

IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS DINÁMICAS OCEÁNICAS, EL FUNCIONAMIENTO DE LOS ECOSISTEMAS Y LAS PESQUERAS EN EL PERÚ: PROYECCIÓN DE ESCENARIOS E IMPACTOS SOCIO ECONÓMICOS

Enero 2010

Arnaud Bertrand^{a,b} (Coordinador), Pierre Fréon^a (Coordinador), Alexis Chaigneau^{b,c},
Vincent Echevin^c, Cartola Estrella^b, Hervé Demarcq^a, Dimitri Gutiérrez^b, Juan Carlos
Sueiro^d

^a Institut de Recherche pour le Développement (IRD), UMR212 EME, Avenue Jean Monnet, BP 171,
34203 Sète Cedex, France (Contacto : Arnaud.Bertrand@ird.fr; Pierre.Fréon@ird.fr).

^b Instituto del Mar del Perú, Esquina Gamarra y Gral. Valle s/n, Apartado 22, Callao, Lima, Peru

^c IRD, Laboratoire d'Océanographie et de Climatologie: Expérimentation et Approches Numériques
(LOCEAN), Paris, France.

^d CooperAcción Acción Solidaria para el Desarrollo, Calle Berlín 1353, Miraflores, Peru

Con el auspicio de



Embajada Británica
Lima

1. INTRODUCCIÓN

Según la hipótesis de la Fundación Marítima de Civilizaciones Andinas, la enorme productividad del Sistema de la Corriente de Humboldt (SCH) es el origen de las civilizaciones andinas. Las comunidades costeras Incas y pre-Incas dependen altamente de los recursos del océano para su supervivencia. La dependencia de los recursos marinos era más fuerte en Chile, donde existe poca evidencia de desarrollo en la agricultura (Moseley, 2001). En Perú, tanto la agricultura como la pesca juegan un rol muy importante; sin embargo existe un gran número de evidencias que indican el rol crucial de los recursos marinos en la alimentación humana, en particular en las áreas costeras. El apogeo y la decadencia de diferentes culturas estuvieron relacionados con los eventos climáticos (eventos de El Niño/La Niña) en escalas interanuales a seculares. La parte norte del SCH es la región donde la Oscilación del Sur El Niño (ENSO) y la variabilidad climática en general, son más notables (Chavez et al., 2008). En el pasado, el clima fluctuaba entre periodos cálidos y fríos, los cuales impactaban en la productividad pesquera y por ende en el desarrollo de la sociedad. En la actualidad, el clima se ve afectado por ambos, por fluctuaciones naturales y por efectos antropogénicos.

Los impactos ecológicos de un clima cálido son ya evidentes en ecosistemas terrestres y marinos (Fréon et al., 2009), con claras señales por parte de la flora y de la fauna, desde las especies hasta los niveles comunitarios (Walther et al., 2002; Parmesan and Yohe, 2003; ACIA, 2004; Harley et al., 2006). La continua influencia de los humanos en el clima, traerá como consecuencia cambios mayores en cuanto a la abundancia y a la distribución de especies marinas, con alta implicación en la pesca, turismo y los “bienes y servicios” brindados por los ecosistemas marinos (Constanza et al., 1997). Como tal, existe una necesidad de estimar la naturaleza y la severidad de las posibles consecuencias ecológicas, a fin de desarrollar estrategias que nos permitan adaptar y administrar mejor nuestros recursos (Field et al., 2002; Clark, 2006). Esto es particularmente crucial en el Perú, donde la pesca da empleo, directa e indirectamente, a más de 125,000 personas. Es más, tal como indicaron Bakun y Weeks (2008), el espectro del cambio climático está a la vista y podría sacar al ecosistema marino peruano de su actual “estado de gracia” (“*sweet spot*”).

En este documento, se describe primero las características principales del SCH (ver Bertrand et al. [Eds] 2008 para una síntesis del SCH). Luego, se explican los principales cambios climáticos históricos que han ocurrido en el milenio pasado. Sin lugar a dudas, han ocurrido cambios drásticos a escalas temporales diferentes (por ejemplo, en décadas y siglos) que han afectado al ecosistema por completo, inclusive antes de la influencia antropogénica en el clima. Posteriormente se mostrarán los cambios reciente que han ocurrido en el SCH. Finalmente, se describen las teorías actuales, y a menudo contrarias, de las posibles evoluciones del sistema en términos de dinámicas oceánicas, productividad y abundancia de recursos. Estimar los efectos del cambio climático (CC) en los ecosistemas marinos es complejo, debido a las distintas formas en que se manifiestan en el Océano mundial; a tal punto que a veces es ignorado o malinterpretado. A pesar de que existen evidencias claras de los profundos cambios en las dinámicas de ecosistemas, el conocimiento actual no permite predicciones concretas. De hecho, las dinámicas ecológicas en los océanos pueden caracterizarse por desarrollos no lineales de física estocástica forzada por procesos biológicos (Hsieh et al., 2006). Aún cuando no se puede predecir lo que depara el futuro del ecosistema, es muy poco probable que la productividad pesquera se mantenga tan alta como a los inicios del desarrollo de la industria pesquera. En todo caso, el potencial para cambios impredecibles y rápidos, en respuesta a la estocasticidad ambiental y el impacto humano apoya un manejo de los recursos marinos basado en un enfoque precautorio.

2. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LA REGIÓN NORTE DEL SISTEMA DE LA CORRIENTE DE HUMBOLDT

El SCH a lo largo de las costas de Perú y Chile es uno de los cuatro principales sistemas de surgencia de borde este a nivel mundial (Figura 1a), y que son sistemas de surgencia (upwelling) costeros inducidos por el viento. A lo largo de Sudamérica, la gran altura de la Cordillera de los Andes forma una barrera aguda frente al flujo atmosférico de la zona, forzando a que los vientos alisios de sur a este soplen de forma paralela hasta las costas de Chile y Perú (Gunther, 1936; Strub et al., 1998), con consecuentes vientos fuertes costeros (*wind-jet*) (Garreaud & Muñoz, 2005). Este régimen de viento origina un flujo oceánico en la capa superficial (10 – 30 m) (Brink et al., 1983), lo que conduce a intensas surgencias oceánicas, a lo largo de la costa, trayendo aguas profundas, frías y ricas en nutrientes a la superficie (Figura 1b). Cuando el agua de surgencia, rica en nutrientes alcanza la superficie, la luz solar desencadena el inicio de la producción de fitoplancton. Este es el primer eslabón de la cadena alimentaria acuática y por lo mismo, el inicio de una alta producción, desde el zooplancton hasta peces y depredadores superiores.

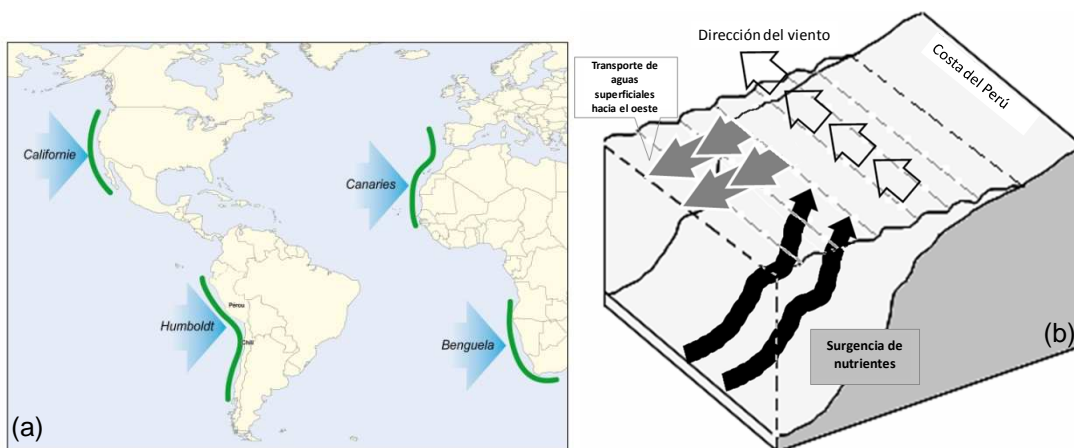


Figura 1. (a) Principales sistemas de surgencia de borde este de los continentes a nivel mundial; (b) representación esquemática de surgencia en acción a lo largo de la costa peruana.

La estrecha plataforma continental, la orientación norte-sur del litoral sudamericano y la presencia de la Cordillera de los Andes permiten, a lo largo de la costa, una eficiente transmisión de las señales atmosféricas y oceanográficas a través del SCH del norte; desde las regiones ecuatoriales hasta áreas de latitud elevadas. El SCH está por lo tanto, íntimamente ligado a las dinámicas del Océano Pacífico ecuatorial y está sujeto a grandes fluctuaciones en el clima, ecosistema y pesca, a varias escalas temporales: estacional, interanual (por ejemplo la Oscilación del Sur El Niño) y secular (Chavez et al., 2008).

De manera más general, el océano tropical de la costa occidental de Sudamérica es notable por varias razones (Chavez et al., 2008). Primero, debido a la surgencia costera, la temperatura de la superficie del mar (TSM) es más fría a lo largo de la costa peruana, que en cualquier otra latitud comparable a nivel mundial. La surgencia de aguas frías trae nutrientes a la superficie, aumentando de manera dramática la productividad biológica en esta región de baja latitud. Segundo, como resultado de la productividad alcanzada, la región norte del SCH produce más peces por área unitaria que cualquier otra región en el Océano mundial (Figura 2 donde se nota que a pesar de una producción primaria promedia, el SCH produce mucho más peces que los

demás ecosistemas de surgencia); representando así menos del 0,1% de la superficie oceánica mundial, actualmente produciendo cerca del 10% de la pesca mundial. Tercero, el SCH se caracteriza por la presencia de las más pronunciadas y extendidas subsuperficies de zona mínima de oxígeno de (ZMO), a las que se les atribuye tres factores principales: (i) una alta producción de fitoplancton en la superficie, que es descompuesta por microbios en la subsuperficie, quienes consumen grandes cantidades del oxígeno disuelto; (ii) una estratificación vertical permanente y brusca de la columna de agua (picnoclina) que impide la ventilación local de las aguas subsuperficiales; (iii) una circulación profunda, lenta y complicada y por lo tanto “anticuada” de las aguas subpicnoclinales.

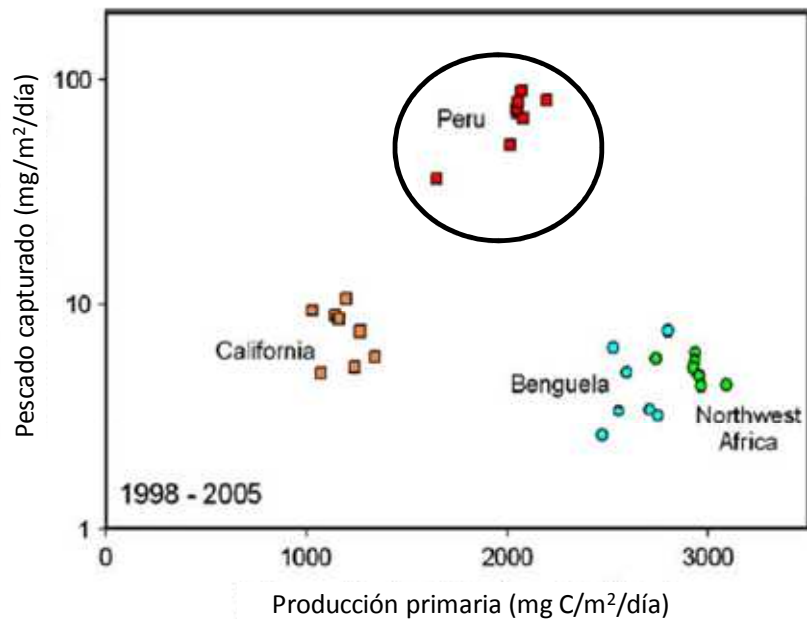


Figura 2. La pesca versus la productividad primaria de las cuatro principales corrientes de surgencia del este para los años 1998-2005. Fuente Chavez et al. (2008).

El núcleo de la ZMO se centra a 300 – 400 m y se caracteriza por valores de oxígeno disuelto menores a 0.02 mL L^{-1} . La ZMO de la región norte del SCH tiene un fuerte impacto no sólo en el rico ecosistema local, sino también en el clima global a través del intercambio activo de gases invernaderos (CO_2 y N_2O) con la atmósfera. Aún cuando ellos representan sólo una pequeña fracción del volumen oceánico global ($\sim 0.1\%$), las ZMOs son reconocidas por ser un entorno importante para el nitrógeno fijado, que contribuye el 30-50% de la extracción del nitrógeno oceánico, mediante los procesos de desnitrificación y anammox (Lam et al., 2009). Un estudio reciente mostró que la ZMO del Pacífico Sureste es una clara fuente de CO_2 y N_2O (Paulmier et al., 2009). Éste, es un gas invernadero importante, porque su potencial de calentamiento es 300 veces más que el CO_2 (Crutzen, 1970) e interviene en la destrucción del ozono estratosférico. Las ZMOs del océano mundial varían en respuesta a las fluctuaciones climáticas tal como lo expandirían en un mundo más cálido. La intensificación de la ZMO en el SCH, asociado a los cambios a gran escala en la circulación oceánica, puede reactivar la concentración de CO_2 y N_2O y así en el clima (Altabet, 1995). En la región norte del SCH, y particularmente cerca de las costa donde la actividad biológica es intensa, el mínimo oxígeno puede inmiscuirse dentro de la capa eufótica. La presencia de la ZMO determina las características de las poblaciones más pelágicas,

así como de las bénticas. Debido a que la ZMO es inhóspita a varias especies, éstas sirven como barreras biogeográficas, limitando los movimientos verticales de las poblaciones (Bertrand et al., 2004, 2008; Thiel et al., 2007; Bograd et al., 2008). El espesor reducido de la bien oxigenada superficie del agua limita considerablemente el hábitat de peces pelágicos (por ejemplo, anchovetas, *Engraulis ringens*; sardina, *Sardinops sagax*, jack makerel, *Trachurus murphyi*) que no pueden adaptarse a la carencia de oxígeno. La extensión de la ZMO experimenta importantes cambios interanuales conducidos por ENSO. Por ejemplo, durante El Niño de 1997-1998, ocurrió una oxigenación a gran escala del margen del Perú, asociada al hundimiento de la ZMO en 100 m (Sanchez et al., 1999).

En los últimos 50 años, *in situ*, la serie temporal revela la expansión vertical de la ZMO en la Zona del Atlántico tropical este y el Pacífico ecuatorial; y una disminución significativa del contenido de oxígeno disuelto (Stramma et al., 2008). El calentamiento global puede llevar a disminuir el contenido de oxígeno en los océanos mundiales (Keeling and Garcia, 2002), y a la expansión de ZMOs en áreas selectas (Stramma et al., 2008). El alcance y severidad de las expansiones de las ZMOs variará en los cambios de la circulación oceánica, la temperatura y productividad (Reichart et al., 1998; Keeling and Garcia, 2002).

3. CAMBIOS EN EL CLIMA Y LA PRODUCTIVIDAD DURANTE EL ÚLTIMO MILENIO

3.1 La historia climática del SCH de la región norte: cuando el clima global cálido significa SCH frío

Observar los cambios climáticos anteriores puede proporcionar un entendimiento clave para comprender los cambios potenciales futuros. Los estudios paleoclimáticos en los registros marítimos y terrestres sugieren que el clima, durante el milenio anterior, fue marcado por cambios a escala centenaria en patrones de precipitación en el Continente Americano y en la TSM a través del Pacífico Tropical Este. Se reconoce dos regímenes centenarios principales, cuya llegada y culminación concuerdan con la Anomalía Climática Medieval (ACM, ~800 – 1300 AD) y con la Pequeña Edad de Hielo (PEH, ~1400 – 1850 AD). Ambas, la ACM y la PEH fueron objeto de estudio, por primera vez en el hemisferio norte, siendo asociadas respectivamente a condiciones climáticas más frías y más cálidas que las promedio. Mientras que la ACM era caracterizada por inviernos más templados y húmedos en el Norte de Europa, la PEH presentaba condiciones de expansiones de glaciares en Europa y Norte América (Graham et al., 2007; Cronin et al., 2002).

