



BOLETÍN

INSTITUTO DEL MAR DEL PERÚ

ISSN 0458-7766

Volumen 25, Números 1 y 2



V PANEL INTERNACIONAL DE EXPERTOS EN EVALUACIÓN DE LA ANCHOVETA PERUANA

Engraulis ringens

Hacia un enfoque ecosistémico
en la pesquería de la
anchoveta peruana

Callao, 10 - 14 de agosto 2009

Enero - Diciembre 2010

Callao, Perú

Relación entre anchoveta y ambiente a diferentes escalas temporales

Relationships between anchovy and environment at different temporal scales

SARA PURCA^{1*}, MICHELLE GRACO¹, DIMITRI GUTIÉRREZ¹, BORIS DEWITTE^{1,4},
JORGE TAM¹, ARNAUD BERTRAND^{1,3}, FRANCISCO CHAVEZ², ROBERTO FLORES¹,
JESÚS LEDESMA¹ LUIS VÁSQUEZ¹ MONIQUE MESSIÉ² KATHERINE GOUBANOVA^{1,4},
OCTAVIO MORÓN¹, CARMELA NAKAZAKI¹,
SALVADOR PERALTILLA¹, SONIA SÁNCHEZ¹

Resumen

PURCA S, GRACO M, GUTIÉRREZ D, DEWITTE B, TAM J, BERTRAND A, CHAVEZ F, FLORES R, LEDESMA J, VÁSQUEZ L, MESSIÉ M, GOUBANOVA K, MORÓN O, NAKAZAKI C, PERALTILLA S, SÁNCHEZ S. 2010. *Relación entre anchoveta y ambiente a diferentes escalas temporales*. *Bol Inst Mar Perú* 25(1-2):13-21.- Se estudió la relación del ambiente y la anchoveta peruana (*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. En series de tiempo mensuales observadas entre 1950 – 2008, se analizó la temperatura superficial, subsuperficial, oxígeno, clorofila-a 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. También se usaron datos de reanálisis 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.

Abstract

PURCA S, GRACO M, GUTIÉRREZ D, DEWITTE B, TAM J, BERTRAND A, CHAVEZ F, FLORES R, LEDESMA J, VÁSQUEZ L, MESSIÉ M, GOUBANOVA K, MORÓN O, NAKAZAKI C, PERALTILLA S, SÁNCHEZ S. 2010. *Relationships between anchovy and environment at different temporal scales*. *Bol Inst Mar Peru* 25(1-2):13-21.- The relationship between the environment and the Peruvian anchovy (*Engraulis ringens*) was studied in the Peruvian Upwelling Ecosystem (PUE). It is hypothesized that in the upwelling zone between 5°S and 13°S there is a negative relationship between temperature, oxygen concentration and landings of anchoveta at decadal timescales. In monthly time series observed between 1950 – 2008, the sea surface temperature, subsurface temperature, oxygen, chlorophyll-a, anchoveta and sardine landings were analyzed applying statistical and spectral methods to obtain decadal temporal modes and characterize the low frequency modulation of their seasonal cycles. In addition, reanalysis data were used to characterize the seasonal changes from the environmental forcing (remote and local) of PUE. Strong associations at decadal scales between coastal environmental and anchoveta landings time series were found, and it is suggested that environmental covariability at seasonal, intraseasonal, interannual, decadal and secular time scales in PUE will increase during the next decade.

KEYWORDS : decadal variability, anchoveta, sardine, Peruvian upwelling ecosystem.

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

2 Monterey Bay Aquarium Research Institute, 7700 Sandholdt Rd. Moss Landing, CA95039 USA.

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

4 LEGOS-IRD/CNES 14, Av. Edouard Belin 31400 Toulouse, France.

* Coordinación: spurca@imarpe.pe, Esquina Gamarra y Gral. Valle s/n, Chucuito-Callao, Perú.

Introducción

La anchoveta en el Perú sustenta la mayor pesquería mono-específica 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 sobre 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 en Evaluación de la Anchoveta Peruana entre el 10-14 de Agosto de 2009, con científicos de Francia, Sudáfrica, Estados Unidos y Perú. 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, decadal) para cumplir con este objetivo.

