. Sensitivity analysis in Bayesian generalized linear mixed models for binary data. *Bayesian Anal.* 6, 259-278.
- Rue H, Martino S, Chopin N. 2009. Approximate Bayesian Inference for Latent Gaussian. *Royal Statistical Society B*, 71, 319–392.
- Ruiz, P., Sepúlveda, A., Cubillos, L., Oyarzún, C., Chong, J. (2008) Reproductive parameters and spawning biomass of jack mackerel (*Trachurus murphyi*), in 1999-2006, determined by the daily egg production method. In: Chilean Jack Mackerel WorkShop. Organized by SPRFMO and the Chilean UnderSecretary of Fishing. 30 June – 4 July 2008. FAO Regional Office for Latin America. Santiago-Chile.
- Salvatteci, R., 2013. Multi-decadal to Millennial Scale Variability in Oxygen Minimum Zone Intensity, Export Production and Pelagic Fish Abundances from Marine Laminated Sediments off Pisco, Peru during the last 25 000 years PhD Thesis. University Paris 6, p. 258.
- Salvatteci, R., 2013. Multi-decadal to Millennial Scale Variability in Oxygen Minimum Zone Intensity, Export Production and Pelagic Fish Abundances from Marine Laminated Sediments off Pisco, Peru during the last 25 000 years PhD Thesis. University Paris 6, p. 258.
- Salvatteci, R., 2013. Multi-decadal to millennial scale variability in Oxygen Minimum Zone intensity, export production and pelagic fish abundances from marine laminated sediments off Pisco, Peru during the last 25 000 years. l'UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE.
- Santander, H. and De Castillo, C. S. 1971. Desarrollo y distribución de huevos y larvas de "jurel" *Trachurus symmetricus murphyi* (nichols), en la costa peruana. Instituto del Mar del Perú. Informe N° 1239 36, 23pages.
- SC-01-12, SPRFMO, 2013. Report on the fishing activities of the peruvian fleet in the area of application of the SPRFMO during january 2012 – july 2013. 15 p. (<https://www.sprfmo.int/assets/Meetings/Meetings-2013-plus/SC-Meetings/1st-SC-Meeting-2013>).
- Serra et al. 2010. Estructura poblacional de jurel. Informe Final proyecto FIP 2010-18. 287 pp.
- Serra, J.R. 1991. Important life history aspects of the Chilean jack mackerel, *Trachurus symmetricus murphyi*. *Investigaciones Pesqueras (Chile)*, 36: 67 – 83.
- Shaffer, G., S. Hormazabal, O. Pizarro & S. Salinas. 1999. Seasonal and interannual variability of currents and temperature over the slope of central Chile. *J. Geophys. Res.*, 104, C12, 29,951-29,961, 1999.

- Shaffer, G.S., Hormazabal, S., Pizarro, O., & S. Salinas. 1999. Seasonal and interannual variability of currents and temperature off central Chile. *J. Geophys. Res.*, 104, 29, 931-962.
- Shchepetkin, A. F., McWilliams, J. C. 2005. The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean Modelling*, 9(4): 347-404. doi:10.1016/j.ocemod.2004.08.002.
- Shchepetkin, A.F. & J.C. McWilliams. 2003. A method for computing horizontal pressure-gradient force in an oceanic model with a nonaligned vertical coordinate, *J. Geophys. Res.*, 108 (C3), 3090, doi:10.1029/2001JC001047.
- Strub, P. T., Mesias, J.M & C. James. 1995. Altimeter observation of the Perú-Chile Countercurrent. *Geophys. Res. Lett.* 22(3): 211-214.
- Strub, P.T., J. Mesias, & C. James, 1995: Satellite observations of the Peru-Chile countercurrent. *Geophys. Res. Lettr.*, 22, 211-214.
- Sub-Group/CHJMWS paper #1. SPRFMO Interim Secretariat, PO Box 3797, Wellington
- SWG-03, SPRFMO, 2012. Report of the Jack Mackerel Subgroup. 11th Meeting of the Science Working Group, SPRFMO. Lima, Peru, 15-19 October 2012. 69 p. (<http://www.southpacificrfmo.org/assets/11th-SWG-and-10th-DIWG-meetings/SWG-11/SWG-JM-report-with-TechAttachments.pdf>).
- SWG-11-08a, SPRFMO, 2012. Peru National Report No2. National report on the peruvian stock of jack mackerel (northern stock) and the peruvian fishery in national jurisdictional waters. 11th Meeting of the Science Working Group, SPRFMO. Lima, Peru, 15-19 October 2012. 65 p. (<http://www.southpacificrfmo.org/eleventh-meeting/>).
- SPRFMO, 2020. SPRFMO SC8-Report. Annex 8. Jack Mackerel Technical Annex. 8th SPRFMO Scientific Committee Meeting (SC8). New Zealand, but held remotely. 66 pp.
- Tegen, I. & Fung, I. 1995. Contribution to the atmospheric mineral aerosol load from land surface modification. *Journal of Geophysical Research* 100: doi: 10.1029/95JD02051. issn: 0148-0227.
- Thiel M, Macaya E, Acuña E, Arntz W, Bastías H et al. 2007. The Humboldt Current System of northern and central Chile: oceanographic processes, ecological interactions and socioeconomic feedback. *Oceanogr Mar Biol* 45:195-345
- Thomas A. 1999. Seasonal distributions of satellite-measured phytoplankton pigment concentration along the Chilean coast. *J Geophys Res-Oceans* 104:25877-25890
- Tille, Y., Matei, A., 2016. *sampling: Survey Sampling*. R package version 2.8. <https://CRAN.r-project.org/package=sampling>.

- Vásquez, 2012. Modelación de la historia de vida temprana del jurel (*Trachurus murphyi*) en el Pacífico suroriental: Influencia de factores biofísicos en la conectividad de zonas desove-crianza. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias, mención Pesquerías. Departamento de Oceanografía. Universidad de Concepción. 161 pp.
- Vásquez, S., Correa-Ramírez, M., Parada, C., & A. Sepúlveda. 2013. The influence of oceanographic processes on jack mackerel (*Trachurus murphyi*) larval distribution and population structure in the southeastern Pacific Ocean. ICES Journal of Marine Science, 70: 1097–1107.
- Vásquez, S., Salas, C., Sepúlveda, A., Núñez, S., Soto-Mardones, L., Letelier, J., Cisterna, L., Alegría, N., Gretchina, A., Gatica, C. & M. Arteaga. 2017. Estructura poblacional y estimación de índices de reclutamiento de jurel basados en modelos biofísicos (fase I). Informe Final proyecto FIPA 2014-33. 321 págs.
- Vergara, O., Dewitte, B., Montes, I., Garçon, V., Ramos, M., Paulmier, A. & Pizarro, O. 2016. Seasonal variability of the oxygen minimum zone off Peru in a high-resolution regional coupled model. Biogeosciences, 13, 4389–4410, 2016
- Warner, J. C., C. R. Sherwood, H. G. Arango, and R. P. Signell, 2005. Performance of four turbulence closure methods implemented using a generic length scale method, Ocean Modelling, 8, 81-113. (PDF)
- Wilkin, J. L., and L. Lanerolle, 2005. Ocean Forecast and Analysis Models for Coastal Observatories, in: Ocean Weather Forecasting, An Integrated View of Oceanography, Springer, 577p., ISBN: 978-1-4020-3981-2.
- Wilkin, J. L., H. G. Arango, D. B. Haidvogel, C. S. Lichtenwalner, S. M. Durski, and K. S. Hedstrom, 2005: A regional Ocean Modeling System for the Long-term Ecosystem Observatory, J. Geophys. Res., 110, C06S91, doi:10.1029/2003JC002218.
- Wood, S.: Generalized Additive Models. An Introduction with R. 2006. Chapman & Hall, Boca Raton.
- Wood, S.N. 2006. Generalized Additive Models: An Introduction with R. Texts in Statistical Science. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton.
- Yañez, E., Barbieri, M.A., González, A., Pizarro, O., Bravo, M., Canales, C. & S. Salinas. 1994. Sea surface thermal structure associated to the pelagic fish resources distribution in northern Chile. Second Thematic Conf. on Rem. Sens. Mar. Coastal Envir. ERIM, Ann Arbor MI, 149-162.
- Zhu, G., Zhang, M., Ashford, J., Zou, X., Chen, X., Zhou, Y., 2014. Does life history connectivity explain distributions of Chilean jack mackerel *Trachurus murphyi* caught in international waters prior to decline of the southeastern Pacific fishery? Fisheries Research 151, 20–25.

Zwolinski, J. P. and Demer, D.A. 2012. A cold oceanographic regime with high exploitation rates in the 1297 Northeast Pacific forecasts a collapse of the sardine stock. PNAS, March 13, 2012, vol. 109 no. 11 pp 1298 4175–4180.

**Anexo I. Listado de registros bibliográficos para la determinación de factores críticos del hábitat de jurel en el Pacífico suroriental**

| Cita  | Año de publicación | Variable                  | Zona                                  | Etapa ciclo vida   |
|---|--------------------|---------------------------|---------------------------------------|--------------------|
| Li, G., Cao, J., Zou, X., Chen, X., Runnebaum, J., 2016. Modeling habitat suitability index for Chilean jack mackerel ( <i>Trachurus murphyi</i> ) in the South East Pacific. Fisheries Research. <a href="http://dx.doi.org/10.1016/j.fishres.2015.11.012">http://dx.doi.org/10.1016/j.fishres.2015.11.012</a> . | 2016               | Altura Nivel del Mar      | Zona oceánica                         | Adultos            |
| Núñez <i>et al.</i> 2008. Variability of the Chilean mackerel fishing habitat in the southeastern Pacific ocean. Eighth International Meeting: SWG: Jack Mackerel Sub-Group SP-08_SWG-JM-06. 30 pages.  | 2008               | Capa de mezcla            | Chile centro-sur (costero y oceánico) | Adultos            |
| Chernyshkov, P., E. Timokhin & A. Glubokov. 2008. Inter-annual and seasonal variability of oceanological conditions in the Southern Pacific Ocean in connection with the pelagic ecosystem structure. 2 pages. Chilean Jack mackerel Workshop, CHJMWS paper#6. SPRFMO Meeting, Santiago-Chile.                    | 2008               | Circulación anticiclónica | Pacifico sur                          | Juveniles, Adultos |
| Hormazabal, S., S. Nuñez, D. Arcos, F. Espindola, and G. Yuras. 2004. Mesoscale eddies and the pelagic fishery off central Chile (33 – 40 S), <i>Gayana (Zool.)</i> , 68(2), 291 – 296.   | 2004               | Clorofila-a               | costa Chile                           | Adultos            |
| Serra <i>et al.</i> 2013. Estructura poblacional del jurel 2013. Informe Final. Proyecto FIP 2010-18. Instituto de Fomento Pesquero. 301 págs.  | 2013               | Clorofila-a               | Perú central                          | Adultos            |
| Hintzen, N., A. Corten, F. Gerlotto, J. Habasque, A. Bertrand, P. Lehodey, T. Brunel, A.-C. Dragon, and I. Senina. 2014. Hydrography and Jack Mackerel Stock in the South Pacific — Final Report. Report number C176.14. IMARES—Institute for Marine Resources & Ecosystem Studies,                               | 2014               | Clorofila-a               | Pacifico sur                          | Juveniles          |

|   |      |             |  |                     |
|---|------|-------------|--|---------------------|
| Netherlands   |      |             |  |                     |
| Bertrand, A., A-C. Dragon, J. Habasque & P. Lehodey. 2014. Hydrography/biogeochemistry and Chilean Jack mackerel stock structure interactions. Information paper SC-02-JM-06. 12 pages. 2nd Scientific Committee Meeting. SPRFMO Scientific Meeting, Honolulu, Hawaii, USA, 1-7 October 2014.                             | 2014 | Clorofila-a | Costa de Peru, norte y centro de Chile | Adultos y Juveniles |
| Vásquez <i>et al.</i> 2015. Estructura poblacional y estimación de índices de reclutamiento de jurel basados en modelos biofísicos (fase I). Informe Final. Proyecto FIP 2014-33. Instituto de Investigación Pesquera, 321 págs.  | 2015 | Clorofila-a | Costera Chile norte                    | Juveniles           |
| Bertrand, A., Habasque, J., Hattab, T., Hintzen, N. T., Oliveros-Ramos, R., Gutierrez, M., & Gerlotto, F. 2016. 3-D habitat suitability of jack mackerel <i>Trachurus murphyi</i> in the Southeastern Pacific, a comprehensive study. <i>Progress in Oceanography</i> , 146, 199–211.                                     | 2016 | Clorofila-a | Pacífico suroriental                   | Adultos             |
| Li, G., Cao, J., Zou, X., Chen, X., Runnebaum, J., 2016. Modeling habitat suitability index for Chilean jack mackerel ( <i>Trachurus murphyi</i> ) in the South East Pacific. <i>Fisheries Research</i> . <a href="http://dx.doi.org/10.1016/j.fishres.2015.11.012">http://dx.doi.org/10.1016/j.fishres.2015.11.012</a> . | 2016 | Clorofila-a | Zona oceanica                          | Adultos             |



|  |      |                         |                                    |  |
|--|------|-------------------------|------------------------------------|--|
| Vasquez, S., Correa-Ramirez, M., Parada, C., & Sepulveda, A. 2013. The influence of oceanographic processes on jack mackerel ( <i>Trachurus murphyi</i> ) larval distribution and population structure in the southeastern Pacific ocean. <i>ICES Journal of Marine Sciences</i> , 70(6), 1097–1107. <a href="https://doi.org/10.1093/icesjms/fst065">https://doi.org/10.1093/icesjms/fst065</a> | 2013 | Corrientes              | Pacifico suroriental               | Juveniles                              |
| Hintzen, N., A. Corten, F. Gerlotto, J. Habasque, A. Bertrand, P. Lehodey, T. Brunel, A.-C. Dragon, and I. Senina. 2014. Hydrography and Jack Mackerel Stock in the South Pacific — Final Report. Report number C176.14. IMARES—Institute for Marine Resources & Ecosystem Studies, Netherlands  | 2014 | Corrientes              | Pacifico sur                       | Juveniles                              |
| Vásquez, S., Sepúlveda, A., Salas, C., Núñez, S., Gretchina, A. & A. Ospina-Álvarez. 2016. Biophysical modelling to assess population connectivity and inter-annual variability in the recruitment patterns of jack mackerel in the southeastern Pacific. SPRFMO Netherlands meeting   | 2016 | Corrientes              | Pacifico suroriental               | Juveniles                              |
| Serra <i>et al.</i> 2010. Estudio de migración de jurel en Chile (Fase I), 2007. Informe Final. Proyecto FIP 2007-27. Instituto de Fomento Pesquero. 512 págs.   | 2010 | Corrientes costeras     | Costera Chile (norte y centro-sur) | Norte: Reclutas<br>Centro-sur: Adultos |
| Núñez, S., S. Vásquez, P. Ruiz & A. Sepúlveda. 2008. Distribution of early developmental stages of Jack mackerel in the southeastern Pacifico ocean. 11 pages. Chilean Jack mackerel Workshop, CHJMWS paper#2. SPRFMO Meeting, Santiago-Chile.   | 2008 | Corrientes geostróficas | Oceánica Chile centro-sur          | Adultos desovantes                     |
| Serra <i>et al.</i> 2013. Estructura poblacional del jurel 2013. Informe Final. Proyecto FIP 2010-18. Instituto de Fomento Pesquero. 301 págs.   | 2013 | Corrientes geostróficas | Costera Chile (centro-sur)         | Adultos                                |

|   |      |  |                                       |                    |
|---|------|--|---------------------------------------|--------------------|
| Vásquez <i>et al.</i> 2015. Estructura poblacional y estimación de índices de reclutamiento de jurel basados en modelos biofísicos (fase I). Informe Final. Proyecto FIP 2014-33. Instituto de Investigación Pesquera, 321 págs.  | 2015 | Corrientes geostróficas                          | Oceánica Chile centro-sur             | Adultos desovantes |
| Kryukov, V.V. 1982. Densidad de aguas de la región sur del Pacífico Sur y distribución de jurel en abril 1980. En: Investigaciones pesqueras en el Pacífico Suroriental. VNIRO, Moscú, Rusia. Pp.122-130 (en ruso)  | 1982 | Densidad   | Pacífico sur                          | Adultos            |
| Hückstädt, L. A., and Antezana, T. 2003. Behaviour of the southern sea lion ( <i>Otaria flavescens</i> ) and consumption of the catch during purse-seining for Jack mackerel ( <i>Trachurus murphyi</i> ) off central Chile. ICES Journal of Marine Science, 60: 1003-1011. | 2003 | Distribución predadores (mamíferos marinos)      | Chile centro-sur                      | Adultos            |
| Hückstädt, L. A., Rojas, C.P. and Antezana, T. 2007. Stable isotope analysis reveals pelagic foraging by the Southern sea lion in Central Chile. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology 347: 123-133.   | 2007 | Distribución predadores (mamíferos marinos)      | Chile centro-sur                      | Adultos            |
| Ashford, J., Serra, R., Saavedra, J. C., & Letelier, J. 2011. Otolith chemistry indicates large-scale connectivity in Chilean jack mackerel ( <i>Trachurus murphyi</i> ), a highly mobile species in the Southern Pacific Ocean. Fisheries Research, 107, 291–299.          | 2011 | Eddy Kinetic energy                              | Pacífico suroriental                  | Adultos            |
| Hormazabal, S., S. Nuñez, D. Arcos, F. Espindola, and G. Yuras. 2004. Mesoscale eddies and the pelagic fishery off central Chile (33 – 40 S), Gayana (Zool.), 68(2), 291 – 296.   | 2004 | Eddy Kinetic energy, Eddies                      | costa Chile                           | Adultos            |
| Núñez <i>et al.</i> 2008. Variability of the Chilean mackerel fishing habitat in the southeastern Pacific ocean. Eighth International Meeting: SWG: Jack Mackerel Sub-Group SP-08_SWG-JM-06. 30 pages.  | 2008 | Energía cinética asociada a remolinos y meandros | Chile centro-sur (costero y oceánico) | Adultos            |

|   |      |  |   |                    |
|---|------|--|---|--------------------|
| Sepúlveda <i>et al.</i> 2009. Condición biológica de jurel en alta mar, año 2008. Informe Final. Proyecto FIP 2008-06. Instituto de Investigación Pesquera, 283 págs.   | 2009 | Energía cinética asociada a remolinos y meandros | Oceánica Chile centro-sur               | Adultos desovantes |
| Serra <i>et al.</i> 2013. Estructura poblacional del jurel 2013. Informe Final. Proyecto FIP 2010-18. Instituto de Fomento Pesquero. 301 págs.  | 2013 | Energía cinética asociada a remolinos y meandros | Oceánica Chile centro-sur               | Adultos desovantes |
| Serra <i>et al.</i> 2013. Estructura poblacional del jurel 2013. Informe Final. Proyecto FIP 2010-18. Instituto de Fomento Pesquero. 301 págs.  | 2013 | Energía cinética asociada a remolinos y meandros | Costera Chile (centro-sur)              | Adultos            |
| Vásquez <i>et al.</i> 2015. Estructura poblacional y estimación de índices de reclutamiento de jurel basados en modelos biofísicos (fase I). Informe Final. Proyecto FIP 2014-33. Instituto de Investigación Pesquera, 321 págs.  | 2015 | Energía cinética asociada a remolinos y meandros | Oceánica Chile centro-sur               | Adultos desovantes |
| Vásquez <i>et al.</i> 2015. Estructura poblacional y estimación de índices de reclutamiento de jurel basados en modelos biofísicos (fase I). Informe Final. Proyecto FIP 2014-33. Instituto de Investigación Pesquera, 321 págs.  | 2015 | Energía cinética asociada a remolinos y meandros | Costera Chile norte                     | Juveniles          |
| Ñiquén, M.A. & C.L. Peña. 2008. Distribution and concentration of Jack mackerel ( <i>Trachurus murphyi</i> ) related to oceanographical features between north Peru and north Chile. 8 pages. Chilean Jack mackerel Workshop, CHJMWS paper#5. SPRFMO Meeting, Santiago-Chile. | 2008 | Frente de surgencia                              | Costera (Norte de Chile, Norte de Perú) | Adultos            |
| Sepúlveda <i>et al.</i> 1998. Migración de jurel desde y hacia la ZEE de Chile central. Informe Final. Proyecto FIP 96-15. Instituto de Investigación Pesquera, 273 págs.   | 1998 | Frentes oceánicos                                | Oceánica Chile centro-sur               | Adultos desovantes |

|   |      |  |                           |                            |
|---|------|--|---------------------------|----------------------------|
| Peña <i>et al.</i> 1998. Dinámica espacial y temporal de las zonas de pesca de jurel en Chile centro-sur y su relación con procesos ambientales. Informe Final. Proyecto FIP 97-06. Instituto de Investigación Pesquera, 331 págs.  | 1998 | Gradientes térmicos                          | Costera. Chile centro-sur | Adultos                    |
| Bertrand, A., Habasque, J., Hattab, T., Hintzen, N. T., Oliveros-Ramos, R., Gutierrez, M., & Gerlotto, F. 2016. 3-D habitat suitability of jack mackerel <i>Trachurus murphyi</i> in the Southeastern Pacific, a comprehensive study. <i>Progress in Oceanography</i> , 146, 199–211. | 2016 | Mesozooplankton (eufausidos)                 | Pacífico suroriental      | Adultos                    |
| Sapozhnikov, V.V. & V.A. Shiryayev. 1984. Las bases hidroquímicas de productividad biológica en el Pacífico Sureste. En: Estudios Pesqueros en las áreas abiertas de Océano Mundial. Informe Interno del VNIRO, Moscú, p. 31-44 (en ruso).  | 1984 | Microzooplankton                             | Pacífico sur              | Adultos y juveniles        |
| AtlantNIRO, 2003. Informe de expedición científica al Pacífico Suroriental en STM-8390 "Atlantida" (crucero 32). 14 agosto 2002 – 03 marzo 2003. Archivos de AtlantNIRO, Kaliningrado, Rusia.   | 2003 | Microzooplankton                             | Pacífico sur              | Adultos y juveniles        |
| Nesin, A.V. 2009. Específica en alimentación y perspectivas de pesca de jurel peruano ( <i>Trachurus symmetricus murphyi</i> ) en el Pacífico Sur. Moscú, VNIRO (tesis doctorado, en ruso). 28 pp.  | 2009 | Microzooplankton, Zooplankton, Macroplankton | Pacífico Sur              | Larvas, juveniles, adultos |
| Bertrand, A., Segura, M., Gutierrez, M., & Vasquez, L. 2004. From smallscale habitat loopholes to decadal cycles: A habitat-based hypothesis explaining fluctuation in pelagic fish populations off Peru. <i>Fish and Fisheries</i> , 5, 296–316.                                     | 2004 | Oxígeno disuelto                             | Perú                      | Adultos                    |

|   |      |                  |                                    |  |
|---|------|------------------|------------------------------------|--|
| Bertrand, A., Barbieri, M., Gerlotto, F., Leiva, F., Córdova, J., 2006. Determinism and plasticity of fish schooling behaviour as exemplified by the South Pacific jack mackerel <i>Trachurus murphyi</i> . <i>Marine Ecology Progress Series</i> 311, 145–156.                                 | 2006 | Oxígeno disuelto | costa Chile                        | Adultos en alimentación                |
| Gutiérrez, M., A. Bertrand, M. Ballón, P. Espinoza, A. Alegre & F. Gerlotto. 2008. Distribution changes and interactions of Jack mackerel off Perú as observed using acoustic (1983-2008). 12 pages. Chilean Jack mackerel Workshop, CHJMWS paper#16. SPRFMO Meeting, Santiago-Chile.           | 2008 | Oxígeno disuelto | Región costera de Perú             | Adultos                                |
| Serra <i>et al.</i> 2010. Estudio de migración de jurel en Chile (Fase I), 2007. Informe Final. Proyecto FIP 2007-27. Instituto de Fomento Pesquero. 512 págs.  | 2010 | Oxígeno disuelto | Costera Chile (norte y centro-sur) | Norte: Reclutas<br>Centro-sur: Adultos |
| Ayón, P., Correa, J., 2013. Variabilidad espacial y temporal de larvas de jurel <i>Trachurus murphyi</i> en el Perú entre 1966–2010. <i>Revista Peruana de Biología</i> 20, 83–86.  | 2013 | Oxígeno disuelto | costa Perú                         | Adultos en desove, larvas y juveniles  |
| Dioses, T., 2013. Patrones de distribución y abundancia del jurel <i>Trachurus murphyi</i> en el Perú. <i>Revista Peruana de Biología</i> 20, 67–74.  | 2013 | Oxígeno disuelto | costa Peru                         | Adultos                                |
| Serra <i>et al.</i> 2013. Estructura poblacional del jurel 2013. Informe Final. Proyecto FIP 2010-18. Instituto de Fomento Pesquero. 301 págs.  | 2013 | Oxígeno disuelto | Perú central                       | Adultos                                |
| Hintzen, N., A. Corten, F. Gerlotto, J. Habasque, A. Bertrand, P. Lehodey, T. Brunel, A.-C. Dragon, and I. Senina. 2014. Hydrography and Jack Mackerel Stock in the South Pacific — Final Report. Report number C176.14. IMARES—Institute for Marine Resources & Ecosystem Studies, Netherlands | 2014 | Oxígeno disuelto | Pacifico sur                       | Adultos                                |

|   |      |                                  |                        |                         |
|---|------|----------------------------------|------------------------|-------------------------|
| Vásquez <i>et al.</i> 2015. Estructura poblacional y estimación de índices de reclutamiento de jurel basados en modelos biofísicos (fase I). Informe Final. Proyecto FIP 2014-33. Instituto de Investigación Pesquera, 321 págs.  | 2015 | Oxígeno disuelto                 | Costera Chile norte    | Juveniles               |
| Bertrand, A., Habasque, J., Hattab, T., Hintzen, N. T., Oliveros-Ramos, R., Gutierrez, M., & Gerlotto, F. 2016. 3-D habitat suitability of jack mackerel <i>Trachurus murphyi</i> in the Southeastern Pacific, a comprehensive study. <i>Progress in Oceanography</i> , 146, 199–211.                         | 2016 | Oxígeno disuelto                 | Pacífico suroriental   | Adultos                 |
| Dragon, A.C., Senina, I., Hintzen, N.T. & P. Lehodey. 2017. Modelling south Pacific jack mackerel spatial population dynamics and fisheries. <i>Fisheries oceanography</i> . DOI: 10.1111/fog.12234   | 2017 | Oxígeno disuelto                 | Pacífico sur           | Adultos en alimentación |
| Gutiérrez, M., A. Bertrand, M. Ballón, P. Espinoza, A. Alegre & F. Gerlotto. 2008. Distribution changes and interactions of Jack mackerel off Perú as observed using acoustic (1983-2008). 12 pages. Chilean Jack mackerel Workshop, CHJMWS paper#16. SPRFMO Meeting, Santiago-Chile.                         | 2008 | Oxígeno disuelto (ZMO, oxiclina) | Región costera de Perú | Adultos                 |
| Gretchina, A., Sepúlveda, A., Nuñez, S., González, C., 2013. Jack mackerel superpopulation and the climate variability in the Pacific Ocean. International Conference "Climate Variability and Change on Marine Resources and Fisheries in the South Pacific - SPICES", Concepción, Chile, 7-10 January 2013. | 2013 | PDO, SOI, El Niño-La Niña        | Pacífico sur           | Adultos y Juveniles     |

|   |      |                         |                                       |                                       |
|---|------|-------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Bertrand, A., Habasque, J., Hattab, T., Hintzen, N. T., Oliveros-Ramos, R., Gutierrez, M., & Gerlotto, F. 2016. 3-D habitat suitability of jack mackerel <i>Trachurus murphyi</i> in the Southeastern Pacific, a comprehensive study. <i>Progress in Oceanography</i> , 146, 199–211. | 2016 | Peces mesopelágicos     | Pacífico suroriental                  | Adultos                               |
| Bertrand, A., Habasque, J., Hattab, T., Hintzen, N. T., Oliveros-Ramos, R., Gutierrez, M., & Gerlotto, F. 2016. 3-D habitat suitability of jack mackerel <i>Trachurus murphyi</i> in the Southeastern Pacific, a comprehensive study. <i>Progress in Oceanography</i> , 146, 199–211. | 2016 | Peces mesopelágicos     | Pacífico suroriental                  | Adultos                               |
| Ayón, P., Correa, J., 2013. Variabilidad espacial y temporal de larvas de jurel <i>Trachurus murphyi</i> en el Perú entre 1966–2010. <i>Revista Peruana de Biología</i> 20, 83–86.  | 2013 | Profundidad termoclina  | costa Perú                            | Adultos en desove, larvas y juveniles |
| Dioses, T., 2013. Patrones de distribución y abundancia del jurel <i>Trachurus murphyi</i> en el Perú. <i>Revista Peruana de Biología</i> 20, 67–74.  | 2013 | Profundidad termoclina  | costa Peru                            | Adultos                               |
| Gretchina <i>et al.</i> 2010. Estudio del jurel y operación de barco de búsqueda e investigación pesquera, durante 2009-2010. <i>Documentos Técnicos</i> . Instituto de Investigación Pesquera, 105 págs.   | 2010 | Remolinos de mesoescala | Chile centro-sur (costero y oceánico) | Adultos                               |
| Ayón, P., Correa, J., 2013. Variabilidad espacial y temporal de larvas de jurel <i>Trachurus murphyi</i> en el Perú entre 1966–2010. <i>Revista Peruana de Biología</i> 20, 83–86.  | 2013 | Salinidad               | costa Perú                            | Adultos en desove, larvas y juveniles |
| Dioses, T., 2013. Patrones de distribución y abundancia del jurel <i>Trachurus murphyi</i> en el Perú. <i>Revista Peruana de Biología</i> 20, 67–74.  | 2013 | Salinidad               | costa Peru                            | Adultos                               |

|   |      |             |                      |                         |
|---|------|-------------|----------------------|-------------------------|
| Li, G., Cao, J., Zou, X., Chen, X., Runnebaum, J., 2016. Modeling habitat suitability index for Chilean jack mackerel ( <i>Trachurus murphyi</i> ) in the South East Pacific. Fisheries Research. <a href="http://dx.doi.org/10.1016/j.fishres.2015.11.012">http://dx.doi.org/10.1016/j.fishres.2015.11.012</a> . | 216  | Temperatura | Zona oceanica        | Adultos                 |
| Farris, D.1961. Abundance and distribution of eggs and larvae and survival of larvae of jack mackerel ( <i>Trachurus symmetricus</i> ). U.S. Fish Wildl. Serv., Fish, Bull. 61:247-279.   | 1961 | Temperatura | Zona oceanica        | Adultos en desove       |
| Konchina, Yu. 1980. The Peruvian Jack mackerel <i>Trachurus symmetricus murphyi</i> , a facultative predator in the coastal upwelling ecosystem. J. Ichthyol. 20(5):46-59.  | 1980 | Temperatura | Pacífico sur         | Adultos en alimentación |
| Boldyrev, V.Z & V.B. Darnitskiy. 1982. Primer crucero BBI "Charls Darwin" al a la región sur del Océano Pacífico. En: Investigaciones pesqueras en el Pacífico Suroriental. VNIRO, Moscú, Rusia. pp.140-154 (en ruso)   | 1982 | Temperatura | Pacífico sur         | Adultos                 |
| Santander, H. & R. Flores. 1983. Los desoves y distribución larval de cuatro especies pelágicas y sus relaciones con las variaciones se ambiente marino frente al Perú. FAO. Fish. Rep. 3(291): 835-868.  | 1983 | Temperatura | Perú costero         | Adultos en desove       |
| Sapozhnikov, V.V. & V.A. Shiryaev. 1984. Las bases hidroquímicas de productividad biológica en el Pacífico Sureste. En: Estudios Pesqueros en las áreas abiertas de Océano Mundial. Informe Interno del VNIRO, Moscú, p. 31-44 (en ruso).   | 1984 | Temperatura | Perú                 | Adultos en alimentación |
| Parin, N.V. 1984. Oceanic ictyogeography: an attempt to review the distribution and origin of pelagic and botton fishes outside continental shelves and neretic zones. Arch.Fishwiss., B.35, p.: 5-41.  | 1984 | Temperatura | Pacífico suroriental | Adultos                 |



|   |      |             |                      |                     |
|---|------|-------------|----------------------|---------------------|
| Gorbunova, N.N., S.A. Evseenko & S.V. Garetsky. 1985. Distribución deictioplancton en las zonas frontales de aguas peruanas. J.Ichthyol. 25(5): 770-782.  | 1985 | Temperatura | Pacífico sur         | Adultos en desove   |
| Evseenko, S.A., 1987, Reproduction of Peruvian jack mackerel, <i>Trachurus symmetricus murphyi</i> , in the southern Pacific. J. Ichthyol. 27, 151–160.   | 1987 | Temperatura | Zona oceanica        | Adultos en desove   |
| Bailey, K. 1989. Description and Surface distribution of juvenile Peruvian Jack Mackerel, <i>Trachurus murphyi</i> (nichols), from the subtropical convergence zone of the central South Pacific. Fich. Bull. 87(2): 273-278.                       | 1989 | Temperatura | Pacífico sur         | Juveniles           |
| Evseenko, S.A.; Andrianov, DDP.; Bekker, V.E. 1990. The reproduction of fishes along the shores of Peru in the abnody warm year of 1987. Journal of Ichthyology 30: 113-121.  | 1990 | Temperatura | Zona oceanica        | Adultos en desove   |
| Vinogradov, M.E., E.A. Shushkina & S.A. Evseenko. 1990. Biomasa de plancton forrajero y recursos potenciales del jurel peruano en la zona subantártica del Pacífico Sutoeste. Voprosylktiologii 30 (&): 1036-1040 (en ruso).                        | 1990 | Temperatura | Pacífico suroriental | Adultos y Juveniles |
| Nazarov, N.A. & A.A. Nesterov. 1990. Jurel, <i>Trachurus symmetricus murphyi</i> en el Pacífico Suroeste. Reunión científica "Recursos biológicos de reserva en los mares abiertos de la URSS". Kaliningrado, marzo 20-22, 1990: 131-133 (en ruso). | 1990 | Temperatura | Chile oceanico       | Adultos             |
| Elizarov, A.A., Grechina A.S., Kotenev B.N., Kuznetsov A.N. 1993. Peruvian Jack mackerel, <i>Trachurus symmetricus murphyi</i> , in the open waters of the South Pacific. J.Ichthyol. 33, 86-104.   | 1993 | Temperatura | Pacífico sur         | Adultos y Juveniles |

|  |      |             |                      |                   |
|--|------|-------------|----------------------|-------------------|
| Grechina, A., 1998. Historia de investigaciones y aspectos básicos de la ecología del jurel <i>Trachurus symmetricus murphyi</i> (Nichols) en alta mar del Pacífico Sur. In: Arcos, D. (Ed.), <i>Biología y ecología del jurel en aguas Chilenas</i> . Instituto de Investigación Pesquera, Concepción, pp. 11–34. | 1998 | Temperatura | Pacífico sur         | Adultos           |
| Grechina, A., 1998. Historia de investigaciones y aspectos básicos de la ecología del jurel <i>Trachurus symmetricus murphyi</i> (Nichols) en alta mar del Pacífico Sur. In: Arcos, D. (Ed.), <i>Biología y ecología del jurel en aguas Chilenas</i> . Instituto de Investigación Pesquera, Concepción, pp. 11–34. | 1998 | Temperatura | Pacífico sur         | Juveniles         |
| Gretchina, A. S., Núñez, S., and Arcos, D. 1998. Biología reproductiva del jurel ( <i>Trachurus symmetricus murphyi</i> ) en el Pacífico sur. En: <i>Biología y ecología del jurel en aguas chilenas</i> , pp. 77–79. Ed. D. Arcos. Instituto de Investigación Pesquera, Talcahuano, Chile.                        | 1998 | Temperatura | Pacífico sur         | Adultos           |
| Gretchina, A. S., Núñez, S., and Arcos, D. 1998. El desove del recurso jurel, <i>Trachurus symmetricus murphyi</i> (Nichols), en el Océano Pacífico Sur. En: <i>Biología y ecología del jurel en aguas chilenas</i> , pp. 117-140. Ed. D. Arcos. Instituto de Investigación Pesquera, Talcahuano, Chile.           | 1998 | Temperatura | Pacífico sur         | Adultos en desove |
| Arcos, D.F., L. Cubillos & S. Núñez. 2001. The jack mackerel fishery and El Niño 1997-1998 effects off Chile. <i>Progress and Oceanography</i> , 49:597-617.   | 2001 | Temperatura | Pacífico suroriental | Juveniles         |
| Arcos, D.F., L. Cubillos & S. Núñez. 2001. The jack mackerel fishery and El Niño 1997-1998 effects off Chile. <i>Progress and Oceanography</i> , 49:597-617.   | 2001 | Temperatura | Pacífico suroriental | Adultos           |

|   |      |             |                |                         |
|---|------|-------------|----------------|-------------------------|
| Taylor, P.R., 2002. Stock structure and population biology of the Peruvian jack mack-erel, <i>Trachurus symmetricus murphyi</i> . In: New Zealand Fisheries Assessment Report 2002/21, 83 pp.   | 2002 | Temperatura | Nueva Zelanda  | Adultos en desove       |
| AtlantNIRO, 2003. Informe de expedición científica al Pacífico Suroriental en STM-8390 "Atlantida" (crucero 32). 14 agosto 2002 – 03 marzo 2003. Archivos de AtlantNIRO, Kaliningrado, Rusia.   | 2003 | Temperatura | Pacífico sur   | Adultos y juveniles     |
| Bertrand, A., Segura, M., Gutierrez, M., & Vasquez, L. 2004. From smallscale habitat loopholes to decadal cycles: A habitat-based hypothesis explaining fluctuation in pelagic fish populations off Peru. <i>Fish and Fisheries</i> , 5, 296–316.               | 2004 | Temperatura | Perú           | Adultos                 |
| Núñez, E., Letelier, P., Donoso, Q., Sepulveda, O., & Arcos, R. 2004. Relating spatial distribution of Chilean jack mackerel eggs and environmental factors in the oceanic waters off Chile. <i>Gayana (Concepcion)</i> , 68(2), 444–449.                       | 2004 | Temperatura | Chile oceanico | Adultos en desove       |
| Bertrand, A., Barbieri, M., Gerlotto, F., Leiva, F., Córdova, J., 2006. Determinism and plasticity of fish schooling behaviour as exemplified by the South Pacific jack mackerel <i>Trachurus murphyi</i> . <i>Marine Ecology Progress Series</i> 311, 145–156. | 2006 | Temperatura | costa Chile    | Adultos en alimentacion |
| Cubillos, L. A., Paramo, J., Ruiz, P., Núñez, S., & Sepulveda, A. 2008. The spatial structure of the Oceanic spawning of jack mackerel ( <i>Trachurus murphyi</i> ) off Central Chile (1998–2001). <i>Fisheries Research</i> , 90, 261–270.                     | 2008 | Temperatura | Chile oceanico | Adultos en desove       |

|   |      |             |                      |                         |
|---|------|-------------|----------------------|-------------------------|
| Ashford, J., Serra, R., Saavedra, J. C., & Letelier, J. 2011. Otolith chemistry indicates large-scale connectivity in Chilean jack mackerel ( <i>Trachurus murphyi</i> ), a highly mobile species in the Southern Pacific Ocean. <i>Fisheries Research</i> , 107, 291–299.  | 2011 | Temperatura | Pacífico suroriental | Adultos                 |
| Dioses, T., 2013. Patrones de distribución y abundancia del jurel <i>Trachurus murphyi</i> en el Perú. <i>Revista Peruana de Biología</i> 20, 67–74.  | 2013 | Temperatura | costa Peru           | Adultos                 |
| Ñiquen M., M. Bouchon, D. Ulloa & A. Medina. 2013. Análisis de la pesquería del jurel <i>Trachurus murphyi</i> en el Perú. <i>Rev. Perú, biol.</i> Número especial 20(1): 097-106. En: <i>Ecología, pesquería y conservación del jurel (Trachurus murphyi) en Perú</i> . Ed.: Csirke J., R. Guevara-Carrasco & M. Espino. | 2013 | Temperatura | Perú y Ecuador       | Adultos                 |
| Hintzen, N., A. Corten, F. Gerlotto, J. Habasque, A. Bertrand, P. Lehodey, T. Brunel, A.-C. Dragon, and I. Senina. 2014. Hydrography and Jack Mackerel Stock in the South Pacific — Final Report. Report number C176.14. IMARES—Institute for Marine Resources & Ecosystem Studies, Netherlands                           | 2014 | Temperatura | Pacifico sur         | Adultos en desove       |
| Corten, A., 2014. Possible recruitment of jack mackerel ( <i>Trachurus murphyi</i> ) from oceanic waters off Chile to the stock in Peruvian and Ecuadorian waters in 2010. SPRFMO, 2nd Meeting of the Scientific Committee, Honolulu, Hawaii, USA, 1-7 October 2014 SC-02-JM-03: 19 p.                                    | 2014 | Temperatura | Pacífico sur         | Juveniles               |
| Oliveros-Ramos et al. 2014. Pattern-oriented validation of habitat distribution models: application to the spatial distribution of Jack mackerel in the Humboldt Current Ecosystem  | 2014 | Temperatura | Peru                 | Adultos en alimentación |

|   |      |             |                      |                         |
|---|------|-------------|----------------------|-------------------------|
| Bertrand, A., Habasque, J., Hattab, T., Hintzen, N. T., Oliveros-Ramos, R., Gutierrez, M., & Gerlotto, F. 2016. 3-D habitat suitability of jack mackerel <i>Trachurus murphyi</i> in the Southeastern Pacific, a comprehensive study. <i>Progress in Oceanography</i> , 146, 199–211.                                     | 2016 | Temperatura | Pacífico suroriental | Adultos                 |
| Li, G., Cao, J., Zou, X., Chen, X., Runnebaum, J., 2016. Modeling habitat suitability index for Chilean jack mackerel ( <i>Trachurus murphyi</i> ) in the South East Pacific. <i>Fisheries Research</i> . <a href="http://dx.doi.org/10.1016/j.fishres.2015.11.012">http://dx.doi.org/10.1016/j.fishres.2015.11.012</a> . | 2016 | Temperatura | Zona oceanica        | Adultos                 |
| Vásquez, S., Sepúlveda, A., Salas, C., Núñez, S., Gretchina, A. & A. Ospina-Álvarez. 2016. Biophysical modelling to assess population connectivity and inter-annual variability in the recruitment patterns of jack mackerel in the southeastern Pacific. <i>SPRFMO Netherlands meeting</i>                               | 2016 | Temperatura | Pacífico suroriental | Adultos en desove       |
| Dragon, A.C., Senina, I., Hintzen, N.T. & P. Lehodey. 2017. Modelling south Pacific jack mackerel spatial population dynamics and fisheries. <i>Fisheries oceanography</i> . DOI: 10.1111/fog.12234   | 2017 | Temperatura | Pacífico sur         | Adultos en alimentación |
| Dragon, A.C., Senina, I., Hintzen, N.T. & P. Lehodey. 2017. Modelling south Pacific jack mackerel spatial population dynamics and fisheries. <i>Fisheries oceanography</i> . DOI: 10.1111/fog.12234   | 2017 | Temperatura | Pacífico sur         | Adultos en desove       |
| Peña, J., Dresdner, J. & F. Vasquez. 2017. El Niño and Fishing Location Decisions: The Chilean Straddling Jack Mackerel Fishery. <i>Marine Resource Economics</i> 32(3):249-275   | 2017 | Temperatura | Pacífico suroriental | Adultos                 |

|   |      |  |                                       |  |
|---|------|--|---------------------------------------|--|
| González C., A. Gretchina. 2017. Similitudes y cambios estructurales en la dinámica espacio-temporal de la población de jurel frente las costas de Chile centro-sur: años 2002-2016. Libro Resumen XXXVII Congreso de Ciencias del Mar, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Chile. | 2017 | Temperatura                                  | Chile costero y oceánico              | Adultos                                |
| Zhang, M., X. Zou & Y. Zhou. 2008. Report of data collection on Jack mackerel in South-East Pacific. 29 pages. Chilean Jack mackerel Workshop, CHJMWS paper#15. SPRFMO Meeting, Santiago-Chile.   | 2008 | Temperatura (profundidad de cardumenes)      | Región oceánica                       | Adultos                                |
| Gutiérrez, M., A. Bertrand, M. Ballón, P. Espinoza, A. Alegre & F. Gerlotto. 2008. Distribution changes and interactions of Jack mackerel off Perú as observed using acoustic (1983-2008). 12 pages. Chilean Jack mackerel Workshop, CHJMWS paper#16. SPRFMO Meeting, Santiago-Chile.         | 2008 | Temperatura (termoclina)                     | Región costera de Perú                | Adultos                                |
| Córdova <i>et al.</i> 2012. Evaluación hidroacústica del registro jurel entre la V y X Regiones, Año 2011. Informe Final. Proyecto FIP 2011.05. Instituto de Fomento Pesquero.  | 2012 | Temperatura a profundidad media del cardúmen | Chile centro-sur (costero y oceánico) | Adultos                                |
| Sepúlveda <i>et al.</i> 1998. Migración de jurel desde y hacia la ZEE de Chile central. Informe Final. Proyecto FIP 96-15. Instituto de Investigación Pesquera, 273 págs.   | 1998 | Temperatura superficial del mar              | Oceánica Chile centro-sur             | Adultos desovantes                     |
| Sepúlveda <i>et al.</i> 1998. Migración de jurel desde y hacia la ZEE de Chile central. Informe Final. Proyecto FIP 96-15. Instituto de Investigación Pesquera, 273 págs.   | 1998 | Temperatura superficial del mar              | Costera Chile (norte y centro-sur)    | Norte: Reclutas<br>Centro-sur: Adultos |
| Peña <i>et al.</i> 1998. Dinámica espacial y temporal de las zonas de pesca de jurel en Chile centro-sur y su relación con procesos ambientales. Informe Final. Proyecto FIP 97-06. Instituto de Investigación Pesquera, 331 págs.  | 1998 | Temperatura superficial del mar              | Costera. Chile centro-sur             | Adultos                                |

|  |      |                                 |                                       |                    |
|--|------|---------------------------------|---------------------------------------|--------------------|
| Núñez, S., S. Vásquez, P. Ruiz & A. Sepúlveda. 2008. Distribution of early developmental stages of Jack mackerel in the southeastern Pacifico ocean. 11 pages. Chilean Jack mackerel Workshop, CHJMWS paper#2. SPRFMO Meeting, Santiago-Chile.   | 2008 | Temperatura superficial del mar | Oceánica Chile centro-sur             | Adultos desovantes |
| Chernyshkov, P., E. Timokhin & A. Glubokov. 2008. Inter-annual and seasonal variability of oceanological conditions in the Southern Pacific Ocean in connection with the pelagic ecosystem structure. 2 pages. Chilean Jack mackerel Workshop, CHJMWS paper#6. SPRFMO Meeting, Santiago-Chile. | 2008 | Temperatura superficial del mar | Pacifico sur                          | Juveniles, Adultos |
| Sepúlveda <i>et al.</i> 2009. Condición biológica de jurel en alta mar, año 2008. Informe Final. Proyecto FIP 2008-06. Instituto de Investigación Pesquera, 283 págs.  | 2009 | Temperatura superficial del mar | Oceánica Chile centro-sur             | Adultos desovantes |
| Serra <i>et al.</i> 2010. Estudio de migración de jurel en Chile (Fase I), 2007. Informe Final. Proyecto FIP 2007-27. Instituto de Fomento Pesquero. 512 págs.   | 2010 | Temperatura superficial del mar | Oceánica Chile centro-sur             | Adultos desovantes |
| Gretchina <i>et al.</i> 2010. Estudio del jurel y operación de barco de búsqueda e investigación pesquera, durante 2009-2010. Documentos Técnicos. Instituto de Investigación Pesquera, 105 págs.  | 2010 | Temperatura superficial del mar | Chile centro-sur (costero y oceánico) | Adultos            |
| Serra <i>et al.</i> 2013. Estructura poblacional del jurel 2013. Informe Final. Proyecto FIP 2010-18. Instituto de Fomento Pesquero. 301 págs.   | 2013 | Temperatura superficial del mar | Oceánica Chile centro-sur             | Adultos desovantes |
| Serra <i>et al.</i> 2013. Estructura poblacional del jurel 2013. Informe Final. Proyecto FIP 2010-18. Instituto de Fomento Pesquero. 301 págs.   | 2013 | Temperatura superficial del mar | Perú central                          | Adultos            |

|  |      |   |   |                         |
|--|------|---|---|-------------------------|
| Bertrand, A., A-C. Dragon, J. Habasque & P. Lehodey. 2014. Hydrography/biogeochemistry and Chilean Jack mackerel stock structure interactions. Information paper SC-02-JM-06. 12 pages. 2nd Scientific Committee Meeting. SPRFMO Scientific Meeting, Honolulu, Hawaii, USA, 1-7 October 2014.  | 2014 | Temperatura superficial del mar                       | Costa de Peru, norte y centro de Chile  | Adultos y Juveniles     |
| Vásquez <i>et al.</i> 2015. Estructura poblacional y estimación de índices de reclutamiento de jurel basados en modelos biofísicos (fase I). Informe Final. Proyecto FIP 2014-33. Instituto de Investigación Pesquera, 321 págs.   | 2015 | Temperatura superficial del mar                       | Oceánica Chile centro-sur               | Adultos desovantes      |
| Vásquez <i>et al.</i> 2015. Estructura poblacional y estimación de índices de reclutamiento de jurel basados en modelos biofísicos (fase I). Informe Final. Proyecto FIP 2014-33. Instituto de Investigación Pesquera, 321 págs.   | 2015 | Temperatura superficial del mar                       | Costera Chile norte                     | Juveniles               |
| Ñiquén, M.A. & C.L. Peña. 2008. Distribution and concentration of Jack mackerel ( <i>Trachurus murphyi</i> ) related to oceanographical features between north Peru and north Chile. 8 pages. Chilean Jack mackerel Workshop, CHJMWS paper#5. SPRFMO Meeting, Santiago-Chile.  | 2008 | Temperatura superficial del mar (Frente térmico)      | Costera (Norte de Chile, Norte de Perú) | Adultos                 |
| Núñez, S., M. Correa-Ramírez & S. Vásquez. 2008. Variability of the Chilean mackerel fishing habitat in the southeastern Pacific ocean. Eighth International Meeting: SWG: Jack Mackerel Sub-Group SP-08_SWG-JM-06. 30 pages.  | 2008 | Temperatura superficial del mar (gradientes térmicos) | Chile centro-sur (costero y oceánico)   | Adultos                 |
| Nesterov. A.A., V.N. Chur, F.V. Kolomeyko, 2007. Russian fishery and researches in the Southern Pacific Ocean in 1978-1991 and 2002-2003. Presented In: The jack mackerel fishery in the South Pacific Meeting. March 22, 2007, Talcahuano, Chile. Atlantic Research Institute of Marine Fisheries and Oceanography (AtlantNIRO), Kaliningrad, Russia. | 2007 | Temperatura, Corrientes                               | Pacífico sur                            | Adultos en alimentación |



|  |      |                         |                           |                    |
|--|------|-------------------------|---------------------------|--------------------|
| Ashford, J., Serra, R., Saavedra, J. C., & Letelier, J. 2011. Otolith chemistry indicates large-scale connectivity in Chilean jack mackerel ( <i>Trachurus murphyi</i> ), a highly mobile species in the Southern Pacific Ocean. <i>Fisheries Research</i> , 107, 291–299. | 2011 | Transporte Oeste        | Pacífico suroriental      | Adultos            |
| Sepúlveda <i>et al.</i> 2009. Condición biológica de jurel en alta mar, año 2008. Informe Final. Proyecto FIP 2008-06. Instituto de Investigación Pesquera, 283 págs.  | 2009 | Turbulencia vertical    | Oceánica Chile centro-sur | Adultos desovantes |
| Serra <i>et al.</i> 2010. Estudio de migración de jurel en Chile (Fase I), 2007. Informe Final. Proyecto FIP 2007-27. Instituto de Fomento Pesquero. 512 págs.   | 2010 | Turbulencia vertical    | Oceánica Chile centro-sur | Adultos desovantes |
| Núñez, E., Letelier, P., Donoso, Q., Sepúlveda, O., & Arcos, R. 2004. Relating spatial distribution of Chilean jack mackerel eggs and environmental factors in the oceanic waters off Chile. <i>Gayana (Concepcion)</i> , 68(2), 444–449.                                  | 2004 | Velocidad de corrientes | Chile oceanico            | Adultos en desove  |
| Núñez, E., Letelier, P., Donoso, Q., Sepúlveda, O., & Arcos, R. 2004. Relating spatial distribution of Chilean jack mackerel eggs and environmental factors in the oceanic waters off Chile. <i>Gayana (Concepcion)</i> , 68(2), 444–449.                                  | 2004 | Viento                  | Chile oceanico            | Adultos en desove  |
| Núñez, S., S. Vásquez, P. Ruiz & A. Sepúlveda. 2008. Distribution of early developmental stages of Jack mackerel in the southeastern Pacifico ocean. 11 pages. Chilean Jack mackerel Workshop, CHJMWS paper#2. SPRFMO Meeting, Santiago-Chile.                             | 2008 | Viento superficial      | Oceánica Chile centro-sur | Adultos desovantes |
| Sepúlveda <i>et al.</i> 2009. Condición biológica de jurel en alta mar, año 2008. Informe Final. Proyecto FIP 2008-06. Instituto de Investigación Pesquera, 283 págs.  | 2009 | Viento superficial      | Oceánica Chile centro-sur | Adultos desovantes |

|  |      |  |                            |                         |
|--|------|--|----------------------------|-------------------------|
| Serra <i>et al.</i> 2010. Estudio de migración de jurel en Chile (Fase I), 2007. Informe Final. Proyecto FIP 2007-27. Instituto de Fomento Pesquero. 512 págs.   | 2010 | Viento superficial                       | Oceánica Chile centro-sur  | Adultos desovantes      |
| Serra <i>et al.</i> 2013. Estructura poblacional del jurel 2013. Informe Final. Proyecto FIP 2010-18. Instituto de Fomento Pesquero. 301 págs.   | 2013 | Viento superficial                       | Oceánica Chile centro-sur  | Adultos desovantes      |
| Serra <i>et al.</i> 2013. Estructura poblacional del jurel 2013. Informe Final. Proyecto FIP 2010-18. Instituto de Fomento Pesquero. 301 págs.   | 2013 | Viento superficial                       | Costera Chile (centro-sur) | Adultos                 |
| Vásquez <i>et al.</i> 2015. Estructura poblacional y estimación de índices de reclutamiento de jurel basados en modelos biofísicos (fase I). Informe Final. Proyecto FIP 2014-33. Instituto de Investigación Pesquera, 321 págs. | 2015 | Viento superficial (esfuerzo del viento) | Oceánica Chile centro-sur  | Adultos desovantes      |
| Vásquez <i>et al.</i> 2015. Estructura poblacional y estimación de índices de reclutamiento de jurel basados en modelos biofísicos (fase I). Informe Final. Proyecto FIP 2014-33. Instituto de Investigación Pesquera, 321 págs. | 2015 | Viento superficial (esfuerzo del viento) | Costera Chile norte        | Juveniles               |
| Vásquez <i>et al.</i> 2015. Estructura poblacional y estimación de índices de reclutamiento de jurel basados en modelos biofísicos (fase I). Informe Final. Proyecto FIP 2014-33. Instituto de Investigación Pesquera, 321 págs. | 2015 | Viento superficial (velocidad de Ekman)  | Oceánica Chile centro-sur  | Adultos desovantes      |
| Vásquez <i>et al.</i> 2015. Estructura poblacional y estimación de índices de reclutamiento de jurel basados en modelos biofísicos (fase I). Informe Final. Proyecto FIP 2014-33. Instituto de Investigación Pesquera, 321 págs. | 2015 | Viento superficial (velocidad de Ekman)  | Costera Chile norte        | Juveniles               |
| Konchina, Yu. 1980. The Peruvian Jack mackerel <i>Trachurus symmetricus murphyi</i> , a facultative predator in the coastal upwelling ecosystem. <i>J. Ichthyol.</i> 20(5):46-59.  | 1980 | Zooplancton                              | Pacífico sur               | Adultos en alimentación |

|  |      |             |                      |                     |
|--|------|-------------|----------------------|---------------------|
| Vinogradov, M.E., E.A. Shushkina & S.A. Evseenko. 1990. Biomasa de plancton forrajero y recursos potenciales del jurel peruano en la zona subantártica del Pacífico Sutoeste. <i>Voprosy Iktiologii</i> 30 (&): 1036-1040 (en ruso).   | 1990 | Zooplancton | Pacífico suroriental | Adultos y Juveniles |
| Cornejo-Rodríguez, M.H. 1991. Causas posibles de las agregaciones de jurel ( <i>Trachurus murphyi</i> , <i>Nochols</i> ): disponibilidad de alimentos. Tesis de Magister en Ciencias de Mención en Oceanografía. Universidad de Concepción, 108 p.   | 1991 | Zooplancton | Chile centro-sur     | Adultos             |
| Medina, M. & H. Arancibia. 1992. Interacciones tróficas entre jurel ( <i>Trachurus murphyi</i> ) y caballa ( <i>Scomber japonicus</i> ) en el ecosistema pelágico de la zona norte de Chile. <i>Invest. Cient. Technol., Ser. Cienc. Mar</i> , 2: 67-78.   | 1992 | Zooplancton | Chile norte          | Adultos             |
| Konchina, Y., Nesin A., Onishchik N. and Pavlov Y. 1996. On the Migration and Feeding of the Jack Mackerel <i>Trachurus symmetricus murphyi</i> in the Eastern Pacific. <i>Journal of Ichthyology</i> , Vol 36, N°9, pp. 753-766   | 1996 | Zooplancton | Pacífico sur         | Adultos             |
| Quiñones, R., R. Serra, S. Nuñez, H. Arancibia, J. Cordova & F. Bustos. 1997. Relación espacial entre jurel ( <i>Trachurus symmetricus murphyi</i> ) y sus presas en la zona centro-sur de Chile. En: Tarifeño (ed.) <i>Gestión de Sistemas Oceanográficos del Pacífico Oriental</i> . Comisión Oceanografía Intergubernamental de UNESCO. IOC/INF-1046, 432 pp. | 1997 | Zooplancton | Chile centro-sur     | Adultos             |
| Medina, M. & H. Arancibia. 2002. Dinámica trófica del jurel ( <i>Trachurus symmetricus murphyi</i> ) en el norte de Chile. <i>Investig. Mar</i> , v.30, n.1, Valparaíso.   | 2002 | Zooplancton | Chile norte          | Adultos, juveniles  |

|  |      |                            |                  |                         |
|--|------|----------------------------|------------------|-------------------------|
| Bertrand et al., 2004. Diel vertical behaviour, predator-prey relationships, and occupation of space by jackmackerel ( <i>Trachurus murphyi</i> ) off Chile. ICES Journal of Marine Science, 61: 1105-1112.  | 2004 | Zooplankton                | Chile centro-sur | Adultos en alimentación |
| Bertrand, A., Barbieri, M., Gerlotto, F., Leiva, F., Córdova, J., 2006. Determinism and plasticity of fish schooling behaviour as exemplified by the South Pacific jack mackerel <i>Trachurus murphyi</i> . Marine Ecology Progress Series 311, 145-156.   | 2006 | Zooplankton                | costa Chile      | Adultos en alimentación |
| Oliveros-Ramos et al. 2014. Pattern-oriented validation of habitat distribution models: application to the spatial distribution of Jack mackerel in the Humboldt Current Ecosystem   | 2014 | Zooplankton                | Peru             | Adultos en alimentación |
| Alegre, A., P. Espinoza & M. Espino. 2013. Ecología trófica del jurel <i>Trachurus murphyi</i> en el Perú entre 1977-2011. Rev. Perú, biol. Número especial 20(1): 075-82. En: Ecología, pesquería y conservación del jurel ( <i>Trachurus murphyi</i> ) en Perú. Ed.: Csirke J., R. Guevara-Carrasco & M. Espino. | 2013 | Zooplankton, Macroplankton | Peru             | Adultos                 |

**Anexo II. Acta de reunión de coordinación con Subsecretaría de Pesca y Fondo de Investigación Pesquera y Acuicultura**

## **RESÚMEN DE REUNIÓN DE COORDINACIÓN**

### **PROYECTO FIPA 2017-62**

Según las bases técnicas del Proyecto FIPA 2017-62 "Dinámica poblacional de juveniles y adultos de jurel basada en modelación biofísica" se realizó la reunión de coordinación del proyecto en dependencias del Fondo de Investigación Pesquera y Acuicultura, en la ciudad de Valparaíso, con fecha 04 de abril de 2018.

