

Universidad de Concepción
Escuela de Graduados

Doctorado en Oceanografía



Efecto de los remolinos de mesoescala sobre la distribución de la clorofila
satelital en la Zona de Transición Costera (ZTC) frente a Chile central (30°-
40°S)

Marco Alejandro Correa Ramírez

Concepción, Chile, Diciembre de 2009



Universidad de Concepción
Escuela de Graduados

La Tesis Doctoral en Oceanografía “*Efecto de los remolinos de mesoescala sobre la distribución de la clorofila satelital en la Zona de Transición Costera (ZTC) frente a Chile central (30°-40°S)*” del Sr. *Marco Alejandro Correa Ramirez*, realizada en el Departamento de Oceanografía, Facultad de Ciencias Naturales y Oceanográficas, Universidad de Concepción, ha sido aprobada por la siguiente Comisión de Evaluación:

Dr. Osvaldo Ulloa
Director de Tesis
Laboratorio de Procesos Oceanográficos
y Clima (PROFC)
Universidad de Concepción



Dr. Samuel Hormazabal
Profesor Guía
Departamento de Geofísica
Universidad de Concepción

Dra. Carmen Morales
Miembro Comité de Tesis
Centro de Investigación Oceanográfica
del Pacífico Sur - Oriental (COPAS)
Universidad de Concepción

Dr. Pablo Sangrà
Evaluador Externo
Facultad de Ciencias del Mar
Universidad de las Palmas de Gran Canaria

Dr. Marcus Sobarzo
Director de Programa
Universidad de Concepción

Abril

26

de

2010.



Dedicatoria: A mi esposa e hija, por su comprensión y complicidad



Indice de Contenidos

Agradecimientos	vi
Curriculum Vitae	viii
Resumen	ix
Abstract	xii
1.- INTRODUCCION	14
1.1.- Hipótesis	26
1.2.- Objetivo General	26
1.3.- Objetivos Específicos	26
2.- MATERIALES Y METODOS	27
2.1. Información Satelital	27
2.2.- Caracterización y seguimiento de remolinos de mesoescala	
28	
2.3.- Interpolación de información satelital	29
2.4.- Análisis de series de tiempo	31
2.5.- Análisis espectral multivariado	
32	
3.- RESULTADOS	33
3.1.- Remolinos de mesoescala y altas concentraciones de clorofila frente a la costa central de Chile (29°-39°S)	33
3.2.- Patrón espacial de la variabilidad anual e interanual de la clorofila-a en el sistema de corrientes de Chile-Perú	49
3.3.- Remolinos de Mesoescala, clorofila y captura de jurel (<i>Trachurus murphyi</i>)	

en la zona centro-sur de Chile (30°-45°S), durante el periodo 1995-2008.	77
3.3.1.- Resumen	77
3.3.2.- Introducción	78
3.3.3.- Metodología	79
3.3.4.- Resultados	81
3.3.4.1.- Clorofila, energía cinética y distribución del jurel en el Pacífico Sur Oriental	81
3.3.4.2.- Zonas de pesca y captura de jurel en el periodo 1995-2008	82
3.3.4.3.- Zonas de pesca y estructuras de mesoescala frente a Chile central	83
3.3.4.4.- Variabilidad ambiental del hábitat de pesca de jurel frente a Chile central	87
3.3.5.- Discusión y conclusiones	90
4.- DISCUSION	92
5.- REFERENCIAS	99



Agradecimientos

Son muchas las personas e instituciones que contribuyeron con este trabajo de tesis a las cuales debo expresar mis agradecimientos. Especialmente a mi Profesor Guía, el Dr. Samuel Hormazabal, quien ha sido mi mentor, mi “padrino” en ciencia y un invaluable amigo, por sus valiosos consejos e incondicional apoyo incluso durante los momentos más difíciles de mi estancia en Chile. Al Dr. Osvaldo Ulloa por acogerme cuando era aun un estudiante neófito y ayudarme a orientar mi proyecto de Tesis. A la Dra. Carmen Morales por su constante preocupación sobre mi avance académico y sus pertinentes observaciones. A todos los profesores del Programa de Posgrado en Oceanografía, por contribuir con mi formación y compartir desinteresadamente su valiosa experiencia. A mis compañeros de generación, Aldo Montecinos, Mauricio Landaeta, Alex Galan, Gisella Lorca, Martin Cornejo y Antonio Carlos (q.e.p.d), con quienes afrontamos hombro a hombro las exigentes actividades académicas del Doctorado y estrechamos una profunda amistad más allá de nuestras diferencias culturales. A todos mis “compañeros de la marcha y de la lucha” en el DGEO, en especial a Gabriel Yuras por iniciarme en el excitante mundo de la programación, a Fabian Gomez (Turbina) por su valiosa crítica y a Cristian Henriquez (El “Z”). A mi familia cercana, mi esposa Almeira Navia y mi hija Lina Margarita, por su constante motivación, su comprensión y el sosiego que me brindaron durante las arduas horas de estudio. A mi madre, mi padre, mi abuelo y toda la “patota” de mi familia en Colombia por su cariño y apoyo; todos ellos me han “sumado su estatura” al considerarme su embajador en tierras lejanas.

El sostenimiento personal y familiar durante mis estudios doctorales en Chile, fue financiado por la beca A/02/19911 del Servicio de Intercambio Académico Alemán (DAAD). Este trabajo de tesis fue financiado por el proyecto del Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología FONDECYT 1070504 liderado por el Dr. Samuel Hormazabal, y el proyecto de la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica PBCT-CONICYT ACT-19 liderado por la Dra. Carmen Morales. Igualmente debo agradecer al Instituto de Investigación Pesquera, en especial a Sergio Nuñez, por abrirme las puertas al

mundo de la Oceanografía Pesquera. A todas estas instituciones y proyectos, les reitero mis profundos agradecimientos por depositar su confianza en mi trabajo y permitirme crecer como profesional e investigador.



Curriculum Vitae

Marco Alejandro Correa Ramirez
Nacido el 7 de Diciembre de 1974 en Cali, Colombia.

1997: Biólogo Marino, Universidad del Valle, Colombia
2009: Doctor en Oceanografía, Universidad de Concepción Chile.

PUBLICACIONES

Correa-Ramirez, M.A., S. Hormazabal & C. E. Morales. Spatial patterns of annual and interannual chlorophyll-a variability in the Peru-Chile Current System. Progress in Oceanography (submitted in november 2009).

Morales, C. E., M.L. Torreblanca, S. Hormazabal, M. Correa-Ramírez, S. Nuñez & P. Hidalgo. Mesoscale structure of copepod assemblages in the coastal transition zone and oceanic waters off central-southern Chile. Progress in Oceanography, Progress In Oceanography 84(3-4, March): 158-173. doi:[10.1016/j.pocean.2009.12.001](https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.12.001).

Párraga, D. P., L. Cubillos & M. Correa-Ramirez. Cambios espacio-temporales de la captura por unidad de esfuerzo en la pesquería artesanal costera del pargo rayado (*Lutjanus synagris*) en el Caribe colombiano, y su relación con variables ambientales. Revista de Biología Marina y Oceanografía, 45(1): 77-88.

Correa-Ramirez, M.A., S. Hormazabal and G. Yuras, 2007. Mesoscale eddies and high chlorophyll concentrations off central Chile (29°-39°S). Geophysical Research Letters, 34(12) L12604, doi:10.1029/2007GL029541.

AREAS DE INVESTIGACION

Principal : Oceanografía Satelital, Percepción Remota.
Secundaria: Oceanografía Física
Otras: Oceanografía Pesquera

EXPERIENCIA DOCENTE

- Profesor Seminario: “Análisis de datos oceanográficos: Funciones empíricas ortogonales”. Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla" – Programa Maestría en Oceanografía, Cartagena – Colombia, 30 de noviembre a 5 de diciembre de 2009.
- Profesor Seminario “Procesos físicos asociados a la producción biológica del océano”. Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla" – Programa Maestría en Oceanografía, Cartagena – Colombia, noviembre de 2007.
- Profesor cursos “Biología” y “Contaminación Marina”. Universidad de la Guajira, Facultad de Ingeniería Ambiental, Riohacha – Colombia. Agosto a diciembre de 1997.

Resumen

Efecto de los remolinos de mesoescala sobre la distribución de la clorofila satelital en la Zona de Transición Costera (ZTC) frente a Chile central (30°-40°S)

Marco Alejandro Correa Ramírez

Programa de Doctorado en Oceanografía

Universidad de Concepción, 2009

Dr. Osvaldo Ulloa, Director de Tesis

Dr. Samuel Hormazabal, Profesor Guía

Remolinos y meandros de mesoescala son estructuras de ocurrencia frecuente frente a los sistemas de borde oriental. En el sistema de corrientes de Chile-Perú (SCCP), el análisis de más de una década de datos satelitales de viento, anomalía del nivel del mar y clorofila, revela que los remolinos de mesoescala se generan cerca de la zona costera y se propagan hacia el oeste a velocidades cercanas al primer modo baroclino de una onda de Rossby. En su desplazamiento, estas estructuras se observan modificando el campo corrientes, generando zonas de alta energía cinética y extendiendo el área de alta concentración de clorofila, más allá de la zona costera directamente influenciada por la surgencia. De esta manera, en la zona de transición costera frente a la costa central de Chile, los remolinos de mesoescala se observan asociados a más del 50% del máximo invernal de la clorofila. En esta región, los remolinos de mesoescala pueden estar incrementando las concentraciones de clorofila a través del bombeo de nutrientes, el transporte horizontal de nutrientes y/o biomasa fitoplanctónica, además de la mezcla de propiedades favorecida por las corrientes de meandro entre remolinos. De esta manera, estas estructuras contribuyen a extender el área de alta productividad biológica alrededor de

800 km fuera de la costa y prolongan su duración hacia los meses de invierno, cuando la actividad de la surgencia costera es menor.

La variabilidad interanual de la clorofila frente a Chile central se observa estrechamente relacionada con la variabilidad de origen tropical asociada a El Niño. A través de la reconstrucción del patrón espacial de la clorofila en las principales frecuencias asociadas a El Niño mediante del método MTM-SVD (Multitaper Method – Singular Value Decomposition), se observó que la señal de El Niño se transmite principalmente desde la zona costera hacia la zona oceánica a través de la propagación hacia el oeste de ondas de Rossby y remolinos de mesoescala. Durante los eventos cálidos (fríos) estas estructuras se observan con menor (mayor) energía, lo que podría condicionar una menor (mayor) intensidad de los mecanismos de bombeo y transporte horizontal, generando las menores (mayores) concentraciones de clorofila observadas durante estos eventos. De esta manera, las ondas de Rossby y los remolinos de mesoescala son los principales responsables de la transmisión de la variabilidad de El Niño hacia la zona oceánica del SCCP, determinando una fracción significativa de la amplitud y fase de la perturbación que llega desde la zona ecuatorial a esta región.

El efecto de los remolinos de mesoescala sobre la clorofila también genera impactos sobre niveles tróficos superiores del ecosistema pelágico, observados en la modulación del hábitat pesquero de especies de peces pelágicos de importancia comercial, como es el caso del jurel (*Trachurus murphyi*). La utilización de ~15 años (1995-2009) de información pesquera de jurel, revela que las agregaciones de esta especie aparecen en el verano austral en cercanías de la costa y se desplazan progresivamente a través de la zona de transición costera hacia el invierno (junio-sep), asociadas a los frentes de baja temperatura y alta energía cinética (EKE) generados entre los remolinos de mesoescala. En tales frentes, procesos de sub-mesoescala parecen favorecer la concentración de presas y la formación de agregaciones de jurel. Durante el periodo cálido de El Niño comprendido entre 2001-2007, se observó un retraso en el inicio de la temporada de pesca y un alejamiento de la costa de las agregaciones de jurel, asociado a una menor actividad de mesoescala y una menor oferta de ambientes apropiados para la formación de agregaciones. A pesar del retorno a

condiciones más frías en el año 2008, la captura de jurel persistió mayormente oceánica, por lo que estudios adicionales sobre los cambios del ecosistema pelágico son aún necesarios para entender completamente la dinámica asociada a la variabilidad interanual del hábitat del jurel en la región.

Palabras Clave: Remolinos de mesoescala, clorofila satelital, Sistema de Corrientes de borde oriental Chile-Perú, El Niño, Energía cinética



Abstract

Effect Mesoscale of eddies on the satellite chlorophyll distribution in the coastal transition zone off central Chile (30°–40°S)

Marco Alejandro Correa Ramírez

Programa de Doctorado en Oceanografía

Universidad de Concepción, 2009

Dr. Osvaldo Ulloa, Director de Tesis

Dr. Samuel Hormazabal, Profesor Guía

Mesoscale eddies and meanders are recurrent features in the eastern boundary currents systems. Over a decade of satellite data of wind, sea level anomaly and chlorophyll in the Chile-Peru current system, one of the most productivity eastern boundary systems, show how mesoscale eddies are generated near the coast and they move westward at speeds near to first-barocline mode Rossby wave. Along their paths, these structures changes the currents field, increases the eddy kinetic energy and they extends the high chlorophyll concentration area beyond the coastal zone directly influenced by upwelling. In the coastal transition zone off the central Chile, mesoescale eddies account for more than 50% of the seasonal chlorophyll maximum in winter. In this zone, mesoscale eddies could be increasing the chlorophyll concentrations through the eddy pumping of subsurface rich in nutrients waters, by the horizontal transport of nutrients and / or phytoplankton biomass from the coastal zone, and increasing the mixing of properties that occur in the meander currents between eddies. Thus, mesoscale eddies are contributing to extend the high biological productivity area to around 800 km offshore and makes it last longer towards the winter months, when the upwelling is weak.

The chlorophyll interannual variability off central Chile is closely related to the tropical variability of El Niño. The reconstruction of the chlorophyll spatial pattern in the main frequencies associated with El Niño through the MTM-SVD method (Multi Taper method - Singular Value Decomposition), shows that El Niño signal is mainly transmitted from the coastal zone via Rossby waves and mesoscale eddies towards offshore. During the warm (cold) event these structures show low (high) energy, which could reduce (increase) the eddy pumping and the eddy horizontal transport, processes that decrease (increase) chlorophyll concentrations during these events. Thus, Rossby waves and mesoscale eddies are the main structures transmitting the El Niño signal to the oceanic zone and they control the amplitude and phase of this disturbance coming from the equatorial zone.

The effect of mesoscale eddies on chlorophyll also impacts higher trophic levels of the pelagic ecosystem in the coastal transition zone off central Chile, producing changes on the plankton biomass and on the habitat of some important pelagic fish, such as jack mackerel (*Trachurus murphyi*). The analysis of more than 15 years (1995-2009) of fishery information shows that shoals of Jack mackerel appears in the austral summer near the coast and gradually they moves offshore reaching the coastal transition zone in winter (June-Sep) in association with fronts of low temperature and high eddy kinetic energy between mesoscale eddies. In these fronts sub-mesoscale processes could be favoring the prey items concentration for jack mackerel. During the warm El Niño period between 2001-2007 there was a delay in the onset of the fishing season and the shoals of jack mackerel were observed farther from the coast than previous years, due to a low mesoscale activity in the coastal transition zone and a smaller food supply for the formation of shoals of jack mackerel. Despite the return to cooler conditions in 2008, the catching of jack mackerel remained offshore, showing that further studies on the changes of the pelagic ecosystem are still necessary to understand the dynamics associated with the interannual variability of the jack mackerel habitat in the region.

Key words: Mesoscale eddies, satellite chlorophyll, Chile-Perú Eastern boundary currents system, Coastal upwelling, El Niño phenomena, Eddy kinetic energy.

2.- INTRODUCCION

Debido a su gran extensión, en los océanos ocurre el 50% de la producción primaria del planeta vía fotosíntesis (Behrenfeld *et al.* 2001). La producción primaria oceánica ha sido la responsable de almacenar más del 99,9% del carbono de origen atmosférico en los sedimentos marinos sobre escalas de tiempo geológicas. Sin embargo, la superficie iluminada de la mayor extensión del océano exhibe bajas concentraciones de nutrientes y fitoplancton, además de bajas tasas de producción primaria. Los nutrientes esenciales para el crecimiento celular y la productividad primaria son permanentemente removidos de la capa iluminada del océano por la producción y subsecuente exportación de partículas orgánicas hacia aguas más profundas. Los nuevos nutrientes que entran a la capa superficial son rápidamente utilizados por la comunidad plantónica y controlan la mayor proporción de la producción biológica del océano. Esta entrada de nutrientes se encuentra principalmente mediada por procesos oceánicos de difusión, convección y advección. Los procesos de difusión son generalmente diapícnicos y ocurren sobre toda la extensión del océano, aunque su velocidad (aprox. 10^{-5} m s^{-1}) es varios órdenes de magnitud menor en relación a los procesos advectivos (Williams & Follows, 2003). Los procesos convectivos se presentan principalmente en latitudes medias caracterizadas por una intensa mezcla vertical de nutrientes durante invierno, en las cuales el inicio de las condiciones de primavera favorece la estabilización de la columna de agua sobre la pycnoclina estacional, reduciendo la limitación por luz y permitiendo que los nutrientes que ingresaron en invierno sean aprovechados completamente por el fitoplancton para producir un florecimiento primaveral (Sverdrup, 1953). Los procesos advectivos ocurren sobre una fracción inferior del océano (<5%) pero son los que soportan la mayor proporción de la producción biológica, a pesar de su alta variabilidad espacial y temporal. Entre los principales procesos advectivos se encuentra la surgencia ecuatorial, la surgencia costera y los remolinos de mesoescala. Particularmente, alrededor de un 20-40% de la productividad oceánica global se ha encontrado asociada a los remolinos de mesoescala (Falkowski *et al.* 2001; Oschlies &

Garçon, 1998). Estas estructuras modifican la producción biológica y la distribución de biomasa fitoplanctonica durante el florecimiento primaveral en latitudes medias (Levy *et al.* 1998) y participan en los procesos de interacción entre las aguas provenientes de los sistemas de surgencia costera con las aguas oceánicas adyacentes (Barton *et al.* 1998, Gruber *et al.* 2006, Strub *et al.* 2000).