Los estudios realizados sobre las variaciones de la población de 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 produjo un cambio, y se establecieron 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).

En los últimos 50 años, los estudios indican importantes fluctuaciones en la población de anchoveta asociadas a 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 en el ciclo El Niño Oscilación Sur (ENOS) (CHAVEZ et al. 2003, AN 2009).

En efecto, 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 1982-83 cuando las anomalías de temperatura superficial del mar (TSM) se incrementaron (BARBER y CHAVEZ 1983) y después en 1997. 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 años 1990, 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 frente a toda la costa de Perú (5 - 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-a principalmente cerca a la costa, y con una mayor extensión entre los 11 - 15°S como respuesta a la intensificación del afloramiento (Fig. 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, existen períodos de oxigenación asociados a la ocurrencia de eventos El Niño, pero también a la propagación de ondas Kelvin hacia 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, que da lugar a lo que se conoce como "la paradoja de la anchoveta peruana", donde valores de un alto índice de afloramiento ~1,2 m³*s⁻¹*m⁻¹ y mezcla producida por el viento de ~250

$m^3 \cdot s \cdot m^{-3}$ podrían explicar condiciones ambientales óptimas (CURY et al. 1998, TAYLOR y 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 este 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-a 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.

Datos

Se utilizó la información de desembarques mensuales de anchoveta y sardina desde 1950 hasta 2008, colectados por la Unidad de Investigación de Recursos Pelágicos del IMARPE (ÑIQUEN y FRÉON 2006) (Fig. 2a, b). Asimismo, promedios mensuales de temperatura superficial del mar (TSM) reconstruida extendida (ERSST) (Fig. 2c), para el mismo período. Además, se trabajó con los promedios mensuales de temperatura superficial del mar de la base de datos HadISST1 de 1 grado por un 1 grado de resolución sobre el área: 5°S-13°S, 160°W-70°W (NCDC v3. 2009). La TSM frente a 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 la información de los cruceros del IMARPE (FLORES et al. 2009) (Fig. 2d). Se analizaron series de tiempo entre los años 1960 y 2008 de oxígeno y clorofila-a, obtenidos por la Unidad de Investigación en Oceanografía Química (UIOQ) de IMARPE, que se complementaron con información de la base de datos mundial WOA2005. La información de oxígeno corresponde a un área de 5°S a 13°S, a 350 km desde la línea de costa y a un integrado hasta 60 m de profundidad en la columna de agua (Fig. 2e). La información sobre clorofila-a se obtuvo 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] (Fig. 2f).

Para graficar las tasas de deposición de escamas de peces (suavizadas) desde 1850 frente a la costa de Perú y norte de Chile, se utilizó la información de GUTIÉRREZ et al. (2009).

Con el objetivo de caracterizar los cambios del ambiente/forzamiento e interpretar los datos observados, se utilizaron dos productos derivados respectivamen-

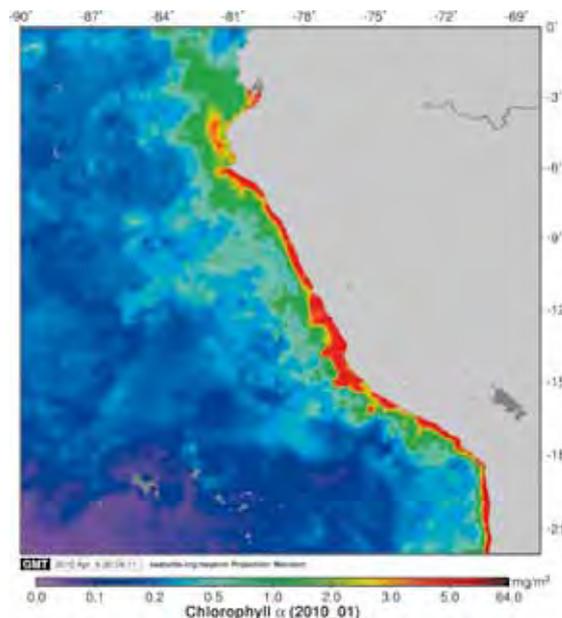


Figura 1.- Promedio de clorofila-α satelital (SEAWIFS) frente a la costa peruana. Enero 2010