La finalidad de esta reunión fue exponer el plan de trabajo, alcances, metodologías y procedimientos relevantes para el logro de cada uno de los objetivos específicos del proyecto e indicar las necesidades de información que requiera el consultor. Según lo establecido en las Bases Técnicas del proyecto, el ejecutor debe elaborar un acta de la reunión de coordinación, en la cual se registren los principales temas tratados y los participantes de la misma, y ser enviada al director ejecutivo del FIPA en un plazo no superior a 5 días de realizada la reunión de coordinación.

Asistentes a la reunión de coordinación:

Sr. Luis Carroza (FIPA)

Sr. Mario Acevedo (SUBPESCA)

Sr. Aquiles Sepúlveda (INPESCA)

Sr. Sebastián Vásquez (INPESCA)

La reunión se desarrolló entre las 15:30-17:00 horas. El relato de las actividades y tareas comprometidas para cada uno de los objetivos específicos, fue realizado principalmente por S. Vásquez (jefe de proyecto).

Se informan las fechas establecidas para las entregas de informes:

Informe de Avance 1 : 11/04/2018

Informe de Avance 2 : 11/10/2018

Pre-informe final : 13/05/2019

Informe final : 11/07/2019

Reunión de coordinación : 04/04/2018

Taller de presentación de resultados : 11/06/2019

Los principales temas tratados fueron los siguientes:

1.- **Objetivo general.** Implementar un modelo espacialmente explícito que permita caracterizar el hábitat-distribución de juveniles y adultos de jurel en el Pacífico Sur para entender la estructura poblacional de ésta especie.

Se indican ciertas inconsistencias en las bases del proyecto respecto a la región de estudio, la cual se señala indistintamente como Pacífico sur y Pacífico suroriental. Se acuerda que el modelamiento será implementado en el Pacífico suroriental, debido a que el principal foco de interés se encuentra en esta subregión del Pacífico y no en el Pacífico Sur.

**2.- Objetivo específico 1. Identificar factores críticos del hábitat (físicos, químicos, ecológicos, biológicos) de jurel a lo largo de su historia de vida en énfasis en los estadios juveniles y adultos en base a una recopilación bibliográfica.**

2.1. Se explicó detalladamente el objetivo específico 1, enfatizando que la búsqueda bibliográfica se hará en un rango amplio hacia posibles forzantes que determinan la distribución de jurel, no obstante no todas ellas puedan ser incorporadas en un proceso de modelación espacial, éstas pueden servir de insumo hacia la discusión y prueba de hipótesis de estructura poblacional de jurel.

2.2. Se indica que los factores críticos del hábitat son entendidos hacia el proyecto como aquellos factores, variables o índices, que representen procesos físicos, químicos, biológicos o ecológicos, que sean útiles para delimitar el hábitat efectivo de juveniles y adultos de jurel en el Pacífico suroriental, y que modulen significativamente su variabilidad espacio-temporal.

**3.- Objetivo específico 2. Desarrollar e implementar un sistema de modelación hidrodinámica y biogeoquímico validado para la región del Pacífico suroriental que permita caracterizar cambios interanuales de factores críticos del hábitat de la población juvenil y adulta de jurel.**

3.1. Se indicó en forma detallada el esquema de trabajo en la modelación hidrodinámica y biogeoquímica. Se informa sobre las limitaciones de cálculo del esquema de modelación y sobre la necesidad de establecer un compromiso entre la resolución espacial, el periodo y dominio de modelación y el plazo de ejecución del proyecto.

3.2. Se indica que necesariamente el modelo de este proyecto tendrá una resolución espacial menor al utilizado en el proyecto FIP 2014-33 por la complejidad de implementar un modulo biogeoquímico. Mario Acevedo consulta sobre la existencia de una relación entre la resolución del modelo y el nivel de satisfacción del mismo. Se contesta que dadas la escala del problema abordado (Subregional Pacífico suroriental) la resolución planteada (30 km) sería satisfactoria, aunque además se puede explorar la opción de generar dominios anidados de mayor resolución para áreas específicas en caso de ser necesario (eg. sector costero).

3.3. Mario Acevedo consulta respecto a la diferencia entre los componentes del modelo hidrodinámico y biogeoquímico. Se aclara que en el nuevo esquema se incorporan 24 nuevas variables, las cuales son esquematizadas y descritas a los asistentes.

3.4. Se informa que en el marco de este proyecto, a la fecha ya se cuenta con una modelación hidrodinámica mejorada respecto del modelo de la Fase 1 de biofísico jurel, y que está en resolución de 10 km, la cual servirá de base para la implementación del modelo hidrodinámico y biogeoquímico.

**4.- Objetivo específico 3. Desarrollar e implementar un modelo biofísico de juveniles y adultos de jurel que permita realizar un seguimiento de la distribución e historia de vida de esta especie en el Pacífico suroriental.**



- 4.1. Se indicó que para el desarrollo de este objetivo específico (clave para el proyecto), actualmente existen limitaciones en la disponibilidad de información referenciada espacio-temporalmente para algunas zonas de distribución de jurel.
- 4.2. Se solicita la colaboración de Subpesca en la recopilación de datos históricos tanto de capturas georeferenciadas de jurel, así como provenientes de cruceros de investigación (principalmente acústicos). Mario Acevedo señala el compromiso por parte de Subpesca para ayudar en el proceso de obtención de los datos necesarios para el proyecto.
- 4.3. La situación asociada a los datos de la pesquería extremo norte de la SPRFMO, es explicitada. Se informa de la necesidad de esta información y los esfuerzos que se están realizando. Se considera que si a fines del 2018 no se cuenta con esta información, se cerraría la modelación con las restricciones correspondientes. Sin embargo, se plantea la necesidad de estar abiertos a una extensión del proyecto en relación a la fecha de entrega del Informe Pre-Final del proyecto, asociada a una oportunidad de obtención de información de parte de los actores de la pesquería extremo norte que incluso podría darse hasta abril de 2019. Tal decisión debe ser consensuada en forma previa con la contraparte técnica.
- 4.3. Luis Carroza consulta sobre que sucede en caso de que no se obtengan los datos faltantes. Se aclara que el proceso de modelación puede ser igualmente establecido, aunque los resultados emanados pueden ser insatisfactorios para responder preguntas asociadas a la estructuración espacial de la población de jurel.
- 4.3. El ejecutor compromete poner al servicio del proyecto datos georeferenciados históricos de la pesquería industrial de la zona centro-sur de Chile. Además señala que la información de capturas georeferenciadas de la pesquería del norte de Chile será solicitada al programa de seguimiento de pesquerías del Instituto de Fomento Pesquero mediante Ley de Transparencia. Se establece que la información de la flota internacional así como la de la pesquería extremo norte, serán solicitadas por el Gobierno de Chile a la secretaría ejecutiva de la SPRFMO. Para esto último el ejecutor redactará una propuesta de carta-solicitud para

estos efectos. El ejecutor plantea que hará gestiones inter institucionales para obtener datos de la flota pesquera del norte de Chile a través del Centro de Investigación Aplicada del Mar (CIAM).

4.4. Mario Acevedo consulta si el proyecto considera la historia de vida del jurel, espacialidad y cambios en patrones de distribución asociados a procesos como desove, alimentación, etc. Se responde que el modelo debiese rescatar el movimiento de los centros de masa de la población de jurel asociados a estos procesos, no obstante no se incorporan intrínsecamente.

4.5. Mario Acevedo consulta si se obtendrá algún indicador del nivel de precisión del modelo espacial. Se indica que el modelo será un modelo estadístico, por lo que se tendrán niveles de varianza explicada por el modelo final seleccionado.

**5.- Objetivo específico 4. Definir escenarios de simulación con un forzamiento variable del ambiente de acuerdo a 4.1. (remolinos, corrientes, temperatura, oxígeno, nutrientes, disponibilidad de alimento entre otros) para evaluar la modulación del proceso de transporte y sobrevivencia de juveniles y adultos de jurel.**

5.1. Se clarifica que en el estudio no se efectuarán simulaciones teóricas modificando forzantes, sino que los escenarios bajo un forzamiento variable del ambiente estarán implícitos en la variabilidad de un modelo interanual (24 años de simulación), donde existen distintos eventos, algunos extremos tipo El Niño/la Niña o de distintas condiciones de los forzantes.

**6.- Objetivo específico 5. Realizar simulaciones evaluando los escenarios de forzamiento contrastantes (4.4) y el modelo desarrollado (4.3), identificando los factores o hábitat críticos que pudieran modular la estructura poblacional del jurel en el Pacífico Sur. Los escenarios de concentraciones de oxígeno deben ser considerados en las simulaciones.**

6.1. Mario Acevedo consulta si la variabilidad en el oxígeno será incluida. Se indica que los escenarios contrastantes de oxígeno disuelto se consideran en un contexto tridimensional e inter-anual.

**7.- Objetivo específico 6. Identificar fortalezas y debilidades de todo el ámbito abarcado por el estudio, establecer líneas de desarrollo/necesidades de investigación para avanzar en el estudio de la estructura poblacional de la especie.**

7.1. Se propone que para satisfacer este objetivo se realizará un taller bajo enfoque de trabajo multi-específico con diversos expertos a nivel nacional involucrados en temáticas orientadas al establecimiento de la estructura poblacional de jurel. Este taller debiera hacerse entre abril y mayo del 2019.

7.2. Luis Carroza consulta si este taller sólo incluirá a expertos nacionales. Se indica que se considera una discusión a nivel nacional para unificar criterios para asesorar al grupo que participa de la SPRFMO.

Se termina la reunión a las 17 hrs.

**Anexo III. Presentación Dr Vincent Echevin "The coastal impact of the 2015-2016 "El Niño" and 2017 "El Niño costero" events off Peru: analysis of in-situ measurements, satellite data and model experiments", Talcahuano 27 de julio de 2018**

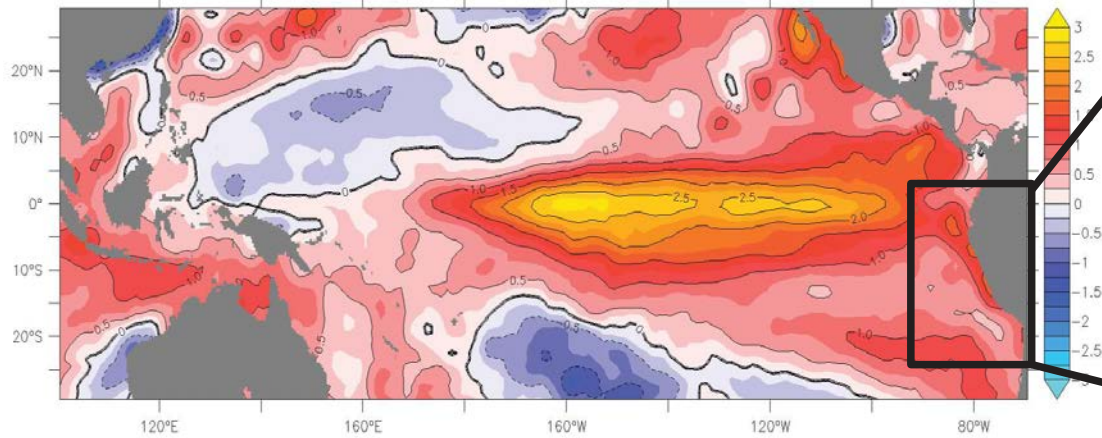
# The coastal impact of the 2015-2016 “El Niño” and 2017 “El Niño costero” events off Peru: analysis of in-situ measurements, satellite data and model experiments

Vincent Echevin,  
F. Colas, D. Espinoza, H. Demarcq,  
J.-L. Fuda, H. Benabdelmoumene, P. Testor,  
D. Gutierrez, C. Quispe, L. Vasquez,  
M. Campos, M. Graco, D. Correa

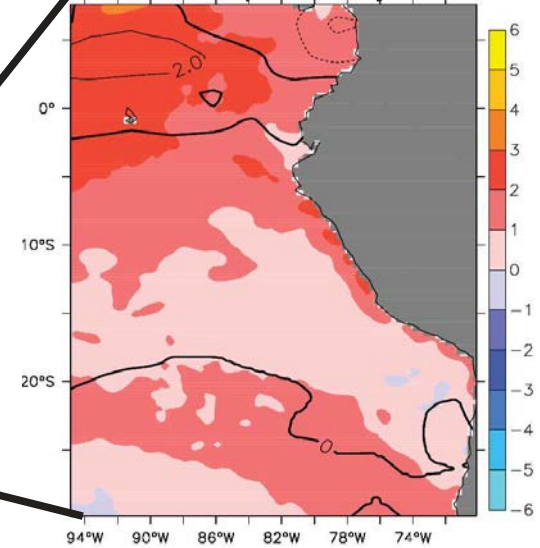


# Two warm events in 2015-2016 and 2017 off Peru

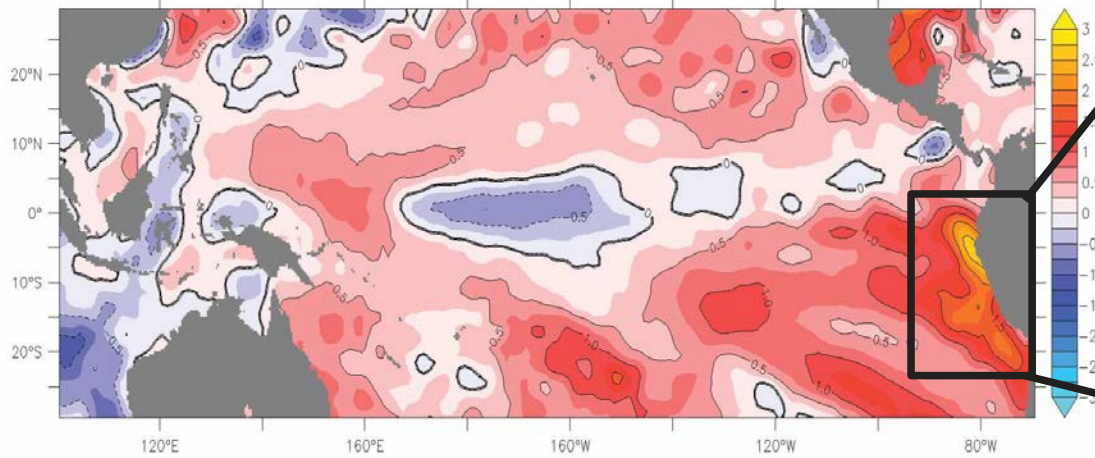
## SST anomaly JFM 2016



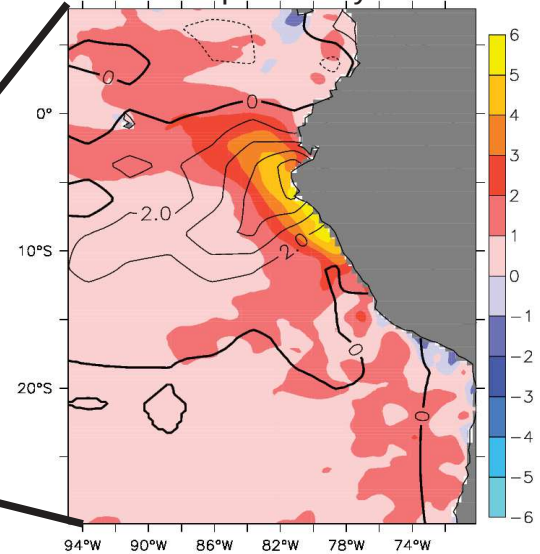
## SST/Precip anomaly Jan 2016



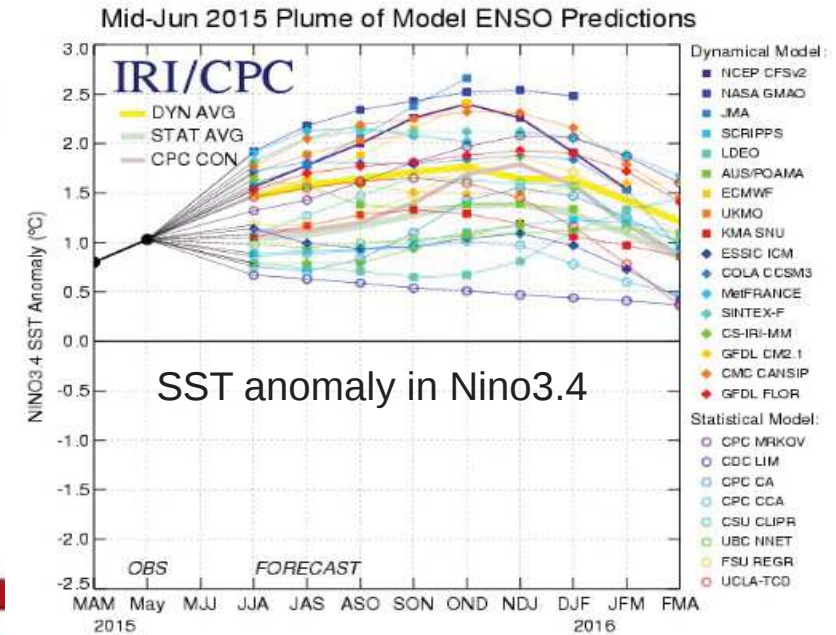
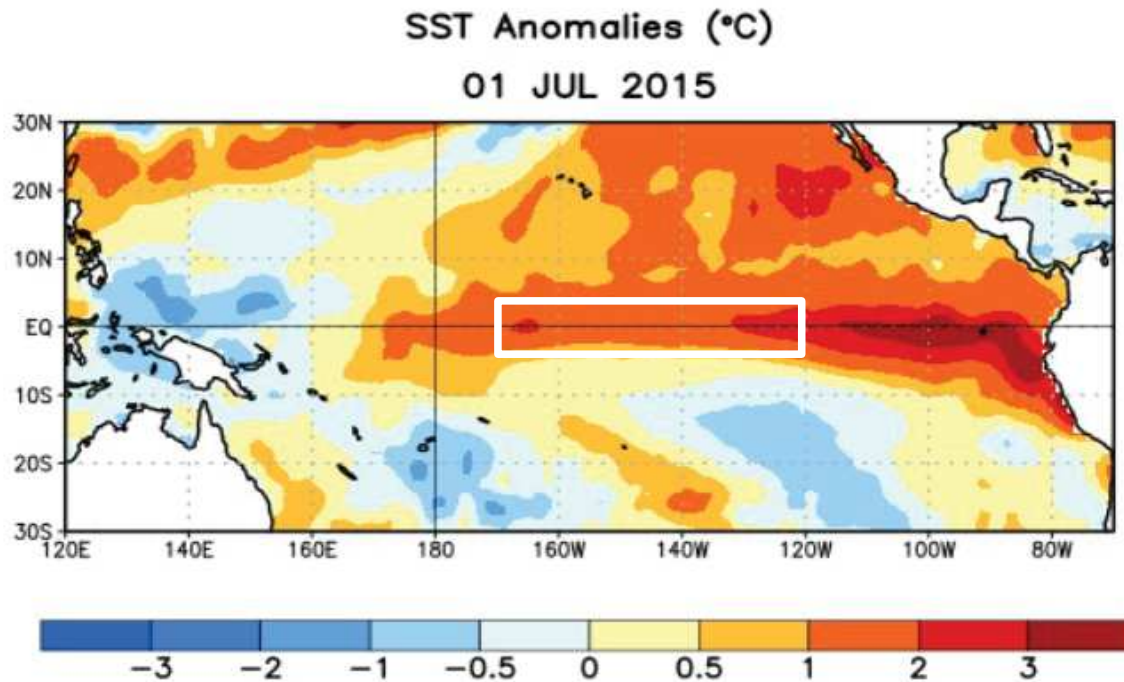
## SST anomaly JFM 2017



## SST/Precip anomaly Mars 2017



# Part 1: A very strong El Nino event in 2015-2016



- Early forecasts of a very strong El Niño event during summer 2015

- Motivation for targeted measurements

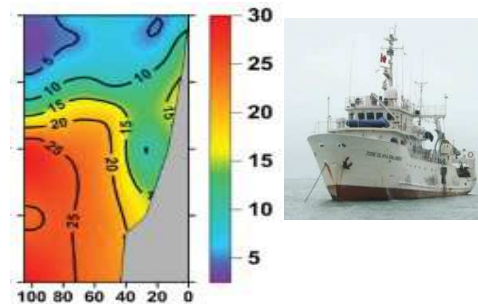
⇒ **CIENPERU** project

- co-funded by IRD & IMARPE
- support of IMARPE for deployments & IRD Peru for administration/customs
- CNRS : technical support + funding for modelling activities (LEFE-GMMC)

# Measurements and modelling to study the 2015-2016 El Niño

- Deployment of 2 gliders in the north of Peru (8°S):  
2 x 1.5 months (Nov-Dec 2015 ; March-April 2016)
- Implementation of coastal sensors (Pres, Temp) at different latitudes (L. Ortlieb & collab.)
- Deployment of 6 ARGO floats from IMARPE cruises :  
3 T/S floats (nov-dec 2015)  
1 TS, 1 TS/DO , 1 BGC (April 2017)

- Regular sections by IMARPE cruises:  
T,S, Chla, nutrients, oxygen



- Regional modelling using ROMS/CROCO-PISCES (12 km & 4 km)

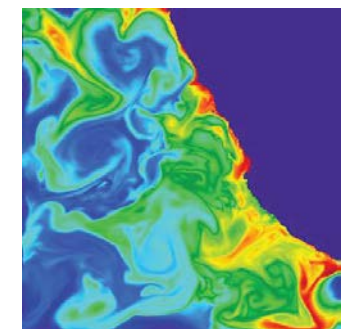
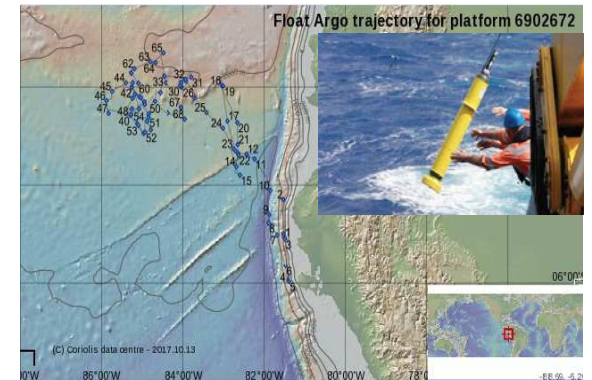
## Robots ayudan a medir el impacto de El Niño

Gracias a la cooperación del IIR de Francia, Image ya cuenta con múltiples submarinos autónomos para monitorizar condiciones del mar "tal y como es real". Accienden a la superficie cada cierto tiempo y envían datos vía satélite.

El fenómeno de El Niño, conocido como "Inmortal", vuelve a ser un tema de actualidad. Desde que se volvió dominante en el Pacífico central y sur, una ola de calor oceánico se está abriendo paso por el Océano Índico y el Océano Atlántico. Este fenómeno climático, que se repite cada 3 a 7 años, provoca un calentamiento de las aguas superficiales del océano y una disminución de las precipitaciones en algunas zonas. En el Pacífico, esto provoca un calentamiento de las aguas superficiales y una disminución de las precipitaciones en algunas zonas. En el Pacífico, esto provoca un calentamiento de las aguas superficiales y una disminución de las precipitaciones en algunas zonas.

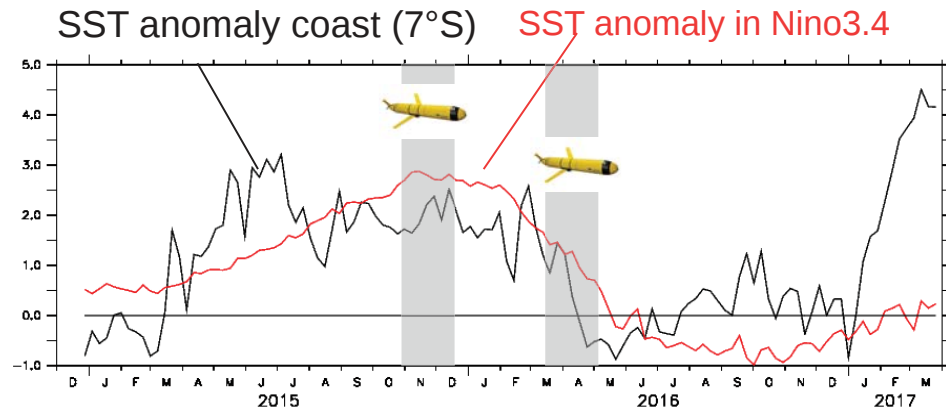
**Nueva alerta sobre El Niño**  
El Niño, conocido como "Inmortal", vuelve a ser un tema de actualidad. Desde que se volvió dominante en el Pacífico central y sur, una ola de calor oceánico se está abriendo paso por el Océano Índico y el Océano Atlántico. Este fenómeno climático, que se repite cada 3 a 7 años, provoca un calentamiento de las aguas superficiales del océano y una disminución de las precipitaciones en algunas zonas.

**Historia del Niño**  
El Niño, conocido como "Inmortal", vuelve a ser un tema de actualidad. Desde que se volvió dominante en el Pacífico central y sur, una ola de calor oceánico se está abriendo paso por el Océano Índico y el Océano Atlántico. Este fenómeno climático, que se repite cada 3 a 7 años, provoca un calentamiento de las aguas superficiales del océano y una disminución de las precipitaciones en algunas zonas.

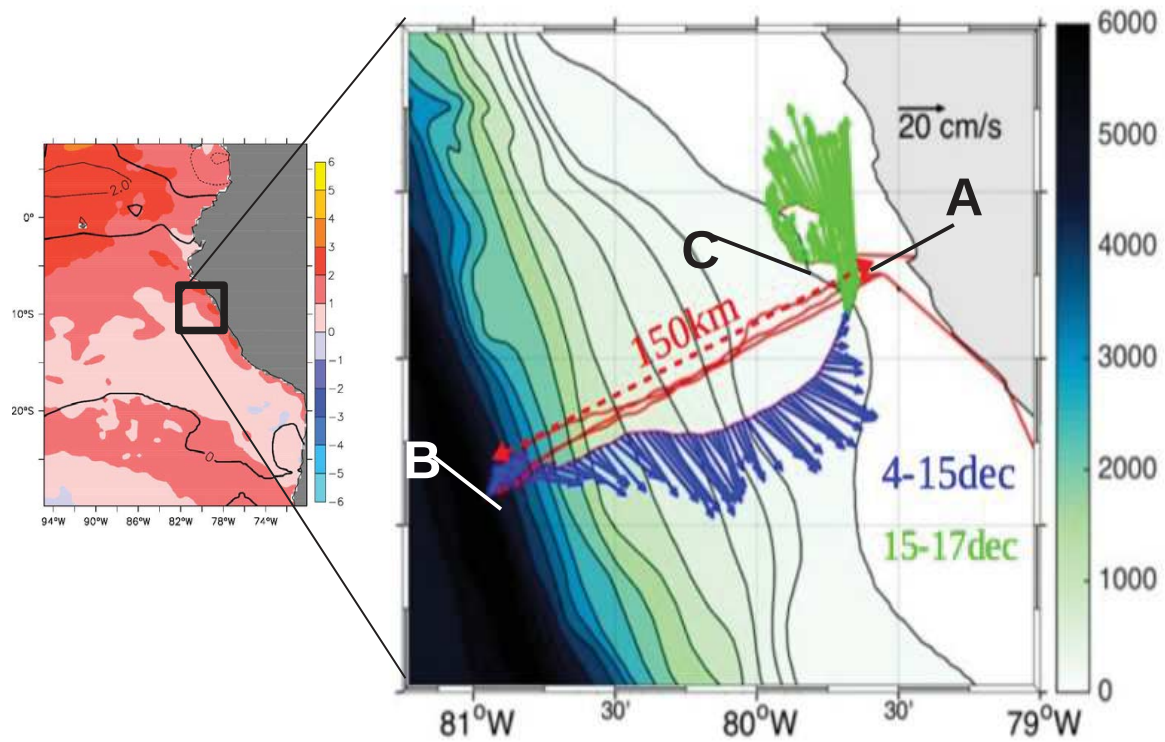
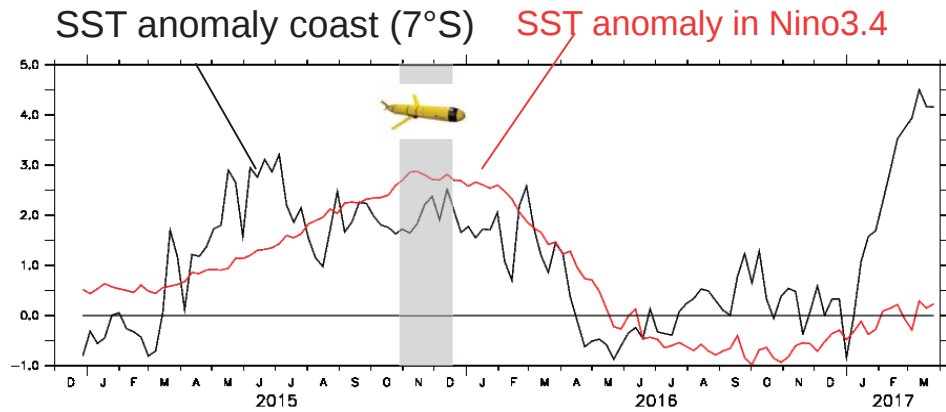




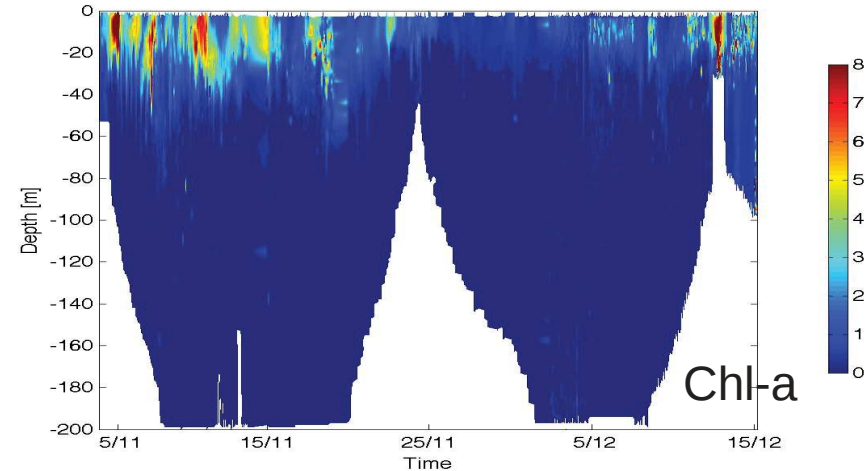
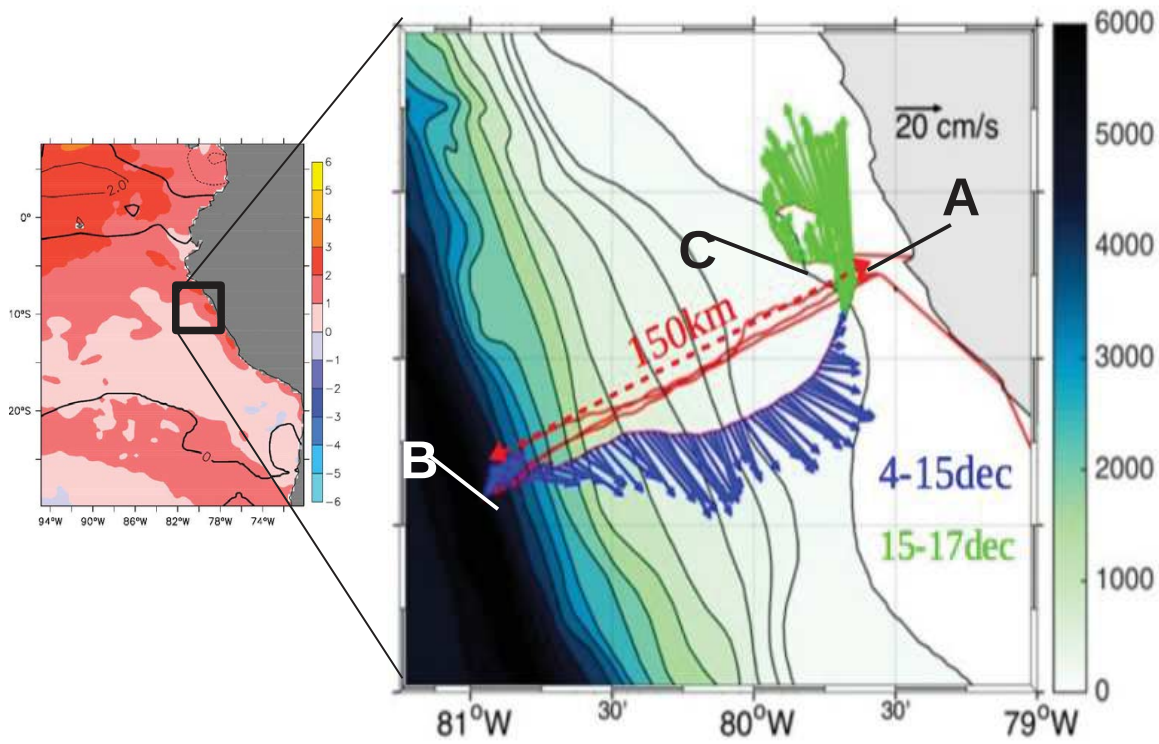
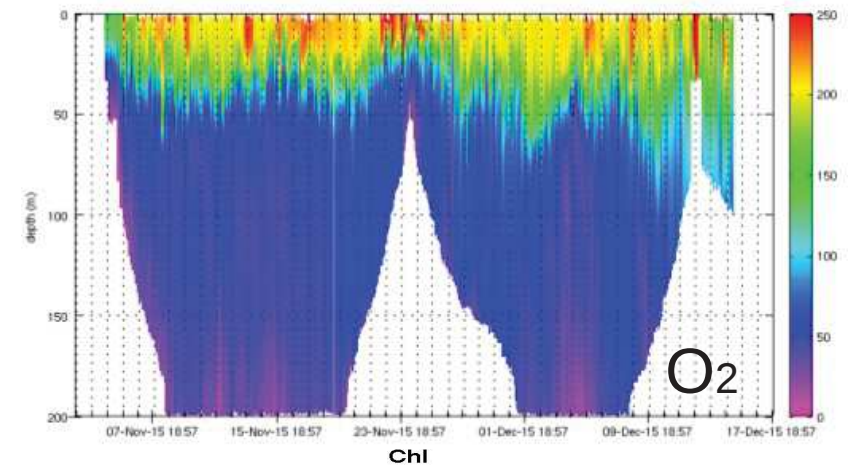
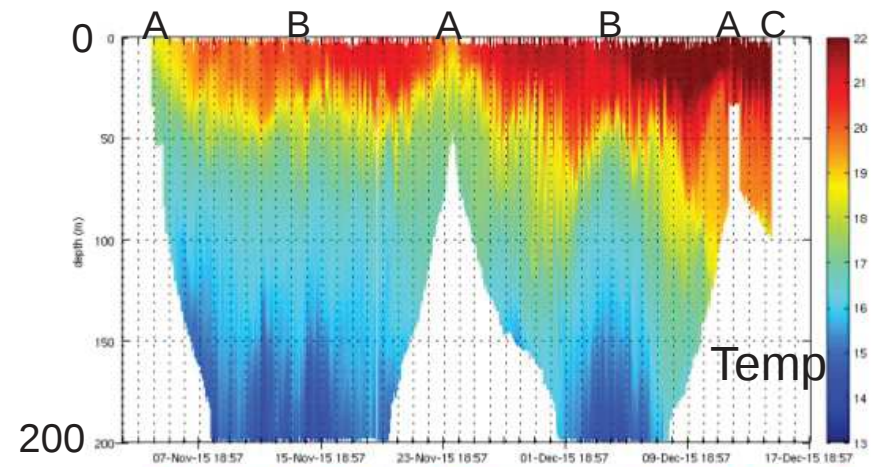
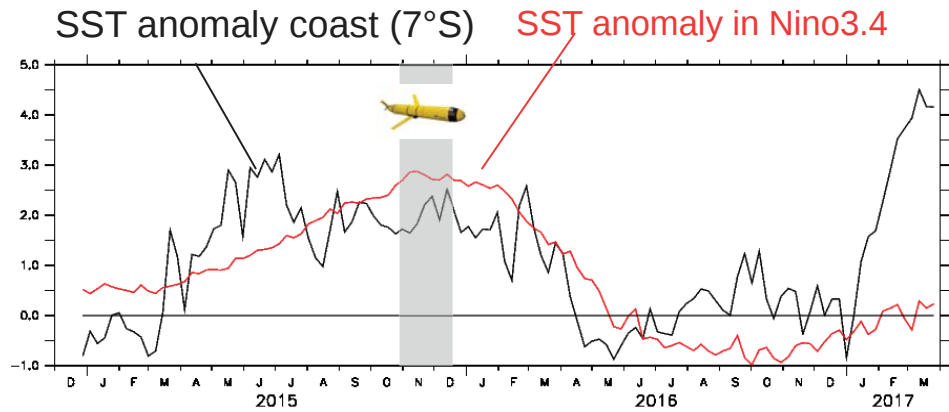
# Glider measurements during El Niño (Nov-Dec 2015)



# Glider measurements during El Niño (Nov-Dec 2015)



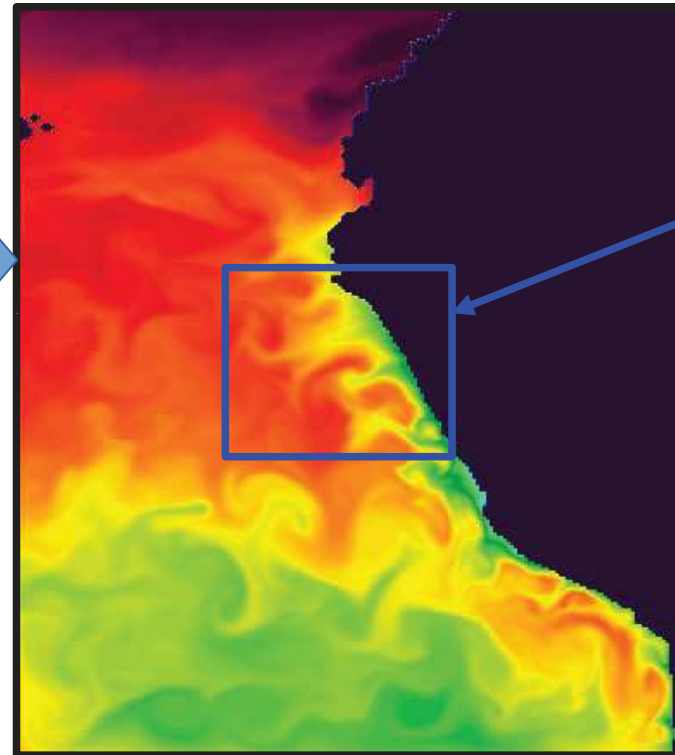
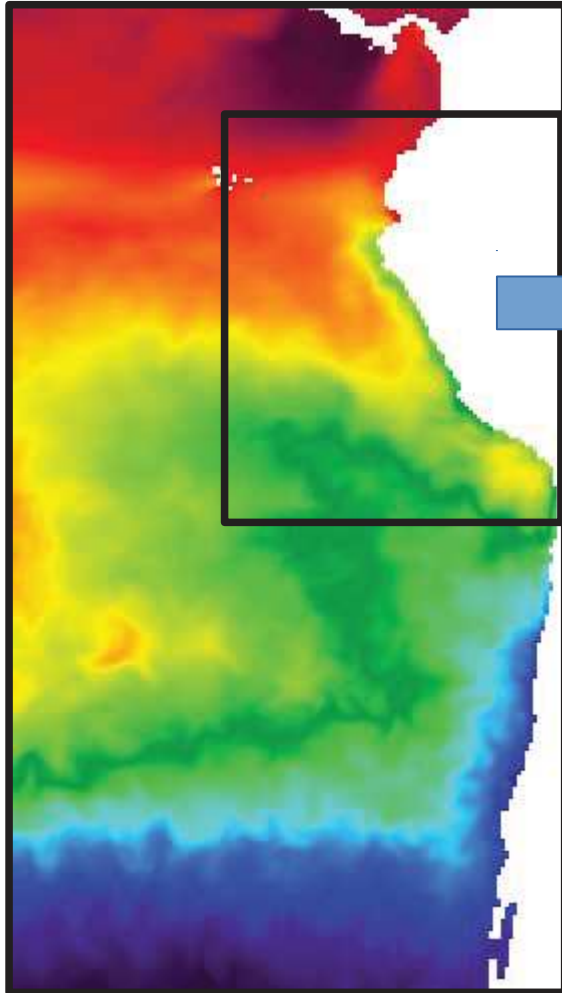
# Glider measurements during El Niño (Nov-Dec 2015)



# CROCO model configurations

Mercator global model (1/12°)  
Physics

CROCO-PISCES (1/9°~12 km)  
+ CARS climatology  
for biogeochemistry



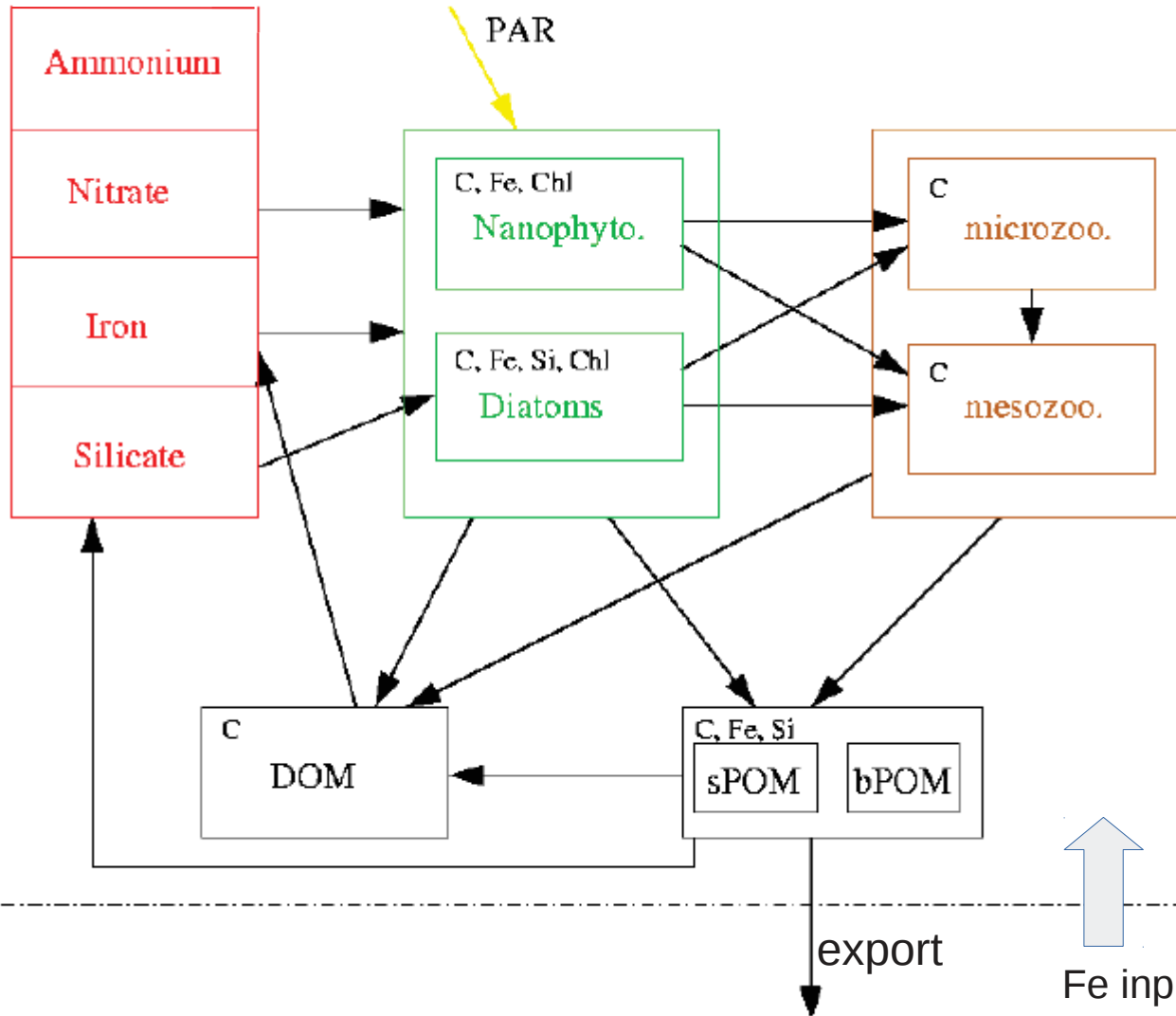
CROCO-PISCES  
(~4 km)  
online zoom

- daily boundary conditions from Mercator model (data assim.)
- atmospheric forcing: daily wind stress from ASCAT
- climatological heat forcing+ relaxation to AVHRR SST

# PISCES biogeochemical model



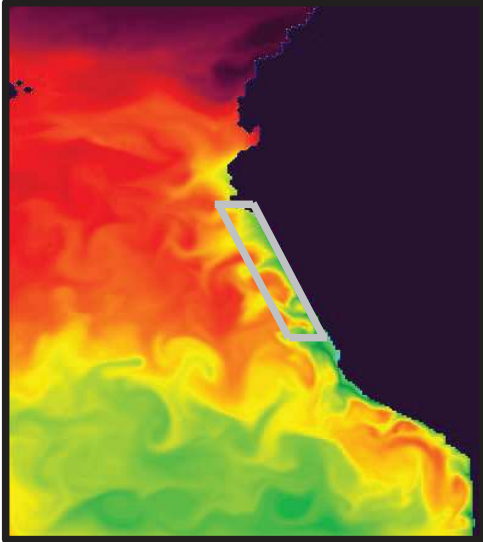
sea surface



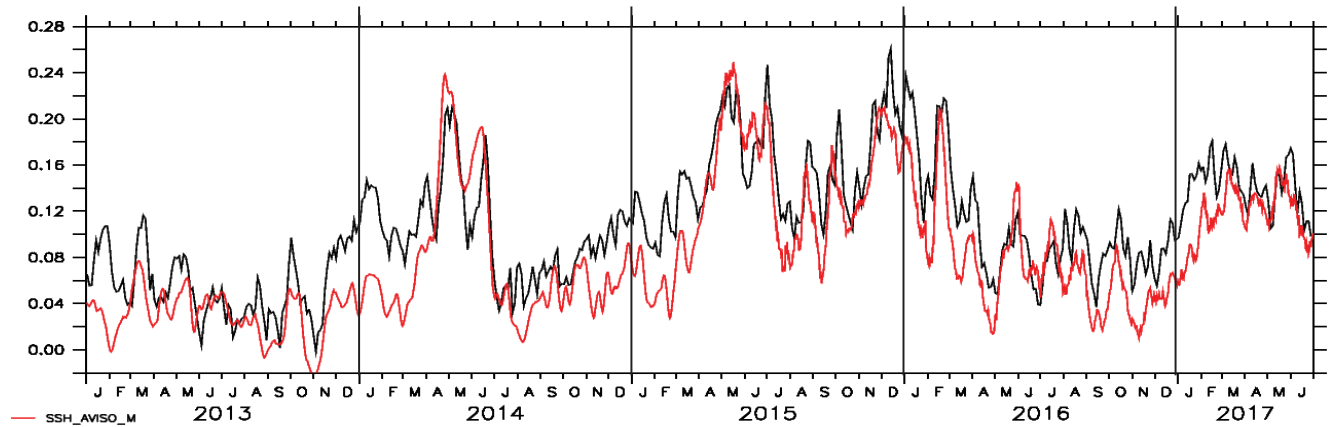
Ref : Aumont et al.(2015)

sediment

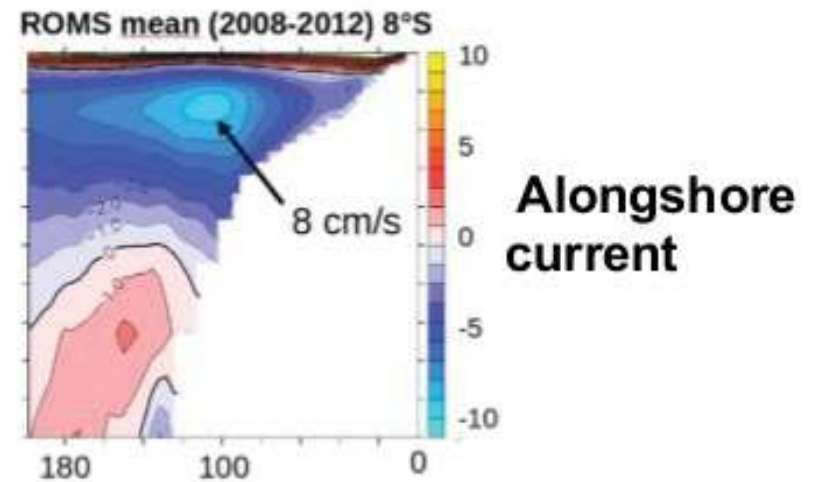
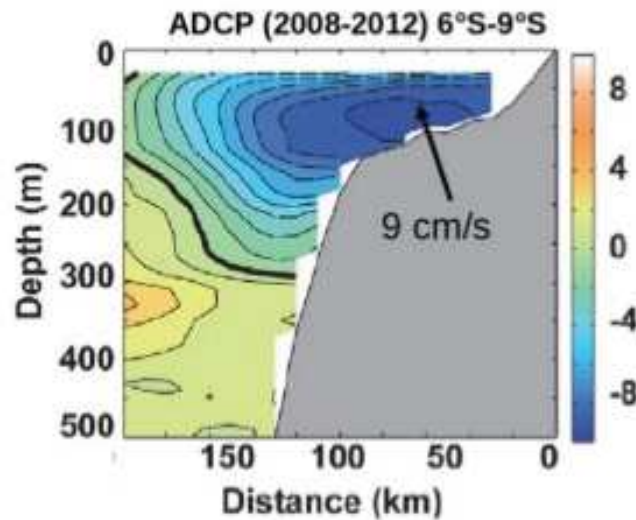
# Model evaluation: sea level variability



SSH in coastal band of 24 km between 6°S and 12°S (ROMS, AVISO)

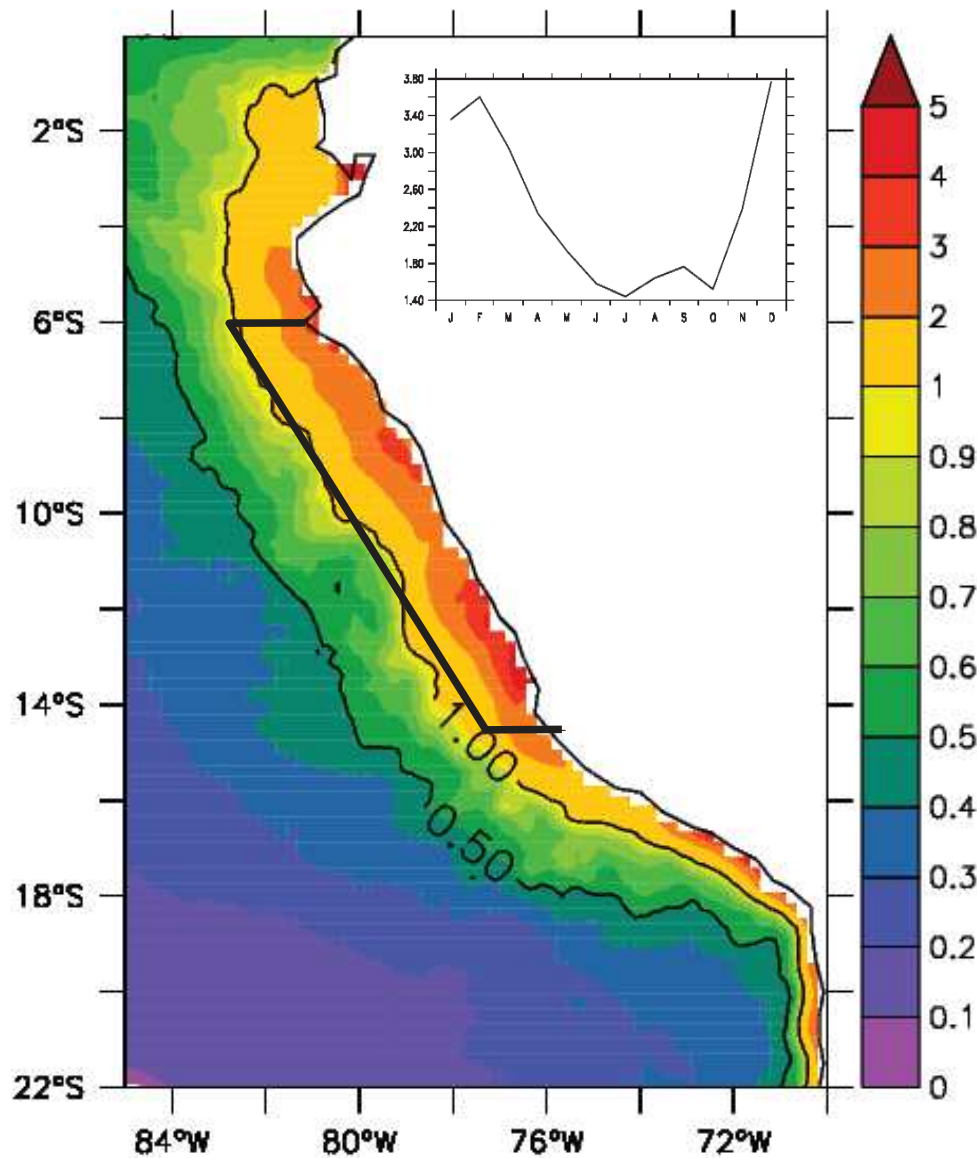


## Observations Chaigneau et al.(2013)

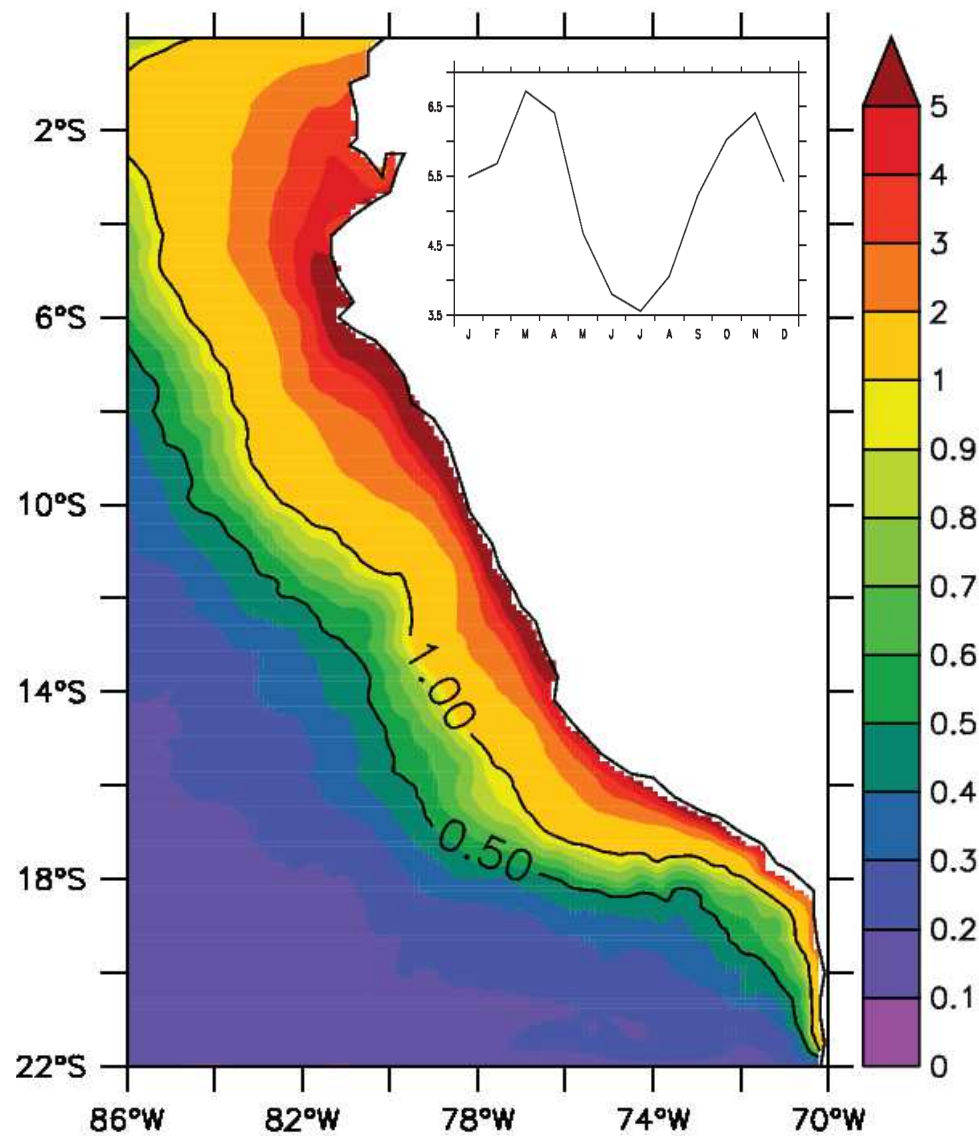


# Model evaluation: mean and seasonal cycle of surface chlorophyll

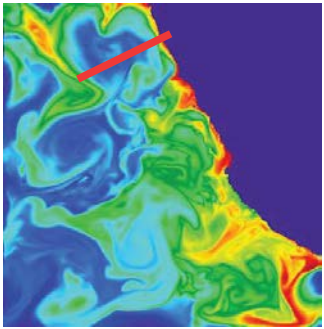
Modis chl (2013-2016)



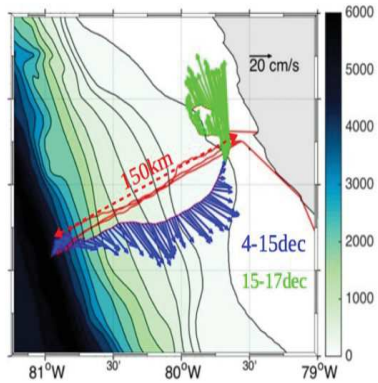
Model chl (2013-2016)



