

## Informe del Grupo 1

### RELACIÓN ENTRE ANCHOVETA Y AMBIENTE A DIFERENTES ESCALAS TEMPORALES

S. Purca<sup>1\*</sup>, Graco M.<sup>1</sup>, Gutierrez D.<sup>1</sup>, Dewitte B.<sup>1,4</sup>, Tam J.<sup>1</sup>, Bertrand, A.<sup>1,3</sup>, Chavez F.<sup>2</sup>, Flores R.<sup>1</sup>, Ledesma J.<sup>1</sup>, Vasquez, L.<sup>1</sup>, Messi M.<sup>2</sup>, Goubanova K.<sup>1,4</sup>, Moron O.<sup>1</sup>, Nakazaki C.<sup>1</sup>, Peraltilla S.<sup>1</sup>, Sanchez S.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto del Mar del Perú, Esquina Gamarra y Gral. Valle s/n, Apartado 22, Callao, Perú.

<sup>2</sup> Monterey Bay Aquarium Research Institute, 7700 Sandholdt Rd. Moss Landing, CA95039 USA.

<sup>3</sup> Institut de Recherche pour le Développement (IRD), CRH, Avenue Jean Monnet, BP 171, 34203 Sète Cedex, France.

<sup>4</sup> LEGOS/IRD/CNES – 14, Av. Edouard Belin – 31400 Toulouse, France.

\*Coordinación: [spurca@imarpe.pe](mailto:spurca@imarpe.pe), Esquina Gamarra y Gral. Valle s/n, Chucuito-Callao, Perú.

#### RESUMEN

Se estudió la relación del ambiente con la anchoveta (*Engraulis ringens*) en el Ecosistema de Afloramiento Peruano (EAP). Se hipotetiza que en la zona de afloramiento comprendida entre 5°S -13°S se presenta una relación negativa entre la temperatura, concentración de oxígeno y desembarques de anchoveta en escalas de tiempo decadales. Fueron analizadas series de tiempo mensuales observados entre 1950 - 2008 de temperatura superficial, subsuperficial, oxígeno, clorofila y desembarques de anchoveta y sardina aplicando métodos estadísticos y espectrales para obtener modos temporales decadales y caracterizar la modulación a baja frecuencia de sus ciclos estacionales. Datos de reanálisis también fueron usados para caracterizar los cambios estacionales a partir de los forzamientos (remoto y local) ambientales del EAP. Se encontró una fuerte asociación a escala decadal entre las series ambientales costeras y los desembarques de anchoveta y se sugiere que la covariabilidad ambiental en escalas temporales interanuales, intraestacionales, decadales, seculares frente al EAP se incrementará durante la próxima década.

Palabras clave: variabilidad decadal, anchoveta, sardina, Ecosistema de Afloramiento Peruano.

#### INTRODUCCIÓN

La anchoveta en el Perú sustenta la mayor pesquería monoespecífica del mundo y ha sido recientemente catalogada como una de las pesquerías mejor manejadas (Alder y Pauly, 2008). Los desembarques de la anchoveta muestran una alta variabilidad en diferentes escalas temporales las cuales estarían asociadas con el afloramiento costero (Brink *et al.* 1983, Huyer *et al.* 1991, Strub *et al.* 1998) y el ciclo El Niño Oscilación Sur (ENOS) (Chavez *et al.* 2008). Si bien los avances científicos han sido significativos en el estudio de la anchoveta, principalmente en aspectos ecológicos y de manejo a partir de un enfoque ecosistémico, es necesario profundizar más algunos aspectos en relación a la variabilidad climática de este recurso y su interacción con el ambiente en el EAP.

En este contexto, el Instituto del Mar del Perú (IMARPE) organizó el V panel internacional de expertos de evaluación de la anchoveta peruana entre el 10-14 de Agosto de 2009, con científicos de Perú, Francia, Sudáfrica y Estados Unidos. El propósito de este panel fue actualizar información sobre los procesos biológicos de la anchoveta, su estado poblacional, conocer mejor sus capacidades adaptativas, así como la situación de su entorno biótico y abiótico frente a la variabilidad ambiental, en el marco de un enfoque ecosistémico. A partir de los resultados obtenidos se espera caracterizar el rol actual de la anchoveta en el EAP, proporcionando mayores elementos para el desarrollo sostenible de su pesquería.

El objetivo de este grupo fue caracterizar el ambiente donde habita la anchoveta peruana. Se utilizaron diferentes aproximaciones temporales (estacional, interanual, multidecadal) para cumplir con este objetivo.

Los estudios realizados sobre la variabilidad de la población de la anchoveta indican importantes fluctuaciones a diferentes escalas de tiempo. A escalas seculares, estudios paleoceanográficos recientes para el Sistema de la Corriente de Humboldt (SCH) muestran una dramática declinación de pequeños pelágicos, tales como la anchoveta, asociada a importantes cambios ambientales, como disminución de la productividad primaria y reducción de la zona mínima de oxígeno, lo cual ocurrió durante 400 años hasta el final de la Pequeña Edad de Hielo (PEH) cerca de 1820. A partir de esta época se generó un cambio estableciéndose condiciones similares a las actuales en el SCH con una importante abundancia de pequeños pelágicos una alta producción primaria, y una intensa zona de mínima de oxígeno (Gutiérrez et al. 2008, Sifeddine et al. 2008, Valdés et al. 2008).

Por su parte, estudios de los últimos 50 años, indican importantes fluctuaciones en la población de la anchoveta asociadas con cambios de gran escala en la temperatura del océano y en la posición de la termoclina, existiendo regímenes fríos y calientes, similares a los cambios observados interanualmente durante El Niño/ La Niña durante el ciclo El Niño Oscilación Sur (ENOS) (Chavez et al., 2003).

En efecto, de ENOS frente a la costa Peruana, aparece como un factor clave que conduce a cambios interanuales significativos en el EAP impactando y conectando otras escalas de variabilidad de alta y baja frecuencia (Chavez et al. 2008). Por ejemplo, una fuerte disminución en los desembarques de anchoveta se observó durante El Niño 1982-1983 cuando las anomalías de temperatura superficial del mar (TSM) se incrementaron, ocurriendo algo similar en 1925, 1941, 1957 y 1997 (Barber y Chavez 1983). Adicionalmente, un nuevo tipo de El Niño se presentó durante esta última década, donde las anomalías positivas de TSM se confinaron al área del Pacífico Central Tropical [5N-5S, 150-90W] (Kug et al. 2009). Además del impacto ambiental, es importante considerar igualmente que parte de la variabilidad de la anchoveta se asocia al efecto de la sobrepesca, siendo la declinación de este recurso antes de los 90s fuente de importantes debates en la comunidad científica.