Durante la ACM, se habían determinado, generalmente condiciones áridas con episodios de sequía severa a escala centenaria, a lo largo de la costa de California (Graham et al., 2007). La costa peruana también mostraba anomalías de precipitación negativa extrema (Rein et al., 2004), que sugería un monzón sudamericano debilitado y una posición al norte de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). Aún cuando los registros publicados sobre las reconstrucciones del paleo-TSM no eran accesibles para el Pacífico Sureste, las reconstrucciones coral paleo-TSM del Pacífico Central ecuatorial indicaban condiciones frescas durante el periodo de la ACM (Graham et al., 2007). Esto también es afirmado por trabajos recientes que sugieren una surgencia más fuerte y una productividad mayor en el Perú durante la ACM (Sifeddine et al., 2008a; A. Sifeddine. M. Gurgel and D. Gutiérrez, datos no publicados). La PEH fue asociada con radiaciones solares menores y actividad volcánica elevada, resultando en grandes expansiones de glaciares de montañas en Europa y Norte América entre los siglos quince y diecinueve (Cronin et al., 2002; Broecker et al., 2000), y por las

condiciones más áridas en los trópicos del norte (Haug et al., 2001). Durante la PEH, la posición de la ZCIT en el Pacífico Este puede haber cambiado hacia el sur debido a un incremento (disminución, respectivamente) de la temperatura gradiente meridional (zonal) (Koutavas & Lynch-Stieglitz, 2004; Peterson & Haug, 2006; Mann et al., 2005). El desplazamiento de la ITCA y la asociada elevación del monzón Sudamericano probablemente tuvo dos consecuencias principales: (1) humedad elevada y salida de los Andes occidentales, aumentando la entrada litogénica hacia el océano costero (Sifeddine et al., 2008b), y (2) tensión de los vientos más débiles a lo largo de la costa que condujeron a una intensidad de surgencia reducida y a la productividad del sistema peruano (Sifeddine et al., 2008b, Gutiérrez et al., 2009;). Las temperaturas de la superficie reconstruida en Pisco (~14°S, Peru) también apoyaban la idea de una surgencia reducida durante la PEH, con valores de temperatura de 1 -2°C más altos que aquellos de a finales del siglo diecinueve y a lo largo del siglo veinte (Gutiérrez et al., 2008).

Una rápida reorganización de las condiciones climáticas y oceánicas (en una o dos décadas) tuvo lugar a inicios del siglo diecinueve, hacia el final de la PEH (Gutiérrez et al., 2009). Es probable que el cambio haya sido conducido por una migración del norte de la ZCIT y de la Alta Subtropical del Pacífico Sur hacia su ubicación actual, conjuntamente con el fortalecimiento de la circulación Walker. Por lo tanto, en el SCH, las TSM disminuyeron rápidamente y una rápida expansión de las aguas de la subsuperficie rica en nutrientes y escasas de oxígeno resultaron más altas en la actualidad, de productividad biológica más alta (aumento en el carbón orgánico total, TOC ver Figuras 3 y 4), incluyendo los peces pelágicos (Figura 3). Un ‘periodo de ajuste’ caracterizó la variabilidad del SCH desde ~1820 a 1870), con altos y bajos en el comportamiento de principales indicadores geoquímicos y biogénicos, que sugieren la influencia de la variabilidad aumentada semejante a la de ENSO y/o respuesta no lineal del sistema oceánico para los forzantes climáticos (Gutiérrez et al., 2008; Vargas et al., 2007; Valdés et al., 2008).

Finalmente, la TSM reconstruida a lo largo de la costa peruano muestra una tendencia negativa desde ~1870 con un enfriamiento más intenso durante los últimos 50 años (Gutiérrez et al., 2008). Esta tendencia de enfriamiento es consistente con los registros instrumentales de las TSM costera (ver parte 4) y más fuerte a lo largo de la costa con la acentuación del viento desde inicios del siglo 20, sugiriendo el incremento de la surgencia costera (Jahncke et al., 2004).

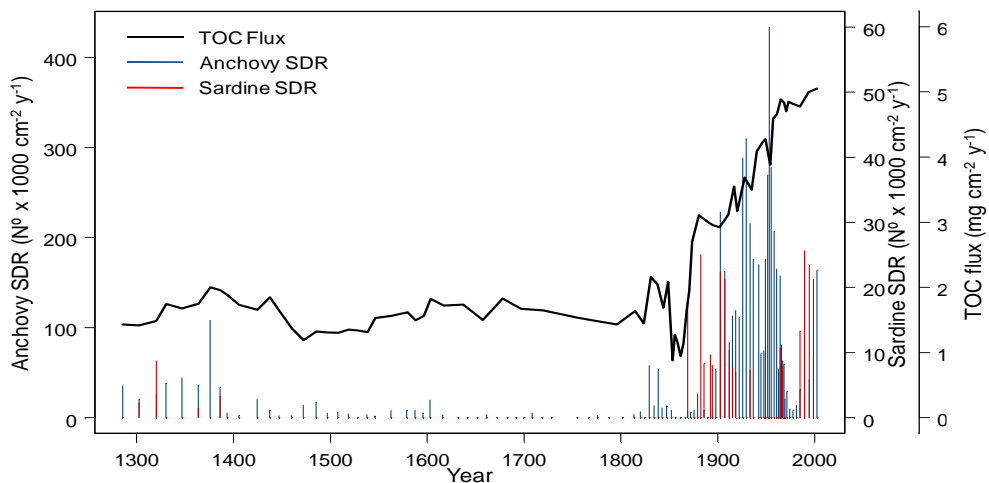


Figura 3. Indicadores del ecosistema pelágico del Callao, Peru: carbón orgánico total (TOC) flujo (en $\text{mg cm}^{-2} \text{ y}^{-1}$) (línea negra sólida), escala del índice de deposiciones (SDR, en $\text{N}^{\circ} 1000 \text{ cm}^{-2} \text{ y}^{-1}$) de la anchoveta (barras verticales azules) y la sardina (barras verticales rojas). Tomado de Gutiérrez et al. (2009).

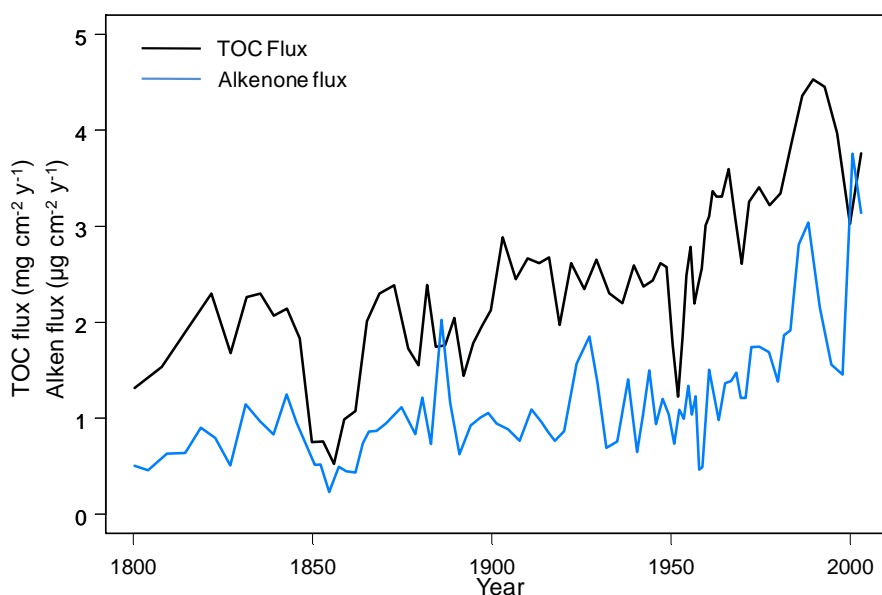


Figura 4. La serie temporal de indicadores desarrollados en núcleos de sedimento recolectado en Pisco: carbón orgánico total (TOC), un indicador clásico de la productividad primaria y producción de exportación, y flujo de alquenones, un indicador de la productividad de los coccolotofóridos. Fuente: D. Gutierrez, I. Boulobassi, A. Sifeddine (comunicación personal)

3.2 Cambios en la concentración del oxígeno y la acidificación

Los trabajos paleoclimáticos también proporcionan importantes perspectivas sobre las dinámicas de la ZMO durante los últimos siglos. Los registros de sedimentos acuáticos del Perú sugieren un cambio milenar durante la última desglaciación, desde condiciones oxigenadas en la columna de agua hasta condiciones reducidas de oxígeno, lo que caracteriza la configuración moderna de la ZMO en el Pacífico este (Higginson & Altabet, 2004). Estos registros también indican variabilidad centenar a milenaria de la ZMO con cuatro periodos centenarios cortos de alta producción y reducción intensa de oxígeno, separada por largos periodos de productividad moderada y reducción de oxígeno (Agnihotri et al., 2008).

Al final de la PEH, la reorganización de las condiciones climáticas y oceánicas también implicaron una reducción a gran escala del oxígeno debajo de la capa de mezcla y una superficie rica en nutrientes (Gutiérrez et al., 2008, 2009). El cambio debió haberse asociado con una expansión de los ricos nutrientes, Aguas Ecuatoriales Subsuperficiales de escaso oxígeno que nutren la surgencia costera de la región (Strub et al., 1998). Los registros de sedimentos indican que después del cambio de 1820, la reducción del oxígeno es similar a la de la ACM (A. Sifeddine, comunicación personal).

En el SCH, la presencia de una ZMO intensa también tiene consecuencias importantes en la acidez oceánica. Puesto que las áreas de surgencia de las aguas con carencia de oxígeno son lugares clave de eflujos de CO_2 disuelto hacia la atmósfera, también son áreas de bajo pH (Karstensen et al., 2008). Por lo tanto, la variabilidad centenaria

en la expansión de aguas carentes de oxígeno también puede reflejarse en cambios en la acidez oceánica en el SCH. En este sentido, las condiciones oceánicas durante la ACM pueden parecerse a las condiciones del siglo veinte en términos de carencia de oxígeno y acidificación del agua.

3.3 Impacto climático en la productividad de la región norte del SCH

DeVries & Pearcy (1982) señalaron la existencia de periodos centenarios de altos restos de deposición de peces, coincidiendo con alta sedimentación silíceo. El trabajo actual en muestras de sedimentos que abarcan las ACM revela dominancia análoga desde sedimentación biogénica (silíceo y provenientes de peces) hasta condiciones modernas en el margen superior del Perú (A. Sifeddine & D. Gutiérrez, pers. obs.). Los flujos de restos de peces que son resistentes a la disolución (vétebra y otros huesos) indican fuertemente que la productividad total de peces disminuye durante la PEH, y que el núcleo de la distribución de la anchoveta se dirigió hacia el sur (Gutiérrez et al., 2008, 2009). En contraste al panorama paradigmático de la alternancia de la anchoveta y de la sardina para el periodo frío productivo contra el periodo cálido no productivo (Schwartzlose et al., 1999), los registros sedimentarios indican que ni la sardina ni ninguna otra especie de peces oceánicos se expandieron durante la PEH (Figura 3), a pesar de las condiciones más cálidas y menos productivas en ese periodo (Gutiérrez et al., 2008, 2009). Así también, las escalas de tiempo para picos y valles de la dominancia de anchovetas difiere con la de la expansión de sardina. Los registros sedimentarios en el SCH muestran fluctuaciones en la escala del índice de deposiciones (SDR) del orden de 25-40 años, mientras que los únicos dos picos de sardina observados SDR fueron separados cerca de un siglo entre uno y otro. (Figura 3).

Finalmente, los registros peruanos presentan una tendencia positiva centenaria en los flujos de escamas de anchoveta que comienzan a finales del siglo diecinueve hasta la llegada de la era industrial de la pesca. La tendencia y los patrones de variaciones están positivamente correlacionados con los indicadores de surgencia/productividad descritos anteriormente. Estos resultados son increíblemente consistentes con una respuesta '*bottom-up*' donde los efectos de una intensificación de la surgencia alcanza los niveles de población de grandes predadores como las aves guaneras (Jahncke et al., 2004).

3.4 Observaciones concluyentes

Tomados en conjunto, los 'indicadores paleo' revelan que la condiciones actuales del sistema de surgencia peruano (nivel de productividad, producción pesquera, desarrollo de la ZMO), que fueron establecidas después del término de la EPH y particularmente desde finales del siglo diecinueve, no son típicas de la era Holocena. Los análogos más modernos parecen ser los de la ACM, cuando las condiciones climáticas similares relacionadas a la posición ZCIT favorecieron el fuerte enfriamiento (dirigidos por la surgencia) del Pacífico este. Mientras que a mediados del siglo diecinueve hasta inicios del siglo veinte es difícil atribuir los cambios a la influencia antropogénica, las últimas tendencias desde mediados del siglo veinte sugieren claramente que el sistema ya ha sido impactado por el cambio climático. La mejora de la surgencia costera hipotéticamente se señala como una respuesta al calentamiento global, debido a la intensificación de los gradientes de calor tierra/océano (Bakun, 1990; Bakun & Weeks, 2008).

Por otro lado, la respuesta del ecosistema al término de la PEH incluyó un aumento total de los grupos principales de diatomeas y peces pelágicos, en contraste a la

productividad disminuida en el Pacífico Este durante el Niño y El Viejo (Barber and Chávez, 1983; Chavez et al., 2003). Esta paradoja indica que los procesos en funcionamiento durante las recientes variaciones multi-decenios pueden ser substancialmente diferentes a los cambios de escala centenaria a milenial. Además, sin el incremento centenario de la productividad 'bottom-up' del sistema de surgencia (probablemente dirigido, en parte, por un calentamiento global), la explotación intensa de anchoveta durante las décadas pasadas no hubiese sido posible. Dado que el cambio climático inminente puede fácilmente exceder las variaciones observadas en el siglo veinte, se deberá esperar cambios de regímenes mayores y no lineales.

4. CAMBIOS RECIENTES EN EL CLIMA Y LA PRODUCTIVIDAD DEL SCH

El último siglo se ha caracterizado por la tendencia más grande del calentamiento global, nunca antes observada, desde un punto de vista histórico. Según las mediciones de la TSM (Figura 5), se observó una aceleración del calentamiento global desde los últimos cincuenta años. El calentamiento es más pronunciado en el hemisferio norte, así como en las áreas ecuatoriales y tropicales.

Durante las últimas décadas, los vientos costeros aumentaron en la mayoría de regiones en surgencia del mundo, en particular en el Perú (Figura 6). El aumento en la tensión de los vientos costeros (*wind stress*) favorece la surgencia del agua de la sub-superficie rica en nutrientes y fría. En efecto, a pesar del calentamiento global, las tendencias en la TSM obtenidas de los núcleos sedimentarios del Perú muestra una disminución en la TSM durante las últimas décadas (ver sección 3). Tal tendencia también puede observarse en los datos de TSM *in situ* que muestran una leve disminución durante las últimas décadas (Figura 7). Se debe notar que esta tendencia no es muy significativa y que utilizando un periodo o área geográfica diferente se puede observar un leve incremento en la TSM, (ver Demarcq, 2009). Asimismo, las series temporales de la TSM a largo plazo de las estaciones costeras del IMARPE muestran una tendencia de enfriamiento (leve calentamiento, respectivamente) desde 1960 al sur (norte) de 12°S (S. Purca & D. Gutiérrez, pers. comm.). De manera interesante, la frecuencia de las tormentas de polvo inducidas por los vientos ('vientos Paracas') en la parte costa sur peruana, las mismas que son provocadas por los procesos de circulación atmosférica a lo largo de la costa en escalas que van desde locales hasta regionales, ha sido intensificada desde 1950 (Escobar, 1993; com. pers.), mejorando potencialmente el transporte del polvo litogénico hacia el océano costero (Sifeddine et al., 2008b).