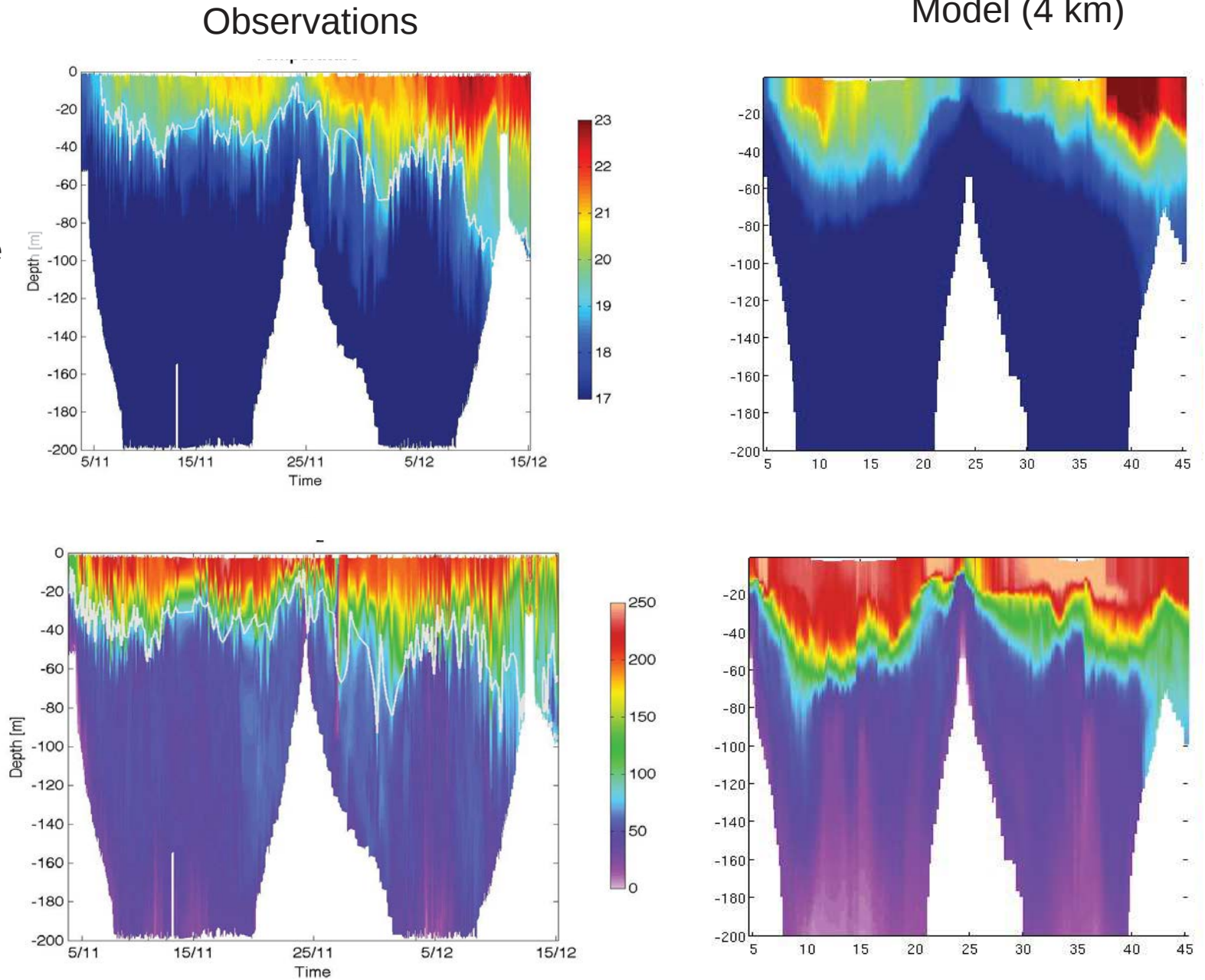
# Gliders/ regional model comparison during November-December 2015



Temperature

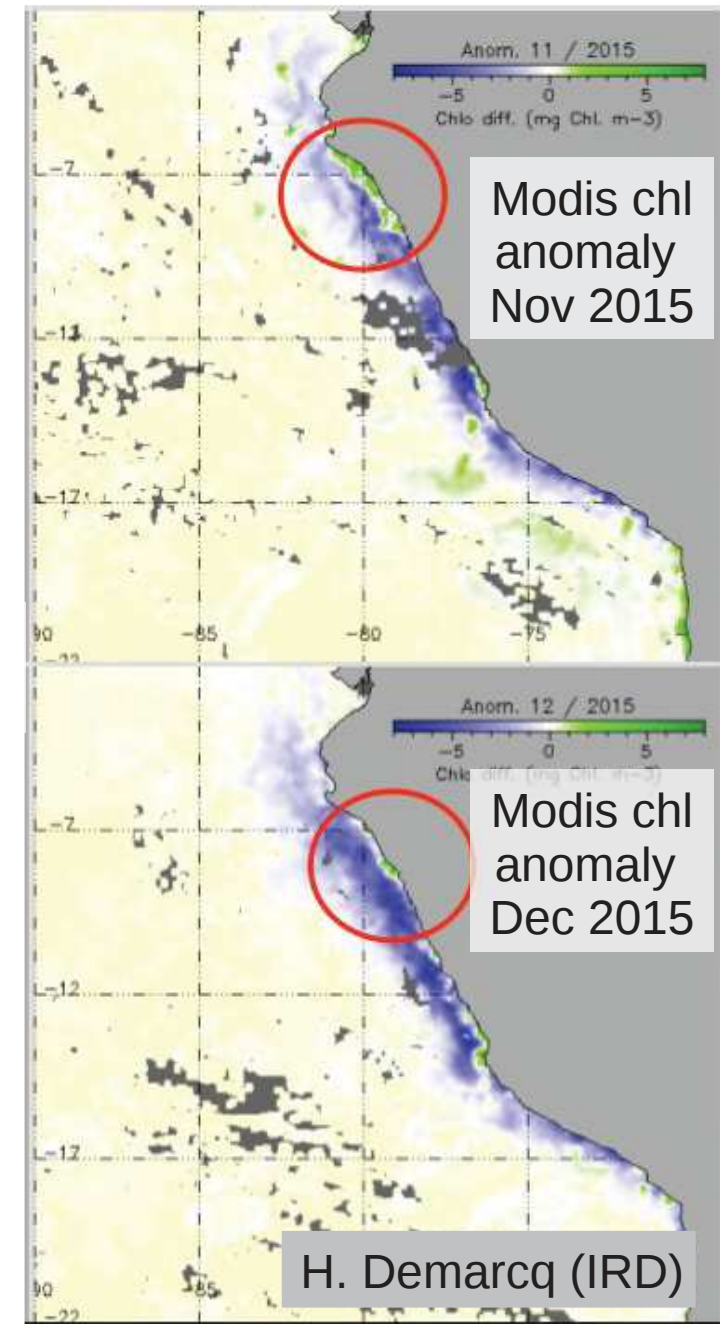
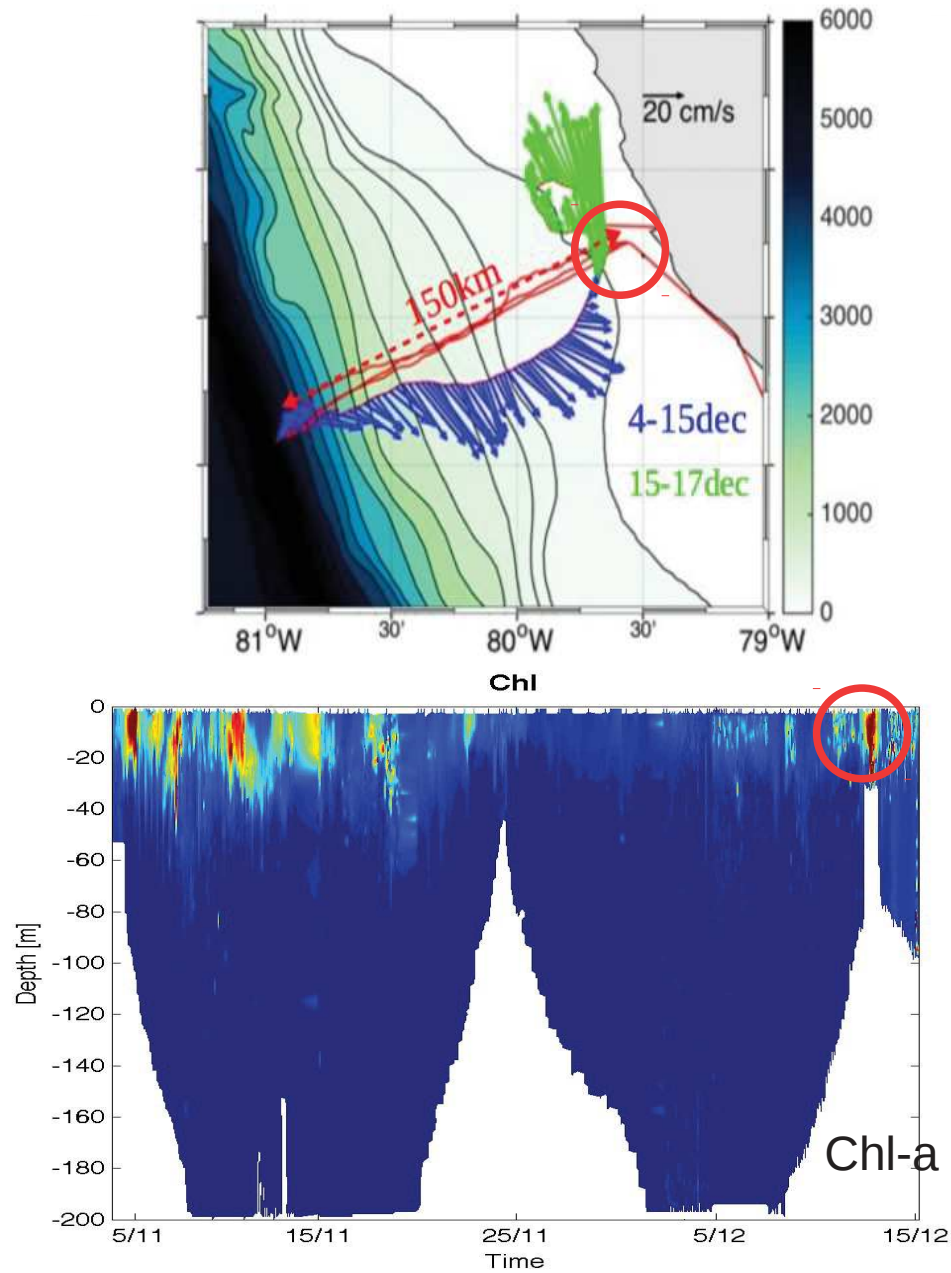


Oxygen



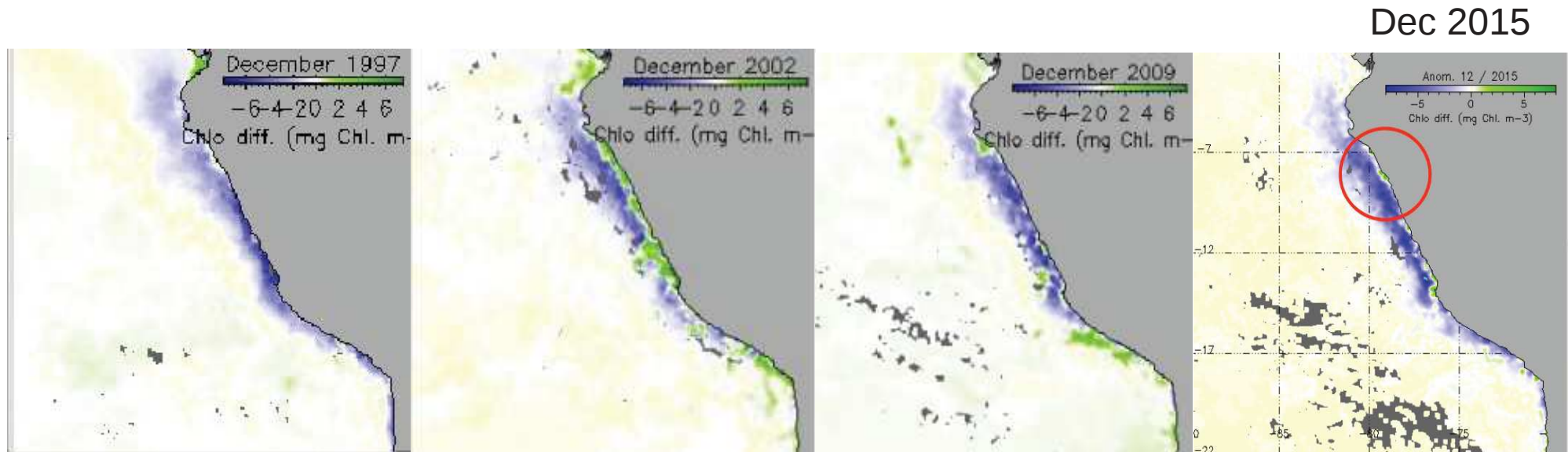


# A high nearshore chlorophyll signal during El Nino

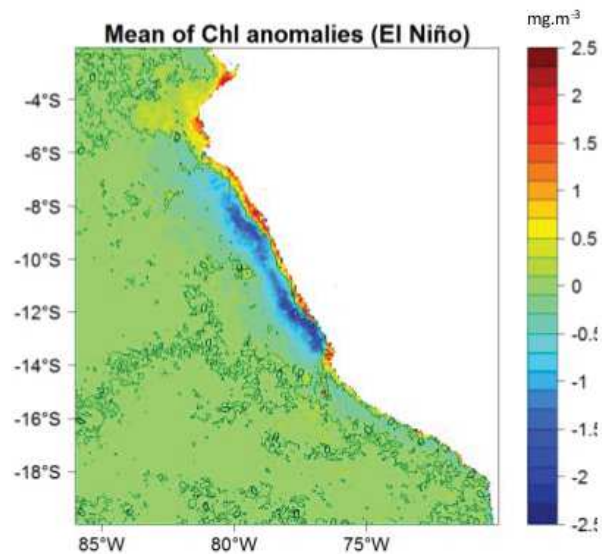


# A high nearshore chlorophyll signal during El Niño

Also present during other Niño events (1997, 2002, 2009, 2015)

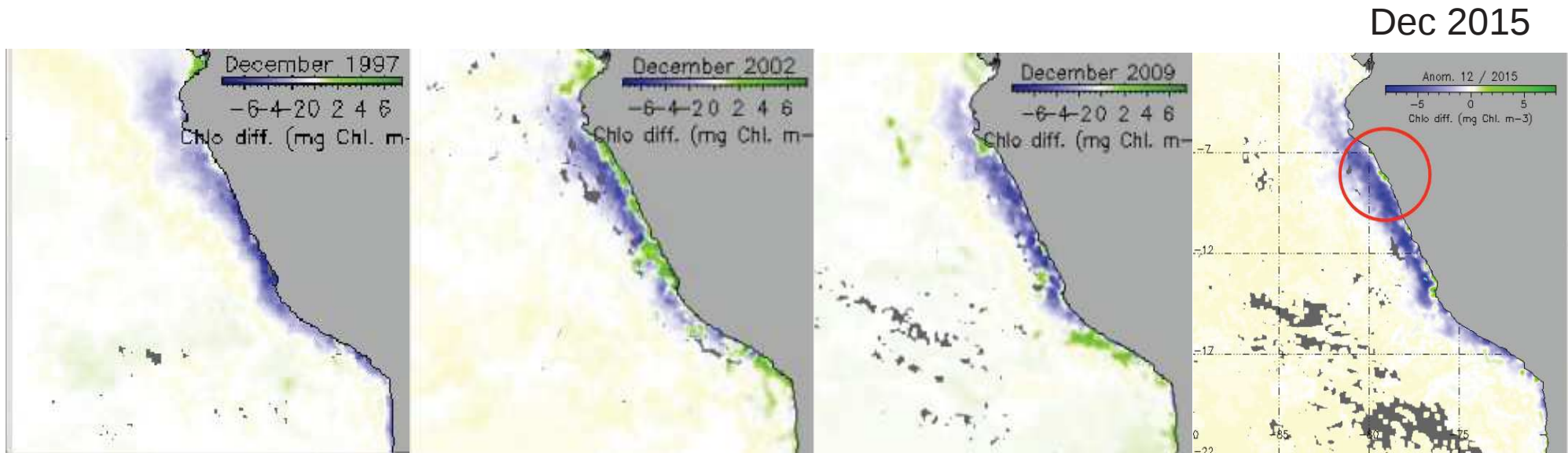


Composite of surface Chl during El Niño (1998-2016)

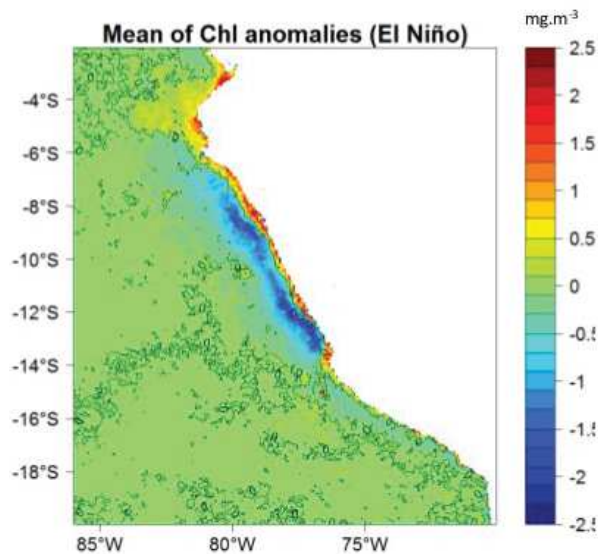


# A high nearshore chlorophyll signal during El Niño

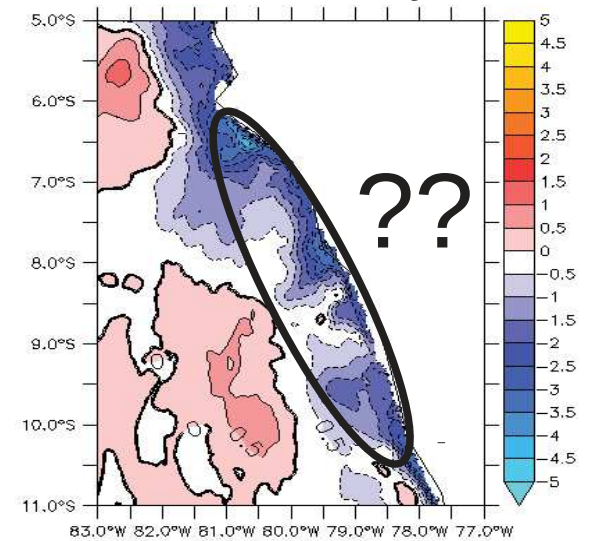
Also present during other Niño events (1997, 2002, 2009, 2015)



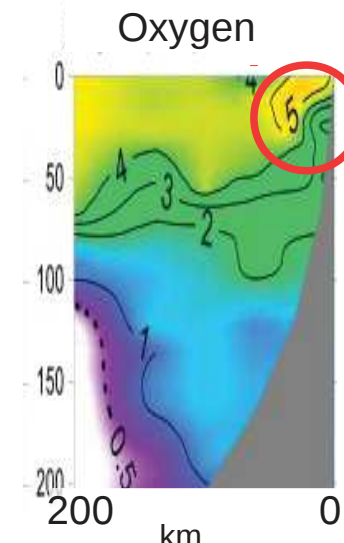
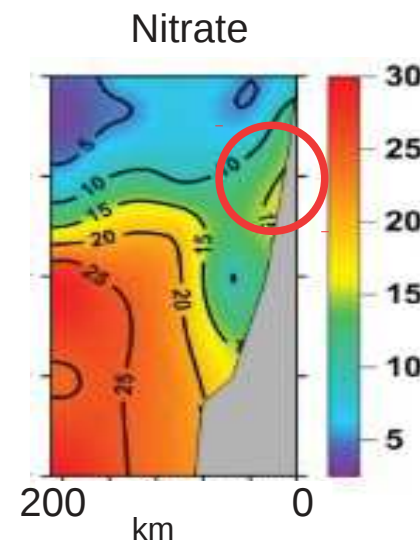
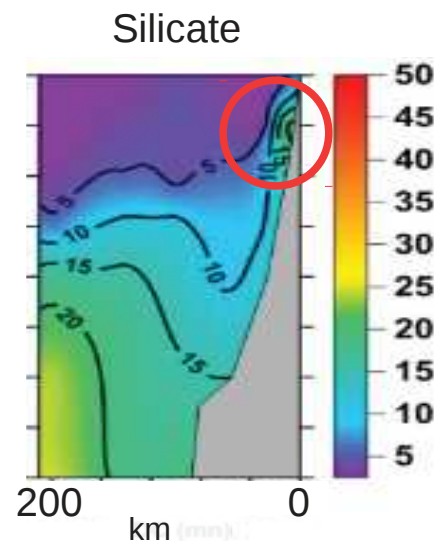
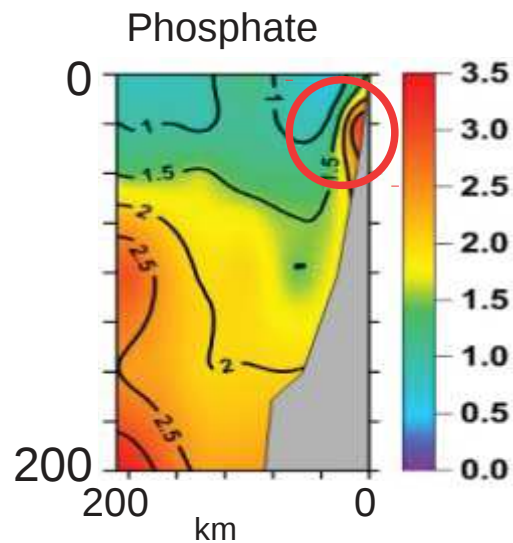
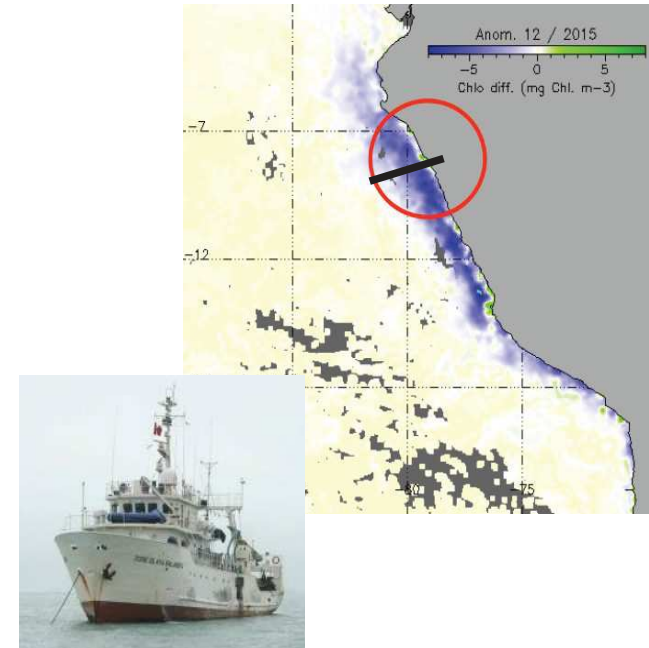
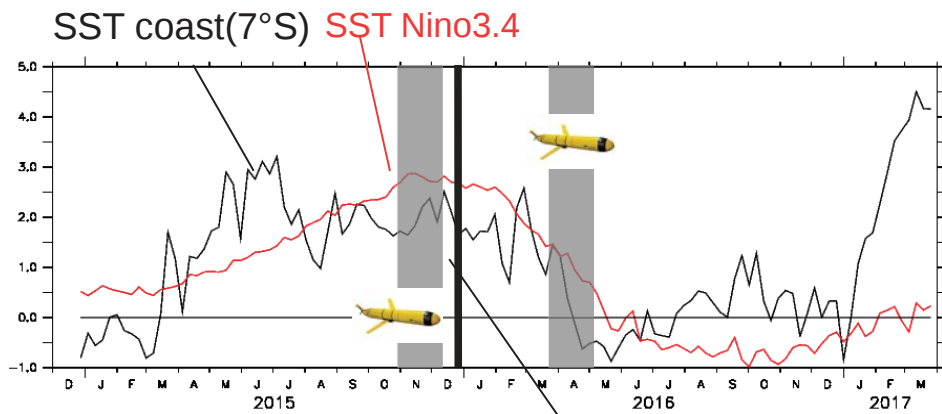
Composite of surface Chl during El Niño (1998-2016)



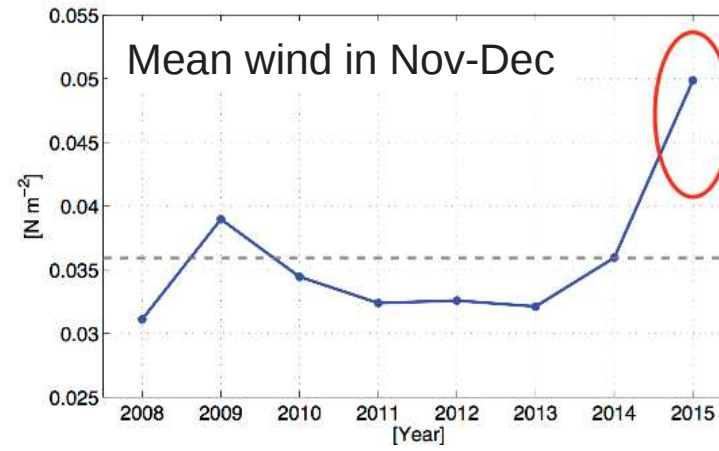
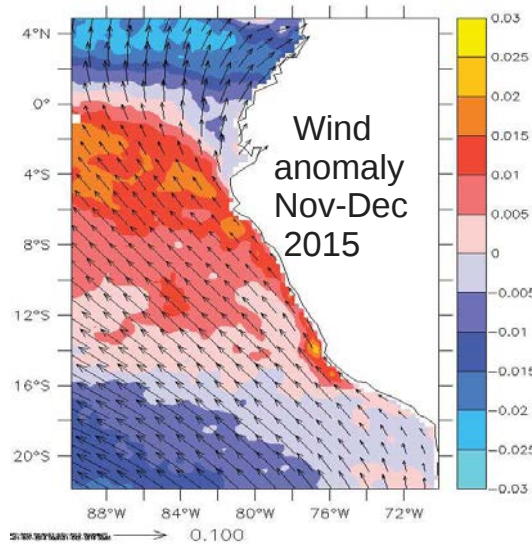
Model Chl anomaly in Dec 2015



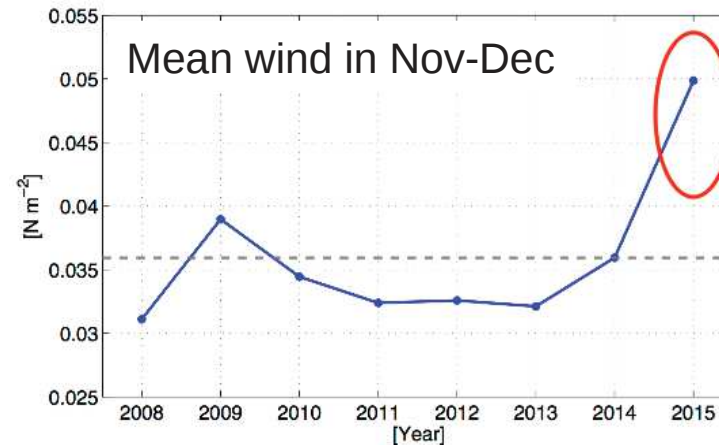
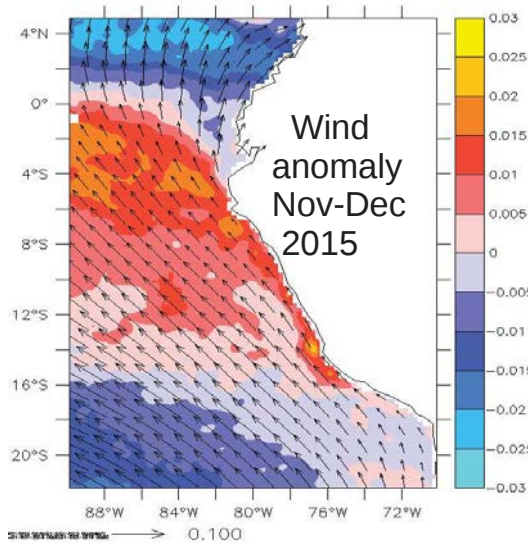
# Nutrient and oxygen measurements in november 2015



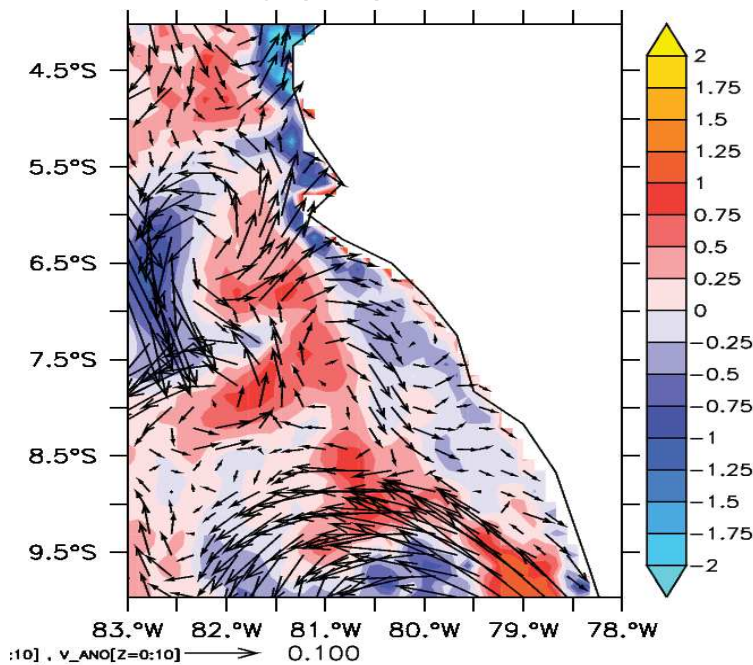
# Processes during the 2015-2016 El Niño: was there upwelling?



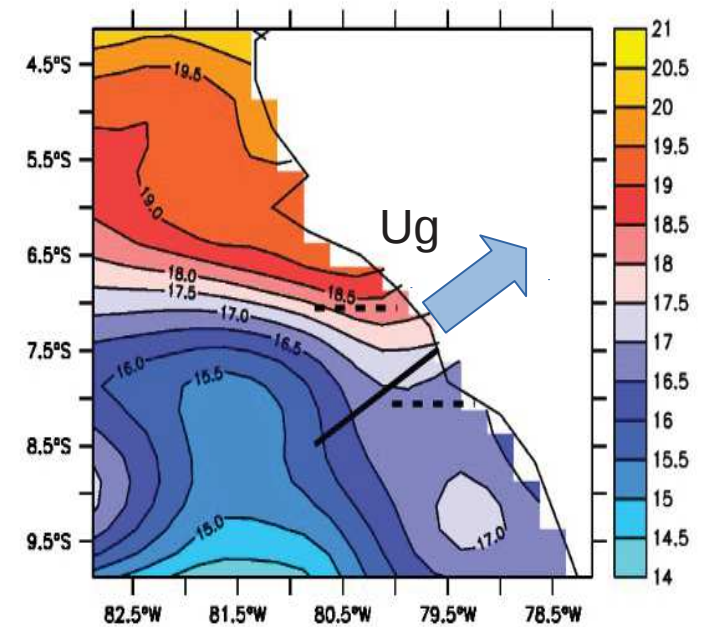
# Processes during the 2015-2016 El Niño: was there upwelling?



Model Vertical velocity anomaly (m/d), Nov-Dec 2015

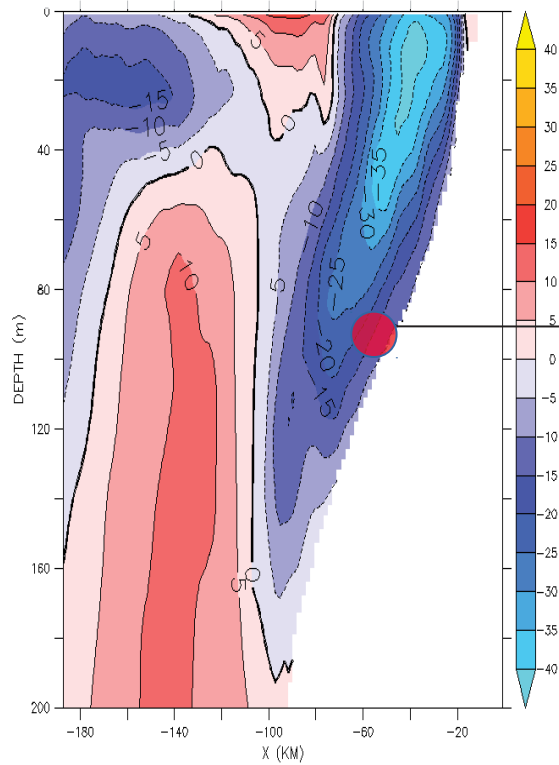


Sea level anomaly (cm, AVISO) Nov-Dec 2015

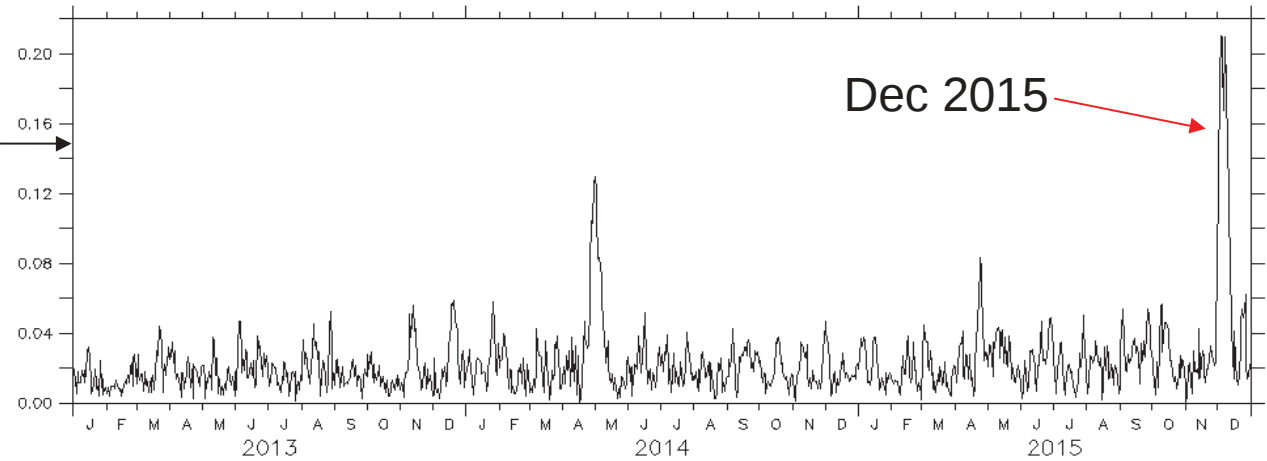


# Processes during the 2015-2016 El Niño: sediment resuspension?

## Model alongshore velocity (28nov-5dec2015)

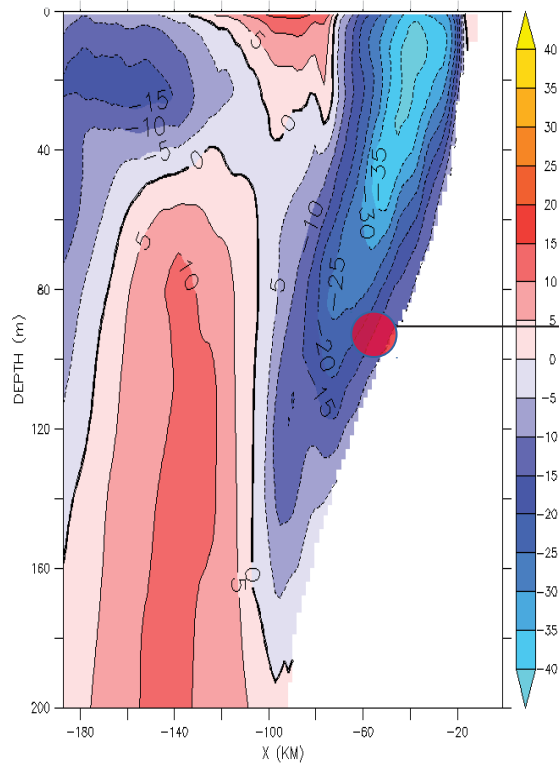


## Model bottom velocity

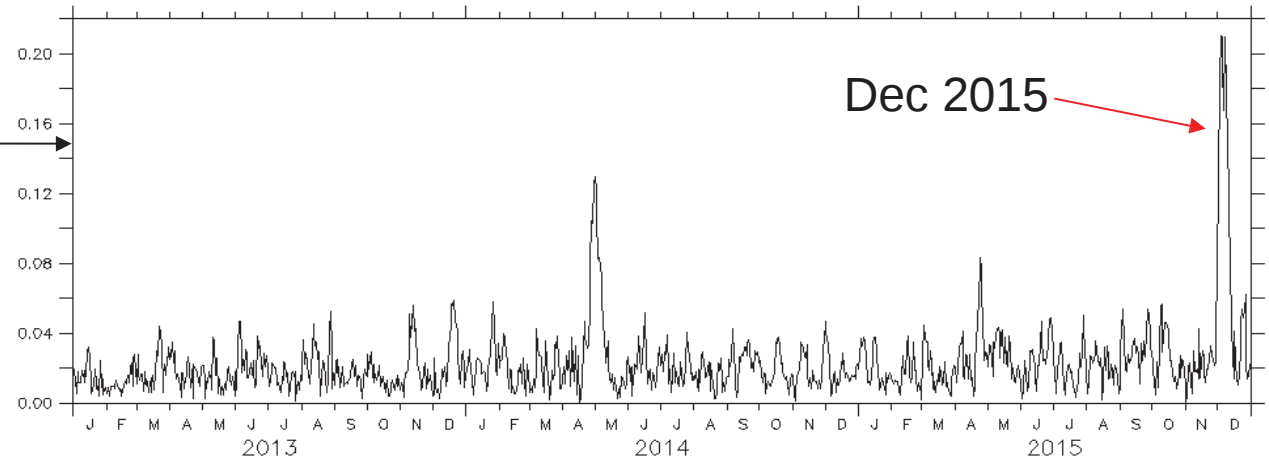


# Processes during the 2015-2016 El Niño: sediment resuspension?

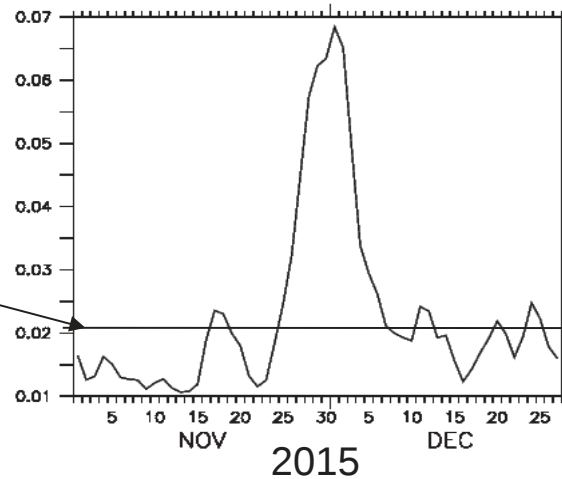
## Model alongshore velocity (28nov-5dec2015)



## Model bottom velocity

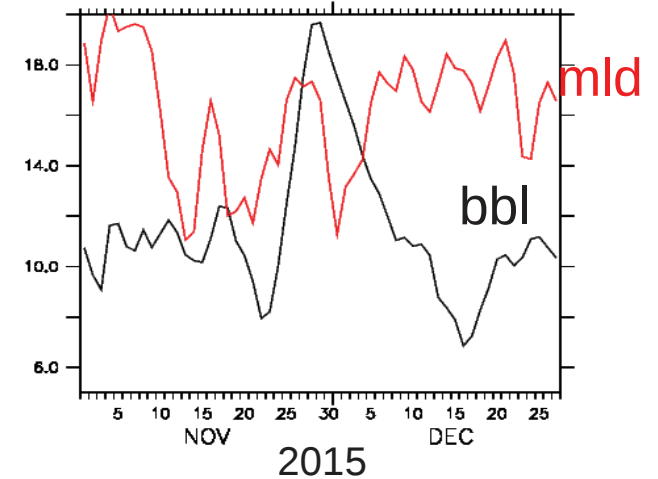


## Bottom stress averaged on shelf (h<100m, 7-8°S)



Erosion threshold = 0.02 N/m<sup>2</sup>  
Stanev & Kandilarov (2012)

## Bottom boundary layer depth and mixed layer depth (m)





# (1) Conclusions and perspectives

The 2015-2016 El Niño had a relatively weak impact on the Peru upwelling system

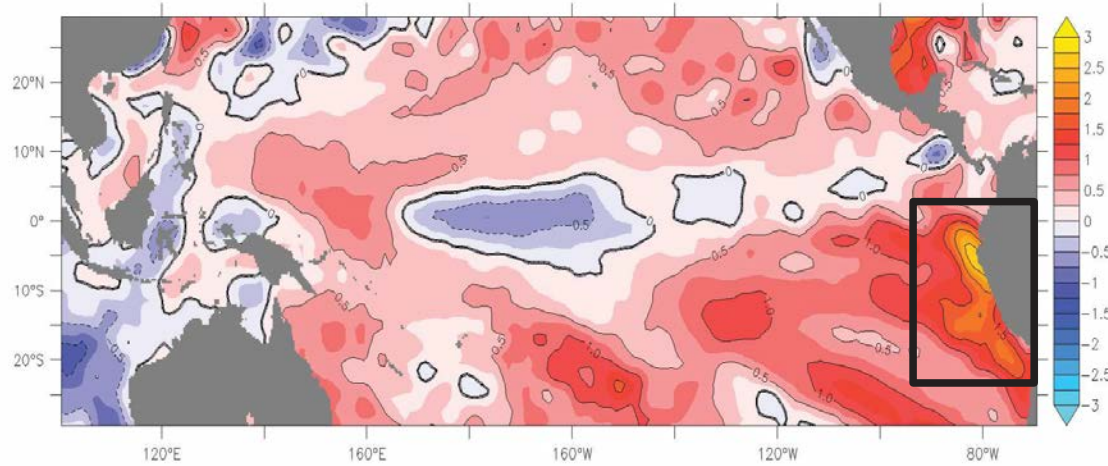
- Deepening of the thermocline/oxycline/nutricline associated with the passage of coastal waves
- Maintenance of high chlorophyll in a nearshore band (~10 km)
- Strong winds but upwelling is compensated by onshore geostrophic current
- Nutrient enrichment could be associated to sediment resuspension (to be confirmed)

## **Perspectives**

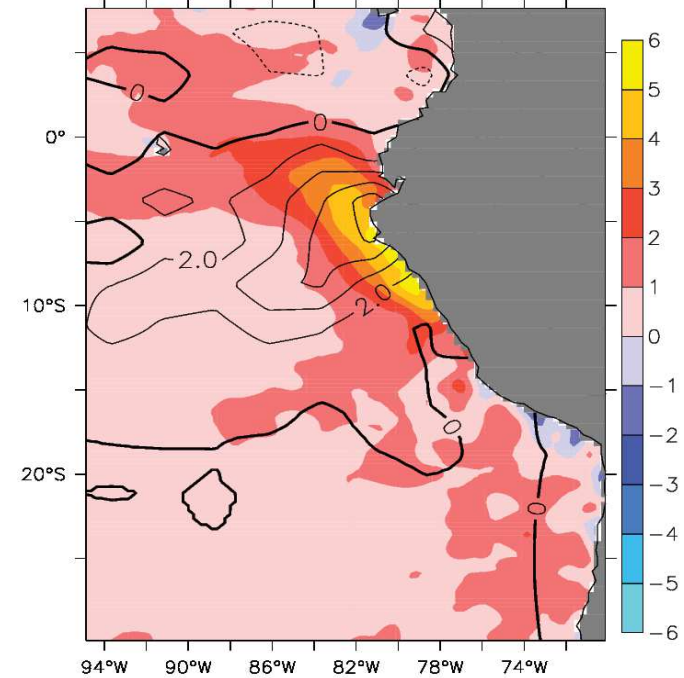
- Monitoring of the coastal current, oxycline, productivity using IMARPE glider

# Part 2: the March 2017 “El Niño costero”

SST anomaly JFM 2017

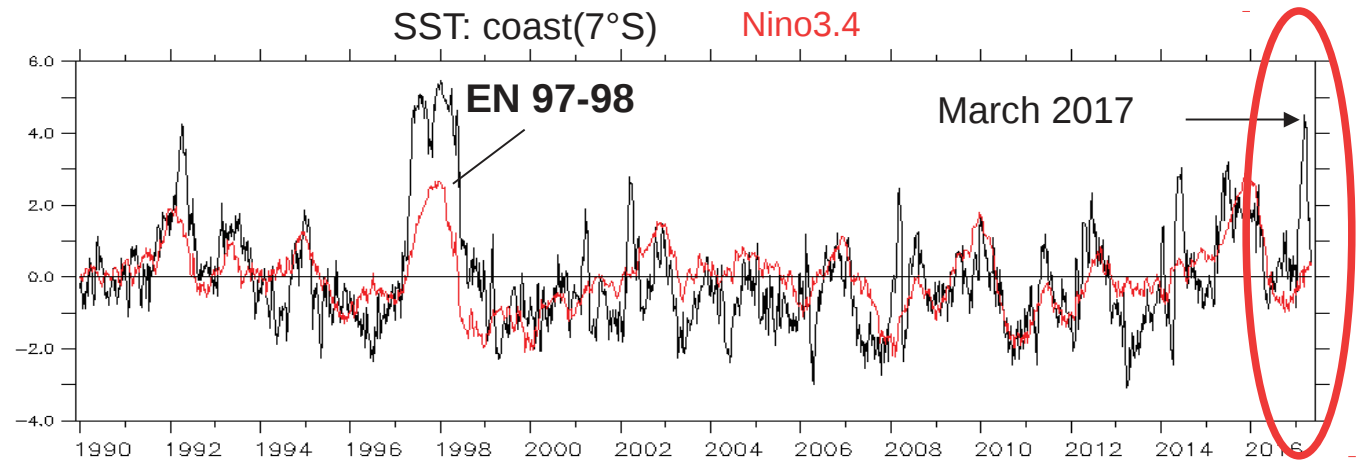


SST/Precip anomaly Mars 2017

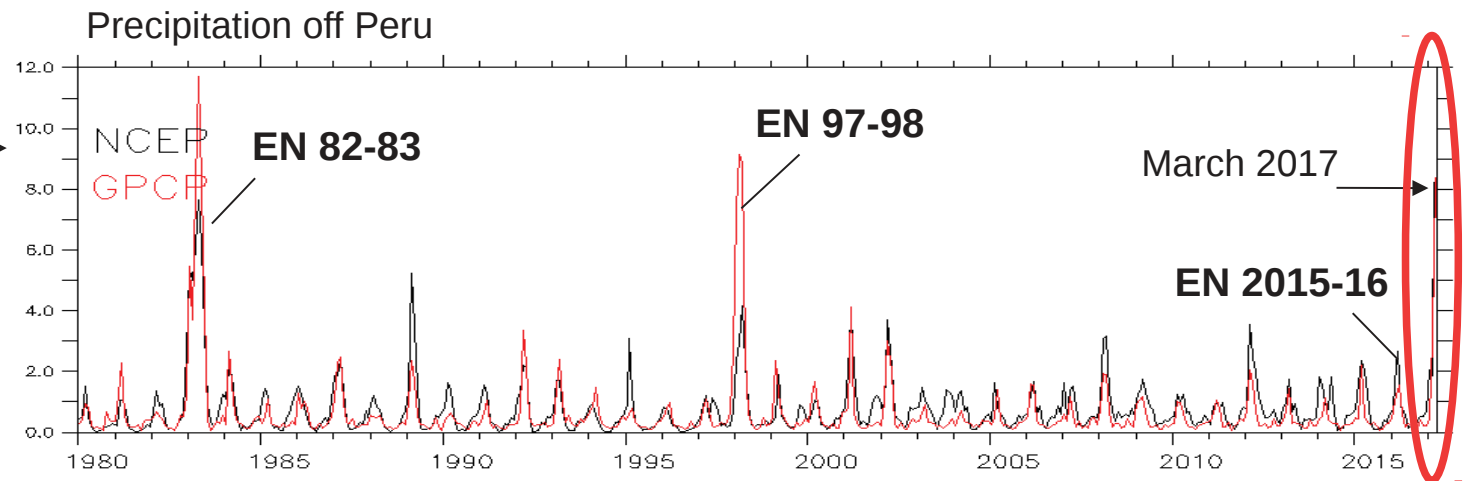
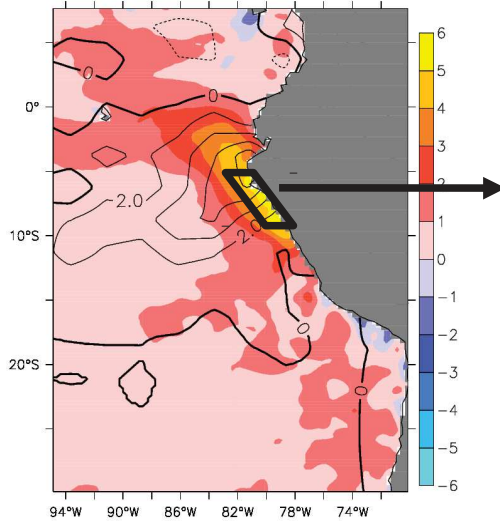


Lima, march 2017

# Impacts of the March 2017 “El Niño costero”



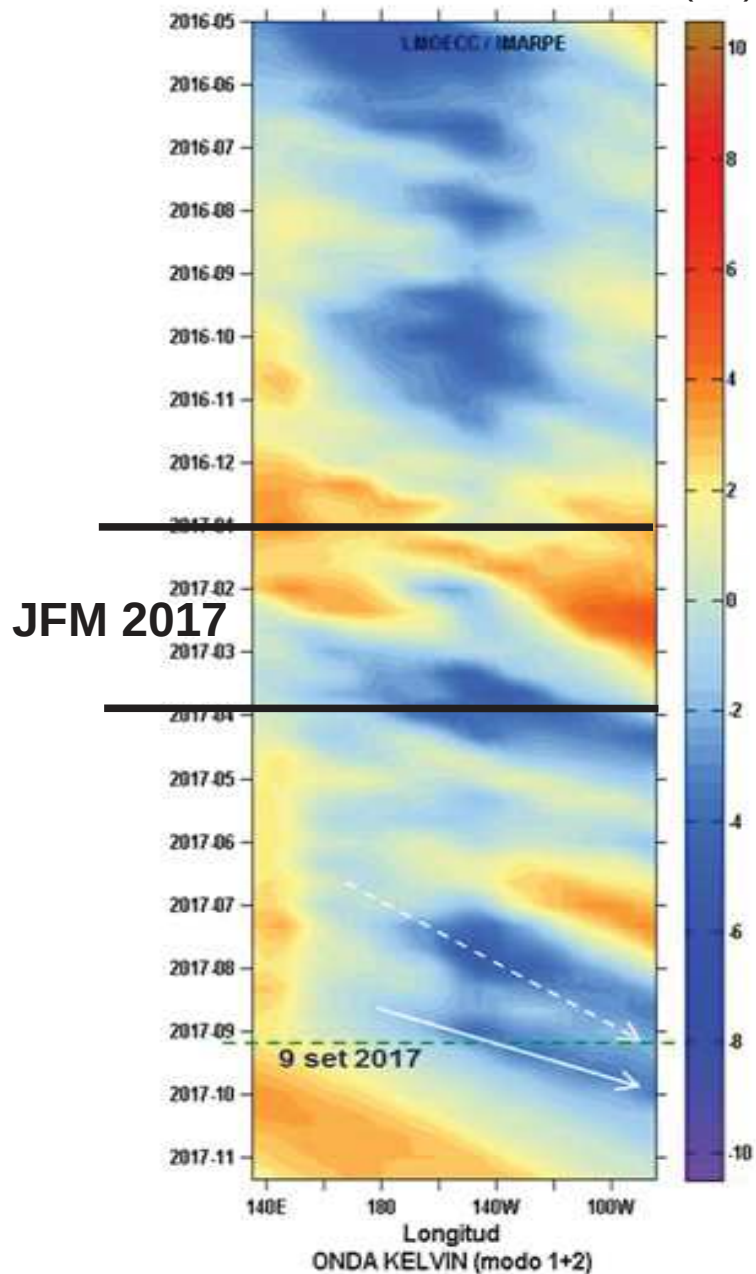
SST/Precip anomaly Mars 2017



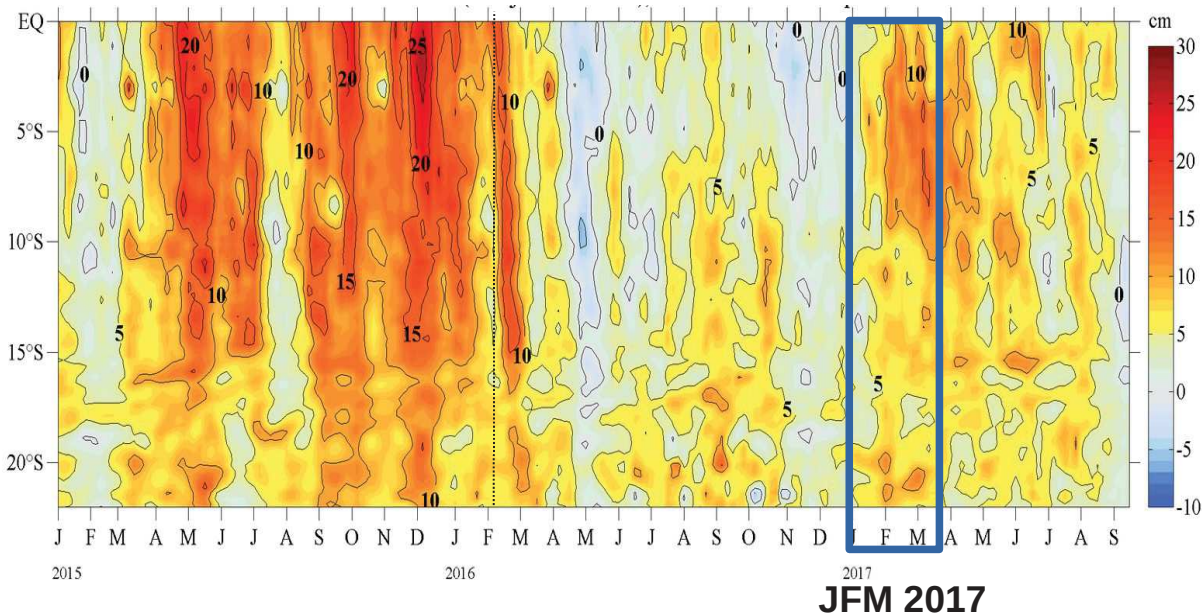
# Equatorial KW and coastal waves during “El Niño costero”



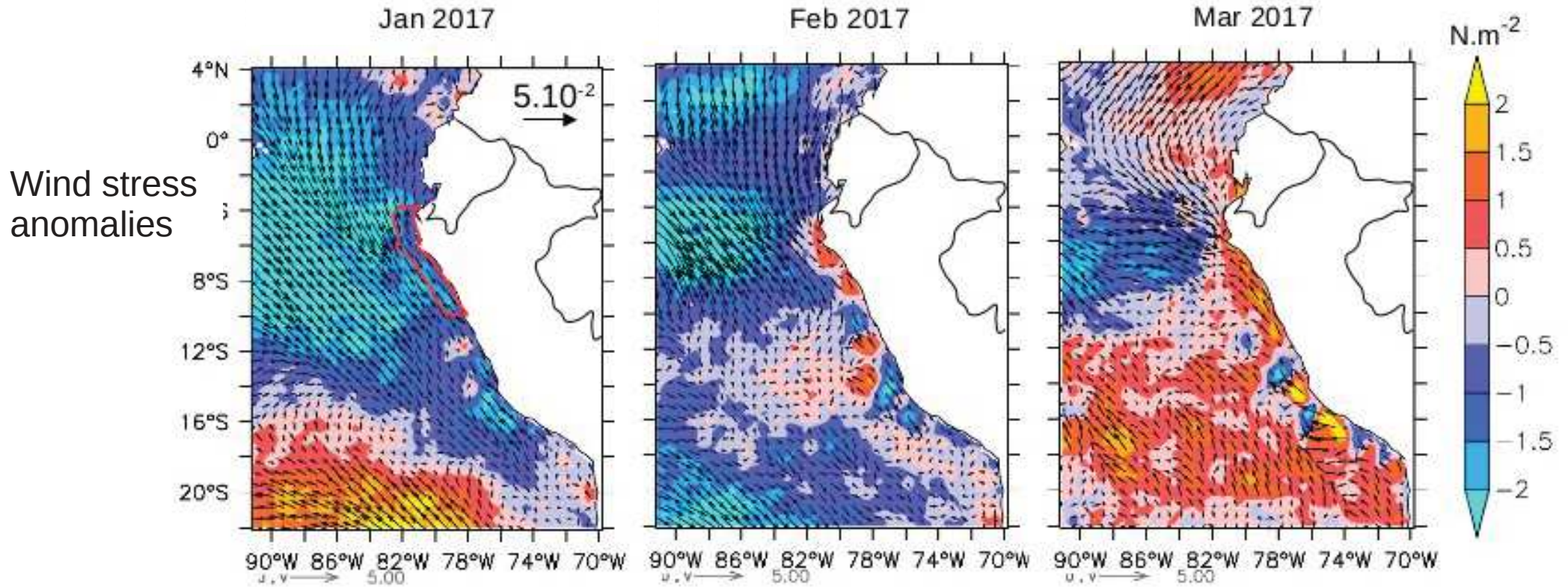
Equatorial Kelvin waves (modes 1&2) contribution to sea level (cm)



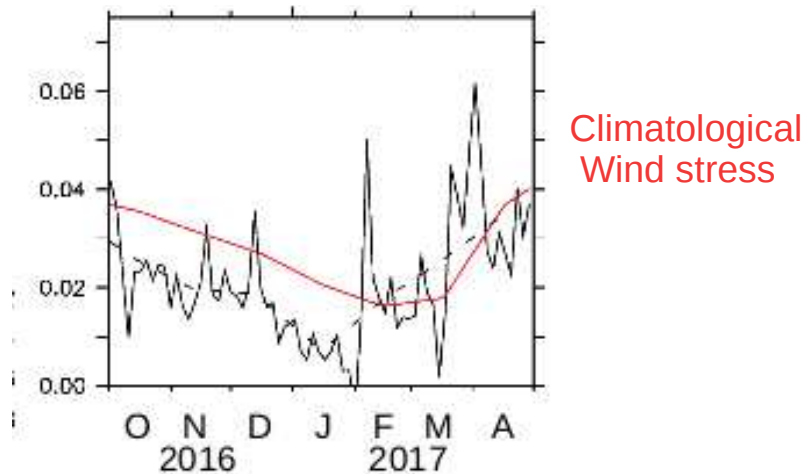
AVISO sea level (cm) along the Ecuador-Peru coasts