Las condiciones climáticas del EAP resultan de la interacción del sistema atmosférico de la cuenca del Pacífico Sur con el océano, combinado con el efecto local de la diferencia termal causada por la interacción tierra/mar en la costa (Brink et al. 1983, Strub et al. 1998). El afloramiento costero se extiende a lo largo de la costa de Perú (5°S-18°S) con un impacto de aproximadamente 100 km costa-océano, generando condiciones frías (~16°C) y una termoclina somera (20-50 m) mantenida por una capa de Ekman somera (Halpern 2002). Una alta productividad caracteriza la zona, con altas concentraciones de clorofila principalmente cerca a la costa, y con una mayor extensión entre los 11°-15° S como respuesta a la intensificación del afloramiento (Figura 1). Por su parte, si bien el sistema se caracteriza por la presencia de una

intensa Zona de Mínima de Oxígeno (ZMO) subsuperficial (50 – 500 m) que impacta sobre la plataforma continental, ocurren períodos de oxigenación asociados a la ocurrencia de eventos El Niño pero también a la propagación de ondas Kelvin atrapadas a la costa (Gutiérrez et al. 2008).

El EAP mantiene la pesquería más importante del mundo lo cual no se explicaría sólo por sus niveles de productividad primaria, generando lo que se conoce como “la paradoja de la anchoveta peruana”, donde valores de un alto índice de afloramiento  $\sim 1.2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$  y mezcla generada por el viento de  $\sim 250 \text{ m}^3 \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$  podrían explicar condiciones ambientales óptimas (Cury et al. 1998, Taylor and Wolff 2007). Muchas hipótesis se han presentado para explicarla, entre ellas actualmente se considera probable la asociada con la alta variabilidad del sistema lo cual tendría un rol dominante en el funcionamiento y estructura de éste ecosistema y el impacto de las condiciones deficientes en oxígeno afectando la distribución de los organismos y con ella la interacción predador-presa (Chavez et al. 2008). En este contexto, el análisis de la variabilidad de series de tiempo de temperatura, oxígeno y clorofila de las últimas décadas junto con la información paleo-ambiental y biológica de los últimos 500 años podría contribuir a explicar “la paradoja de la anchoveta” en Perú.

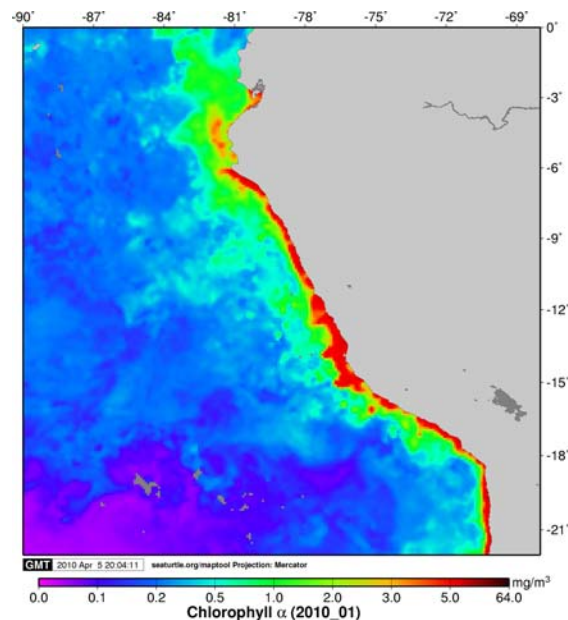


Figura 1. Promedio de Clorofila-a satelital (SEAWIFS) para el mes de Enero 2010 frente a la costa peruana.

## DATOS

Se utilizaron datos de desembarques mensuales de anchoveta y sardina desde el año 1950 hasta el año 2008, colectados por la unidad de Investigación de Recursos Pelágicos del IMARPE (Ñiquen y Freón 2006) (Figura 2a,b). Asimismo series de tiempo mensuales de temperatura superficial del mar (TSM) reconstruida extendida (ERSST) fueron usadas desde 1950 hasta el presente, consistentes en la base de datos HadISST1 de 1° por un 1° de resolución sobre el área: 5°S-13°S, 160°W-70°W (NCDC v3. 2009). La TSM a lo largo de la costa de Perú fue representada por el Índice de Oscilación Peruano (IOP) (Purca 2005) que representa en forma adecuada la variación costera de la TSM entre los 5°S y 17°S. Para representar la dinámica de la termoclina se utilizó la profundidad de la isoterma de 15°C estimada a partir de datos de cruceros del IMARPE (Flores et al. 2006). Se analizaron series de tiempo entre los

años 1960 y 2008 de clorofila-a y oxígeno, obtenidos por la unidad de investigación en oceanografía química (UIOQ) de IMARPE complementándose con información de la base de datos mundial WOA2005. Los datos de oxígeno corresponden a un área de 5°S a 13°S, 350 km desde la línea de costa y una profundidad de 60 m en la columna de agua. Los datos de clorofila-a se obtuvieron a partir de una elipse a 12°S dentro de los 100 km de la costa para el área de [11.30°-12.30°S, 77-77.30°W] (Figura 2f).

Datos de las tasas de deposición de escamas de peces (suavizadas) frente a la costa de Perú y Norte de Chile desde 1850 A.D. fueron graficadas a partir de los resultados presentados en el trabajo de Gutiérrez et al. (2009).

Con el objetivo de caracterizar los cambios del ambiente/forzamiento y interpretar los datos observados, dos productos derivados receptivamente de los datos de reanálisis atmosférico NCEP/CNAR (Kalnay et al., 1996) y oceánico SODA (Carton and Giese, 2008) fueron usados. Los datos de los vientos de superficiales sobre el periodo 1958-2008 obtenidos por el método estadístico de reducción de escala “downscaling” estadístico (Goubanova et al., 2010). Los datos de la amplitud de la onda de Kelvin Ecuatorial se obtuvieron a partir de los dos primeros modos baroclínicos (Dewitte et al., 2008) para el período 1958-2008

## **MÉTODOS**

Se presentan las series de tiempo frente a las latitudes de 5°S, 7°S, 9°S, 12°S y 13°S de la profundidad de la isoterma de 15°C, y el análisis de la primera componente principal (PC1). La PC1 de la profundidad de la isoterma de 15°C representa el 75% del total de la variabilidad, mientras que el IOP representa el 83% del total de la variabilidad de la series de tiempo de TSM. Las series de tiempo de desembarques de anchoveta, sardina, así como las series de oxígeno y clorofila-a fueron estandarizadas y estudiadas a partir de sus anomalías (Figura 2). Se aplicó un filtro de paso bajo de una banda temporal de 3-6 años para extraer la señal multidecadal de las series de tiempo biológicas y físicas; métodos espectrales (Fourier) sustentaron la extracción de la señal interanual del ENSO ( $2-7\text{años}^{-1}$ ) para el valor del espectro de potencia. El coeficiente de correlación lineal de Pearson se usó para comparar las series de tiempo filtradas ambientales y los desembarques de anchoveta y sardina.