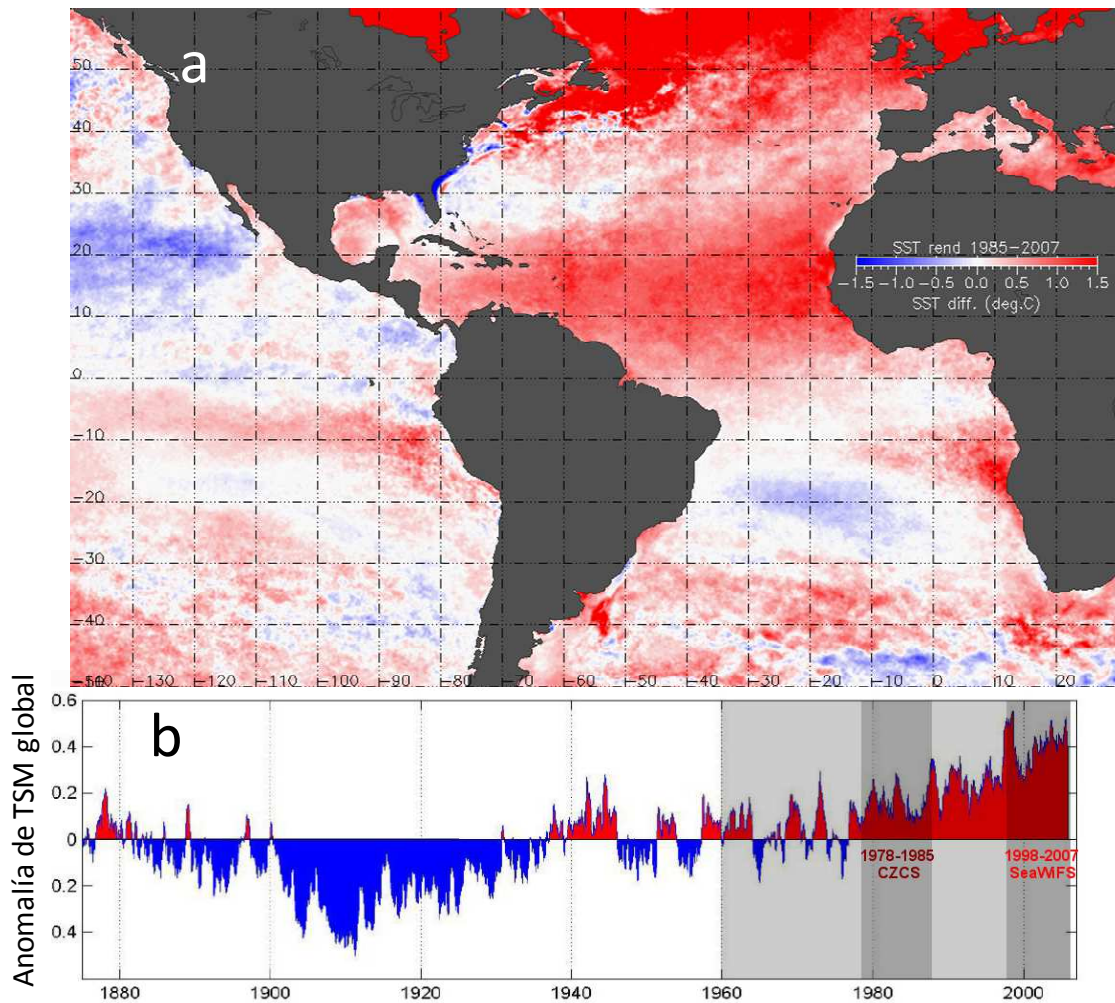


Figura 5. (a) tendencia TSM (least square fit) observada in situ y satélite las TSMs más las TSMs simuladas por la cala de hielo marino desde 1985 hasta el 2006. Fuente H. Demarcq, com. pers. (b) anomalía de la TSM global desde 1880 hasta el 2007. Adaptado de F. Chavez.

El efecto de la intensificación de la surgencia es más claro en la productividad, con un fuerte aumento de clorofila durante las últimas décadas (Figuras 8 y 9).

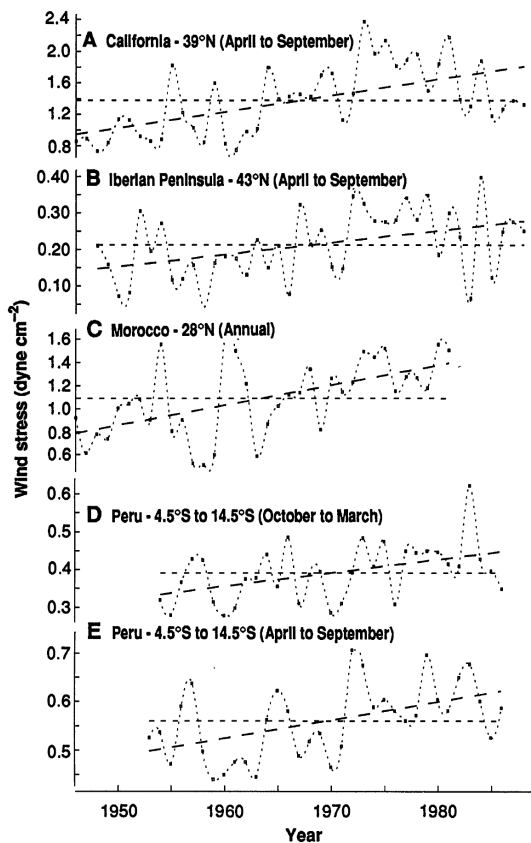


Figura 6. Promedio de los estimados mensuales de la tensión del viento a lo largo de la costa de California, en un año (A), la península Ibérica (B), Marruecos (C), y Perú (D y E) (En D, cada valor medio desde octubre a marzo es asignado al año en el que cae la porción de enero a marzo). Los guiones pequeños indican la media a largo plazo de cada serie. Los guiones más grandes indican la tendencia lineal por el método de cuadrados mínimos. Fuente Bakun (1009)

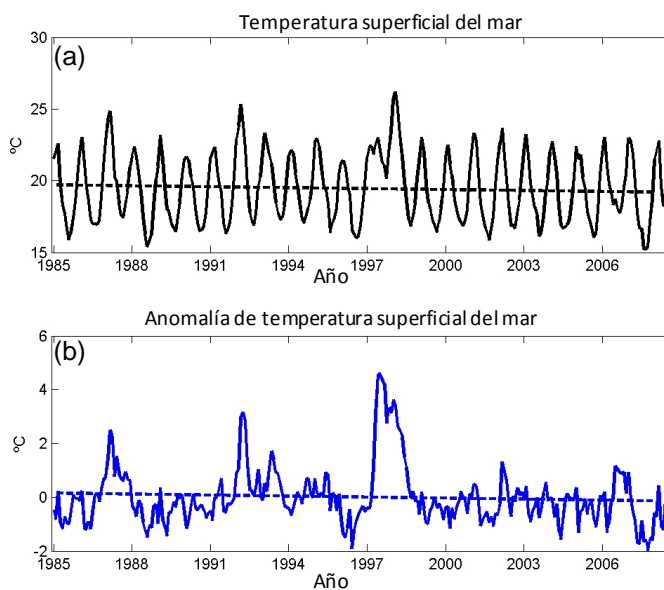


Figura 7. Evolución temporal de (a) Temperatura de la Superficie Marina (TSM) y (b) las anomalías de la TSM en el Sistema de la Corriente de Humboldt del norte (8°S-180°S; desde la costa hasta 100 mm de la costa oceánica) desde la información satelital del AVHRR. Las anomalías de la STM son calculadas relativamente a un ciclo estacional. Sobrepuestas a las escalas estacionales e interanuales, ambas curvas muestran una significativa tendencia negativa lineal a largo plazo (líneas punteadas) entre 1985 y 2007. Fuente: Alexis Chaigneau com. pers.

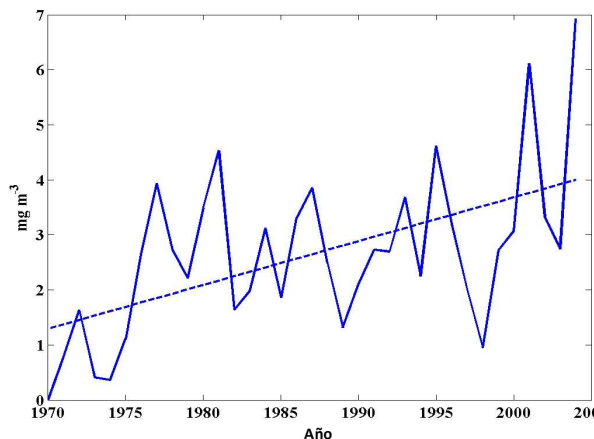


Figura 8. Tendencia temporal (promedio anual) en la concentración de clorofila en la superficie estimada desde las mediciones in situ realizadas por el IMARPE desde 1970-2005. Fuente: IMARPE

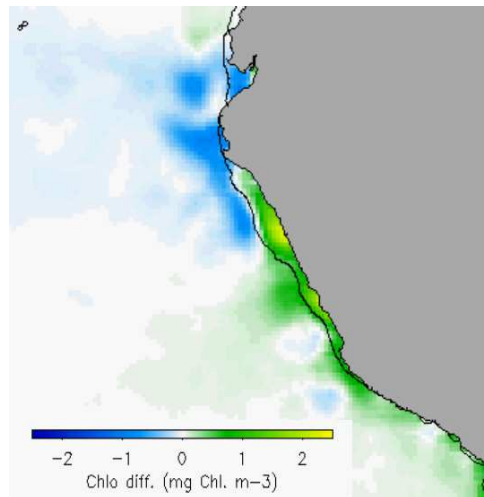


Figura 9: Tendencias espaciales de la concentración de clorofila en la superficie como se observó en la información de SeaWiFS desde 1998 hasta 2007 en la región peruana. Fuente: Demarcq, 2009.

En el ecosistema de surgencia peruano, la red alimentaria costera es dominada por fitoplancton grande, típicamente diatomeas céntricas coloniales, que apoyan una red alimentaria con zooplancton grande (por ejemplo copépodos y eufausidos) que son consumidos por peces pelágicos pequeños y medianos. Durante los periodos fríos, este ecosistema ocupa un área relativamente larga (~ 200 km de extensión oceánica) y existe una separación espacio temporal de fuentes (nutrientes, fitoplancton) y pozos (fitoplancton, zooplancton). Un ecosistema “oceánico” es encontrado en el mar abierto y es dominado por el pico fitoplancton, cuyos alimentos son protistas, con índices de crecimiento similar lo que crea un sistema de reciclajes eficiente. Una red alimentaria compleja se desarrolla con una pequeña proporción de la producción primaria, alcanzando niveles tróficos superiores. Durante los años cálidos, el área productiva es reducida y el ecosistema oceánico afecta la costa. En el reducido hábitat productivo, las separaciones son menos evidentes. En este escenario, las condiciones cálidas se tornan en una productividad reducida.

Tal como afirman los estudios paleo, la productividad total del sistema se incrementó desde el final de la pequeña edad de hielo en 1820. Un aspecto clave es que el desarrollo de las pesqueras industriales tuvo lugar durante un periodo de máxima productividad pesquera con respecto a los últimos 700 años. Para interpretar las tendencias en la pesca (Figura 10) es importante tener en consideración el curso inherente a tal información (ver Bertrand et al., 2004 para la pesca pelágica en el Perú). Por ejemplo, el incremento dramático en las pescas de anchovetas observadas a finales de los 50's – inicios de los 60's ilustra el desarrollo de la pesca comercial y no un cambio actual en la biomasa. De todas formas, la pesca comercial total (Figura 10) es alta desde el desarrollo de la pesca comercial, aún si se observa alzas y bajas, son observadas por la mayoría de especies debido a una combinación de pesca y factores ambientales (Chavez et al., 2003; Alheit and Ñiquen, 2004; Bertrand et al., 2004, 2008; Guevara-Carrasco & Leonart, 2008; Gutiérrez et al., 2007; Chavez et al., 2008; Swartzman et al., 2008).

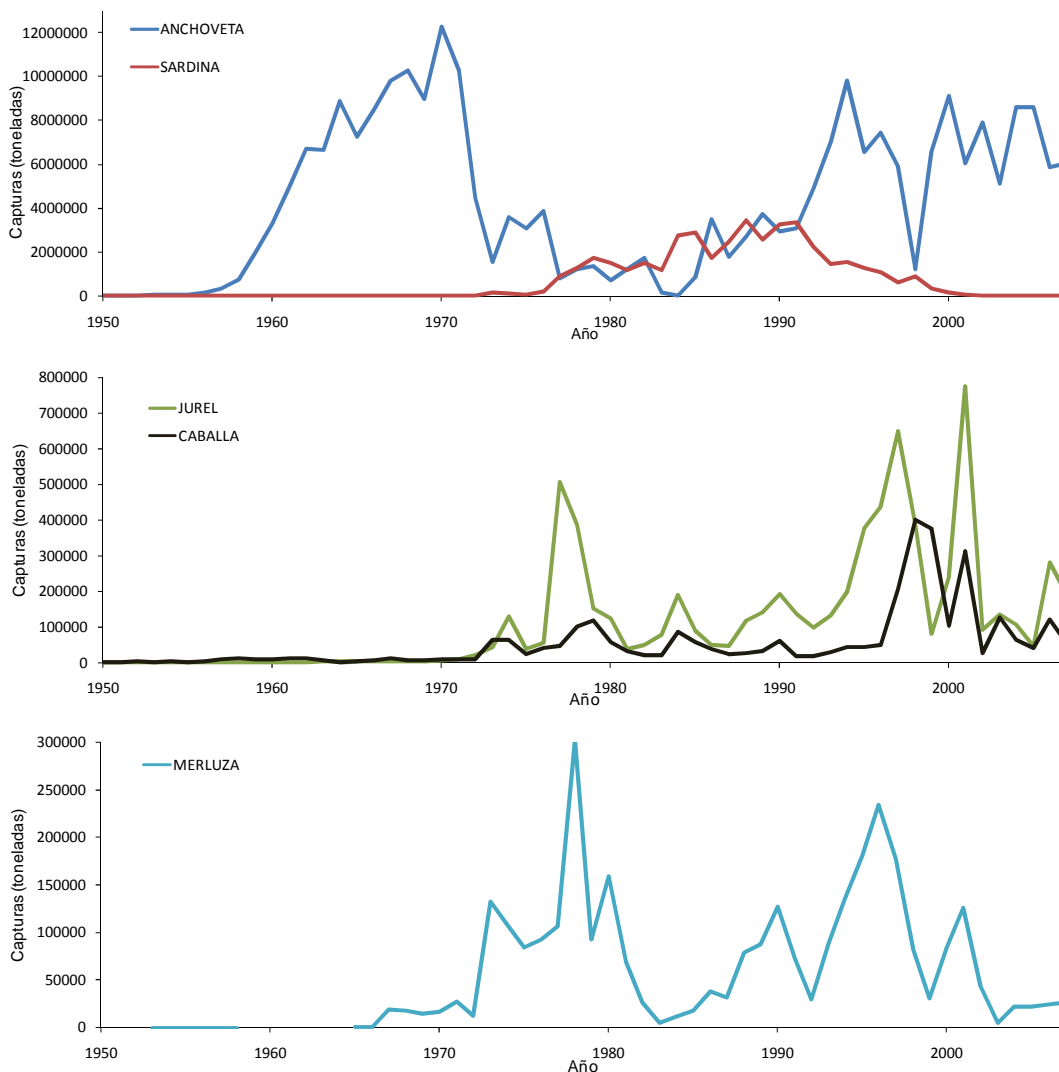


Figura 10. Series temporales de las pesca comercial para la anchoveta peruana (*Engraulis ringens*), la sardina (*Sardinops sagax*), el jurel (*Trachurus murphyi*), la caballa (*Scomber japonicus*) y la merluza (*Merluccius gayi peruanus*).