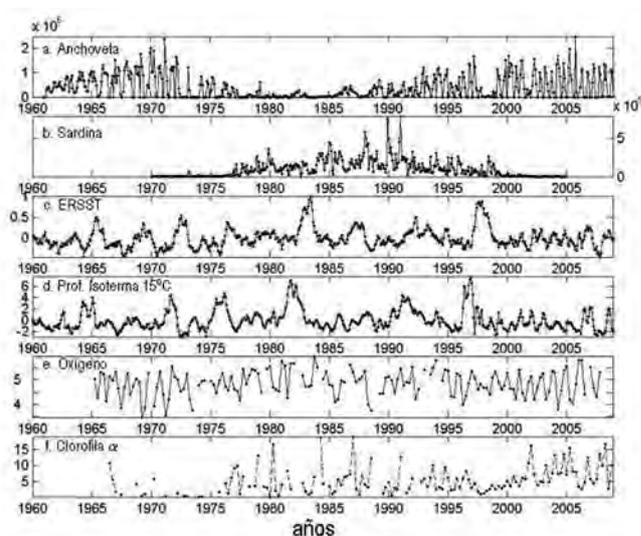


Figura 2.- a) Series de tiempo mensuales de anchoveta en millones de toneladas. b) Desembarques mensuales de sardina en 10^5 toneladas. c) Series de tiempo mensual de la primera componente principal de TSM reconstruida extendida (ERSST). d) Series de tiempo mensual de la primera componente principal 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 (mg/m^3) de la estación fija Callao (12°S) desde enero-febrero-marzo 1966 hasta octubre-noviembre-diciembre 2008.

te del reanálisis atmosférico NCEP/CNAR (KALNAY et al. 1996) y oceánico SODA (CARTON y GIESE 2008). La información de los vientos superficiales sobre el período 1958 - 2008 se obtuvo por el método estadístico de reducción de escala “downscaling” (GOUBANOVA et al. 2010) y la amplitud de la onda de Kelvin ecuatorial 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 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 (Fig. 2). Se aplicó un filtro de paso bajo de una banda temporal de 3-6 años para extraer la señal decadal de las series de tiempo biológicas y físicas; métodos espectrales (Fourier) sustentaron la extracción de la señal interanual ENSO (2 – 7 años⁻¹) para el valor del espectro de potencia. El coeficiente de correlación lineal de Pearson se usó para comparar las series ambientales de tiempo filtradas y los desembarques de anchoveta y sardina.

Resultados y discusión

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

En la Fig. 3 se presentan 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.

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 (1972-73) con respecto a la sardina (1975-76) se explica, en el caso de la anchoveta por la sobrepesca y el efecto EN 1972-73 (PAULY et al. 1987), mientras que para la sardina el salto mundial 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).

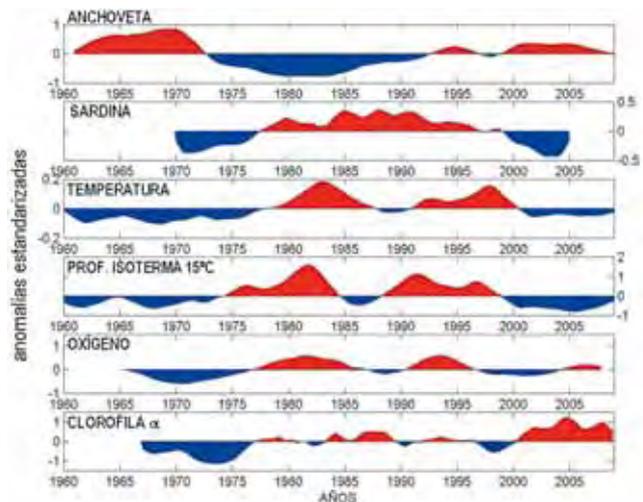


Figura 3.- Filtro decadal de las anomalías de series de tiempo de desembarques de peces (anchoveta y sardina) comparado con anomalías de variables ambientales (PC1 de la TSM en el EAP, profundidad de la isoterma de 15 °C cerca de la costa de Perú, concentración de oxígeno superficial y clorofila-a frente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