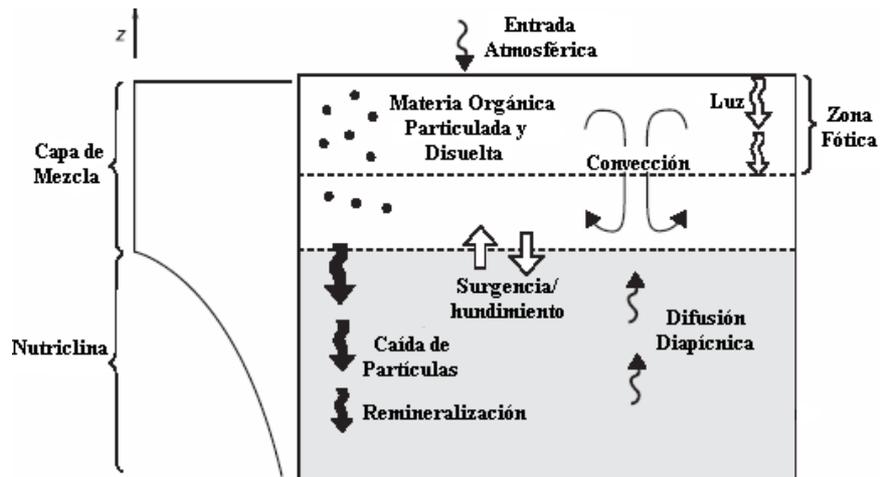


Figura 1. Esquema mostrando los procesos físicos que afectan la entrada de nutrientes y la productividad biológica en las capas superficiales del océano (Tomado de: Williams & Follows, 2003).

En el océano existen tres tipos de remolinos de mesoescala; los remolinos ciclónicos los cuales causan un levantamiento de la piconclina principal y estacional; los remolinos anticiclónicos que causan un efecto contrario al deprimir ambas interfaces de densidad; y los remolinos intratermoclina o “meddies”, los cuales deprimen la piconclina principal y levantan la estacional, generando una estructura en forma de lente (Fig. 2) (McGillicuddy *et al.* 2007). De estos, los remolinos ciclónicos y los intratermoclina tienden a adveccionar aguas ricas en nutrientes hacia la zona eufótica durante su formación e intensificación, mediante un transporte de Ekman vertical que es ampliamente conocido como “Eddy Pumping” o bombeo de Ekman (Aristegui *et al.* 1997, Kimura *et al.* 2000, McGillicuddy & Robinson 1997). Sin embargo, además del bombeo de Ekman, existen varios mecanismos asociados a

remolinos de mesoescala que también pueden producir transporte vertical de nutrientes e incrementos sobre la productividad biológica. Se ha observado que la perturbación del flujo circular de los remolinos de mesoescala puede producir una circulación ageostrófica y un transporte vertical sobre una fracción del área superficial de estas estructuras (Martin & Richards 2001). Por otra parte, el esfuerzo del viento incidiendo sobre los remolinos de mesoescala puede amplificar el bombeo de Ekman y la concentración de fitoplancton al interior de los remolinos (McGillicuddy *et al.* 2007). Además, los modelos numéricos del océano indican que la mezcla horizontal que se produce entre dos o más remolinos y las aguas circundantes, amplifica el efecto del bombeo de Ekman que producen estas estructuras y genera importantes incrementos en la producción biológica a nivel regional (Fig. 3) (Martin *et al.* 2002). Esto debido a que las aguas bombeadas son generalmente más densas que las superficiales y tienden a hundirse, por lo cual la retención superficial de nutrientes y el incremento de la productividad biológica dependen del transporte horizontal de estas aguas y su mezcla con aguas superficiales. Estudios basados en derivadores muestran que los remolinos cuasigeostróficos son el principal mecanismo que controla la mezcla lateral de propiedades en latitudes medias, siendo las regiones de alta energía cinética y actividad de mesoescala frente a los principales sistemas de borde oriental, las que presentan los más altos coeficientes de difusividad lateral en el Océano Pacífico (Zhurbas & Ho, 2003).

Los remolinos de mesoescala son estructuras características y recurrentes en los sistemas de borde oriental (Barton *et al.* 1998, Chaigneau *et al.* 2008, Chereskin *et al.* 2000; Hormazabal *et al.* 2004; Strub & James, 2000). En estos sistemas se ha observado que los remolinos de mesoescala participan en el transporte horizontal de masas de agua con altas concentraciones de plancton, material biogénico y nutrientes provenientes de la zona costera afectada por la surgencia (Aristegui *et al.* 1997, Aristegui *et al.* 2004, Barton *et al.* 2004, Morales *et al.* 2007, Yebra *et al.* 2005). Este transporte mediado por remolinos puede tener un papel importante en la distribución de la biomasa fitoplanctónica fuera de la zona costera, además de su importancia para el sostenimiento de la producción biológica en las regiones oligotróficas de los giros subtropicales (Lee & Williams, 2000).

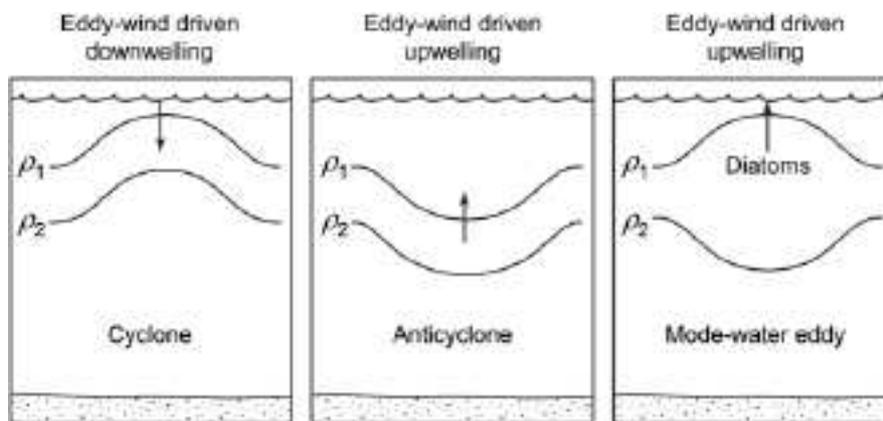


Figura 2. Desplazamiento de las isopícnas asociado a los tres tipos de remolinos de mesoescala. Las dos

superficies de densidad corresponden a la termoclina estacional (ρ_1) y a la termoclina principal (ρ_2). Las flechas indican el sentido de la velocidad vertical resultante de la interacción del viento con el flujo causado por el remolino, el cual es hacia arriba en remolinos anticiclónicos y de media agua, y hacia abajo en remolinos ciclónicos. (Tomado de: McGillicuddy *et al.* 2007).

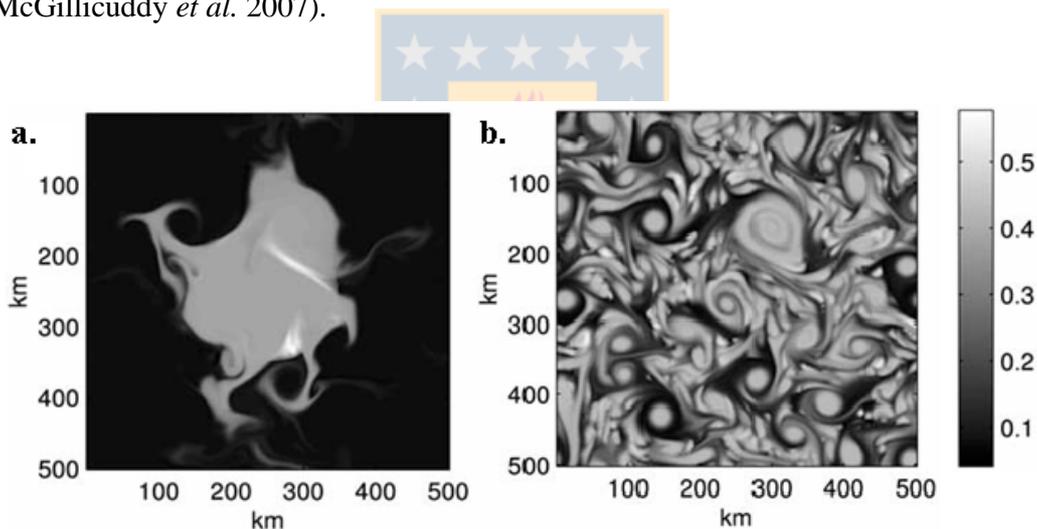


Figura 3. Distribución de la productividad primaria ($\text{mmol N m}^{-3} \text{d}^{-1}$), después de 100 días de un experimento numérico. En ambos casos, el 12% del área total es influenciada por surgencia. En el caso (a), el área afectada por surgencia ocupa una única región circular, observándose un incremento final sobre la productividad del 29%. En el caso (b) el área influenciada por surgencia se encuentra distribuida en numerosas regiones pequeñas y dispersas, las cuales en conjunto producen un incremento del 139% sobre la productividad (Tomado de: Martin *et al.* 2002).

Entre los sistemas de corrientes de borde oriental, el sistema de corrientes Chile-Perú

(SCCP) es uno de los de mayor producción biológica y sustenta algunas de las pesquerías más grandes del planeta (Chavez & Messié 2009, Kudela *et al.* 2006). En este sistema, una fracción significativa de la biomasa fitoplanctónica y de la producción biológica está vinculada al ascenso de aguas ricas en nutrientes hacia la capa iluminada por efecto de la surgencia costera, producida por el esfuerzo del viento (Hill *et al.* 1998). El SCCP presenta un máximo estacional en el esfuerzo del viento favorable a la surgencia, el cual se desplaza en dirección sur desde la primavera hasta el verano (Shaffer *et al.* 1999) y se encuentra en fase con el incremento estacional en la concentración de clorofila-a satelital en la zona costera frente a Chile (Yuras *et al.* 2005). Sin embargo, fuera de la zona costera (>100 km de la costa), el máximo estacional de la clorofila-a se observa después del máximo estacional del viento y no parece estar vinculado directamente con la surgencia costera (Fig. 4) (Yuras *et al.* 2005). En esta zona, la generación y propagación de intensos remolinos de mesoescala configuran una zona de transición costera altamente dinámica, caracterizada por una alta variabilidad en la energía cinética (Fig. 5) (Hormazabal *et al.* 2004). Estas estructuras se desplazan predominantemente hacia el oeste a una velocidad cercana a la del primer orden baroclino una onda de Rossby, modificando en su trayecto el campo medio de las corrientes, la vorticidad y la energía cinética (Fig. 6) (Hormazabal *et al.* 2004, Leth & Shaffer 2001). En la zona de transición costera frente a Chile central (30-40°S) se han observado altas concentraciones de clorofila satelital a lo largo del año (Thomas *et al.* 2001), donde remolinos y meandros de mesoescala son recurrentemente observados en asociación con incrementos de la concentración de clorofila (Fig. 7) (Morales *et al.* submitted). Esto sugiere que mecanismos asociados a remolinos de mesoescala podrían estar modulando la productividad primaria y/o la biomasa planctónica en la zona de transición costera del SCCP.

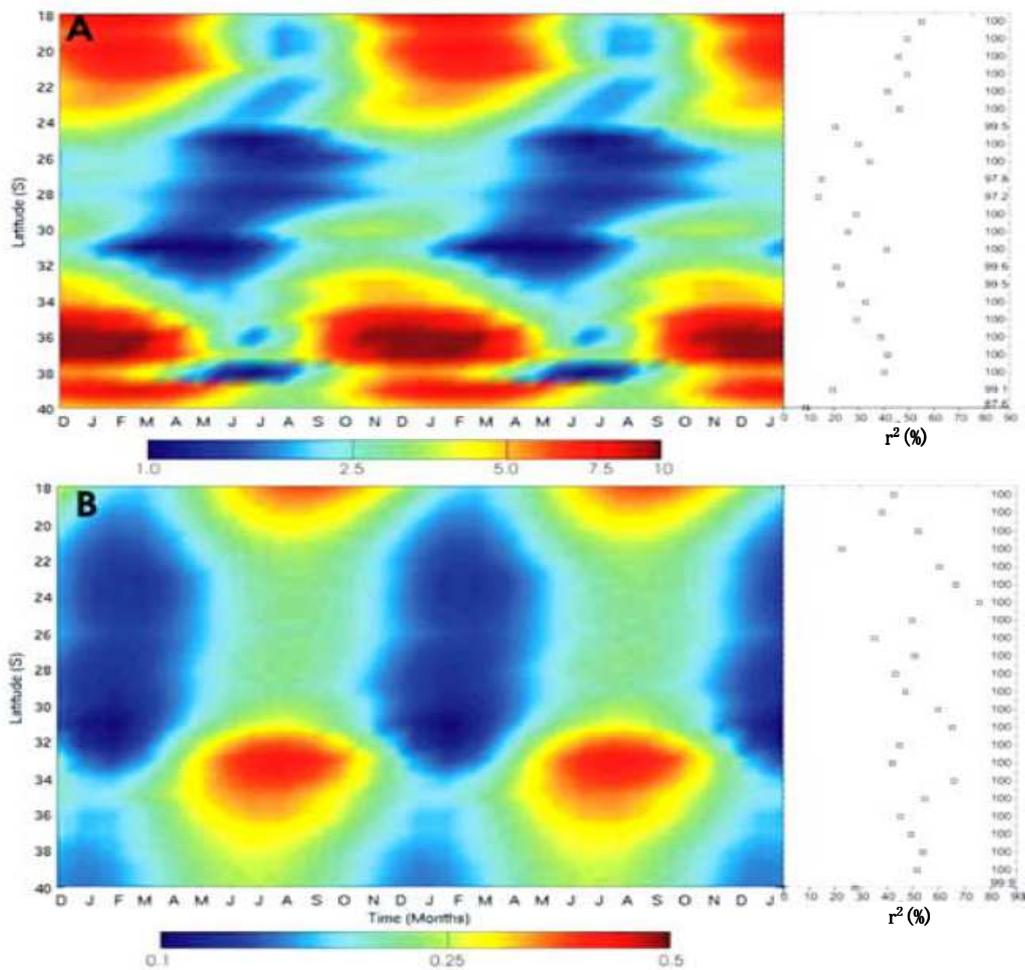


Figura 4. Ajuste armónico del ciclo anual de la información mensual de clorofila satelital SeaWiFS en (a) 20 km y (b) 400 km desde la costa. Los paneles a la derecha son el r^2 del armónico ajustado y los números son los porcentajes de la simulación de Morte Carlo, indicando el nivel de confianza del armónico ajustado. (Tomado de: Yuras et al., 2005)

Frente a la costa central de Chile los remolinos de mesoescala se caracterizan por presentar diámetros alrededor de los 200 km, con extensiones verticales del orden de 500 m y pueden generar un transporte hacia el oeste del orden de 2-3 Sv ($1\text{Sv}=10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) con una duración de varios meses (Hormazabal *et al.* 2004, Johnson & McTaggart 2009). En esta región, las inestabilidades baroclinas de las corrientes costeras han sido propuestas como el principal mecanismo de generación de remolinos de mesoescala (Leth & Shaffer 2001). La mayor proporción de estas estructuras se generan dentro de los primeros 50-100

km de la costa, donde ocurre la mayor parte de la conversión de la energía potencial almacenada en los frentes de surgencia, en energía cinética (Leth & Shaffer 2001). La energía requerida para dar origen a estas estructuras proviene de la surgencia costera y en menor medida del flujo de calor a través de la superficie del océano (Leth & Shaffer 2001, Hormazabal *et al.* 2004). Debido a esto, las regiones que se caracterizan por presentar un mayor esfuerzo del viento favorable a la surgencia son las que muestran mayores valores de energía cinética asociada a remolinos de mesoescala (Hormazabal *et al.* 2004), lo cual sugiere un vínculo dinámico entre la actividad de mesoescala y la surgencia costera en el SCCP. Sin embargo, los mecanismos físicos subyacentes a la relación entre la surgencia y la actividad de mesoescala requieren ser estudiados con mayor detalle en este sistema de borde oriental.