# Wind stress during “El Niño costero”

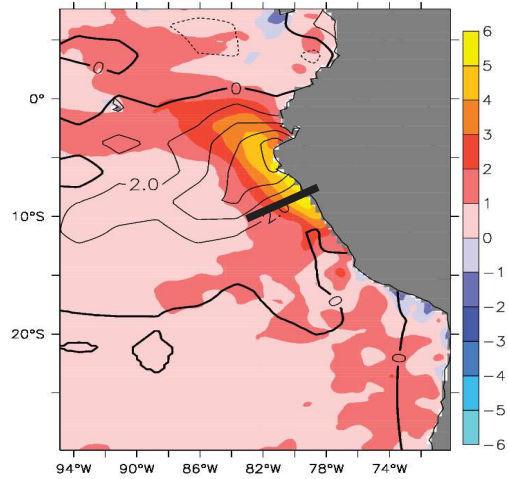


## Alongshore Wind stress



# In situ observations during “El Niño costero”

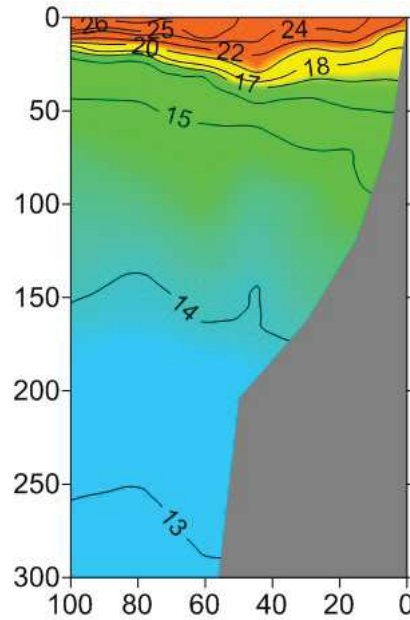
Temperature sections



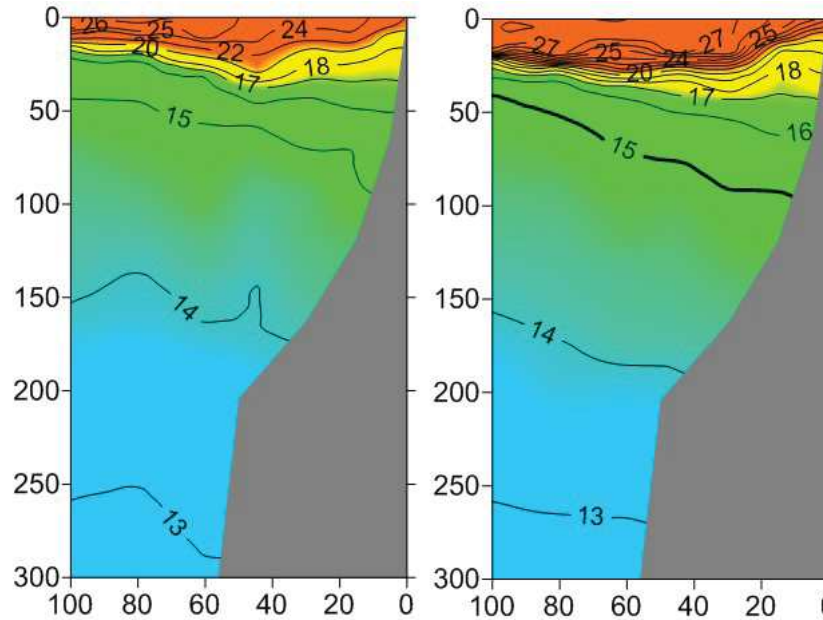
Anomalies



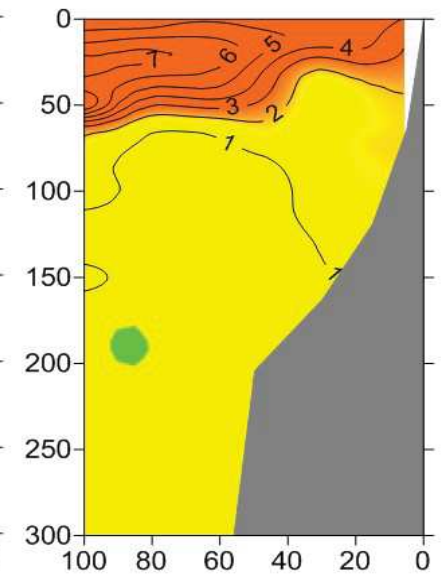
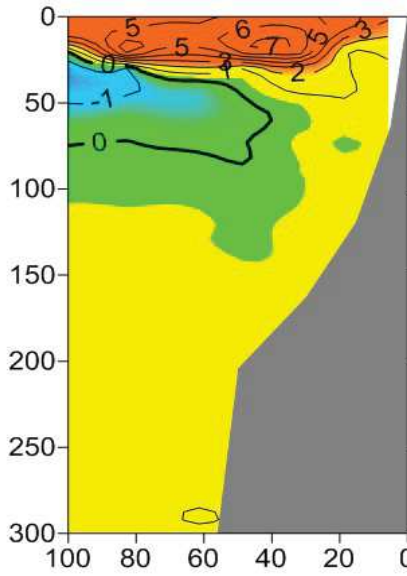
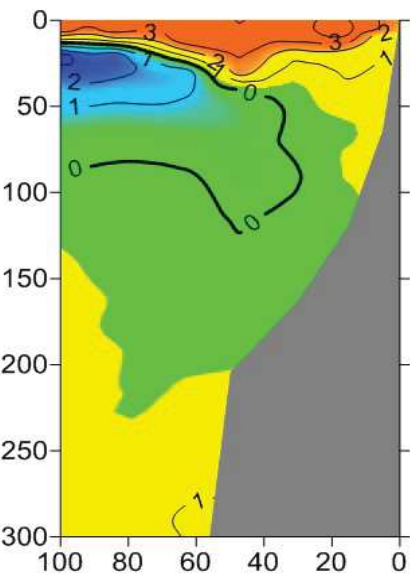
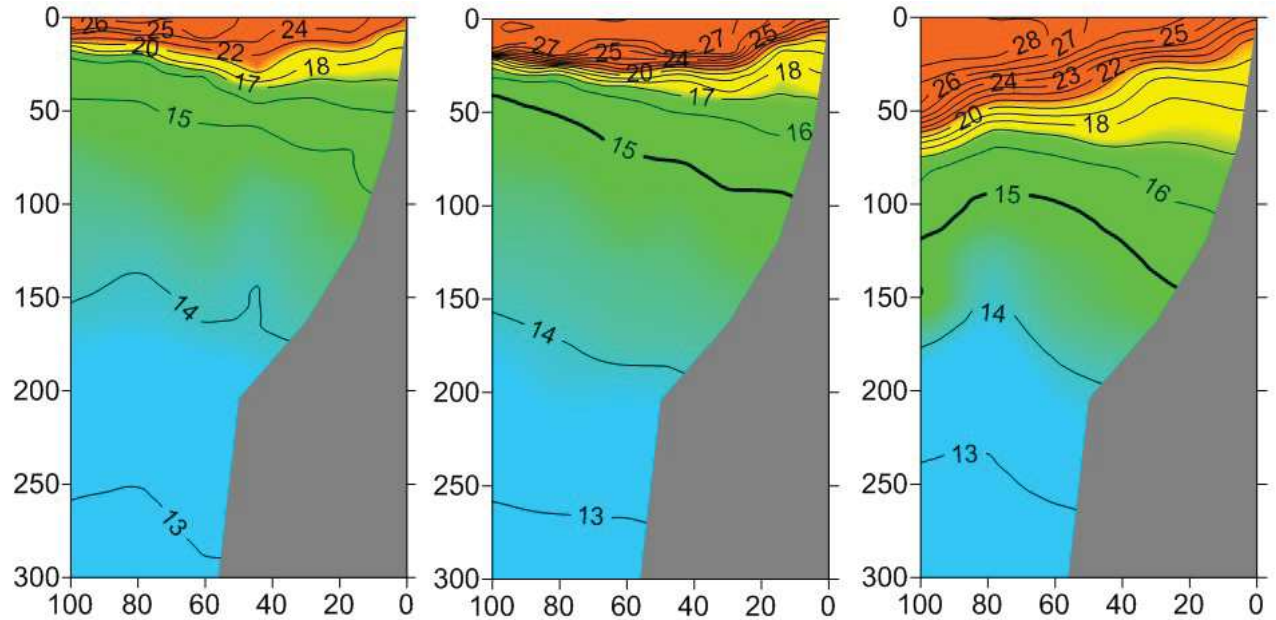
25-26 Jan 2017



18-19 Feb 2017

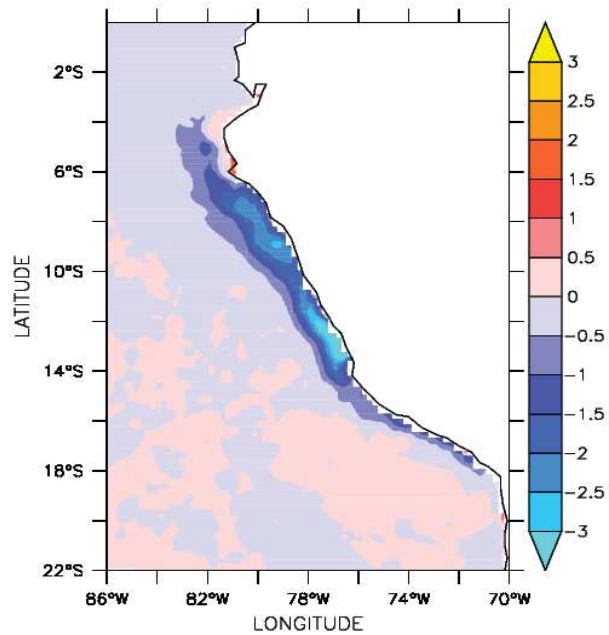


27-28 Mar 2017

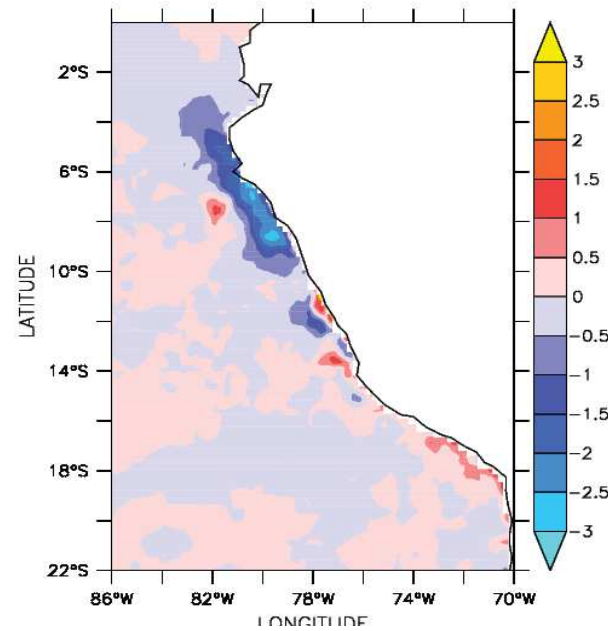


# Surface productivity during “El Niño costero”

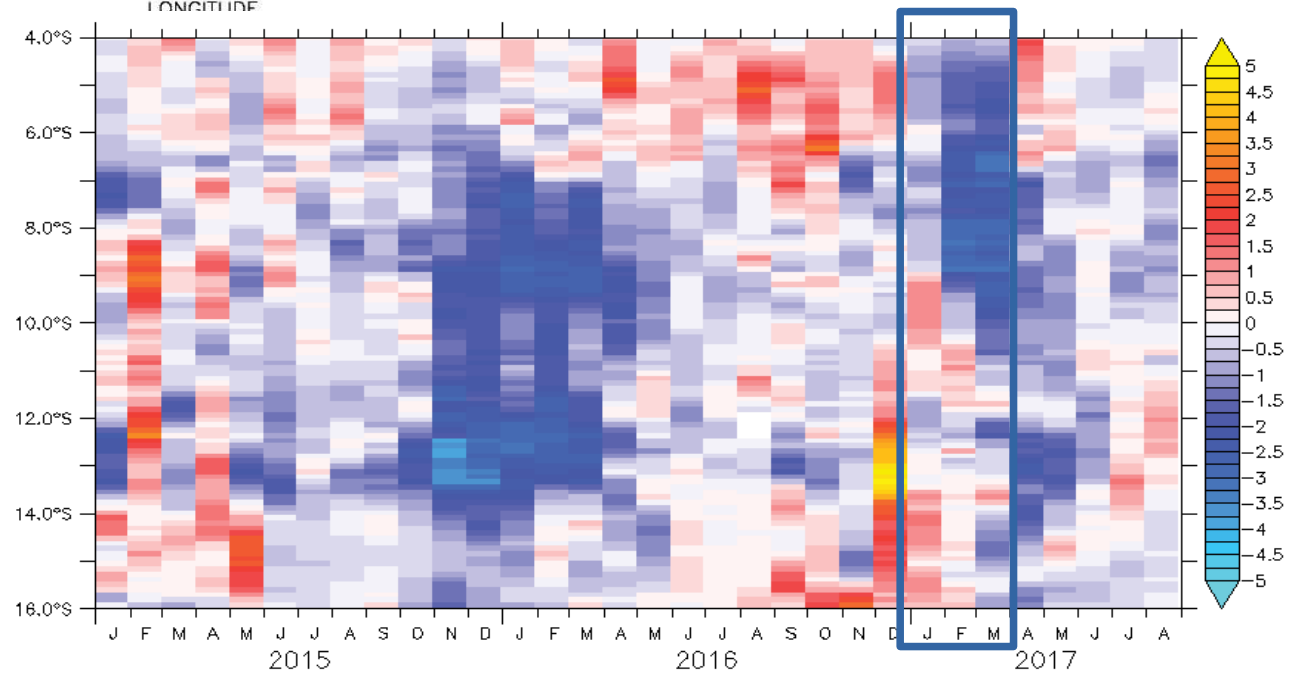
Modis Chl anomaly  
Nov2015-Jan2016



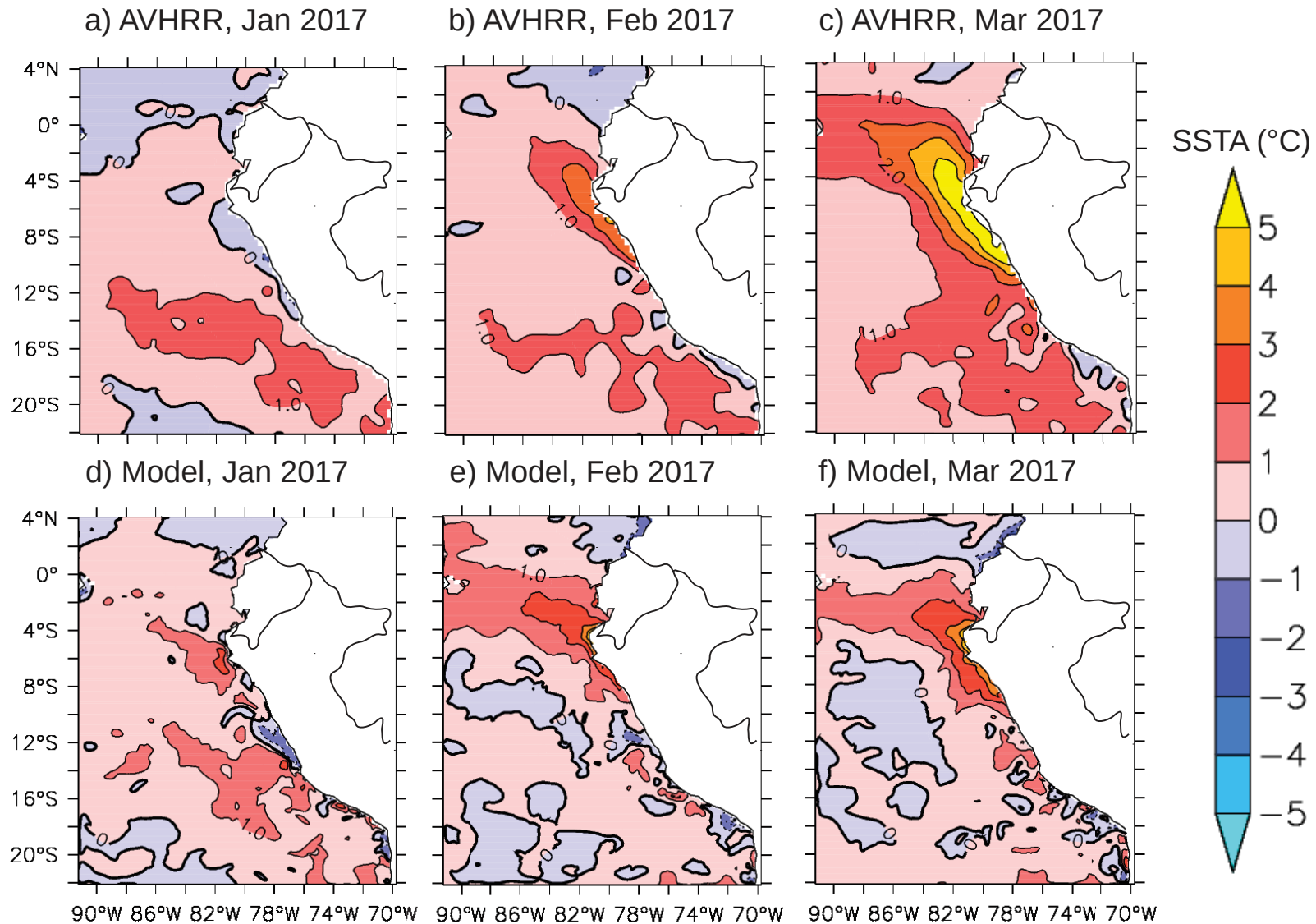
Modis Chl anomaly  
JFM2017



Hovmuller  
of surface Chl  
In 100 km  
coastal band

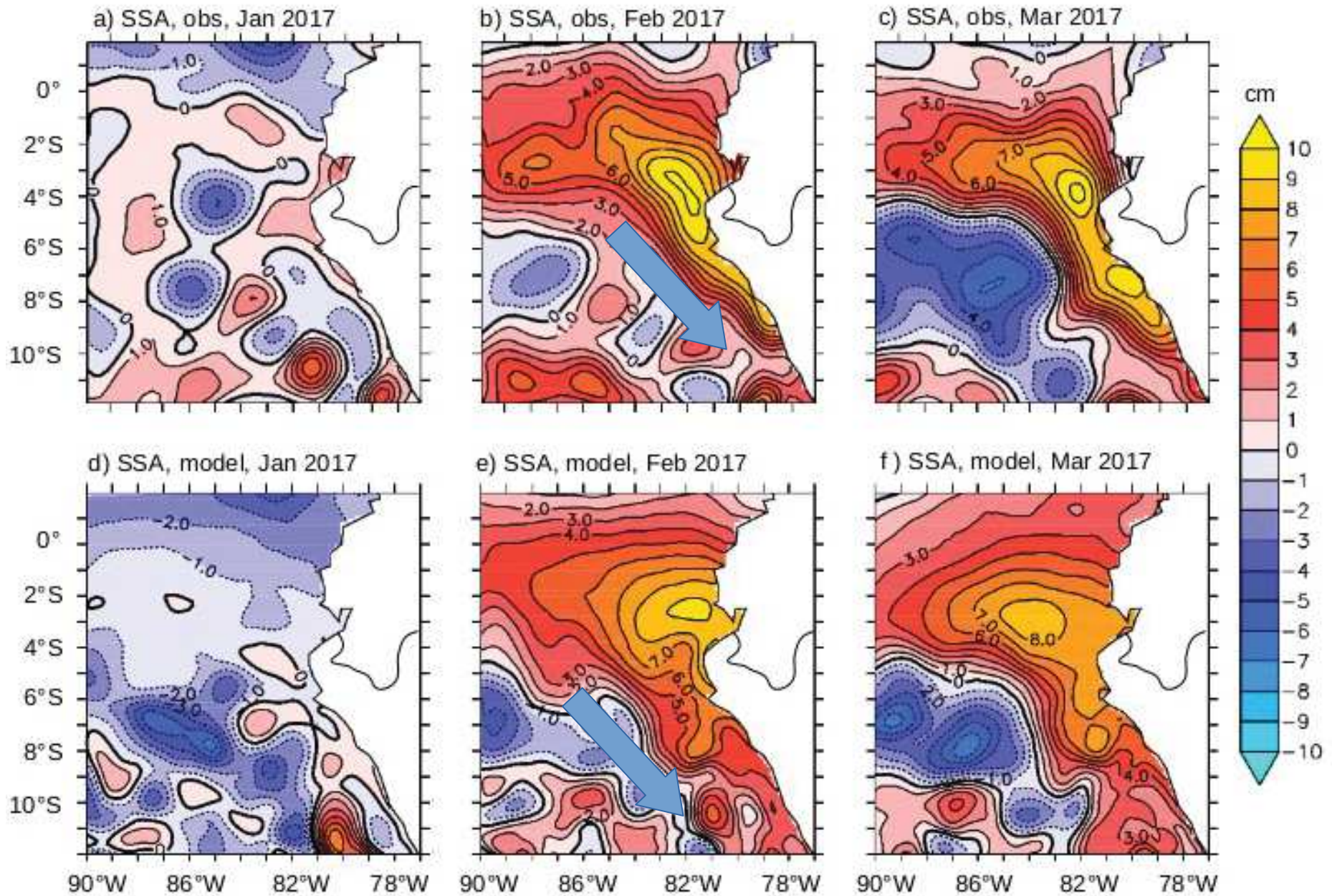


# Simulating “El Niño costero” with CROCO-PISCES:SST



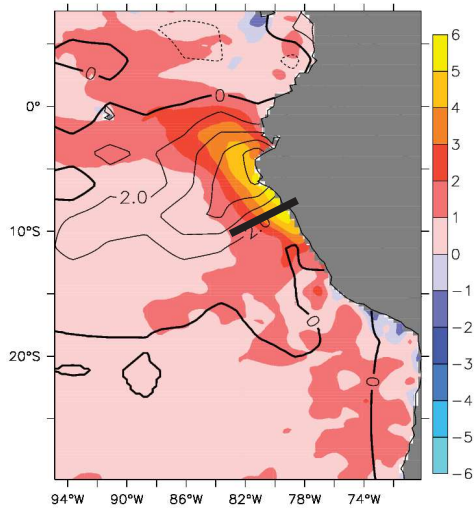


# Simulating “El Niño costero” with CROCO-PISCES:sea level

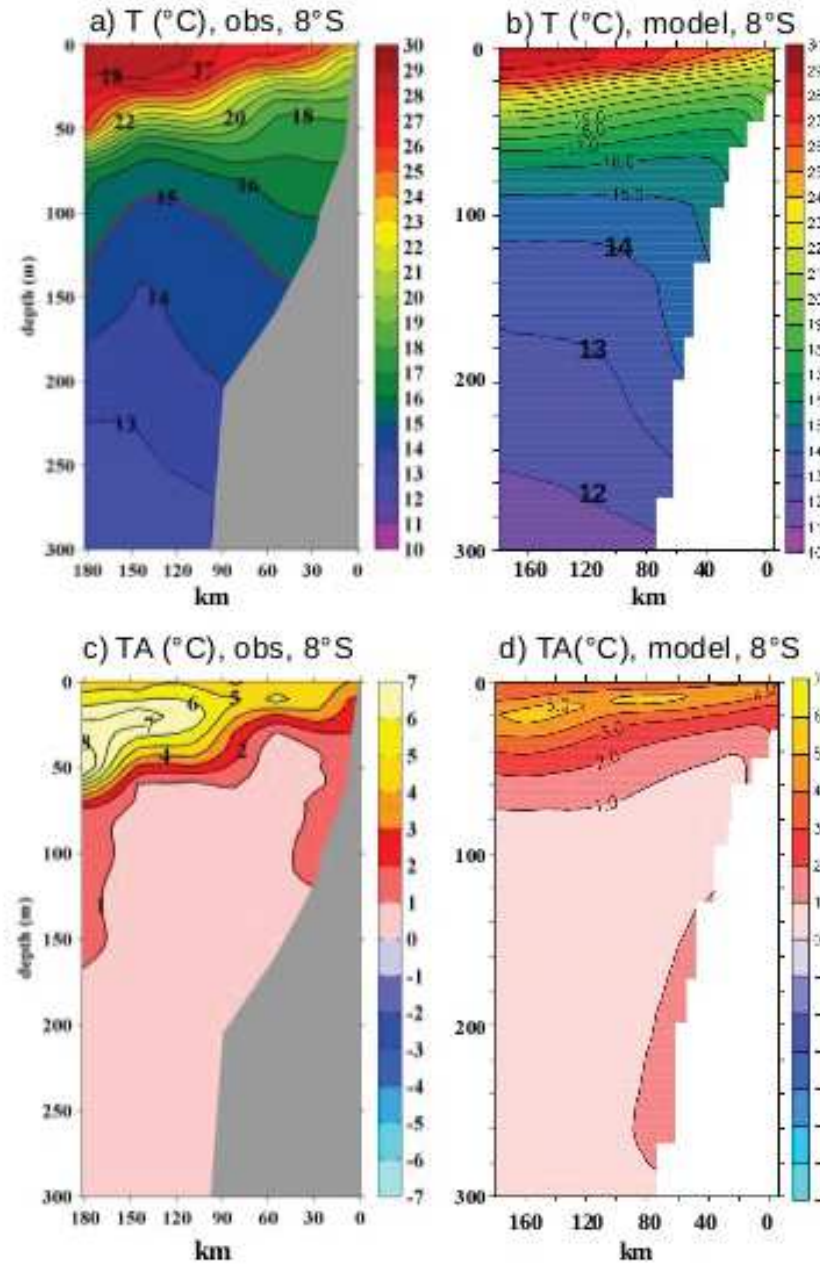


# Simulating “El Niño costero” with CROCO-PISCES: in situ temperature

March 2017



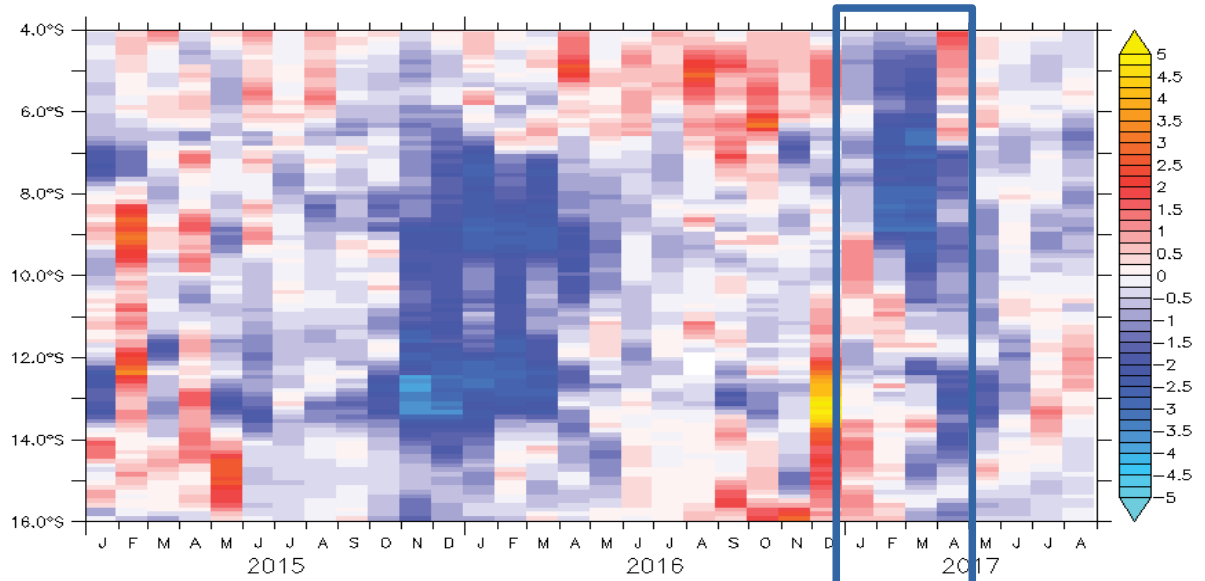
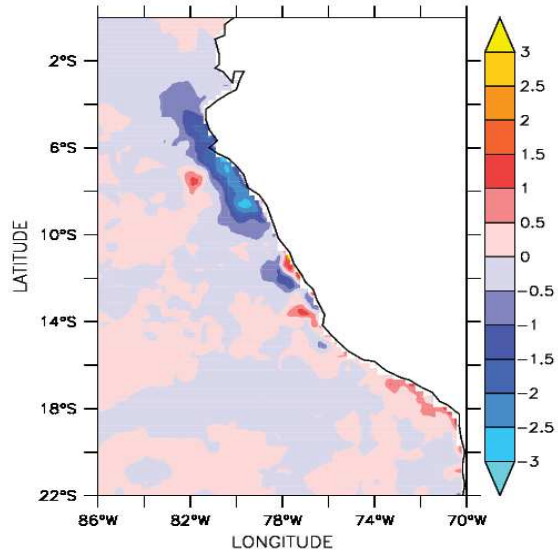
Observations



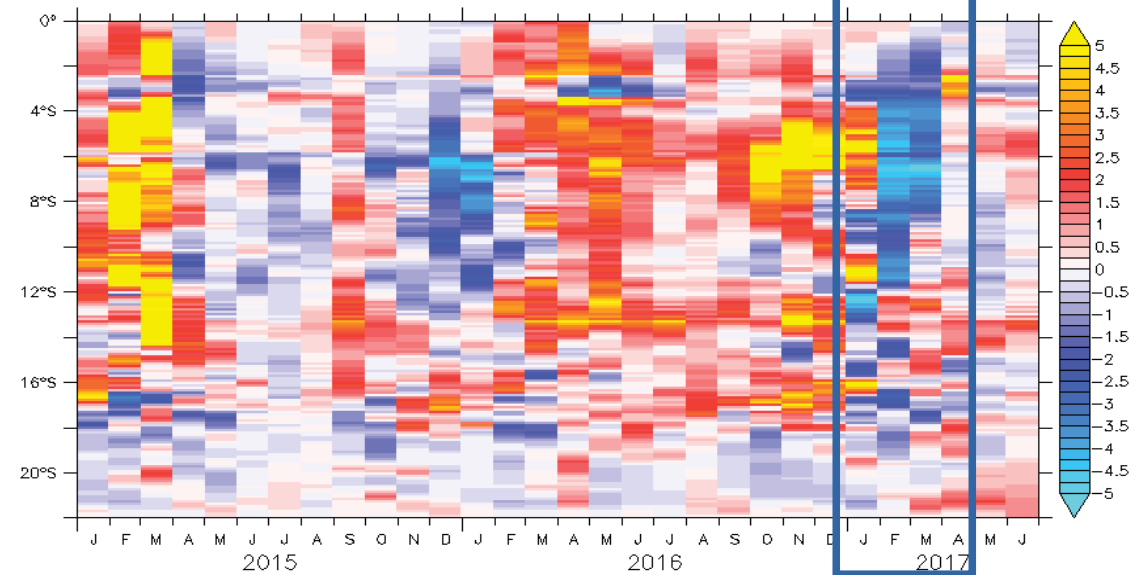
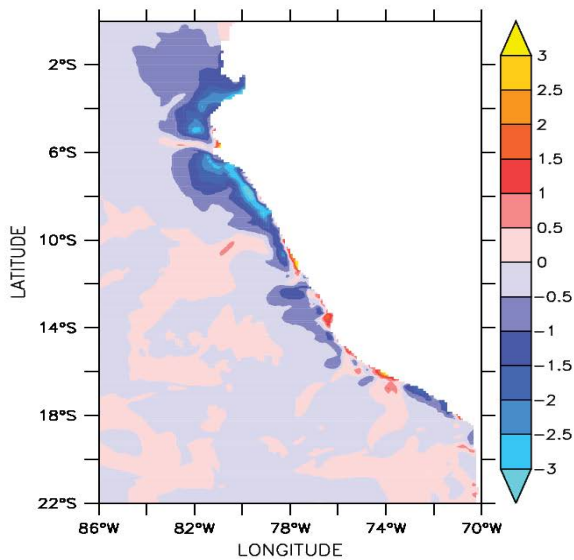
Model

# Simulating “El Niño costero” with CROCO-PISCES: surface chlorophyll

## MODIS Chl anomaly JFM2017

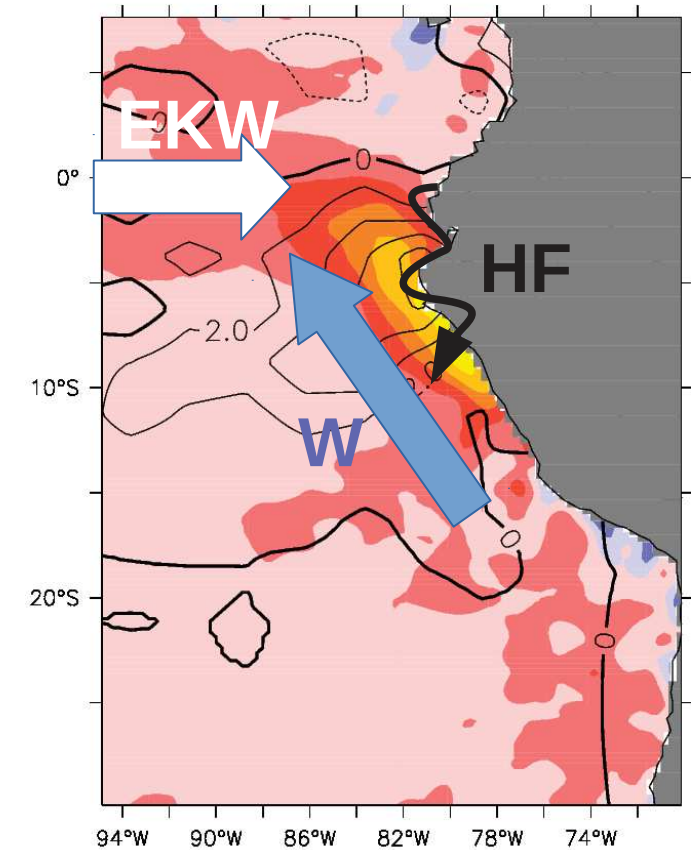


## Model Chl anomaly JFM2017



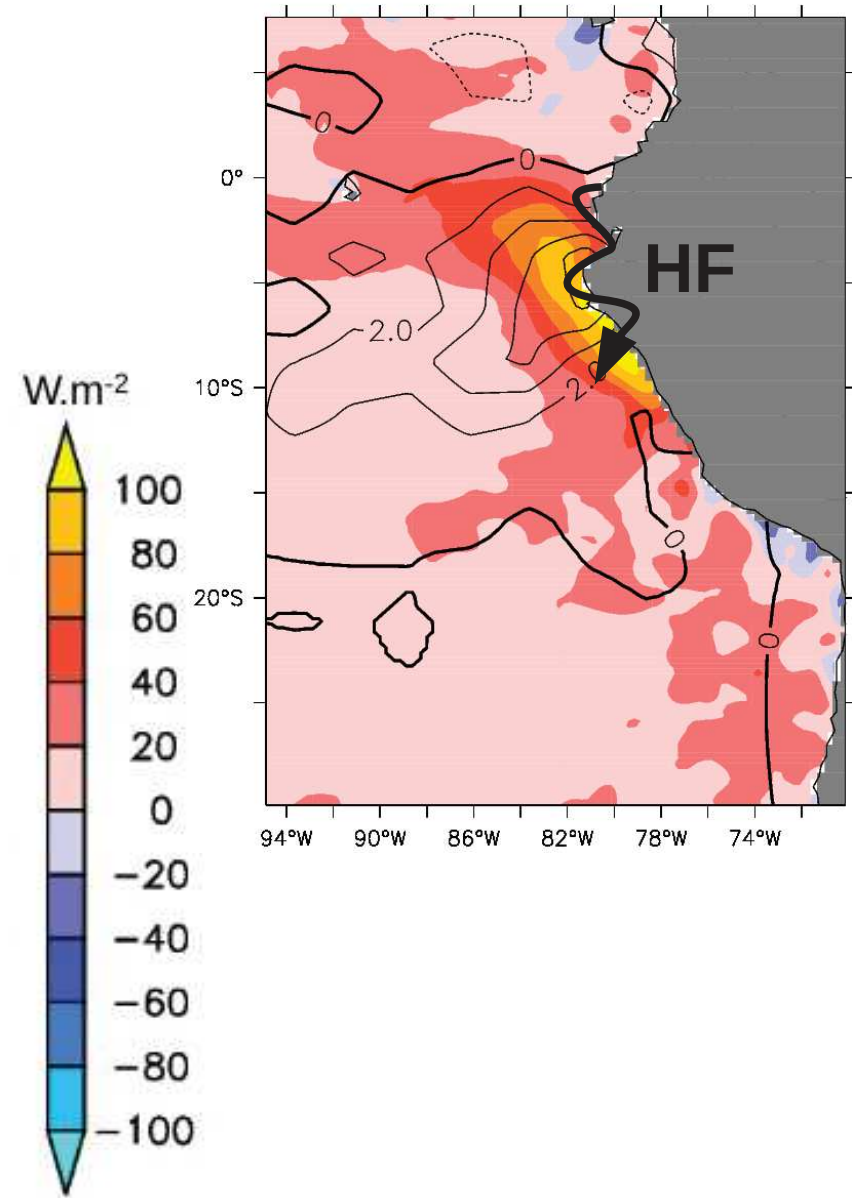
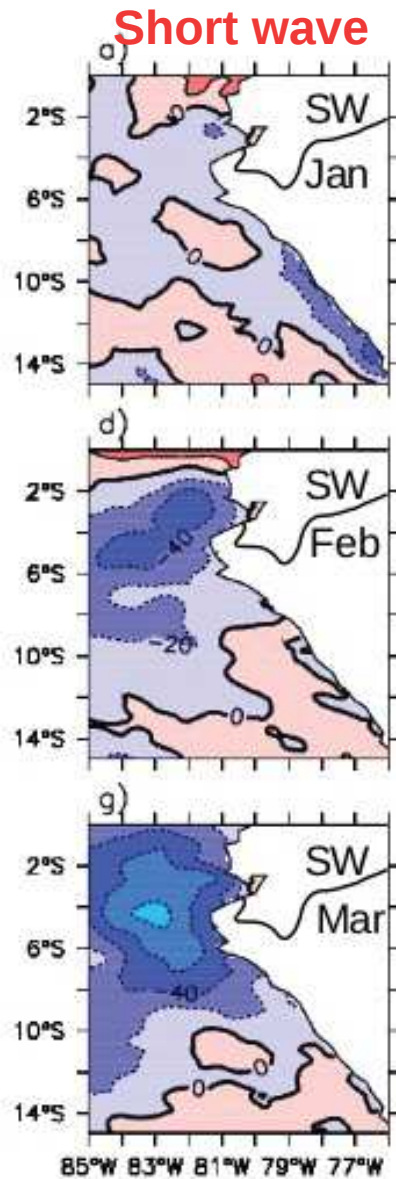
# Dynamical processes driving “El Niño costero”

- 1) what is the role of surface heat flux anomalies (HF) ?
- 2) what is the role of the wind anomaly (W)?
- 3) what is the role of the coastal wave (EKW->CW)?



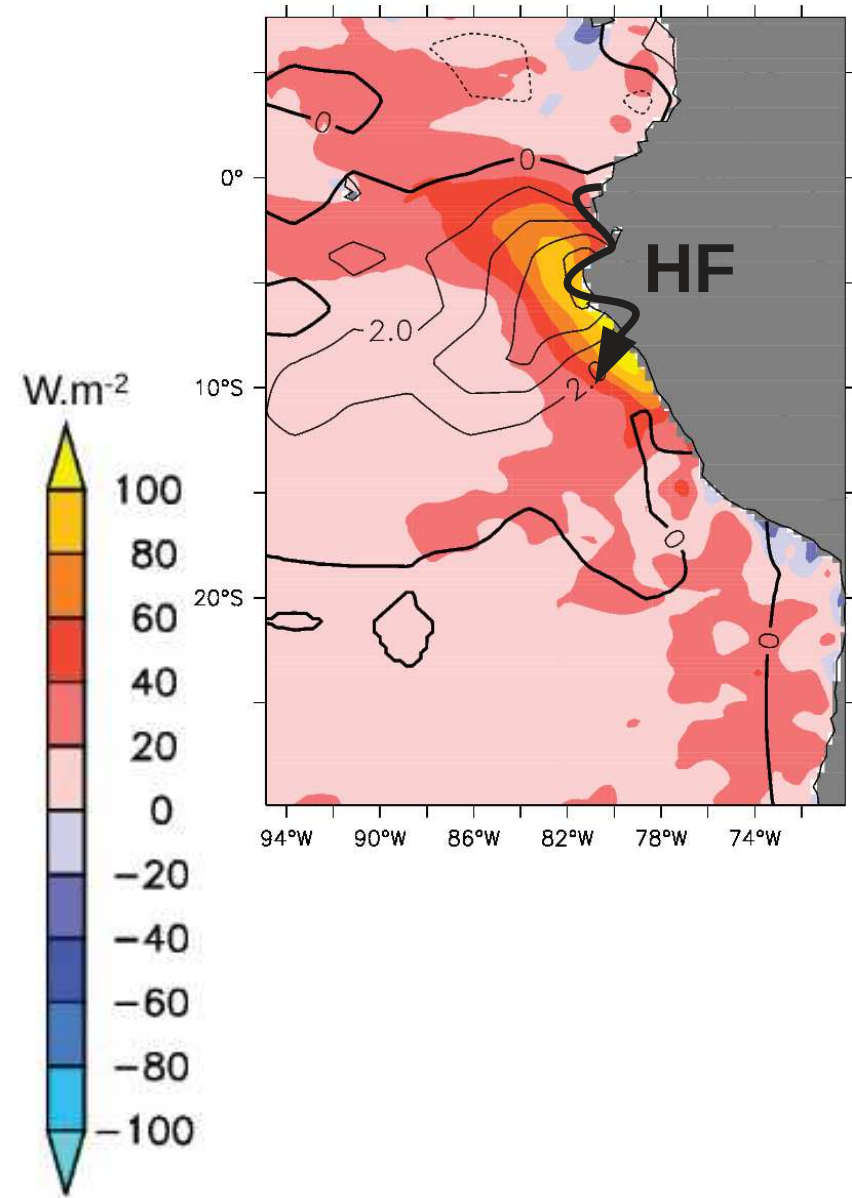
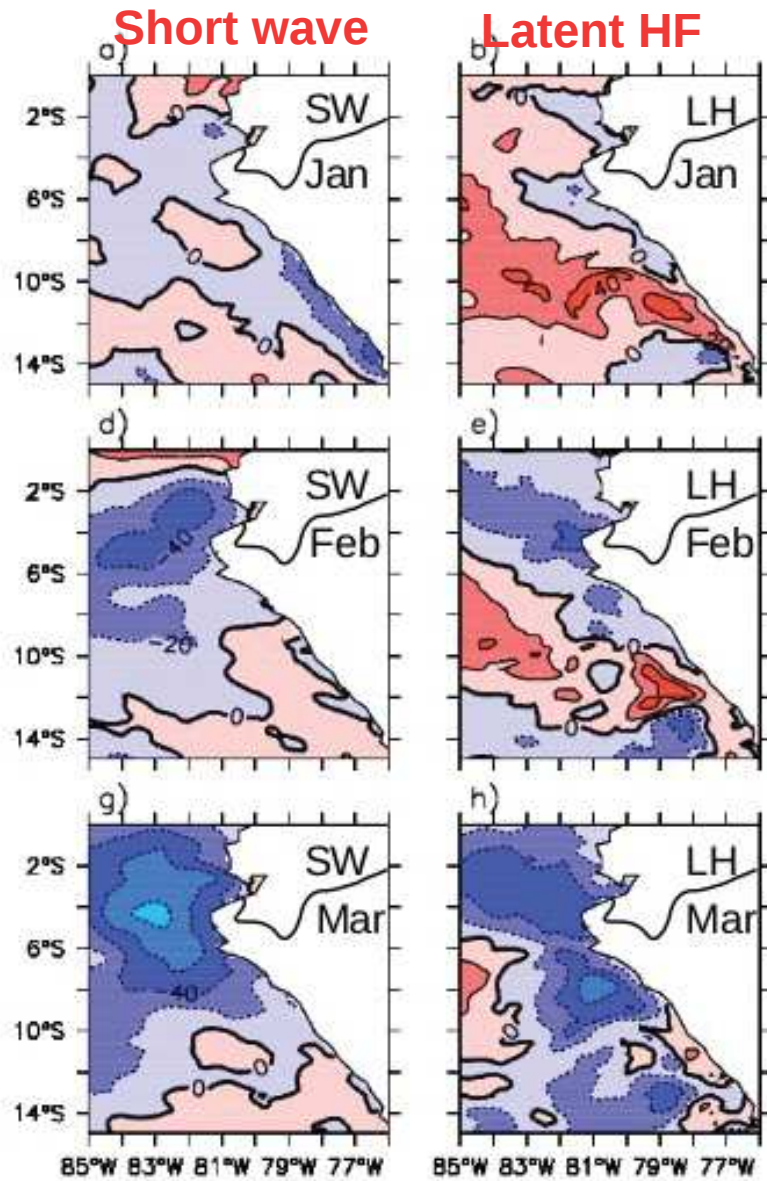
# Dynamical processes driving “El Niño costero”

- what is the role of surface heat flux anomalies ?



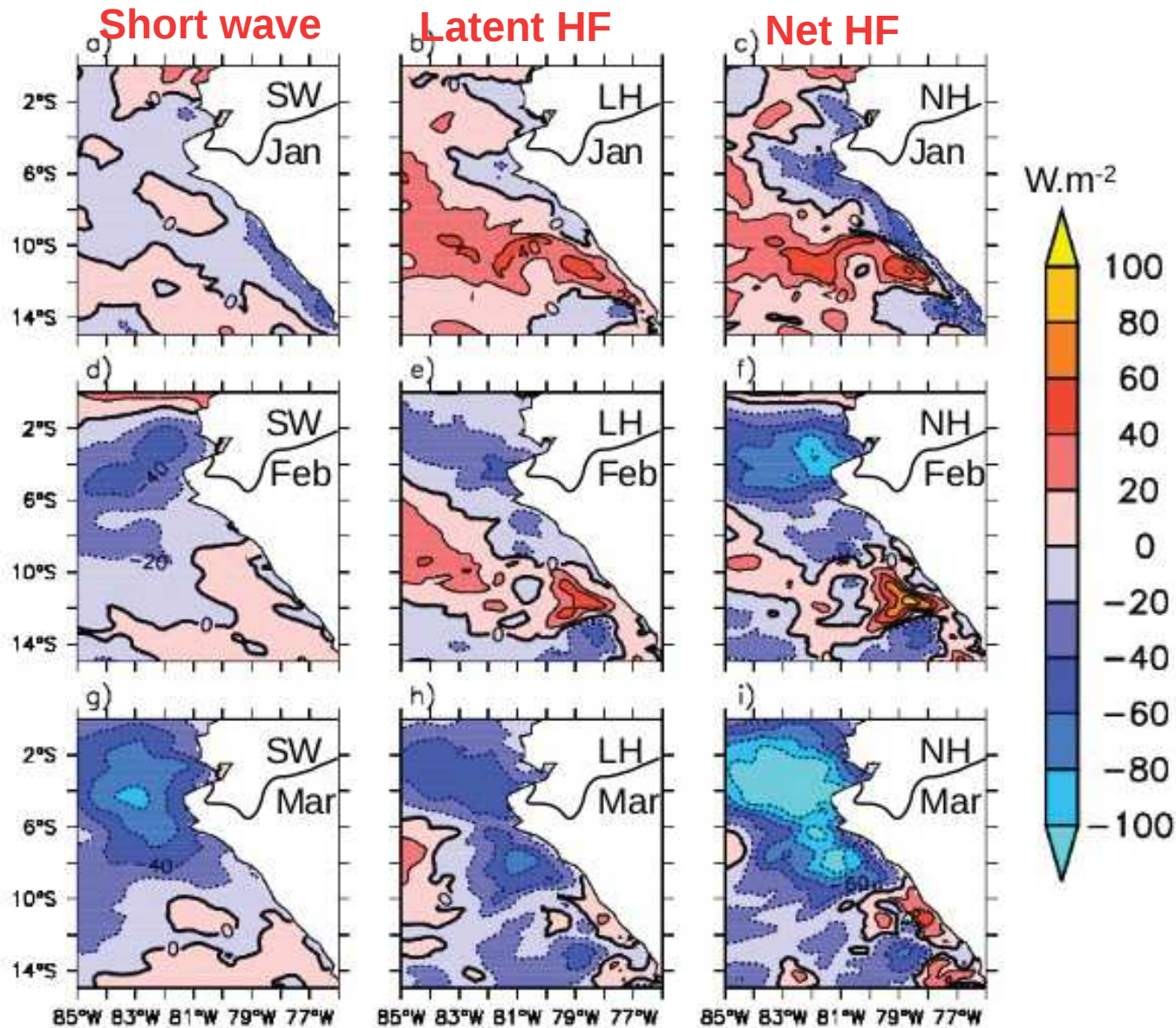
# Dynamical processes driving “El Niño costero”

- what is the role of surface heat flux anomalies ?



# Dynamical processes driving “El Niño costero”

- what is the role of surface heat flux anomalies ?



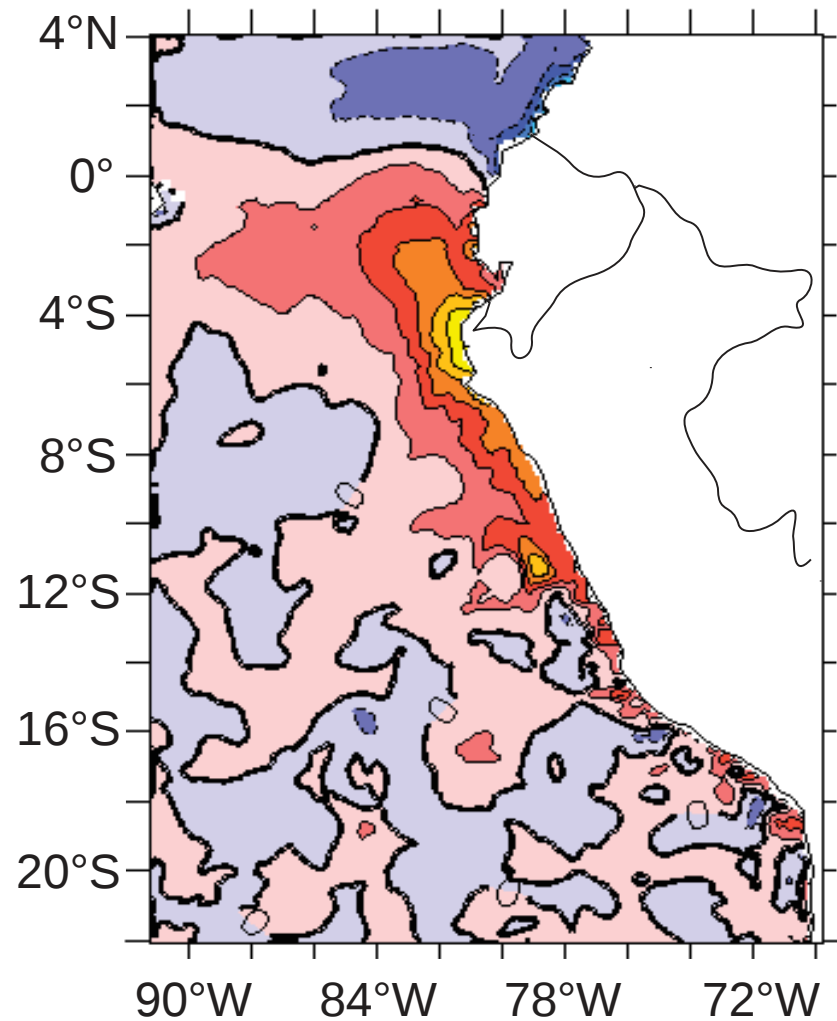
=> negative heat flux nearshore

=> not responsible for the nearshore SST anomaly

# Dynamical processes driving “El Niño costero”

- what is the role of the wind anomaly ? => run with climatological wind (Wclim)=>CR-Wclim

Effect of JFM 2017 wind anomaly  
on March SST

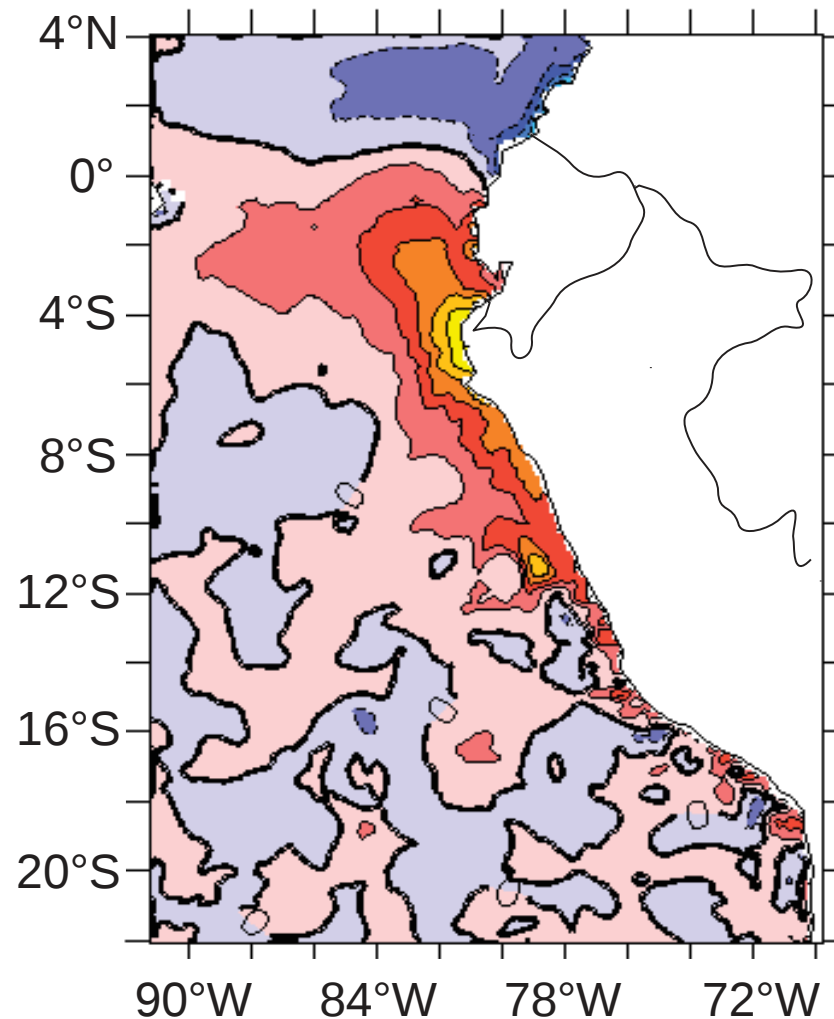




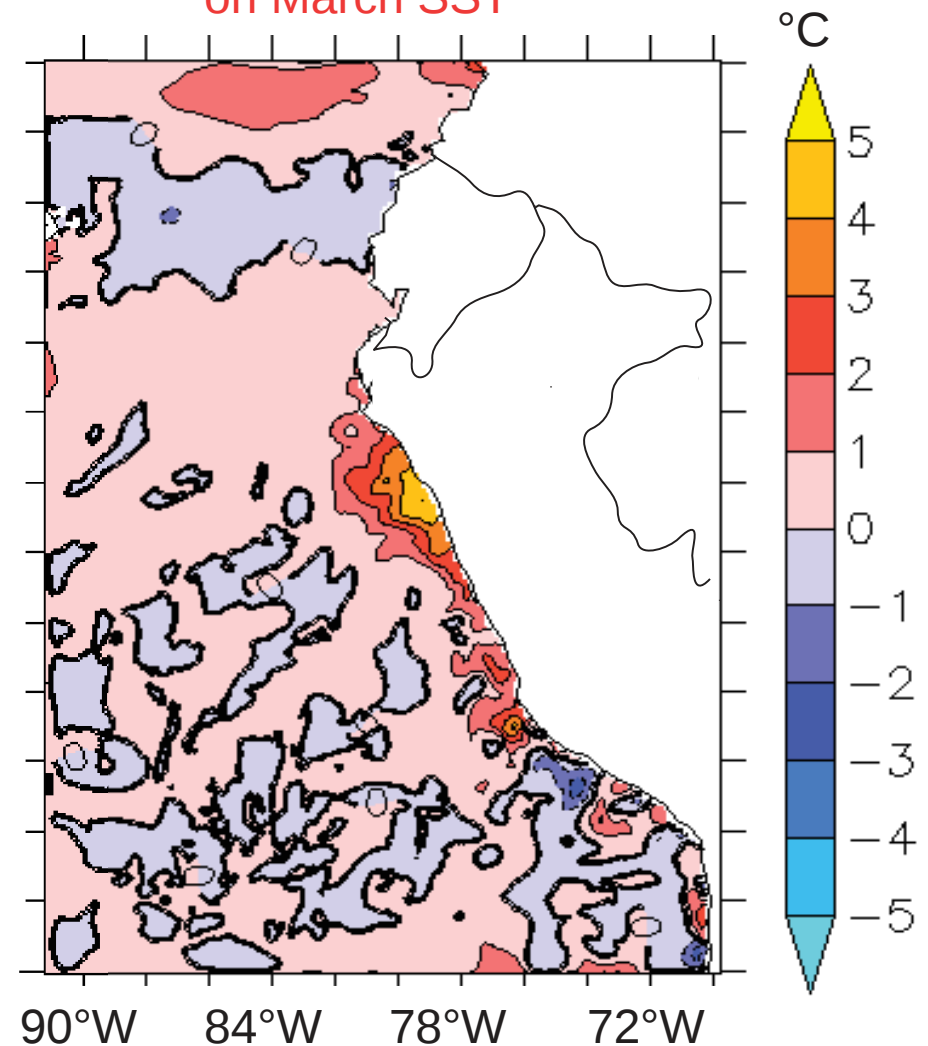
# Dynamical processes driving “El Niño costero”

- what is the role of the wind anomaly ? => run with climatological wind (Wclim) =>CR-Wclim
- what is the role of the coastal wave ? => run with clim equatorial forcing (Kclim)=>CR-Kclim

Effect of JFM 2017 wind anomaly  
on March SST



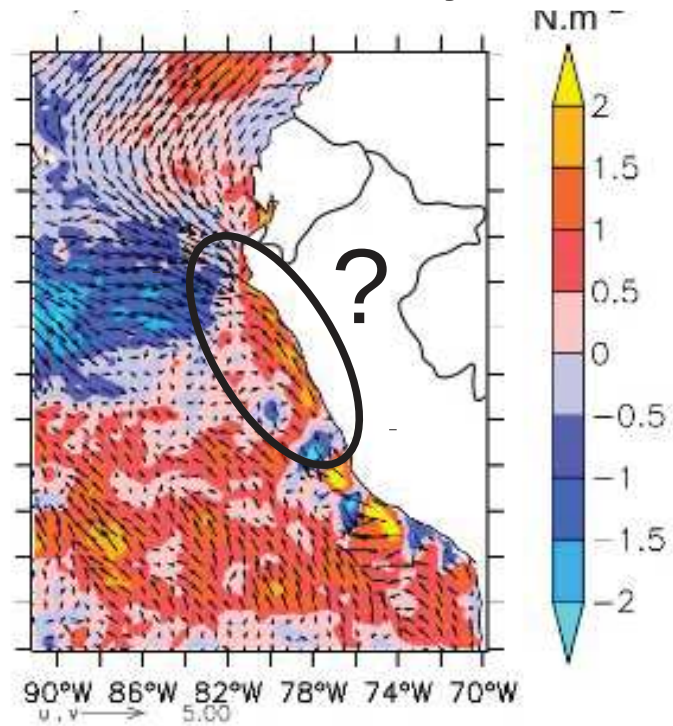
Effect of JFM2017 equatorial forcing  
on March SST