En las variables ambientales también se observan cambios de régimen. En el caso de la temperatura superficial del mar y la profundidad de la isoterma de 15 °C, se presentan períodos fríos entre 1960 a 1972-76 y a partir del año 1999 y, un solo período cálido entre 1973-77 hasta 1999 que a su vez se relaciona al cambio de régimen mundial que se observó a partir de 1976-78, que formó parte de las señales del calentamiento global y se extendió cerca de 20 años hasta 1997-1998 (CHAVEZ et al. 2008). La alta correlación entre las series de temperatura y profundidad de la termoclina se explica por el forzamiento remoto ecuatorial ENSO que afecta ambas series.

Con respecto a la serie de oxígeno y clorofila-a, igualmente se 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 1990. La serie de oxígeno, a partir del año 1997, presenta 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 +1mg/m³/década (Fig. 4), indicando un incremento en la productividad del sistema en los últimos 40 años, y con una intensificación en esta tendencia a partir del año 2000 (+3 mg/m³/década) (Fig. 4). Este patrón coincide con lo propuesto a partir de estudios paleoceanográficos, en el área que indican que esta variabilidad decadal estaría inmersa

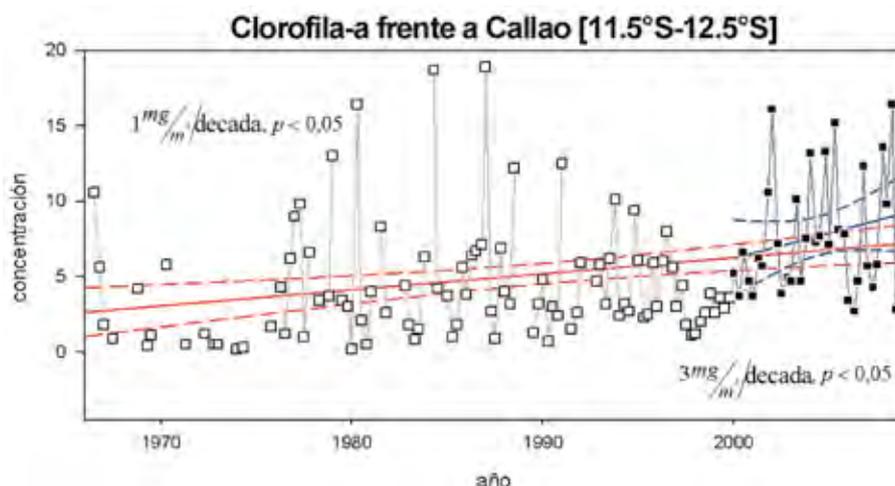


Figura 4.- Tendencia de los promedios estacionales de concentración de clorofila de Callao, de 1960 a 2009 (rojo) y de 2000 a 2008 (azul). Cruceros oceanográficos de IMARPE.

Tabla 1.- Valores de correlación lineal de las series de tiempo filtradas 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**

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

El análisis estadístico de las series de tiempo, desde los años 1960 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 decadal. Una mayor correlación se obtuvo a partir del índice de TSM costero IOP, profundidad de la termoclina y la concentración de oxígeno (Tabla 1).

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 pa-

trón climático y que reflejan cambios en la intensidad de la circulación del Pacífico norte (DILorenzo et al. 2008). 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).

Las escalas, decadal o 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 los 1970 (GUTIÉRREZ et al. 2009). Hacia el año 1820, el EAP experimentó una rápida expansión de nutrientes y aguas pobres en oxígeno, probablemente asociada a un cambio hacia el norte de la ITCZ, y estos cambios persisten hasta la actualidad. El impacto de estos cambios en el ecosistema fue un incremento en la productividad primaria, que en la actualidad se manifiesta 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 continuó en el siglo XX.