5. MIRANDO HACIA UN FUTURO INCIERTO

5.1 Escenarios contrarios

Tal como lo sintetizaron Fréon et al. (2009), se espera que un clima cálido resulte en varios cambios importantes que pueden impactar directamente la productividad biológica: (i) patrones de viento e intensidades pueden ser considerablemente modificadas (e.g. Bakun, 1990; Snyder et al., 2003; Vecchi et al., 2006), impactando la fuerza de la corriente oceánica, niveles de turbulencia, mezcla, y la frecuencia y magnitud de ocurrencias de fenómenos como el de los eventos de El Niño (Cane, 2005; Hansen et al., 2006); (ii) la estratificación en las capas superficiales puede aumentar con el calentamiento de la superficie oceánica (e.g. McGowan et al., 2003) lo que debe disminuir, tanto el mezclado vertical de nutrientes en la zona eufórica, como los efectos fertilizadores del mezclado y de la surgencia (Behrenfeld et al., 2006); (iii) los cambios en la precipitación junto con los cambios en el viento pueden

alterar el transporte de polvo, y por lo tanto la entrega de hierro y otros micronutrientes a los océanos (ej. Jickells et al., 2005; McTainsh and Strong, 2006; Tagliabue et al., 2008). En particular, Tagliabue et al. (2008) utilizaron un modelo de circulación general global, junto con un modelo de ecosistema limitado por macro nutrientes y hierro, y mostraron que los cambios en la circulación atmosférica y la entrada de polvo podrían inducir una disminución de ~30% en la producción primaria en el SCH del norte, así como una disminución en desnitrificación en las aguas de la sub superficie. Hoy en día no existen predicciones científicas específicas a la escala del ecosistema de la región norte del SCH. Los avances científicos a nivel global o de las zonas de surgencia costera en general, no permiten llegar a un consenso en el efecto del cambio climático en las dinámicas de la región norte del SCH. Con el fin de sintetizar el conocimiento actual, en base a las teorías generales y al conocimiento local actual, en este informe proponemos dos escenarios 'extremos' más un escenario 'mixto'.

5.2 Escenario 1: intensificación de la surgencia

Los lados orientales de los océanos se caracterizan por atmósferas más áridas que las de los lados occidentales. Debido a que el gas invernadero más importante en la atmósfera de la tierra es el vapor de agua, las regiones del borde este del océano tienden, naturalmente, a experimentar un efecto invernadero más reducido. Consecuentemente, el enfriamiento local nocturno es rápido y eficiente. Esto tiende a relajar las células de baja presión térmica que se han construido en la zona continental costera durante el día (Bakun & Weeks, 2008). Sin embargo, como el contenido atmosférico en gases de efecto invernadero (vapor de agua, dióxido de carbono, metano, óxidos de nitrógeno, ozono, y clorofluorocarbonos) aumenta, el enfriamiento radiactivo nocturno será cada vez más reducido (Bakun, 1990). Esto puede conducir a una intensificación de la tensión del viento a lo largo de la costa en la superficie del océano, luego a una aceleración de la surgencia costera (Figura 11). Como retroacción positiva, el enfriamiento resultante del océano podría intensificar localmente la baja altitud barométrica de los lados oceánicos de las gradientes de presión costa-mar abierta. Evidencias de varias regiones sugieren que, en los principales sistemas de surgencia costera del mundo (California, Canary, Benguela, y el SCH) la intensidad de surgencia ha crecido mientras los gases de efecto invernadero se han acumulado en la atmósfera de la tierra. La información disponible basada en los registros paleo o incluso instrumental (Ej. Jahncke, 2004) indican que la intensidad del viento costero y la productividad han efectivamente aumentado en el SCH durante las últimas décadas (ver también la sección 4).

La intensificación de la surgencia y de la productividad relacionada deben favorecer a especies como la anchoveta, cuya abundancia es relativa a la extensión oceánica de las aguas costeras ricas y frías, originadas por la surgencia (Bertrand et al., 2004, 2008; Swartzman et al., 2008). Sin embargo, los efectos de la intensificación de la surgencia en el ecosistema oceánico son potencialmente dramáticos (Tablas 1 y 2). Se pueden mencionar, por lo menos dos efectos potencialmente negativos.

Primero, aumentar en la producción primaria no promueve necesariamente el éxito de la reproductividad y crecimiento de las poblaciones de las principales especies comerciales, en particular si la turbulencia vertical inducida por vientos fuertes impide el mantenimiento de los micro-parches de presas que son esenciales para la supervivencia larval (Cury & Roy, 1989). Las anchovetas y otras poblaciones pueden, por lo tanto, ser impactadas de manera negativa por una surgencia demasiado fuerte asociada a una fuerte turbulencia vertical. Además, se espera que la extensión oceánica de las aguas costeras frías empuje más lejos de la costa a las especies

pelágicas que son blancos de la pesca artesanal y comercial, tal como el atún (principalmente *Thunnus albacares*), el jurel la caballa o el perico (*Coryphaena hippurus*).

Segundo, la producción orgánica aumentada podría intensificar la ZMO y reducir el hábitat de la mayoría de recursos vivientes, en particular todos los peces demersales que son importantes para la pesca artesanal. Hoy en día, la parte superior de la ZMO puede ser tan superficial como 10 m (Bertrand et al., 2008), cualquier intensificación de la ZMO podría transformar la región norte del SCH en un lugar inapropiado para la mayoría de recursos, excepto por el calamar gigante o pota (*Dosidicus gigas*). Sin embargo, este efecto podría ser apagado puesto que el incremento de la turbulencia inducida por el viento también podría aumentar la ventilación de la capa superior de la columna de agua, llevándolo a un hundimiento de la capa de mezcla oxigenada superficial.

De manera más general, la intensificación de la surgencia probablemente impactará en los ecosistemas terrestres y oceánicos. La 'triada de Bakun' (Bakun, 1996) proporciona un marco teórico para interpretar como los cambios en la hidrodinámica de la surgencia podrían afectar el éxito reproductivo en los ecosistemas oceánicos. Según la triada, los tres componentes del éxito del reclutamiento de los peces en un ecosistema marino son (1) enriquecimiento de las aguas con fuentes alimenticias aportadas por la surgencia, (2) concentración de alimentos en cantidades suficientes para mantener a la población, y (3) retención de los organismos y de las fuentes alimenticias en la misma área. La intensificación de la surgencia debe favorecer el enriquecimiento, lo cual debería beneficiar a los organismos. Sin embargo, tanto la concentración como la retención pueden disminuir debido a un incremento de la turbulencia y del transporte hacia mar afuera de las aguas superficiales. En conjunto, esto podría tener un efecto negativo en los ecosistemas oceánicos (inferior a un orden de magnitud), puesto que el balance actual de estos tres factores claves será modificado si ocurren cambios en la surgencia.

También, existe un consenso emergente que la termoclina se hundirá en el Pacífico Ecuatorial. Este debido a una reducción de la circulación Walker (ver sección 5.3 para más detalles). De este modo, en una fase posterior, el contenido de nutriente de las aguas de surgencia podría disminuir, y por ende la productividad de las aguas superficiales, aún si la surgencia costera producida por el viento se mantiene bastante intensa.

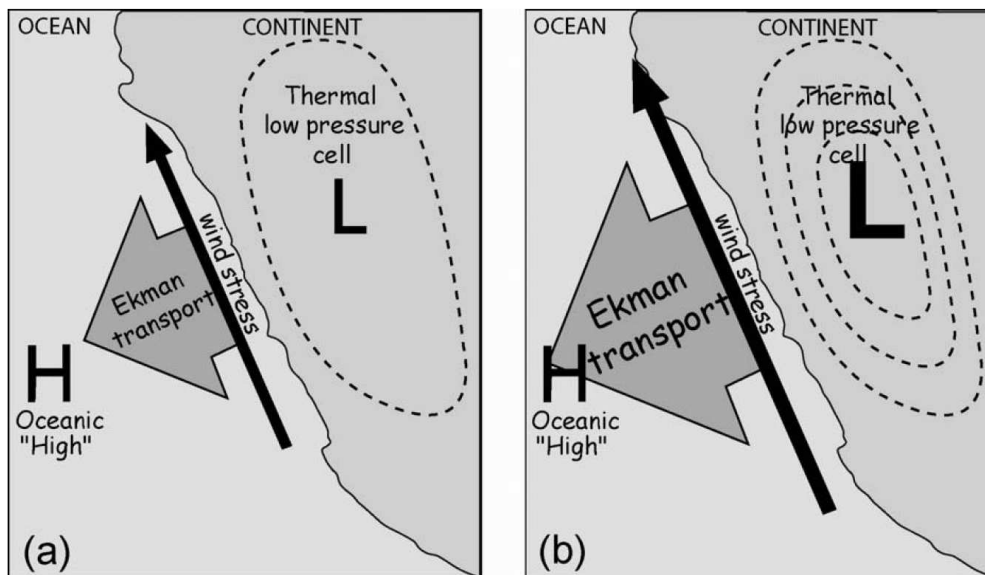


Figure 11. Diagrama del mecanismo de intensificación de surgencia: (a) una célula 'térmica' de baja presión se construye sobre la masa continental costera debido al calentamiento de la superficie continental relativa al calentamiento más lento del océano, provocando un viento geostrófico hacia el ecuador en la superficie oceánica que, sucesivamente, provoca un transporte de Ekman del agua superficial con dirección al océano lo que induce la surgencia de aguas más profundas para reemplazar las aguas superficiales transportadas; (b) la acumulación de los gases invernadero en la atmósfera inhibe el enfriamiento nocturno de las tierras costeras calentadas, lo que aumenta la intensidad promedio de la célula de baja presión costera y los vientos favorables a la surgencia, los cuales en términos conduce cuadráticos (o mayores) aumentos en el transporte de las aguas oceánicas superficiales y de la surgencia resultante. Fuente: Bakun & Weeks (2008).

5.3 Escenario 2: reducción de la surgencia

Una teoría emergente en los estudios del cambio climático, basados en modelos globales, es que la circulación Walker del Pacífico Ecuatorial disminuye y esto debilitará el sistema de los vientos alisios del Pacífico (Vecchi et al., 2006; Vecchi & Soden, 2007). Esta disminución debe tener dos efectos: primero, como los vientos alisios con dirección al oeste a lo largo del Ecuador son conocidos por mantener la pendiente de la termoclina en el océano ecuatorial, y particularmente en el Pacífico este, la disminución de los vientos alisios podría allanar la termoclina (como ocurre durante los eventos El Niño) y por ende aumentar la TSM en el Pacífico Ecuatorial Este y probablemente la del Perú. Segundo, la disminución de la circulación de Walker podría tener un efecto local al disminuir los vientos costeros (lo cual aún no se ha observado en la actualidad), aún cuando la conexión entre los vientos costeros del Perú y los vientos ecuatoriales en el Pacífico Este aún no estén claros.

Recientes experimentos de alta resolución (*statistical downscaling*) utilizando el modelo acoplado IPSL-CM4, uno de los más realista en la región Pacífico Este, en términos de estado oceánico medio y de las dinámicas ENSO (Belmadani et al., en prensa), muestran que los vientos a lo largo de la costa en una banda costera peruana de 0.5° de ancho disminuyen levemente de las condiciones climáticas pre industriales a 4xCO₂ (Goubanova et al., in prep.). Esta reducción de intensidad, en el viento costero, está asociada a la disminución en la circulación de Walker. Esta disminución también fue confirmada por los experimentos del modelo atmosférico regional (F. Codron, pers. com.) utilizando el modelo global IPSL-CM4 como condiciones de borde.

Por lo menos en este modelo acoplado, la disminución en la circulación de Walker es consistente con una disminución en los vientos costeros. Sin embargo, como la conexión entre los vientos costeros del Perú y los vientos ecuatoriales en el Pacífico Este no está bien comprendida, se necesitan otros futuros estudios (en particular con modelos acoplados océano-atmósfera de alta resolución) para confirmar estos resultados, que claramente ponen en cuestionamiento el pronóstico de la hipótesis de Bakun, para la intensificación de los vientos a lo largo de la costa.

El escenario 2 puede sintetizarse de la siguiente manera:

- Disminución en la circulación de Walker (Vecchi & Soden, 2007);
- Hundimiento de la termoclina en la región Pacífico Este, una situación que se parece a las condiciones del tipo El Niño permanente (Vecchi & Soden, 2007);
- Disminución en la intensidad de los vientos costeros;
- Disminución en la intensidad de la surgencia;
- Aumento en la TSM, debido tanto a una termoclina más profunda, como a la disminución de la intensidad de surgencia.

Bajo este escenario, las especies favorecidas por condiciones del tipo El Niño como el atún, el perico, la mayoría de los recursos demersales y los moluscos (por ejemplo la concha de abanico) serán favorecidas (incremento inferior a un orden de magnitud), mientras que la población de anchoveta colapsará (disminución probablemente superior a un orden de magnitud). Las especies pelágicas como la sardina o el jurel podrían ser favorecidas en un primer periodo, pero luego serán afectadas por la baja productividad del sistema (Tablas 1 y 2).

5.4 Escenario 3: efectos mixtos

Un tercer escenario combina las dos teorías anteriores. El principal flujo de viento favorable a la surgencia en el Perú se separa desde la Costa Sudamericana para fusionarse directamente en el sistema de vientos alisios al sureste del Pacífico casi inmediatamente después de salir de la zona en surgencia del Perú. Obviamente, en el caso de (1) un aumento de vientos favorables a la surgencia y (2) una disminución en los vientos alisios ecuatoriales de acuerdo a las proyecciones de gran escala de los modelos climáticos, hace falta una teoría para conectar los dos sistemas regionales. Sin lugar a dudas, cuando la información histórica de yuxtaposición de los vientos favorables en surgencia y del Índice de Oscilación del Sur (IOS), el cual es un índice de la fuerza de los vientos alisios del Pacífico, ocurre una disyunción entre las dos regiones, en particular durante los eventos cálidos El Niño (Bakun & Weeks, 2008).

Un tercer escenario es de este modo propuesto, basándose en (1) la hipótesis de una disminución de los vientos alisios ecuatoriales, lo cual induciría a una disminución en los vientos a lo largo de la costa en la región oceánica (~200 nm de la costa) y (2) un aumento en los vientos costeros cercanos a la costa, siguiendo la hipótesis de Bakun. Este escenario induce una disminución en la variación *cross-shore* de los vientos favorables a la surgencia, lo que debe reducir o incluso invertir (*downwelling*) las velocidades verticales debido al bombeo de Ekman (Figura 12). La situación conduciría a una surgencia costera más intensa y a una surgencia oceánica menos intensa o virtualmente ausente. Esto podría modificar la pendiente de la termoclina/nutriclina cerca de la costa, con una termoclina oceánica allanada, y una

termoclina más empinada cerca de la costa (Figura 12). Además, el transporte hacia mar afuera de las aguas superficiales (advección) podría ser reducido, favoreciendo aun mas la retención de huevos y larvas sobre la plataforma continental (Fréon et al., 2009).