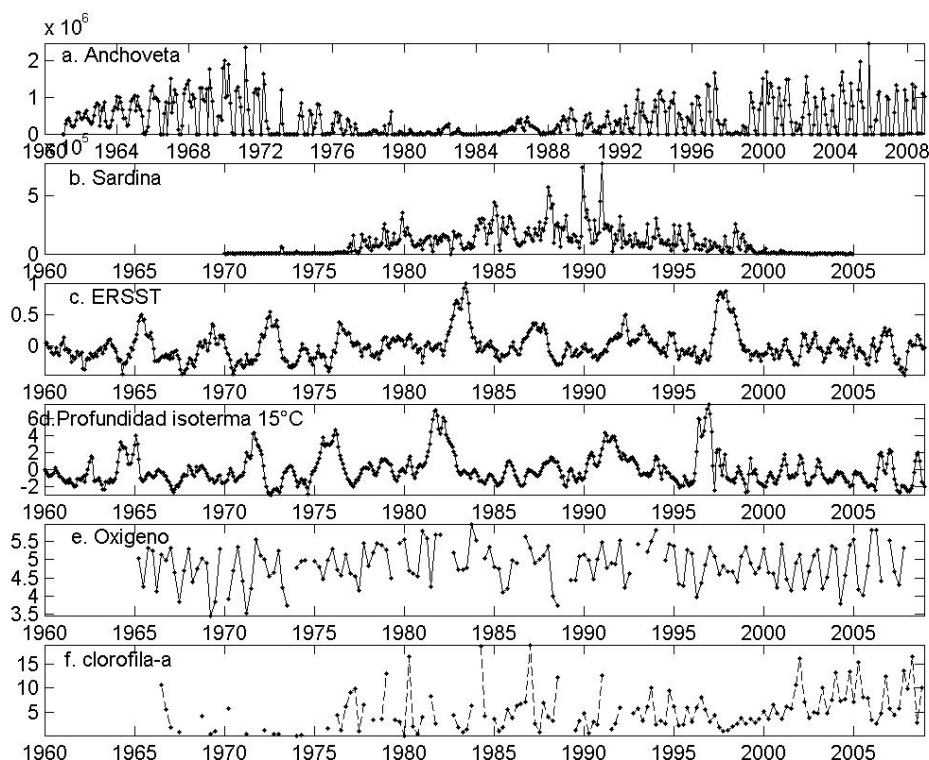


Figura 2. (a) Series de tiempo mensuales de anchoveta en millones de toneladas (b) Desembarques mensuales de sardina en  $10^5$  toneladas (c) Series de tiempo mensual de la primera componente principal de TSM de la base de datos HadISST(1x1 grado) de la TSM reconstruida extendida (ERSST) (d) Series de tiempo mensual de la primera componente principal de la profundidad de la isoterma de 15°C en anomalías estandarizadas (e) Serie de tiempo estacional de concentración de oxígeno (mL/L) de los primeros 60 m.(f) Series de tiempo trimestrales de concentración de clorofila-a ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) de la estación fija Callao ( $12^\circ\text{S}$ ) desde Enero-Febrero-Marzo 1966 hasta Octubre-Noviembre-Diciembre 2008.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### VARIABILIDAD MULTIDECADAL E INTERACCIONES RECURSO-AMBIENTE (1850 – 2008)

Las series de tiempo filtradas y estandarizadas en anomalías de desembarques de anchoveta desde 1960 hasta la actualidad y de sardina desde 1970, junto con la variabilidad de parámetros ambientales se presentan en la Fig 3.

Los registros de anchoveta y sardina muestran dos períodos de orden decadal marcados por la alternancia en la dominancia de estas especies, que coincide con lo que muestran otras grandes pesquerías del océano Pacífico (Chavez et al. 2003). Para la anchoveta se presenta un período cálido entre 1960 y 1975, seguido por condiciones frías hasta finales de 1992 que coincide con una época de desarrollo de la pesquería industrial, para nuevamente entrar en un período cálido que se extiende hasta la actualidad (Fig 3). El desfase entre el paso de período frío a cálido de la anchoveta (1972-1973) con respecto a la sardina (1975-1976) se explica, en el caso de la anchoveta por la sobrepesca y el efecto EN 1972-1973 (Pauly et al. 1987), mientras que para la sardina el salto global de temperaturas y presiones superficiales del mar

registrado durante 1975-1976 determinarían este cambio (Chavez et al. 2008). Estas tendencias observadas son consistentes con reconstrucciones de la población de aves guaneras, basadas en censos de estas aves o en la producción de guano (Jahncke et al., 2004).

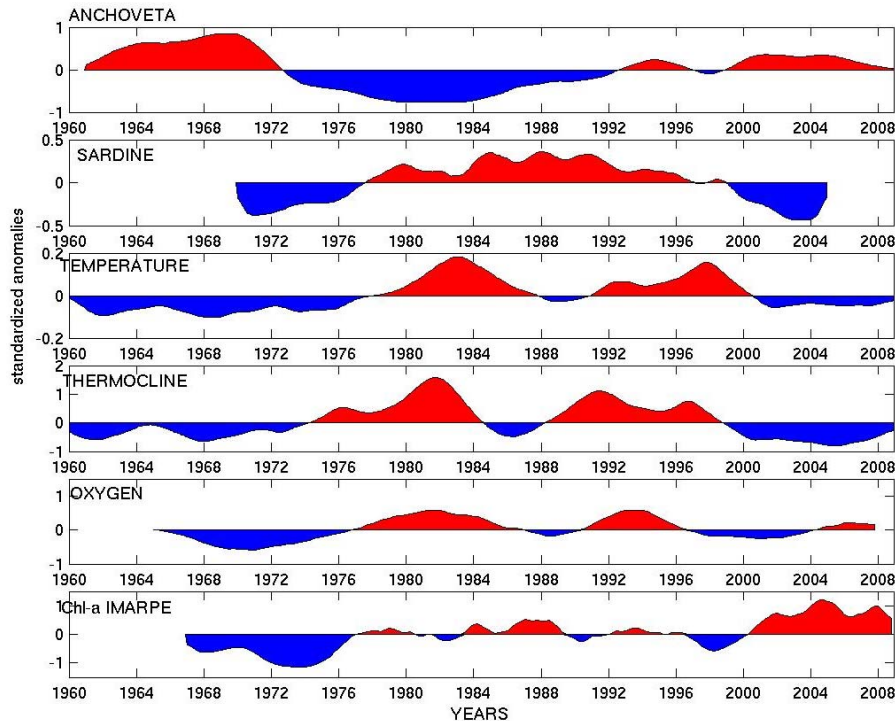


Figura 3. Filtro decadal de las anomalías de series de tiempo de desembarques de peces (anchoveta y sardina) comparado con anomalías de variables ambientales (PC1 de la TSM en el EAP, profundidad de la isoterma de 15°C cerca de la costa de Perú, concentración de oxígeno superficial y clorofila-a frente a Perú).