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⁻¹ 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

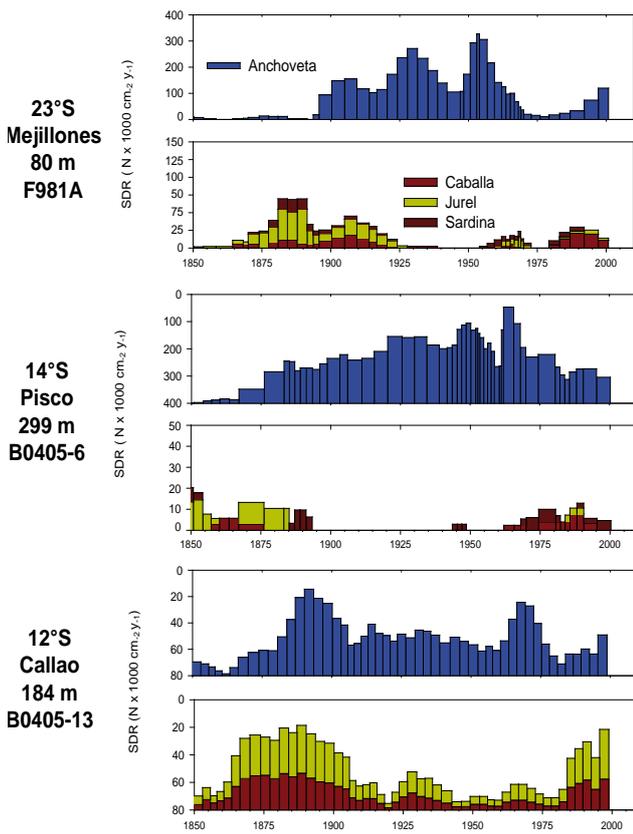


Figura 5.- Tasas de deposición de escamas (SDR) inferidas a partir de testigos de sedimento frente a Callao y Pisco, Perú y Mejillones, Chile entre 1850-2000. La SDR relativa de anchoveta, sardina, jurel y caballa indica la distribución espacial de estos recursos. La SDR de anchoveta domina el período 1890 - 1975 en Pisco, (basado en Gutiérrez et al. 2009).

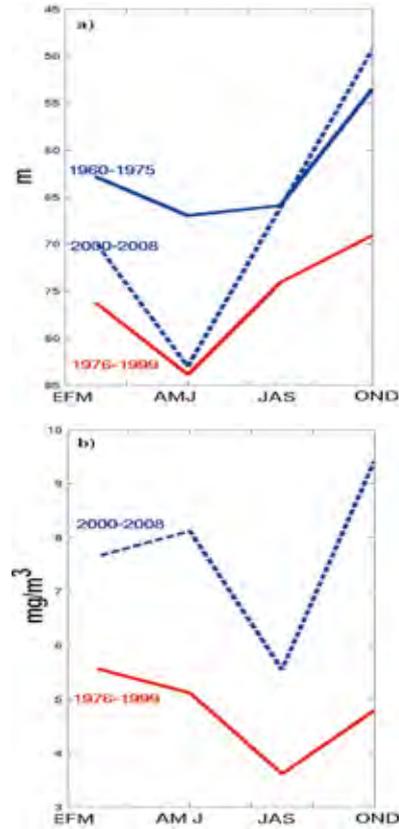


Figura 6.- a) Ciclo estacional por décadas para los promedios trimestrales de la profundidad (m) de la isoterma de 15 °C entre los 6°S-14°S de los cruces comprendidos dentro de los 100 km frente a la costa. b) Promedios trimestrales de la concentración de clorofila-a (mg/m³) frente al Callao por décadas.