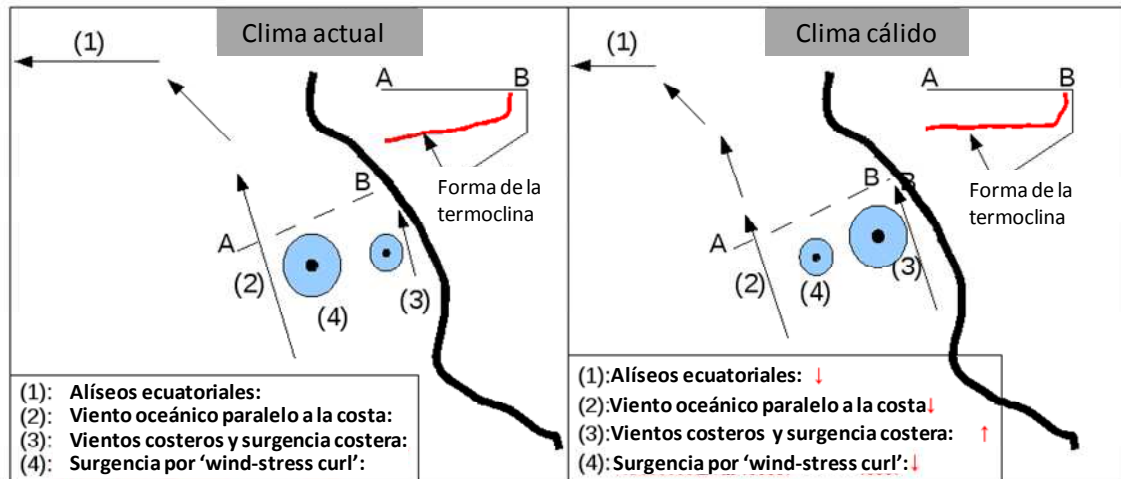


Figura 12. Tercer escenario conceptual (los procesos dinámicos que vinculan los vientos en la región ecuatorial y cerca de la costa no están claros). La forma de la termoclina en un plan perpendicular a la costa está representada en la esquina derecha superior de las figuras.

Mientras tanto, la relajación de los vientos alisios ecuatoriales también debe reducir la pendiente zonal de la termoclina/nutriclina a lo largo del Océano Pacífico ecuatorial, y desde ahí profundizar la termoclina/nutriclina en el Pacífico Este, como se describe en el escenario (2). De este modo, la surgencia costera esperada en el Perú podría tener menos efecto en la temperatura y productividad que en el escenario (1), pero aún incluyendo más productividad que el escenario (2) ya que la capa de mezcla costera será más profunda en el escenario (3). Por lo tanto, los efectos combinados de los diferentes procesos podrían mitigar uno a otro en este escenario (cambios inferiores a un orden de magnitud).

Bajo este escenario, las especies oceánicas (atún, jurel, perico, caballa) serán desfavorecidas aunque mas accesible por ser mas de la costa, mientras que las población especies costeras, pelágicas (anchoveta en particular), demersales o bénticas, podrían ser favorecidas.

5.5 Impacto del cambio climático en los eventos ENSO

Cualesquiera que fuese el escenario que ocurra, a una escala interanual, en el SCH, los eventos ENSO juegan un rol clave en las dinámicas climáticas, oceánicas y de los ecosistemas. En el periodo actual, los eventos ENSO ocurren como una perturbación de un estado medio en el que la surgencia de agua fría conducida por los vientos, a través de un termoclina superficial en el Pacífico Ecuatorial Este (PEE) sostiene una gradiente de temperatura oceánica y de presión atmosférica asociada entre el Pacífico tropical este y oeste. Esta gradiente de presión controla la fuerza de la circulación de Walker, reforzando la surgencia de agua fría en el PEE (retroacción de Bjerknes). Los eventos El Niño usualmente inician con anomalías del viento, seguidas por una

anomalía de calentamiento del océano superficial en el Pacífico ecuatorial central que se propaga hacia el este.

Como lo mencionaron Manganello & Huang (2009), existen fuertes sesgos sistemáticos en los modelos acoplados atmósfera-océano, los cuales pueden afectar las dinámicas ENSO. Los modelos atmosféricos y los modelos acoplados atmósfera-océano muestran sesgos persistentes de más 5-6°C, a lo largo de la costa de Sudamérica. En el Sistema de predicción del Clima 'NCEP', un modelo totalmente acoplado de predicción estacional de la dinámica océano-tierra-atmósfera (Saha et al., 2006), el sesgo cálido es de 2-3°C en el área. Este nivel de error sistemático es comparable a las variaciones del clima que el sistema acoplado pretende predecir, como por ejemplo los ENSO, lo que podría, por lo tanto distorsionar considerablemente las señales pronosticadas (Ej. Hu & Huang, 2007). Cuando se quita artificialmente el sesgo la predicción del ENSO mejora significativamente (Manganello & Huang, 2009).

Tomando como base la disminución de los vientos alisios hacia el occidente (Vecchi et al., 2006) y una acumulación de calor en el Pacífico ecuatorial, se puede suponer un cambio desde el estado promedio actual hacia un régimen persistente del tipo El Niño, con una termoclina allanada en un mundo caliente. Las teleconexiones conducidas por la 'piscina caliente' (*warm pool*) del Pacífico ecuatorial occidental (WEP) o por los regímenes de subducción en las latitudes medias podrían conducir a un hundimiento permanente de la termoclina en el EEP, sellando la lengüeta de agua fría cerca de la costa Sudamericana. Como resultado, se podría establecer un estado promedio, persistente de tipo El Niño con aguas superficiales cálidas en la EEP y una circulación Walker disminuida. Una teoría contradictoria postula que, condiciones de tipo La Niña sostenidas podrían ocurrir bajo condiciones del calentamiento global debido a, en particular, un aumento de retroacción de Bjerknees a partir de un calentamiento más fuerte de la WEP que el de la EPP (Cane et al., 1997; Bakun & Weeks, 2008).

En términos de la variabilidad interanual del ENSO hasta ahora no existe un consenso de porqué los cambios en la frecuencia y la amplitud de los eventos difiere considerablemente de un modelo a otro (Figura 13; Yamaguchi and Noda, 2006). Los resultados del IPCC-WG1-2007 (Meehl et al., 2007 - <http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/wg1-report.html>) indican que todos los modelos muestran la continuación de la variabilidad interanual ENSO en el futuro. Sin embargo, los cambios en la variabilidad interanual ENSO difieren de un modelo a otro. Basándose en varias salidas de los modelos actuales que simulan mucho mejor los eventos de El Niño actuales que en el Informe de la Tercera Evaluación del IPCC (<http://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/vol4/english/index.htm>), no existe indicación consistente, en este momento, de cambios perceptibles en la amplitud o frecuencia proyectada de los ENSO en el siglo 21.

Por otro lado, la evidencia paleoclimática del Plioceno temprano, que es el episodio más reciente con un clima más cálido que hoy, es hasta ahora no concluyente, con un estudio que sostenga las condiciones persistentes de tipo El Niño (Wara et al., 2005), y otro estudio que indique un régimen de tipo La Niña (Rickaby & Halloran, 2005).

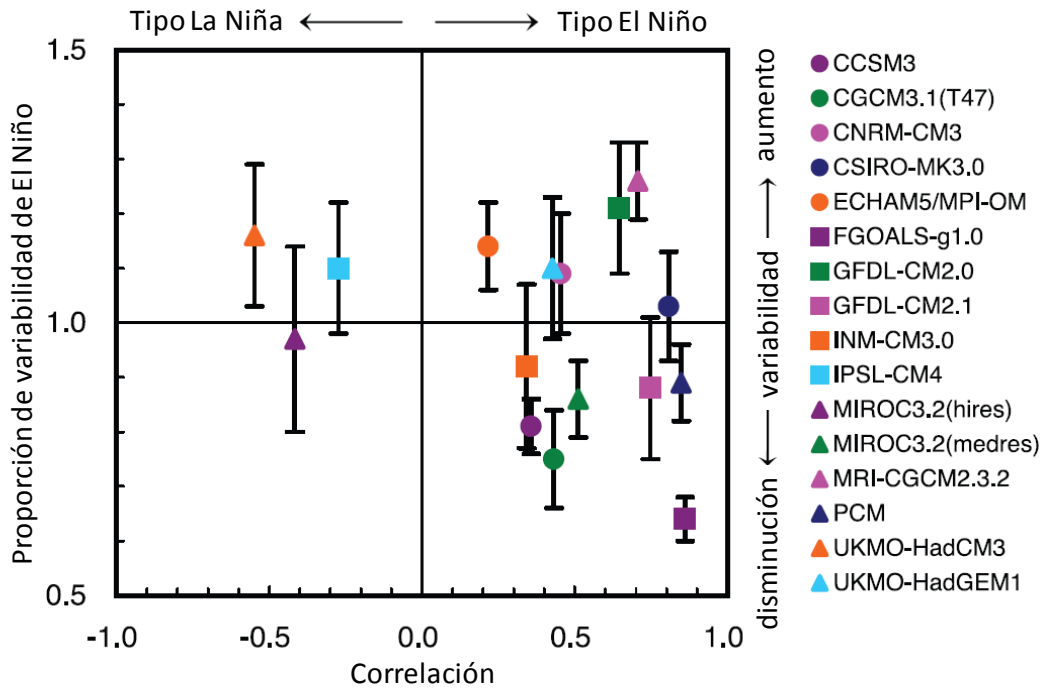


Figura 13. Cambio de estado base de la TSM promedio del Pacífico tropical y cambio en la variabilidad de El Niño simulada por los Modelos de Circulación General Océano-Atmósfera. Este estado base (eje horizontal) es indicado por el coeficiente de correlación del patrón de anomalía espacial entre la tendencia lineal de la TSM en el experimento de cambio climático de aumento de $1\% \text{ yr}^{-1} \text{ CO}_2$; y la primera Función Empírica Ortogonal (EOF) de la TSM en el experimento de control en el área de 10°S a 10°N , 120°E a 80°O (reproducido de Yamaguchi and Noda, 2006). Los valores de correlación positiva indican que el cambio climático promedio tiene un patrón de tipo El Niño y los valores negativos son de tipo La Niña. El cambio en la variabilidad de los eventos El Niño (eje vertical) es indicado por el radio de desviación estándar del primer EOF de presión a nivel del mar (PNM) entre el clima actual y los últimos 50 años de los experimentos. La barra de error indica el intervalo de confianza al 95%. Notar que el cambio de estado de base del Pacífico tropical con patrones ya sea parecido a El Niño o parecido a La Niña no son permanentes con los eventos de El Niño o La Niña, y todo aún tienen una variabilidad interanual ENSO superpuesta en ese estado de clima promedio en un futuro clima más cálido. Fuente: Meehl et al. (2007).

5.6 Hasta ahora, ausencia de consenso

En este documento, sólo se han descrito parte de los mecanismos implicados en las relaciones océano-atmósfera y sus efectos en el ecosistema oceánico. Fréon et al. (2009) proponen un esquema que resume como los forzantes físicos y el efecto 'bottom-up' podrían afectar el funcionamiento del ecosistema y de las dinámicas de las poblaciones de peces (Figura 14). Tal esquema está lejos de representar todas las interacciones y procesos involucrados. Esto ilustra la complejidad del sistema, la dificultad para describir y modelar los procesos; y nuestra actual dificultad para determinar cuáles de los escenarios tiene más probabilidades de ocurrir. Varios proyectos científicos (por ejemplo "Peru Ecosystem Projection Scenarios" financiado por la Agencia nacional francesa) se están realizando y se espera que dentro de algunos años se tengan disponibilidad de escenarios más precisos y sólidos.

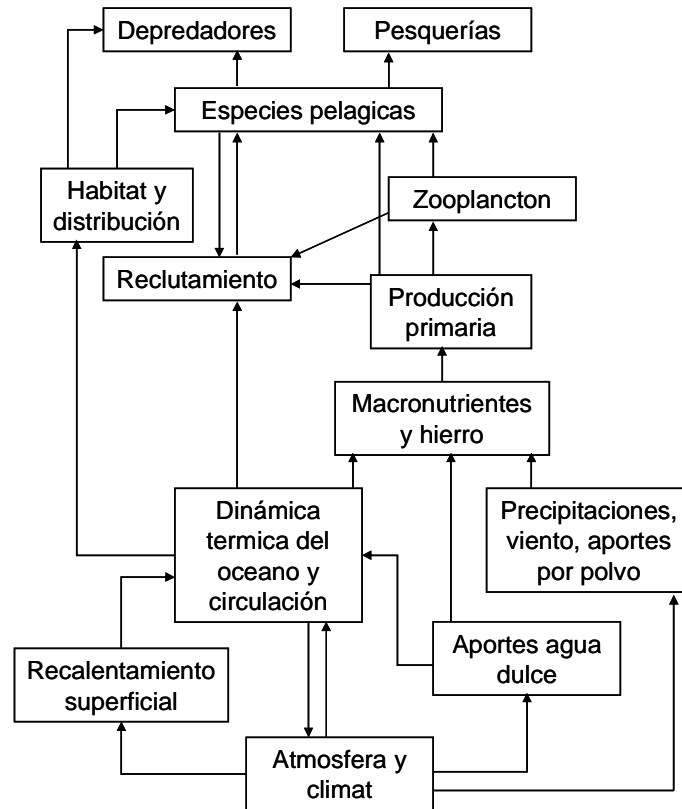


Figura 14. Descripción simplificada de cómo los forzantes físicos y los efectos descendentes-ascendentes podrían afectar el funcionamiento del ecosistema y las dinámicas de la población de peces. Los forzadores atmosféricos pueden alterar el calentamiento, los flujos de agua fresca y los vientos que pueden modificar directamente las dinámicas oceánicas y la circulación termal. Por dinámicas termales nos referimos a cambios horizontales (por ejemplo El Niño, PDO) o verticales (profundidad de la capa de mezcla) en la distribución del calor. Los cambios en la circulación oceánica incluyen las ramas de los giros polares y subtropicales, incluyendo fuerza y ubicación. Estos cambios afectan las poblaciones de peces en por lo menos cuatro formas (1) al cambiar el suministro de nutrientes y consecuentemente todos los componentes productivos del ecosistema – los forzadores clásicos bottom-up; (2) al físicamente (por ejemplo procesos de mezcla y advección) afectar los procesos de reclutamiento de los peces (la triada de Bakun); (3) por modificación física del hábitat de los adultos, resultando en cambios en la distribución; y (4) en la modificación física del hábitat de los adultos ya sea restringiendo o permitiendo un mayor acceso de los depredadores. La multiplicidad de los efectos físicos en las poblaciones de peces complica futuras predicciones como lo hace la retroacción océano-clima. Además, los vínculos entre los sistemas biológicos y físicos son decididamente no lineales. Fuente: Fréon et al. (2009).

6. TABLAS SINTÉTICAS DEL PROBABLE EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA FÍSICA Y EN LOS RECURSOS

El efecto probable del cambio climático en los recursos esta presentada en las Tablas 1, 2 y 3 en términos de tendencias y no de cifras precisas porque hoy en día no se puede cuantificar los cambios de manera confiable. En estas Tablas sólo se consideran los escenarios 1 y 2. Para cada parámetro se propone un valor histórico promedio así como su actual tendencia estimada en las dos últimas décadas (una ↑ indica una tendencia de crecimiento, una ↓ indica una tendencia de reducción y ↔ indica estabilidad para el parámetro considerado). Luego, para cada escenario, se indica el impacto potencial del cambio climático, de ahora a ~2060. Este plazo temporal está dividido en dos periodos de casi 25 años para los parámetros físico (Tabla 1) y 3 periodos de aproximadamente 15-20 años para los recursos (Tablas 2 y 3). Cabe insistir en que las predicciones quedan muy inciertas, dado la complejidad de los procesos involucrados a la escala regional (Perú) y el nivel de conocimiento actual.

Cualquier sea el escenario, se espera que el cambio climático tenga un efecto globalmente negativo y marcado en los recursos, en particular los explotados por la pesca industrial (Tablas 2 y 3). Bajo el escenario 1 (intensificación de surgencia) la población de anchoveta podría quedar en buen estado en un futuro próximo permitiendo altas capturas antes de caer. Los demás recursos (con la excepción de la pota) podrían ser mucho más afectados. Bajo el escenario 2 (disminución de surgencia) se espera una caída rápida de la población de anchoveta probablemente superior a un orden de magnitud. Sin embargo otros recursos, en particular los explotados por la pesquería artesanal (excepto la pota) podrían ver sus abundancias aumentar de manera significativa.