Cambios de régimen igualmente se observan en las variables ambientales. En el caso de la temperatura superficial del mar y la profundidad de la isoterma de 15°C presentan períodos fríos entre 1960 y 1972-76 y a partir del año 1999 presentan con un período cálido entre 1973-77 y 1999 que a su vez se relaciona al cambio de régimen global que se observó a partir de 1976-1978, que resultó en un calentamiento global y se extendió cerca de 20 años hasta 1997-1998 (Chavez et al. 2008). Por su parte, la alta correlación entre las series de temperatura y profundidad de la termoclina se explica por el forzamiento remoto ecuatorial ENOS que afecta ambas series.

Con respecto a la serie de oxígeno y clorofila-a igualmente presentan fluctuaciones a diferentes escalas temporales. Ambas series presentan un cambio de régimen que coincide con el de la TSM, hacia el año 1976 y nuevamente hacia fines de la década de los 90. La serie de oxígeno presenta a partir del año 1997 un período de anomalías positivas y negativas lo cual pone en evidencia en el caso de variables biogeoquímicas la complejidad de la interacción de procesos locales físicos y biológicos de diferentes escalas de tiempo (estacional o intraestacional) que modifican las señales de mayor escala. Por su parte el análisis de la serie estacional de clorofila-a indica una tendencia ascendente en toda la serie  $+1\text{mg/m}^3/\text{década}$  (Fig. 4), indicando un incremento en la productividad del sistema en los últimos 40 años, y con una intensificación en ésta tendencia a partir del año 2000 ( $+3\text{ mg/m}^3/\text{década}$ ) (Fig. 4). Este patrón coincide con lo propuesto a partir de estudios paleoceanográficos en el área que indican que esta variabilidad multidecadal estaría inmersa en cambios a

escala centenal, ya que un incremento en la productividad primaria y de peces se habría mantenido durante el siglo 20 (Gutiérrez et al., 2009) y con estudios recientes a partir de datos satelitales también indicarían una tendencia positiva en la productividad primaria (Demarq, 2009).

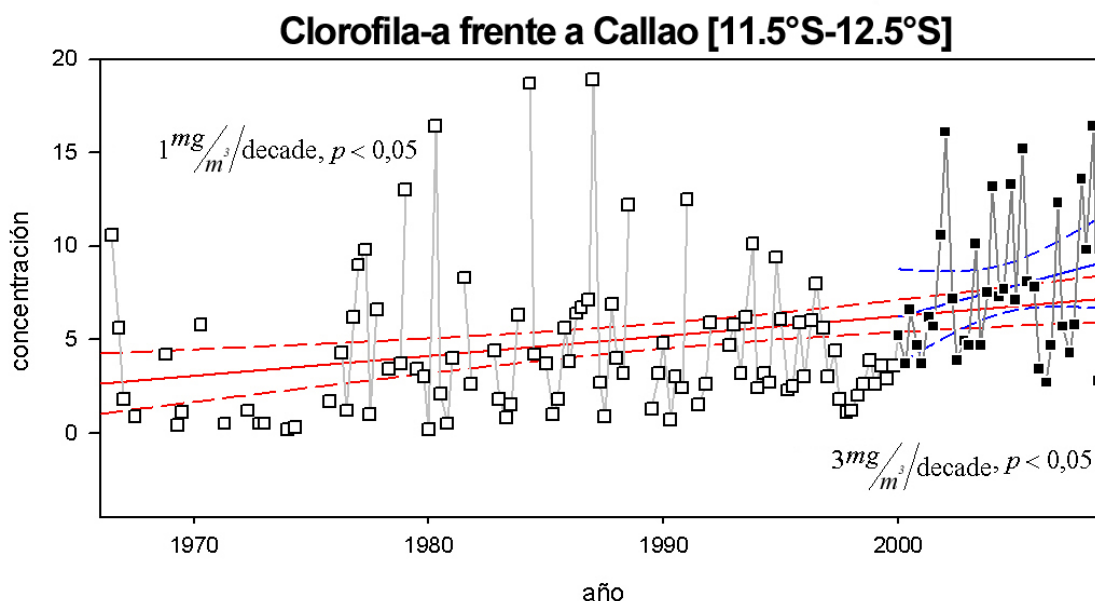


Figura 4. Líneas de tendencia de los promedios estacionales de concentración de clorofila de Callao generados a partir de los cruceros oceanográficos del IMARPE, de 1960 a 2009 (en rojo) y de 2000 a 2008 (en azul).

El análisis estadístico de las series de tiempo desde los años 60 hasta la actualidad muestra una correlación lineal negativa significativa entre las variables ambientales y los desembarques de anchoveta, y positivas con la sardina a escala multidecadal. Una mayor correlación se obtuvo a partir del índice de TSM costero IOP, profundidad de la termoclina y la concentración de oxígeno (Tabla 1).

Tabla 1. Valores de correlación lineal son mostrados para filtros paso bajo entre las series de tiempo filtradas ambientales y de desembarques de anchoveta y sardina. (\*\* =  $p < 0.05$ ).

Desembarques (período de tiempo)	ERSST	IOP	Prof. isoterma de 15°C	Oxígeno
Anchoveta (1961-2008)	-0.30 **	-0.46**	-0.64**	-0.56**
Sardina (1970-2004)	0.20**	0.31**	0.54**	0.61**

Las series presentadas sugieren la existencia de patrones de variabilidad decadal o multidecadal coincidentes tanto para la anchoveta, como para la sardina y las variables ambientales analizadas, que podrían explicarse en el contexto de la variabilidad climática global y de la oscilación climática interdecadal en el océano Pacífico (Mantua et al. 1997). Cambios decadales en la salinidad, nutrientes, intensidad del afloramiento y clorofila-a superficial han sido observados en el Pacífico Norte asociados a fluctuaciones en el patrón climático y que reflejan cambios en la intensidad de la circulación del Pacífico Norte (DiLorenzo et al. 2008). Por su parte, a partir de 1999, las series ambientales sugieren un nuevo cambio de régimen que igualmente se ha observado en la sardina y que podría asociarse en parte con la intensificación del centro de alta presión del Pacífico Norte (Bond et al. 2003).