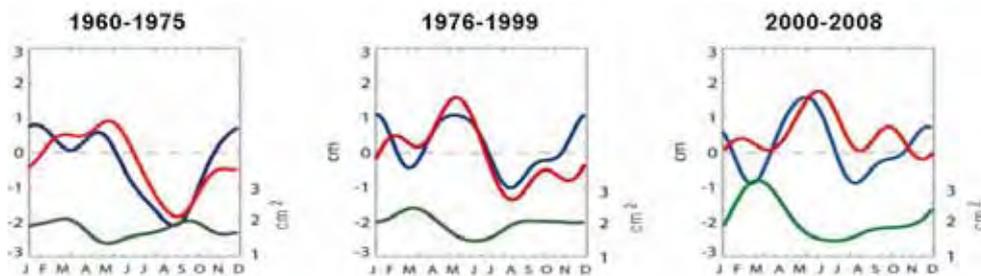


Figura 7.- Promedio del ciclo anual de la onda Kelvin Ecuatorial a 95°W para el primer (azul) y segundo (rojo) modo baroclínico, periodos 1960-1975, 1976-1999 y 2000-2008. Promedio del ciclo anual intraestacional ([30-90] días⁻¹ banda de frecuencia) del segundo modo baroclínico de la actividad de la onda Kelvin Ecuatorial (cf. DEWITTE et al. (2008) en línea verde (escala de la derecha, unidades 0,1 cm²). Los datos provienen de las bases de re-análisis SODA período 1958-2008 (versión 2.1.6 (B. GIESE, comunicación personal)).

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 periodos 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).

A escala estacional, para los diferentes periodos analizados, se presentan los valores promedio de profundidad de la isoterma de 15 °C y clorofila-a superficial (0-10 m), determinados a partir de los regímenes de la TSM. El ciclo anual del período cálido 1976-1999 se caracterizó por una profundización de la isoterma de 15 °C y la disminución de clorofila-a. Durante los periodos fríos 1960-1975 y 2000-2008

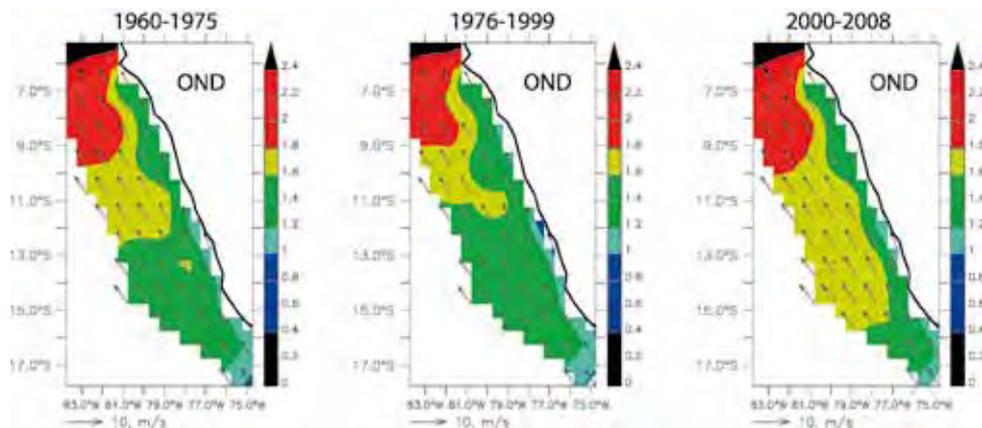


Figura 8.- Promedio climatológico octubre-noviembre-diciembre (OND) del Transporte EKMANN (TE) para los períodos 1960-1975, 1976-1999 y 2000-2008. TE fue obtenido de los datos de viento superficial de reanálisis NCEP/CNAR con una reducción estadística de la escala de $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$ (GOUBANOVA et al. 2010). Las flechas indican el promedio del período 1958-2008, unidades m^2s^{-1} para la escala de colores.