Tabla 1. Proyección del probable cambio en parámetros físicos y biogeoquímicos para los escenarios 1 y 2 (2010-2060)

Variable	Valor histórico promedio	Tendencia actual	Escenario 1 (mayor surgencia)		Escenario 2 (menor surgencia)	
			Periodo 1	Periodo 2	Periodo 1	Periodo 2
Temperatura superficial del mar <180 km de la costa)	18.6°C ¹	↓	↓	↑	↑	↑
Temperatura superficial del mar entre 180 y 360 nmi de la costa	20.5°C ²	↑	↑	↑	↑	↑
Profundidad Termoclina/oxyclina	~25 m ³	↓	↓	↔	↑	↑
Turbulencia Vertical	No disponible	↑	↑	↑	↓	↓
Clorofila-a <180 km de la costa	⁴ : 3.1 µg m ⁻³	↑	↑	↑	↓	↓
Bio-volumen del zooplancton	~0.6 mL.m ⁻³⁵	↑	↑	↓	↓	↓

1 Fuente: National Oceanographic Data Center

2 Fuente : National Oceanographic Data Center

3 Fuente: Dewitte et al. (2008), for thermocline

4 Fuente: Echevin et al. (2008)

5 Fuente: Ayón et al. (2004), las muestras de Zooplancton fueron tomadas con redes Hensen de 0.33-m2 mouth area and 300-mm malla, por redadas verticales entre 50 y 0 m. Periodo: 1964-2002.

Tabla 2. Situación y tendencias actuales y escenarios de cambios probables en las biomásas de los recursos marinos para los escenarios 1 and 2 (2010-2060).

Recurso	Valor histórico anual promedio	Tendencia actual	Escenario 1 (mayor surgencia)			Escenario 2 (menor surgencia)		
			Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3
Anchoveta	10 Mt ⁶	↑	↔	↔	↓	↓	↓	↓
Sardina	2.5 Mt	↓	↓	↔	↔	↑	↔	↔
Jurel	2 Mt	↓	↓	↔	↔	↑	↔	↔
Atún	Nd ⁷	↓	↓	↔	↔	↑	↔	↔
Pota	200 000 t	↑	↑	↔	↔	↑	↓	↓
Merluza	200 000 t	↓	↓	↓	↓	↑	↑	↔
Otros demersales	Nd	↓	↓	↓	↓	↑	↑	↔
Molluscos	Nd	↓	↓	↔	↔	↑	↑	↔

Tabla 3. Situación y tendencias actuales y escenarios de cambios probables en las capturas anuales de los recursos marinos para los escenarios 1 and 2 (2010-2060).

Recursos	Valor histórico anual promedio	Tendencia actual	Escenario 1 (mayor surgencia)			Escenario 2 (menor surgencia)		
			Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3
Anchoveta	5.1 Mt ⁸	↑	↔	↔	↓	↓	↓	↓
Sardina	0.9 Mt ⁹	↓	↓	↔	↔	↑	↔	↔
Jurel	0.14 Mt ¹⁰	↓	↓	↔	↔	↑	↔	↔
Atún	37000 t ¹¹	↔	↓	↔	↔	↑	↑	↔
Pota	64000 t ¹²	↑	↑	↔	↔	↓	↓	↓
Merluza	80000 t ¹³	↓	↓	↓	↓	↑	↑	↔
Otros demersales	70000 t ¹⁴	↓	↓	↓	↓	↑	↑	↔
Molluscos	24000	↓	↓	↔	↔	↑	↑	↔

7. ASPECTOS SOCIO ECONÓMICOS

En esta sección se presentan la capacidad instalada del sector pesquero y en el procesamiento, la mano de obra, los desembarques y la producción, el consumo interno, las exportaciones/importaciones. En cada una de estas seis sub-secciones, se resume la evolución de las actividades pesqueras peruanas hasta el año 2008 a través de las estadísticas proporcionadas por PRODUCE, que son consideradas como oficiales del país. Los ingresos económicos y los precios provienen del sistema de información en línea del Banco Central de Reserva, y en algunos casos de datos de IMARPE. El anexo 1 presenta más detalles al respecto (metodología, interpretación y resultados adicionales). La sub-sección siguiente presenta la contribución del sector pesquero al Producto Bruto Interno (PBI) en función de lo anterior, de los precios y de la demanda. Las dos penúltimas sub-secciones indican los dos escenarios futuros por cada actividad, resumidos en tablas. Seguidamente, se sugieren medidas para limitar los impactos socio-económicos del cambio climático.

⁶ Millones de toneladas

⁷ No determinado

⁸ Periodo: 1960-2007

⁹ Periodo: 1960-2007

¹⁰ Periodo: 1960-2007

¹¹ Periodo: 1960-1999

¹² Periodo: 1990-2007

¹³ Periodo: 1970-2007

¹⁴ Periodo: 1960-1999

7.1. Capacidad instalada del sector pesquero

7.1.1. Flota pelágica

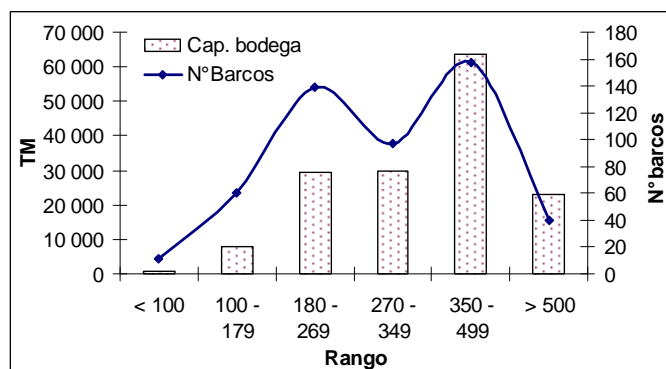


Figura 15. Capacidad de bodega y número de embarcaciones de cerco industrial (acero) con permiso vigente.

Las embarcaciones de cerco con casco de acero y con permiso de pesca son 504 al año 2009, las que tienen una capacidad de bodega acumulada de 154 380 TM (Figura 15; Tabla 1 del Anexo 1). El rango de capacidades de bodega se encuentra muy extendido (de 100 hasta más de 500 TM).

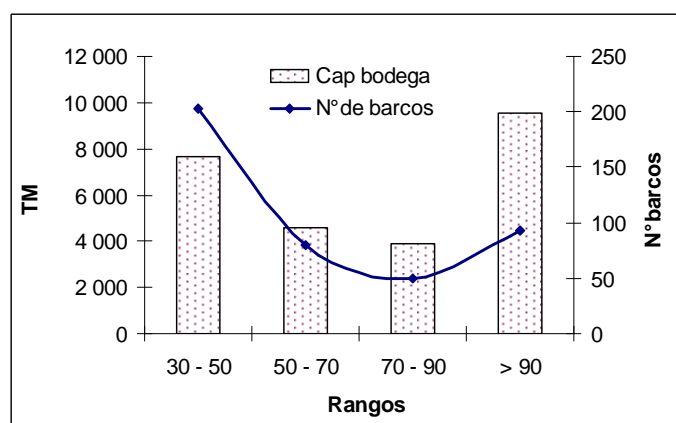


Figura 16. Capacidad de bodega y número de embarcaciones ley 26920 (madera o vikingas) con permiso vigente.

Son 426 las embarcaciones de madera (también llamadas de menor escala o 'vikingas') para la captura de anchoveta y producción de harina de pescado con permiso vigente las que cuentan con una capacidad de bodega acumulada de 25 696 TM. El rango de capacidad de bodega varía entre 30 y 100 TM (Figura 16).

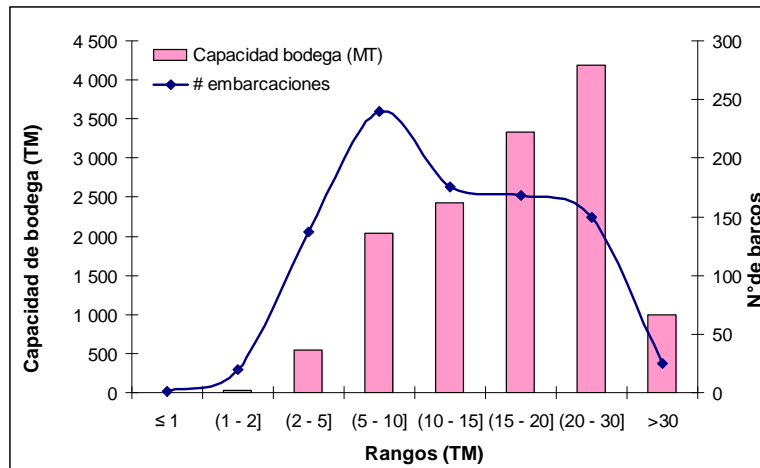


Figura 17. Capacidad de bodega y número de embarcaciones de cercos artesanales (encuesta estructural IMARPE 2009)

Son 915 las embarcaciones artesanales equipadas con aparejo de pesca de cerco, y que son usadas en principio para la captura de anchoveta destinada al consumo humano directo (CHD) e indirecto (CHI), y tienen una capacidad de bodega acumulada de 13 568 TM. El rango de capacidad de bodega varía entre 1 y 30 TM (Figura 17).

7.1.2. Flota demersal

Las embarcaciones de arrastre, para captura dirigida a merluza, con permiso vigente son 84 con 8 924 TM de capacidad de bodega acumulada (Tabla 1 del Anexo 1). El mayor número y la mayor capacidad de bodega esta en los rangos de más de 100 TM de capacidad de bodega (Figura 18).

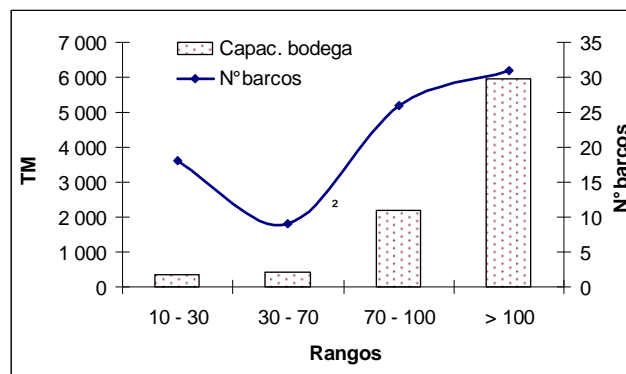


Figura 18. Capacidad de bodega y número de barcos de arrastre con permiso vigente.

7.1.3. Pesca artesanal (excluyendo cercos)

La pesquería artesanal peruana, al igual de otras pesquerías de este tipo en el mundo, se caracteriza por estructuras de explotación familiares o por lo menos con gran coherencia social, una gran variedad de artes de pesca, de modos de transporte al lugar de pesca (embarcaciones, vehículos terrestres, pesca a pie y recolectores de orilla), de formas de comercialización, y consecuentemente, de una gran capacidad de adaptación a los cambios. Esta flexibilidad del sector se manifiesta tanto frente a cambios climáticos de varias escalas, como a cambios en el mercado o en la legislación. Eso trae dos consecuencias importantes: 1) a condición de manejar adecuadamente los recursos, la pesca artesanal será, globalmente, la menos afectada por el cambio climático; 2) su tipo de respuesta al cambio es altamente imprevisible, pero en todos los casos se beneficiará a la mayor parte del sector, por la capacidad de

respuesta que han aprehendido luego de los dos últimos cambios dramáticos El Niño del 82-83 y 97-98.

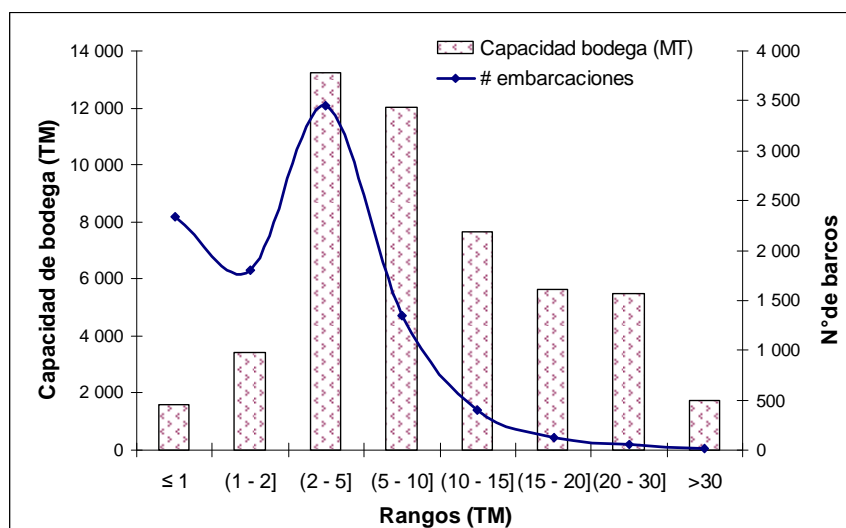


Figura 19. Capacidad de bodega y número de embarcaciones artesanales salvo cercos (encuesta estructural IMARPE 2009)

La capacidad de la flota artesanal peruana se resume en las siguiente cifras: más de 10 400 embarcaciones (incluyendo más de 900 cercos) de rango variable entre 0,1 y 30 TM, cumulando 51 600 TM (Figura 19), 12 tipo de artes principales y más de 15 secundarios.

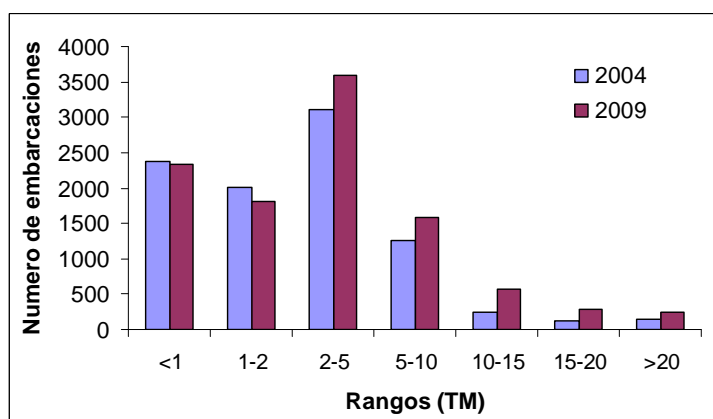


Figura 20. Encuestas estructurales IMARPE: número de embarcaciones por capacidad de bodega (todos tipos de barcos artesanales).

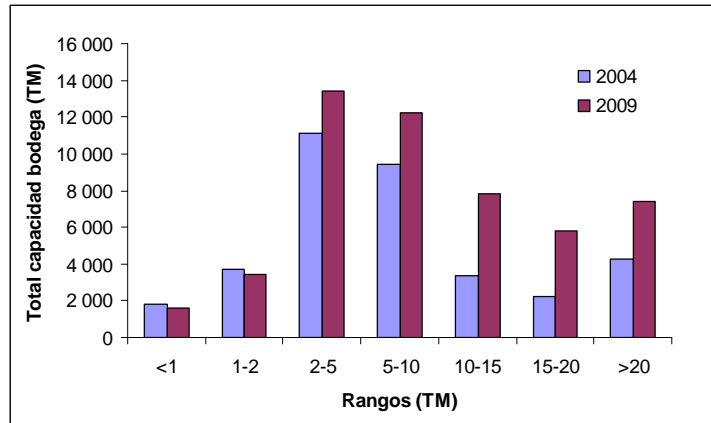


Figura 21. Encuestas estructurales IMARPE: capacidad de bodega acumulada por rango (todos tipos de barcos artesanales).

7.2 Capacidad instalada en el procesamiento pesquero

La capacidad instalada con licencia vigente para la producción de harina de pescado es de 9 173 TM por hora (Figura 22; Tabla 5 del Anexo 1), lo que es similar a la capacidad en plantas del año 1970 que es casi 10 veces superior a lo necesario (Fréon et al., 2008).