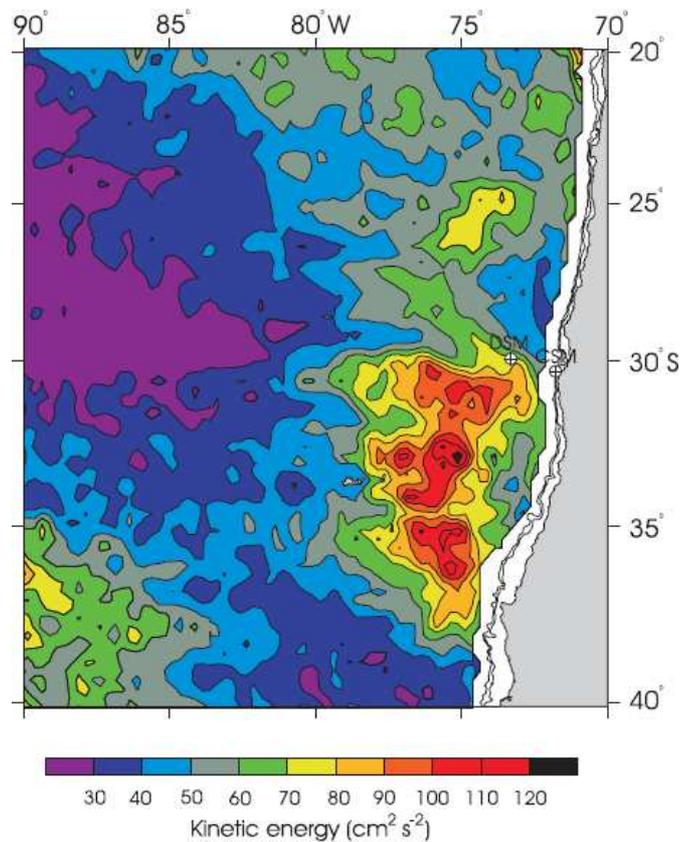


Figura 5. Promedio temporal de la energía cinética, calculada en base de 7.5 años de velocidades geostroficadas estimadas a partir de las mediciones combinadas de altimetría

satelital TOPEX/Poseidon, ERS-1 y ERS-2. (Tomado de: Hormazabal *et al.* 2004)

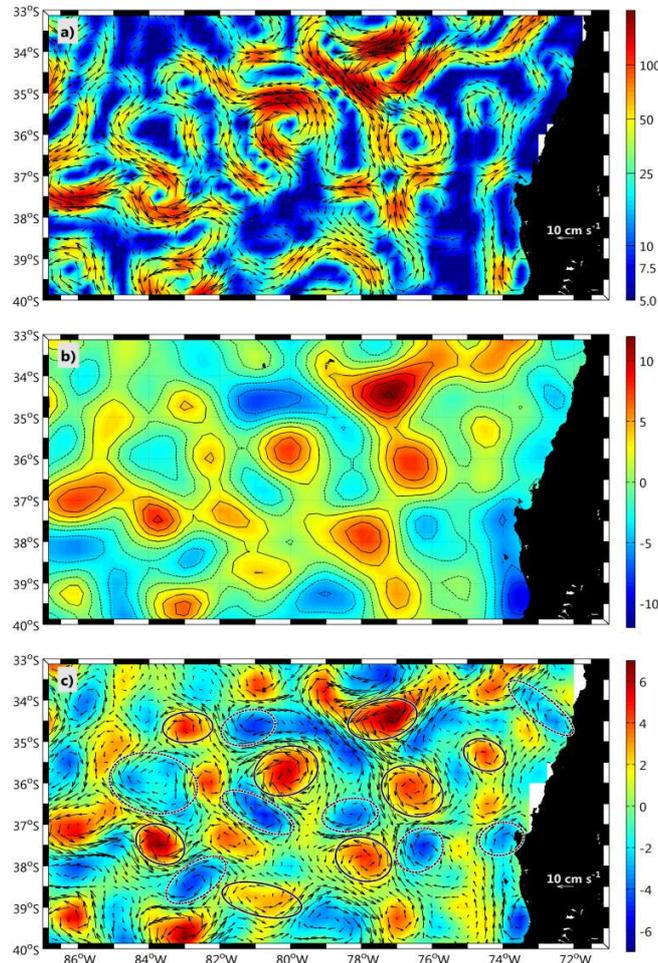


Figura 6. Variabilidad oceanográfica de la zona de transición costera frente a Chile central, para noviembre de 2006. En (a) el campo de la corrientes geostróficas (vectores) revela un complejo campo de remolinos de mesoescala, causando importantes incrementos en la energía cinética principalmente asociados a las corrientes de meandros entre estas estructuras. En (b) se observan las perturbaciones que causan los remolinos de mesoescala en el nivel del mar, donde las anomalías positivas (negativas) del nivel del mar, delimitadas por los contornos continuos (segmentados), corresponden a remolinos anticiclónicos (ciclónicos). En el campo de la vorticidad relativa (c), los mayores valores absolutos de vorticidad se observan asociados a los centros de giro de los remolinos de mesoescala, donde las estructuras anticiclónicas (ciclónicas) exhiben valores positivos (negativos) de vorticidad. En este último las estructuras de remolinos (elipses) son identificadas utilizando el parámetro de Okubo-Weiss. (Tomado de: Morales et al. submitted)

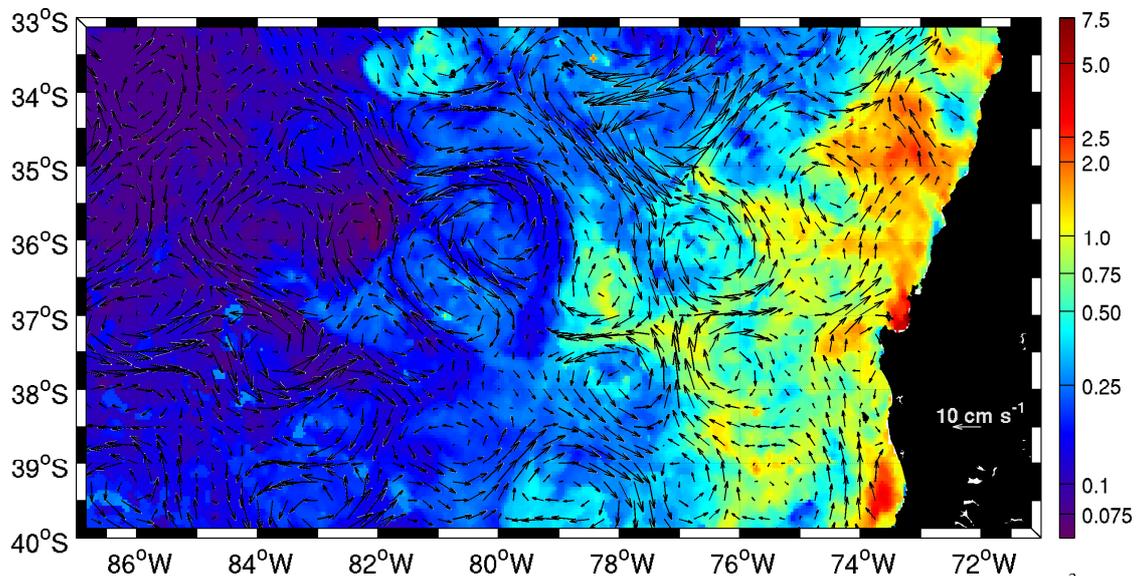


Figura 7. Campo de la velocidad geostrófica (vectores) y concentración de clorofila satelital (mg m^{-3}) en la zona costera y de transición frente a Chile central.

Una de las características distintivas del SCCP es su fuerte conectividad con el Pacífico tropical. El SCCP presenta una significativa variabilidad interanual en la temperatura de la columna de agua, las corrientes y el nivel del mar, estrechamente relacionada con el ciclo de El Niño Oscilación Sur (Blanco *et al.* 2001, Hormazabal *et al.* 2002, Pizarro *et al.* 2002, Shaffer *et al.* 1999, Strub & James 2002). Se ha observado que El Niño perturba el ecosistema de surgencia generando cambios en la estructura de tamaño de la comunidad planctónica, en la producción biológica y en los stocks de los recursos pesqueros pelágicos (Fig. 8) (Alheit & Niquen 2004, Bertrand *et al.* 2004, Cubillos & Arcos 2002, Escribano *et al.* 2004, Iriarte & Gonzalez 2004). En la clorofila satelital se ha observado que durante El Niño 1997-1998, las altas concentraciones de clorofila típicas de la zona costera disminuyen, al igual que su extensión hacia la zona oceánica (Carr *et al.* 2002, Thomas *et al.* 2001). Sin embargo, observaciones *in situ* en la zona costera del norte de Chile durante la misma fase no muestran cambios significativos en la producción primaria y en la biomasa fitoplanctónica (Ulloa *et al.* 2001, Escribano *et al.* 2004). Adicionalmente, durante El Niño la superposición de procesos en la escala sinóptica e

intraestacional, como son las perturbaciones atmosféricas atrapadas a la costa (bajas costeras) y el paso de ondas atrapadas a la costa en el océano, podrían modular la concentración de clorofila en la zona costera (Rutllant & Montecino 2000), sugiriendo que el efecto de El Niño sobre la variabilidad de la clorofila de la región es más complejo que lo esperado.

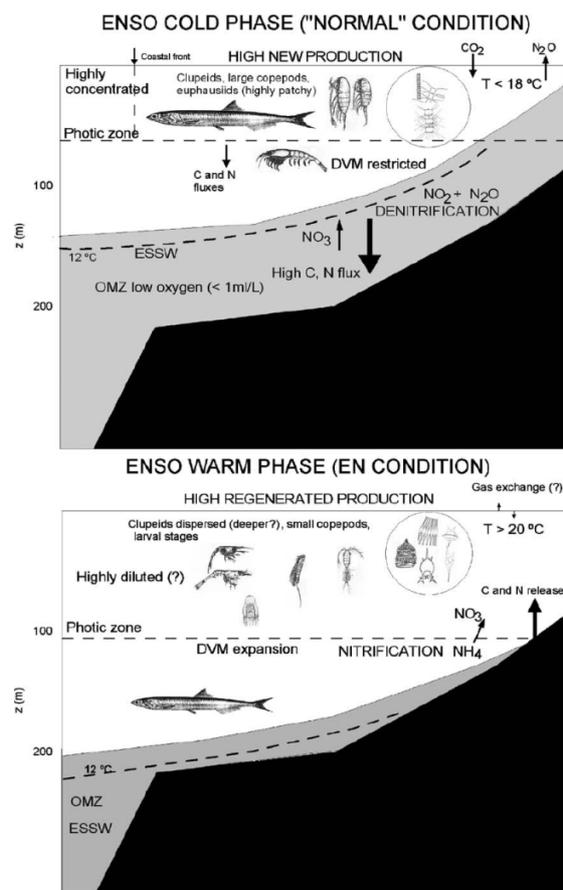


Figura 8. Modelo conceptual resumiendo los principales cambios oceánicos y sus consecuencias químicas y biológicas durante El Niño en el ecosistema de surgencia costera. El panel superior representa una condición normal, y en el panel inferior se representan los cambios típicos durante una condición cálida El Niño. Este modelo está basado principalmente en información proveniente de la región norte (18-30°S). Cambios similares se esperan en la región centro y sur (30°-40°S) aunque con menor intensidad. La isoterma de 12°C representa la temperatura promedio de la masa de Agua Ecuatorial Subsuperficial entre los 100-200 m de profundidad y permite observar el alejamiento de la zona de mínima de oxígeno de la costa bajo condiciones El Niño. (Tomado de: Escribano *et al.*, 2004).

Por otra parte, se ha observado una modulación del ciclo estacional del viento frente a la costa central de Chile durante El Niño, lo cual provoca un corrimiento en el inicio de la estación de surgencia afectando significativamente la variabilidad interanual y la distribución zonal de clorofila-a (Gomez 2008). Además, en la zona de transición costera, la energía cinética asociada a remolinos de mesoescala presenta una significativa variabilidad interanual vinculada a El Niño (Hormazabal *et al.* 2004). Aparentemente esta variabilidad interanual en la energía cinética está relacionada con los cambios de la actividad de los remolinos de mesoescala, lo que podría constituir un factor determinante en la concentración y distribución de la clorofila en la zona de transición costera sobre una escala interanual.

El efecto que tienen los remolinos de mesoescala sobre la clorofila puede generar impactos sobre los niveles tróficos superiores del ecosistema pelágico y en las poblaciones de especies de peces de importancia comercial. Este podría ser el caso del jurel (*Trachurus murphyi*) el cual es un pez pelágico mediano de amplia distribución en el Pacífico sur, cuya mayor proporción de su captura (>2 millones de toneladas por año) se realiza en la zona de transición costera frente a Chile central (Fig. 9) (Arcos *et al.* 2001). La flota pesquera de este recurso frecuentemente concentra su operación en las periferias de los remolinos de mesoescala, ya que en estos lugares es donde se forman las mayores agrupaciones de jurel (Hormazabal *et al.* submitted). Esto sugiere que los remolinos y meandros de mesoescala podrían ser responsables de la formación de ambientes ricos en biomasa planctónica y presas de jurel, que favorecen la formación de agrupaciones de jurel de interés pesquero frente a Chile central.

El efecto de los remolinos de mesoescala sobre la productividad y la biomasa fitoplanctónica en el océano abierto ha sido ampliamente documentado (Allen *et al.* 1996, Aristegui *et al.* 1997, Garçon *et al.* 2001, Harris *et al.* 1997, Kimura *et al.* 2000, Lee & Williams 2000, Martin *et al.* 2002; McGillicuddy & Robinson 1997, McGillicuddy *et al.* 2007, Moran *et al.* 2001, Vaillancourt *et al.* 2003). Sin embargo, el conocimiento acerca del papel que tienen estas estructuras en la productividad biológica y el ecosistema pelágico de

los sistemas de borde oriental es aún incipiente. Considerando los antecedentes descritos, el presente trabajo de Tesis Doctoral aborda el estudio de los remolinos de mesoescala en relación a su efecto sobre la clorofila satelital y explora algunas de sus implicaciones sobre los eslabones tróficos superiores frente a la costa centro sur de Chile. Los artículos enmarcados dentro de este trabajo resaltan la importancia de los remolinos de mesoescala sobre la variabilidad espacial y temporal de la clorofila, además que evidencian su efecto en otros componentes del ecosistema pelágico y en el hábitat de algunas especies de peces de importancia comercial en la región.

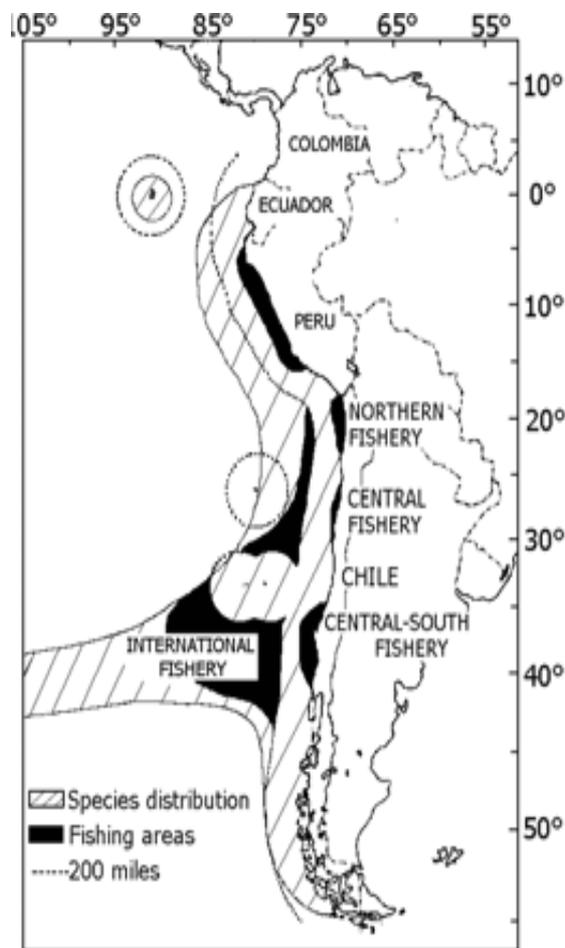


Figura 9. Diagrama de la distribución del jurel en el Pacífico sur oriental. (tomada de: Arcos et al. 2001).

1.1.- Hipótesis

La presencia de altas concentraciones de clorofila satelital en la Zona de Transición Costera frente a Chile central (30°S - 40°S), se debe principalmente al efecto de remolinos de mesoescala, los cuales enriquecen la capa fótica a través del transporte vertical de nutrientes y/o incrementan la concentración de clorofila superficial a través de la advección horizontal de aguas provenientes de la surgencia costera.