A su vez, las escalas decadal-multidecadal, estarían asociadas a escalas de tipo secular. Investigaciones basadas en registros sedimentarios de restos óseos, indican que la dominancia de la anchoveta ha prevalecido en el EAP desde fines del siglo XIX hasta la década de 1970 (Gutiérrez et al., 2009). Hacia el año 1820, probablemente asociado a un cambio hacia el norte de la ITCZ, el EAP experimenta una rápida expansión de nutrientes y aguas pobres en oxígeno, persistiendo estos cambios hasta la actualidad. El impacto de estos cambios en el ecosistema fue un incremento en la productividad primaria y que se manifiesta en la actualidad en la tendencia positiva de la serie de clorofila-a presentada en este trabajo (Fig. 5), y un incremento en la productividad de peces, tal como lo indican los flujos de restos de peces al sedimento, la cual continúa en el siglo XX.

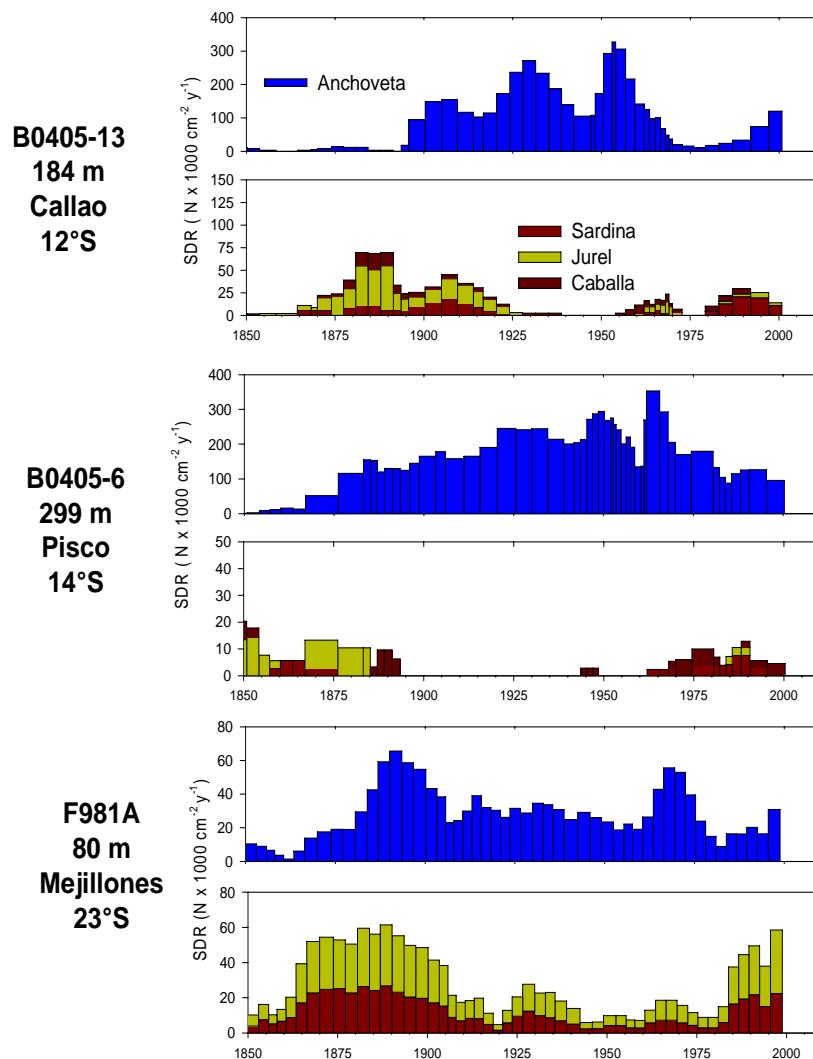


Figura 5. Tasas de deposición de escamas (SDR) (suavizadas) frente a la costa de Perú y Norte de Chile desde 1850 AD, inferidas a partir de testigos de sedimento frente a Callao, Pisco y Mejillones. La SDR relativa de anchoveta, sardina, jurel y caballa reflejan la distribución espacial actual de estos recursos. La DSR de la anchoveta domina el período entre ~1890 and 1975 AD, (a partir de datos publicados en Gutiérrez et al., 2009).



## Modulación a baja frecuencia del ciclo estacional del ambiente en el EAP: ¿un factor clave?

Desde el punto de vista físico, la variabilidad ambiental en el EAP está explicada por el ENOS. Así, los valores del espectro de frecuencia entre 2 y 7 años<sup>-1</sup> explican más del 50% del total de la variabilidad de la temperatura a lo largo de la costa de Perú (IOP) (Purca 2005). Adicionalmente, el efecto de las ondas Kelvin ecuatoriales en la profundidad de la isoterma de 15°C y en la concentración de clorofila indican un ciclo anual “cálido” entre 1976-1999 y “frío” 2000-2008. Destaca un alto grado de asimetría en la TSM y la profundidad de la isoterma de 15°C (coeficiente de asimetrías entre períodos 2000-2008/1976-1999= 1.19/0.60 y 0.77/0.002, respectivamente) y del ciclo estacional (i.e. diferencia de amplitud entre el verano y el invierno) (Fig 6).

Por su parte, a escala estacional se presentan los valores promedio de profundidad de la isoterma de 15° C y clorofila-a superficial (0-10 m) para los diferentes períodos analizados determinados a partir de los regímenes de la TSM. El ciclo anual del período cálido 1976-1999 se caracteriza por una profundización de la isoterma de 15°C y la disminución de clorofila-a, contrario a lo que ocurre durante el período frío 1960-1975 y 2000-2008. La diferencia entre los períodos fríos se puede interpretar mejor al observar los resultados de la disminución de la actividad de las Ondas Kelvin Ecuatoriales Intraestacionales (OKEI). Durante los tres periodos considerados: Los períodos fríos (1960-1975 y 2000-2008) son caracterizados por un desfase entre modo 1 y 2 (en líneas rojas y azules en la Fig 7) de la OKEI, mientras que durante el período frío 2000-2008 ambos modos baroclínicos muestran valores positivos y desfasados, confirmando un efecto residual mayor durante el período frío 2000-2008 en relación al período cálido 1975-1999 (Fig 7). Nótese que la amplitud de la onda de Kelvin estacional del modo 2 (la más energética en el Pacífico Ecuatorial Oriental) produce más afloramiento que hundimiento durante el 2000-2008, esta característica combinada con el incremento de la actividad de la onda de Kelvin intraestacional, puede producir un afloramiento costero promedio por efecto residual, consistente con el incremento de productividad.