# Dynamical processes driving “El Niño costero”

- Reinforcement of the warming due to negative wind stress curl

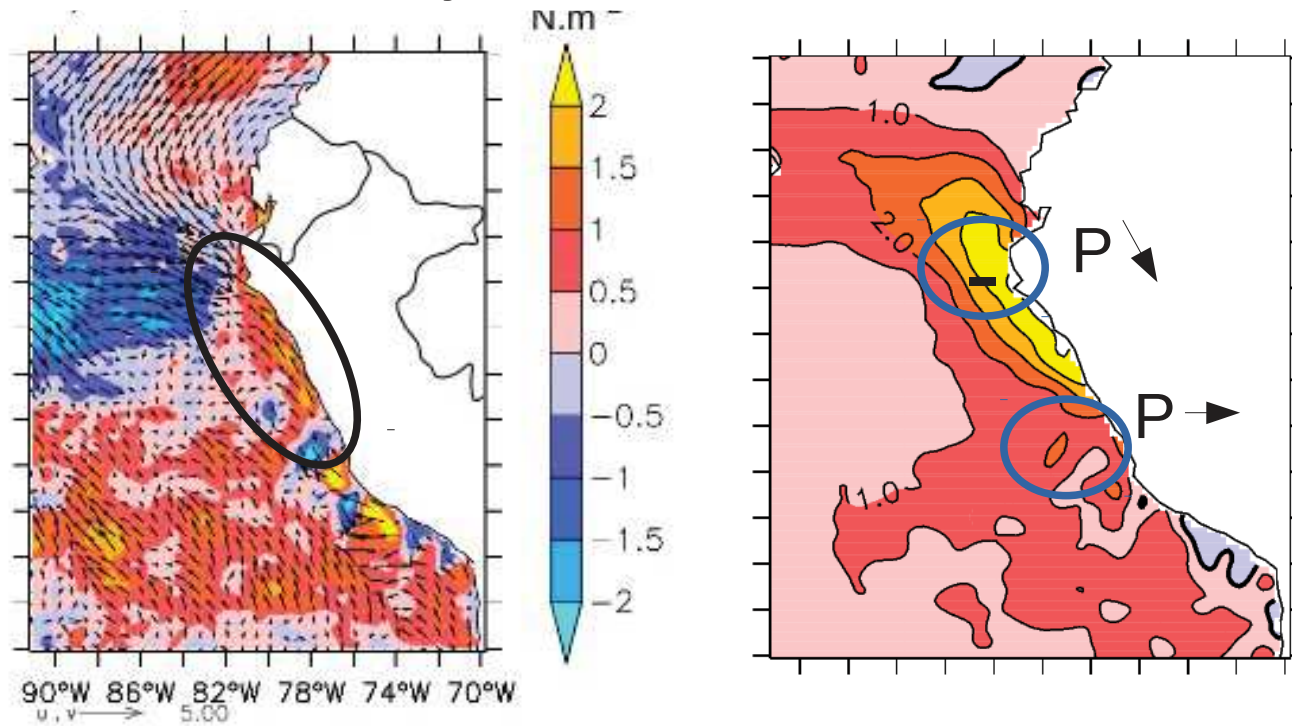
## Wind stress anomaly in March



# Dynamical processes driving “El Niño costero”

- Reinforcement of the warming due to negative wind stress curl

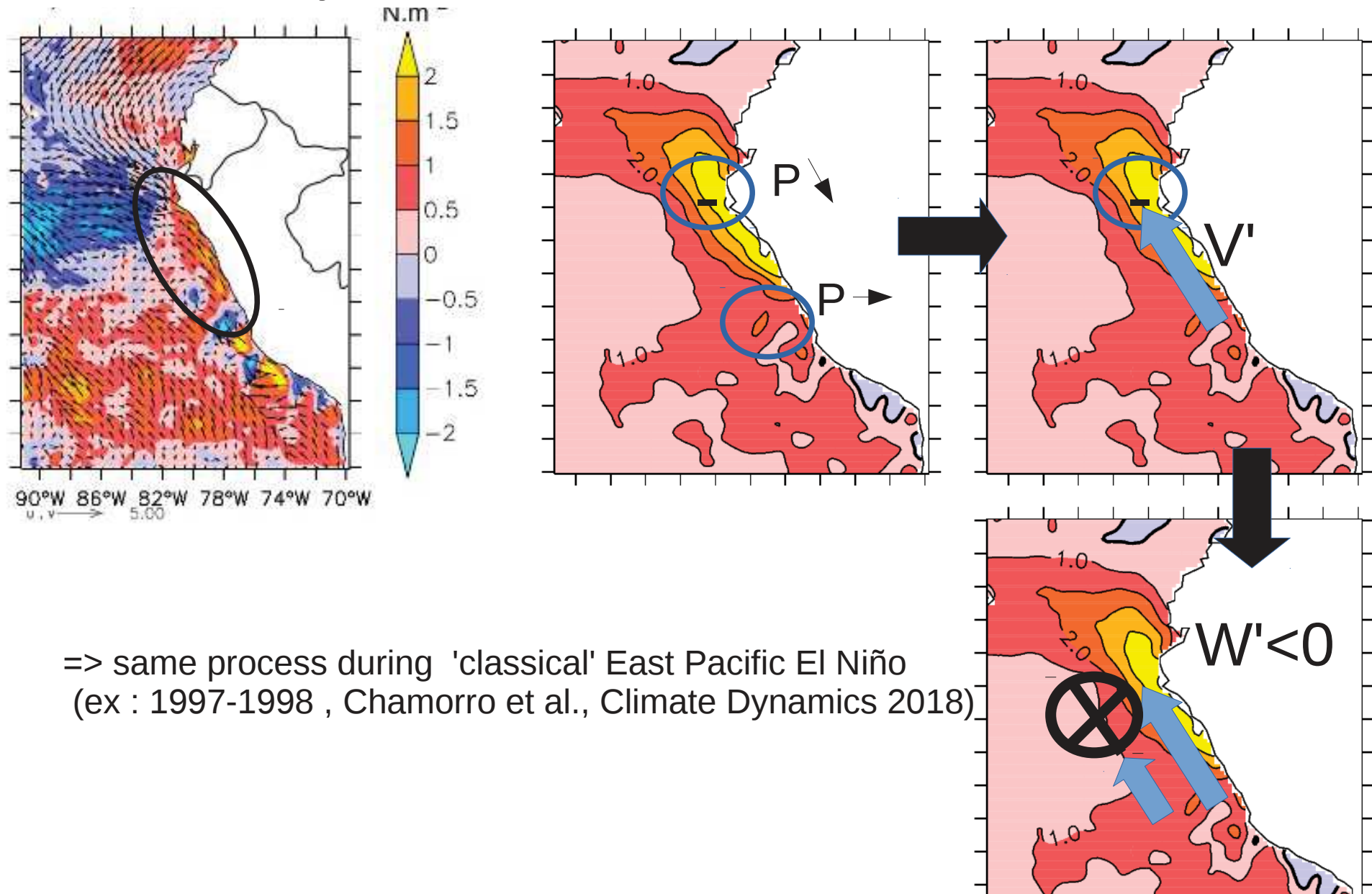
## Wind stress anomaly in March



# Dynamical processes driving “El Niño costero”

- Reinforcement of the warming due to negative wind stress curl

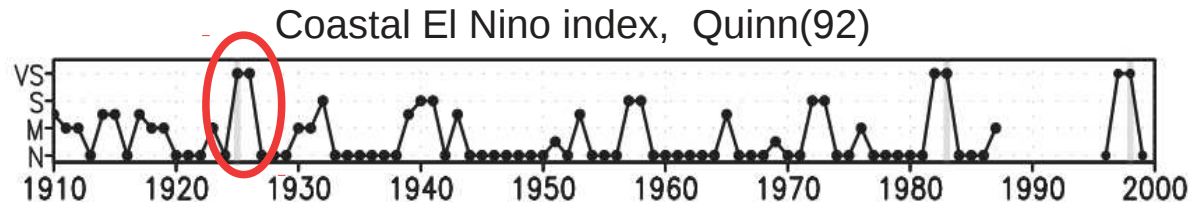
## Wind stress anomaly in March



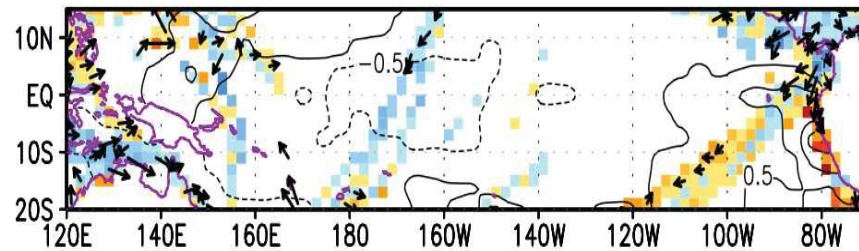
=> same process during 'classical' East Pacific El Niño  
(ex : 1997-1998 , Chamorro et al., Climate Dynamics 2018)

# Large scale forcing of “El Niño costero”

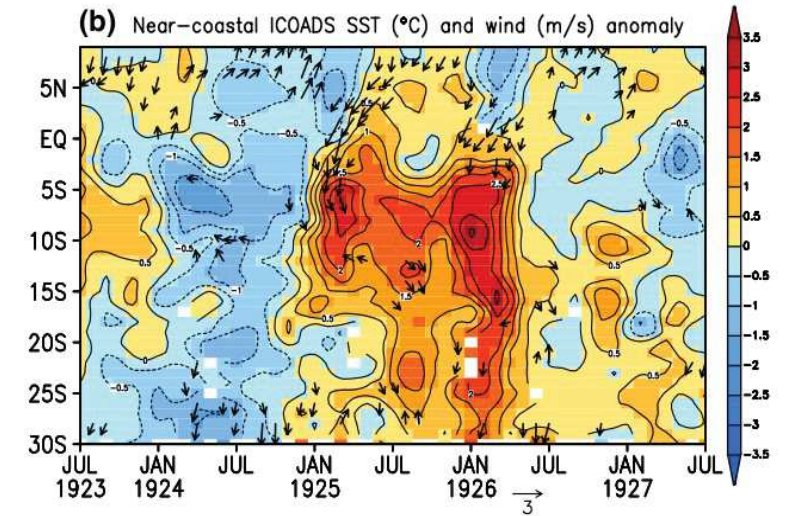
- Coastal events in 1891 and in 1925 (Takahashi and Martinez, 2017)



No SST/wind anomaly in equatorial Pacific  
(b) Feb–Apr 1925

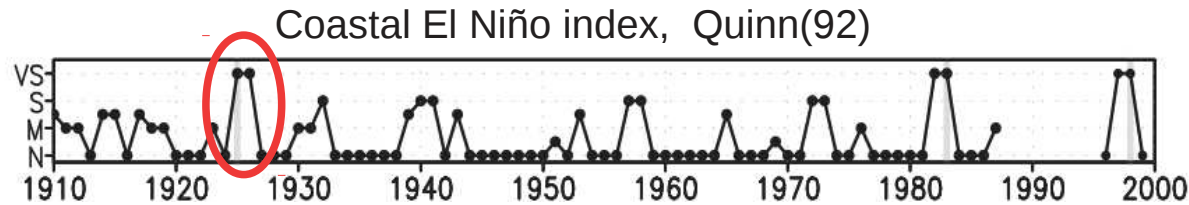


SST/wind anomaly along the coast

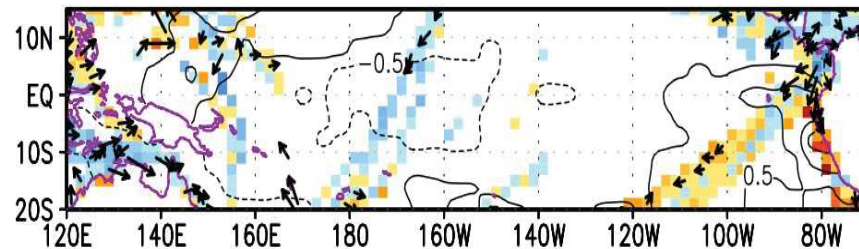


# Large scale forcing of “El Niño costero”

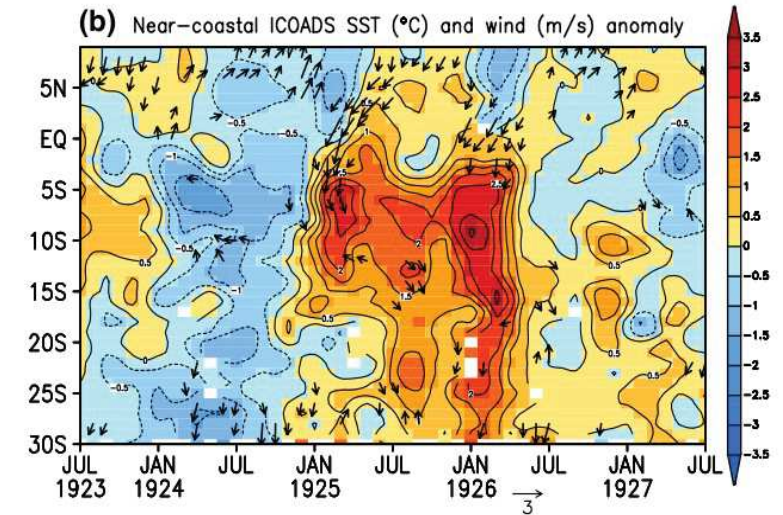
- Coastal events in 1891 and in 1925 (Takahashi and Martinez, 2017)



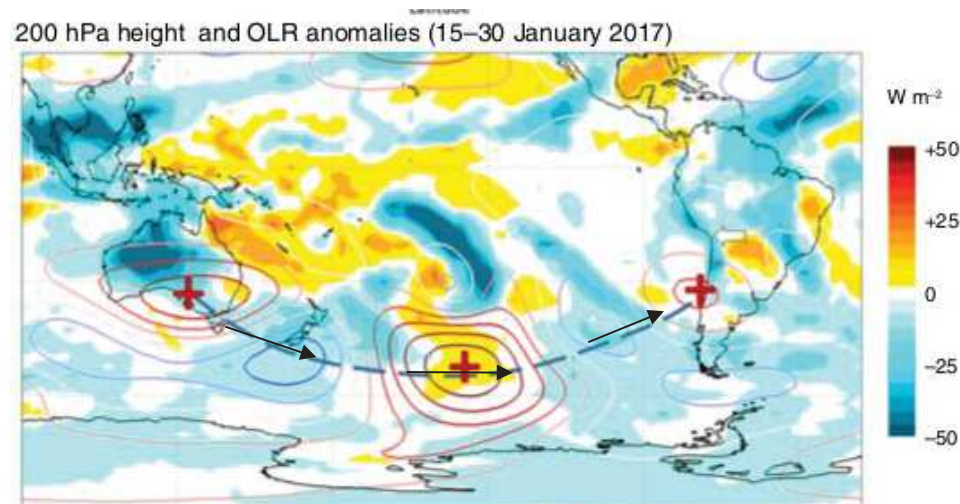
No SST/wind anomaly in equatorial Pacific  
(b) Feb–Apr 1925



SST/wind anomaly along the coast



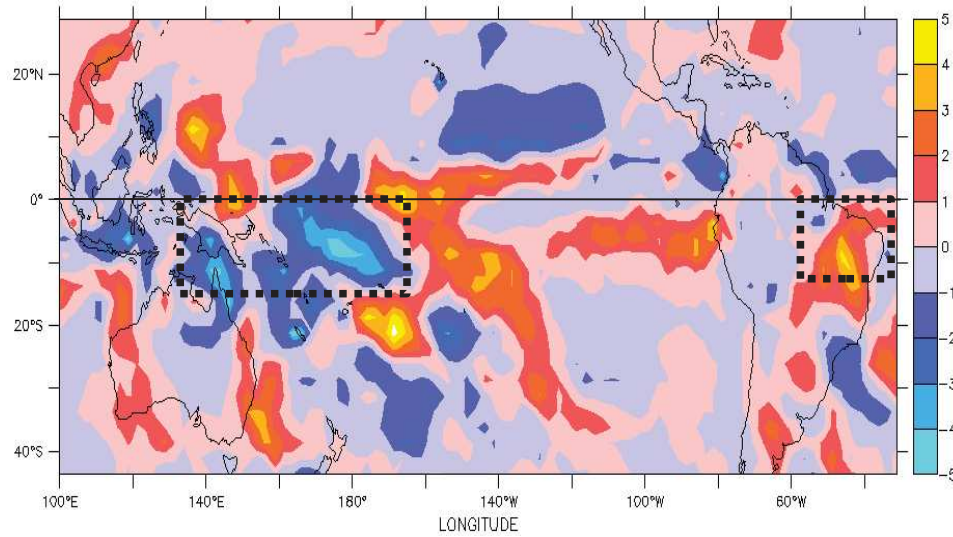
- Atmospheric teleconnection with western Pacific in January 2017 (Garreaud(2018))



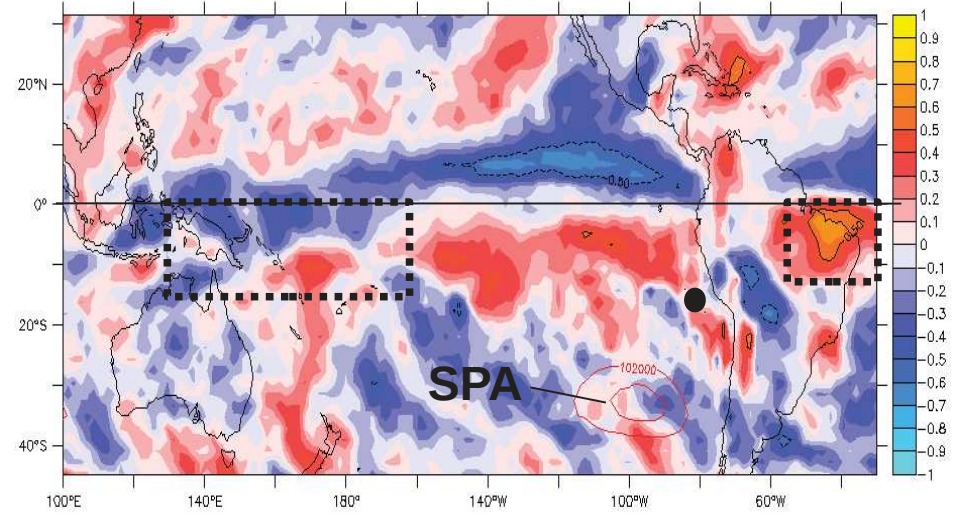
Weakening of the South Pacific anticyclone  
=> wind relaxation off Northern Peru

# Large scale forcing of “El Niño costero”

Precip anomaly in JFM2017, GPCP

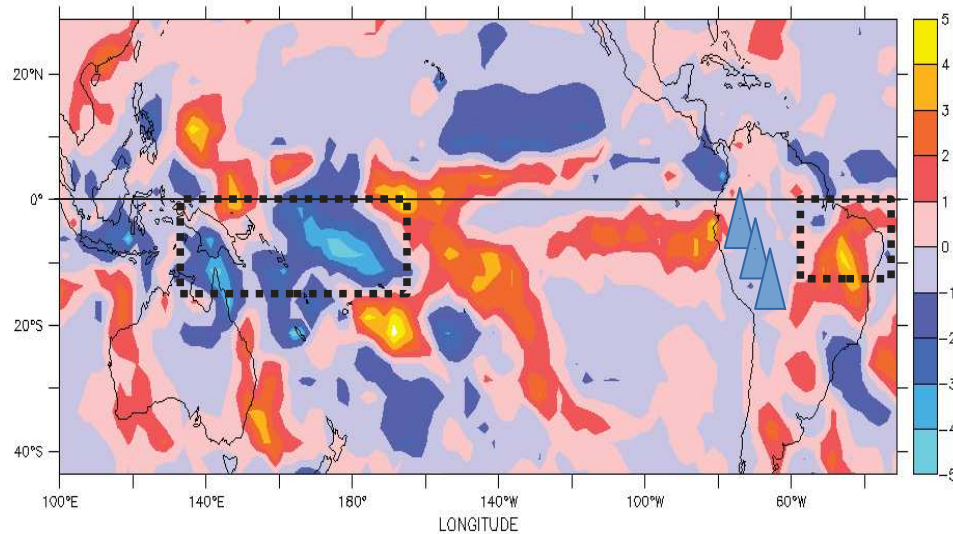


correlation precip/ poleward surface wind off Peru, JFM, NCEP2

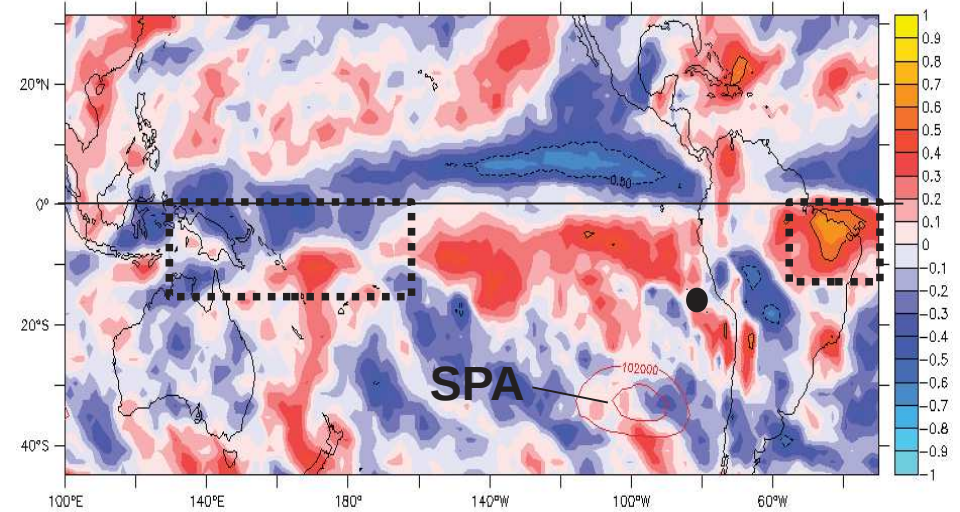


# Large scale forcing of “El Niño costero”

Precip anomaly in JFM2017, GPCP



correlation precip/ poleward surface wind off Peru, JFM, NCEP2



=> possible teleconnection between Amazonia and Eastern Pacific

(to be confirmed)



## (2) Conclusions

- El Niño 2015-2016 had a relatively weak impact on the Peru upwelling system
- Deepening of the thermocline/oxycline/nutricline but maintenance of high chlorophyll nearshore
- Role of the sediment needs to be confirmed !

## (2) Conclusions

- El Niño 2015-2016 had a relatively weak impact on the Peru upwelling system
  - Deepening of the thermocline/oxycline/nutricline but maintenance of high chlorophyll nearshore
  - Role of the sediment needs to be confirmed !
- A strong temperature anomaly in **March 2017** off Peru in spite of weak La Niña conditions
  - Surface warming is mainly due to wind relaxation but equatorial waves also play a role
  - Coastal El Niños are rare events (1891, 1925, 2017) and initiating processes not well known

## (2) Conclusions

- El Niño 2015-2016 had a relatively weak impact on the Peru upwelling system
- Deepening of the thermocline/oxycline/nutricline but maintenance of high chlorophyll nearshore
- Role of the sediment needs to be confirmed !
- A strong temperature anomaly in **March 2017** off Peru in spite of weak La Niña conditions
- Surface warming is mainly due to wind relaxation but equatorial waves also play a role
- Coastal El Niños are rare events (1891, 1925, 2017) and initiating processes not well known

### Perspectives :

- Implementation of biogeochemical sediment model in CROCO-PISCES
- Find (?) and study coastal El Niños in CMIP climate simulations to study them !

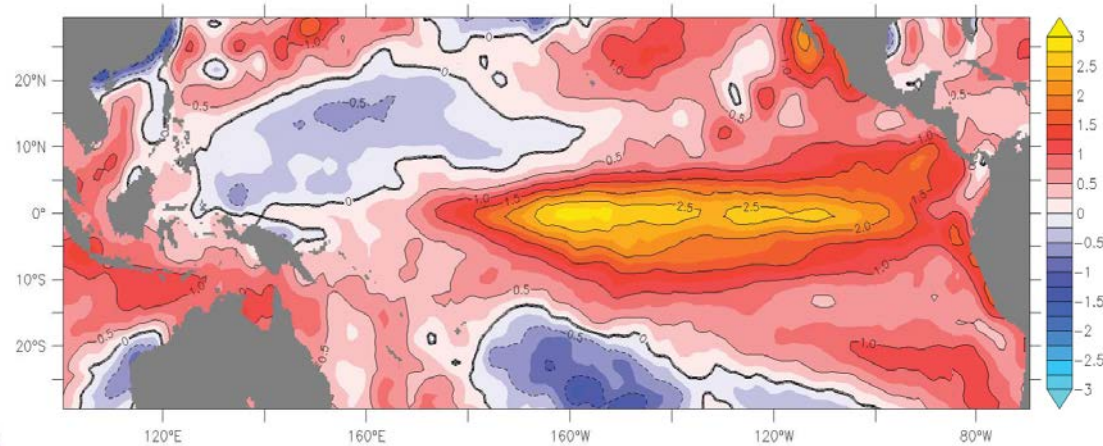


# Muchas gracias !

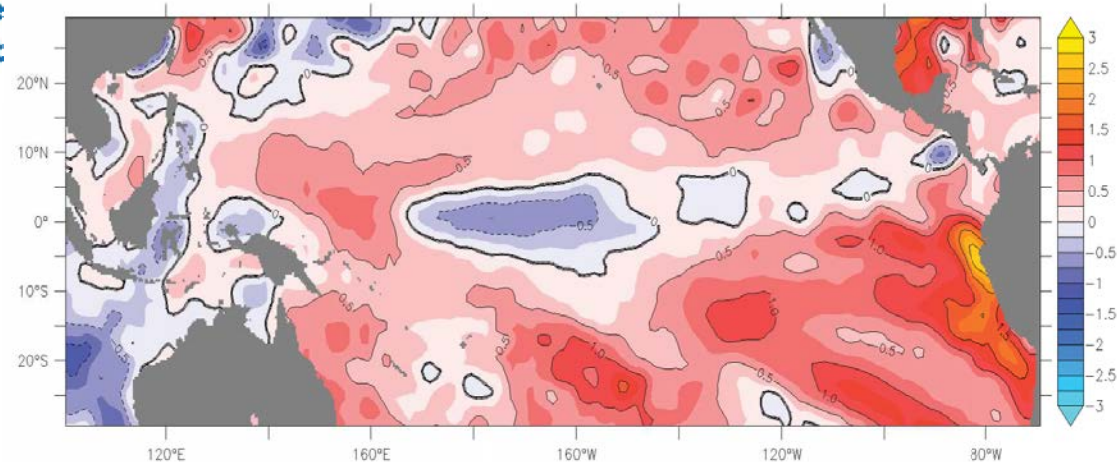


INSTITUTO DE  
INVESTIGACIÓN  
PESQUERA

SST anomaly JFM 2016



SST anomaly JFM 2017



[vincent.echevin@ird.fr](mailto:vincent.echevin@ird.fr)

**Anexo IV. Documentación elaborada para la implementación del taller de expertos “Taller de actualización del estado del conocimiento de la estructura poblacional de jurel en el Pacífico Suroriental”**

## INVITACIÓN TALLER



El Instituto de Investigación Pesquera tiene el agrado de invitar a Usted al Taller de Discusión en el marco del proyecto FIPA 20107-62: **"Actualización del estado del conocimiento de la estructura poblacional de jurel en el Pacífico suroriental"**, el cual se realizará de forma telemática los días 04 y 07 de agosto entre las 09:30 y 13:00 hrs.

Para unirse al taller debe ingresar al siguiente enlace Google Meet: [meet.google.com/uhp-tpo-iac](https://meet.google.com/uhp-tpo-iac)

Esperamos poder contar con su presencia.

R.S.V.P.: +56 41 2 920410

Talcahuano, julio de 2020



---

## Taller de discusión

### Actualización del estado del conocimiento de la estructura poblacional de jurel en el Pacífico suroriental

Proyecto FIPA 2017-62 "Dinámica poblacional de juveniles y adultos de jurel basada en modelación biofísica"

---

#### Motivación

El proyecto FIPA 2017-62 tiene como objetivo general caracterizar el hábitat y la distribución de jurel en distintas etapas del ciclo de vida y su impacto en el entendimiento de su estructura poblacional. La definición de la estructura poblacional y la identificación stocks auto-sustentados en poblaciones naturales es un tema complejo, que debe ser abordado desde una mirada multidisciplinaria para generar definiciones hacia la evaluación de stocks y el manejo pesquero.

En consecuencia, este taller se presenta como una oportunidad para revisar el estado del conocimiento en relación a la estructura espacial de la población de jurel y discutir como los resultados del presente proyecto se insertan en la discusión de las distintas hipótesis manejadas por la Organización Regional de Pesca del Pacífico Sur para el manejo integrado de la pesquería de jurel.

Este taller se estructura como una instancia participativa, donde el equipo ejecutor presentará el marco general de la problemática, incluyendo los principales resultados del proyecto FIPA 2017-62 los que darán contexto a tres etapas de participación: i) un panel de discusión abierta mediada por un moderador; ii) una instancia de identificación de fortalezas y debilidades de las metodologías presentadas hacia el entendimiento de la estructura poblacional, y; iii) una instancia propositiva de líneas de desarrollo en investigación aplicada hacia la estructura poblacional de jurel.



---

## Proyecto

### "Dinámica poblacional de juveniles y adultos de jurel basada en modelación biofísica"

**Financia: Fondo de Investigación Pesquera**

**Ejecuta: Instituto de Investigación Pesquera**

Jefe de proyecto: Sebastián Vásquez Pastene

Reporteros: Cristian Salas y Roberto San Martín

**Martes 04 y viernes 07 de agosto de 2020**

Taller telemático vía GoogleMeet

---

## Programa día 1

|                |   |
|----------------|---|
| 09:30 – 09:45: | Presentación del Taller FIPA 2017-62<br><i>Sebastián Vásquez P. (INPESCA)</i>   |
| 09:45 – 10:15: | Manejo integrado de jurel por medio de la OROP-PS: implicancias de la estructura poblacional<br><i>Aquiles Sepúlveda O. (INPESCA)</i>                 |
| 10:15 – 10:25  | PAUSA   |
| 10:25 – 11:15: | Estado del conocimiento hacia la estructura poblacional del jurel y las evidencias del proyecto FIPA 2017-62<br><i>Sebastián Vásquez P. (INPESCA)</i> |
| 11:15 – 11:30: | PAUSA   |
| 11:30 – 13:00: | Plenario y discusión: estructura poblacional del jurel. Fortalezas y debilidades para su definición.<br><i>Moderador: Sergio Núñez E. (INPESCA)</i>   |

---

## Programa día 2

|                |  |
|----------------|--|
| 09:30 – 10:00: | Resumen plenario y discusión día 1<br><i>Sebastián Vásquez P. (INPESCA)</i>  |
| 10:00 – 11:00: | Actividad participativa 1: identificación de fortalezas y debilidades en el ámbito del estudio.<br><i>Carlos González A. (INPESCA)</i>                                   |
| 11:00 – 11:15  | PAUSA  |
| 11:15 – 12:00: | Recuento y presentación de resultados actividad participativa 1<br><i>Roberto San Martín (INPESCA)</i>   |
| 12:00 – 12:45  | Actividad participativa 2: propuestas de desarrollo en investigación hacia fortalecer estudios de estructura poblacional de jurel<br><i>Carlos González A. (INPESCA)</i> |
| 12:45 – 13:00: | Cierre taller<br><i>Aquiles Sepúlveda O. (INPESCA)</i>   |

---



**Anexo V. Definición de stock hacia el manejo del jurel en el Pacífico sur: aspectos metodológicos para un manejo integrado**

Un stock puede ser definido como *grupos arbitrarios de peces con un tamaño suficientemente grande para auto-sustentarse, donde los miembros de cada grupo que comparten características similares de su historia de vida* (Hilborn & Walters, 1992). La diferencia entre stock y subpoblación fue abordada explícitamente por Marr (1957) quien consideró que *una subpoblación es una entidad genéticamente auto-sustentada (un deme) o la unidad más pequeña con capacidad de auto-sustentarse*. Por otra parte, dicho estudio definió un stock como *una población o una porción de una población donde todos sus miembros son caracterizados por similitudes inducidas por el ambiente, que no son heredables, y que pueden incluir a miembros de varias o diferentes subpoblaciones*. Sin embargo, un stock también puede ser considerado una unidad de manejo o de producción pesquera, la cual debe ser auto-sustentable en el tiempo (Larkin, 1972). Según lo sugerido por Begg & Waldman (1999), la definición moderna de un stock considera *la integridad genética, reconociendo el número de unidades poblacionales auto-reclutadas sin inter-conectividad de individuos dentro de una población explotada* (Ovenden, 1990). Según esta definición, en esencia la definición de stock describe las características de las unidades asumidas homogéneas para propósitos particulares de manejo.

A menudo los términos 'stock' y 'población' son utilizados indistintamente, debido a la evolución de sus definiciones y a los avances tecnológicos. Independiente de la definición precisa y de sus fundamentos biológicos, el concepto de stock realmente tiene que ver con la interacción entre una especie explotada y su administración (Begg & Waldman, 1999). Así, el concepto de stock o unidad de stock surge debido a la necesidad de definir grupos discretos de peces cuya dinámica interna sea evaluable con énfasis en definiciones prácticas basadas en características de la pesquería (Cadrin & Secor, 2009; Cope & Punt, 2009) y en la homogeneidad de atributos demográficos (Waples et al., 2008). El sentido práctico del manejo pesquero ha llevado a que esta naturaleza de la definición persista en el tiempo. Por ejemplo, la FAO define el stock como *un subconjunto de una especie que tiene los mismos parámetros de crecimiento y mortalidad, y que habitan un área geográfica particular* (FAO, 1998). Además, debido a que tanto los modelos stock-recluta como los de excedentes productivos se basan en teorías de renovación y reemplazo poblacional, es inevitable que la unidad de stock y la de población biológica (grupo discreto auto-sustentable sensu Marr, 1957) sean consideradas como una misma (Waldman, 2005).

Los parámetros utilizados en evaluación de stock incluyen: fecundidad, tasa de reproducción, reclutamiento, tasas de inmigración/emigración, estructura de edad, estructura de tamaños, tasa de crecimiento, tasa de mortalidad natural, como también tasa de mortalidad por pesca, capturabilidad y accesibilidad. Como tal, un stock no se limita a definiciones biológicas estrictas (Brown *et al.*, 1987), y el concepto de stock yace en la intersección entre la organización biológica y las actividades humanas (Secor, 1999).

De esta forma, la definición de stock o estructura poblacional resulta sensible para el manejo pesquero, y esfuerzos deben ser dedicados al levantamiento de información que la sustente para evitar medidas de manejo erróneas e inefectivas. Existen muchos ejemplos en los cuales altos niveles de explotación, combinados con un manejo pesquero inefectivo han llevado al colapso de stocks pesqueros (ver Begg & Waldman, 1999 para detalles). Dicho colapso puede resultar en una pérdida importante del pool genético de una especie (Nelson & Soulé, 1987; Smith *et al.*, 1991), que es una consideración en la aproximación precautoria para pesquerías (ICES, 1997). El desconocimiento de la estructura del stock en el manejo pesquero también puede conducir a cambios significativos en las características biológicas de una especie (Altukhov, 1981; Ricker, 1981 *fide* Begg & Waldman, 1999).

La identificación de stocks o unidades poblacionales en peces puede ser simple y cualitativa, como lo es en algunas poblaciones anádromas que habitan un río en particular; o altamente compleja técnica y cuantitativamente requiriendo técnicas de laboratorio y procedimientos estadísticos, para especies que involucran un amplio rango geográfico con un número elevado de stocks y donde las diferencias entre ellos son poco marcadas. Los stocks son agrupaciones taxonómicas útiles en la medida en que son importantes para algún propósito explícito de manejo y su definición puede evolucionar en conjunto con las medidas de manejo, y podrían ser revisitadas cuando surja la necesidad o cuando estén disponibles tecnologías innovadoras (Begg & Waldman, 1999).

Los complejos patrones espaciales simpátricos de muchas poblaciones marinas presentan desafíos hacia la definición de la estructura de los stocks, los cuales involucran la aplicación de

tecnologías innovadoras y aproximaciones interdisciplinarias que den cuenta de esta heterogeneidad espacial (Conover et al. 2006). Es precisa la adopción de nuevas convenciones en el muestreo de poblaciones de peces, monitoreo de pesquerías, la modelación poblacional y finalmente el manejo de pesquerías para dar cuenta de nuevas perspectivas sobre la estructura poblacional. En consecuencia, las consideraciones de la ciencia y el manejo pesquero se han ampliado considerablemente desde objetivos tradicionales basadas en el rendimiento pesquero hacia aquellos que incorporan estabilidad y resiliencia, consideraciones ecosistémicas y retroalimentación entre pesquería y manejo (manejo adaptativo) (Secor, 2014). En este marco de referencia, estructuras y modelos flexibles pueden incorporar múltiples escalas y fuentes de información para abordar como la dinámica de la población pesquera es afectada por la diversidad de comportamientos espaciales y el rol del ambiente en esta conformación (Kerr & Goethel, 2014).

La visión que aún es ampliamente sostenida es que los stocks son poblaciones reproductivamente aisladas con sus propias dinámicas internas, las cuales pueden ser identificadas por marcadores moleculares de linaje (Ihssen *et al.*, 1981). En la actualidad existen marcadores moleculares que sustentan varias escalas de inferencia: filogenética, evolutiva, de linaje, deriva genética, separación alopátrica reciente y selección generacional (Nielsen *et al.*, 2012). Sin embargo, los supuestos del uso de estos marcadores para diferenciar poblaciones marinas permanecen aun poco verificados (ver Secor *et al.*, 2014 para detalles). La carencia de un marcador molecular para determinar el aislamiento reproductivo (Waples et al., 2008) ha llevado a la conformación de aproximaciones interdisciplinarias donde los avances en marcadores moleculares son utilizados en conjunto con técnicas no moleculares para identificar stocks y unidades poblacionales. Siguiendo a Secor et al., 2014, el estado del arte en esta materia incluye los siguientes aspectos: i) propiedades fenotípicas, demográficas y marcadores naturales de los stocks; ii) análisis de marcaje, telemetría y estadísticas de captura, y; iii) oceanografía y modelos de movimiento y conectividad. Cuando se integran, los enfoques múltiples proporcionan un marco del peso de la evidencia en la identificación práctica y el delineamiento de la estructura de los stocks o unidades poblacionales (Cadrin *et al.*, 2005). A continuación se entregan brevemente detalles de las técnicas recomendadas para una estrategia moderna e integradora de identificación de la estructura poblacional en peces.

## **1. Fenotípicas**

### *1.1. Morfometría*

Los patrones de variación morfométrica en peces puede ser un indicador de diferencias en el crecimiento y tasas de maduración debido a que la forma corporal es producto de la ontogenia (Stransky, 2013). Dos categorías principales se reconocen en análisis morfométricos, la primera es la que analiza la distancia lineal discreta entre puntos de referencia corporal y la relación geométrica entre puntos; y la segunda la que se orientan en el estudio de las formas del perímetro corporal (ver Cadrin, 2014 para detalles).

### *1.2. Marcas de crecimiento en estructuras calcificadas*

En peces las estructuras calcificadas como escamas, otolitos y estructuras calcáreas generalmente crecen a una tasa proporcional al crecimiento somático. Dependiendo de las estructuras, se depositan marcas secuenciales anuales, estacionales y diarias permitiendo la extracción de información cronológica para fases de específicas de la historia de vida (Panfili *et al.*, 2002). Marcas del crecimiento han sido utilizadas para resolver una diversidad de preguntas relacionadas con la estructura de stocks: i) discriminación stocks adultos mediante distintas trayectorias de crecimiento (e.g. Brophy & Danilowicz, 2002); ii) discriminación de peces silvestres de peces de cultivo (Uglen *et al.*, 2011); iii) reconstrucción de origen larval y trayectorias de dispersión (Bruce *et al.*, 2001).

### *1.3. Merística*

Caracteres merísticos como las espinas o rayos de las aletas, son estructuras contables que se desarrollan de forma serial en peces (Waldman, 2005). Merística tradicionalmente a estructuras correspondientes a segmentos del cuerpo como el número de aletas o vertebras. Son embargo, el término es aplicado actualmente a cualquier estructura contable como el número de escamas, arcos branquiales, branquiespinas o poros cefálicos (Helfman *et al.*, 1997). Las merísticas pueden ser internas o externas, pero en ambos casos deben ser claramente definidos y cuantificados, lo cual los convierte en caracteres útiles para comparar especímenes. Los caracteres merísticos son útiles para la discriminación de stocks debido a que pueden indicar que el desarrollo temprano ocurrió en áreas separadas o bajo condiciones diferentes. Los conteos merísticos son

parcialmente determinados por la genética y parcialmente por las condiciones ambientales durante el desarrollo de huevos, larvas y juveniles (Swain *et al.*, 2005).

## 2. Demográficas

### 2.1. *Parámetros de la historia de vida*

Rasgos de la historia de vida resultan promisorios para la identificación de stocks debido a que pueden estar directamente relacionados a procesos genéticos. La selección natural de genes requiere que estos rasgos manifiesten variaciones entre poblaciones que sean heredables a través de las generaciones y que estén correlacionadas con el éxito reproductivo (e.g. crecimiento y reproducción) (Wright & Trippel, 2009). La relación entre el aislamiento reproductivo, la estructura genética, y la diversidad fenotípica no siempre resulta evidente, y aunque un rasgo de la historia de vida sea heredable, no siempre es detectable por la estructura genética. Las condiciones ambientales pueden directamente afectar a las tasas de crecimiento, productividad reproductiva y la estacionalidad reproductiva (Keller *et al.*, 2012). Dentro de los parámetros de historia de vida que deben ser analizados para diferenciar stocks se encuentran: i) estacionalidad de la distribución y abundancia (Begg, 2005); ii) consideraciones de todo el ciclo de vida hacia la estructuración espacial ontogenética (Frisk *et al.*, 2013); iii) existencia de contingentes con comportamientos migratorios o residentes diferenciado en una misma población (Secor, 2005); iv) talla y edad se pueden utilizar para identificar la estructura del stock, ya sea directamente o calculando las tasas de crecimiento y mortalidad Begg (2005); v) estacionalidad reproductiva entre distintas áreas de distribución (Wright & Trippel, 2009); vi) diferencias en la talla o edad de la madurez (McBride *et al.*, 2013); diferencias en la fecundidad (McElroy *et al.*, 2013); vii) tamaño de los huevos entre localidades distintas de desove (Chambers & Trippel, 1997);

### 2.2. *Rasgos cuantitativos*

Los rasgos cuantitativos son rasgos fenotípicos que están determinados por muchos genes de pequeño efecto, en contraste con los rasgos mendelianos donde el estado fenotípico está controlado por un solo gen (Stearns, 1992). La mayoría de las características individuales que podemos observar directamente, como el tamaño y la forma del cuerpo, el recuento de rayos y escamas de la aleta, y muchos aspectos de la coloración, son rasgos cuantitativos, mientras que los rasgos mendelianos clásicos son relativamente raros. Los rasgos cuantitativos se pueden

medir en una escala de intervalo, y muchos muestran una variabilidad esencialmente continua dentro de una población, mientras que otros son discretos pero contables (e.g. los rasgos merísticos). Algunos rasgos, como la edad de maduración de las especies que viven en entornos estacionales, se caracterizan por solo unos pocos estados posibles (Gross, 1984).

### **3. Marcadores naturales**

#### *3.1. Parásitos como marcadores biológicos*

El principio básico detrás del uso de parásitos como marcadores poblacionales en peces es que un pez puede infectarse con un parásito solo cuando ellos se encuentran dentro del área endémica de dicho parásito. El área endémica es la región geográfica en la que las condiciones son adecuadas para la transmisión del parásito, incluidos factores bióticos como la presencia de otros huéspedes esenciales para completar el ciclo de vida del parásito y factores abióticos como la temperatura y la salinidad. Si se encuentran peces infectados fuera del área endémica, podemos inferir que estos peces estuvieron dentro de esa área en algún momento de su historia pasada. La información sobre la esperanza de vida máxima del parásito en ese huésped particular nos permite estimar el período de tiempo desde que el pez dejó el área endémica del parásito. Cuantos más parásitos con diferentes áreas endémicas se puedan utilizar, mejor será la información que se obtendrá sobre los movimientos pasados de las poblaciones de peces y, por lo tanto, sobre la estructura del stock (MacKenzie & Abaunza, 2014).

#### *3.2. Composición química de partes duras*

La composición química de las estructuras calcificadas en los peces se ha identificado como un marcador natural útil para identificar los peces que habitan en diferentes ambientes. En algunos casos, esta información se puede usar para inferir la estructura del stock (Kerr & Campana, 2014). Esta aplicación depende de la variación geográfica en la química del océano u otros factores que influyen en la química de la estructura calcificada, como la temperatura, de modo que los peces que habitan en diferentes ambientes exhiben diferencias en la composición química de las estructuras calcificadas (Campana, 2005). Es importante tener en cuenta que las diferencias en el registro químico de las estructuras no implican diferencias genéticas. Por lo tanto, el uso de esta técnica en la discriminación de stocks (i.e. unidades poblacionales) debe

considerarse cuidadosamente porque se deben cumplir una serie de supuestos (ver Kerr & Campana, 2014 para detalles).

### 3.3. Ácidos grasos

En los lípidos de los animales marinos aparecen aproximadamente 20 ácidos grasos en cantidades relativas de más del 1%. Un número mayor está presente en concentraciones menores. Las diferentes especies de peces tienen perfiles característicos de ácidos grasos (Ackman, 1980), pero la variabilidad en la composición de los ácidos grasos de los distintos tejidos es grande. La dieta es el factor externo más importante que influye en la composición de los ácidos grasos en los tejidos de peces (la edad, madurez sexual, factor de condición, momento del ciclo reproductivo; entre los factores internos más importantes). Las diferencias en el perfil de ácidos grasos es evidente entre especies, sin embargo dicho perfil también varía entre individuos pertenecientes a distintas unidades poblacionales y su correcta detección puede ser utilizada como marcador natural para diferenciación de stocks (Grahl-Nielsen, 2005).

### 3.4. ADN mitocondrial (*mtADN*)

Los marcadores genéticos, que son fragmentos de ADN y/o ARN, constituyen marcadores innatos. Una de sus ventajas es que todos los peces de una población están marcados inherentemente (en contraste con el marcaje convencional, en el que la precisión se logra solo para una proporción muy pequeña de individuos marcados que se recuperan con éxito). La identificación de especies, que es a menudo problemática, es una contribución clave de la técnica mtDNA en investigación pesquera. A pesar del hecho de que muchos taxones marinos parecen tener distribuciones amplias y dadas la aparente falta de barreras para la dispersión en el océano abierto de huevos y larvas planctónicas, los análisis moleculares pueden revelar que, de hecho, son grupos de especies que son morfológicamente indistinguibles (ver Bickford *et al.*, 2007 para una revisión). Dada la necesidad de información sobre la abundancia de especies antes del comienzo de su explotación, el *ADNmt* puede proporcionar estimaciones sobre los tamaños de las poblaciones en el pasado, incluso en ausencia de muestras históricas, siendo una herramienta de gran utilidad en la determinación de unidades poblacionales.



## 4. Dinámica oceanográfica

### 4.1. Historia de vida temprana y definición de stocks

La dispersión planctónica es un elemento importante en la dinámica poblacional de peces, como también en la formación de stocks siendo uno de los principales mecanismos de intercambio de individuos entre localidades espacialmente distantes. Muchas teorías primordiales en la biología poblacional involucran a la historia de vida temprana y su dispersión mediante corrientes marinas. La retención larval local contribuye a la pertenencia a un determinado grupo (*member*) promoviendo poblaciones cerradas y dinámicas potencialmente dependientes de la densidad. El transporte a larga distancia contribuye a la dispersión (*vagrant*) promoviendo poblaciones abiertas y a una dinámica potencialmente limitada por el reclutamiento (Sinclair, 1988). Genéticamente, peces con etapas planctónicas cortas manifiestan mayor diversidad genética entre localidades (limitación de mezcla espacial) que aquellos con largas vidas planctónicas (Riginos & Victor, 2001). La mezcla restringida contribuye a una estructuración espacial mucho mayor en las poblaciones marinas y, por extensión, en las unidades pesqueras que lo previamente reconocido (Hare & Richardson, 2014). Para comprender esta estructuración es necesario cuantificar la dispersión de las etapas planctónicas y no simplemente asumir que las primeras etapas de la vida se dispersan ampliamente (Pineda *et al.*, 2007). Considerando la dificultad de realizar un seguimiento de huevos larvas y juveniles en el campo, el uso de modelos que acoplen la circulación oceánica con el comportamiento de desove de los adultos (area y temporada de desove) y la historia de vida temprana (ubicación vertical, duración planctónica) ha resultado una herramienta de alta utilidad para evaluar tasas de dispersión e intercambio e inferir niveles de estructuración espacial de poblaciones marinas hacia la definición de stocks (Edwards *et al.*, 2007).

## 5. Análisis directo de migraciones

### 5.1. Marcaje

El marcaje de peces orientado a comprender mejor el movimiento y la dinámica de las poblaciones se remonta al menos hace 400 años cuando se marcaron por primera vez juveniles de salmón del Atlántico (*Salmo salar*) mediante el uso de cintas adheridas a su pedúnculo caudal (Walton, 1653). Mediante el marcaje es posible hacer inferencias en la estructura de supuestos stocks desde regiones geográficamente discretas (por ejemplo, en zonas de desove durante temporada

reproductiva) para determinar si posteriormente se mezclan con otros grupos o regiones de desove (Cushing, 1981). Alternativamente, los peces pueden marcarse en las regiones de pesca para investigar los patrones de dispersión hacia las zonas de desove. El éxito del marcaje y recaptura para fines de identificación de stocks es dependiente de la representación de los esfuerzos de instalación de las marcas y posterior recaptura (Begg & Waldman, 1999). De esta manera, el marcaje de peces puede proveer de información útil para decisiones de manejo críticas diseñadas para recuperar stocks agotados, así como también para estimar los patrones de migración de peces en disputas jurisdiccionales. Los datos de marcaje pueden proporcionar estimaciones de crecimiento, mortalidad por pesca y mortalidad natural. Las diferencias entre la localización del marcaje y la recaptura pueden proporcionar información sobre las tasas de movimiento e indicadores de la estructura del stock.

### *5.2. Acústica y radio-telemetría:*

La telemetría acústica y radioeléctrica se ha utilizado en la ciencia pesquera durante más de 50 años (Arnold & Dewar, 2001) y ha revelado nueva información sobre los movimientos y comportamientos de especies acuáticas importantes. Los movimientos de un individuo pueden rastrearse con una alta resolución temporal y espacial durante un período prolongado de tiempo utilizando la telemetría. Los datos derivados de la telemetría se pueden usar para investigar temas que son centrales para la identificación del stock, como la fidelidad del desove, los patrones de movimiento grupal y la preferencia del hábitat. La telemetría acústica se usa comúnmente en entornos marinos y salobres, donde la señal acústica puede viajar a distancias relativamente largas. Los transmisores ultrasónicos funcionan emitiendo un pulso de sonido, que es detectado por un hidrófono con un receptor acústico. Los peces son marcados con un transmisor de radio y una antena de cable que emite la señal de radio. La señal de radio viaja a través del agua poco profunda y hacia el aire, donde puede ser detectada por un receptor que se encuentra en tierra o montado en un avión o barco. Aunque la telemetría no se ha utilizado ampliamente para fines de identificación de stocks hasta la fecha, constituye una promisoría herramienta cuando se desea una identificación de stocks finas y de alta resolución.

### *5.3. Telemetría de especies migratorias*

Los modelos de marcaje y recaptura son inherentemente modelos dependientes de la actividad pesquera y posiblemente tienen sesgos asociados a la actividad de pesca y al marco regulatorio (Schwarz, 2003). Métodos independientes de la pesca tienen preferencia para evitar estos factores de confusión. Los métodos de telemetría ofrecen un medio independiente para obtener información de individuos de una población de manera sinóptica. Métodos de telemetría requieren que los animales sean provistos de un transmisor y su detección se divide en categorías acústicas y no-acústicas. Mientras los métodos acústicos son preferidos para ambientes costeros debido a su rango de detección y las implicancias del seguimiento acústico activo. Para casos de poblaciones de peces más allá del sector costero, métodos no-acústicos (MNA) son recomendados (Galuardi & Lam, 2014). MNA se dividen en dos categorías: marcadores con datos almacenados y marcadores radio transmitidos conectados a satélites. La diferencia es que los primeros tienen un desfase en el envío de datos, mientras que los segundos son enviados en tiempo-real. La determinación del hábitat y el rango utilizado se encuentran entre los usos más beneficiosos de los datos de telemetría y pueden usarse para inferir directamente los límites y mecanismos de los stocks mediante los cuales los límites pueden cambiar en el espacio y el tiempo. Los patrones de comportamiento pueden determinarse a partir de los esfuerzos de marcado electrónico y son importantes para evaluar cómo los cambios ambientales influyen en el movimiento. La frecuencia de alimentación, el hábitat térmico, la identificación del hábitat potencial de desove y el manejo pesquero espacio-temporal en tiempo real son aplicaciones prácticas realizadas mediante el uso de datos de telemetría en la pesca.

## **6. Herramientas de simulación**

La asimilación de información desde muchas fuentes en un modelo de dinámica poblacional puede proporcionar una visión holística de la estructura del stock y, al simular el modelo, podemos explorar las implicancias ecológicas, de evaluación y de manejo para el recurso (ICES, 2011). Los modelos de simulación también se pueden usar para probar hipótesis con respecto a la estructura del stock y la conectividad (Secor *et al.*, 2009; ICES, 2011). Por lo tanto, los modelos de simulación pueden permitirnos obtener más información sobre la estructura del stock y sus implicaciones, al tiempo que identificamos lagunas en el conocimiento sobre dónde puede ser necesario un mayor trabajo de identificación del stock. La naturaleza compleja de la estructura poblacional no siempre se alinea con los límites existentes de las unidades de manejo pesquero

(Lorenzen *et al.*, 2010). El resultado puede ser un desajuste entre la estructura de la población biológica y las unidades de stock definidas espacialmente que se utilizan para evaluar y gestionar el recurso (Reiss *et al.*, 2009). Modelos de simulación han demostrado que este tipo de desajuste puede comprometer la precisión de la evaluación y conducir a una gestión de recursos ineficaz (Cope & Punt, 2011; Berger *et al.*, 2012). Los impactos negativos específicos asociados con la falta de reconocimiento de la estructura espacial de la población en la evaluación y el manejo incluyen el sesgo en los resultados de la evaluación, la sobreexplotación y, en casos extremos, la disminución dramática de los componentes locales de desove (Steneck & Wilson, 2010; Ying *et al.*, 2011). El mantenimiento de la estructura poblacional y las vías de conectividad pueden desempeñar un papel fundamental para lograr los objetivos principales del manejo pesquero, que incluyen: obtener máximos rendimientos sostenibles; evitar el fracaso del reclutamiento; reconstruir las poblaciones sobreexplotadas; y conservación de especies en peligro de extinción (Cadrin *et al.*, 2005; Ying *et al.*, 2011). Comprender la estructura y la conectividad de la población también es fundamental para evaluar con precisión el estado del stock y pronosticar cómo responderán las poblaciones a diversas estrategias de manejo o cambios en el clima (Kerr *et al.*, 2010). Debido a la dificultad de observar directamente y acceder científicamente a las poblaciones naturales (Peck, 2004), los modelos de simulación proporcionan una vía útil para estudios a gran escala de componentes poblacionales. Entender el intercambio de individuos entre distintas localidades al interior de su distribución es fundamental para entender la estructuración espacial, así como los factores que motivan el movimiento y las condiciones del hábitat que establecen su distribución. La modelación del movimiento en la dinámica poblacional ha sido abordada desde perspectivas Lagrangianas y Eulerianas. La aproximación Lagrangiana se basa en un seguimiento del movimiento individual en el tiempo a través de modelos basados en el individuo (IBM), mientras que la Euleriana calcula el movimiento de peces por unidad de tiempo de un punto a otro en el espacio (Lehodey *et al.*, 2008).

### 6.1. *Dispersión larval*

Uno de los argumentos comúnmente utilizados en la determinación de estructura de stocks es el aislamiento de las zonas de desove y el auto-reclutamiento. Unidades poblacionales que exhiben aislamiento reproductivo, a través de un estricto comportamiento *natal homing* o de un aislamiento hidrodinámico de las zonas de desove, constituyen unidades auto-sustentadas. El

resultado es la inexistencia de intercambio de individuos entre stocks vecinos. En las últimas décadas, el desarrollo de IBM's acoplados a modelos hidrodinámicos han permitido simular el transporte de estadíos tempranos y como la variabilidad ambiental modula la dinámica del reclutamiento y la dispersión espacial (Hinrichsen *et al.*, 2011). En estos modelos, huevos y larvas son modelados como partículas Lagrangianas con ciertos rasgos biológicos y donde el movimiento es determinado por el modelo de circulación oceánica. Estos modelos pueden tener niveles de complejidad mayor mediante la incorporación de módulos bioenergéticos (i.e. crecimiento, mortalidad por inanición), campos de predadores, movimientos verticales, etc. Bajo estas consideraciones biológicas, estos modelos entregan una perspectiva de la conectividad poblacional y del nivel de aislamiento reproductivo de las unidades consideradas inicialmente, constituyendo una herramienta de alta utilidad en la determinación de stocks (Werner *et al.*, 2001).

### 6.2. Movimiento de adultos desde una perspectiva lagrangiana

Analizar como el comportamiento individual influencia la estructura poblacional, requiere el entendimiento de como estos reaccionan frente a un ambiente heterogéneo (Humston *et al.*, 2004). Así, en esta aproximación los cambios en el movimiento son producidos por un gradiente en el estímulo ambiental (*kinesis*) o por reacciones basadas en la historia pasada (área de búsqueda o área preferente). En esta última, los cambios en distribución de los individuos son desatadas por cambios en la "calidad" del hábitat, el cual se compara con distribuciones previas lo que conlleva a un movimiento constante entre ambientes adecuados de preferencia individual (Humston *et al.*, 2004). Casi cualquier estímulo puede ser responsable de causar movimientos reaccionarios (e.g. comportamiento de cardumen), pero este tipo de modelos comúnmente asumen que los individuos siguen un campo densidad de presas o condiciones abióticas como un rango óptimo de temperatura o rango de salinidad (Senina *et al.*, 2008). De esta manera, esta aproximación entrega una relación causal entre los cambios en el hábitat y los movimientos posibles de los peces adultos, siendo de utilidad para el contraste de hipótesis sobre la estructura de los stocks o la conectividad poblacional (Faugeras & Maury, 2007).

### 6.3. Movimiento de adultos desde una perspectiva Euleriana

Las simulaciones espaciales a escala poblacional son útiles para comprender las consecuencias de la estructura de los stocks y el movimiento a nivel de sistema, lo que es más directamente relevante para el manejo pesquero. Este enfoque se desplaza de las respuestas individuales frente un entorno heterogéneo hacia el impacto promedio de las estructuras de gran escala en el movimiento poblacional. Aunque el enfoque lagrangiano es extremadamente útil, puede ser intensivo en términos de datos y computacionales (Goethel *et al.*, 2011). El enfoque euleriano, frecuentemente denominado transferencia de caja, modela el movimiento basado en el flujo a través de un stock o límite geográfico (Beverton & Holt, 1957; Porch *et al.*, 2001; Goethel *et al.*, 2011) utilizando coeficientes de transferencia (Quinn & Deriso, 1999) para describir la probabilidad de movimiento entre (y nivel de fidelidad interna) stocks o unidades espaciales.