1.2.- Objetivo General

Determinar el efecto de los remolinos de mesoescala sobre la abundancia y distribución de la clorofila superficial en la Zona de Transición Costera frente a Chile central (30°S - 40°S), durante el periodo comprendido entre 1997 y 2007.

1.3.- Objetivos Específicos

1.3.1.- Determinar la variabilidad estacional e interanual de la clorofila superficial dentro de los remolinos

1.3.2.- Determinar las relaciones entre los remolinos de mesoescala y la distribución de la clorofila superficial

1.3.3.- Determinar las relaciones de los cambios de vorticidad de los remolinos de mesoescala y la variabilidad de la clorofila superficial en la Zona de Transición Costera frente a

1.3.4.- Explorar las implicaciones de la variabilidad de mesoescala de la clorofila en la formación de ag



2.- MATERIALES Y MÉTODOS

2.1.- Información Satelital

Se utilizaron datos satelitales de clorofila, viento y nivel del mar para la región del Pacífico sur-oriental, comprendida entre 10-40°S y 70-90°W. Los datos diarios de clorofila satelital fueron derivados de las imágenes SeaWiFs L3, con una resolución espacial de ~9 km, los cuales son distribuidos por el Goddard Earth Sciences Distributed Active Archive Center (<http://daac.gsfc.nasa.gov>). Los datos de vientos utilizados corresponden a la combinación de las mediciones de dos scatterómetros satelitales; los campos de vientos semanales ERS2 de 1°x1° de resolución obtenidos del Center for Satellite Exploration and Research (<http://cersat.ifremer.fr/data>), y los campos diarios de vientos descendentes QuickScat L3 de ¼°x¼° de resolución, obtenidos del Jet Propulsion Laboratory SeaWinds Project (<http://podaac.jpl.nasa.gov/quickscat>). Para hacer equivalentes ambas mediciones de viento, los datos QuickScat fueron llevados a la misma resolución temporal de los datos ERS, ambos set de datos fueron filtrados con un filtro pasa-baja Coseno-Lanczos con una amplitud media de 21 días y los datos ERS filtrados fueron llevados a la misma resolución espacial que los datos QuickScat. Posteriormente, se obtuvo la media y la desviación estándar del periodo común entre ambas series, para cada pixel. Las series de tiempo de ERS fueron normalizadas, sustrayendo la media y dividiendo por la desviación estándar del periodo común, y luego renormalizada multiplicando por la desviación estándar y sumando la media de los datos QuickScat del periodo común entre ambos set de datos. Con este procedimiento nos aseguramos que el periodo de mediciones ERS previo al inicio de las mediciones QuickScat, posea igual media y desviación estándar y que contenga las mismas frecuencias de variabilidad que el resto del periodo QuickScat. A partir de esta serie combinada de vientos se calculó el esfuerzo del viento (τ) y el rotor del esfuerzo del viento (ζ), utilizando respectivamente las siguientes expresiones:

$$\tau = \rho_a \cdot C_d \cdot V_w^2 \quad \text{y} \quad \zeta = \nabla \cdot \tau$$

donde ρ_a es la densidad del aire ($=1.22 \text{ kg m}^{-3}$), Cd es el coeficiente de arrastre a 10 metros de la superficie (1.55×10^{-3}) y V_w la magnitud del esfuerzo del viento.

Los datos de la anomalía del nivel del mar (ζ) corresponden al producto combinado de las misiones TOPEX-Poseidon, Jason-1, ERS-1/2 y Envisat, distribuido por AVISO (www.aviso.oceanobs.com). A partir ζ se calcularon los componentes del campo de la velocidad geostrófica superficial U_g y V_g , empleando la metodología descrita por Hormazabal *et al.* (2004), donde

$$U_g = \frac{-g}{f} \frac{\partial \eta}{\partial y} ,$$

$$V_g = \frac{g}{f} \frac{\partial \eta}{\partial x} .$$

y Ω representa el parámetro de Coriolis. Con los componentes de velocidad geostrófica, se estimó también la vorticidad relativa (\diamond) y la energía cinética por unidad de masa (EKE), utilizando respectivamente

$$\diamond = \frac{\partial V_g}{\partial x} - \frac{\partial U_g}{\partial y} ,$$

$$EKE = \frac{1}{2} U_g^2 + V_g^2 .$$

2.2.- Caracterización y seguimiento de remolinos de mesoescala

La identificación de remolinos de mesoescala en el campo de velocidades geostróficas se realizó empleando las propiedades del parámetro de Okubo-Weiss (W), descrito por Isern-Fontanet *et al.* (2004). El parámetro W es un índice que determina la importancia relativa de la deformación y la vorticidad en un flujo, calculado como;

$$W = s_s^2 \cdot s_n^2 - \diamond^2 ,$$

donde \diamond es la vorticidad (definida previamente), s_s es la tasa de deformación del cizalle y s_n es la tasa de deformación por el componente normal del esfuerzo, definidas como;

$$s_s = \frac{\partial V_g}{\partial x} \cdot \frac{\partial U_g}{\partial y} \quad \text{y} \quad s_n = \frac{\partial U_g}{\partial x} - \frac{\partial V_g}{\partial y} .$$

En las regiones donde $W < 0$, la rotación domina sobre el flujo, lo cual es característico de las regiones al interior de vórtices. De esta manera, los remolinos de mesoescala son definidos como las regiones donde W es menor a un valor umbral $W_0 = -0.2 \cdot \sigma_w$, donde σ_w es la desviación estándar espacial de W en toda la región. El tamaño de los remolinos se estimó calculando el área dentro del umbral W_0 . El transporte superficial asociado a remolinos fue estimado considerando una extensión vertical de 200 m, la cual es moderada considerando las escalas verticales típicas reportadas para estas estructuras por Hormazabal *et al.* (2004) y Johnson & McTaggart (2009). La trayectoria y velocidad de los remolinos fue determinada mediante el seguimiento de los centros de giro, los cuales exhibieron los máximos valores absolutos de vorticidad dentro de esas estructuras. El sentido de giro fue determinado mediante el signo de la vorticidad del centro de giro; negativo para remolinos ciclónicos y positivo para anticiclónicos. Como indicador de la intensidad de giro de los remolinos se utilizó el valor absoluto de la vorticidad en el centro de giro.

2.3.- Interpolación de información satelital

La cobertura nubosa asociada al paso de sistemas frontales y a la formación de estratos costeros genera brechas en los datos de clorofila satelital de la región, con frecuencias del orden de días a semanas. Para estimar los datos faltantes y permitir análisis posteriores con los datos de clorofila, se utilizó el método de interpolación DINEOF (Data Interpolating Empirical Orthogonal Function) (Alvera-Azcárate *et al.* 2007). A diferencia de otros métodos de interpolación como el Kriging y el Optimal Interpolation (OI), DINEOF no requiere valores previamente estimados de covarianza y distancia de correlación, ya que usa para la interpolación la correlación entre las observaciones analizada mediante funciones ortogonales empíricas (EOFs).

Para la interpolación DINEOF los datos son almacenados inicialmente en una matriz X de tres dimensiones (longitud, latitud, tiempo), a la cual se le sustrae el promedio espacial y temporal. Los datos faltantes en la matriz X son inicializados como cero (0) para garantizar que no se encuentren sesgados con respecto a X . Sobre esta matriz se realiza una primera descomposición ortogonal (primer EOF). Los datos faltantes son reemplazados usando el EOF obtenido, mediante:

$$X_{i,j} = \sum_{p=1}^k \rho_p \cdot u_p \cdot v_p^T$$

donde i, j son los índices espacial y temporal de los datos faltantes en la matriz X , ρ_p es el correspondiente valor singular; u_p y v_p son la p -ésima columna de los componentes (EOFs) espacial (U) y temporal (V), obtenidos de la descomposición ortogonal

$$X = U \cdot V^T$$

Con los nuevos valores estimados, se realizan repetidamente nuevas descomposiciones ortogonales hasta obtener una convergencia de los datos estimados. Este procedimiento se realiza para cada k , donde k es un número máximo de EOFs a considerar para la interpolación.

La interpolación DINEOF de los datos de clorofila se realizó a través de una caja móvil de 31 días aplicada consecutivamente a lo largo de la serie de clorofila (Fig. 10). En esta interpolación solo se consideraron las primeras dos EOFs, las cuales acumulan la mayor fracción de la varianza de las series.

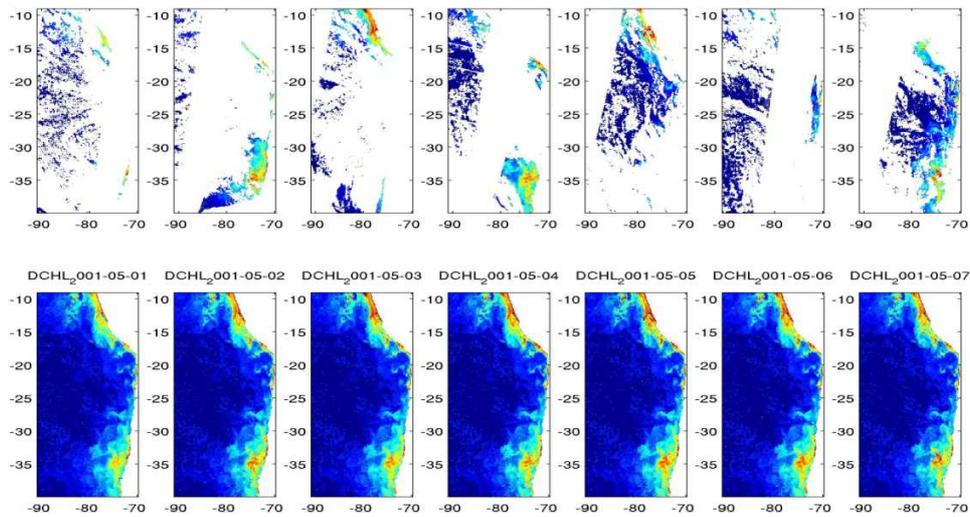


Figura 10. Ejemplo de la interpolación DINEOF de los datos de clorofila del Pacífico sur-oriental de la primera semana de mayo de 2001. El panel superior muestra la cobertura original de datos y el inferior los datos restituidos mediante DINEOF. La interpolación utilizó 31 días de datos de clorofila, centrados en el día 4 de mayo de 2001.

2.4.- Análisis de series de tiempo

Las series de tiempo de información satelital fueron frecuentemente analizadas a través del ajuste de funciones armónicas, filtros de frecuencia pasa-baja y correlación cruzada. El ajuste de funciones armónicas por mínimos cuadrados, se realizó principalmente en las frecuencias de 365,25, 182,63, 121,75 y 91,3125 días, con el fin de describir la amplitud y fase de la fluctuación estacional de la clorofila. Varios filtros pasa baja Coseno-Lanczos fueron diseñados y aplicados frecuentemente con el fin de preparar las series de tiempo satelitales para la realización de análisis posteriores más complejos. Los filtros Coseno-Lanczos se basan en funciones de Fourier truncadas, las cuales le permiten superar las ondulaciones de Gibbs que presentan comúnmente otros filtros cerca de la frecuencia de corte, y de esta manera reducen la pérdida de energía asociada a frecuencias que se desean retener (Emery & Thomson 2004). En la mayoría de los casos se utilizaron filtros Coseno-Lanczos para eliminar la variabilidad de alta frecuencia intramensual (amplitud media en 30 días y una longitud de 90 días) y para aislar la variabilidad interanual de las series e índices climáticos (amplitud media de 400 días y una longitud de

900 días). Las funciones de correlación cruzada se utilizaron principalmente para determinar el grado de asociación y desfase temporal entre series con respecto a la anomalía de la temperatura superficial del mar en la región En Niño 3.4, obtenida de la NOAA (<http://www.cpc.noaa.gov>).

2.5.- Análisis espectral multivariado

Los datos de clorofila, nivel del mar, energía cinética y esfuerzo del viento fueron analizados simultáneamente en el dominio de la frecuencia utilizando el Multitaper Method-Singular Value Decomposition (MTM-SVD), desarrollado por Mann & Park (1999). Este método aprovecha las ventajas del análisis espectral multitaper, el cual proporciona una estimación óptima del espectro de variabilidad minimizando la fuga espectral y reduciendo la varianza de la estimación, al utilizar un promedio de las principales estimaciones espectrales ortogonales en cada frecuencia. El principal objetivo del MTM-SVD es el de identificar y aislar las oscilaciones estadísticamente significativas que se encuentran correlacionadas o son comunes para un grupo de series de tiempo independientes, como son los conformados por las observaciones periódicas satelitales sobre una región. Las oscilaciones identificadas pueden ser moduladas o de naturaleza irregular, lo que es ventajoso para analizar fluctuaciones no-periódicas vinculadas a una variabilidad de gran escala como El Niño.

Mediante el método MTM-SVD se analizaron las oscilaciones estadísticamente significativas en la clorofila, el nivel del mar, la energía cinética y el esfuerzo del viento, en la región del SCCP (~8209 localidades). Previo al análisis, a cada localidad se le sustrajo la media y la desviación estándar temporal y fue ponderada por área, multiplicándola por el coseno de su latitud con el fin de minimizar la dominancia numérica y espacial en la señal. El análisis MTM-SVD se aplicó con 3 ventanas (tapers) ortogonales y 2 grados de libertad. Los niveles de significancia en los espectros de varianza fraccional fueron determinados mediante la técnica de re-muestreo Bootstrap, descrita por Mann & Park (1999).

3.- RESULTADOS

3.1.- Remolinos de mesoescala y altas concentraciones de clorofila frente a la costa central de Chile (29°-39°S)

Mediante observaciones satelitales de clorofila, esfuerzo del viento y anomalías del nivel del mar en el periodo 1997-2003, se observa que la propagación costa-afuera de los remolinos de mesoescala contribuye significativamente a expandir el área de alta concentración de clorofila fuera de la zona costera directamente afectada por la surgencia frente a Chile central. En esta región, los remolinos de mesoescala poseen tamaños característicos $\sim 6.45 \times 10^3 \text{ km}^2$, se forman cerca de la zona costera entre primavera-verano y se desplazan hacia el oeste a una velocidad $\sim 1,68 \text{ km d}^{-1}$, alcanzando una distancia de la costa $\sim 500 \text{ km}$ en invierno. Las concentraciones de clorofila observadas en las trayectorias de los remolinos son elevadas debido al bombeo de Ekman y/o al transporte de nutrientes y clorofila desde la zona costera asociado a estas estructuras. De esta manera, los remolinos de mesoescala aparecen asociados a más del 50% del máximo invernal de la clorofila en la zona de transición costera, durante la estación de baja actividad de la surgencia costera. Por otra parte, el acoplamiento entre los remolinos de mesoescala y la surgencia costera, permite extender el área de alta productividad frente a Chile central y la prolonga hacia el invierno en la zona de transición costera.



3.2.- Patrón espacial de la variabilidad anual e interanual de la clorofila-a en el sistema de corrientes de Chile-Perú

Más de una década de datos satelitales (1997-2007) de clorofila-a, altimetría y viento sobre el mar, fueron utilizados para analizar la variabilidad espacial y temporal de la biomasa fitoplanctónica en el sistema de corrientes Chile-Perú (10-40°S), y los mecanismos físicos subyacentes a esta variabilidad. A través del método MTM-SVD (Multitaper Method-Singular Value Decomposition), se identificaron las oscilaciones que son estadísticamente significativas para toda la región y se reconstruyeron sus patrones espaciales asociados. Los resultados indican que el esfuerzo del viento y la propagación de ondas de Rossby dominan la señal anual de la clorofila-a en la zona costera y de transición costera de toda la región. Las anomalías de la energía cinética vinculadas a la propagación de estructuras de mesoescala, contribuyen al incremento de la señal anual de la clorofila-a frente a Perú (10-18°S) y en la zona centro-sur de Chile (30-40°S). En la zona oceánica adyacente, el rotor del esfuerzo del viento determina el incremento estacional de la clorofila-a durante la primavera. La variabilidad interanual de la clorofila-a se encuentra estrechamente asociada a la ocurrencia de eventos El Niño, cuya señal es transmitida desde la costa y hacia mar afuera a través de ondas de Rossby y remolinos de mesoescala. Frente a la costa centro-sur de Chile la señal de El Niño aparece con antelación respecto a la costa Peruana, sugiriendo una teleconexión atmosférica con la variabilidad El Niño de la región ecuatorial.



3.3.- Remolinos de Mesoescala, clorofila y captura de jurel (*Trachurus murphyi*) en la zona centro-sur de Chile (30°-45°S), durante el periodo 1995-2008.

Marco Correa-Ramírez^{1,2}, Sergio Núñez Elías¹, Carlos Gonzales¹, Samuel Hormazabal²

¹ Departamento de Pesquerías, Instituto de Investigación Pesquera S.A. Talcahuano-Chile, Colon 2780. ² Departamento de Geofísica, Universidad de Concepción.