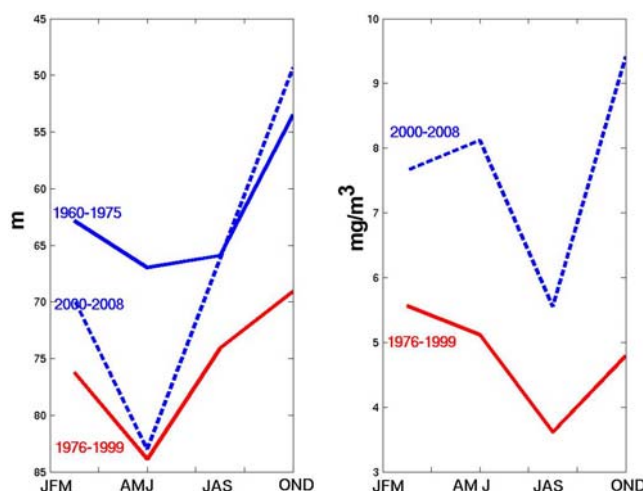


Figura 6. a). Ciclo estacional por décadas para los promedios trimestrales de la profundidad (m) de la isoterma de 15°C entre los 6°S-14°S de los cruces comprendidos dentro de los 100 Km frente a la costa, y b). Promedios trimestrales de la concentración de clorofila-a (mg/m<sup>3</sup>) frente a Callao por décadas.

Estudios en el Pacífico Ecuatorial han mostrado como la variabilidad es dominada por ondas oceánicas Kelvin en una variedad de escalas de tiempo. La dinámica de las OKEI permite comprender los mecanismos asociados con el evento ENOS. A su vez la

variabilidad intraestacional también aparece modulada en el Pacífico a partir de las OEKI (Dewitte et al., 2008). A partir del año 2000 se observa un incremento en la actividad de las OEKI intraestacionales (Dewitte et al. 2008). Estos cambios relacionados con los cambios de la variabilidad en el Pacífico Ecuatorial tienen el potencial de retrasar la recuperación del EAP después del período cálido 1976-1999 a escala estacional.

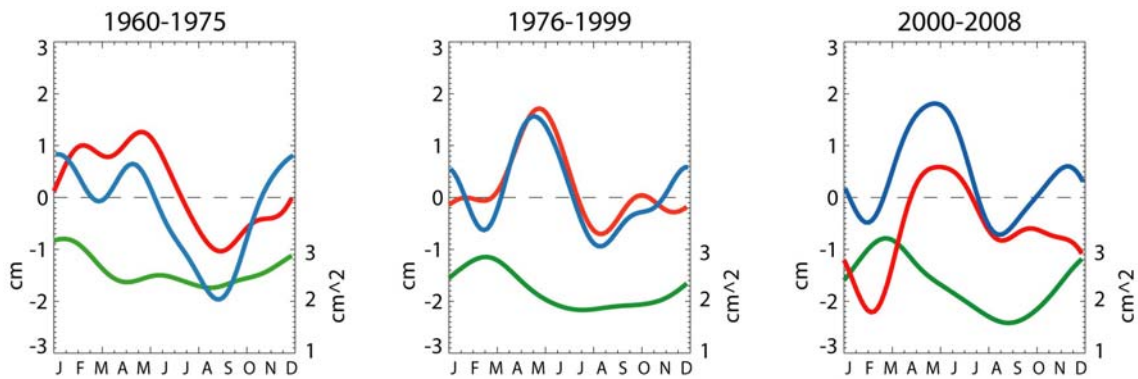


Figure 7: Promedio del ciclo anual de la onda Kelvin Ecuatorial a 95°W para el primer (azul) y segundo (rojo) modo baroclínico, períodos 1960-1975, 1976-1999 y 2000-2008 (panel inferior, de izquierda a derecha). Promedio del ciclo anual intraestacional ([30-90] días<sup>-1</sup> banda de frecuencia) de la actividad de la onda Kelvin Ecuatorial (cf. Dewitte et al. (2008) para detalles del cálculo) son presentados en línea verde para el segundo modo baroclínico (escala de la derecha, unidades 0.1cm<sup>2</sup>). Los datos provienen de la bases de re-análisis SODA período 1958-2008 (version 2.1.6 (B. Giese, comunicación personal)).

Adicionalmente, en el área de afloramiento del EAP, el Transporte de Ekman (TE) disminuyó durante el período de anomalías negativas de los desembarques de anchoveta 1976-1999 (Fig 8), pero se expandió durante el período 2000-2008, sobre todo durante el período de mayor concentración de la clorofila-a (OND). La disminución fue crítica con la climatología del TE para el período 1976-1999 (Fig 8), mientras que para el período estacional OND donde se presenta la mayor concentración de clorofila-a, el TE se incrementó, en especial durante el período 2000-2008 en comparación al período 1960-1975 (Fig 8).

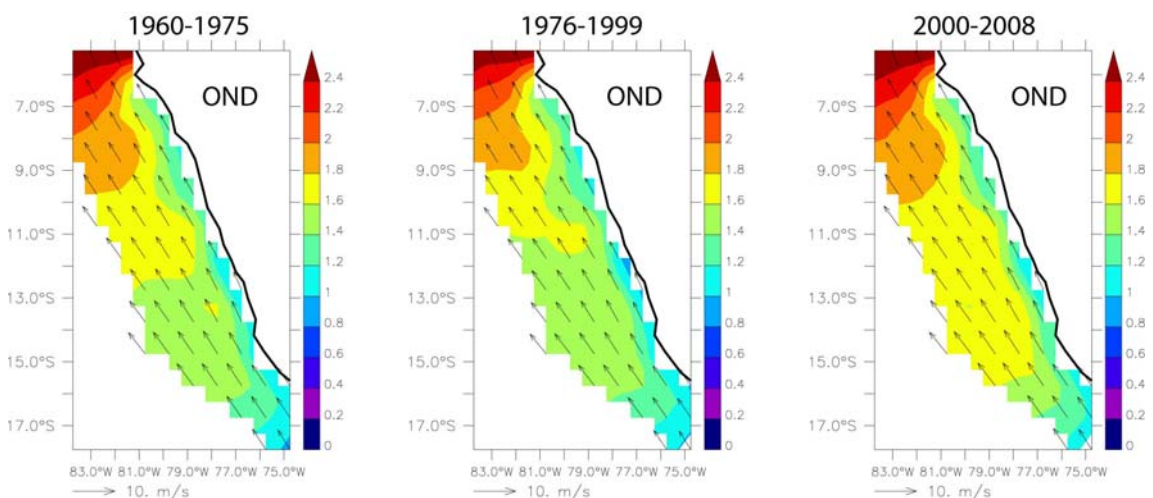


Figura 8. Promedio climatológico Octubre-Noviembre-Diciembre (OND) del Transporte Ekman (TE) para los períodos 1960-1975, 1976-1999 y 2000-2008. TE fue obtenido de los datos de