#### 6.4. Modelos de historia de vida completa

Este tipo de modelación representa la aproximación más sofisticada para modelar el movimiento entre poblaciones y entre etapas de la historia de vida. En general, esta aproximación busca agregar modelos de historia de vida temprana (e.g. IBM's) con modelos de dinámica poblacional de adultos (Rose *et al.*, 1996). Aplicaciones de mayor complejidad implican el desarrollo de simulaciones ecosistémicas que combinan modelos de circulación y biogeoquímica con un modelo de dinámica poblacional que va desde el transporte larval hasta el movimiento de adultos basado en esquemas de advección-difusión alterados por preferencia ambiental (Lehodey *et al.*, 2008). Heath *et al.* (2008) llevó esta aproximación más allá, desarrollando un modelo metapoblacional de 10 *demes* (subunidades genéticas) de bacalao que utilizó los resultado de un modelo larval biofísico (e.g. la proporción de reclutas exitosos de un *deme* específico en una región particular) como dato de entrada para un modelo poblacional. A su vez, incorporó heterogeneidad espacial y movimiento a través de etapas larvales y adulta para examinar el nivel de fidelidad del bacalao en el mar del norte.

**Anexo VI. Informe Taller de presentación y discusión de resultados proyecto FIPA 2017-62**

### **Implementación del taller de difusión de resultados: Dinámica poblacional de juveniles y adultos de jurel basada en modelación biofísica.**

Este taller fue realizado el 26 de agosto de 2020 entre las 9.30 y 13.30 horas, por medio la plataforma virtual MEET. El objetivo de este taller, fue difundir los principales resultados del proyecto FIPA 2017-62 a la comunidad científica y organizaciones gubernamentales. Los contenidos tratados en el taller fueron los siguientes.

- Presentación del Proyecto FIPA 2017-62 (Sebastián Vásquez, Inpesca).
- Modelación biogeoquímica del Pacífico Suroriental: logros y desafíos (Cristian Salas, Inpesca).
- Modelación biofísica aplicada al estudio de la distribución espacial de jurel (Sebastián Vásquez, Inpesca).
- Estudios regionales de biogeoquímica marina con el modelo ROMS/CROCO-PISCES (VincentEchevin, Locean, Francia).
- Modelación biofísica y sus implicancias hacia la estructura poblacional de jurel en el Pacífico Suroriental (Sebastián Vásquez, Inpesca).
- Identificación de fortalezas y debilidades hacia la definición de estructura poblacional de jurel (Roberto San Martín, Inpesca)

Se contabilizó una asistencia de 34 personas, incluyendo el equipo de investigadores de Inpesca, provenientes de distintas entidades gubernamentales, académicas y de investigación (Tabla 1)



Tabla 1. Identificación de asistentes que participaron en el taller de difusión

| Nº | Listado de Asistentes | Institución               |
|----|-----------------------|---------------------------|
| 1  | Andrés Sepúlveda      | SSPA                      |
| 2  | Antonio Aranís        | IFOP                      |
| 3  | Carla Falcon          | Subsecretaría de Economía |
| 4  | Catherine González    | IFOP                      |
| 5  | Catherine Grendi      | IFOP                      |
| 6  | Daniel Cerda          | Pesquera Alimar           |
| 7  | Eleuterio Yáñez       | PUCV                      |
| 8  | Elier Armas           | CIAM                      |
| 9  | Fernando Espíndola    | PUCV                      |
| 10 | Gabriela Bohm         | IFOP                      |
| 11 | Graciela Pérez        | IFOP                      |
| 12 | Grista Eisele         | IFOP                      |
| 13 | Jessica Bonicelli     | IFOP                      |
| 14 | Karen Walker          | IFOP                      |
| 15 | Luis Soto             | UBB                       |
| 16 | María Ángela Barbieri | PUCV                      |
| 17 | Milena Pizarro        | IFOP                      |
| 18 | Odette Vergara        | INCAR                     |
| 19 | Oscar Latorre         | CIAM                      |
| 20 | Osvaldo Artal         | IFOP                      |
| 21 | Raimundo Gallegos     | Consultor Orizon          |
| 22 | Vincent Echevin       | Locean, Francia           |
| 23 | Sergio Núñez          | INPESCA                   |
| 24 | Sebastián Vásquez     | INPESCA                   |
| 25 | Cristián Salas        | INPESCA                   |
| 26 | Roberto San Martín    | INPESCA                   |
| 27 | Rubén Luna            | INPESCA                   |
| 28 | Nicolás Alegría       | INPESCA                   |
| 29 | Carlos González       | INPESCA                   |
| 30 | Aquiles Sepúlveda     | INPESCA                   |
| 31 | Jeannelle Jaque       | CIAM                      |
| 32 | Carola Hernández      | IFOP                      |
| 33 | Edgardo Santander     | Universidad Arturo Prat   |
| 34 | Eduardo Díaz          |                           |

## **Marco motivacional en el que enfocaron las presentaciones**

El proyecto FIPA 2017-62 tuvo como objetivo general caracterizar el hábitat y la distribución de jurel en distintas etapas del ciclo de vida y su impacto en el entendimiento de su estructura poblacional. La identificación de variables y procesos críticos del hábitat de especies pelágicas constituye un desafío mayor, más aun cuando se trata de especies migratorias y de amplia distribución como es el caso del jurel (*Trachurus murphyi*).

Este proyecto abordó aspectos asociados a la historia de vida de jurel desde una perspectiva de modelación. Se ha implementado un modelo hidrodinámico y biogeoquímico (ROMS-PISCES) para el Pacífico Suroriental para simular los cambios del hábitat a través de variables consideradas relevantes para la distribución espacial de la especie en distintas etapas del ciclo de vida (i.e., desove, historia de vida temprana, y adultos).

Se destacaron y discutieron los hallazgos del proyecto en función del impacto sobre la definición de estructura poblacional de la especie y los alcances hacia el manejo integrado de la pesquería de jurel que se sustenta en el Pacífico suroriental.

## **Ideas principales del plenario y de las consultas a las presentaciones**

Los innumerables aportes entregados por los participantes al taller que surgieron del dialogo generado a partir de las consultas y aclaraciones en la etapa posterior de las presentaciones se resumieron y presentan a continuación:

- Ante la consulta de “¿Cómo se interpretan los desacoples de la zona Centro-Sur, en relación a las masas de agua que están interactuando, y que pueden provocar zonas de mezcla (Aguas Subantárticas y oceánicas)?”

Se indicó como respuesta que: “la dinámica es muy relevante para lo que se desea describir, recordemos que el modelo biogeoquímico y todas las salidas coexisten en un mundo hidrodinámico dado por el modelo físico de las corrientes básicamente, entonces si el modelo

biofísico describe de manera relativamente bien las corrientes, vamos a tener salidas del modelo biogeoquímico relativamente bien. Entonces el modelo hidrodinámico de 20 km de resolución parece ser un modelo un poco grueso, pero es suficiente para dar respuesta a los patrones generales".

Además se indicó "que igual es importante el desacople que se produce del oxígeno en la zona Centro Sur, que es donde la mínima de oxígeno va desapareciendo, el modelo muestra más fortalezas en la zona Norte entre Perú y Chile en donde la región es más amplia".

- Ante la consulta: "¿Cómo les fue con la simulación de la clorofila desde la costa?", para apoyar la pregunta se aclaró que el grupo de investigación que realizó la consulta siempre ha tenido problemas con la simulación de esa variable en la costa.

Se indicó que "esta variable también complicó la modelación y reproducción de los patrones. Se mencionó que al menos la producción de clorofila en la costa por eventos de surgencia está bien descrita por el modelo y la estacionalidad también, pero la extensión costa afuera parece ser más débil en el modelo que en lo que se observa, sin embargo responde bien a procesos como La Niña o El Niño. Se debe acotar que el sesgo era alto en las zonas de surgencia, el modelo no rescata estos máximos que recoge el satélite, pero en el resto del área el sesgo era bajo, entre el modelo y lo observado".

- "Da la impresión que en el desarrollo del estudio el equipo de investigación se apega al modelo tradicional de estructura del stock poblacional de jurel referido al triángulo de Jones", en este caso se consultó: "¿Se tiene una mirada hacia los juveniles en la etapa temprana y si esto se ajusta a lo indicado en la modelo conceptual?".

Se indicó que "los juveniles de etapa temprana correspondes a una de las brechas que tenemos en la observación a nivel de jurel, la información existente de la pesquería del norte de Chile no muestra la presencia de estos ejemplares a pesar de capturar ejemplares juveniles, se ha discutido que no han sido bien muestreados en la zona oceánica de Chile posterior al desove. Se requiere más muestreo de esta fracción de vida, para ir validando esta propuesta de modelación".

- Se comentó que “el rol que juega la plataforma continental en la retención o en la producción de los nutrientes, podría ser asociado a la presencia de ejemplares de mayor tamaño en la costa con otra demografía. Esta puede ser una variable importante a incorporar en el modelo, relacionado al ancho de la plataforma continental. En este caso el ancho en la zona Centro Sur es mayor que lo observado en la zona Norte”. Además en relación al Cambio Climático (CC), poniéndose como contexto que las pesquerías de sardina común y anchoveta están asociadas fuertemente a la costa, se hizo la pregunta en relación al jurel en el Norte considerando el CC, ¿Esto podría provocar algún cambio?”.

En relación a la primera pregunta se indicó que “el ancho de la plataforma indica es un problema típico de hidrodinámica, para la hidrodinámica con el modelo que se utiliza se tiene que suavizar la plataforma de acuerdo a la resolución dada, el fijar ciertas escalas puede tener un impacto en lo que pasa cerca de la plataforma”, se plantea que “la buena resolución para estudiar bien las zonas costeras, especialmente el anidamiento off-line u on-line es posible de hacer con Roms para evitar suavizar la plataforma y con esto se puede acercarse como lo he mostrado a escalas de menos de 1 km, pero de todas formas se puede usar esta herramienta. Creo que el punto débil de la modelación bioquímica en las zonas de plataforma es el papel del sedimento en la bioquímica, hay mucha desmineralización en el sedimento y eso puede afectar el oxígeno en la plataforma y esto está representado de manera muy simple en el modelo Pisces, pero se tiene la esperanza que en el futuro se genere un progreso en esto”.

En relación a la segunda pregunta sobre el efecto del CC en los recursos se planteó, “que lo interesante que nos muestra Vincent son estas proyecciones espacialmente georreferenciadas considerando el CC, ello en consideración de la modelación presentada anteriormente en el cual se pueden incorporar forzantes externos para proyectar la distribución espacial de la especie, abre bastantes posibilidades de estudio de ¿Cuál podría ser la distribución del recurso en el futuro? en un ambiente cambiante considerando el efecto del CC”.

- Se le consulta a Vincent Echevin sobre el tema del oxígeno, “¿Cuál es el mecanismo de la mínima de oxígeno para volverse más somera o profunda de acuerdo a esta modelación que tú

has hecho y cuánto tiempo puede permanecer esta condición de mínima oxígeno más somera o más superficial?"

Se indicó que "De acuerdo al estudio realizado, las corrientes ecuatoriales en los últimos 10 a 15 años no han cambiado mucho, entonces quizás esta somerización no sería tan fuerte, esto es lo que podemos ver, pero no hemos realizado una simulación. Lo que digo está basado en los modelos que representan la corriente ecuatorial en los últimos 20 años, en este caso los modelos Soda u otros tuvieron una buena asignación de datos para representar mejor la dinámica y ellos no muestran una tendencia fuerte en la zona ecuatorial".

- Otra consulta relacionada con el oxígeno plantea que se presentó una serie de tiempo de oxígeno, en este caso mediciones de Perú y esta tenía una buena relación con el modelo, pero se advirtió que había confiabilidad de alta frecuencia en el oxígeno en las mediciones que no tenían una buena relación con el modelo, "¿Crees que sea porque el modelo tiene una resolución distinta o porque esa variabilidad de alta frecuencia de oxígeno esté siendo forzada por algún mecanismo que no está resolviendo el modelo?"

"Hay que entender que los modelos como Croco o Roms son modelos que no son lineal, entonces producen muchos filamentos y remolinos, y si hacemos una corrida por ejemplo en el año 2008, el modelo no tiene ninguna razón de poder recrear un remolino en la misma fecha o el mismo lugar que los datos, solamente los modelos que pueden representar remolinos donde los datos indican que realmente hay remolinos son modelos que asimilan datos, entonces son modelos que nos son forzados solamente por vientos y condiciones de borde, son modelos también forzados por los datos. Lo que pasa es que la variabilidad de alta frecuencia en el modelo que hemos utilizado es debido a los remolinos y los filamentos, que no tienen nada que ver con la variabilidad de alta frecuencia que había en el mundo real cuando se hicieron las mediciones. Es imposible con este tipo de modelos sin asimilación de datos representar lo que pasó exactamente en la misma fecha y mismo lugar, es más una discreción estadística de lo que pasa".

- La siguiente consulta tuvo que ver con la integración del modelo biofísico al modelo biogeoquímico, "¿Qué parámetros de la parte biogeoquímica que se incorporaron luego al modelo hidrodinámico son posteriormente recogidos por el modelo basado en individuos?, en ambos casos como que muchas de las variables que puede tener a priori el modelo en realidad puede que no las tenga para Chile, es importante ver como se integra este modelo biogeoquímico a lo que luego podemos hacer en modelación biofísica".

Se indicó que "el modelo basado en el individuo tiene la potencialidad de recoger todas las variables que tenga el modelo hidrodinámico y biogeoquímico, ahora cuales son los procesos que uno busca modelar va a depender de que variable utiliza o de que variable no utiliza. Por ejemplo si uno quiere modelar crecimiento y tiene un módulo bien desarrollado de la bioenergética, que sea temperatura dependiente o que sea dependiente de la cantidad de alimento que hay, ese módulo va a ser alimentado en cada paso de tiempo por la salida del modelo biogeoquímico, o si uno tiene un módulo de mortalidad dependiente del oxígeno, también va a alimentar el modelo biogeoquímico a ese módulo donde por ejemplo si una larva que está tantas horas sometida a una condición de mínima de oxígeno muere, el modelo biofísico va ir rescatando todas esas variables. Al abrir el abanico de no solamente ser un modelo hidrodinámico, sino también un modelo biogeoquímico, permite también poder analizar más procesos asociados a la historia de vida de los recursos".

- "¿Pero en jurel cuánto sabemos de esa dependencia a esas variables en el caso de su vida larval y juvenil?".

Se indicó que "sabemos poco, sobre todo la historia de vida del jurel se desarrolla en una zona muy oceánica, donde además es una zona bastante oligotrófica en comparación al área de surgencia. Lo que tenemos incorporado en el modelo de historia de vida temprana, es más bien un modelo que tiene que ver con la dispersión de larvas y no tiene incorporado elementos de la bioenergética por ejemplo, lo único que tiene es un modelo de crecimiento temperatura-dependiente, tiene larvas que migran verticalmente día noche y después lo demás tiene que ver con los procesos de circulación. Aquí hay un desafío importante".

- “Cuando se incorporan en el modelo biológico las características de migración vertical diurna y si en el modelo hidrodinámico no está bien resuelta esta variabilidad diurna, ¿No estaría bien combinarlos para hacer un modelo biofísico?, o ¿tendría que tener un modelo hidrodinámico que te resuelva bien la circulación diurna?”.

Se indicó que “el modelo hidrodinámico puede resolver la dinámica diurna y si no hay dinámica diurna creo que usted piensa en mareas o ciclo diurno del viento, pero eso es algo que se puede hacer si hay información sobre el ciclo diurno del viento se puede incorporar fácilmente. Lo hemos hecho en otras zonas y mareas, Cristian Salas nos habló de mareas, es realmente posible, la dificultad con mareas es si quiere hacer anidamiento no se puede hacer off-line, se necesita hacer on-line, quizás es un poco más complicado a nivel de modelación, pero es posible”.

Además se indicó que “es importante tener en cuenta en este tipo de modelaciones, que no se debe centrarse solamente en un tipo de modelación sino hacer múltiples modelaciones a lo largo de un periodo para obtener finalmente el producto medio, el producto estadístico como decía Vincent, porque si uno desea concentrarse en un evento particular de mesoescala que ocurrió en un día particular ahí el modelo no va a representar necesariamente lo que ocurrió ese día en ese lugar. Por ejemplo para el uso del modelo Písces, en el modelo predictivo de jurel nosotros utilizamos promedios mensuales, se llegó a la señal mensual tanto lo biológica, como lo biogeoquímica para no tener ese problema o tratar de salir de ese problema de la mesoescala a nivel diario, además que teníamos los datos de Perú que también estaban en la escala mensual y no diaria”.

- Otra consulta señaló que “en el estudio de series de tiempo la señal diurna del oxígeno es muy importante, mucho se debe a la circulación, pero también se debe a procesos biológicos como la respiración y el consumo, entonces en relación a la pregunta anterior sobre la variabilidad diurna que uno podría observar en un modelo, que tal vez no es la real, ¿No sé si el modelo rescata esa variabilidad diurna del oxígeno que es un resultado de un proceso biológico? ¿El modelo puede observar esa variabilidad diurna que se observa en la naturaleza?”

Se indicó que "si es posible representar la variabilidad física, entonces esta variabilidad física diaria va a forzar una variabilidad diaria en el oxígeno, pero la variabilidad diaria debido a los procesos biogeoquímicos, el modelo PISCES que utilizamos ahora no puede representarlos, porque no puede representar el crecimiento, el ciclo diario de respiración, consumo del fitoplancton a la escala diaria, pero en el futuro hay un modelo (PISCES-quota), es un modelo que va poder representar esta variabilidad de alta frecuencia y el impacto sobre el oxígeno, aún se está probando este modelo".

- Sobre la estructura poblacional del jurel, "Es evidente que hay una sola población, ¿Cómo se estructuraría el stock?, ¿Habría una unidad de stock en la población o habría varias unidades de stock en la población?, pensando en el manejo".

Se indicó que "desde el manejo lo que se está viendo más favorecida es la hipótesis de un solo stock que tiene cierta estructuración espacial, pero en donde es difícil separar distintas unidades de stock que tengan ciclos autosustentables a través del tiempo. Al final para el manejo lo que es relevante es que estos stock sean autosustentables. Entonces cuando se trata de hacer una segregación espacial de unidades autosustentables para jurel no existirían los elementos fuertes como para apoyar la hipótesis de dos stock".

- Se mencionó que Perú postula que ellos tienen una unidad de stock.

"En cuanto a los ciclos biológicos, el que existan algunas evidencias de desove, de adultos esos tienen que ser más o menos consistentes con la dinámica poblacional de un stock para apoyarlo como una unidad de manejo. Lo que ocurre con la fracción de Perú resulta claro que tiene una relación importante en su nivel abundancia con el resto de la población, como para ser determinado como un stock separado, tendría que ser muy claro que la dinámica es dependiente de la productividad local y acá al no haber barreras geográficas claras, estamos hablando que esa fracción de Perú es muy dependiente de lo que ocurra en el resto de la población, que tiene una biomasa más fuerte en la zona Centro Sur de Chile".

- Respecto a la contracción del jurel observada en la última década y que se grafica en la figura que elaboró Alexandre Gretchina, se consultó si ¿Esa variable fue considerada en el



estudio y tiene alguna relación con la alta presencia de jibia?, considerando algún nivel de competencia por el hábitat con el jurel.

Se indicó que "es un tema que se ha discutido en el último tiempo, he estado mirando datos georreferenciados de jibia para tratar en algún momento de acoplar esto, pero la información de jibia está más relacionada al área de pesca y es más parchosa, no obstante hay un estudio reciente que se presentó en la OROP-PS que habla de esta interacción entre el jurel y la jibia en Perú y en donde señalan lo que tú acabas de decir que sería un competidor por el espacio y que ante la presencia de jibia el jurel tendría más limitaciones en su ingreso y también Aquiles Sepúlveda (Director de Inpesca) ha apoyado la idea de que esta hipótesis debiera ser estudiada, o sea vea si tuvo un efecto la presencia de jibia en la distribución de jurel. Aunque los datos que hemos visto para nuestra región no son muy coincidentes, no se ve que la distribución de jibia tenga una asociación importante con la distribución del jurel, en todo caso es una buena hipótesis a contrastar".

- "En el tema de alimentación de jurel que tiene que ver con la oferta ambiental, ¿No sería un elemento a considerar también en la distribución?"

Se indicó que "en lo correspondiente a la alimentación pasa lo mismo, el modelo trataba de tener una salida de zooplancton, pero como bien lo comentó Vincent son salidas muy del extremo, muy simples del modelo. Nos cuesta tenerlas como una medida predictora para jurel y yendo a la información de campo, como el jurel abarca un escenario tan amplio, cuesta a veces tener indicadores de cambios en la alimentación espacialmente referenciados para incorporarlos en estos esquemas. Lo que hay que hacer es avanzar hacia otros tipos de evaluación más de series de tiempo u otro tipo de información que pudiese mostrar esa variabilidad del alimento que son los Eufáusidos principalmente, ello es otro elemento a considerar. Las relaciones interespecíficas hasta ahora no están evaluadas en este tipo de esquemas, como la predación y la alimentación no están incorporadas mecanísticamente en este tipo de modelos, es necesario incorporarlas en una siguiente etapa para tener un modelo de ciclo completo".

- Respecto de necesidades de investigación basadas en un futuro programa de marcaje de jurel, se plantearon ciertas aprehensiones, se indicó que "las experiencias de marcaje no han funcionado en jurel porque son extremadamente caras, por el tipo de marca utilizadas, por el bajo nivel de recuperación de los ejemplares y la falta de compromiso en la devolución de los ejemplares. Sin embargo, espera que a 20 años después de las iniciativas fallidas se pueda en la actualidad instalar esta iniciativa de manera efectiva y se pueda realizar esta experiencia de manera exitosa. Sobre todo en el marco del funcionamiento de la OROP-PS
- Finalmente se destacó el enfoque del análisis planteado en este estudio, "dado que se tiende a considerar normalmente la información más reciente, la integración histórica de toda esta información es súper necesaria para interpretar la estructura real de toda la población. Normalmente se está teniendo una mirada muy estrecha respecto de lo que es la magnitud de esta población, la cual ha cambiado radicalmente su biomasa que existía previo al 2001, es muy distinta, por lo tanto podemos tener una visión muy sesgada cuando no se tiene este tipo de enfoque, creo que la recomendación es el enfoque integral, ecosistémico, pero más bien histórico lo más completo posible".

A lo anterior se agregó que "lo relevante es incorporar a distintos grupos de trabajo que tienen mucho que decir en jurel, se debe tratar de hacer un grupo de jurel que haga este análisis crítico integrado. Hay muchos investigadores que han trabajado en este recurso a lo largo del tiempo y tienen visiones muy valiosas que pueden ser incorporadas a las visiones de los investigadores que poseen menos tiempo de trabajando en este recurso. Se consideró como una necesidad la generación de este grupo y que la Subsecretaría de Pesca y Acuicultura lo debe convocar y liderar.

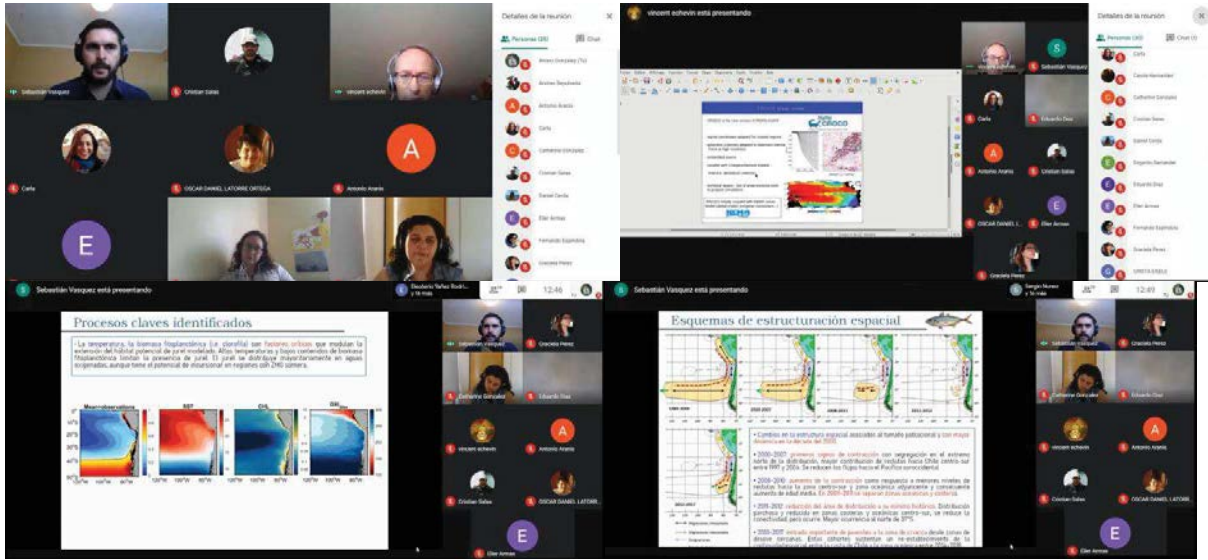


Figura 1. Imágenes del desarrollo del Taller.

## Documentación elaborada para la implementación del taller de difusión

### INVITACIÓN TALLER



El Instituto de Investigación Pesquera tiene el agrado de invitar a usted al Taller de presentación y discusión de resultados del proyecto FIPA 2017-62 "**Dinámica poblacional de juveniles y adultos de jurel basada en modelación biofísica**", el cual se realizará de forma telemática el día 26 de agosto entre las 09:30 y 13:30 hrs.

Para unirse al taller debe ingresar al siguiente enlace Google Meet: [meet.google.com/ahw-otut-osw](https://meet.google.com/ahw-otut-osw)

Esperamos poder contar con su presencia.

R.S.V.P.: +56 41 2 920410

Talcahuano, agosto de 2020



---

## Presentación y discusión de resultados proyecto FIPA 2017-62

### "Dinámica poblacional de juveniles y adultos de jurel basada en modelación biofísica"

**Financia:** Fondo de Investigación Pesquera

**Ejecuta:** Instituto de Investigación Pesquera

Jefe de proyecto: Sebastián Vásquez Pastene

**Miércoles 26 de Agosto de 2020**

Taller telemático vía GoogleMeet

---

### Motivación

El proyecto FIPA 2017-62 tiene como objetivo general caracterizar el hábitat y la distribución de jurel en distintas etapas del ciclo de vida y su impacto en el entendimiento de su estructura poblacional. La identificación de variables y procesos críticos del hábitat de especies pelágicas constituye un desafío mayor, más aun cuando se trata de especies migratorias y de amplia distribución como es el caso del jurel (*Trachurus murphyi*)

Este proyecto aborda aspectos asociados a la historia de vida de jurel desde una perspectiva de modelación. Se ha implementado un modelo hidrodinámico y biogeoquímico (ROMS-PISCES) para el Pacífico suroriental para simular los cambios del hábitat a través de variables consideradas relevantes para la distribución espacial de la especie en distintas etapas del ciclo de vida (i.e. desove, historia de vida temprana, adultos).

Finalmente, se discuten los hallazgos de este proyecto en función del impacto sobre la definición de estructura poblacional de la especie y los alcances hacia el manejo integrado de la importante pesquería que sustenta en el Pacífico suroriental.



---

## Presentación y discusión de resultados proyecto FIPA 2017-62

### "Dinámica poblacional de juveniles y adultos de jurel basada en modelación biofísica"

**Financia: Fondo de Investigación Pesquera**

**Ejecuta: Instituto de Investigación Pesquera**

Jefe de proyecto: Sebastián Vásquez Pastene

**Miércoles 26 de Agosto de 2020**

Taller telemático vía GoogleMeet

## Programa

---

|                |   |                |   |
|----------------|---|----------------|---|
| 09:30 – 09:45: | Presentación del Proyecto<br><i>Sebastián Vásquez P. (INPESCA)</i>  | 11:30 – 12:00: | Modelación biofísica y sus implicancias hacia la estructura poblacional de jurel en el Pacífico suroriental<br><i>Sebastián Vásquez (INPESCA)</i> |
| 09:45 – 10:15: | Modelación biogeoquímica del Pacífico suroriental: logros y desafíos<br><i>Cristian Salas (INPESCA)</i>                 | 12:00 – 12:10: | PAUSA   |
| 10:15 – 10:45: | Modelación biofísica aplicada al estudio de la distribución espacial de jurel<br><i>Sebastián Vásquez (INPESCA)</i>     | 12:10 – 12:40: | Identificación de fortalezas y debilidades hacia la definición de estructura poblacional de jurel<br><i>Roberto San Martín (INPESCA)</i>          |
| 10:45 – 10:55: | PAUSA   |                |   |
| 10:55 – 11:30: | Estudios regionales de biogeoquímica marina con el modelo ROMS/CROCO-PISCES<br><i>Vincent Echevin (LOCEAN, Francia)</i> | 12:40 – 13:30: | Discusión y conclusiones  |

---

## **Anexo VII. Configuración del modelo hidrodinámico y biogeoquímico ROMS-PISCES**

**Versión modelo biogeoquímico ROMS-PISCES:**

Roms\_Agrif\_v3.0

**Resolución espacial:**

20 km en modelo padre y 7 km en modelo anidado hijo

**Resolución temporal:**

Diaria

**Periodo de modelación:**

1993-2017 en modelo padre y 2001-2017 en modelo anidado hijo

**Características de la configuración del modelo:**

Número de procesadores utilizados:

NUMBER OF THREADS: 48 BLOCKING: 3 x 16

**Campos guardado en las salidas mensuales avg del modelo ROMS-PISCES:**

- T write zeta free-surface.
- T write UBAR 2D U-momentum component.
- T write VBAR 2D V-momentum component.
- T write U 3D U-momentum component.
- T write V 3D V-momentum component.
- T write T( 1) Tracer of index 1: averaged potential temperature
- T write T( 2) Tracer of index 2. averaged salinity
- T write T( 3) Tracer of index 3. averaged Dissolved inorganic carbon
- T write T( 4) Tracer of index 4. averaged Total Alkalinity
- T write T( 5) Tracer of index 5. averaged Oxygen
- T write T( 6) Tracer of index 6. averaged Calcite
- T write T( 7) Tracer of index 7. averaged Phosphate
- T write T( 8) Tracer of index 8. averaged Small particulate organic carbon
- T write T( 9) Tracer of index 9. averaged Silicate
- T write T(10) Tracer of index10. averaged Nanophytoplankton
- T write T(11) Tracer of index11. averaged Microzooplankton
- T write T(12) Tracer of index12. averaged Dissolved organic carbon
- T write T(13) Tracer of index13. averaged Diatoms
- T write T(14) Tracer of index14. averaged Mesozooplankton
- T write T(15) Tracer of index15. averaged Diatoms silicon
- T write T(16) Tracer of index16. averaged Dissolved iron
- T write T(17) Tracer of index17. averaged Iron in big particles
- T write T(18) Tracer of index18. averaged Big particulate organic carbon



T write T(19) Tracer of index19. averaged Iron in nanophytoplankton  
 T write T(20) Tracer of index20. averaged Iron in diatoms  
 T write T(21) Tracer of index21. averaged Biogenic silica  
 T write T(22) Tracer of index22. averaged Iron in small particles  
 T write T(23) Tracer of index23. averaged Chlorophyll in nano  
 T write T(24) Tracer of index24. averaged Chlorophyll in diatoms  
 T write T(25) Tracer of index25. averaged Nitrate  
 T write T(26) Tracer of index26. averaged Ammonium

T write Omega Omega vertical velocity.  
 T write W True vertical velocity.  
 T write Akt Vertical diffusivity for temperature.  
 T write Hbl Depth of KPP-model boundary layer  
 T write Hbbl Depth of the bottom planetary boundary layer.  
 T write Bostr Bottom Stress.  
 T write Wstr Wind Stress.  
 T write U-Wstress comp. U-Wind Stress.  
 T write V-Wstress comp. V-Wind Stress.  
 T write Visc3d Horizontal diffusivity

Atributos globales:

```
:type = "ROMS averages file" ;
:date = "" ;
:rst_file = "roms_rst.nc" ;
:his_file = "roms_his.nc" ;
:avg_file = "roms_avg.nc" ;
:grd_file = "roms_grd.nc" ;
:ini_file = "roms_ini.nc" ;
:frc_file = "roms_frc.nc" ;
:theta_s = 6.f ;
:theta_s_expl = "S-coordinate surface control parameter" ;
:theta_b = 0.f ;
:theta_b_expl = "S-coordinate bottom control parameter" ;
:Tcline = 10.f ;
:Tcline_expl = "S-coordinate surface/bottom layer width" ;
:Tcline_units = "meter" ;
:hc = 10.f ;
:hc_expl = "S-coordinate parameter, critical depth" ;
:hc_units = "meter" ;
:Cs_r_expl = "S-coordinate stretching curves at RHO-points" ;
:ntimes = 132885 ;
:ndtfast = 60 ;
:dt = 1920.f ;
:dtfast = 32.f ;
:nwrt = 45 ;
:ntsavg = 1 ;
```

```

:ntsavg_expl = "starting time-step for accumulation of time-averaged fields" ;
:navg = 1395 ;
:navg_expl = "number of time-steps between time-averaged records" ;
:tnu4 = 0.f ;
:tnu4_expl = "biharmonic mixing coefficient for tracers" ;
:units = "meter4 second-1" ;
:rdrng = 0.0003f ;
:rdrng_expl = "linear drag coefficient" ;
:rdrng_units = "meter second-1" ;
:rho0 = 1025.f ;
:rho0_expl = "Mean density used in Boussinesq approximation" ;
:rho0_units = "kilogram meter-3" ;
:gamma2 = 1.f ;
:gamma2_expl = "Slipperiness parameter" ;
:x_sponge = 0.f ;
:v_sponge = 0.f ;
:sponge_expl = "Sponge parameters : extent (m) & viscosity (m2.s-1)" ;

```

#### **Módulos activados modelo ROMS-PISCES :**

```

REGIONAL
OPENMP
OBC_WEST
OBC_NORTH
OBC_SOUTH
BIOLOGY
CURVGRID
SPHERICAL
MASKING
SOLVE3D
UV_COR
UV_ADV
TS_HADV_RSUP3
TS_HADV_C4
TS_DIF4
TS_MIX_ISO
SPONGE
SPONGE_GRID
LMD_MIXING
LMD_SKPP
LMD_BKPP
LMD_RIMIX
LMD_CONVEC
LMD_NONLOCAL

```

SALINITY  
NONLIN\_EOS  
SPLIT\_EOS  
BULK\_FLUX  
BULK\_FAIRALL  
BULK\_EP  
FRC\_BRY  
Z\_FRC\_BRY  
M2\_FRC\_BRY  
M3\_FRC\_BRY  
T\_FRC\_BRY  
ANA\_BSFLUX  
ANA\_BTFLUX  
OBC\_M2CHARACT  
OBC\_M3ORLANSKI  
OBC\_TORLANSKI  
AVERAGES  
AVERAGES\_K  
PISCES  
key\_trc\_pisces  
key\_passivetr  
VAR\_RHO\_2D  
M2FILTER\_POWER  
UV\_VADV\_SPLINES  
TS\_MIX\_IMP  
DIF\_COEF\_3D  
TS\_VADV\_AKIMA  
SPONGE\_DIF2  
SPONGE\_VIS2  
DBLEPREC  
Linux  
QUAD  
QuadZero  
GLOBAL\_2D\_ARRAY  
GLOBAL\_1D\_ARRAYXI  
GLOBAL\_1D\_ARRAYETA  
START\_2D\_ARRAY  
START\_1D\_ARRAYXI  
START\_1D\_ARRAYETA  
PRIVATE\_1D\_SCRATCH\_ARRAY  
PRIVATE\_2D\_SCRATCH\_ARRAY  
PRIVATE\_1DXI\_SCRATCH\_ARRAY  
PRIVATE\_1DETA\_SCRATCH\_ARRAY  
WESTERN\_EDGE  
EASTERN\_EDGE  
SOUTHERN\_EDGE

NORTHERN\_EDGE  
MYID  
MPI\_master\_only  
ZEROTH\_TILE  
SINGLE\_TILE\_MODE  
LF\_AM\_STEP  
FIRST\_TIME\_STEP  
FIRST\_2D\_STEP  
NOT\_LAST\_2D\_STEP  
PUT\_GRID\_INTO\_RESTART  
PUT\_GRID\_INTO\_HISTORY  
PUT\_GRID\_INTO\_AVERAGES  
NF\_FTYPE  
nf\_get\_att\_FTYPE  
nf\_put\_att\_FTYPE  
nf\_get\_var1\_FTYPE  
nf\_put\_var1\_FTYPE  
nf\_get\_vara\_FTYPE  
nf\_put\_vara\_FTYPE  
nf\_put\_var\_FTYPE  
NF\_FOUT  
fast\_indx\_out

## cppdefs.h (Configuración de la Física del modelo ROMS-PISCES)

```

! $Id: cppdefs.h 1005 2012-12-20 11:49:37Z gcambon $
!
!=====
!
! ROMS_AGRIF is a branch of ROMS developped at IRD and INRIA, in France
! The two other branches from UCLA (Shchepetkin et al)
! and Rutgers University (Arango et al) are under MIT/X style license.
! ROMS_AGRIF specific routines (nesting) are under CeCILL-C license.
!
! ROMS_AGRIF website : http://roms.mpl.ird.fr
!=====
!
!
/*
  This is "cppdefs.h": MODEL CONFIGURATION FILE
  =====
*/
#undef BASIN      /* Basin Example */
#undef CANYON_A   /* Canyon_A Example */
#undef CANYON_B   /* Canyon_B Example */
#undef EQUATOR    /* Equator Example */
#undef GRAV_ADJ   /* Graviational Adjustment Example */
#undef INNERSHELF /* Inner Shelf Example */
#undef RIVER      /* River run-off Example */
#undef OVERFLOW   /* Graviational/Overflow Example */
#undef SEAMOUNT   /* Seamount Example */
#undef SHELFROnt  /* Shelf Front Example */
#undef SOLITON    /* Equatorial Rossby Wave Example */
#undef UPWELLING  /* Upwelling Example */
#undef VORTEX     /* Baroclinic Vortex Example */
#undef INTERNAL   /* Internal Tide Example */
#undef JET        /* Baroclinic Jet Example */
#define REGIONAL  /* REGIONAL Applications */

#if defined REGIONAL
/*
!=====
!
!          REGIONAL (realistic) Configurations
!=====
!
!-----
! BASIC OPTIONS
!-----

```

```

!
*/
        /* Configuration Name */
# define BENGUELA_LR
        /* Parallelization */
# define OPENMP
# undef MPI
        /* Nesting */
# undef AGRIF
# undef AGRIF_2WAY
        /* Open Boundary Conditions */
# undef TIDES
# undef OBC_EAST
# define OBC_WEST
# define OBC_NORTH
# define OBC_SOUTH
        /* Applications */
# define BIOLOGY
# undef FLOATS
# undef STATIONS
# undef PASSIVE_TRACER
# undef SEDIMENT
# undef BBL
/*!
!-----
! PRE-SELECTED OPTIONS
!
! ADVANCED OPTIONS ARE IN SET_GLOBAL_DEFINITIONS.H
!-----
*/
        /* Parallelization */
# ifdef MPI
# undef PARALLEL_FILES
# endif
# undef AUTOTILING
# undef ETALON_CHECK
        /* Grid configuration */
# define CURVGRID
# define SPHERICAL
# define MASKING
        /* Model dynamics */
# define SOLVE3D
# define UV_COR
# define UV_ADV
# ifdef TIDES
# define SSH_TIDES

```

```
# define UV_TIDES
# undef TIDERAMP
# endif

        /* Lateral Explicit Momentum Mixing */
# undef UV_VIS2
# ifdef UV_VIS2
# define UV_MIX_S
# define UV_VIS_SMAGO
# endif

        /* Lateral Tracer Advection (default UP3) */
# define TS_HADV_RSUP3
# undef TS_HADV_UP5
# undef TS_HADV_C4
        /* Lateral Explicit Tracer Mixing */
# ifdef TS_HADV_C4
# define TS_DIF2
# undef TS_DIF4
# define TS_DIF_SMAGO
# define TS_MIX_ISO
# endif

        /* Sponge layers for UV and TS */
# define SPONGE
# define SPONGE_GRID
        /* Vertical Mixing */
# undef BODYFORCE
# undef BVF_MIXING
# define LMD_MIXING
# ifdef LMD_MIXING
# define LMD_SKPP
# undef LMD_SKPP2005
# define LMD_BKPP
# define LMD_RIMIX
# define LMD_CONVEC
# undef LMD_DDMIX
# define LMD_NONLOCAL
# endif

        /* Equation of State */
# define SALINITY
# define NONLIN_EOS
# define SPLIT_EOS
        /* Surface Forcing */
# define BULK_FLUX
# ifdef BULK_FLUX
# define BULK_FAIRALL
# undef BULK_LW
# define BULK_EP
```

```
# undef BULK_SMFLUX
# undef SST_SKIN
# undef ANA_DIURNAL_SW
# undef ONLINE
# else
# define QCORRECTION
# define SFLX_CORR
# undef ANA_DIURNAL_SW
# endif
        /* Lateral Forcing */
# undef CLIMATOLOGY
# ifdef CLIMATOLOGY
# define ZCLIMATOLOGY
# define M2CLIMATOLOGY
# define M3CLIMATOLOGY
# define TCLIMATOLOGY

# define ZNUDGING
# define M2NUDGING
# define M3NUDGING
# define TNUDGING
# undef ROBUST_DIAG
# endif

# define FRC_BRY
# ifdef FRC_BRY
# define Z_FRC_BRY
# define M2_FRC_BRY
# define M3_FRC_BRY
# define T_FRC_BRY
# endif
        /* Bottom Forcing */
# define ANA_BSFLUX
# define ANA_BTFLUX
        /* Point Sources - Rivers */
# undef PSOURCE
# undef ANA_PSOURCE
        /* Open Boundary Conditions */
# ifdef TIDES
# define OBC_M2FLATHER
# else
# undef OBC_M2SPECIFIED
# undef OBC_M2FLATHER
# define OBC_M2CHARACT
# undef OBC_M2ORLANSKI
# ifdef OBC_M2ORLANSKI
```



```

# define OBC_VOLCONS
# endif
# endif
# define OBC_M3ORLANSKI
# define OBC_TORLANSKI
# undef OBC_M3SPECIFIED
# undef OBC_TSPECIFIED
        /* Input/Output & Diagnostics */
# define AVERAGES
# define AVERAGES_K
# undef DIAGNOSTICS_TS
# undef DIAGNOSTICS_UV
# ifdef DIAGNOSTICS_TS
# undef DIAGNOSTICS_TS_ADV
# undef DIAGNOSTICS_TS_MLD
# endif
/*
!       Applications:
!-----
! Biology, floats, Stations,
! Passive tracer, Sediments, BBL
!-----
*/
        /* Choice of Biology models */
# ifdef BIOLOGY
# define PISCES
# undef BIO_NChIPZD
# undef BIO_N2ChIPZD2
        /* Options */
# ifdef PISCES
# define key_trc_pisces
# define key_passivetr
# undef DIAGNOSTICS_BIO
# ifdef DIAGNOSTICS_BIO
# define key_trc_diaadd
# define key_trc_dia3d
# endif
# endif
# ifdef BIO_NChIPZD
# undef OXYGEN
# endif
# ifdef BIO_NChIPZD
# define DIAGNOSTICS_BIO
# endif
# ifdef BIO_N2P2Z2D2
# undef VAR_CHL_C

```

```

# endif
# endif
        /* Lagrangian floats model */
# ifdef FLOATS
# undef FLOATS_GLOBAL_ATTRIBUTES
# undef IBM
# undef RANDOM_WALK
# ifdef RANDOM_WALK
# define DIEL_MIGRATION
# define RANDOM_VERTICAL
# define RANDOM_HORIZONTAL
# endif
# endif
        /* Stations recording */
# ifdef STATIONS
# define ALL_SIGMA
# endif
        /* Sediment dynamics model */
# ifdef SEDIMENT
# define ANA_SEDIMENT
# undef BED_ARMOR
# undef ANA_SPFLUX
# undef ANA_BPFLUX
# define LINEAR_CONTINUATION
# undef NEUMANN
# endif
        /* Bottom Boundary Layer model */
# ifdef BBL
# define ANA_WWAVE
# ifdef SEDIMENT
# undef ANA_BSEDIM
# else
# define ANA_BSEDIM
# endif
# undef Z0_BL
# ifdef Z0_BL
# define Z0_RIP
# endif
# undef Z0_BIO
# endif
/*
!
!=====
!      IDEALIZED CONFIGURATIONS
!=====
!
!

```

```

*/
#elif defined BASIN
/*
!           Basin Example
!           =====
*/
# define ETALON_CHECK
# undef OPENMP
# undef MPI
# define UV_ADV
# define UV_COR
# define UV_VIS2
# define UV_MIX_S
# define SOLVE3D
# define TS_DIF2
# define TS_MIX_S
# define BODYFORCE
# define ANA_GRID
# define ANA_INITIAL
# define ANA_SMFLUX
# define ANA_STFLUX
# define ANA_BTFLUX

#elif defined CANYON_A
/*
!           First Canyon Example
!           =====
*/
# define ETALON_CHECK
# undef OPENMP
# undef MPI
# define UV_ADV
# define UV_COR
# define SOLVE3D
# define EW_PERIODIC
# define ANA_GRID
# define ANA_INITIAL
# define ANA_SMFLUX
# define ANA_STFLUX
# define ANA_BTFLUX

#elif defined CANYON_B
/*
!           Second Canyon Example
!           =====
*/

```

```

# define ETALON_CHECK
# undef OPENMP
# undef MPI
# define UV_ADV
# define UV_COR
# define SOLVE3D
# define EW_PERIODIC
# define ANA_GRID
# define ANA_INITIAL
# define ANA_SMFLUX
# define ANA_STFLUX
# define ANA_BTFLUX
# define ANA_VMIX

#elif defined EQUATOR
/*
!           Equator Example
!           =====
! Boccaletti, G., R.C. Pacanowski, G.H. Philander and A.V. Fedorov, 2004,
! The Thermal Structure of the Upper Ocean, J.Phys.Oceanogr., 34, 888-902.
*/
# define ETALON_CHECK
# undef OPENMP
# undef MPI
# define UV_ADV
# define UV_COR
# define UV_VIS2
# define UV_MIX_S
# define SOLVE3D
# define SALINITY
# define TS_DIF2
# define TS_MIX_S
# define ANA_GRID
# define ANA_INITIAL
# define ANA_SMFLUX
# define ANA_STFLUX
# define ANA_SRFLUX
# define ANA_SSFLUX
# define ANA_BTFLUX
# define ANA_BSFLUX
# define QCORRECTION
# define ANA_SST
# define LMD_SKPP /* problem with MPI in Xi direction */
# define LMD_MIXING
# define LMD_RIMIX
# define LMD_CONVEC

```

```

#elif defined GRAV_ADJ
/*
!           Gravitational Adjustment Example
!           =====
*/
# define ETALON_CHECK
# undef OPENMP
# undef MPI
# define UV_ADV
# define UV_VIS2
# define UV_MIX_S
# define TS_DIF2
# define TS_MIX_S
# define SOLVE3D
# define ANA_GRID
# define ANA_INITIAL
# define ANA_SMFLUX
# define ANA_STFLUX
# define ANA_BTFLUX

#elif defined INNERSHELF
/*
!           Inner Shelf Example
!           =====
*/
# define ETALON_CHECK
# undef OPENMP
# undef MPI
# define SOLVE3D
# define UV_COR
# define UV_ADV
# define ANA_GRID
# define ANA_INITIAL
# define AVERAGES
# define SALINITY
# define NONLIN_EOS
# define SPLIT_EOS
# define ANA_SSFLUX
# define ANA_SRFLUX
# define ANA_STFLUX
# define ANA_BSFLUX
# define ANA_BTFLUX
# define ANA_SMFLUX
# define LMD_MIXING
# define LMD_SKPP

```

```

# define LMD_BKPP
# define LMD_RIMIX
# define LMD_CONVEC
# define NS_PERIODIC

#elif defined INTERNAL
/*
!           Internal Tide Example
!           =====
! Di Lorenzo, E, W.R. Young and S.L. Smith, 2006, Numerical and analytical estimates of M2
! tidal conversion at steep oceanic ridges, J. Phys. Oceanogr., 36, 1072-1084.
*/
# undef ETALON_CHECK
# undef OPENMP
# undef MPI
# define SOLVE3D
# define UV_COR
# define UV_ADV
# define BODYTIDE
# define ANA_GRID
# undef INTERNALSHELF
# define ANA_INITIAL
# define ANA_BTFLUX
# define ANA_SMFLUX
# define ANA_SRFLUX
# define ANA_STFLUX
# define ANA_VMIX

# define EW_PERIODIC
# define NS_PERIODIC

# undef UV_VIS2
# undef UV_MIX_GEO
# undef TS_DIF2
# undef TS_MIX_GEO
# undef SPONGE
# undef ANA_SSH
# undef ANA_M2CLIMA
# undef ANA_M3CLIMA
# undef ANA_TCLIMA
# undef ZCLIMATOLOGY
# undef M2CLIMATOLOGY
# undef M3CLIMATOLOGY
# undef TCLIMATOLOGY
# undef ZNUDGING
# undef M2NUDGING

```

```

# undef M3NUDGING
# undef TNUDGING
# undef OBC_EAST
# undef OBC_WEST
# undef OBC_M2CHARACT
# undef OBC_M2FLATHER
# undef OBC_TORLANSKI
# undef OBC_M3ORLANSKI

#elif defined RIVER
/*
!           River run-off test problem
!           =====
*/
# define ETALON_CHECK
# undef OPENMP
# undef MPI
# define SOLVE3D
# define UV_ADV
# define UV_COR
# define M2FILTER_FLAT
# define NONLIN_EOS
# define SPLIT_EOS
# define SALINITY
# define ANA_GRID
# define MASKING
# define ANA_INITIAL
# define ANA_SMFLUX
# define ANA_STFLUX
# define ANA_SSFLUX
# define ANA_SRFLUX
# define ANA_BTFLUX
# define ANA_BSFLUX
# define LMD_MIXING
# define LMD_SKPP
# define LMD_BKPP
# define LMD_RIMIX
# define LMD_CONVEC
# define PSOURCE
# define ANA_PSOURCE
# define NS_PERIODIC
# define FLOATS
# ifdef FLOATS
#   define RANDOM_WALK
#   ifdef RANDOM_WALK
#     define DIEL_MIGRATION

```

```
# define RANDOM_VERTICAL
# define RANDOM_HORIZONTAL
# endif
# endif
```

```
#elif defined SEAMOUNT
```

```
/*
!           Seamount Example
!           =====
*/
```

```
# define ETALON_CHECK
# undef OPENMP
# undef MPI
# define UV_ADV
# define UV_COR
# define SOLVE3D
# define SALINITY
# define NONLIN_EOS
# define SPLIT_EOS
# define ANA_GRID
# define ANA_INITIAL
# define ANA_SMFLUX
# define ANA_STFLUX
# define ANA_SSFLUX
# define ANA_SRFLUX
# define ANA_BTFLUX
# define ANA_BSFLUX
```

```
# elif defined SHELF FRONT
```

```
/*
!           Shelf Front Example
!           =====
*/
```

```
# define ETALON_CHECK
# undef OPENMP
# undef MPI
# define UV_ADV
# define UV_COR
# define SOLVE3D
# define SALINITY
# define ANA_GRID
# define ANA_INITIAL
# define ANA_SMFLUX
# define ANA_STFLUX
# define ANA_SSFLUX
# define ANA_SRFLUX
```



```

# define ANA_BTFLUX
# define ANA_BSFLUX
# define EW_PERIODIC

#elif defined SOLITON
/*
!           Equatorial Rossby Wave Example
!           =====
*/
# define ETALON_CHECK
# undef OPENMP
# undef MPI
# define UV_COR
# define UV_ADV
# define ANA_GRID
# define ANA_INITIAL
# define AVERAGES
# define EW_PERIODIC
# define ANA_SMFLUX

# elif defined OVERFLOW
/*
!           Gravitational/Overflow Example
!           =====
*/
# define ETALON_CHECK
# undef OPENMP
# undef MPI
# define UV_ADV
# define UV_COR
# define UV_VIS2
# define UV_MIX_GEO
# define TS_DIF2
# define TS_MIX_GEO
# define SOLVE3D
# define ANA_GRID
# define ANA_INITIAL
# define ANA_SMFLUX
# define ANA_STFLUX
# define ANA_BTFLUX

#elif defined UPWELLING
/*
!           Upwelling Example
!           =====
*/

```

```

# define ETALON_CHECK
# undef OPENMP
# undef MPI
# define SOLVE3D
# define UV_COR
# define UV_ADV
# define ANA_GRID
# define ANA_INITIAL
# define AVERAGES
# define SALINITY
# define NONLIN_EOS
# define SPLIT_EOS
# define ANA_SSFLUX
# define ANA_SRFLUX
# define ANA_STFLUX
# define ANA_BSFLUX
# define ANA_BTFLUX
# define ANA_SMFLUX
# define LMD_MIXING
# define LMD_SKPP
# define LMD_BKPP
# define LMD_RIMIX
# define LMD_CONVEC
# define EW_PERIODIC

#elif defined VORTEX
/*
!           Baroclinic Vortex Example (TEST AGRIF)
!           =====
*/
# undef ETALON_CHECK
# undef OPENMP
# undef MPI
# define AGRIF
# define AGRIF_2WAY
# define SOLVE3D
# define UV_COR
# define UV_ADV
# define ANA_STFLUX
# define ANA_SMFLUX
# define ANA_BSFLUX
# define ANA_BTFLUX
# define ANA_VMIX
# define SPONGE
# define ZCLIMATOLOGY
# define M2CLIMATOLOGY

```

```

# define M3CLIMATOLOGY
# define TCLIMATOLOGY
# define ZNUDGING
# define M2NUDGING
# define M3NUDGING
# define TNUDGING
# define OBC_EAST
# define OBC_WEST
# define OBC_NORTH
# define OBC_SOUTH
# define OBC_M2FLATHER
# define OBC_TORLANSKI
# define OBC_M3ORLANSKI

#elif defined JET
/*
!           Baroclinic JET Example
!           =====
*/
# undef ANA_JET
# undef ETALON_CHECK
# undef MPI
# undef AGRIF
# undef AGRIF_2WAY
# define SOLVE3D
# define UV_COR
# define UV_ADV
# ifdef ANA_JET
# define ANA_GRID
# define ANA_INITIAL
# endif
# define ANA_STFLUX
# define ANA_SMFLUX
# define ANA_BSFLUX
# define ANA_BTFLUX
# define ANA_VMIX
# define EW_PERIODIC
# define CLIMATOLOGY
# ifdef CLIMATOLOGY
# define ZCLIMATOLOGY
# define M2CLIMATOLOGY
# define M3CLIMATOLOGY
# define TCLIMATOLOGY
# define ZNUDGING
# define M2NUDGING
# define M3NUDGING

```

```
# define TNUDGING
# define ROBUST_DIAG
# define ZONAL_NUDGING
# ifdef ANA_JET
# define ANA_SSH
# define ANA_M2CLIMA
# define ANA_M3CLIMA
# define ANA_TCLIMA
# endif
# endif
# define LMD_MIXING
# ifdef LMD_MIXING
# undef ANA_VMIX
# define ANA_SRFLUX
# undef LMD_KPP
# define LMD_RIMIX
# define LMD_CONVEC
# endif
```

```
#endif /* END OF CONFIGURATION CHOICE */
```

```
#include "set_global_definitions.h"
```

### **param.h (Configuración de la ejecución del modelo ROMS-PISCES)**

```
! $Id: param.h 960 2012-12-05 17:09:45Z gcambon $
```

```
!
```

```
!=====
```

```
==
```

```
! ROMS_AGRIF is a branch of ROMS developed at IRD and INRIA, in France
```

```
! The two other branches from UCLA (Shchepetkin et al)
```

```
! and Rutgers University (Arango et al) are under MIT/X style license.
```

```
! ROMS_AGRIF specific routines (nesting) are under CeCILL-C license.
```

```
!
```

```
! ROMS_AGRIF website : http://roms.mpl.ird.fr
```

```
!=====
```

```
==
```

```
!
```

```
! Dimensions of Physical Grid and array dimensions:
```

```
!=====
```

```
! LLm,MMm Number of the internal points of the PHYSICAL grid.
```

```
! in the XI- and ETA-directions [physical side boundary
```

```
! points and peroodic ghost points (if any) are excluded].
```

```
!
```

```
! Lm,Mm Number of the internal points [see above] of array
```

```
! covering a Message Passing subdomain. In the case when
```

```
! no Message Passing partitioning is used, these two are
```

```

!      the same as LLm,MMm.
!
! N      Number of vertical levels.
!
      integer LLm,Lm,MMm,Mm,N, LLm0,MMm0
#if defined AGRIF
      integer LLmm2, MMmm2
#endif
#if defined BASIN
      parameter (LLm0=60, MMm0=50, N=10)
#elif defined CANYON_A
      parameter (LLm0=65, MMm0=48, N=16)
#elif defined CANYON_B
      parameter (LLm0=66, MMm0=48, N=16)
#elif defined EQUATOR
      parameter (LLm0=40, MMm0=32, N=32) ! 100 km resolution
#elif defined GRAV_ADJ
      parameter (LLm0=128, MMm0=4, N=10)
#elif defined INNERSHELF
      parameter (LLm0=64, MMm0=3, N=40)
#elif defined INTERNAL
!   parameter (LLm0=120, MMm0=10, N=40) ! 10 km resolution
!   parameter (LLm0=800, MMm0=4, N=40) ! 1.5 km resolution
      parameter (LLm0=1600, MMm0=4, N=40) ! 1.5 km resolution
#elif defined OVERFLOW
      parameter (LLm0=4, MMm0=128, N=10)
#elif defined RIVER
      parameter (LLm0=40, MMm0=80, N=20)
#elif defined SEAMOUNT
      parameter (LLm0=64, MMm0=64, N=20)
#elif defined SHELFROUNT
      parameter (LLm0=4, MMm0=40, N=10)
#elif defined SOLITON
      parameter (LLm0=96, MMm0=32, N=10)
#elif defined UPWELLING
      parameter (LLm0=16, MMm0=64, N=16)
#elif defined VORTEX
!   parameter (LLm0=179, MMm0=179, N=10) ! 10 km resolution
      parameter (LLm0=59, MMm0=59, N=10) ! 30 km resolution
!   parameter (LLm0=69, MMm0=57, N=10) ! 30 km resolution
!   parameter (LLm0=35, MMm0=35, N=10) ! 50 km resolution
!   parameter (LLm0=24, MMm0=24, N=10) ! 70 km resolution
#elif defined JET
# ifdef JET_ANA
!   parameter (LLm0=250, MMm0=1000, N=30) ! Jet 2 km resolution
!   parameter (LLm0=100, MMm0=400, N=30) ! Jet 5 km resolution

```

```

    parameter (LLm0= 50, MMm0=200, N=30) ! Jet 10 km resolution
!   parameter (LLm0= 25, MMm0=100, N=30) ! Jet 20 km resolution
# else
!   parameter (LLm0=300, MMm0=500, N=30) ! Jet 2 km resolution
!   parameter (LLm0=120, MMm0=200, N=30) ! Jet 5 km resolution
    parameter (LLm0=60, MMm0=100, N=30) ! Jet 10 km resolution
# endif
#elif defined REGIONAL
# if defined USWC0
    parameter (LLm0=62, MMm0=126, N=40) ! <-- US_West grid15 L0
# elif defined USWC1
    parameter (LLm0=60, MMm0=96, N=40) ! <-- US_West grid15 L1
# elif defined USWC2
    parameter (LLm0=60, MMm0=120, N=40) ! <-- US_West grid15 L2
# elif defined USWC155
    parameter (LLm0=83, MMm0=168, N=20) ! <-- US_West USWC155 L1
# elif defined CANARY
!   parameter (LLm0=97, MMm0=159, N=32) ! <-- Canary 25km
    parameter (LLm0=83, MMm0=112, N=30) ! <-- Canary 15km
# elif defined FINISTERE
    parameter (LLm0=78, MMm0=100, N=16) ! <-- Finistere
# elif defined RIA
    parameter (LLm0=77, MMm0=96, N=28) ! <-- RIA
# elif defined PERU
    parameter (LLm0=39, MMm0=32, N=20) ! <-- Peru test
# elif defined SAFE
    parameter (LLm0=111, MMm0=96, N=32) ! <-- SAFE
# elif defined PACIFIC
    parameter (LLm0=170, MMm0=60, N=30) ! <-- Pacific
# elif defined CORAL
    parameter (LLm0=81, MMm0=77, N=32) ! <-- CORAL sea
# elif defined BENGUELA_LR
    parameter (LLm0=390, MMm0=381, N=32) ! <-- BENGUELA_LR
# elif defined BENGUELA_HR
    parameter (LLm0=83, MMm0=85, N=32) ! <-- BENGUELA_HR
# elif defined BENGUELA_VHR
    parameter (LLm0=167, MMm0=170, N=32) ! <-- BENGUELA_VHR
# else
    parameter (LLm0=94, MMm0=81, N=40)
# endif
#else
    parameter (LLm0=??, MMm0=??, N=??)
#endif

!
! MPI related variables

```

```

! === =====
integer Lmmpi,Mmmpi,iminmpi,imaxmpi,jminmpi,jmaxmpi
common /comm_setup_mpi/ Lmmpi,Mmmpi,
&          iminmpi,imaxmpi,jminmpi,jmaxmpi

#ifdef AGRIF
common /scrump_physical_grid/ LLm,Lm,LLmm2,MMm,Mm,MMmm2
#else
parameter (LLm=LLm0, MMm=MMm0)
#endif

!
! Domain subdivision parameters:
! =====
! NPP          Maximum allowed number of parallel threads;
! NSUB_X,NSUB_E Number of SHARED memory subdomains in XI- and
!                      ETA-directions;
! NNODES       Total number of MPI processes (nodes);
! NP_XI,NP_ETA Number of MPI subdomains in XI- and ETA-directions;
!
integer NSUB_X, NSUB_E, NPP
#ifdef MPI
integer NP_XI, NP_ETA, NNODES
parameter (NP_XI=1, NP_ETA=4, NNODES=NP_XI*NP_ETA)
parameter (NPP=1)
parameter (NSUB_X=1, NSUB_E=1)
#elif defined OPENMP
parameter (NPP=48)
# ifdef AUTOTILING
common/distrib/NSUB_X, NSUB_E
# else
parameter (NSUB_X=3, NSUB_E=16)
# endif
#else
parameter (NPP=1)
# ifdef AUTOTILING
common/distrib/NSUB_X, NSUB_E
# else
parameter (NSUB_X=1, NSUB_E=NPP)
# endif
#endif
!
! Number of tracers and tracer identification indices:
! =====
!