3.3.1.- Resumen

La pesquería de jurel es una de las más importantes de Chile (desembarques de ~2 millones de toneladas al año) y su captura se concentra frente a la costa centro sur de Chile pese a su amplia distribución en el Pacífico sur. Las fluctuaciones la captura y el inexplicable alejamiento de las agregaciones explotables durante los últimos años, han evidenciado la necesidad de profundizar el conocimiento de la variabilidad del hábitat del jurel en esta región. Alrededor de 15 años de información pesquera en conjunto con información satelital de clorofila, altimetría, temperatura y vientos, son utilizados para analizar las relaciones entre los remolinos de mesoescala, la clorofila y la captura de jurel frente a la costa centro-sur de Chile. En esta región se presentan elevadas concentraciones de clorofila vinculadas a la surgencia costera y a la propagación hacia el oeste de remolinos de mesoescala. Las agregaciones explotables de jurel en esta región aparecen desde el verano austral en las cercanías de la costa y se desplazan progresivamente hacia el oeste a través de la zona de transición costera (ZTC) hasta la estación de invierno (junio-sep). Este desplazamiento se encuentra vinculado a los frentes de baja temperatura y alta energía cinética generados entre los remolinos de mesoescala. Igualmente, la región de alta energía cinética dentro de la zona de transición costera presenta una expansión estacional con un máximo en invierno que es coherente con las mayores capturas observadas durante esta época. En la escala interanual, la energía cinética presenta una migración norte-sur de

alrededor de 400 km, la cual podría estar favoreciendo la generación de agrupaciones oceánicas de jurel en los últimos años. Tal migración podría ser un mecanismo determinante en los cambios de régimen biológico dentro del sistema de corrientes de Chile-Perú.

3.3.2.- Introducción

El jurel es un pez pelágico que habita a lo largo de la costa de Ecuador, Perú y Chile, sobre una banda restringida entre los frentes subtropical y el subpolar (30-45°S), que se extiende entre la costa centro-sur de Chile y Nueva Zelanda, conocida como el cinturón del jurel (Arcos *et al.* 2001). La pesquería de jurel ha sido históricamente la más importante en Chile y actualmente reporta desembarques cercanos a los 2 millones de toneladas al año, concentrados principalmente frente a la zona centro-sur de Chile. En esta zona se presenta una alta productividad biológica que se encuentra directamente vinculada a la surgencia de aguas subsuperficiales ricas en nutrientes generada por el esfuerzo del viento en la zona costera y a la actividad de remolinos y meandros de mesoescala que se desplazan al oeste en la zona de transición costera (Correa-Ramírez *et al.* 2007).

Las observaciones que realiza la flota pesquera de jurel (FPJ) sugieren que durante la temporada de pesca la ubicación y el rendimiento de los lances de pesca parecen estar relacionados a la ocurrencia de remolinos y meandros de mesoescala (Hormazabal *et al.* submitted). Sin embargo entre los años 2002-2006 la flota pesquera se ha visto obligada a desplazar su actividad hacia mar afuera alrededor de 1000 km de la costa, en respuesta a una mayor dispersión de las agregaciones de jurel durante este periodo, lo que ha conllevado a un incremento sensible en los gastos de operación. La dinámica que subyace tras esta variabilidad espacial en la captura de jurel en la escala anual e interanual es aun desconocida. Un mayor conocimiento de los procesos que rigen la formación de agregaciones explotables podría constituir una herramienta importante para el pronóstico y la administración de este recurso. En el presente trabajo se utiliza la información pesquera de jurel junto con más de una década de información satelital de clorofila, altimetría,

vientos y temperatura, para describir la variabilidad espacial de la captura de jurel y determinar su relación con la clorofila y la variabilidad de mesoescla observada en la región.

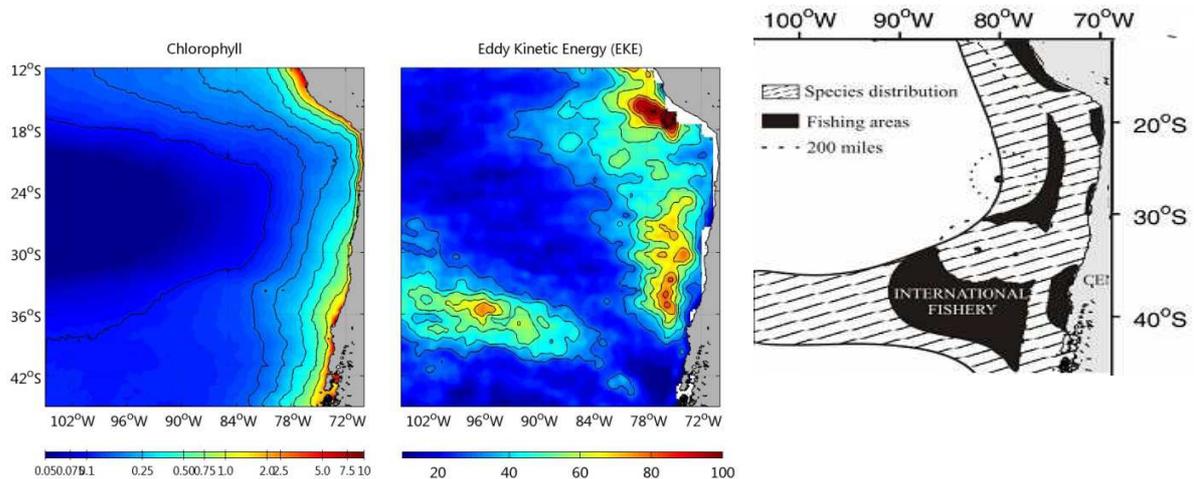


Figura 11. (a) Promedio sobre 10 años de datos de la clorofila satelital y (b) la energía cinética, calculada partir de la velocidad geostrófica y altimetría satelital. (c) Diagrama de la distribución del jurel, tomada de: Arcos *et al.* (2001).

3.3.3.- Metodología

La distribución espacial de la captura de jurel entre 1995-2008 se consolidó utilizando distintas fuentes de información: la estadística de los lances de pesca proporcionada por FPJ, la posición geográfica de los barcos en operación reportada 2 veces al día a la guardia costera, las toneladas desembarcadas en puerto y los registros de observadores a bordo. Esta información de captura fue remuestreada a una cuadrícula regular de 10x10 km. El análisis de las condiciones oceanográficas de las zonas de pesca se realizó mediante información satelital de corrientes, clorofila y vientos. Los datos de corrientes fueron calculados a partir de los datos de altímetra satelital de $\frac{1}{4}^\circ$ de las misiones TOPEX-Poseidon y ERS, distribuidos por AVISO (www.aviso.oceanobs.com). En base al campo de corrientes se calculó el campo de la energía cinética de la región de estudio, asumiendo un volumen de masa unitaria para cada píxel. Los remolinos de mesoescala

fueron identificados en el campo de corrientes mediante el parámetro de Okubo Wesiss (W), utilizando un umbral de -1×10^{-12} y un diámetro mínimo de 60 km. Los datos diarios de clorofila provienen de los sensores SeaWiFs y Modis, de ~9 y 4 km de resolución respectivamente, obtenidos del <http://daac.gsfc.nasa.gov>. Los campos diarios en la tarde (descendentes) de vientos QuickScat L3 de $\frac{1}{4}^\circ$ de resolución, fueron obtenidos del Jet Propulsión Laboratory SeaWinds Project (<http://podaac.jlp.nasa.gov/quickscat>). Los datos diarios de temperatura superficial del mar provienen del reanálisis de los datos del AVHRR Pathfinder version 5, con 4 km de resolución espacial, obtenidos de <http://www.nodc.noaa.gov/SatelliteData/pathfinder4km/>. A partir de los datos de corrientes, clorofila y vientos se construyen promedios estacionales y climatologías para la región, además de gráficas distancia de la costa-tiempo con promedios espaciales sobre transectas perpendiculares a la costa, alrededor de las latitudes de mayor incidencia de captura de jurel.

Para la determinación del óptimo ambiental de las agregaciones de jurel se utilizó la información hidroacústica proveniente del proyecto “Evaluación directa del jurel con naves de la flota FIP 2007-24” (Sepulveda *et al.* 2009). La información de biomasa hidroacústica de jurel se discretizó en 50 intervalos de igual dimensión dentro de los valores mínimos y máximos de las variables ambientales previamente identificadas como importantes para la distribución del jurel: Temperatura, gradiente de temperatura superficial, nivel del mar, vorticidad, velocidad de la corriente, energía cinética, clorofila, profundidad de la termoclina, salinidad y densidad superficial. A las curvas resultantes de distribución de la captura se les ajustó por mínimos cuadrados una función Gaussiana, a través de la cual se determinaron los parámetros de una distribución normal (media y desviación estándar). El óptimo de jurel para cada una de las variables consideradas fue asumido como el rango entre ± 1 desviación estándar, el cual concentra el 70% de la biomasa de jurel.

3.3.4.- Resultados

3.3.4.1.- Clorofila, energía cinética y distribución del jurel en el Pacífico Sur-Oriental

La distribución de jurel en el Pacífico Sur-Oriental se observa coherente con las áreas de mayor concentración de clorofila satelital a lo largo de la costa suramericana y sobre la zona de la deriva del oeste (Fig. 11). La concentración de clorofila se observa incrementada a lo largo de la costa suramericana debido principalmente al esfuerzo del viento costero hacia el ecuador, el cual favorece la surgencia de aguas sub-superficiales ricas en nutrientes e incrementa la productividad biológica y la concentración de clorofila satelital en la zona costera (~100 km de la costa). Además, los remolinos y meandros de mesoescala originados a partir de los frentes de surgencia bombean y transportan hacia la zona oceánica aguas ricas en nutrientes provenientes de la surgencia costera, ampliando la banda de alta concentración de clorofila hasta ~800 km costa afuera (Correa-Ramírez *et al.* 2007). Igualmente la alta ocurrencia de remolinos y meandros de mesoescala que se originan entre los frentes subtropical y subpolar, parecen estar relacionadas con las altas concentraciones de clorofila satelital observadas en la zona de la deriva del oeste (Fig. 11-a). Tales áreas de alta concentración de clorofila corresponden a zonas de alta productividad biológica que estarían favoreciendo una alta abundancia de presas y de esta forma estimulan la formación de las agregaciones de jurel, dando una posible explicación a la distribución geográfica de la especie.

La alta actividad de mesoescala frente a la costa sur Americana y en la región de la corriente de deriva de los vientos del oeste, genera dos regiones de alta energía cinética (EKE) (Fig. 11-b). Sobre estas regiones de alta EKE se distribuyen las principales áreas de captura de jurel: frente a la costa Peruana (12-18°S), en el norte de Chile alrededor de los 21°S frente a Iquique y entre 28 y 30°S frente Coquimbo y Caldera, y en el centro sur de Chile entre los 33-42°S (Arcos *et al.* 2001) (Fig. 11-c). Esta coherencia espacial entre las áreas de captura y la EKE sugiere que la ocurrencia de estructuras como remolinos o meandros de mesoescala podrían estar favoreciendo la formación de agrupaciones comerciales de jurel. Sin embargo, factores operacionales como la autonomía de las embarcaciones y la distancia a los puertos de desembarque afectan también la amplitud

de las áreas de captura.

3.3.4.2.- Zonas de Pesca y Captura de Jurel en el periodo 1995-2008

Las mayores capturas de jurel por la flota Chilena y la extranjera, ocurren entre los 32-45°S frente a la costa centro sur de Chile. En esta región, la FPJ Chilena captura alrededor de 2 millones de toneladas de jurel al año. Sin embargo, la ubicación de las zonas de pesca y la captura promedio anual ha presentado cambios importantes durante el periodo 1995-2008 (Fig. 12). Entre 1995-2001 las zonas de pesca se observaron ubicadas entre la zona costera y los 76°W, conformando regiones de alta densidad de captura con extensiones menores a 10.000 km, las cuales obtenían más del 15% de la captura anual. Posteriormente, entre los años 2002-2008 se observa una desagrupación de las zonas de pesca y un desplazamiento progresivo de la actividad de la FPJ hacia el oeste, alcanzando los 86°W. Es así como en los años 2007-2008 la captura de jurel se realizó exclusivamente en la zona oceánica, debido a que durante estos años no se presentó el acercamiento estacional del recurso a la zona costera que ocurría típicamente durante el verano.

La captura total anual también ha presentado una tendencia a la disminución, de $>4 \times 10^6$ toneladas en 1995 a $1,8 \times 10^6$ toneladas en 2008. Sin embargo, las mediadas de regulación de la captura no permiten establecer con certeza si esta tendencia a la disminución se encuentra vinculada a una disminución regional de la abundancia de jurel. Entre 1995-1999 se implementó un sistema flexible de vedas y cuotas de captura por embarcación, el cual favoreció los altos desembarques registrados en este periodo. A partir del año 1999, la disminución progresiva de la captura motivó a la implementación de un Límite Máximo de Captura por Armador (LMCA), sistema que fiscaliza la captura desembarcada y permite una mayor regulación. Este límite se fija anualmente en base a la evaluación de stoks realizadas en los años precedentes y a la capacidad de la flota de las compañías pesqueras operativas en la zona. Aunque el LMCA ha mantenido las capturas anuales por debajo de 2×10^6 toneladas en los últimos 5 años, esta medida administrativa no ejerce influencia sobre el rendimiento espacial de la captura o sobre el desplazamiento

observado de la FPJ hacia el oeste.

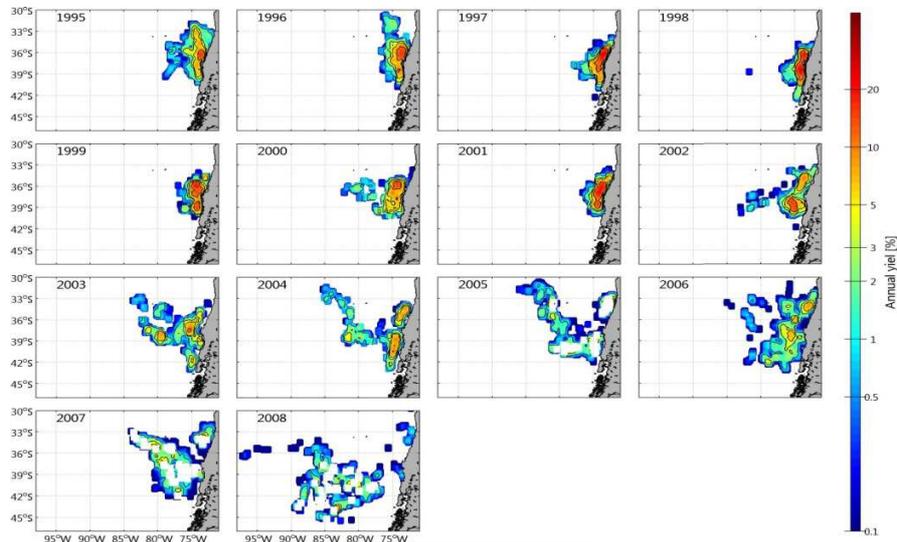


Figura 12. Rendimiento espacial de la captura de jurel. El color rojo representa valores sobre el 15% del total anual de la captura.

3.3.4.3.- Zonas de pesca y estructuras de mesoescala frente a Chile central

Las mayores capturas de jurel frente a Chile central ocurren entre los 200 km de la costa y los 80°W en la zona de transición costera, zona que se caracteriza por una alta ocurrencia de remolinos y meandros de mesoescala (Hormazabal *et al.* 2004). En esta zona, es comúnmente observado que la FPJ tanto nacional como extranjera, concentra los lances de pesca en las regiones de corrientes de meandro entre los remolinos de mesoescla (Fig. 13). Aunque son aun desconocidos los mecanismos que determinan la asociación entre las agrupaciones de jurel y los ambientes de meandros, observaciones a bordo de las embarcaciones pesqueras en operación reportan frecuentemente que las agregaciones de jurel se desplazan en contra de las corrientes de meandro cuando se están alimentando (Gretchina, comp. pers.). Este comportamiento alimentario podría estar vinculado al incremento en la frecuencia de encuentro de presas y/o reportar una mayor eficiencia alimentaria en ambientes de alta corriente.

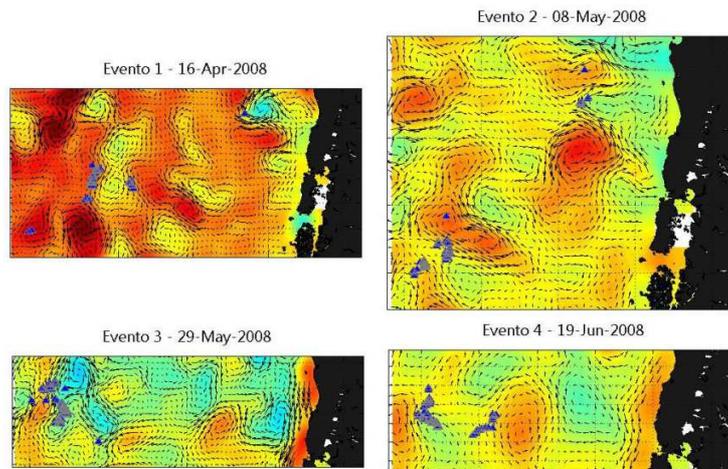


Figura 13. Anomalía del nivel del mar (color de fondo), corrientes geostróficas (vectores) y posición de los lances de pesca (triángulos azules), durante 4 eventos de capturas superiores a 4,000 toneladas en el año 2008. Anomalías positivas (negativas) del nivel del mar se encuentran asociadas a remolinos anticiclónicos (cyclónicos).