viento superficial de reanálisis NCEP/CNAR con una reducción estadística de la escala de  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  (Goubanova et al. 2010). Las flechas indican el promedio del período 1958-2008, unidades  $m^2s^{-1}$  para la escala de colores.

## UN ESQUEMA CONCEPTUAL DE LAS INTERACCIONES AMBIENTE-RECURSO DESDE EL SIGLO XX

En base de los resultados, se propone un esquema hipotético acerca de las relaciones temporales entre las variables ambientales y los desembarques. Este esquema se puede sintetizar de la siguiente manera (Fig 9):

1. La tendencia mundial de temperatura superficial del mar es positiva, excepto en los grandes ecosistemas marinos (GEM) de California y Humboldt, ya que ambos presentan tendencias negativas después de 1982 (Sherman et al. 2008), como lo indica la línea negra en el parte inferior de la Fig 9. Por otro lado la tendencia de la clorofila frente a Callao es positiva sobre todo a partir del año 2000, confirmando la respuesta inversa del EAP en comparación a los otros GEM (Figura 9).

2. Durante 1975 a 1990 la isoterma de  $15^\circ C$  y la isoxígena de  $0.5 mL/L$  se profundizaron y los desembarques de sardina se incrementaron (línea roja, Fig. 9). 3. Después de 1990 se observa el aumento de la eficiencia del afloramiento, la expansión de las aguas costeras frías (ACF), expansión del área de la zona mínima de oxígeno (ZMO), incremento de la actividad de la OKEI, así como incremento de la biomasa del zooplancton y de la anchoveta.

4. En el contexto del cambio climático, los modelos de simulación muestran una gran incertidumbre de sus proyecciones climáticas, en particular en la zona de afloramiento peruano (Wang et al. 2009). La influencia no necesariamente será negativa para todas las especies, pues un escenario de afloramiento más intenso podría favorecer a la anchoveta, pero no permanentemente. Otros escenarios son posibles, pero aún inciertos en el estado actual del conocimiento (Fig 9).

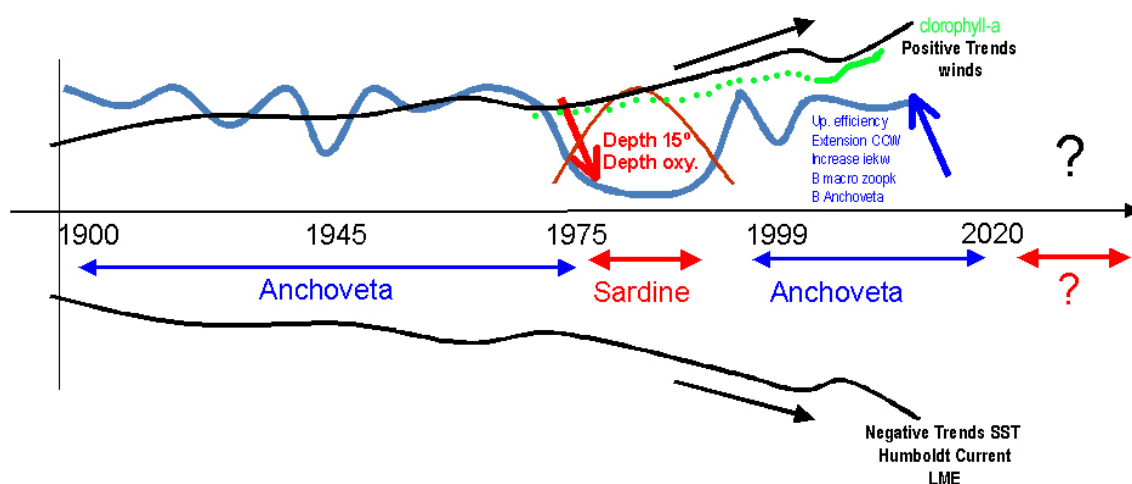


Figura 9. Esquema hipotético acerca de las relaciones temporales entre los desembarques de anchoveta y la variabilidad multidecadal ambiental en el EAP.

## CONCLUSIONES

1) Las relaciones entre las poblaciones de anchoveta y el ambiente son más notables a escalas multidecadales; En particular se observa una modulación a baja frecuencia (escala de tiempo decadal) del ciclo estacional del ambiente, que tiene el potencial de impactar los recursos.

- 2) Estas relaciones, acopladas con la respuesta biológica de la anchoveta, sugieren un control desde abajo de la trama trófica;
- 3) Los cambios decadales en el EAP relacionados con los cambios de la variabilidad en el Pacífico Ecuatorial tienen el potencial de retrasar la recuperación del EAP en relación al período cálido 1976-1999 a escala estacional.

## RECOMENDACIONES

- 1) Desarrollar un índice climático, que pueda ser usado para estimar el estado del ecosistema y predicción por modelos ;
- 2) Fortalecer el excelente programa de monitoreo del IMARPE y asegurar una estimación robusta de las comunidades y poblaciones del macrozooplancton, especialmente eufáusidos, los cuales son especies clave;
- 3) Continuar el desarrollo de modelos de predicción ambiental y ecosistémico estacional, decadal y secular (ej. > 20 años);
- 4) Organizar un nuevo taller de la anchoveta en 5 años para determinar el estado del régimen y revisar las mejoras del estado del arte sobre el cambio climático global.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores están muy agradecidos con Claudia Wosnitza-Mendo, Ricardo Oliveros, Carlos Quispe y Renato Guevara-Carrasco por sus valiosos comentarios y sugerencias.