```

```

#ifdef SOLVE3D
    integer NT, itemp
    & , ntrc_salt, ntrc_pas, ntrc_bio, ntrc_sed
    & , ntrc_diats, ntrc_diauv, ntrc_diabio
# ifdef BIOLOGY
    & , itrc_bio
# endif
# ifdef SEDIMENT
    & , itrc_sed
# endif
# ifdef SALINITY
    & , isalt
# endif
# ifdef PASSIVE_TRACER
    & , itpas
# endif
# ifdef BIOLOGY
# ifdef PISCES
    & , iDIC_, iTAL_, iOXY_, iCAL_, iPO4_
    & , iPOC_, iSIL_, iPHY_, iZOO_, iDOC_
    & , iDIA_, iMES_, iBSI_, iFER_
    & , iBFE_, iGOC_, iSFE_, iDFE_, iDSI_
    & , iNFE_, iNCH_, iDCH_, iNO3_, iNH4_
# endif
# ifdef DIAGNOSTICS_BIO
# ifdef key_trc_dia3d
    & , Nhi,Nco3,Naksp,Netot,Nprorca
    & , Nprorca2,Npronew,Npronew2
    & , Nprorca3,Nprorca4,Nprorca5
# endif
# ifdef key_trc_diaadd
    & , Nfld,Nflu16,Nkgco2,Natcco2,Nsinking
    & , Nsinking2,Nsinkfer,Nsinkfer2,Nsinksil
    & , Nsinkcal,Nzmeu,Nirondep,Nnitropot
# endif
# endif
    & , NumFluxTerms,NumVSSinkTerms,NumGasExcTerms
# elif defined BIO_NChlPZD
    & , iNO3_, iChla, iPhy1, iZoo1
    & , iDet1
# ifdef OXYGEN
    & , iO2
# endif
    & , NFlux_NewProd, NFlux_Grazing, NFlux_SlopFeed
    & , NFlux_Pmort, NFlux_Zmetab, NFlux_Zmort, NFlux_Remind
    & , NumFluxTermsN, NumFluxTerms, NumGasExcTerms
    & , NFlux_VSinkChl, NFlux_VSinkP1, NFlux_VSinkD1

```



```

    &      , NumVSinkTerms
# ifdef OXYGEN
    &      , OGain_NewProd, OLoss_Zmetab
    &      , OLoss_Remind, NumFluxTermsO, OFlux_GasExc
# endif
# elif defined BIO_N2ChlPZD2
    &      , iNO3_, iNH4_, iChla, iPhy1, iZoo1
    &      , iDet1, iDet2
    &      , NFlux_NewProd
    &      , NFlux_RegProd
    &      , NFlux_Nitrific
    &      , NFlux_Grazing
    &      , NFlux_SlopFeed
    &      , NFlux_Pmort
    &      , NFlux_Zmetab
    &      , NFlux_Zmort
    &      , NFlux_Remind1, NFlux_Remind2
    &      , NumFluxTermsN, NumFluxTerms, NumGasExcTerms
    &      , NFlux_VSinkChl, NFlux_VSinkP1
    &      , NFlux_VSinkD1, NFlux_VSinkD2
    &      , NumVSinkTerms
# endif
# endif

# ifdef SEDIMENT
    &      , isand, isilt
    &      , NST, NLAY
# endif

    parameter (itemp=1)
# ifdef SALINITY
    parameter (ntrc_salt=1)
    parameter (isalt=itemp+1)
# else
    parameter (ntrc_salt=0)
# endif
# ifdef PASSIVE_TRACER
    parameter (ntrc_pas=1)
    parameter (itpas=itemp+ntrc_salt+1)
# else
    parameter (ntrc_pas=0)
# endif
# ifdef BIOLOGY
# ifdef PISCES
    parameter (ntrc_bio=24, itrc_bio=itemp+ntrc_salt+ntrc_pas+1)
    parameter (iDIC_ =itrc_bio, iTAL_ =iDIC_ +1,

```

```

&      iOXY_ =iDIC_+2, iCAL_ =iDIC_+3, iPO4_ =iDIC_+4,
&      iPOC_ =iDIC_+5, iSIL_ =iDIC_+6, iPHY_ =iDIC_+7,
&      iZOO_ =iDIC_+8, iDOC_ =iDIC_+9, iDIA_ =iDIC_+10,
&      iMES_ =iDIC_+11, iBSI_ =iDIC_+12, iFER_ =iDIC_+13,
&      iBFE_ =iDIC_+14, iGOC_ =iDIC_+15, iSFE_ =iDIC_+16,
&      iDFE_ =iDIC_+17, iDSI_ =iDIC_+18, iNFE_ =iDIC_+19,
&      iNCH_ =iDIC_+20, iDCH_ =iDIC_+21, iNO3_ =iDIC_+22,
&      iNH4_ =iDIC_+23)
# ifdef key_trc_dia3d
  parameter (Nhi      = 1,
&      Nco3      = 2,
&      Naksp     = 3,
&      Netot     = 4,
&      Nprorca  = 5,
&      Nprorca2 = 6,
&      Nprnew   = 7,
&      Nprnew2  = 8,
&      Nprorca3 = 9,
&      Nprorca4 = 10,
&      Nprorca5 = 11,
&      NumFluxTerms = Nprorca5)
# else
  parameter (NumFluxTerms = 0)
# endif
# ifdef key_trc_diaadd
  parameter (Nfld     = 1,
&      Nflu16    = 2,
&      Nkgco2   = 3,
&      Natcco2  = 4,
&      Nsinking = 5,
&      Nsinking2 = 6,
&      Nsinkfer = 7,
&      Nsinkfer2 = 8,
&      Nsinksil = 9,
&      Nsinkcal = 10,
&      Nzmeu   = 11,
&      Nirondep = 12,
&      Nnitpot  = 13,
&      NumGasExcTerms = 0,
&      NumVSinkTerms = Nnitpot)
# else
  parameter (NumGasExcTerms = 0, NumVSinkTerms = 0)
# endif
# elif defined BIO_NChlPZD
# ifdef OXYGEN
  parameter (ntrc_bio=6,itrc_bio=itemp+ntrc_salt+ntrc_pas+1)

```

```

# else
  parameter (ntrc_bio=5,itrc_bio=itemp+ntrc_salt+ntrc_pas+1)
# endif
  parameter (iNO3_=itrc_bio, iChla=iNO3_+1,
    & iPhy1=iNO3_+2,
    & iZoo1=iNO3_+3,
    & iDet1=iNO3_+4)
# ifdef OXYGEN
  parameter (iO2=iNO3_+5)
# endif
  parameter (NFlux_NewProd = 1,
    & NFlux_Grazing = 2,
    & NFlux_SlopFeed = 3,
    & NFlux_Pmort = 4,
    & NFlux_Zmetab = 5,
    & NFlux_Zmort = 6,
    & NFlux_Remind = 7,
    & NumFluxTermsN = NFlux_Remind,
# ifdef OXYGEN
    & OGain_NewProd = NFlux_Remind+1,
    & OLoss_Zmetab = OGain_NewProd+1,
    & OLoss_Remind = OLoss_Zmetab+1,
    & NumFluxTermsO = OLoss_Remind - NumFluxTermsN,
    & NumFluxTerms = NumFluxTermsN + NumFluxTermsO,
    & OFlux_GasExc = 1,
    & NumGasExcTerms = 1,
# else
    & NumFluxTerms = NumFluxTermsN,
    & NumGasExcTerms = 0,
# endif
    & NFlux_VSinkP1 = 1,
    & NFlux_VSinkD1 = 2,
    & NumVSinkTerms = 2)
# elif defined BIO_N2ChlPZD2
  parameter (ntrc_bio=7,itrc_bio=itemp+ntrc_salt+ntrc_pas+1)
  parameter (iNO3_=itrc_bio, iNH4_=iNO3_+1, iChla=iNO3_+2,
    & iPhy1=iNO3_+3,
    & iZoo1=iNO3_+4,
    & iDet1=iNO3_+5, iDet2=iNO3_+6)
  parameter (NFlux_NewProd = 1,
    & NFlux_RegProd = 2,
    & NFlux_Nitrific = 3,
    & NFlux_Grazing = 4,
    & NFlux_SlopFeed = 5,
    & NFlux_Pmort = 6,
    & NFlux_Zmetab = 7,

```

```

&      NFlux_Zmort  = 8,
&      NFlux_Remind1 = 9,
&      NFlux_Remind2 = 10,
&      NumFluxTermsN = NFlux_Remind2,
&      NumFluxTerms  = NumFluxTermsN,
&      NumGasExcTerms = 0,
&      NFlux_VSinkP1 = 1,
&      NFlux_VSinkD1 = 2,
&      NFlux_VSinkD2 = 3,
&      NumVSinkTerms = 3)
# endif
# if defined BIO_NChlPZD || defined BIO_N2ChlPZD2 || defined PISCES
# ifdef DIAGNOSTICS_BIO
  parameter (ntrc_diabio=NumFluxTerms+
&          NumGasExcTerms+NumVSinkTerms)
# else
  parameter (ntrc_diabio=0)
# endif
# else
  parameter (ntrc_diabio=0)
# endif
# else
  parameter (ntrc_bio=0,ntrc_diabio=0)
# endif /* BIOLOGY */

# ifdef SEDIMENT
! NST      Number of sediment (tracer) size classes
! NLAY     Number of layers in sediment bed
  parameter (NST=2, NLAY=2)
  parameter (ntrc_sed=NST,
&          itr_sed=itemp+ntrc_salt+ntrc_pas+ntrc_bio+1)
  parameter (isand=itr_sed, isilt=isand+1)
# else
  parameter (ntrc_sed=0)
# endif
  parameter (NT=itemp+ntrc_salt+ntrc_pas+ntrc_bio+ntrc_sed)
# ifdef DIAGNOSTICS_TS
# ifdef DIAGNOSTICS_TS_MLD
  parameter (ntrc_diats=15*NT)
# else
  parameter (ntrc_diats=7*NT)
# endif
# else
  parameter (ntrc_diats=0)
# endif
# ifdef DIAGNOSTICS_UV

```

```

    parameter (ntrc_diauv=16)
# else
    parameter (ntrc_diauv=0)
# endif
#endif /*SOLVE3D */
#ifdef STATIONS
    integer NS      ! Number of output stations (if any).
    parameter (NS=5) ! ===== = ===== = ===== = =====
#endif
#ifdef PSOURCE
    integer Msrc    ! Number of point sources, if any
    parameter (Msrc=10) ! ===== = ===== = ===== = =====
#endif
#ifdef FLOATS
    integer Mfloats ! Maximum number of floats
    parameter (Mfloats=32000)! ===== = ===== = =====
#endif
#ifdef STATIONS
    integer Msta    ! Maximum of stations
    parameter (Msta=1000) ! ===== = =====
#endif
#if defined SSH_TIDES || defined UV_TIDES
    integer Ntides
    parameter (Ntides=8)
#endif
!
! Derived dimension parameters.
!
    integer stdout, Np, padd_X,padd_E
#ifdef AGRIF
    common/scrump_deriv_param/padd_X,padd_E
#endif
    parameter (stdout=6, Np=N+1)
#endif AGRIF
!
! Domain subdivision parameters:
! =====

# ifdef MPI
    parameter (Lm=(LLm+NP_XI-1)/NP_XI, Mm=(MMm+NP_ETA-1)/NP_ETA)
# else
    parameter (Lm=LLm, Mm=MMm)
# endif
!
! Derived dimension parameters.
!
```

```

parameter (padd_X=(Lm+2)/2-(Lm+1)/2)
parameter (padd_E=(Mm+2)/2-(Mm+1)/2)
#endif

#if defined AGRIF || defined AUTOTILING
integer NSA, N2d,N3d,N1dXI,N1dETA
parameter (NSA=28)
common /scrump_private_param/ N2d,N3d,N1dXI,N1dETA
#else
integer NSA, N2d,N3d, size_XI,size_ETA
integer se,sse, sz,ssz
parameter (NSA=28)
#endif ALLOW_SINGLE_BLOCK_MODE
parameter (size_XI=6+Lm, size_ETA=6+Mm)
# else
parameter (size_XI=7+(Lm+NSUB_X-1)/NSUB_X)
parameter (size_ETA=7+(Mm+NSUB_E-1)/NSUB_E)
#endif
parameter (sse=size_ETA/Np, ssz=Np/size_ETA)
parameter (se=sse/(sse+ssz), sz=1-se)
parameter (N2d=size_XI*(se*size_ETA+sz*Np))
parameter (N3d=size_XI*size_ETA*Np)
#endif
!
! Number maximum of weights for the barotropic mode
!
integer NWEIGHT
parameter (NWEIGHT=137)

```

### **Namelist.trc.sms**

```

:
&natgas  gasfac = 1.7, igaswind = 1,
         icice=1 ,&end

```

&natext atcco2 = 278., &end

&NATBIO

caco3r = 0.4,  
 dispo0 = 10.e-5,  
 conc0 = 2.e-6,  
 oxymin = 1.e-6,  
 grosip = 0.06,  
 sedlam = 0.,  
 sedlostpoc = 0.,  
 sedlostcal = 0.,  
 sedlostsil = 0.,  
 nrdttre = 1,  
 pislope = 3. ,  
 excret = 0.1 ,  
 wsbio = 3. ,  
 wchl = 0.001 ,  
 wchld = 0.02 ,  
 resrat = 0.03 ,  
 mprat = 0.01 ,  
 mprat = 0.0 ,  
 grazrat = 4. ,  
 xprefc = 1. ,  
 xprefp = 0.2 ,  
 unass = 0.3 ,  
 xkgraz = 20E-6 ,  
 xkmort = 1.E-7 ,  
 xksi1 = 1.5E-6 ,  
 xksi2 = 4.E-6 ,  
 xremip = 0.025 ,  
 xremik = 0.2 ,  
 xsirem = 0.025,  
 xkdoc1 = 1.E-6 ,  
 xkdoc2 = 417.E-6 ,  
 excret2 = 0.1 ,  
 resrat2 = 0.005,  
 mprat2 = 0.01,  
 mpratm = 0.01,  
 mprat2 = 0.05,  
 grazrat2 = 0.7,  
 xprefz = 1 ,  
 xprefpoc = 0.2 ,  
 unass2 = 0.3 ,  
 xkgraz2 = 20.E-6 ,  
 xlam1 = 0.005,  
 ferat3 = 3.E-6,  
 conc1 = 10E-6 ,

```

conc2 = 0.01E-9 ,
conc3 = 0.1E-9 ,
concnh4 = 1.E-7,
concdnh4 = 5.E-7,
nitrif= 0.05,
epsher = 0.33 ,
epsher2 = 0.33 ,
pislope2 = 3. ,
wsbio2 = 50.,
sigma1 = 0.6,
sigma2 = 0.6,
zprefc = 0.,
zprefp = 0.5,
zprefd = 0.5,
chlcnm = 0.033,
chlcdm = 0.05,
fecnm = 15E-6,
fecdm = 20E-6,
sedfeinput = 1E-9,
niter1max=10,
niter2max=15,
&end
&NATSMS
bdustfer = .TRUE.,
briver = .FALSE.,
bndepo = .FALSE.,
bsedinput = .TRUE.,
&end

```

### Trcini.pisces.h

```
! $Id: trcini.pisces.h 707 2011-05-10 14:49:53Z gcambon $
```

```
!
```

```
!=====
```

```

=====
! ROMS_AGRIF is a branch of ROMS developped at IRD and INRIA, in France.
! The two other branches, from UCLA (Shchepetkin et al)
! and Rutgers University (Arango et al), are under MIT/X style license.

```



! ROMS\_AGRIF specific routines (nesting) are under CeCILL-C license.

!

! ROMS\_AGRIF website : <http://roms.mpl.ird.fr>

!=====

=====

!

CC-----

CC

CC           ROUTINE trcini.pisces.h

CC           \*\*\*\*\*

CC

CC PURPOSE :

CC -----

CC    Initialisation of PISCES biological and chemical variables

CC

CC INPUT :

CC ----

CC    common

CC       all the common defined in opa

CC

CC

CC OUTPUT :           : no

CC ----

CC

CC EXTERNAL :

CC -----

CC    p4zche

CC

CC MODIFICATIONS:

CC -----

CC    original : 1988-07 E. MAIER-REIMER   MPI HAMBURG

CC    additions : 1999-10 O. Aumont and C. Le Quere

CC    additions : 2002   O. Aumont (PISCES)

CC

CC    changes for ROMS:

CC       2007   P. Marchesiello

CC

CC-----

CC local declarations

CC =====

INTEGER ichl,iband,mo

INTEGER jpmois,jpan

PARAMETER (jpan=1, jpmois=12)

CHARACTER\*34 clname

```

INTEGER ipi,ipj,ipk,istep(jpmois),itime,istep0(jpan)
INTEGER numriv,numdust,numbath,numdep

REAL xtoto,expide,denitide
REAL ndepo(jpi,jpj),river(jpi,jpj)
REAL riverdoc(jpi,jpj)
REAL dustmp(GLOBAL_2D_ARRAY,12)
REAL zsecond, zlon(jpi,jpj),zlat(jpi,jpj),zlev(jpk),zdate0
REAL zmaskt

c  INCLUDE 'netcdf.inc'
# include "netcdf.inc"
# include "ncscrum.h"
# include "scalars.h"
    integer ncid, varid, dimid, ierr,
    &      lstr, lenstr, nf_fread, nrec_dust, irec
C
C Compute record length for direct access FILE
C (this length depends on 512 for the t3d machine)
C
    rfact = rdt
    rfactr = 1./rfact
    WRITE(numout,*) ' Tracer time step=',rfact,' rdt=',rdt
    rfact2= rfact
    rfact2r = 1./rfact2
    write(numout,*) ' Biology time step=',rfact2
C
C INITIALISE DUST INPUT FROM ATMOSPHERE
C -----
C
! IF (bdustfer) THEN
!   lstr=lenstr(bioname)
!   ierr=nf_open (bioname(1:lstr), nf_nowrite, ncid)
!   if (ierr .ne. nf_noerr) then
!     write(stdout,4) bioname
!   endif
!   ierr=nf_inq_varid (ncid,"dust",varid)
!   if (ierr .ne. nf_noerr) then
!     write(stdout,5) "dust", bioname
!   endif
!   ierr=nf_inq_dimid(ncid,"dust_time",dimid)
!   ierr=nf_inq_dimlen(ncid,dimid,nrec_dust)
!   do irec=1,nrec_dust
!     ierr=nf_fread(dustmp(START_2D_ARRAY,irec), ncid, varid,
!     &             irec, r2dvar)
!     if (ierr .ne. nf_noerr) then

```

```

!       write(stdout,6) "dust", irec
!       endif
!       enddo
!       ierr=nf_close(ncid)
!       write(stdout,'(6x,A,1x,I4)')
!       &          'TRCINI_PISCES -- Read dust deposition '
!#ifndef MPI
!       &          , mynode
!#endif
! 4   format(/, ' TRCINI_PISCES - unable to open forcing netCDF ',1x,A)
! 5   format(/, ' TRCINI_PISCES - unable to find forcing variable: ',A,
!       &          ',14x,'in forcing netCDF file: ',A)
! 6   format(/, ' TRCINI_PISCES - error while reading variable: ',A,2x,
!       &          ' at TIME index = ',i4)
!
!       do irec=1,nrec_dust
!           do j=Jstr,Jend
!               do i=Istr,Iend
!                   dustmo(i,j,irec)=dustmp(i,j,irec)
!               enddo
!           enddo
!       enddo
!
!       ELSE
!
!           do irec=1,nrec_dust
!               do j=Jstr,Jend
!                   do i=Istr,Iend
!                       dustmo(i,j,irec)=0.
!                   enddo
!               enddo
!           enddo
!
!       ENDIF
!C
!C INITIALISE THE NUTRIENT INPUT BY RIVERS
!C -----
!C
!C IF (briver) THEN
!C   clname='river.orca.nc'
!C   CALL flinopen(clname,nizoom,jpi,njzoom,jpj,.false.,ipi,ipj,0
!C $       ,zlon,zlat,zlev,itime,istep0,zdate0,zsecond,numriv)
!C   CALL flinget(numriv,'riverdic',jpidta,jpjdtta,0,jpan,1,
!C $       1,nizoom,jpi,njzoom,jpj,river)
!C   CALL flinget(numriv,'riverdoc',jpidta,jpjdtta,0,jpan,1,
!C $       1,nizoom,jpi,njzoom,jpj,riverdoc)

```

```

C    CALL flinclo(numriv)
C    ELSE
      river(:,:)=0.
      riverdoc(:,:)=0.
C    ENDIF

C
C    INITIALISE THE N INPUT BY DUST
C    -----
C
C    IF (bndepo) THEN
C      cname='ndeposition.orca.nc'
C      CALL flinopen(cname,nizoom,jpi,njzoom,jpj,.false.,ipi,ipj,0
C $      ,zlon,zlat,zlev,itime,istep0,zdate0,zsecond,numdep)
C      CALL flinget(numdep,'ndep',jpidta,jpjdtta,0,jpan,1,
C $      1,nizoom,jpi,njzoom,jpj,ndepo)
C      CALL flinclo(numdep)
C    ELSE
      ndepo(:,:)=0.
C    ENDIF
C
C    Computation of the coastal mask.
C    Computation of an island mask to enhance coastal supply
C    of iron
C    -----
C
C    IF (bsedininput) THEN
      do j=Jstr,Jend
        do i=Istr,Iend
          cmask(i,j,jpk)=1.
        end do
      end do
      do k=1,jpk-1
        do j=Jstr,Jend
          do i=Istr,Iend
            zmaskt=tmask(i+1,j,k)*tmask(i-1,j,k)
&            *tmask(i,j+1,k)*tmask(i,j-1,k)
            if (zmaskt.eq.0) then
              cmask(i,j,k)=1.
            endif
          enddo
        enddo
      enddo
      do k=1,jpk
        do j=Jstr,Jend
          do i=Istr,Iend

```

```

    expide=min(8.,(fsdept(i,j,k)/500.))**(-1.5))
    denitide=-0.9543+0.7662*log(expide)-
&          0.235*log(expide)**2
    cmask(i,j,k)=cmask(i,j,k)*min(1.,exp(denitide)/0.5)
    enddo
  enddo
  enddo
ELSE
  cmask(:, :, :)=0.
ENDIF
C
C  Computation of the total atmospheric supply of Si
C  -----
C
C  sumdepsi=0.
C  DO mo=1,12
C    DO j=2,jpjm1
C      DO i=2,jpim1
C        sumdepsi=sumdepsi+dustmo(i,j,mo)/(12.*rmoss)*8.8
C      &      *0.075/28.1*e1t(i,j)*e2t(i,j)*tmask(i,j,1)
C    END DO
C  END DO
C END DO
C
C  COMPUTATION OF THE N/P RELEASE DUE TO COASTAL RIVERS
C  COMPUTATION OF THE Si RELEASE DUE TO COASTAL RIVERS
C  -----
C
DO j=1,jpj
  DO i=1,jpi
    cotdep(i,j)=river(i,j)*1E9/(12.*raass*e1t(i,j)
&      *e2t(i,j)*fse3t(i,j,1))*tmask(i,j,1)
    rivinp(i,j)=(river(i,j)+riverdoc(i,j))*1E9
&      /(31.6*raass*e1t(i,j)*e2t(i,j)*fse3t(i,j,1))
&      *tmask(i,j,1)
    nitdep(i,j)=7.6*ndepo(i,j)*tmask(i,j,1)/
&      (14E6*raass*fse3t(i,j,1))
  END DO
END DO

C  rivpo4input=0.
C  rivalkinput=0.
C  nitdepinput=0.
C  DO j=2,jpjm1
C    DO i=2,jpim1
C      rivpo4input=rivpo4input+rivinp(i,j)*(e1t(i,j)*e2t(i,j)

```

```

C & *fse3t(i,j,1))*tmask(i,j,1)*raass
C rivalkinput=rivalkinput+cotdep(i,j)*(e1t(i,j)*e2t(i,j)
C & *fse3t(i,j,1))*tmask(i,j,1)*raass
C nitdepinput=nitdepinput+nitdep(i,j)*(e1t(i,j)*e2t(i,j)
C & *fse3t(i,j,1))*tmask(i,j,1)*raass
C END DO
C END DO
C
C Coastal supply of iron
C -----
C
C DO k=1,jpk
C DO j=1,jpj
C DO i=1,jpi
C ironsed(i,j,k)=sedfeinput*cmask(i,j,k)
C & /(fse3t(i,j,k)*rjss)
C END DO
C END DO
C END DO
C
CC-----
CC
CC Initialize biological variables
CC
CC-----
C
C Set biological ratios
C -----
C
C rno3 = (16.+2.)/122.
C po4r = 1./122.
C o2nit = 32./122.
C rdenit = 97.6/16.
C o2ut = 140./122.
C
CC-----
CC
CC Initialize chemical variables
CC
CC-----
C
C set atmospheric [o2] (atm)
C -----
C
C atcox = 0.20946
C hi(:, :, :)=1.E-8

```

C

C Set coefficients for chlorinity and calcite

C -----

C

salchl = 1./1.80655

calcon = 1.03E-2

rtrn=1.E-15

C

C Set coefficients for apparent solubility equilibrium

C of calcite (Ingle, 1800, eq. 6)

C -----

C

akcc1 = -34.452

akcc2 = -39.866

akcc3 = 110.21

akcc4 = -7.5752E-6

C

C

C Set coefficients for seawater pressure correction

C -----

C

devk1(1) = -25.5

devk2(1) = 0.1271

devk3(1) = 0.

devk4(1) = -3.08E-3

devk5(1) = 0.0877E-3

devk1(2) = -15.82

devk2(2) = -0.0219

devk3(2) = 0.

devk4(2) = 1.13E-3

devk5(2) = -0.1475E-3

devk1(3) = -29.48

devk2(3) = 0.1622

devk3(3) = 2.608E-3

devk4(3) = -2.84E-3

devk5(3) = 0.

devk1(4) = -14.51

devk2(4) = 0.1211

devk3(4) = -0.321E-3

devk4(4) = -2.67E-3

devk5(4) = 0.0427E-3

devk1(5) = -23.12

devk2(5) = 0.1758  
 devk3(5) = -2.647E-3  
 devk4(5) = -5.15E-3  
 devk5(5) = 0.09E-3

devk1(6) = -26.57  
 devk2(6) = 0.2020  
 devk3(6) = -3.042E-3  
 devk4(6) = -4.08E-3  
 devk5(6) = 0.0714E-3

devk1(7) = -25.60  
 devk2(7) = 0.2324  
 devk3(7) = -3.6246E-3  
 devk4(7) = -5.13E-3  
 devk5(7) = 0.0794E-3

C

devkst = 0.23  
 devks = 35.4

C

C Set universal gas constants

C -----

C

rgas = 83.131  
 oxyco = 1./22.4144

C

C Set boron constants

C -----

bor1 = 0.000232  
 bor2 = 1./10.811

C

C Set volumetric solubility constants for co2 in mol/kg

C from Weiss and Price (1980)

C -----

C

c00 = -60.2409  
 c01 = 93.4517  
 c02 = 23.3585  
 c03 = 0.023517  
 c04 = -0.023656  
 c05 = 0.0047036

ca0 = -162.8301  
 ca1 = 218.2968  
 ca2 = 90.9241  
 ca3 = -1.47696



ca4 = 0.025695  
ca5 = -0.025225  
ca6 = 0.0049867

C

C Set coeff. for 1. dissoc. of carbonic acid (Millero, 1995)

C -----

C

c10 = -3670.7  
c11 = 62.008  
c12 = -9.7944  
c13 = 0.0118  
c14 = -0.000116

C

C Set coeff. for 2. dissoc. of carbonic acid (Millero, 1995)

C -----

C

c20 = -1394.7  
c21 = -4.777  
c22 = 0.0184  
c23 = -0.000118

C

C Set coeff. for 1. dissoc. of boric acid (Dickson and Goyet, 1994)

C -----

C

cb0 = -8966.90  
cb1 = -2890.53  
cb2 = -77.942  
cb3 = 1.728  
cb4 = -0.0996  
cb5 = 148.0248  
cb6 = 137.1942  
cb7 = 1.62142  
cb8 = -24.4344  
cb9 = -25.085  
cb10 = -0.2474  
cb11 = 0.053105

C

C Set coeff. for dissoc. of water (Dickson and Riley, 1979,  
C eq. 7, coefficient cw2 corrected from 0.9415 to 0.09415  
C after pers. commun. to B. Bacastow, 1988)

C -----

C

cw0 = -13847.26  
cw1 = 148.9652  
cw2 = -23.6521  
cw3 = 118.67

cw4 = -5.977  
cw5 = 1.0495  
cw6 = -0.01615

C

C Set coeff. for dissoc. of phosphate (Millero (1974))

C -----

C

cp10 = 115.525  
cp11 = -4576.752  
cp12 = -18.453  
cp13 = -106.736  
cp14 = 0.69171  
cp15 = -0.65643  
cp16 = -0.01844

cp20 = 172.0883  
cp21 = -8814.715  
cp22 = -27.927  
cp23 = -160.340  
cp24 = 1.3566  
cp25 = 0.37335  
cp26 = -0.05778

cp30 = -18.141  
cp31 = -3070.75  
cp32 = 17.27039  
cp33 = 2.81197  
cp34 = -44.99486  
cp35 = -0.09984

C

C Set coeff. for dissoc. of phosphate (Millero (1974))

C -----

C

cs10 = 117.385  
cs11 = -8904.2  
cs12 = -19.334  
cs13 = -458.79  
cs14 = 3.5913  
cs15 = 188.74  
cs16 = -1.5998  
cs17 = -12.1652  
cs18 = 0.07871  
cs19 = -0.001005

C

C Set volumetric solubility constants for o2 in ml/l (Weiss, 1970)

C -----

```

C
  ox0 = -58.3877
  ox1 = 85.8079
  ox2 = 23.8439
  ox3 = -0.034892
  ox4 = 0.015568
  ox5 = -0.0019387
C
C FROM THE NEW BIOOPTIC MODEL PROPOSED JM ANDRE, WE READ HERE
C A PRECOMPUTED ARRAY CORRESPONDING TO THE ATTENUATION
C COEFFICIENT
C -----
C
c   open(49,file='kRGB61.txt',form='formatted')
c   do ichl=1,61
c     READ(49,*) xtoto,(xkrbg(iband,ichl),iband = 1,3)
c   end do
c   close(49)
C
C
C Call p4zche to initialize the chemical constants
C -----
C
  CALL p4zche(Istr,Iend,Jstr,Jend)
C
C
C Initialize a counter for the computation of chemistry
C -----
C
  ndayflxtr=0
C
  WRITE(numout,*) ' Initialisation of PISCES done'

```

## **Anexo VIII. Publicaciones derivadas del proyecto**



---

## 7<sup>th</sup> MEETING OF THE SCIENTIFIC COMMITTEE

*La Havana, Cuba, 7 to 12 October 2019*

SC7-HM03

Spatio-temporal distribution pattern of jack mackerel off South-central Chile

*Chile*

## **Spatio-temporal distribution pattern of Chilean jack mackerel (*Trachurus murphyi*) fishing grounds and environmental variability off southern-central Chile**

Sebastián Vásquez<sup>1</sup>, Aquiles Sepúlveda<sup>1</sup> & Sergio Nuñez<sup>1</sup>

### **Abstract**

The Chilean jack mackerel displays a wide spatial distribution in the Southeast Pacific, extending from the coast line of South America to New Zealand and Tasmania. Within this broad distribution, this species supports an important fishery that reaches its maximum catch levels off southern-central Chile where both the Chilean purse-seine industrial fleet and the international fleet operate. From statistical fishing data of the Chilean industrial fleet, the spatio-temporal variability of the Chilean jack mackerel fishing grounds in the 1995-2019 period was described. For the same region, environmental variability was analyzed using satellite information. The spatio-temporal distribution of Chilean jack mackerel catches revealed marked differences in the seasonal pattern of catches and in the offshore extension of the purse-seine fleet. According to the above, three periods were identified: i) 1995-2001 characterized by catches throughout the year, an offshore extension during July and August that did not exceed 900 km and an average annual catch of 2, 1 million tons; ii) 2002-2011, with catches throughout the year, mostly in the first half and a large offshore extension of the fleet from March to August reaching up to 1800 kilometers offshore and an average annual catch of around 900 thousand tons, and finally; iii) 2012-2019 characterized by concentrated catches in the first half, absence of fishing activity between September and November, with an offshore extension that did not exceed 600 km and average catches around 290 thousand tons. The environmental variability revealed a highly dynamic habitat influenced by El Niño/La Niña events, and characterized by strong spatial gradients mainly associated with a coastal zone of highly productive upwelling, seasonal migration of the Pacific anticyclone and the presence of coastal transition zone with strong mesoscale activity. Interannually, a period of negative anomalies in the sea level height and primary production and positive in sea surface temperature between 1995 and 2002, followed by a period of neutral activity between 2003 and 2013, and a period of positive anomalies of the sea level height, low kinetic activity and higher productivity between 2014 and 2019.

## 1. Introduction

Chilean jack mackerel (CHJM; *Trachurus murphyi*, Nichols) from the southern Pacific constitutes one of the most important pelagic fisheries in the world. Over the last 16 years, total landings have declined from a maximum of 4.4 million tons in 1994 to a minimum of 353,000 tons in 2013, after which, a slight increase has been observed to reach 531,000 tons in 2018 (Figure 1). Chilean fishery authorities set a minimum legal size of 26 cm in 1982, closed the fishery to new boats in 1990, set an annual quota in 1999, and imposed a total allowable catch per vessel in 2003 (Figure 1). The South Pacific Regional Fisheries Management Organization (SPRFMO) is an inter-governmental group committed to the long-term conservation and sustainable use of fishery resources in the South Pacific Ocean (<https://www.sprfmo.int/>). The SPRFMO Convention has applied to the high seas of the South Pacific since 2009. Jack mackerel is one of the commercial resources managed by the SPRFMO, which is composed of countries with fishing interests in the South Pacific jack mackerel fishery.

CHJM is a highly migratory, pelagic species that is widely distributed in the ESP off Chile and Peru, reaching across to New Zealand and Tasmania (Bailey, 1989; Serra, 1991; Elizarov et al., 1993; Arcos & Gretchina, 1994; Suda et al., 1995; Gretchina, 1998; Arcos et al., 2001). The wide distribution of this species in the region and its highly migratory behaviour make it difficult to gather evidence supporting specific hypotheses about its spatial dynamics and population structure. However, it is recognized that CHJM exhibits a strong seasonal migration pattern (Serra 1991, Arcos et al. 2001), showing an offshore migration towards the reproductive oceanic habitat in early spring which extend along the southeaster Pacific Ocean (SPO), but mainly in oceanic waters off central Chile from the 82°W to beyond 90°W (Cubillos *et al.* 2008; Núñez *et al.*, 2008); and an onshore migration during the summer linked to coastal food availability. During fall and winter, jack mackerel aggregates in compact schools in coastal and oceanic waters off central Chile, being more available for the Chilean purse-seine fleet (Arancibia *et al.* 1995). Spawning occurs mainly between October and December, although it can extend from September to February (Grechina et al. 1998). In this context, CHJM exploits a wide range of environmental conditions since it occupies highly heterogeneous regions in terms of oceanographic and prey conditions (Bertrand et al., 2006; Alegre et al., 2015).

The environmental variability in the Southeastern Pacific Ocean (SPO) could be mainly explained by intra-annual fluctuations associated to the coastal upwelling seasonality (Strub et al. 1998; Leth & Shaffer 2001, Rutland et al. 2002), inter-annual variability related to warm/cold alternated events (El Niño/La Niña) (Shaffer et al. 1999, Hormazábal et al. 2001, Escribano et al. 2004), including long equatorial trapped Kelvin waves, coastal

trapped waves and Rossby waves (Strub et al. 1998), and decadal variability (Klyashtorin 1998). It is also suggested that mesoscale structures (eddies, meanders and fronts) can play an important role in pelagic fish abundance and distribution (Nakata et al. 2000, Hormazábal et al. 2004). Despite this environmental variability, a suitable CHJM habitat has been proposed, which is strongly related with thermal and productivity conditions associated with the presence of the subtropical front, which extends from the oceanic region in front of south-central Chile to the coasts of north-central Chile, Peru and Ecuador (Bertrand et al., 2016, Vasquez *et al.*, 2013). However, within this broad and spatially continuous suitable habitat, it is suggested that specific changes in the spatial-temporal pattern of CHJM may occur in response to different population sizes or local environmental conditions (Gretchina et al., 2016).

In this context, the objective of this contribution is to describe the variability of the spatio-temporal distribution pattern of jack mackerel fishing areas off central-southern Chile, where historically the greatest catches have been reported, and to describe the environmental variability of this region in the period 1995-2019. Owing to the high seasonal and interannual variability of environmental conditions in the study area, we focus both on interannual and intra-annual patterns of variability.

## **2. Methods**

### *2.1. Fishery data*

Chilean jack mackerel spatial information were obtained from historical catch data collected by Instituto de Fomento Pesquero (IFOP) and Instituto de Investigación Pesquera (INPESCA), which through a joint work generated a single database of georeferenced catches from 1995 to 2019, which increased the number of records and eliminated those that were duplicated. Thus, for determining the fishing area locations and CHJM catches, three different data sources were used: fishing set statistics obtained from fishing logbook for each vessel, the geographical position of each vessel reported 2 times daily, the landings (in tonnes) and the onboard observer reports. The total database consisted of 29,351 spatially referenced fishing sets associated with the catch weight. In order to describe the spatial pattern of CHJM, the catch data on each fishing ground was re-sampled by using a 10 x 10 km regular square.

### *2.2. Environmental data*

On the basis of their spatio-temporal availability, local and global relevance according to previous work and contribution to preliminary analyses we selected the main habitat variables related to hydrographic conditions and primary productivity. Unfortunately the availability of biotic and abiotic data on the horizontal and vertical planes over the CHJM



distribution range is scarce. As a consequence satellite environmental data (Table 1) were used in order to describe CHJM habitat variability off central-southern Chile: sea surface temperature (SST, in °C), sea surface chlorophyll-a concentration (CHL-a, in  $\text{mg m}^{-3}$ ) as a *proxy* of primary production, sea level anomaly (in cm), eddy kinetic energy (EKE, in  $\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$ ) as a *proxy* of mesoscale activity and wind induced turbulence (WIT, in  $\text{m}^3 \text{s}^{-3}$ ) as a proxy of water column stability.

### 2.3. Statistical procedures

In order to build a matrix for modeling purposes, for each georeferenced record of jack mackerel, the environmental variables Sea Surface Temperature, Chlorophyll-a and Eddy Kinetic Energy were obtained in a monthly temporal resolution. From this matrix, Generalized Additive Models with a Gaussian error distribution that had a identity function was used to examine the effects of environmental factors on catch distributions considering the three temporal strata identified above. Smoothness parameters were estimated with generalized cross-validation (GCV). Effective covariates were selected following Wood (2001). Covariates are considered no-informative if the following three criteria is met: (i) the estimated degrees of freedom is close to 1; (ii) the confidence interval is zero everywhere; and (iii) the GCV score decreased when the term is dropped. This GAM-based analysis used the “mgcv” package (version 1.30-27) of the R program (R Development Core Team, 2016). “Deviance explained” (analogous to variance in a linear regression), adjusted  $r^2$ , and GCV scores were calculated. The shapes of the functional forms for the selected covariates were plotted. When the slopes of the functional forms are positive, the covariates are related positively to the dependent variables, or vice versa.

## 3. Results

### 3.1. Spatio-temporal variability of CHJM fishing grounds

The interannual variability of the spatial distribution of the purse-seine fleet oriented to Chilean jack mackerel catches and its annual landing levels is shown in Figure 2. This spatio-temporal pattern revealed three periods with different spatial configurations:

i) period 1995-2002: in our study area, this period corresponds to an Olympic Race (OR) regime, with incentives to maximize catch volume per trip in the shortest possible time which promoted high landing levels, with a maximum peak in 1995 with 3.8 million tons. Regardless of the prevalence of restricted entry regulations, the absence of fishing quotas (global and individual) and the risk of fishing closure prompted this behavior (see Figure 1). Despite these high landing levels, the spatial distribution of the catch revealed high levels of jack mackerel availability within the exclusive economic zone of Chile, with over 50% of the records in the coastal region ( $> 75^\circ\text{W}$ ), with high yields per unit area (Figure 2).

Seasonally, this period was characterized by catches throughout the year with an offshore extension during July and August that did not exceed 900 km (Figure 3a). The above suggests a high carrying capacity of the coastal system off central-southern Chile to support these high biomass, considering that fishing activity mostly occurs during the CHJM feeding period.

ii) period 2003-2011: This period was characterized by a marked decline in landings (1.3 million tons in 2003) and corresponds to the beginning of the regulation through maximum catch quotas per vessel owner and with the increase in the activity of the international fleet outside Chile's juridical waters (see Figure 1). This scheme started in February 2001 and distributed percentage-shares upon the annual total allowable quota (TAC) to vessels with valid fishing permits for this fishery. Per vessel TAC shares were initially allocated by weighting historical catch and fishing capacity records per vessel. Under this scenario of lower landings and new administrative regulation, catches still occurred throughout the year, mostly in the first half and a large offshore extension of the fleet from March to August. At the same time, jack mackerel availability decreased in the coastal region of central-southern Chile, encouraging an offshore displacement of the fleet, reaching beyond 1800 km of offshore extension in 2009, with low yields per unit area (Figure 2). Seasonally, this period was characterized by catches throughout the year with an offshore extension during July and August that did not exceed 900 km (Figure 3b).

iii) period 2012-2013: This period is characterized by a stability of landings under low population sizes, with a slight increase in recent years, in response to increases in recruitment strength. From an administrative point of view, this period coincides with the formalization of the South Pacific Regional Fisheries Management Organization (SPRFMO), an inter-governmental group committed to the long-term conservation and sustainable use of fishery resources in the South Pacific Ocean (Figure 1). The SPRFMO is responsible for the integrated fishing management of jack mackerel since 2001 and set the maximum global catch quotas for the entire southern Pacific. In this recent scenario, the yield per unit area in jack mackerel catches has increased in the central-southern region of Chile, and fishing activity has not extended beyond 600 km offshore (Figure 2). In addition, seasonally catches have been concentrated between December and April, mostly in the coastal region (<250 km offshore) and with a season without fishing more extensive than the previous periods (September-November) (Figure 3c). In 2019, this scenario has been consolidated, with very concentrated catches near the main landing ports, fishing areas that did not exceed 200 km offshore and high yields per unit area. The above has promoted a 90% compliance of the fishing quota during the first semester.

### 3.2. *Environmental variability*

In consideration of the spatio-temporal changes of fishing areas pattern, as a *proxy* for the jack mackerel spatial distribution, one of the open questions is what is the role of habitat

conditions in the displacement of mass centers of jack mackerel population in the southeastern Pacific. In order to analyze the seasonal and interannual variability in the habitat conditions of CHJM, an approach based on satellite information was used.

The sea surface temperature shows a marked seasonality in the southern-central region off Chile, which is related to changes in solar radiation and the seasonal movement of the subtropical front in its summer migration towards the pole (Figure 4b). The amplitude of the seasonal signal seems to be related to the variability of the equatorial signal of the El Niño index, which shows alternating patterns throughout the study period promoting dominance of warm and cold periods (Figure 4a). The ENSO index for El Niño 3-4 region shows the alternated warm-cold events (El Niño/La Niña) in the last two decades, emphasizing warm El Niño events during 1987, 1992, 1997-98, 2003 and 2015-2016, and also the cold La Niña events during 1989, 1999 and 2008.

Because the coastal upwelling, a lower sea surface temperature and a higher chlorophyll concentration are observed near the coast during December-February (Figure 4b). These centers of high biological productivity are extended offshore as a result of intense mesoscale activity in the coastal transition zone, promoting maximum winter chlorophyll concentration in the oceanic region, where the persistence of meso-scale eddies traveling northwestward, promotes strong gradients of kinetic energy (Figure 4c). As described above, CHJM fishing grounds shows a seasonal variation that include fishing activity near the coast during austral summer and a gradual offshore displacement to reach its maximum expansion during austral winter (Figure 4d). The sea level anomaly shows a clear interannual fluctuation in the 1993-2019 period, evidencing negative anomalies during 1993-1996 and 2000-2003, and positive anomalies for 1997-1999 and particularly for 2014-2019 (Figure 5b), which is positively correlated with the ENSO index calculated for the El Niño 3.4 region with 9-18 months lag. The time-series for EKE in CHJM fishing habitat revealed positive anomalies during 1995-2000 (excepting 1998) and 2006-2008 and a marked period of negative anomalies since 2016, revealing high EKE periods linked to high mesoscale eddies and meanders activity (Figura 5c), revealing a high(low) dynamic of these mesoscale structures in central Chile associated to El Niño(La Niña) events in the tropical Pacific.

The SST anomaly showed an alternate of warm/cold signal in the CHJM fishing habitat. Figure 5d shows warmer periods for 1995-1999, and colder period between 1991 and 1994; from 2000 to 2014 a neutral situation with a predominance of negative anomalies was observed. From 2015 positive anomalies were observed associated to a strong positive signal of ENSO index in the tropical Pacific. The oceanic chlorophyll concentration for 1997-2019 time-series off central Chile, also showed an interannual fluctuation characterized by negative anomalies during 1997-2003, followed by a neutral period

between 2004 y 2011, a marked positive period between 2011 and 2016 and negative anomalies from 2017 until 2019 (Figure 5e).

Figures 6 to 8 show the interannual zonal variability of the environmental conditions and the location of the centers of mass of the mackerel fishing areas. These analyzes reveal a low correspondence between habitat variations and changes in jack mackerel fishing areas, suggesting a high plasticity of the species against environmental changes. However, more detailed studies regarding the mechanisms behind this spatial dynamics are required.

### *3.3. Statistical procedures*

Selected GAMs for each species are summarized in Table 2. The variance explained for each of the models tested (periods) was 26.2%, 22.9% and 19.0% respectively, suggesting the existence of other forcing, in addition to those considered, that determine the spatial distribution of jack mackerel catches. However, all covariates were statistically significant to explain jack mackerel catches. Selected covariates were the same for the considered periods: 1994-2001, 2002-2011 and 2012-2019. The shapes of the functional forms for selected covariates of each selected period are illustrated in Figure 8. These indicate that jack mackerel, regardless of the period, displayed non-linear responses to the covariates. For instance, jack mackerel catch biomass is related non-linearly to longitude (W): for the period 1994-2001 it shows a positive response with the distance from the coast, suggesting higher offshore levels, however the fishing grounds were recorded near the coast; for the period 2002-2011 it showed an almost-monotonic increase with the distance from the coast increasing offshore catch biomass levels, while for the period 2012-2019 it showed a dome shape centered at 76°W. In relation to latitude, jack mackerel catches showed a dome-shaped relationship in the period 1994-2001, with higher levels around 33°S and a secondary maximum south of 40°S; for the period 2002-2011, a negative dome relationship was observed, with lower levels of capture between 32° and 37°S and maximum at the edges of the latitudinal distribution; finally, in the period 2012-2019, a positive relationship is observed north of 35°S.

In relation to environmental variables, the period 1995-2001 jack mackerel catches showed a dome-shaped relationship with respect to temperature with maximums around 16°C; while in 2002-2011 the highest levels of capture were recorded above 14°C increasing towards warmer waters, similar to what was observed in the period 2012-2019, although in the latter the range was slightly higher. In the case of sea surface chlorophyll, the relationships regarding jack mackerel catches were less informative, however they suggest a positive response in waters with higher productivity associated with the coastal upwelling region during the period 1995-2001; while in the period 2002-2011 this association was reversed towards waters of lower productivity associated with the oceanic region; In the

2012-2019 period, no clear signal was observed regarding chlorophyll, although it suggests an association with intermediate levels of productivity. Finally, the relationship between catches of jack mackerel and eddy kinetic energy showed a positive response with respect to intermediate levels in the period 1995-2001, while for the periods 2002-2011 and 2012-2019 they showed an increase under high levels of eddy kinetic energy, suggesting a positive association of jack mackerel catches with energetic mesoscale structures.

## 5. References

- Alegre, A., Bertrand, A., Espino, M., Espinoza, P., Dioses, T., Ñiquen, M., Navarro, I., Simier, M., Ménard, F., 2015. Diet diversity of jack and chub mackerels and ecosystem changes in the northern Humboldt Current system: a long-term study. *Progress in Oceanography* 137, 299–313. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pocean.2015.07.010>.
- Arancibia, H., Cubillos, L., Arcos, D., Grechina, A., Vilugrón, L., 1995. The fishery of horse mackerel *Trachurus symmetricus murphyi* in the South Pacific Ocean. With emphasis on the fishery unit off Central Chile. *Scientia Marina*. 59(2): 113–117.
- Arcos, D. A., Cubillos, L. A., and Nuñez, S. P. 2001. The jack mackerel fishery and El Niño 1997–98 effects off Chile. *Progress in Oceanography* 49: 597–617.
- Arcos, D.F. and Grechina, A (eds.), 1994. *Biología y pesca comercial del jurel en el Pacífico Sur*. Editorial Anibal Pinto, Concepción, Chile, 203 p.
- Bailey, K. 1989. Description and surface distribution of juvenile Peruvian jack mackerel, *Trachurus murphyi*, Nichols from the Subtropical Convergence Zone of Central South Pacific. *Fishery Bulletin US* 87: 273–278.
- Bertrand, A., Barbieri, M., Gerlotto, F., Leiva, F., Córdova, J., 2006. Determinism and plasticity of fish schooling behaviour as exemplified by the South Pacific jack mackerel *Trachurus murphyi*. *Marine Ecology Progress Series* 311, 145–156.
- Cubillos, L. A., Paramo, J., Ruiz, P., Nuñez, S., and Sepúlveda, A. 2008. The spatial structure of the oceanic spawning of jack mackerel (*Trachurus murphyi*) off central Chile (1998–2001). *Fisheries Research* 90: 261–270.
- Escribano, R., G. Daneri, L. Farías, V. A. Gallardo, H.E. González, D. Gutierrez, C. Lange, C. E. Morales, O. Pizarro, O. Ulloa & M. Braun. 2004. Biological and chemical consequences of the 1997–1998 El Niño in the Chilean coastal upwelling system: a synthesis. *Deep-Sea Research II* 51
- Hormazábal S., S. Núñez, D. Arcos, F. Espíndola & G. Yuras. 2004. Mesoscale eddies and pelagic fishery off central Chile (33–40°S). *Remote Sensing of Oceans, Coasts and the Atmosphere: Developments and Applications*. Pan Ocean Remote Sensing Conference, 2004. University of Concepción, Nov. 29 – Dec. 03, 2004. Concepción-Chile.
- Hormazábal, S., G. Shaffer, J. Letelier & O. Ulloa. 2001. Local and remote forcing of sea surface temperature in the coastal upwelling system off Chile. *Journal of Geophysical Research*, 106, 16657–16672.
- Klyashtorin, L. 1998. Long-term climate change and main commercial fish production in the Atlantic and Pacific. *Fish. Res.* 37:115–125.
- Leth, O. & G. Shaffer. 2001. A Numerical Study of the Seasonal Variability in the Circulation off Central Chile. *J. Geophysical Res.*, vol. 106, no. C10, 22,229 – 22,248, October

Nakata, H., S. Kimura, Y. Okazaki & A. Kasai. 2000. Implications of meso-scale eddies caused by frontal disturbances of the Kuroshio Current for anchovy recruitment. *ICES J. Mar. Sci.* 57: 143-152.

Núñez, S., S. Vásquez, P. Ruiz and A. Sepúlveda. 2008. Distribution of early developmental stages of jack mackerel in the Southeastern Pacific Ocean. Paper presented to the SPRFMO Chilean Jack Mackerel Workshop, Santiago, 30 June – 4 July 2008.

Rutllant, J. & V. Montecino, 2002. Multiscale upwelling forcing cycles and biological response off north-central Chile. *Revista Chilena de Historia Natural.* 75:217-231.

Serra, R. 1991. Important life history aspects of the Chilean jack mackerel, *Trachurus symmetricus murphyi*. *Investigaciones Pesqueras Chile* 36: 67–83.

Strub, P.T., J.M. Mesías, V. Montecino, J. Rutland & S. Salinas. 1998. Coastal ocean circulation off western South America. In: *The Sea* A.R. Robinson & K.H. Brink (eds). Vol. 11, p: 273-313.

Strub, P.T., J.M. Mesías, V. Montecino, J. Rutland & S. Salinas. 1998. Coastal ocean circulation off western South America. In: *The Sea* A.R. Robinson & K.H. Brink (eds). Vol. 11, p: 273-313.

Suda, Y., Machii, T., and Orrego, H. 1995. Some fishery and biological aspects of jack mackerels, genus *Trachurus* (Carangidae). *Scientia Marina* 59: 571–580.

Vásquez, S., Correa-Ramírez, M., Parada, C., and Sepúlveda, A. 2013. Influence of oceanographic processes on jack mackerel (*Trachurus murphyi*) larval distribution and population structure off Chile. *ICES Journal of Marine Sciences* 70: 1097–1107.

## 6. Tables

Table 1. Satellite data used for describe Chilean jack mackerel habitat off central-southern Chile.

| Parameter            | Sensor     | Temporal resolution | Spatial resolution | Period            | Data source   |
|----------------------|------------|---------------------|--------------------|-------------------|---|
| SST                  | Pathfinder | Monthly             | 9 km               | 1995 Jan-2003 Dec | <a href="https://www.ncep.noaa.gov">https://www.ncep.noaa.gov</a>                 |
| SST                  | MODIS-Aqua | Monthly             | 4 km               | 2003 Jan-2019 Jul | <a href="https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/">https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/</a> |
| CHL-a                | Copernicus | Monthly             | 4 km               | 1997 Sep-2019 Jul | <a href="https://www.copernicus.eu/">https://www.copernicus.eu/</a>               |
| Sea level anomaly    | AVISO      | Daily               | 1/4 deg            | 1995 Jan-2019 Jul | <a href="https://www.aviso.oifrance.fr/">https://www.aviso.oifrance.fr/</a>       |
| Geostrophic velocity | AVISO      | Daily               | 1/4 deg            | 1995 Jan-2019 Jul | <a href="https://www.aviso.oifrance.fr/">https://www.aviso.oifrance.fr/</a>       |
| Wind velocity        | CCMP       | Monthly             | 1/4 deg            | 1995 Jan-2019 Jul | <a href="http://www.remotesensing.com">http://www.remotesensing.com</a>           |

Table 2. GAM-based models for jack mackerel catch distribution.

*Jack mackerel catch spatial distribution from central southern Chile*

| Parameter               | period 1995-2001 |         | period 2002-2011 |         | period 2012-2019 |         |
|-------------------------|------------------|---------|------------------|---------|------------------|---------|
|                         | d.f.             | p-value | d.f.             | p-value | d.f.             | p-value |
| Family                  | Gaussian         |         | Gaussian         |         | Gaussian         |         |
| Link function           | Identity         |         | Identity         |         | Identity         |         |
| Adjusted r2             | 0.25             |         | 0.22             |         | 0.17             |         |
| Deviance explained      | 26.2             |         | 22.9             |         | 19.0             |         |
| GCV score               | 88.9             |         | 74.8             |         | 46.8             |         |
| Covariates              |                  |         |                  |         |                  |         |
| Longitude               | 25.50            | <0.001  | 28.83            | <0.001  | 24.79            | <0.001  |
| Latitude                | 28.27            | <0.001  | 28.89            | <0.001  | 25.7             | <0.001  |
| Sea Surface Temperature | 23.14            | <0.001  | 28.76            | <0.001  | 28.53            | <0.001  |
| Sea surface Chlorophyll | 11.45            | <0.001  | 20.75            | <0.001  | 20.7             | <0.001  |
| Eddy Kinetic Energy     | 8.82             | <0.001  | 15.47            | <0.001  | 21.95            | <0.01   |



## 7. Figures

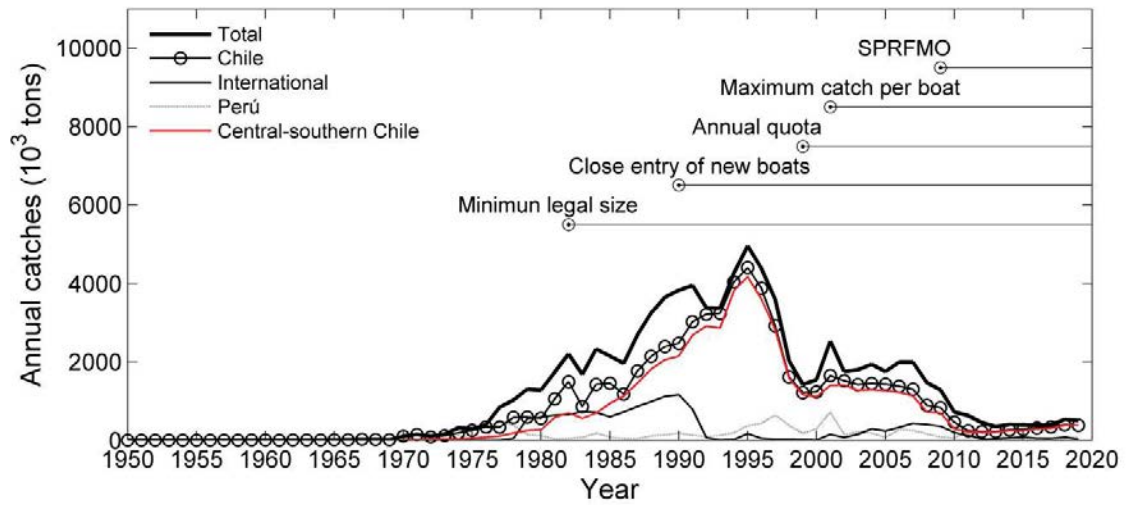


Figure 1. Annual jack mackerel catches carried out by Chilean, Peruvian, and international fleets (database of the Servicio Nacional de Pesca of Chile, Instituto de Investigación Pesquera, and the Food and Agriculture Organization), and the historical Chilean fishery management regulations and bans implemented since 1982. Red line corresponds to the catches of the purse-seine fleet of the central-southern Chile.