La preferencia del jurel a formar agregaciones en las zonas de meandros también es observada mediante la aplicación del parámetro Okubo-Weiss (Fig. 14). Con este parámetro es posible diferenciar la captura realizada en las regiones dominadas por la vorticidad al interior de los remolinos, de la captura realizada en las regiones de meandros al exterior de los remolinos, las cuales son dominadas por una alta variabilidad espacial de las corrientes. Este parámetro indica que la captura pre- estimada a través de observaciones hidroacústicas y la captura efectiva es mayor en las corrientes de meandro. Además, se observa que el sentido de giro de estas corrientes, el cual determina si están vinculadas a remolinos ciclónicos o anticiclónicos, no parece tener una influencia importante sobre la captura.

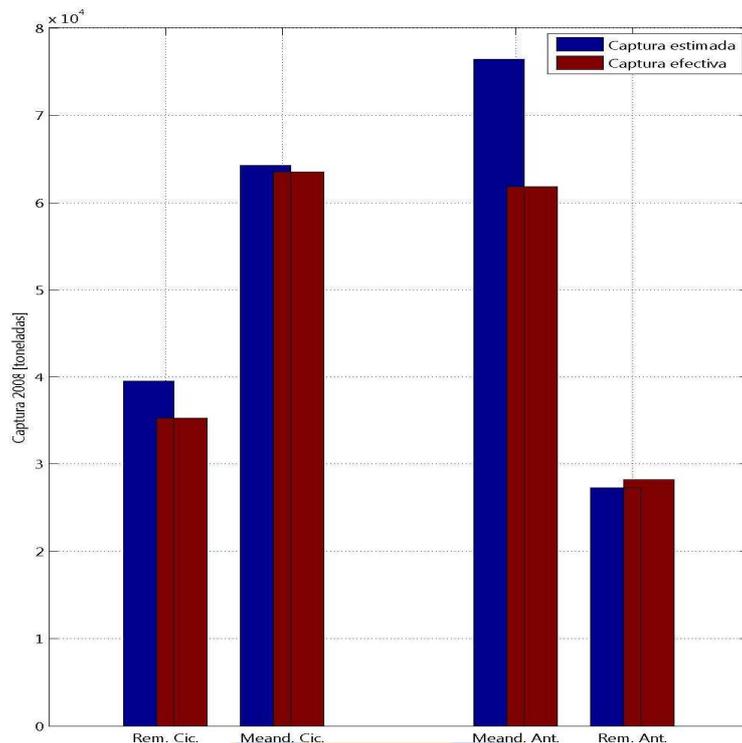


Figura 14. Captura asociada a las regiones de mesoescala (remolinos y meandros ciclónicos y anticiclónicos) determinadas mediante el parámetro Okubo-Weiss durante el año 2008. Las barras de color azul representan la biomasa estimada acuáticamente antes de realizar el lance de pesca. Las barras de color rojo representan la captura efectiva.

Los meandros de mesoescala se caracterizan por presentar bajos valores de vorticiadad, un nivel del mar neutral y altos valores de energía cinética. Estas características también son observadas asociadas a la distribución de la mayor proporción de la biomasa de jurel, determinada mediante prospecciones hidroacústicas realizadas en la región (Fig. 15). Mas del 70% de la biomasa acústica del jurel se observa asociada a velocidades geostroficas altas ($5.2 \pm 3.9 \text{ cm s}^{-1}$), anomalías del nivel del mar cercanas a cero (-0.53 ± 3.4) y vorticidades neutras ($-7.3 \times 10^{-8} \pm 1.3 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$). Además, la mayor proporción de la biomasa acústica también se encontró asociada a ambientes con un estrecho rango de temperatura superficial del mar ($11,53 \pm 1,40 \text{ }^\circ\text{C}$), caracterizados por una termoclina de poca profundidad ($47.75 \pm 1.2 \text{ m}$) y fuertes gradientes térmicos superficiales. Tales características podrían estar indicando una preferencia del jurel por zonas frontales generadas dentro de

las corrientes de meandro entre los remolinos de mesoescala. La generación de estas zonas frontales podría estar asociada a la divergencia de las corrientes de meandro, las cuales generan áreas de surgencia de aguas subsuperficiales en los bordes de los remolinos, favoreciendo de esta manera la concentración de presas y la formación de agregaciones de jurel (Fig. 16).

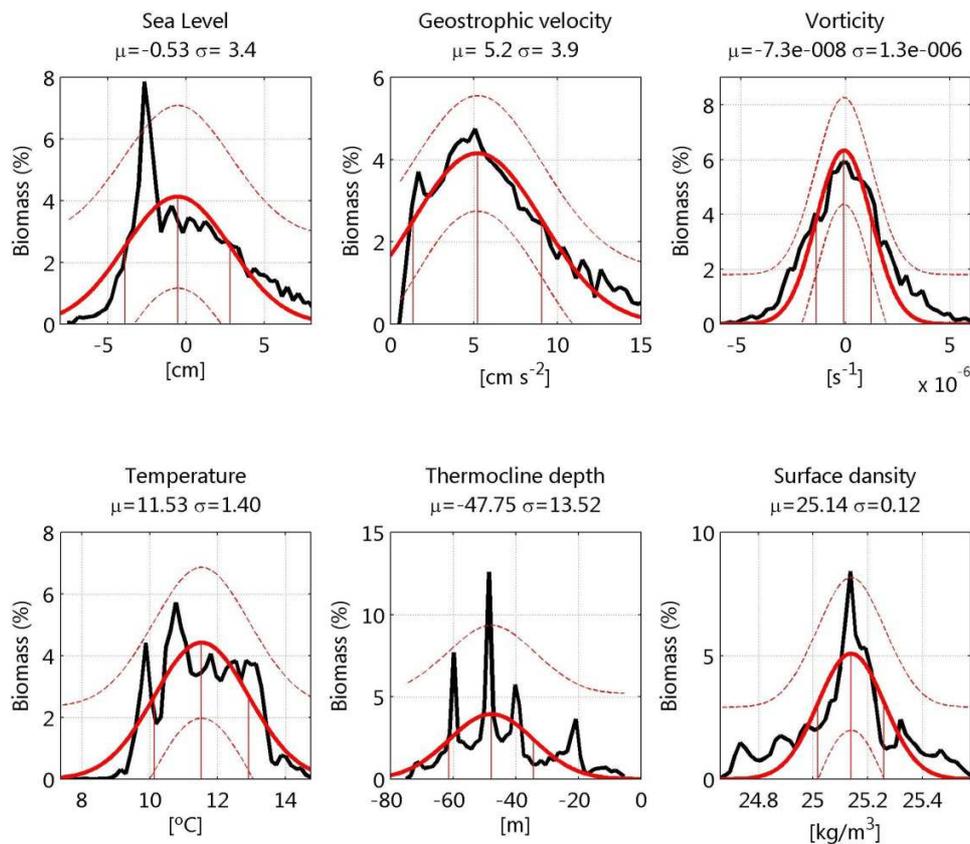


Figura 15. Distribución de la biomasa acústica y rangos ambientales del hábitat de pesca de jurel frente a la costa centro-sur de Chile. Las curva roja continua en cada panel representan una función teórica de Gauss ajustada mediante mínimos cuadrados a la distribución de la biomasa acústica. Las curva roja segmentada indican los intervalos de confianza al 99.5% del ajuste. Las líneas verticales de color rojo bajo las curvas indican el promedio y ± 1 desviación estándar.

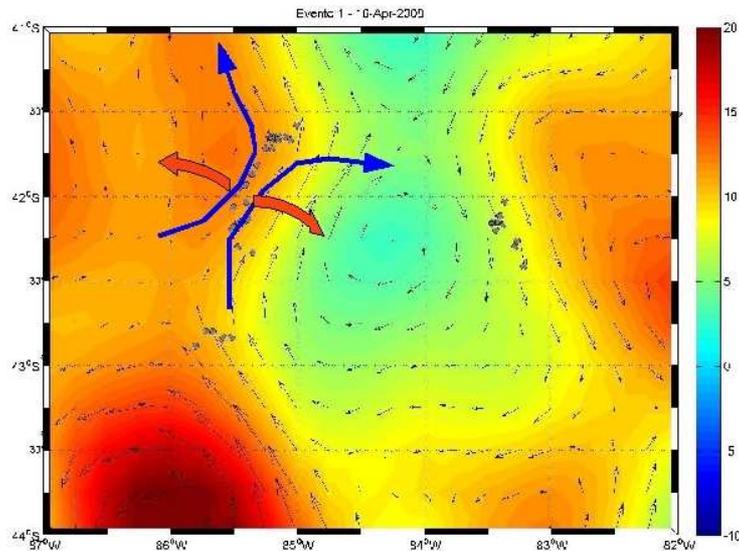


Figura 16. Modelo conceptual explicando la asociación de las zonas de pesca de jurel con las corrientes de meandro. La imagen muestra el campo de anomalía del nivel del mar (escala de colores), las corrientes geostroficas asociadas (vectores) y la posición de los lanzes de pesca (puntos grises) realizados por la FPJ el 6 de abril de 2008. Los lanzes de pesca se observan mayormente concentrados hacia las áreas de los meandros entre remolinos donde las corrientes son divergentes (líneas azules) y posiblemente generan zonas frontales de menor escala.

3.3.4.4.- Variabilidad ambiental del hábitat de pesca de jurel frente a Chile central

La principal región de pesca del jurel frente a Chile centro-sur presenta una fuerte variabilidad estacional e interanual, que es observada en la temperatura superficial del mar, la concentración de clorofila satelital y la energía cinética (Fig. 17). Debido a la surgencia costera, en esta región se observan bajas temperaturas y altas concentraciones de clorofila en la zona costera, entre los meses de diciembre a febrero. En contraste, la energía cinética incrementa desde la costa hacia la zona oceánica, entre los meses de marzo a junio, siguiendo la propagación de los remolinos de mesoescala y ondas de Rossby, observadas por Correa-Ramirez *et al.* (submitted). Igualmente, las zonas de pesca y la captura de jurel presenta una variabilidad estacional; al inicio del año (verano austral) la mayor captura de jurel se realiza cerca de la costa, pero gradualmente las zonas de pesca se mueven hacia la zona oceánica alcanzando los 500km de la costa en los meses de invierno. A partir del año

2001, este límite invernal de la captura de jurel se ha desplazado hasta los 1500 km bordeando el límite de autonomía de la FPJ. Particularmente en el año 2008, todas las capturas de jurel fueron realizadas exclusivamente entre los 600-1000 km de la costa (Fig. 18).

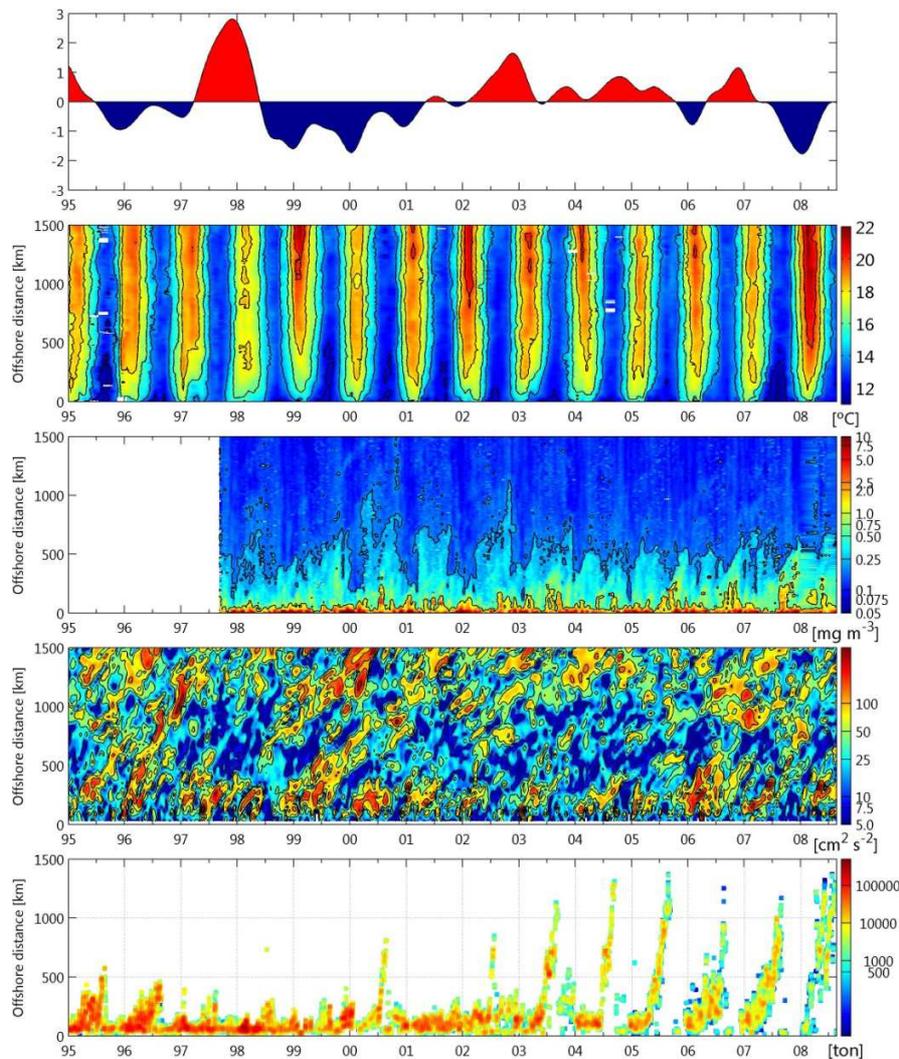


Figura 17. (a) Anomalia de la temperatura superficial del mar en la región El Niño 3,4. Gráfico distancia de la costa vs. tiempo de (b) la temperatura superficial del mar, (c) la concentración de clorofila, (c) la energía cinética y (e) la captura de jurel, en 38°S.

Además de la variabilidad anual, también se observa una variabilidad interanual en la

temperatura, la concentración de clorofila y la EKE, la cual ha sido vinculada principalmente a la variabilidad tropical asociada a la ocurrencia de eventos El Niño (Blanco *et al.* 2002, Hormazabal *et al.* 2002, Shaffer *et al.* 1999, Thomas *et al.* 2001). Durante el mayor evento cálido El Niño de finales de 1997 y el mayor evento frío La Niña de 2008, se reportaron las menores y mayores temperaturas respectivamente en la región. En el resto del periodo analizado se observa en general una correspondencia inversa con las anomalías de la temperatura, donde mayores (menores) temperaturas se observan durante periodos fríos (cálidos). La variabilidad de la clorofila en la zona más costera es pequeña durante todo el periodo, aunque se observa una mayor extensión costa afuera de altas concentraciones de clorofila durante los periodos fríos La Niña. Igualmente la EKE es alta y presenta una mayor extensión hacia fuera de la costa durante los periodos fríos, lo cual podría estar vinculado a una mayor actividad de los remolinos de mesoescala durante estos periodos.

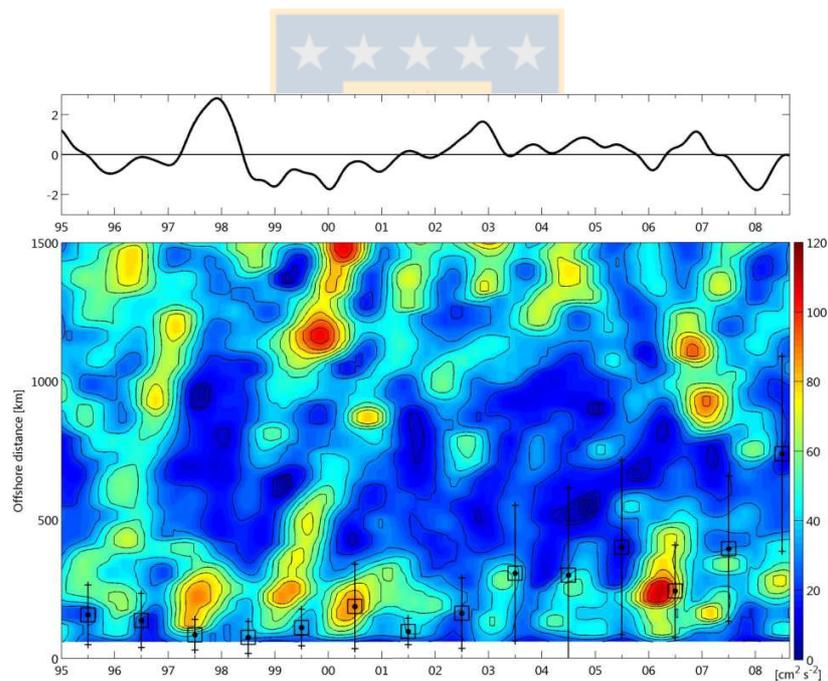


Figura 18. (a) Anomalía de la temperatura superficial del mar en la región El Niño 3,4. (b) Energía cinética frente a 38°S con la variabilidad anual y estacional removida mediante un filtro pasa baja Coseno-Lanczos con una amplitud media de 400 días y una longitud de 900 días, para resaltar la variabilidad interanual.