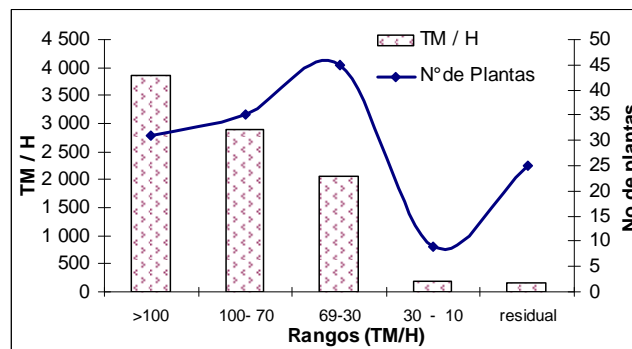


Figura 22. Número y capacidad de plantas harina de pescado con permiso vigente marzo 2009.

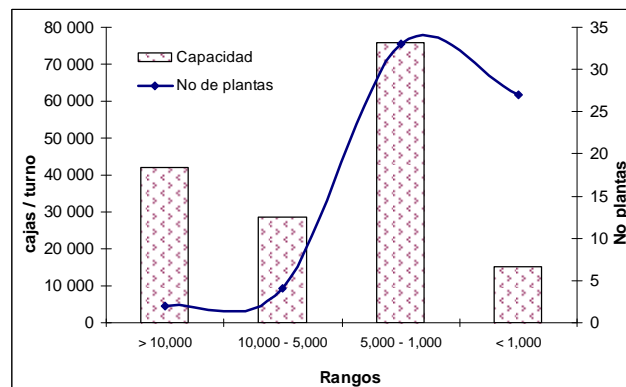


Figura 23. Número y capacidad de planta conservas con licencia vigente.

El número de empresas conserveras es de 66 con cerca de 162 000 cajas por turno de capacidad de procesamiento (Figura 23; Tabla 1 del Anexo 1).

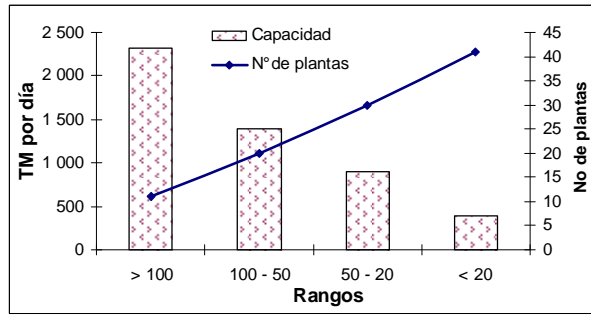


Figura 24. Número y capacidad de planta congelados con licencia vigente.

Respecto a la infraestructura para congelado, son 102 plantas que totalizan una capacidad de 4 600 toneladas por día (Figura 24; Tabla 1 del Anexo 1).

7.3 Mano de obra

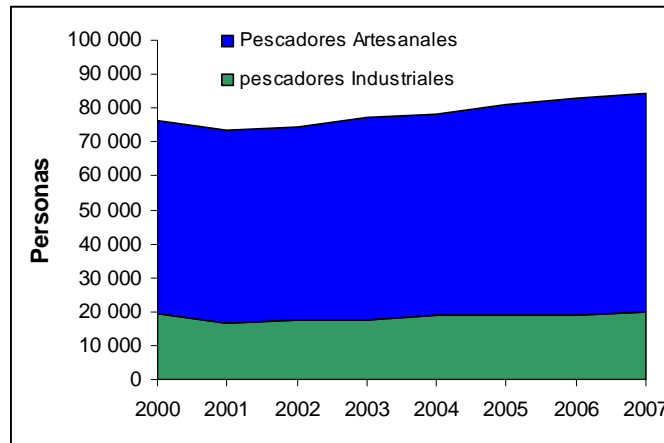


Figura 25. Empleos directos (extracción) sector pesquero (PRODUCE-OGTIE).

Las estimaciones de empleo oficiales en el sector pesquero (PRODUCE-OGTIE) asumen, por razón de simplificación, que una persona solo tiene un puesto de trabajo en el sector (Figura 25), aunque se estima que alrededor de 50 % tiene dos fuentes de ingreso. La encuesta estructural de IMARPE en 2004-2005 enseña que más del 88% de los pescadores tiene como única actividad a la pesca, mientras que los demás alternan la pesca con otras actividades económicas. El número de pescadores industriales y artesanales (marinos y continentales) aumento paulatinamente en esta década Son aproximadamente 20 000 pescadores industriales, entre 40 a 45% son tripulantes de embarcaciones de casco de madera.

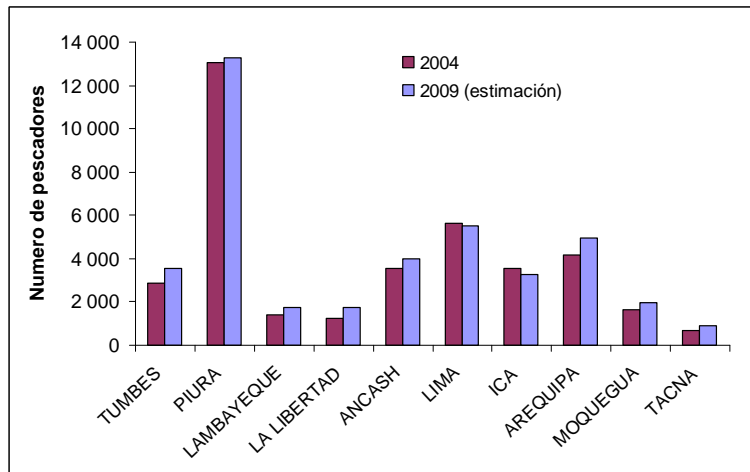


Figura 26. Encuestas estructurales IMARPE: pescadores por región.

Respecto a los pescadores artesanales marinos, (la Figura 25 incluye a los de aguas dulces). En el 2005 la encuesta estructural de IMARPE reportó cerca de 38 000 pescadores artesanales en el litoral peruano. A partir de la distribución regional de los pescadores en 2005, y de la encuesta estructural sobre el número de barcos en 2009, se puede estimar en más de 40 000 la cifra actual (Figura 26). En los últimos años ha seguido creciendo de manera importante la flota potera y la flota espinelera dedicada a la captura de perico principalmente y los buzos tanto los que tienen embarcación como los que no la tienen.

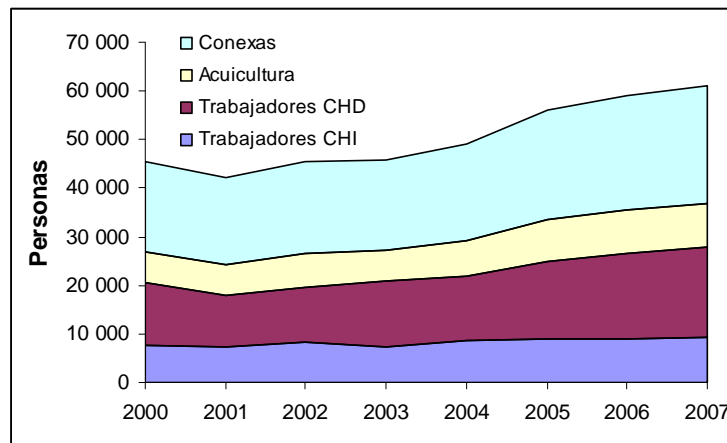


Figura 27. Empleos indirectos (transformación) y de acuicultura (PRODUCE-OGTIE).

El empleo estimado como trabajadores en tierra para la producción de harina de pescado es de aproximadamente 10 000. Trabajadores de las plantas para el consumo humano son poco menos de 20 000 con un importante crecimiento en los últimos años. La acuicultura involucra aproximadamente 9 000 personas (incluyendo 3000 personas trabajando en piscigranjas en el continente). El sector comprenden cerca de 25 000 personas en diversas actividades complementarias a la extracción y a la producción (Figura 27).

7.4 Desembarques y producción

El gráfico 2 del Anexo 1 muestra el patrón interanual de desembarque para harina de pescado, con un registro solamente de anchoveta en los últimos años, dada la casi desaparición de la sardina desde el año 2000. El volumen de captura para la producción de harina aumentó durante la década de los 1980 y se encuentra más

estable, alrededor de 6 millones de toneladas desde el 2005, mientras no haya efectos negativos derivados del fenómeno de El Niño.

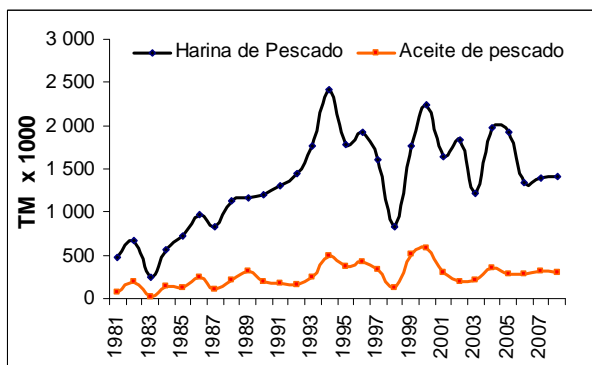


Figura 28. Producción harina y aceite de pescado para consumo humano indirecto (miles de TM).

La producción pesquera para consumo humano indirecto (CHI) ha tenido una evolución en correspondencia con los desembarques (Figura 28). Respecto a la producción de harina de pescado que, en los últimos años, bordea 1,5 millones de toneladas producidas anualmente.

El grafico 1 del Anexo 1 enseña el desembarque marino para CHD por destino, donde resalta la expansión del desembarque para congelado, casi en su totalidad pota, capturada en esta década por los pescadores artesanales. El desembarque para conservas ha tenido cierta recuperación luego de la fuerte contracción debido a que la abundancia de la sardina disminuyo fuertemente. A la desaparición de ésta, se utiliza caballa y jurel y en los años más recientes, también anchoveta.

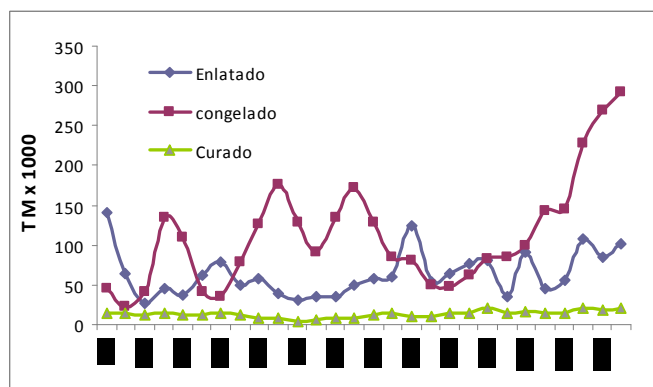


Figura 29. Producción pesquera para consumo humano (miles de TM).

7.5 Consumo interno de pescado

El consumo interno de harina y aceite de pescado ha tenido una contracción muy fuerte (Figura 30), debido al alza de los precios de ambos productos lo que evidencia que la demanda del mercado nacional tienen una fuerte elasticidad en función de los precios. Esta reducción del consumo nacional permite ofertar mayores volúmenes al mercado externo.

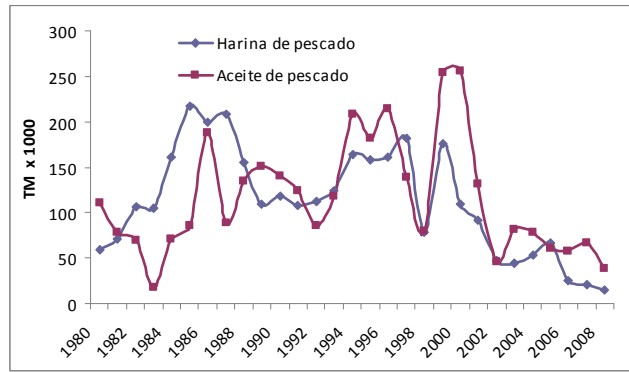


Figura 30. Consumo interno harina y aceite de pescado (miles de TM).

El CHD predominante en el país es al estado fresco, alcanzando 350 000 TM en los últimos años (Figura 31). Estadísticamente el consumo interno de pescado fresco es el desembarque menos unas pocas exportaciones y mas, desde hace unos años, importaciones de pescado al estado fresco.

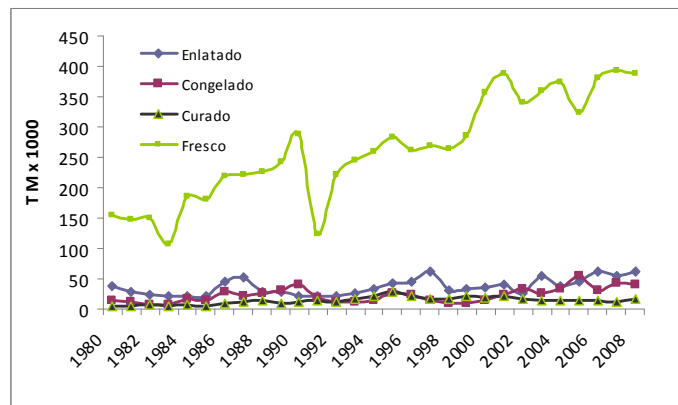


Figura 31. Consumo interno productos pesqueros: consumo humano directo (miles de TM).

7.6 Exportaciones, importaciones

Los ingresos por exportaciones de harina y aceite de pescado también han tenido una expansión importante (Figura 32), impulsado por el incremento de precios a lo largo de esta década (Figura 33) por la demanda acuícola (harina prima en particular), la mayor demandante de ambos productos actualmente. Hasta ahora, lo que se evidencia es que la elasticidad - precio de la demanda externa es menos flexible que la de la demanda nacional.

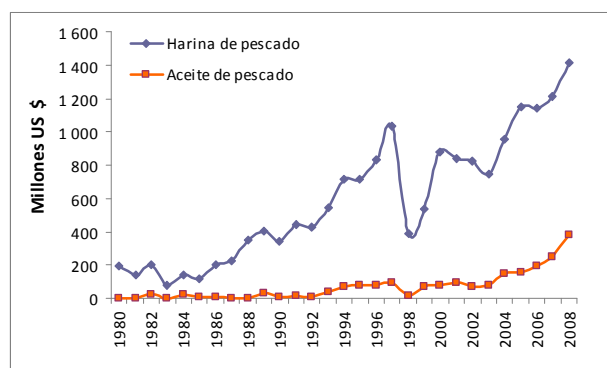


Figura 32. Exportaciones harina y aceite de pescado (millones \$ US).

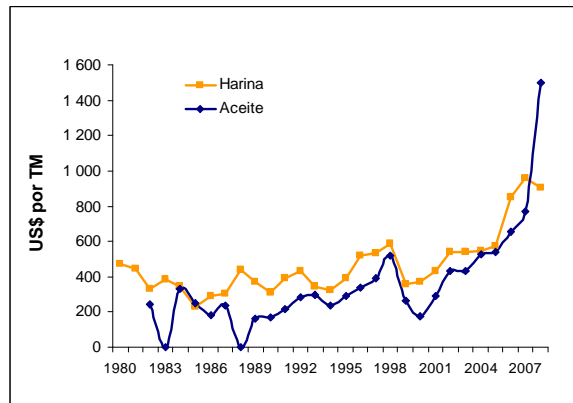


Figura 33. Precio anual promedio harina y aceite de pescado (US \$ por TM).

Las exportaciones de productos para el consumo humano muestran una gran expansión de congelado (pota) y cierta estabilización de las exportaciones de conservas (Figura 34 y 35). Las exportaciones de curado son marginales. Los ingresos por exportaciones han crecido, por el volumen comprometido, como también por precios como se percibe en enlatados y pescados y otros congelados.