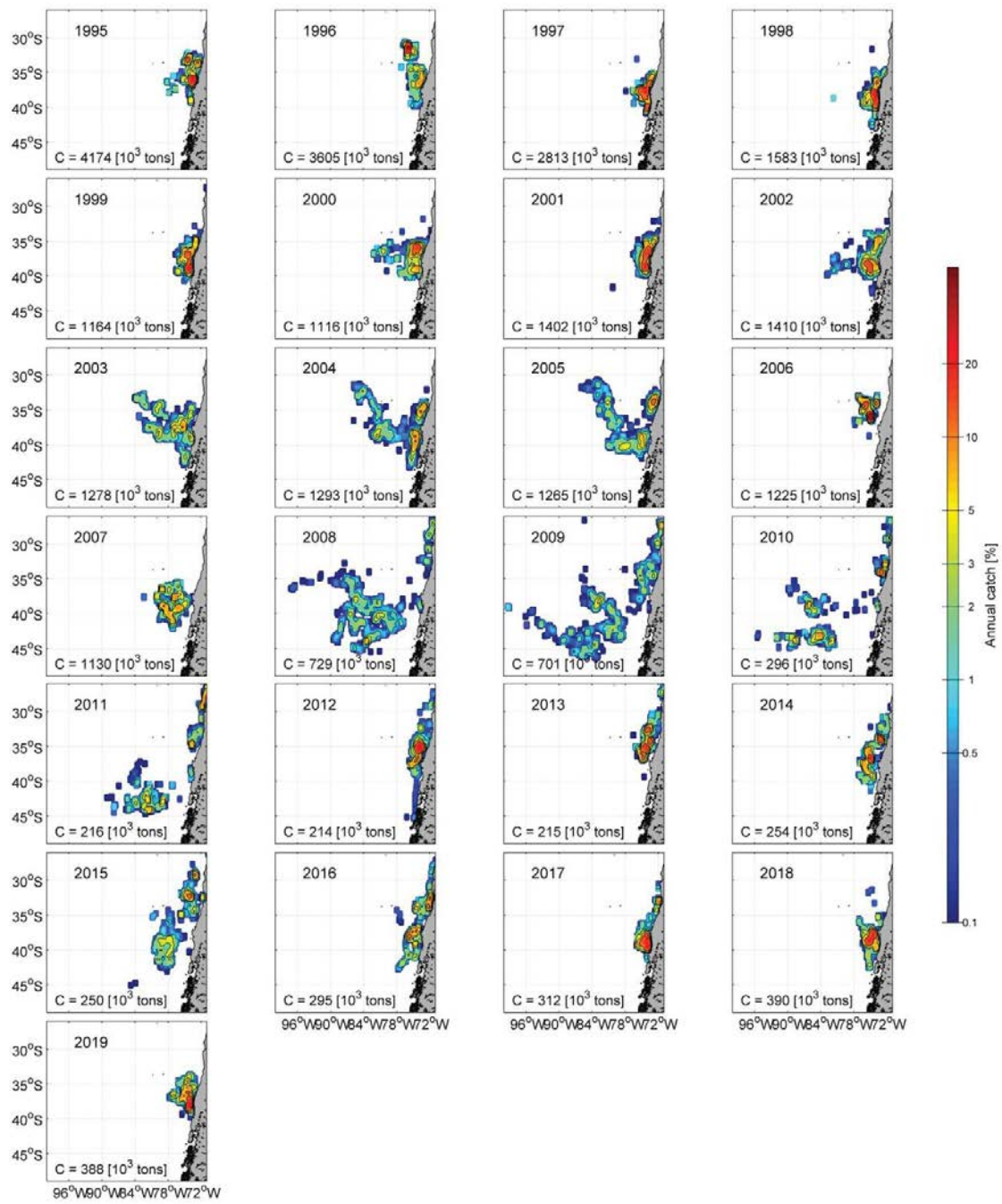


Figure 2. Spatio-temporal variability of Chilean jack mackerel annual catches (%) in central-southern Chile, period 1995-2019. The total annual catch of the central-southern Chile fleet is indicated in each panel.

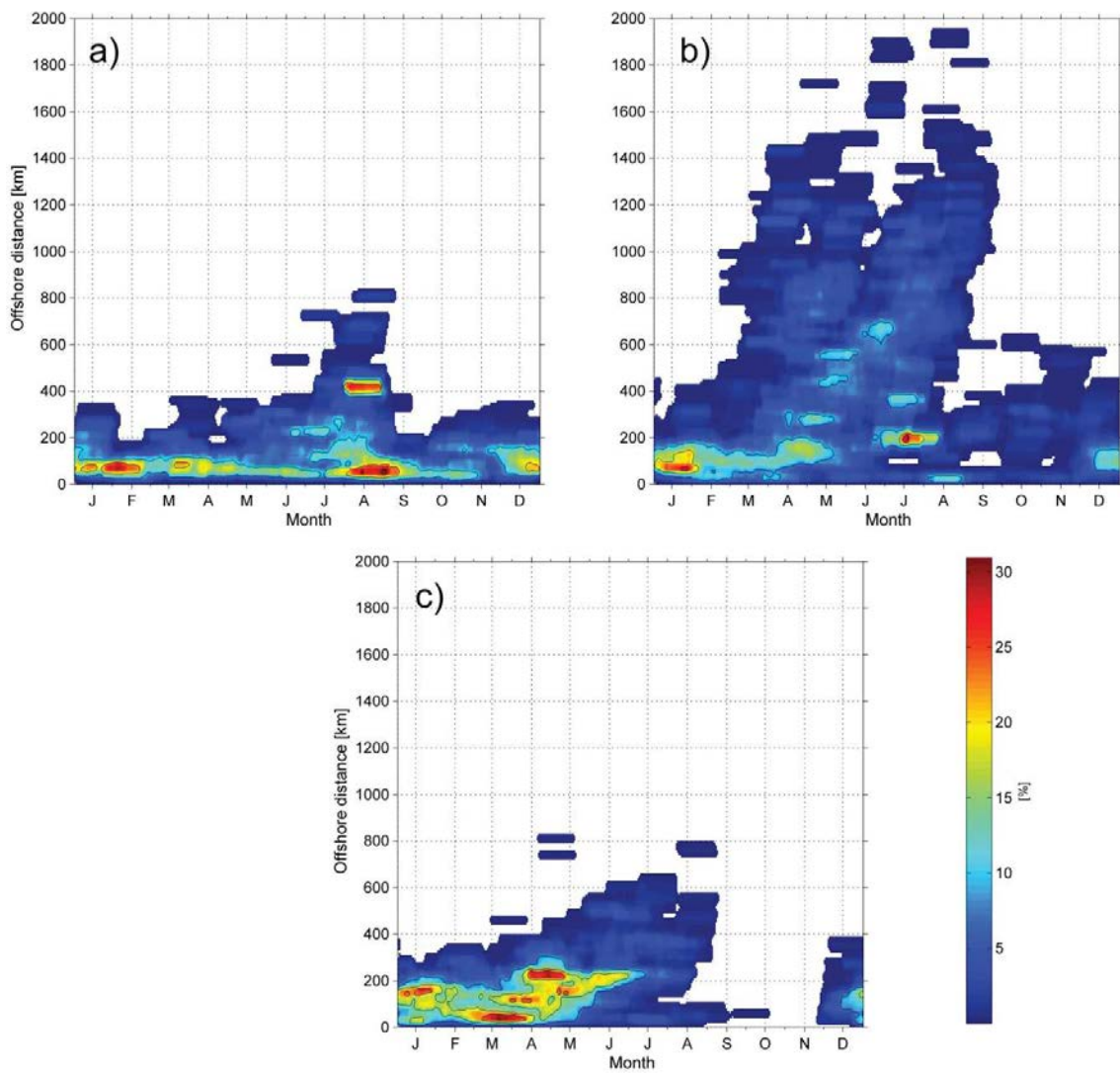


Figure 3. Climatology of the offshore extension of Chilean jack mackerel catches in the central south zone of Chile for the periods: a) 1995-2001; b) 2002-2011 and c) 2012-2019.

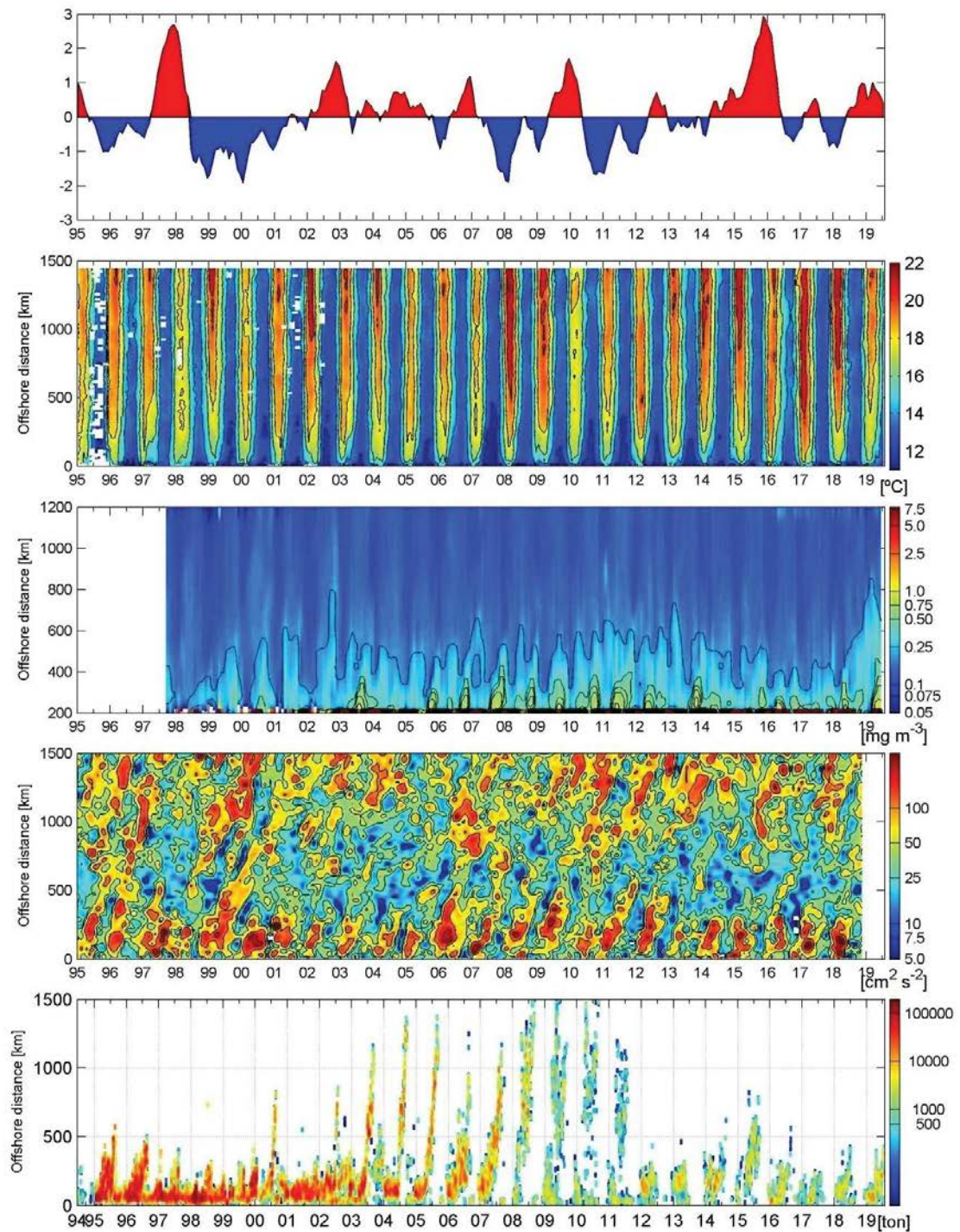


Figure 4. Space-time Hovmöller diagram for Chilean jack mackerel catches and environmental variables considering the 38°S band. a) region 3-4 ENSO index, b) sea surface temperature (°C), c) chlorophyll concentration (mg m<sup>-3</sup>), d) Eddy kinetic energy (cm<sup>2</sup> s<sup>-2</sup>), and e) Chilean jack mackerel catches (tons).

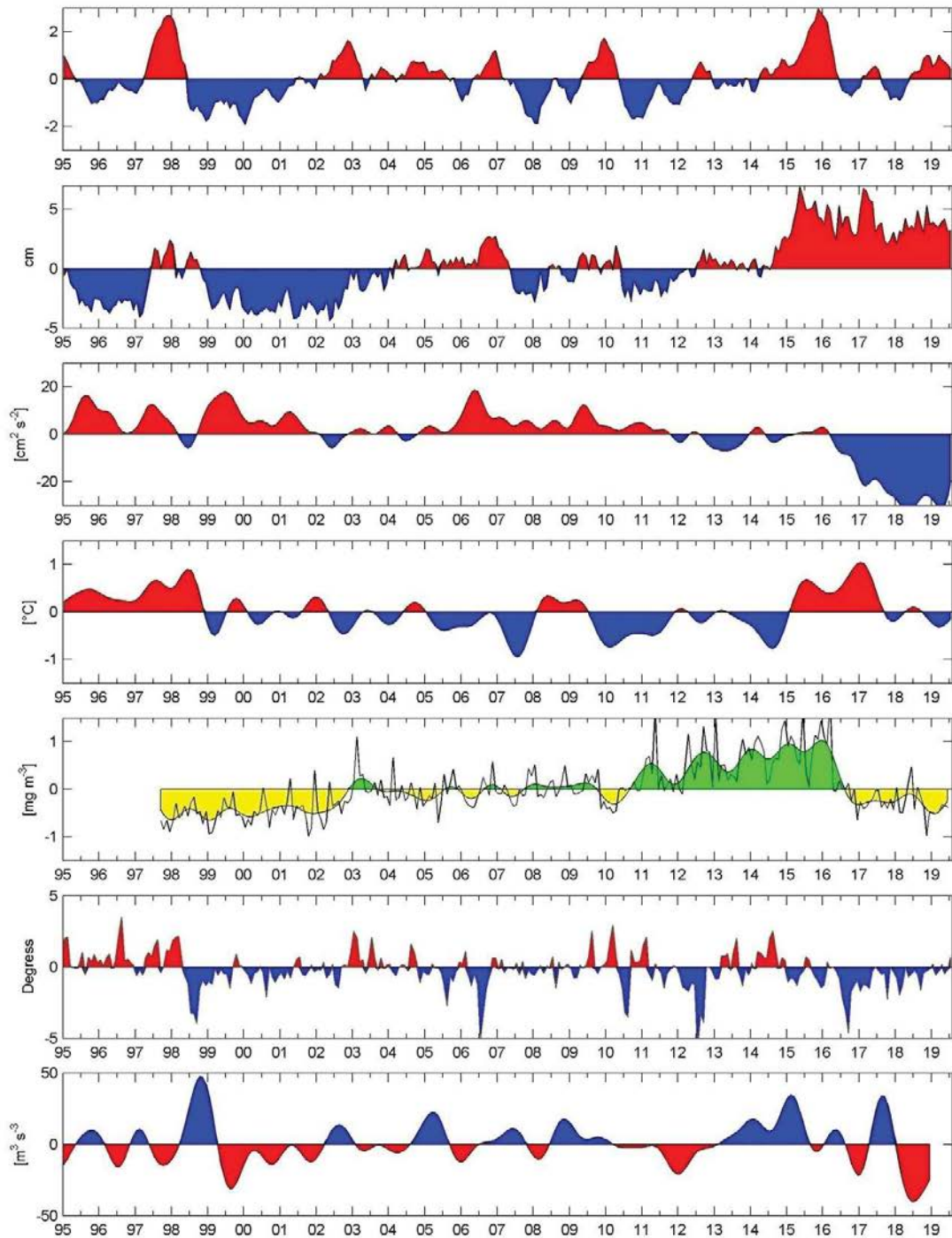


Figure 5. Time-series of environmental indexes in the area delimited by  $34^{\circ}$  -  $42^{\circ}\text{S}$  and from the line coast to  $80^{\circ}\text{W}$ : a) 3-4 ENSO index, b) sea level anomaly, (m) c) Eddy kinetic energy anomaly ( $\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$ ), d) sea surface temperature anomaly ( $^{\circ}\text{C}$ ), e) surface chlorophyll anomaly ( $\text{mg m}^{-3}$ ), f) latitudinal anomaly of  $16^{\circ}\text{C}$  isotherm at  $80^{\circ}\text{W}$  (latitudinal degrees), and e) anomaly of wind induced turbulence ( $\text{m}^3 \text{s}^{-3}$ ).

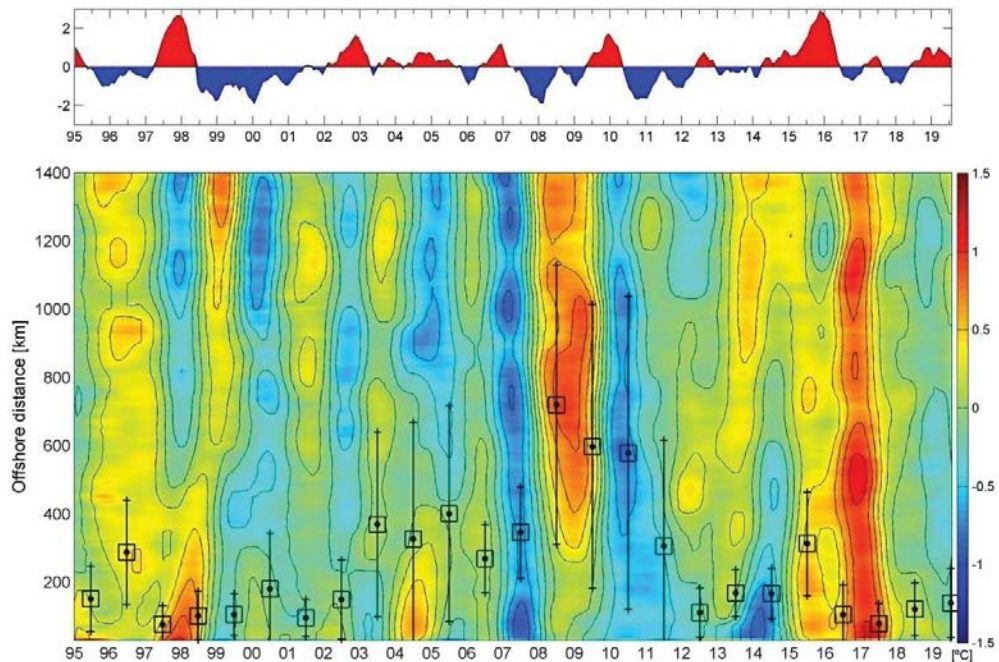


Figure 6. Space-time Hovmöller diagram of sea surface temperature anomalies ( $^{\circ}\text{C}$ ) in the Chilean jack mackerel (CHJM) habitat off central-southern Chile, considering the  $38^{\circ}\text{S}$  band. Boxes represent the CHJM mass centers for 1995-2019. Timeseries of 3-4 ENSO index variability is also included.

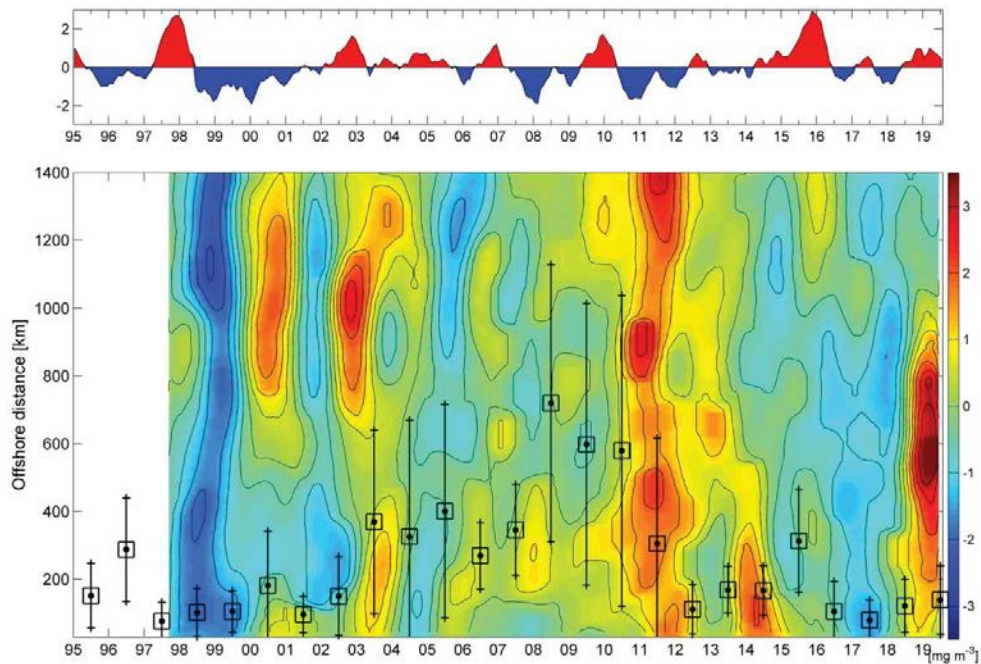


Figure 7. Space-time Hovmöller diagram of sea surface chlorophyll concentration ( $\text{mg m}^{-3}$ ) in the Chilean jack mackerel (CHJM) habitat off central-southern Chile, considering the  $38^{\circ}\text{S}$  band. Boxes represent the CHJM mass centers for 1995-2019. Timeseries of 3-4 ENSO index variability is also included.

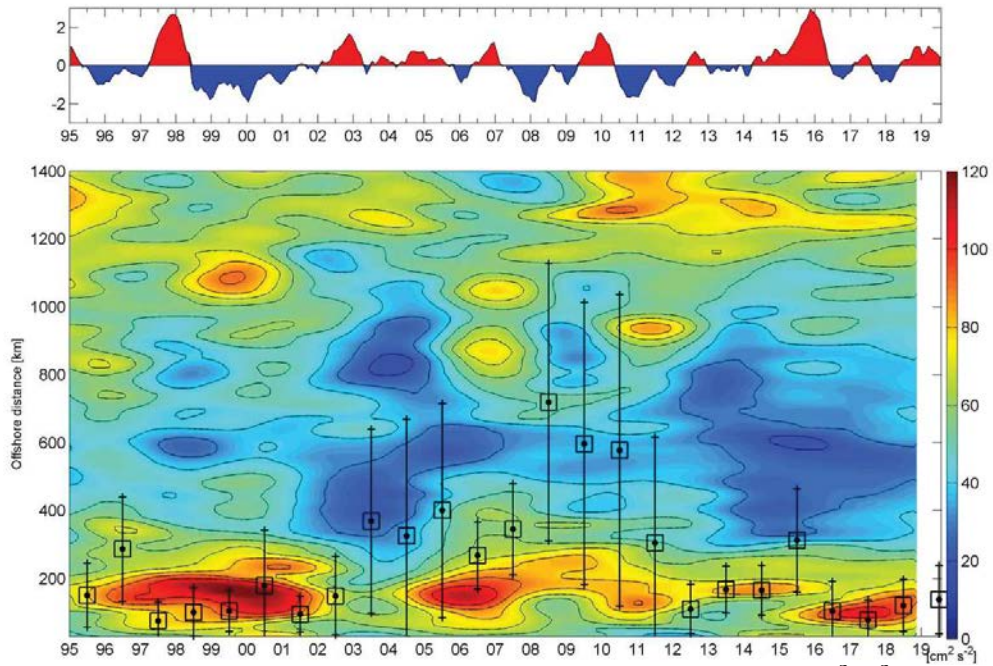


Figure 7. Space-time Hovmöller diagram of eddy kinetic energy ( $\text{cm}^2 \text{s}^{-2}$ ) in the Chilean jack mackerel (CHJM) habitat off central-southern Chile, considering the  $38^\circ\text{S}$  band. Boxes represent the CHJM mass centers for 1995-2019. Timeseries of 3-4 ENSO index variability is also included.

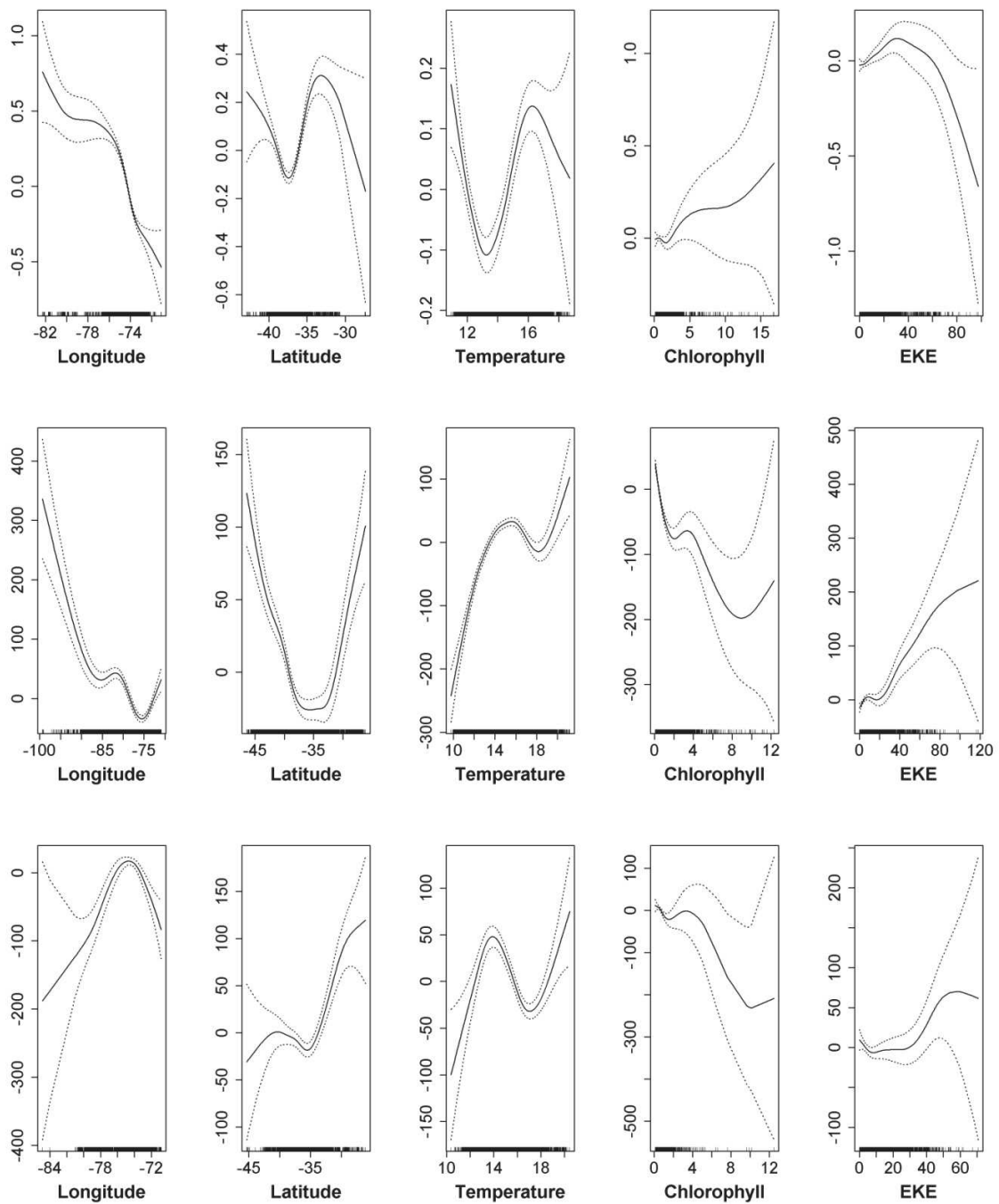


Figure 8. Smoothed fits of covariates modelling the catch biomass of jack mackerel. Tick marks on the x-axis are observed datapoints. The y-axis represents the spline function. Dashed lines indicate 95% confidence bounds. a) period 1995-2001; b) period 2002-2011, and; c) period 2012-2019.



**8<sup>th</sup> MEETING OF THE SCIENTIFIC COMMITTEE**

*New Zealand, 3 to 8 October 2020*

SC8-HM07

**Spatial occurrence of Jack mackerel using Bayesian Hierarchical spatial models**

*Chile*

# Estimation and prediction of the spatial occurrence of jack mackerel (*Trachurus murphyi*) using Bayesian Hierarchical spatial models

Sebastián Vásquez<sup>a</sup>, Cristian Salas<sup>a</sup>, Aquiles Sepúlveda<sup>a</sup>, Maria Grazia Pennino<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*Instituto de Investigación Pesquera, Talcahuano, Chile*

<sup>b</sup>*Instituto Español de Oceanografía, Vigo, España.*

---

## Abstract

A methodological approach is presented for modelling the occurrence patterns of jack mackerel (*Trachurus murphyi*) for the purpose of i) describe the spatial distribution of the species; ii) determine the environmental variables that drive the spatial distribution; iii) provide insights of the spatial structure for fisheries management purposes. Information from the commercial catches of jack mackerel is used to implement the model. This information comes from different fleets that operate in the southeastern Pacific: Peru, northern Chile, southern Chile and international fleet of high seas. The presence/absence of jack mackerel is modelled with a hierarchical Bayesian spatial model using the geographical and environmental characteristics of each fishing location. Maps of predicted probabilities of presence are generated using Bayesian kriging. Bayesian inference on the parameters and prediction of presence/absence in new locations (Bayesian kriging) are made by considering the model as a latent Gaussian model, which allows the use of the integrated nested Laplace approximation (INLA) which has been seen to be quite a bit faster than the well-known MCMC methods. In particular, the spatial effect has been implemented with the Stochastic Partial Differential Equation (SPDE) approach. The analysis shows that environmental and geographical factors can play an important role in directing local distribution and variability in the occurrence of jack mackerel. Although this approach is used to recognize the habitat of adult jack mackerel, it could also be for other different life stages in order to improve knowledge regarding the species population structure.

---

## 1. Introduction

Modelling patterns of the presence/absence of the species using local environmental factors has been extensively used to address several issues, including identifying essential fish habitats and predicting the response of species to environmental features (Giannoulaki et al., 2013). Species distribution models (SDMs) are an essential tool for science and management, as they provide a clear picture of the distribution dynamics and extent of marine resources (Pennino et al., 2014; Martínez-Minaya et al., 2018). In general, information to build marine SDMs can be obtained from two main sources: catch-independent and catch-dependent data.

As has been pointed out by Muñoz et al. (2013), different approaches and methodologies have been proposed for SDMs: species envelope models such as BIOCLIM (Busby, 1991), Generalized Linear Models (GLM), Generalized Additive Models (GAM), neural networks (Zhang et al., 2008) and the multivariate adaptive regression splines (MARS) (Leathwick et al., 2005). Most of these methods are explanatory models that assess the presence of a species in relation to a suite of one or more explanatory variables (e.g. temperature, bathymetry, etc.). The theoretical basis of these methods considers that the observations are independent, while the fisheries data are often characterized by presenting spatial autocorrelation under the consideration that the species display a preferential distribution due to environmental conditions or features (Hurlbert, 1984). In addition, one of the main concerns associated with fisheries data is that target-species samples are collected by preferential sampling as the fishing fleets are commercially driven (Conn et al., 2017).

Chilean jack mackerel (CHJM; *Trachurus murphyi*, Nichols) a highly migratory pelagic species that is widely distributed in the southeastern Pacific ocean off Chile and Peru, reaching across to New Zealand and Tasmania (Bailey, 1989; Grechina et al., 1998). The wide distribution of this species in the region and its highly migratory behavior make it difficult to gather evidence supporting specific hypotheses about its spatial dynamics and population structure. Furthermore, due to its transzonal nature, jack mackerel is caught by several fleets that operate in different areas of its global distribution. Since fishing data are

---

*Email address:* [svasquez@inpesca.cl](mailto:svasquez@inpesca.cl) (Sebastián Vásquez)

the most abundant information related to the distribution of the species, it is important to gather databases from all these fleets to study the spatial distribution and its relationship with environmental variables.

In this contribution, the use of a hierarchical Bayesian model is presented to predict the occurrence of jack mackerel incorporating the environmental and spatial characteristics of each fishing location for a particular fishing year. In particular, this approach uses the geographical characteristics, such as latitude, longitude, of each fishing location from different fleets that operate in different areas: i) Peru; ii) central and northern Chile; iii) central and southern Chile; iv) international high seas fleet. The Bayesian approach is appropriate to spatial hierarchical model analysis because it allows both the observed data and model parameters to be random variables (Banerjee et al., 2014), resulting in a more realistic and accurate estimation of uncertainty. In particular, the integrated nested Laplace approximations (INLA) methodology (Rue et al., 2009) and software (<http://www.r-inla.org>) is used as an alternative to Markov chain Monte Carlo (MCMC) methods. Another advantage of this approach is its generality, which makes it possible to perform Bayesian analysis in a straightforward way and to compute model comparison criteria and various predictive measures so that models can be compared easily (Rue et al., 2009)

## 2. Methods

### *2.1. Study area and jack mackerel data base*

The study area is bounded by longitude 65°E to 120°W and latitude 0° to 50°S in the southeastern Pacific, where jack mackerel fishery operates throughout the year. Jack mackerel occurrence data were obtained from fisheries data available by the EU (Dutch fleet), Peruvian and Chilean fishing fleets (Table 1). In particular, for the application of this methodological approach, the database of the 2009 fishing season was used, when information was available from all the fleets. Due to the fisheries nature of the data, only records positive samples (i.e. presences) are available in the original dataset. To generate a presence/absence dataset, pseudo-absences were generated randomly for the study area. A set of 1000 pseudo-

absences was generated times using the “randomPoints” function (simple random sampling without replacement) from the “dismo” package of the R software (Rc, 2019).

Table 1: Jack mackerel fisheries presence data used to construct the species distribution model for jack mackerel distribution

| Fleet                   | Source         | Number of records | Temporal resolution |
|-------------------------|----------------|-------------------|---------------------|
| Peru                    | PRODUCE        | 35                | Monthly             |
| Central-northern Chile  | IFOP           | 670               | Daily               |
| Central-southern Chile  | INPESCA-IFOP   | 925               | Daily               |
| International high seas | European Union | 624               | Monthly             |

## 2.2. Environmental data

The environmental variables were obtained from different sources including satellite information and regional biogeochemical models. Five abiotic and biotic variables were processed and analyzed based on previous studies analyzing jack mackerel environmental preferences (Núñez et al., 2009): i) monthly sea surface temperature and ii) monthly chlorophyll-a (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>); iii) geostrophic currents derived eddy kinetic energy (<https://www.aviso.altimetry.fr/>); iv) wind induced turbulence (<https://climatedataguide.ucar.edu/>); v) dissolved oxygen at a depth of 50 meters (ROMS-PISCES model). From the dissolved oxygen information (DO) a derived dummy variable (ZMO) was obtained: the presence of minimum oxygen (if  $DO \leq 48 \mu mol L^{-1}$ ,  $ZMO = 1$ ; if  $DO > 50 \mu mol L^{-1}$ ,  $ZMO = 0$ ). The environmental variables were extracted for each jack mackerel record, according to their position and date. All environmental variables were tested for correlation, collinearity, outliers and missing values before their use in the models. As expected. Dissolved oxygen was highly correlated to ZMO (Pearson correlation,  $r > 0.8$ ;  $p$ -value  $< 0.001$ ) and was eliminated. The rest of the variables presented low correlation and collinearity values. Moreover, variables were standardized using the function “decostand” in the “vegan” package (Oksanen et al., 2013) of the R software, in order to facilitate interpretation and to enable comparison of relative weights between variables (Orúe et al., 2020)

### 2.3. Species distribution model

Hierarchical Bayesian models were used to predict the probability of jack mackerel presence with respect to the selected environmental variables using catch-dependent data. Following Orúe et al. (2020), for modelling purpose the response variable was a binary variable that represents the presence (1) or absence (0) of jack mackerel ( $Y_i$ ) in each location  $i$ , and then the occurrence was modelled as:

$$Y_i \sim \text{Bernoulli}(\pi_i), i = 1, \dots, p$$

$$\log(\pi_i) = X_i\beta + W_i$$

$$\beta \sim N(\mu_\beta, q_\beta)$$

$$W_i \sim N(0, Q(k, \tau))$$

where  $\pi_i$  represents the probability of the species presence for a given location ( $i$ ),  $X_i\beta$  represents the matrix of the fixed effects for the linear predictor and  $W_i$  represents the spatially structured random effect at the location  $i$ . Gaussian distributions with a zero mean and covariance matrix ( $Q$ ) was assumed for the spatial component, which depend on the hyperparameters  $k$  and  $\tau$ , and determine the range of the effect and the total variance, respectively. Hyperpriors for  $k$  and  $\tau$  are centered in values such that the range is about 20% of the diameter of the region and the variance is equal to 1 (Lindgren et al., 2011).

Integrated Nested Laplace Approximations (INLA) approach (Rue et al., 2009) and the package INLA ([www.r-inla.org](http://www.r-inla.org)) that is implemented in the R software were used to obtain Bayesian parameter estimates and predictions. The spatial effects ( $W$ ) were computed using the Stochastic Partial Differential Equations (SPDE) approach implemented in INLA (Lindgren et al., 2011), which ensures that the continuous spatial domain (also known as Gaussian Random Field; GRF) is discretized into smaller spatial units (known as Gaussian Markov Random Field; GMRF). Default zero-mean Gaussian non-informative prior distributions with a variance of 100 were used for all of the parameters involved in the fixed effects as recommended by Held et al. (2010).

As pointed out by Orúe et al. (2020), the selection of explanatory variables was conducted by comparing all possible interactions, but only the best combination of variables was chosen, based on the Watanabe-Akaike (WAIC) information criterion (Watanabe, 2010) and Log-Conditional Predictive Ordinations (LCPO) (Roos et al., 2011). Specifically, lower WAIC values indicate a better fit, while lower LCPO scores represent better predictive quality. The best compromise between fit, parsimony and predictive quality is the smaller the WAIC and LCPO values are. Thus, the best models were selected based on the mentioned compromise between low WAIC and LCPO values, containing only relevant predictors (i.e. those with 95% credibility intervals excluding zero).

Once the inference was carried out, we predicted the probability of jack mackerel presence in the area of interest using Bayesian kriging (Muñoz et al., 2013). The prediction in INLA was performed simultaneously with the inference, considering the prediction locations as points where the response is missing. The INLA SPDE module allows the construction of a Delaunay triangulation covering the region of interest for the prediction (Figure 1). Once the prediction is performed in the observed location, there are additional functions that linearly interpolate the results within each triangle into a finer regular grid.

### **3. Results**

In order to demonstrate the applicability of this method to evaluate the spatial structure of jack mackerel incorporating environmental information, a multi-fleet approach was used covering an extensive area in the southeastern Pacific (Figure 1). The distribution of fishing sets shows a characteristic distribution of jack mackerel that extends from the coastal region of Peru and northern Chile to the high seas off central-southern Chile. Regarding environmental variables, those that were available and considered potentially relevant for migratory pelagic species such as jack mackerel were included. In particular, sea surface temperature and chlorophyll have been recognized as important covariates of jack mackerel distribution, as well as dissolved oxygen and the presence of minimum oxygen zone (Bertrand et al., 2016). Furthermore, wind-induced turbulence and eddy kinetic energy were incorporated as potential modulators of the water column stability (Figure 2).

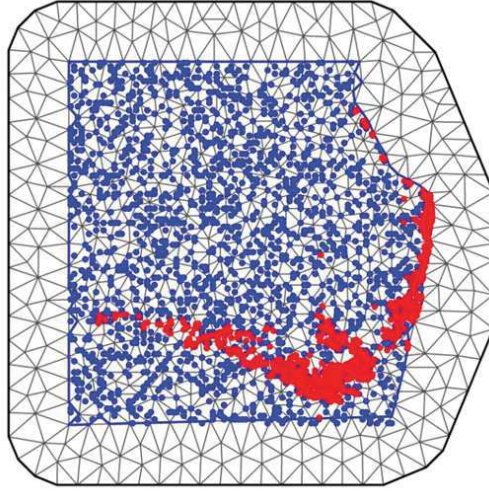


Figure 1: Map of the study area with jack mackerel observations (red dots). Delaunay triangulation used to calculate the Gaussian Markov random field for the SPDE approach. Observations (presences) are shown in red and pseudo-absences in blue

All the resulting models obtained from combining those five covariates were fitted and compared. WAIC was used as a measure for goodness-of-fit, while the logarithmic score (LCPO) measure the predictive quality of the models. As shown in Table 2 and Figure 3, both measures agree on the same model, with a reasonable predictive quality. In particular, the model comparison indicates that (apart from the spatial effect) the sea surface temperature, chlorophyll-a concentration, wind induced turbulence and the presence of minimal oxygen concentrations (less statistical significance) play a determining role in jack mackerel distribution.

As can be seen in Table 2 and Figure 3, most of covariates have a significant influence on driving the jack mackerel distribution. Table 3 shows a numerical summary of the posterior distribution of the effects shown in Figure 3. This results show that sea surface temperature affects the distribution of the species studied negatively, while the chlorophyll-a concentration, the wind induced turbulence and the presence of minimum oxygen concentration have a positive relationship. Results therefore indicate that during the study period occurrence of jack mackerel was is greater in coastal and transition waters where due to the presence



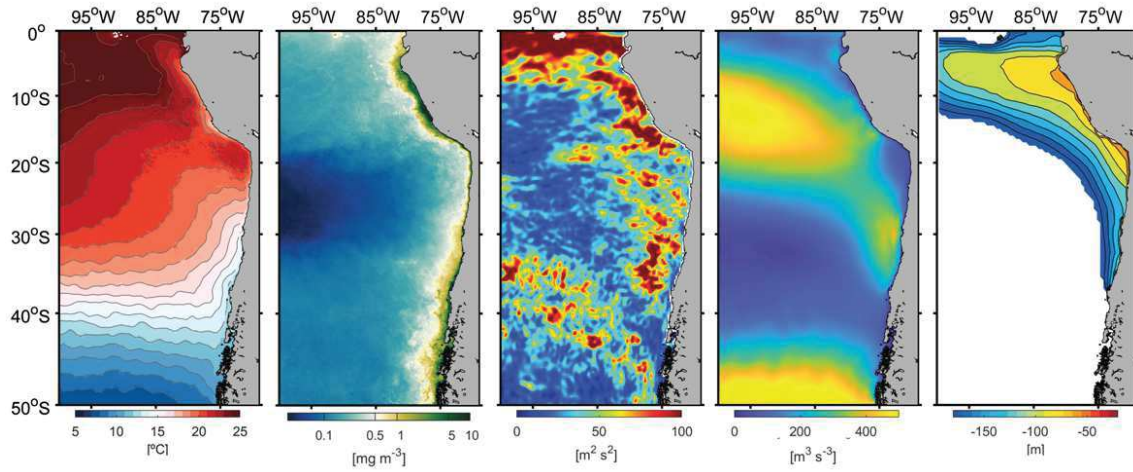


Figure 2: Maps of the covariates considered in the modelling of jack mackerel distribution in the southeastern Pacific: a) sea surface temperature; b) chlorophyll-a; c) eddy kinetic energy; d) wind induced turbulence; e) minimum oxygen depth

of active upwelling centers, the waters are colder and the concentration of the chlorophyll-a is higher with respect to deeper waters. Unexpectedly, the highest occurrence of jack mackerel occurred where the minimum oxygen zone is shallower, which is associated with the presence of subsurface equatorial waters in the coastal sector from Peru to the central zone of Chile. The latter suggests that an oxygenated column of water of 50 meters is appropriate for the common occurrence of jack mackerel.

Figure 4 displays the spatial effect that indicates the intrinsic variability of the distribution of jack mackerel after excluding environmental variables. This component shows a strong effect, with positive values from the northern coast of Peru ( $\sim 8^{\circ}\text{S}$ ) to the southern coast of Chile ( $\sim 41^{\circ}\text{S}$ ) which extend offshore in a band that reaches  $115^{\circ}\text{W}$  in around  $40^{\circ}\text{S}$ . The highest values are observed in the coastal region of southern Peru and northern Chile, in addition to the oceanic zone off south-central Chile where the Chilean industrial fleet operates, as well as the international high seas fleet. Moreover, the mean of the range of the spatial effect of the normal area was about  $\sim 13$  geographical degrees, resulting in a wide spatial correlation field for jack mackerel occurrence. The physical meaning of this value is that jack mackerel records are this distance or greater apart are not spatially correlated.

Table 2: Jack mackerel fisheries presence data used to construct the species distribution model for jack mackerel distribution

| ID | Model                                   | WAIC     | LCPO  |
|----|---|----------|-------|
| 1  | beta0 + sst + clo + tur + zmo + W       | 1876.030 | 0.564 |
| 2  | beta0 + sst + clo + tur + W             | 1876.105 | 0.557 |
| 3  | beta0 + sst + clo + eke + tur + W       | 1876.430 | 0.538 |
| 4  | beta0 + sst + clo + eke + tur + zmo + W | 1878.624 | 0.543 |
| 5  | beta0 + sst + tur + zmo + W             | 1883.769 | 0.612 |
| 6  | beta0 + sst + eke + tur + zmo + W       | 1886.464 | 0.618 |
| 7  | beta0 + sst + tur + W                   | 1896.306 | 0.712 |
| 8  | beta0 + clo + tur + W                   | 1896.827 | 0.486 |
| 9  | beta0 + sst + eke + tur + W             | 1899.207 | 0.718 |
| 10 | beta0 + clo + eke + tur + W             | 1899.506 | 0.490 |

Table 3: Numerical summary of the marginal posterior distribution of the fixed effects for the best jack mackerel B-HSMs selected using catch data. For each variable, the mean, standard deviation and a 95% credible central interval is provided.

|                 | Mean  | SD   | Q <sub>0.025</sub> | Q <sub>0.5</sub> | Q <sub>0.975</sub> |
|-----------------|-------|------|--------------------|------------------|--------------------|
| Parameters      |       |      |                    |                  |                    |
| beta0           | -5.16 | 1.75 | -8.76              | -5.13            | -1.78              |
| sst             | -0.84 | 0.21 | -1.24              | -0.84            | -0.43              |
| clo             | 0.77  | 0.30 | 0.18               | 0.77             | 1.36               |
| tur             | 0.96  | 0.13 | 0.70               | 0.95             | 1.21               |
| zmo             | 1.24  | 0.96 | -0.65              | 1.25             | 3.14               |
| Hyperparameters |       |      |                    |                  |                    |
| $\tau$          | 13.69 | 2.17 | 9.96               | 13.51            | 18.48              |
| $\sigma$        | 5.37  | 0.62 | 4.28               | 5.33             | 6.69               |

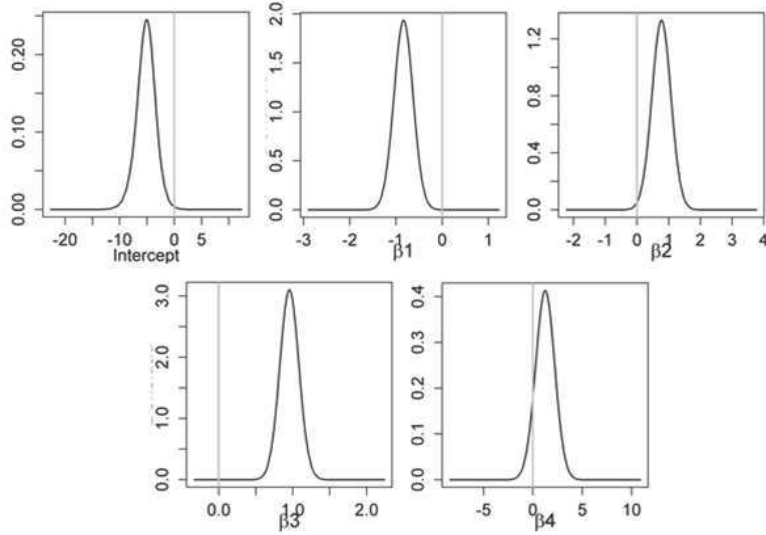


Figure 3: Posterior distributions of the fixed effects for the jack mackerel B-HSMs.  $\beta_1$ =sea surface temperature;  $\beta_2$ =chlorophyll-a concentration;  $\beta_3$ =wind-induced turbulence, and;  $\beta_4$ = presence of minimum oxygen concentration (50 m)

The predicted probability map of jack mackerel occurrence using catch data shows high aggregation and spatial continuity in the hotspots. A narrow coastal band is observed between 8°S and 30°S where the probability drops sharply offshore in response to warmer and less productive waters in the oceanic region. In the offshore extension around 40°S a small discontinuity was obtained, however the predicted probability expands towards a vast oceanic area off central-southern Chile (Figure 5a). The standard deviation map (Figure 5b) show very low values in the area where data were collected, while the error increases along the edges and off the modelled domain. Finally, one of the most important results is the continuity in the area of high probability for jack mackerel occurrence by incorporating information from all fleets in a spatial modelling procedure, which suggests the need to advance in the use of joint databases in order to study the spatial structure of the jack mackerel population in the Southeast Pacific and its relationship with habitat variability.

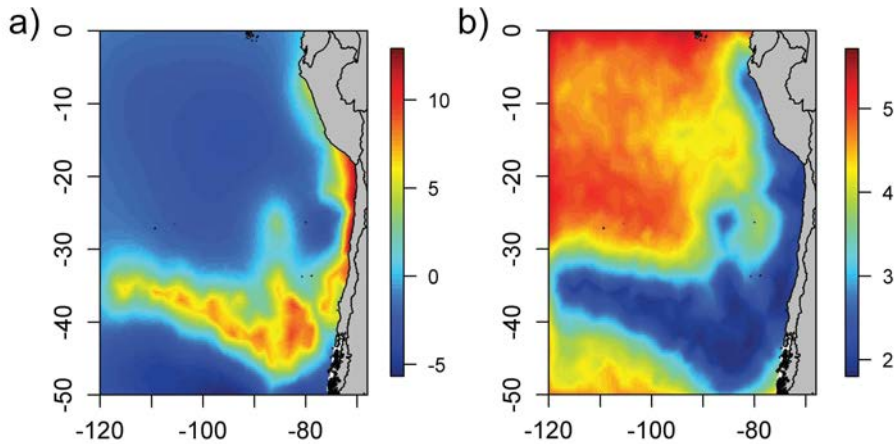


Figure 4: a) Mean and b) standard deviation for posterior distribution of the spatial effect  $W$  for jack mackerel distribution

#### 4. Concluding remarks

The use of hierarchical Bayesian spatial models (hBSMs) is presented for the study of jack mackerel distribution and its relationship with variables that characterize its habitat. One of the main advantages of this approach is that simultaneously deals with spatial autocorrelation issues and different sources of uncertainties. Multiple sources of uncertainty associated with both the observed data and the ecological process can be included in hBSMs, resulting in a stronger statistical inference. Moreover, the posterior predictive distribution of the probability of finding the species turns out to be a very suitable tool that allows us to express our uncertainties associated with the entire species habitat prediction. Another advantage is the computational gain of using the INLA approach, which allows us to easily make inferences and predictions within a highly structured model.

Our results suggest that sea surface temperature affects the distribution of the jack mackerel negatively, while the chlorophyll-a concentration, the wind induced turbulence have a positive relationship. In addition, the results suggest the presence of jack mackerel in areas where the minimum oxygen zone reaches 50 meters deep. These results confirm that jack mackerel is characterised by a high plasticity since it tolerates a large range of

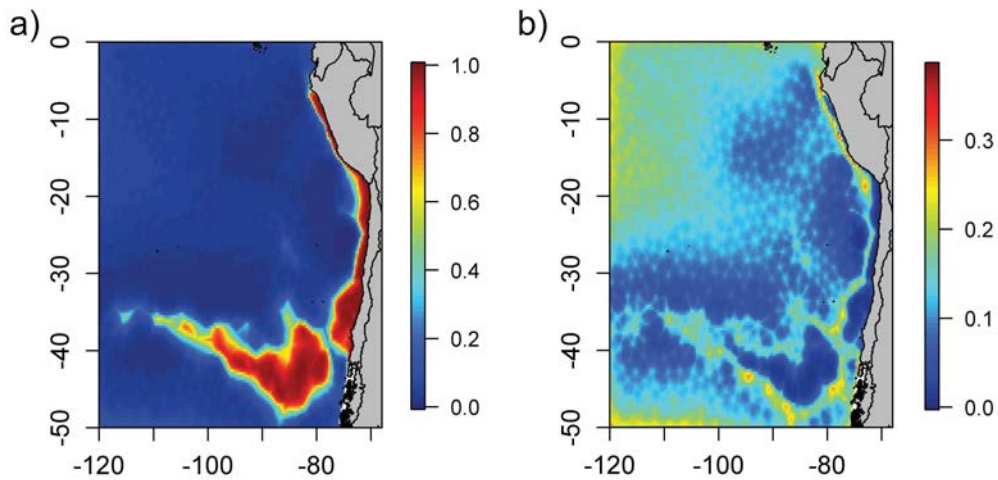


Figure 5: Posterior a) mean and b) standard deviation for predictive distribution of the probability of jack mackerel presence in southeastern Pacific

abiotic conditions. However, in its northern edge of distribution ( $5^{\circ}\text{S} - 25^{\circ}\text{S}$ ) the jack mackerel habitat is restricted to a narrower coastal band due to the presence warmer and less productive waters in the oceanic zone, while south of  $30^{\circ}\text{S}$  the jack mackerel habitat expands offshore covering a larger area.

Regarding the database used in this study, it is worth mentioning that through the use of georeferenced information from different fleets that catch jack mackerel, it is possible to establish more robust statistical models to make inferences regarding the biophysical processes that drive the jack mackerel occurrence throughout its distribution area. The latter is highly relevant to strengthen our understanding of the spatial dynamics of the species, its implications in the definition of its population structure and finally towards integrated management in the south Pacific.

### Acknowledgments

. This work was supported through the Project FIPA 2017-62 "Dinámica poblacional de juveniles y adultos de jurel basada en modelación biofísica" funded by the National Fund for Fisheries and Aquaculture Research of Chilean Government.

## References

- Bailey, K. (1989). Description and surface distribution of juvenile peruvian jack mackerel, *trachurus murphyi*, nichols. *Fishery Bulletin*, *87*, 273.
- Banerjee, S., Carlin, B. P., & Gelfand, A. E. (2014). *Hierarchical modeling and analysis for spatial data*. CRC press.
- Bertrand, A., Habasque, J., Hattab, T., Hintzen, N. T., Oliveros-Ramos, R., Gutiérrez, M., Demarcq, H., & Gerlotto, F. (2016). 3-d habitat suitability of jack mackerel *trachurus murphyi* in the southeastern pacific, a comprehensive study. *Progress in Oceanography*, *146*, 199–211.
- Busby, J. (1991). Bioclim-a bioclimate analysis and prediction system. *Plant protection quarterly*, *61*, 8–9.
- Conn, P. B., Thorson, J. T., & Johnson, D. S. (2017). Confronting preferential sampling when analysing population distributions: diagnosis and model-based triage. *Methods in Ecology and Evolution*, *8*, 1535–1546.
- Giannoulaki, M., Iglesias, M., Tugores, M. P., Bonanno, A., Patti, B., De Felice, A., Leonori, I., Bigot, J. L., Tičina, V., Pyrounaki, M. et al. (2013). Characterizing the potential habitat of european anchovy *engraulis encrasicolus* in the mediterranean sea, at different life stages. *Fisheries Oceanography*, *22*, 69–89.
- Grechina, A., Núñez, S., & Arcos, D. (1998). Biología reproductiva del jurel (*trachurus symmetricus murphyi*) en el pacífico sur. *Biología y ecología del jurel en aguas chilenas*, (pp. 77–79).
- Held, L., Schrödle, B., & Rue, H. (2010). Posterior and cross-validatory predictive checks: a comparison of mcmc and inla. In *Statistical modelling and regression structures* (pp. 91–110). Springer.
- Hurlbert, S. H. (1984). Pseudoreplication and the design of ecological field experiments. *Ecological monographs*, *54*, 187–211.
- Leathwick, J., Rowe, D., Richardson, J., Elith, J., & Hastie, T. (2005). Using multivariate adaptive regression splines to predict the distributions of new zealand’s freshwater diadromous fish. *Freshwater Biology*, *50*, 2034–2052.
- Lindgren, F., Rue, H., & Lindström, J. (2011). An explicit link between gaussian fields and gaussian markov random fields: the stochastic partial differential equation approach. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*, *73*, 423–498.
- Martínez-Minaya, J., Cameletti, M., Conesa, D., & Pennino, M. G. (2018). Species distribution modeling: a statistical review with focus in spatio-temporal issues. *Stochastic environmental research and risk assessment*, *32*, 3227–3244.
- Muñoz, F., Pennino, M. G., Conesa, D., López-Quílez, A., & Bellido, J. M. (2013). Estimation and prediction of the spatial occurrence of fish species using bayesian latent gaussian models. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, *27*, 1171–1180.

- Núñez, S., Correa, M., & Vásquez, S. i. (2009). Variability of the chilean jack mackerel fishing habitat in the southeastern pacific ocean. *South Pacific Regional Fisheries Management Organisation*, .
- Oksanen, J., Blanchet, F. G., Kindt, R., Legendre, P., Minchin, P. R., O'hara, R., Simpson, G. L., Solymos, P., Stevens, M. H. H., Wagner, H. et al. (2013). Package 'vegan'. *Community ecology package, version, 2*, 1–295.
- Orúe, B., Pennino, M. G., Lopez, J., Moreno, G., Santiago, J., Ramos, L., & Murua, H. (2020). Seasonal distribution of tuna and non-tuna species associated with drifting fish aggregating devices (dfads) in the western indian ocean using fishery-independent data. *Frontiers in Marine Science*, .
- Pennino, M. G., Muñoz, F., Conesa, D., López-Quílez, A., & Bellido, J. M. (2014). Bayesian spatio-temporal discard model in a demersal trawl fishery. *Journal of sea research*, *90*, 44–53.
- Rc, T. (2019). R: A language and environment for statistical computing. r foundation for statistical computing, vienna, austria.
- Roos, M., Held, L. et al. (2011). Sensitivity analysis in bayesian generalized linear mixed models for binary data. *Bayesian Analysis*, *6*, 259–278.
- Rue, H., Martino, S., & Chopin, N. (2009). Approximate bayesian inference for latent gaussian models by using integrated nested laplace approximations. *Journal of the royal statistical society: Series b (statistical methodology)*, *71*, 319–392.
- Zhang, W., Zhong, X., & Liu, G. (2008). Recognizing spatial distribution patterns of grassland insects: neural network approaches. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, *22*, 207–216.