3.3.5.- Discusión y conclusiones

Mediante el análisis conjunto de información pesquera e información satelital se ha realizado una descripción sinóptica del hábitat oceánico en la principal región de captura de jurel, correspondiente a la zona costera y la zona de transición costera frente a la costa centro-sur de Chile. Esta región es afectada por el sistema de surgencia costera y una fuerte actividad de remolinos y meandros de mesoescala, cuya interacción afecta el campo de corrientes superficiales, la temperatura superficial del mar y la biomasa planctónica. La evidencia presentada sugiere que la formación de agrupaciones potencialmente capturables por la FPJ también es afectada por la variabilidad oceánica en esta región. Las zonas de divergencia entre los remolinos de mesoescala podrían jugar un importante papel al generar ambientes propicios para la formación de agregaciones de jurel. Sin embargo aun se desconocen los factores, tanto biológicos como físicos, que podrían estar gatillando la formación de estas agregaciones.

La región de pesca de jurel frente a Chile central ha experimentado una importante variabilidad interanual en los últimos 15 años, que podría estar afectando sensiblemente la captura de este recurso. Durante el periodo cálido de El Niño comprendido entre los años 2001-2007, en el cual se presentaron los menores valores de temperatura y energía cinética en la región (Fig, 18), se reporto una disminución en histórica de la captura y un alejamiento de las zonas de pesca de jurel. Tal disminución podría estar relacionada a la menor intensidad en las estructuras de mesoescala que podría condicionar una menor oferta de zonas frontales entre remolinos con condiciones favorables para la formación de agregaciones de jurel. Sin embargo, en los años 2006 y 2008 ocurren dos eventos fríos que parecen marcar una tendencia de transición hacia una fase fría de mayor actividad de mesoescala, en la cual la temperatura y la EKE presentaron mayores valores. A pesar de esto, la captura de jurel en estos años sigue ocurriendo mayormente alejada de la costa e incluso en el 2008 fue casi exclusivamente oceánica. Es posible que además de variabilidad asociada al hábitat de pesca, otros factores como el esfuerzo de pesca, el reclutamiento y el comportamiento migracional, también estén participando en la modulación de la abundancia y la capturabilidad de la especie en la región, por lo cual se requieren estudios

de mayor detalle para incrementar el conocimiento sobre el recurso y la formación de agregaciones de interés comercial.



4.- DISCUSION

En este trabajo se resalta el papel que tienen los remolinos de mesoescala sobre la expansión de la zona de alta biomasa fitoplanctónica medida a través de la concentración de clorofila satelital, su posible función en la productividad oceánica de la región y el efecto de estas estructuras sobre algunos componentes del ecosistema pelágico como es el caso del jurel, dentro del SCCP. El campo de la energía cinética derivada de observaciones satelitales de altura del nivel del mar, mostró ser un indicador robusto de la actividad de mesoescala en el sistema. Los mayores valores de energía cinética se observaron asociados a altas concentraciones de clorofila en dos extensas regiones caracterizadas por una fuerte intensidad de los vientos favorables a la surgencia: la costa Peruana al norte de los 18°S y frente a la costa central de Chile al sur de los 29°S. Esta coherencia espacial sugiere un importante efecto de los remolinos sobre la clorofila, además de la existencia de vínculos físicos entre estas estructuras y la dinámica de la surgencia costera en el SCCP. Frente a la costa central de Chile, la formación de remolinos de mesoescala ha sido atribuida a las inestabilidades baroclinas de las corrientes costeras (Leth & Shaffer 2001, Hormazabal *et al.* 2004), por lo cual es posible que las regiones costeras afectadas por una mayor intensidad de viento favorable a la surgencia, sean las que están contribuyendo con una mayor cantidad de energía para la actividad de mesoescala en la zona de transición costera.

Los remolinos de mesoescala observados frente a Chile central se caracterizaron por ser estructuras grandes ($\sim 6,45 \times 10^3 \text{ km}^2$) de radios mayores al del radio teórico de una onda de Rossby y velocidades de propagación hacia el oeste $\sim 1.68 \text{ km d}^{-1}$, menores a la teórica para una onda de Rossby. El mayor tamaño de estas estructuras representa un transporte regional costa afuera en superficie de $\sim 6 \text{ SV}$ ($1 \text{ SV} = 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), el cual es dos veces mayor al transporte hacia el ecuador reportado para el SCCP (Shaffer *et al.* 2004) y puede ser determinante en el intercambio de sal, calor, nutrientes y biomasa desde las zonas costeras. La menor velocidad de estas estructuras implica una mayor permanencia en la zona de

transición costera y un efecto más prolongado sobre el ecosistema pelágico de la región. Los remolinos de mesoescala del Pacífico Norte se han observado como los responsables de transportar alrededor del 35-60 % de calor a la cuenca de Alaska (Crawford, 2005) y constituyen la mayor fuente de hierro en esta región, caracterizada por una alta concentración de nutrientes y baja concentración de clorofila (Johnson *et al.* 2005). Además, el transporte de aguas de alta concentración en clorofila y nutrientes desde las zonas de surgencia, ha sido reportado como un mecanismo importante en la formación de materia orgánica oceánica y la distribución de clorofila frente a otros sistemas de borde oriental (Aristegui *et al.* 1997, Aristegui *et al.* 2004, Barton *et al.* 2004, Morales *et al.* 2007, Yebra *et al.* 2004).

La clorofila asociada a los remolinos de mesoescala representa más del 50% del máximo estacional de la clorofila en la zona de transición costera frente a Chile central. En esta zona el máximo estacional de la clorofila ocurre en invierno ~6 meses después del máximo en la zona costera. Este retraso es determinado por el tiempo de generación y la lenta velocidad de propagación de los remolinos de mesoescala desde la costa, y puede representar un mecanismo efectivo mediante el cual la productividad biológica del sistema se extiende espacialmente fuera de la zona costera, y se prolonga hacia los meses invernales caracterizados por un bajo aporte de nutrientes desde la surgencia costera. El efecto de los remolinos de mesoescala sobre la clorofila y la productividad biológica posiblemente sea mayor, si además se consideran las zonas frontales generadas entre estas estructuras y las corrientes de meandro asociadas. Las regiones entre remolinos son importantes para la mezcla de propiedades de la columna de agua (Isern-Fontanet *et al.* 2004, Zhurbas & Oh, 2003). Se ha observado que los remolinos de mesoescala ingresan aguas ricas en nutrientes y clorofila en sus bordes exteriores a través de su interacción con plumas de surgencia (Aristegui *et al.* 1997), y forman cintas transportadoras que inyectan clorofila costera hacia el océano abierto (Crawford *et al.* 2005). Algunos experimentos numéricos indican que la mezcla de nutrientes que ocurre en estas regiones es la responsable de causar un mayor incremento de la productividad que el ocurrido al interior de los remolinos (Martin *et al.* 2002). Estudios con mayor detalle que aborden la importancia relativa de los mecanismos

de transporte, bombeo de Ekman y mezcla asociados a remolinos, son requeridos para dilucidar completamente el efecto de estas estructuras sobre la productividad regional.

La concentración de clorofila satelital asociada a remolinos ciclónicos fue generalmente mayor respecto de la asociada a los remolinos anticiclónicos de la zona de transición costera frente a Chile central. Esto podría indicar que las altas concentraciones de clorofila al interior de estructuras ciclónicas están siendo favorecidas por un incremento de la producción biológica estimulada por el bombeo de Ekman de nutrientes (McGillicuddy *et al.* 2007). De esta manera los remolinos ciclónicos podrían tener una mayor importancia que los anticiclónicos en la zona de transición costera frente a Chile central, al participar en la generación de nueva biomasa planctónica. Sin embargo, una parte importante de la clorofila asociada a remolinos ciclónicos puede no estar asociada con la producción primaria, debido a que estas estructuras también levantan más células de fitoplancton a la superficie e incrementan la cantidad de clorofila observada desde los satélites (Cipollini *et al.* 2001). Para determinar el origen de la clorofila y la potencia del bombeo de Ekman dentro de remolinos ciclónicos se requiere del desarrollo de experimentos de campo y experimentos numéricos orientados a este objetivo. Algunos perfiles hidrográficos han mostrado que las aguas superficiales al interior de remolinos ciclónicos corresponden a las masas de Agua Ecuatorial Subsuperficial, la cual se caracteriza por tener altas concentraciones de nutrientes y es la principal fuente de las aguas bombeadas por la surgencia costera (Hormazabal *et al.* 2004, Johnson & McTaggart 2009). Esto sugiere que la extensión costa afuera de la clorofila observada en la región podría potencialmente ser sustentada por producción nueva. La importancia relativa del bombeo de Ekman asociado a remolinos como fuente de nutrientes, no ha sido estudiado con profundidad en esta región y continúa siendo un tema de gran importancia para determinar los balances biogeoquímicos del SCCP.

Además de los remolinos de mesoescala, las ondas de Rossby son estructuras frecuentemente observadas en los sistemas de borde oriental. (Barton *et al.* 1998, Chavez & Messié 2009, Chereskin *et al.* 2000, Hormazabal *et al.* 2004, Strub & James, 2000). Los remolinos de mesoescala y las ondas de Rossby poseen similares velocidades de

propagación y generan anomalías similares en el nivel del mar (Chelton *et al.* 2007), lo cual hace complejo el diferenciarlas utilizando información satelital. Paralelamente a los remolinos, las ondas de Rossby pueden también producir incrementos en la clorofila-a satelital a través de: la convergencia de los gradientes horizontales de clorofila en la región, el levantamiento de nutrientes que favorece la producción de fitoplancton y por ende de la clorofila, o por el levantamiento del máximo subsuperficial de la clorofila (Killworth *et al.*, 2004). Cada uno de estos mecanismos afecta la productividad y/o la biomasa planctónica de diferente forma y posee diferentes impactos sobre la comunidad pelágica. Al interior de los giros subtropicales, las ondas de Rossby han sido asociadas con alrededor del 5-20 % de la varianza de la clorofila observada en estas regiones (Uz *et al.* 2001). Sin embargo los mayores tamaños y menores velocidades de propagación observados en los remolinos de mesoescala respecto a lo esperado teóricamente para ondas de Rossby, sugiere que estas estructuras potencialmente podrían tener una mayor influencia sobre la clorofila en la zona de transición costera frente a Chile central.

En el SCCP, la variabilidad interanual de la clorofila se encuentra principalmente asociada al impacto de perturbaciones asociadas a El Niño, eventos que explican ~12% de la variabilidad total de la clorofila en la región (Correa-Ramirez *et al.* submitted). En esta región la propagación hacia el polo de ondas kelvin es el principal mecanismo mediante el cual las condiciones oceanográficas de la zona costera son afectadas durante los eventos El Niño (Shaffer *et al.* 1997, Blanco *et al.* 2002, Hormazabal *et al.* 2002). Estas ondas podrían estar participando en la generación de ondas de Rossby (Pizarro *et al.* 2002) y de remolinos de mesoescala, las cuales generan importantes anomalías en el nivel del mar y la clorofila. La propagación de estas estructuras hacia el oeste se presenta como el principal mecanismo de transmisión de la variabilidad del Niño, la cual llega a la zona costera y luego se propaga hacia la zona oceánica del SCCP. Por otra parte, la baja energía cinética que caracteriza a los remolinos de mesoescala durante los eventos cálidos, genera un debilitamiento y reducción de la extensión de la zona de transición costera. De esta manera, la variabilidad interanual de las ondas de Rossby y remolinos de mesoescala estaría determinando la extensión de una parte significativa del hábitat pelágico de la zona de transición costera y

del área de alta concentración de clorofila.

Frente a la costa centro-sur de Chile, durante eventos El Niño, la propagación desde la costa de anomalías en el nivel del mar y la clorofila preceden a la propagación observada frente a Perú. Estas observaciones son opuestas al mecanismo de transmisión de la señal de El Niño, a través ondas de Kelvin. Algunas observaciones sugieren que parte de la variabilidad asociada a El Niño, que llega a la costa centro-sur de Chile, es mayormente transmitida a través de teleconexiones atmosféricas con el Pacífico ecuatorial (Hormazabal *et al.* 2002, Shaffer *et al.* 1999). Estas teleconexiones podrían determinar el debilitamiento de los vientos costeros observado durante los eventos El Niño y condicionar un debilitamiento en la surgencia, las estructuras de mesoescala y la energía cinética en la zona de transición costera (Hormazabal *et al.* 2004). Tal debilitamiento podría explicar la disminución observada en la concentración de clorofila en la zona costera y oceánica frente a Chile central que anteceden a la intensificación del evento cálido en la región tropical. Sobre escalas de tiempo mayores, esta teleconexión podría también afectar el ecosistema pelágico en la región centro-sur de Chile. Por otra parte, el incremento en los vientos favorables a la surgencia costera observado en respuesta al efecto del calentamiento global (Bakun, 1990, Garreaud & Flavey 2009), podría afectar la actividad de mesoescala y con ello la productividad y/o la biomasa planctónica en la zona de transición costera.

Además de afectar la distribución de la clorofila y su variabilidad sobre la escala anual e intranual, los remolinos de mesoescala poseen importantes efectos en la distribución de otros componentes del ecosistema pelágico, como es el caso de la población de jurel. Esta especie se reproduce principalmente durante el invierno austral, y su principal región de desove y crianza corresponde con la zona de transición costera frente a Chile central (Nuñez *et al.* 2004). Se ha hipotetizado que el incremento invernal de la clorofila provocado por los remolinos de mesoescala estimula el desove en esta región, siendo un factor importante para los estadios tempranos y probablemente esté afectando el reclutamiento de la especie. Las zonas de pesca del jurel se encuentran generalmente asociadas a las corrientes de meandro entre remolinos, posiblemente debido a que los frentes de submesoescala generados entre estas estructuras concentran presas y favorecen

de esta manera la formación de agregaciones de jurel de fácil captura por la flota pesquera. En la zona de transición costera, la variabilidad interanual de la energía cinética asociada principalmente a los remolinos y meandros de mesoescala, podría ser uno de los mecanismos que condicionan el alejamiento de la costa de las zonas de pesca de jurel que ha sido observado durante los últimos años. Asimismo, el alejamiento de la población de jurel podría ocasionar impactos aun poco conocidos sobre el ecosistema pelágico. La migración hacia zonas más oceánicas de las poblaciones de peces durante eventos El Niño, puede disminuir la predación y constituir uno de los mecanismos vinculados al “re-inicio” del ecosistema pelágico que ocurre posterior al evento cálido, permitiendo una rápida recuperación de las poblaciones de diatomeas, eufáusidos y anchovetas (Bakun & Weeks 2008, Chavez & Mesie 2009). Por otro lado, las diferencias en las características de las estructuras de mesoescala entre eventos El Niño y La Niña también pueden generar modificaciones en el hábitat pelágico y la distribución de jurel, cuyos impactos sobre el ecosistema aun no han sido explorados.

Los resultados presentados a través de los distintos estudios desarrollados en el marco de la presente tesis doctoral, resaltan el importante papel que poseen los remolinos de mesoescala en: i) el intercambio de propiedades desde la zona costera a la zona oceánica en sistemas de borde oriental; ii) el incremento/sostenimiento de la biomasa planctónica fuera de la zona costera; iii) el ciclo estacional de la clorofila en la zona de transición costera; iv) la transmisión de perturbaciones de baja frecuencia de origen ecuatorial como El Niño, y v) la distribución de especies de peces pelágicas de importancia comercial. A pesar de su importancia, son aun pocos los trabajos concernientes a la variabilidad de mesoescala en el sistema de corrientes de Chile-Perú. Estudios adicionales son requeridos para profundizar en el conocimiento de las interacciones entre los remolinos de mesoescala y las ondas de Rossby, principalmente orientados a discriminar su efecto sobre el ecosistema pelágico en la zona de transición costera del sistema. Esta región, que corresponde a una de las de mayor producción biológica y pesquera, requiere un mayor esfuerzo para determinar el aporte de los remolinos de mesoescala a la productividad biológica, la exportación de materia orgánica hacia aguas profundas, su efecto sobre la calidad de las aguas que surgen

en la zona oceánica, su papel en la transferencia de energía/propiedades hacia el océano interior y su importancia e implicaciones sobre la variabilidad de los diferentes componentes de la comunidad biológica.