## REFERENCIAS

- Alder J. y Pauly D. 2008. Aggregate performance of countries in managing their EEZs. Fisheries Centre Research Reports 16 (7), 3-12.
- An, S.-I., 2009: A review of interdecadal changes in the nonlinearity of the El Niño-Southern Oscillation. *Theor. Appl. Climatol.*, 97, 29-40.
- Brink, K.H., D. Halpern, A. Huyer y R.L. Smith. 1983. The Physical environment of the Peruvian Upwelling System. *Progress in Oceanography*. 12:285-305.
- Bond, N.A., J.E. Overland, M. Spillane, P. Stabbeno. 2003. Recent shifts in the state of the North Pacific. *Geophysical Research Letters*, 30 (23) 2183. doi: 10.1029/2003GL018597
- Carton, J.A. and B. S. Giese, 2008: A Reanalysis of Ocean Climate Using Simple Ocean Data Assimilation (SODA). *Monthly Weather Review.*, vol. 136, nº8, pp. 2999-3017
- Chavez F., J. Ryan, S.E. Lluch-Cota y M. Niñen. 2003. From Anchovies to Sardines and Back: Multidecadal Change in the Pacific Ocean. *Science* (299). 217-221
- Chavez F., A. Bertrand, R. Guevara-Carrasco, P. Soler y J. Csirke. 2008. The northern Humboldt Current System: Brief history, present status and a view towards the future. *Progress in Oceanography*. 79. 95-105
- Cury P., C. Roy, V. Faure. 1998. Environmental constraints and pelagic fisheries in upwelling areas: the Peruvian puzzle. *South African Journal of Marine Science*, 19, 1. 159-167
- Dewitte B., S. Purca, S. Illig, L. Renault and B. Giese, 2008: Low frequency modulation of the intraseasonal equatorial Kelvin wave activity in the Pacific ocean from SODA: 1958-2001. *J. Climate*, 21, 6060-6069.
- Di Lorenzo E., N. Schneider, K. M. Cobb, P. J. S. Franks, K. Chhak, A. J. Miller, J. C. McWilliams, S. J. Bograd, H. Arango, E. Curchitser, T. M. Powell, and P. Riviere. (2008) North Pacific Gyre Oscillation links ocean climate and ecosystem change. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, VOL. 35, L08607, doi:10.1029/2007GL032838
- Flores R., J. Tenorio y N. Dominguez. 2006. Southward subsurface flow off the Peruvian coast (Southward extension of Cromwell Current). Book of extended abstracts. International Conference The Humboldt Current System: climate, ocean dynamics, ecosystem processes, and fisheries, Lima, Peru. November 27-December 1, 103-104.
- Goubanova K, V. Echevin, B. Dewitte, F. Codron, K. Takahashi, P. Terray, M. Vrac, 2010. Statistical downscaling of sea-surface wind over the Peru-Chile upwelling region: diagnosing the impact of climate change from the IPSL-CM4 model. *Clim Dyn.*, DOI 10.1007/s00382-010-0824-0
- Gutierrez D., E. Enriquez, S. Purca, L. Quipuzcoa, R. Marquina, G. Flores y M. Graco. 2008. Oxygenation episodes on the continental shelf of central Peru: Remote forcing and benthic ecosystem response. *Progress in Oceanography*. 79. 95-105
- Gutiérrez, D., Sifeddine, A., Field, D., Ortlieb, L., Vargas, G., Chávez, F., Velazco, F., Ferreira, V., Tapia, P., Salvatelli, R., Boucher, H., Morales, M., Valdés, J., Reyss, J.-L., Campusano, A., Boussafir, M., Mandeng-Yogo, M., García, M., Baumgartner, T. 2009. Rapid reorganization in ocean biogeochemistry off Peru towards the end of the Little Ice Age. *Biogeosciences*, 6, 835 - 848.

- Halpern D., 2002. Offshore Ekman transport and Ekman pumping off Peru during the 1997-1998 El Niño. *Geophysical Research Letters*, 29, 5. doi: 10.1029/2001GL014097.
- Huyer A., M Knoll, T. Pauszkiewicz y RL. Smith. 1991. The Peru Undercurrent: a study in variability. *Deep Sea Research* 38. S247-S271.
- Janhke J.; D.M. Jr. Checkley, G.L. Jr., Hunt. 2004. Trends in carbon flux to seabirds in the Peruvian Upwelling system: effects of wind and fisheries on population regulation. *Fisheries Oceanography* 13, 2008-223
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R et al (1996) The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull Amer Meteor Soc* 77: 437-471
- Kug J-S., J Fei-Fei, A Soon-II. 2009. Two types of El Niño events: Cold tongue El Niño and Warm Pool El Niño. *Journal of Climate* 22,6, 1499-1515
- Mantua N.J., S.R. Hare, Y. Zhang, H.M. Wallace, R.C. Francis. 1997. A Pacific Interdecadal Climate Oscillation with Impacts on Salmon production. *Bulletin of the American Meteorological Society*.6 (78). 1069-1079
- NCDC v3. 2009. <http://climexp.knmi.nl/select.cgi?someone@somewhere+ersstv3b>
- Ñiquen M. y P. Freon., A new record set by the Peruvian fishery: 2.5 million tones of anchovy landed in November 2005. *Globec International Newsletter*. October 2006, 12. 56-57.
- Pauly, D. 1987. Managing the Peruvian upwelling ecosystem: a synthesis. p. 325-342. In: Pauly, D., Tsukayama, I. (Eds). *The Peruvian Anchoveta and its Upwelling Ecosystem: Three Decades of Change*. ICLARM Studies and Reviews, vol. 15.
- Purca, S. 2005. Variabilidad temporal de baja frecuencia en el Ecosistema de la Corriente Humboldt frente a Perú. Tesis de Doctorado. Universidad de Concepción, Chile.
- Sherman K., I Belkin, KD Friedland, J O Reilly y K Hyde., 2008. Accelerated warming and emergent trends in fisheries biomass yields of the world's large marine ecosystems. K. Sherman and G. Hempel (eds.). *UNEP Regional Seas Report and Studies*. 182. 41-79
- Strub P. Ted, J. M. Mesías, V. Montecino, J Rutllant, y S. Salinas., 1998. Coastal Ocean Circulation off western South America coastal segment (6,E). *The Sea*. 11. Allan R. Robinson and Kenneth H. Brink ( eds.) 273-313
- Taylor, M. H. y M Wolff. 2007. Trophic modeling of Eastern Boundary Current systems: a review and prospectus for solving the "Peruvian Puzzle". *Revista Peruana de Biología*, 14:87-100
- Wang M., J. Overland y N.A. Bond, 2009. Climate projections for selected large marine ecosystems. *Journal of Marine Systems*. doi: 10.1016/j. jmarsys.2008.11.028