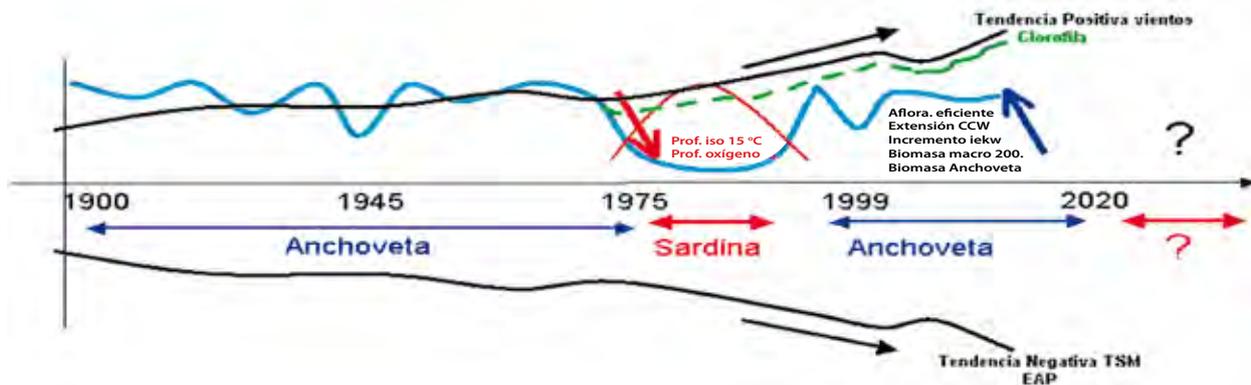


Figura 9.- Esquema hipotético acerca de las relaciones temporales entre los desembarques de anchoveta y la variabilidad decadal ambiental en el EAP.

sucedió lo contrario. 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 figura 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 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 Kelvin ecuatorial intraestacional, puede producir un afloramiento costero promedio por efecto residual, consistente con el incremento de productividad.

Estudios en el Pacífico ecuatorial han mostrado como, en una variedad de escalas de tiempo, la variabilidad

es dominada por ondas oceánicas Kelvin. 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 OKEI (DEWITTE et al. 2008). A partir del año 2000 se observa un incremento en la actividad de las OKEI intraestacionales (DEWITTE et al. 2008). Estos cambios relacionados con la variabilidad en el Pacífico ecuatorial tienen el potencial de retrasar la recuperación del EAP después del período cálido 1976-1999 a escala estacional.

Adicionalmente, en el área de afloramiento del EAP, el Transporte de EKMANN (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).

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 (TSM) 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 la parte inferior de la figura 9. Por otro lado, la tendencia de la clorofila-a frente a Callao es positiva sobre todo a partir del año 2000 (línea verde), confirmando la respuesta inversa del EAP en comparación a los otros GEM (Fig. 9).

2. Durante 1975 a 1990 la isoterma de 15 °C y la isoxígena de 0,5 mL/L se profundizaron (línea azul) 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).

Conclusiones

- 1) Las relaciones entre las poblaciones de anchoveta y el ambiente son más notables a escalas decadales; 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 la base 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 retraer 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 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 el VI Panel Internacional de Expertos en Evaluación de la Anchoveta Peruana (*Engraulis ringens* Jenyns) dentro de 5 años (Año 2015) 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, 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 non-linearity of the El Niño-Southern Oscillation. Theor. Appl. Climatol. 97: 29-40.
- BARBER R, CHAVEZ F. 1983. Biological consequences of El Niño. Science (222): 1203-1210.
- BRINK KH, HALPERN D, HUYER A, SMITH RL. 1983. The Physical environment of the Peruvian Upwelling System. Progress in Oceanography. 12:285-305.
- BOND NA, OVERLAND JE, SPILLANE M, STABBENO P. 2003. Recent shifts in the state of the North Pacific. Geophysical Research Letters, 30 (23) 2183. doi: 10.1029/2003GL018597.
- CARTON JA, GIESE BS. 2008. A Reanalysis of Ocean Climate Using Simple Ocean Data Assimilation (SODA). Monthly Weather Review. Vol.136 (8):2999-3017.
- CHAVEZ F, RYAN J, LLUCH-COTA SE, ÑIQUEÑ M. 2003. From Anchovies to Sardines and Back: Multidecadal Change in the Pacific Ocean. Science (299): 217-221.