5.- REFERENCIAS

- Alheit J & P Bernal 1993. Effects of physical and biological changes on biomass yield of the Humboldt Current Ecosystem. En: K. Sherman, L. M. Alexander, & B. D. Gold (eds.). Large marine ecosystems. V: Stress, mitigation and sustainability. American Association for the Advancement of Science, Washington DC pp. 53–68.
- Alheit J & M Niquen. 2004. Regime shifts in the Humboldt Current ecosystem. *Progress In Oceanography* 60(2-4): 201-222. doi:10.1016/j.pocean.2004.02.006.
- Allen CB, J Kanda & EA Laws. 1996. New production and photosynthetic rates within and outside a cyclonic mesoscale eddy in the North Pacific subtropical gyre. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 43(6): 917-936.
- Alvera-Azcarate A, A Barth, J-M Beckers & RH Weisberg. 2007. Multivariate reconstruction of missing data in sea surface temperature, chlorophyll, and wind satellite fields (vol 112, art no C03008, 2007). *Journal of Geophysical Research-Oceans* 112(C5) doi:10.1029/2007JC004243.
- Arcos DF, LA Cubillos & S Núñez. 2001. The jack mackerel fishery and El Niño effects off Chile. En: McKinnell, S.M., R.D. Brodeur, K. Hanawa, A.B. Hollowed, J.J. Polovina & C.I. Zhang (eds.), *Pacific climate variability and marine ecosystem impacts from the tropics to the Arctic*. *Progress in Oceanography*, 49: 597-617.
- Aristegui J, ED Barton, P Tett, MF Montero, M Garcia-Munoz, G Basterretxea, A-S Cussatlegras, A Ojeda & D de Armas. 2004. Variability in plankton community structure, metabolism, and vertical carbon fluxes along an upwelling filament (Cape Juby, NW Africa). *Progress In Oceanography* 62(2-4): 95-113.
- Aristegui J, P Tett, A Hernandez-Guerra, G Basterretxea, MF Montero, K Wild, P Sangra, S Hernandez-Leon, M Canton & J.A. Garcia-Braun. 1997. The influence of island-generated eddies on chlorophyll distribution: a study of mesoscale variation around Gran Canaria. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 44(1): 71-96.
- Bakun A 1990. Global Climate Change and Intensification of Coastal Ocean Upwelling. *Science* 247(4939): 198-201.
- Bakun A & SJ Weeks. 2008. The marine ecosystem off Peru: What are the secrets of its fishery productivity and what might its future hold? *Progress in Oceanography* 79(2-4): 290-299. doi:10.1016/j.pocean.2008.10.027.
- Barton, ED, J Aristegui, P Tett, M Canton, J Garcia-Braun, S Hernandez-Leon, L Nykjaer, C Almeida, J Almunia, & S Ballesteros. 1998. The transition zone of the Canary Current upwelling region. *Progress In Oceanography* 41(4): 455-504.
- Barton E, J Aristegui, P Tett & E. Navarro-Perez 2004. Variability in the Canary Islands

- area of filament-eddy exchanges. *Progress In Oceanography*, 62(2-4): 71-94.
- Blanco JL, AC Thomas, ME Carr & PT Strub. 2001. Seasonal climatology of hydrographic conditions in the upwelling region off northern Chile. *Journal of Geophysical Research-Oceans* 106(C6): 11451-11467.
- Behrenfeld, MJ, JT Randerson, CR McClain, GC Feldman, SO Los, CJ Tucker, PG Falkowski, et al., 2001. Biospheric Primary Production During an ENSO Transition. *Science*, 291(5513), 2594-2597.
- Bertrand A, M Segura, M Gutiérrez & L Vásquez. 2004. From small-scale habitat loopholes to decadal cycles: a habitat-based hypothesis explaining fluctuation in pelagic fish populations off Peru. *Fish and Fisheries* 5(4): 296-316. doi:10.1111/j.1467-2679.2004.00165.x.
- Carr ME, PT Strub, AC Thomas & JL Blanco. 2002. Evolution of 1996-1999 La Nina and El Nino conditions off the western coast of South America: A remote sensing perspective. *Journal of Geophysical Research-Oceans* 107(C12)://000181233700005
- Chaigneau A, A Gizolme & C Grados. 2008. Mesoscale eddies off Peru in altimeter records: Identification algorithms and eddy spatio-temporal patterns. *Progress In Oceanography* 79(2-4): 106-119. doi:10.1016/j.pocean.2008.10.013
- Chavez FP & M Messié. 2009. A Comparison of Eastern Boundary Upwelling Ecosystems. *Progress In Oceanography* In Press, Accepted Manuscript. doi:10.1016/j.pocean.2009.07.032.
- Chelton DB, MG Schlax, RM Samelson & RA de Szoeki. 2007. Global observations of large oceanic eddies. *Geophysical Research Letters* 34(15). doi:10.1029/2007GL030812.
- Chereskin TK, MY Morris, PP Niiler, PM Kosro, RL Smith, SR Ramp, CA Collins & DL Musgrave. 2000. Spatial and temporal characteristics of the mesoscale circulation of the California Current from eddy-resolving moored and shipboard measurements. *Journal of Geophysical Research-Oceans* 105(C1): 1245-1269.
- Cipollini P, D Cromwell PG Challenor & S Raffaglio. 2001. Rossby waves detected in global ocean colour data. *Geophysical Research Letters* 28(2): 323-326.
- Correa-Ramirez, M.A., S. Hormazabal & C. E. Morales. Spatial patterns of annual and interannual chlorophyll-a variability in the Peru-Chile Current System. *Progress in Oceanography* (submitted in november 2009).
- Correa-Ramirez MA, S Hormazabal & G. Yuras. 2007. Mesoscale eddies and high chlorophyll concentrations off central Chile (29°-39°S). *Geophysical Research Letters* 34(12)://000247533000002 .
- Crawford WR 2005. Heat and fresh water transport by eddies into the Gulf of Alaska. *Deep-Sea Research Part II-Topical Studies in Oceanography* 52(7-8): 893-908.

- Cubillos LA & DF Arcos. 2002. Recruitment of common sardine (*Strangomera bentincki*) and anchovy (*Engraulis ringens*) off central-south Chile in the 1990s and the impact of the 1997-1998 El Niño. *Aquatic Living Resources* 15(2): 87-94. doi:10.1016/S0990-7440(02)01158-0.
- Emery WJ, RE Thomson 2004. *Data analysis methods in physical oceanography*. Second and revised edition. Elsevier editions. 638 pg.
- Escribano R, G Daneri, L Farias, VA Gallardo, HE Gonzalez, D Gutierrez, CB Lange, et al. 2004. Biological and chemical consequences of the 1997-1998 El Niño in the Chilean coastal upwelling system: a synthesis. *Deep-Sea Research Part II-Topical Studies in Oceanography* 51(20-21): 2389-2411.
- Falkowski PG, D Ziemann, Z Kolber, P Bienfang 2001. Role of eddy pumping in enhancing primary production in the ocean. *Nature*. 352: 55 – 58.
- Garçon VC, A Oschlies, SC Doney, D McGillicuddy & J. Waniek. 2001. The role of mesoscale variability on plankton dynamics in the North Atlantic. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 48(10): 2199-2226.
- Garreaud RD & M Falvey. 2009. The coastal winds off western subtropical South America in future climate scenarios. *International Journal of Climatology* 29(4): 543-554. doi:10.1002/joc.1716.
- Gruber N, H Frenzel, SC Doney, P Marchesiello, JC McWilliams, JR Moisan, JJ Oram, G.-K Plattner & K.D. Stolzenbach 2006. Eddy-resolving simulation of plankton ecosystem dynamics in the California Current System. *Deep Sea Research I*. doi:10.1016/j.dsr.2006.06.005.
- Gomez F 2008. Variabilidad ambiental y pequeños pelágicos de la zona norte y centro sur de Chile. MSc Thesis, Universidad de Concepción, Chile, unpublished.
- Harris RP, P Boyd, DS Harbour, RN Head, RD Pingree & AJ Pomroy. 1997. Physical, chemical and biological features of a cyclonic eddy in the region of 61[deg]10'N 19[deg]50'W in the North Atlantic. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 44(11): 1815-1839.
- Hill KL, IS Robinson & P Cipollini. 2000. Propagation characteristics of extratropical planetary waves observed in the ATSR global sea surface temperature record. *Journal of Geophysical Research-Oceans* 105(C9): 21927-21945.
- Hill, E.A., Hickey, B.M., Shillington, F.A., Strub, P.T., Brink, K.H., Barton, E.D., Thomas, A.C., 1998. Eastern ocean boundaries coastal segment (E). In: Robinson, A.R., Brink, K.H. (Eds.), *The Sea*, 11. John Wiley and Sons, New York, pp. 29-67.
- Hormazabal, S., S. Nuñez, D. Arcos, F. Gomez, and G. Yuras. Mesoscale eddies and jack mackerel (*Trachurus murphyi*) distribution in the eastern South Pacific. *Fishery Oceanography* (submitted).
- Hormazabal S, G Shaffer & O Leth. 2004. Coastal transition zone off Chile. *Journal of Geophysical Research-Oceans* 109(C1)://000188867600002 .

- Hormazabal S, G Shaffer & O Pizarro. 2002. Tropical Pacific control of intraseasonal oscillations off Chile by way of oceanic and atmospheric pathways. *Geophysical Research Letters* 29(6): 4.
- Iriarte JL & HE Gonzalez. 2004. Phytoplankton size structure during and after the 1997/98 El Niño in a coastal upwelling area of the northern Humboldt Current System. *Marine Ecology-Progress Series* 269: 83-90.
- Isern-Fontanet J, J Font, E Garcia-Ladona, M Emelianov, C Millot & I Taupier-Letage. 2004. Spatial structure of anticyclonic eddies in the Algerian basin (Mediterranean Sea) analyzed using the Okubo-Weiss parameter. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 51(25-26): 3009-3028.
- Johnson WK, LA Miller, NE Sutherland & CS Wong. 2005. Iron transport by mesoscale Haida eddies in the Gulf of Alaska. *Deep-Sea Research Part II-Topical Studies in Oceanography* 52(7-8): 933-953.
- Johnson, G.C. and K. E. McTaggart, 2009. Equatorial Pacific 13°C Water Eddies in the Eastern South Pacific Ocean, *J. Phys. Oceanogr.*
- Killworth PD, P Cipollini, BM Uz & J.R. Blundell. 2004. Physical and biological mechanisms for planetary waves observed in satellite-derived chlorophyll. *Journal of Geophysical Research* 109(C07002)
- Kimura S, H Nakata & Y Okazaki. 2000. Biological production in meso-scale eddies caused by frontal disturbances of the Kuroshio Extension. *ICES Journal of Marine Science* 57(1): 133-142.
- Kudela RM, WP Cochlan, TD Peterson & CG Trick. 2006. Impacts on phytoplankton biomass and productivity in the Pacific Northwest during the warm ocean conditions of 2005. *Geophysical Research Letters* 33(22)://000241983600001.
- Lee M-M & RG Williams. 2000. The role of eddies in the isopycnic transfer of nutrients and their impact on biological production. *Journal of Marine Research* 58: 895–917.
- Leth O & G Shaffer. 2001. A numerical study of the seasonal variability in the circulation off central Chile. *Journal of Geophysical Research* 106(C10): 22229-22248.
- Levy M, L Memery & G Madec 1999. The onset of the Spring Bloom in the MEDOC area: mesoscale spatial variability. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 46(7): 1137-1160.
- Mann ME, J Park 1999. Oscillatory spatiotemporal signal detection in climate studies: a multiple-taper spectral domain approach. *Advances in Geophysics* 41. 148pp
- Martin AP, KJ Richards, A Bracco & A Provenzale. 2002. Patchy productivity in the open ocean. *Global Biogeochemical Cycles* 16(2): 9.
- Martin AP & KJ Richards. 2001. Mechanisms for vertical nutrient transport within a North Atlantic mesoscale eddy. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 48(4-5): 757-773.

- McGillicuddy DJ, LA Anderson, NR Bates, T Bibby, KO Buesseler, CA Carlson, CS Davis, et al. 2007. Eddy/Wind Interactions Stimulate Extraordinary Mid-Ocean Plankton Blooms. *Science* 316(5827): 1026.
- McGillicuddy J & AR Robinson. 1997. Eddy-induced nutrient supply and new production in the Sargasso Sea. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 44(8): 1427-1450.
- Morales CE, HE González, SE Hormazabal, G Yuras, J Letelier & LR Castro. 2007. The distribution of chlorophyll-a and dominant planktonic components in the coastal transition zone off Concepción, central Chile, during different oceanographic conditions. *Progress In Oceanography* 75(3):452-469.
- Morales CE, ML Torreblanca, S Hormazabal, M Correa-Ramírez, S Nuñez & P Hidalgo. Mesoscale structure of copepod assemblages in the coastal transition zone and oceanic waters off central-southern Chile. *Progress in Oceanography*, (submitted in may 2009)
- Moran XAG, I Taupier-Letage, E Vazquez-Dominguez, S Ruiz, L Arin, P Raimbault & M Estrada. 2001. Physical-biological coupling in the Algerian Basin (SW Mediterranean): Influence of mesoscale instabilities on the biomass and production of phytoplankton and bacterioplankton. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 48(2): 405-437.
- Nuñez S, J Letelier, D Donoso, A Sepulvedad & D. Arcos. 2004. Relating spatial distribution of Chilean jack mackerel eggs and environmental factors in the oceanic waters off Chile. *Gayana* 68(2): 444-449.
- Oschlies A & V Garçon 1998. Eddy-induced enhancement of primary production in a model of the North Atlantic Ocean. *Nature* 394: 266-269.
- Pizarro O, G Shaffer, B Dewitte, M Ramos. 2002. Dynamics of seasonal and interannual variability of the Peru-Chile Undercurrent. *Geophysical Research Letters* 29(12), doi:10.1029/2002GL014790.
- Rutllant J & V Montecino. 2002. Multiscale upwelling forcing cycles and biological response off northcentral Chile. *Revista Chilena de Historia Natural* 75: 149-164.
- Sepúlveda A, R Alarcón, S Nuñez, M Aguayo, P Escobar, R Vargas, M Correa-Ramirez & C. González 2009. Evaluación directa del jurel con naves de la flota. Pre-Informe Final Proyecto FIP 2007-24. 211 pp.
- Shaffer G, S Hormazabal, O Pizarro & M Ramos. 2004. Circulation and variability in the Chile Basin. *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers* 51(10): 1367-1386.
- Shaffer G, S Hormazabal, O Pizarro & S Salinas. 1999. Seasonal and interannual variability of currents and temperature off central Chile. *Journal of Geophysical Research-Oceans* 104(C12): 29951-29961.
- Shaffer G, O Pizarro, L Djurfeldt, S Salinas & J. Rutllant. 1997. Circulation and low-

- frequency variability near the Chilean coast: Remotely forced fluctuations during the 1991-92 El Niño. *Journal of Physical Oceanography* 27(2): 217-235.
- Strub PT & C James. 2000. Altimeter-derived variability of surface velocities in the California Current System: 2. Seasonal circulation and eddy statistics. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 47(5-6): 831-870.
- Strub, P. and James, C., 2002. The 1997-1998 oceanic El Niño signal along the southeast and northeast Pacific boundaries - an altimetric view. *Progress in Oceanography* 54(1-4), 439-458.
- Sverdrup H.U. 1953. On conditions of the vernal blooming of phytoplankton. *Journal du conseil international pour l'exploration de la mer* 18:287-295
- Thomas, A.C., M.-E. Carr, and P.T. Strub. 2001. Chlorophyll variability in eastern boundary currents. *Geophysical Research Letters* 28(18): 3421-3424.
- Ulloa O, N Escribano, S Hormazabal, RA Quinones, RR Gonzalez & M Ramos. 2001. Evolution and biological effects of the 1997-98 El Niño in the upwelling ecosystem off northern Chile. *Geophysical Research Letters* 28(8): 1591-1594.
- Uz BM, JA Yoder & V Osychny. 2001. Pumping of nutrients to ocean surface waters by the action of propagating planetary waves. *Nature* 409: 597-600.
- Vaillancourt RD, J Marra, MP Seki, ML Parsons & RR Bidigare. 2003. Impact of a cyclonic eddy on phytoplankton community structure and photosynthetic competency in the subtropical North Pacific Ocean. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 50(7): 829-847.
- Williams RG & MJ Follows 2003. Physical transport of nutrients and the maintenance of biological production. In: "Ocean Biogeochemistry: The Role of the ocean carbon cycle in global change". Edited por M. Fasham. Springer, pp. 19-51, ISBN: 3-540-42398-2
- Yebra L, C Almeida & S Hernandez-Leon. 2005. Vertical distribution of zooplankton and active flux across an anticyclonic eddy in the Canary Island waters. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* 52(1): 69-83.
- Yuras G, O Ulloa & S Hormazabal. 2005. On the annual cycle of coastal and open ocean satellite chlorophyll off Chile (18 degrees-40 degrees S). *Geophysical Research Letters* 32(23)://000233936000001.
- Zhurbas V & IS Oh. 2003. Lateral diffusivity and Lagrangian scales in the Pacific Ocean as derived from drifter data. *Journal of Geophysical Research-Oceans* 108(C5): doi:10.1029/2002JC001596.