- CHAVEZ F, BERTRAND A, GUEVARA-CARRASCO R, SOLER P, CSIRKE J. 2008. The northern Humboldt Current System: Brief history, present status and a view towards the future. *Progress in Oceanography*, 79: 95-105
- CURY P, ROY C, FAURE V. 1998. Environmental constraints and pelagic fisheries in upwelling areas: the Peruvian puzzle. *South African Journal of Marine Science*, 19(1): 159-167
- DEMARCO, H. 2009. Trends in primary production, sea surface temperature and wind in upwelling systems (1998-2007). *Progress in Oceanography*, 83: 1-4, December 376-385
- DEWITTE B, PURCA S, ILLIG S, RENAULT L, GIESE B. 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, SCHNEIDER N, COBB KM, FRANKS PJS, CHAK K, MILLER AJ, McWILLIAMS JC, BOGRAD SJ, ARANGO H, CURCHITSER E, POWELL TM, RIVIERE P. 2008. North Pacific Gyre Oscillation links ocean climate and ecosystem change. *Geophysical Research Letters*, Vol. 35, L08607, doi:10.1029/2007GL032838
- FLORES R., TENORIO J, DOMÍNGUEZ N. 2009. Variaciones de la Extensión Sur de la Corriente Cromwell frente al Perú entre los 3 y 14°S. *Bol Inst Mar Perú XXIV* (1-2): 39-52.
- GOUBANOVA K, ECHEVIN V, DEWITTE B, CODRON F, TAKAHASHI K, TERRAY P, VRAC M. 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
- GUTIÉRREZ D, ENRÍQUEZ E, PURCA S, QUIPÚZCOA L, MARQUINA R, FLORES G, GRACO M. 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, SALVATTECI 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, KNOLL M, PAUSZKIEWICZ T, SMITH RL. 1991. The Peru Undercurrent: a study in variability. *Deep Sea Research* 38. S247-S271.
- JAHNCKE J, CHECKLEY DM JR, HUNT GL JR. 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 JS, FEI-FEI J, SOON-IL S. 2009. Two types of El Niño events: Cold Tongue El Niño and Warm Pool El Niño. *Journal of Climate* 22(6): 1499-1515
- MANTUA NJ, HARE SR, ZHANG Y, WALLACE HM, FRANCIS RC. 1997. A Pacific Interdecadal Climate Oscillation with Impacts on Salmon production. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 6 (78): 1069-1079
- NCDCv3.2009. <http://climexp.knmi.nl/select.cgi?someone@somewhere+ersstv3b>
- ÑIQUEM M, FRÉON P. 2006. A new record set by the Peruvian fishery: 2.5 million tons of anchovy landed in November 2005. *Globec International Newsletter*. October 2006, 12: 56-57.
- PAULY D. 1987. Managing the Peruvian upwelling ecosystem: a synthesis. pp. 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, BELKIN I, FRIEDLAND KD, REILLY JO, HYDE K. 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.
- SIFEDDINE A, GUTIERREZ D, ORTLIEB L, BOUCHER H, VELAZCO F, FIELD D, VARGAS G, BOUSSAFIR M, SALVATTECI R, FERREIRA V, GARCÍA M, VALDES J, CAQUINEAU S, MANDENG YOGO M, CETIN F, SOLIS J, SOLER P, BAUMGARTNER T. 2008. Laminated sediments from the central Peruvian continental slope: A 500 year record of upwelling system productivity, terrestrial runoff and redox conditions. *Progress in Oceanography*, 79: 190-197.
- STRUB P, TED J, MESÍAS M, MONTECINO V, RUTLLANT J, SALINAS S. 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 MH, WOLFF M. 2007. Trophic modeling of Eastern Boundary Current systems: a review and prospectus for solving the "Peruvian Puzzle". *Revista Peruana de Biología*, 14: 87-100.
- VALDÉS J, ORTLIEB L, GUTIÉRREZ D, MARINOVIC L, VARGAS G, SIFEDDINE A. 2008. A 250 years – sedimentary record of Sardine and Anchovy scale deposition in Mejillones Bay, 23°S, Northern Chile. *Progress in Oceanography*, 79: 198–207.
- WANG M, OVERLAND J, BOND NA. 2009. Climate projections for selected large marine ecosystems. *Journal of Marine Systems*. doi: 10.1016/j.jmarsys.2008.11.028