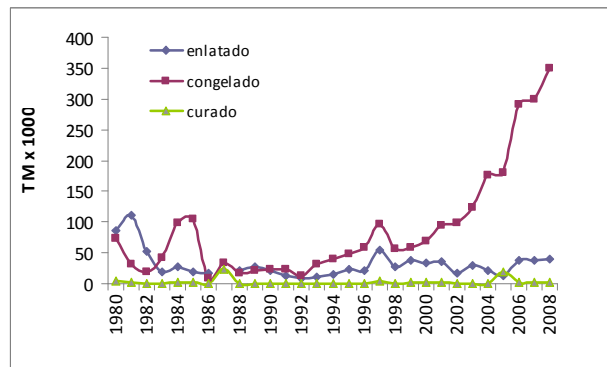


Figura 34. Exportaciones pesqueras para consumo humano directo en miles de TM.

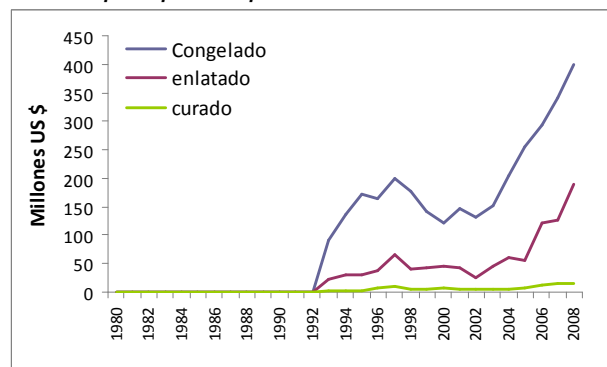


Figura 35. Exportaciones pesqueras para consumo humano directo en millones de US \$.

Tabla 4. Destino de la exportaciones (en US \$ y TM) acumuladas de enero a noviembre 2008.

PAISES	MILES US\$. FOB	TM	PART. US\$.
CHINA	778 754	869 445	37%
ALEMANIA	149 140	154 446	7%
JAPON	148 813	156 163	7%
ESPAÑA	131 055	100 109	6%
CHILE	95 253	75 969	4%
ESTADOS UNIDOS	90 233	21 529	4%
BELGICA	63 645	49 310	3%
CANADA	61 277	46 172	3%
VIETNAM	55 314	60 123	3%
NORUEGA	54 820	33 796	3%
TAIWAN	45 759	41 600	2%
FRANCIA	38 038	14 258	2%
COREA DEL SUR	36 030	30 652	2%
TURQUIA	35 973	39 758	2%
DINAMARCA	34 811	23 716	2%
INDONESIA	32 131	32 299	2%
AUSTRALIA	31 977	30 271	2%
ITALIA	30 320	19 982	1%
REINO UNIDO	22 798	22 440	1%
Otros países	193 321	156 579	9%
Total	2 129 460	1 978 617	100%

El primer destino de las exportaciones es, de lejos, China con más de 1/3 del total (Tabla 4). EEUU solo representa un 4%.

7.7 Contribución al PBI

7.7.1 Factores forzantes del PBI

La contribución del sector pesquero al PBI nacional peruano depende de los efectos directos e indirectos del cambio climático mencionados en la sección 6, pero también de otros factores internos y externos al país como hemos visto anteriormente y como se observa en Figura 36. Aunque se trata de un diagrama conceptual y no de un modelo cuyos parámetros son difíciles de estimar. El espesor de las flechas es proporcional a la importancia de la relación. Las flechas dobles indican una relación bidireccional o una interacción. Los factores determinantes del PBI son primero la cadena clima-abundancia-capturas-economía del sector, segundo las demandas y tercero las exportaciones (ligadas a la demanda internacional), el manejo estatal y los costos de producción. Las demandas en su turno dependen mucho de la demografía y de los PBIs. En el caso de la demanda internacional, el clima puede tener también una influencia a través de la producción de fuentes de proteínas y grasas alternativas a la harina y el aceite de pescado, soya en particular.

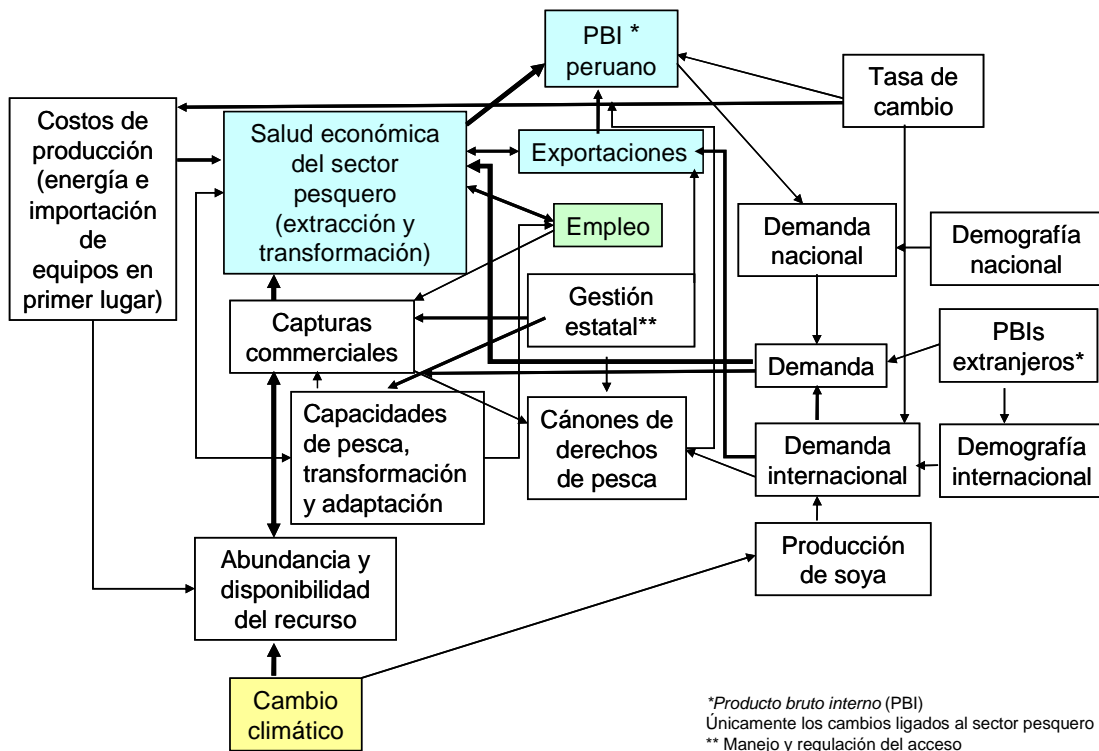


Figura 36. Diagrama conceptual de la influencia del cambio climático sobre el PBI peruano.

7.7.2 Capacidad de producción y PBI

Cumulando los datos de tres sectores pesqueros identificados por ENI (extracción, harina y aceite, elaboración de productos) se calcula que el PBI en 2007 fue de 2 millones de soles expresados en soles constante de 1994, representando una contribución de 1,2% al PBI nacional (Figura 37).

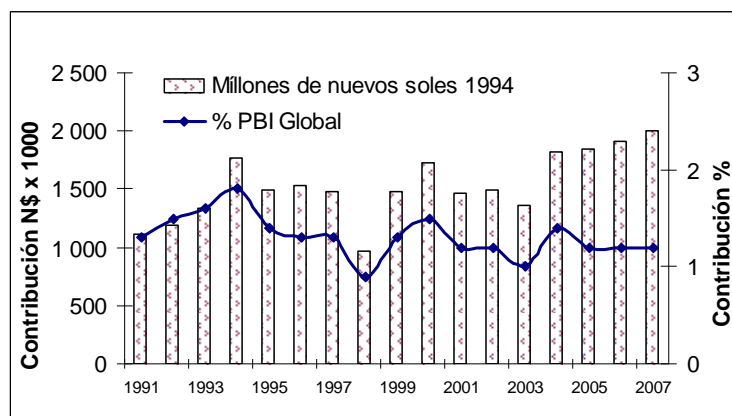


Figura 37. Contribución al PBI del sector pesquero (ENEI).

7.8 Cambios esperados bajo los escenarios 1 y 2

7.8.1. Demanda y costos de producción

Se espera que seguirá la tendencia del crecimiento de la población mundial aunque con una tasa de incremento menos alta que en el pasado debido al desarrollo de mucho países (Figura 38). El cambio climático podría influenciar las tasas de

crecimientos poblacionales, pero de manera seguramente distinta según los países y difícil de cuantificar. El balance total no debería cambiar mucho según los escenarios climáticos.

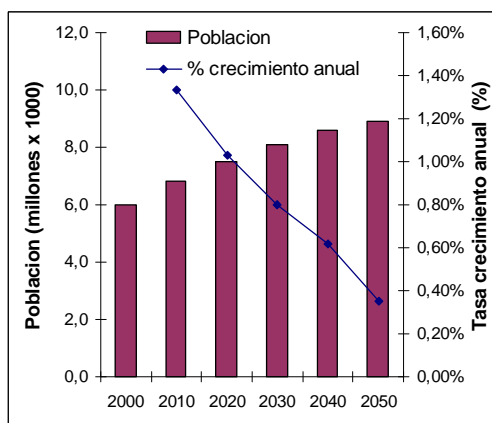


Figura 38. Proyecciones de crecimiento de la población mundial (UN Census bureau).

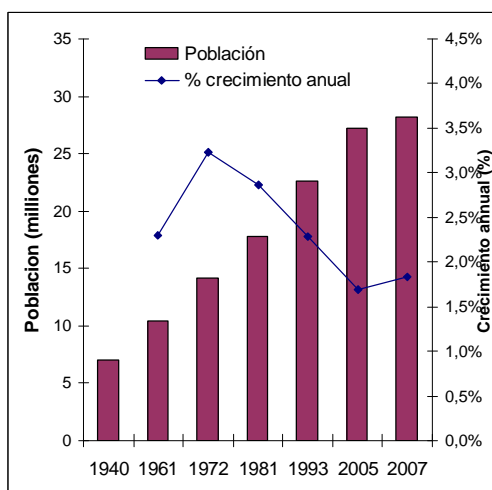


Figura 39. Crecimiento población peruana (UNEI).

Se espera también un seguimiento del crecimiento de la población peruana (Figura 39; Tabla 5).

El aumento poblacional, junto al desarrollo económico de los países emergentes va a favorecer la demanda más allá de la producción disponible. Los costos de producción, que dependen en primer lugar del consumo energético, tanto para la extracción como para la transformación, también aumentarían (Tabla 5).

Tabla 5. Situación y tendencias actuales (1998-2008), y escenarios demográficos y de costos de producción (2010-2060).

Variable	Valor promedio histórico (1990-2008)	Tendencia histórica	Escenarios 1 y 2		
			Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3
Población mundial	7 000 millones	↑↑	↑↑	↑	↑
Demanda internacional	-	↑↑	↑↑↑	↑↑	↑↑
Población peruana	28 millones	↑↑↑	↑↑	↑	↑
Demanda interior	-	↑↑↑	↑↑↑	↑↑	↑↑
Costos de producción (sobre todo energía)	-	↑	↑	↑↑	↑↑↑

7.8.2. Flotas, medios de producción y empleo

Durante los próximos años (aproximadamente 5), y de manera casi independiente de los escenarios climáticos, se espera una rápida disminución de la flota industrial pelágica (del orden de 50%), en particular los barcos de acero más antiguos y más pequeños, debido a la sobre capacidad existente de 2/3 de la flota (Fréon et al., 2008) más el cambio de regulación ocurrido en 2008. El cambio consistió en pasar de una cuota global a una cuota individual por barco (llamado Límite Máximo de Captura por Embarcación o LMCE) que debería disminuir la competencia entre compañías pesqueras (Aranda, 2008), pero con el riesgo de concentración del capital (Chavez et al., 2008). Luego de este periodo inicial, se espera en el escenario 1 una leve disminución de la capacidad pesquera dada la inercia del sistema y porque la disminución del recurso anchoveta (sección 6) debería ser parcialmente compensada por los demás recursos pelágicos. En el escenario 2, la disminución del recurso anchoveta será tan fuerte, que generará una disminución adicional de la flota, hasta un orden de magnitud en comparación a la situación actual. No obstante, para cada escenario, queda la incertidumbre relativa al equilibrio entre los tres segmentos de la flota pelágica de cerco: industrial de acero, industrial de madera y artesanal. El equilibrio tendrá que ver primero con el manejo del estado y medidas para favorecer cualquier segmento pesquero.

La flota demersal disminuyó durante los últimos años debido al enrarecimiento de la merluza. Esta tendencia negativa debería perdurar en el escenario 1, mientras que en el escenario 2 se espera un incremento significativo de la flota, debido a un aumento de los recursos.

En el escenario 1, se espera primero un leve aumento del número de embarcaciones artesanales seguida por una estabilización, mientras que en el escenario 2 se espera primero una disminución significativa del esfuerzo pesquero (tasa de actividad reducida, abandono de embarcaciones antiguas) y luego una estabilización. Estos cambios se estiman a partir de la variabilidad del conjunto de especies explotadas por esta pesquería y de su accesibilidad (Tablas 2 y 3). En todo caso, pero aún más en el escenario 2 donde la especies de mar abierto van a ser más favorecidas, se espera una disminución de actividad y número de embarcaciones de rango inferior a 5 TM y

un aumento de aquellas > 10 TM, una tendencia ya perceptible en los últimos años (Figura 20 y 21). No obstante, la disminución de las pequeñas embarcaciones no sería cierta ya que se podrían usar como auxiliar de embarcaciones “madrinas” o simplemente reducir sus actividades.

Los cambios de capacidad de producción de harina y aceite esperados en los distintos escenarios son parecidos a lo indicado por la flota de cerco, pero más marcados debido a 1) el exceso de capacidad actual; y 2) al probable aumento de la proporción de pescado destinado a consumo humano directo. Sólo las plantas modernas y de gran capacidad sobrevivirían para abastecer de harina de calidad *prime* la piscicultura. En cuanto a la capacidad de empresas de conservación, se espera un aumento al inicio del escenario 1 no obstante la disminución de recursos, debido a una mayor proporción de uso del pescado para CHD y a un aumento de la demanda nacional e internacional. Luego debería bajar. En el escenario 2, la capacidad debería mantenerse para luego aumentar debido a la mayor proporción de especies de alto valor comercial y al incremento de la demanda, nacional y sobre todo internacional. Es probable que la evolución de la capacidad de congelado siga la de enlatados, de acuerdo a los varios escenarios, debido a los mismos factores más un desarrollo de las cadenas de fresco tanto en Perú como en otros países en vía de desarrollo.

Las proyecciones de la evolución de los empleos directos e indirectos son semejantes a las proyecciones del número de embarcaciones, sobre todo artesanal e industrial de madera, y se espera a corto plazo una reconversión de los pescadores industriales en pesca artesanal, un fenómeno que se empieza a observar en 2009.

7.8.3. Precios, producción y consumo

Los precios de harina y aceite de pescado dependerán de la demanda, especialmente en el escenario 2 donde la casi desaparición de la anchoveta no estará compensada por el aumento de la sardina (sección 6).

Respecto a la producción de harina de pescado, seguiría teniendo una evolución en correspondencia con los desembarques. Se espera una estabilidad seguida por un decrecimiento en el escenario 1 y un decrecimiento importante y continuo en el escenario 2. No obstante, dado a la elasticidad de los precios, los cambios en valor de las exportaciones se encontrarán menos afectados (Tabla 3 del Anexo 1).

En el escenario 1, se espera un aumento de producción de congelado debido a la expansión de la pota, a menos que un mal manejo provoque su extinción, lo que no se puede excluir porque el manejo de una especie de vida corta (1-2 años) es bastante difícil. En el escenario 2 se espera más estabilidad y más diversidad en especies congeladas (ver Tabla 3 del Anexo 1). El fresco muestra una expansión en el periodo recién (Figura 29) que debería continuar en los escenarios 1 y 2 debido principalmente al aumento de la proporción de anchoveta y sardina dedicada al CHD. Con respecto a conservas, la tendencia observada debería continuar, al igual que por el pescado fresco. Por último el desembarque y producción para curados son menores en comparación de lo demás destinos. Sin embargo tiene un mercado regional bien definido, en la costa, sierra y parte de la selva alta del norte del país y el sur andino de Ecuador. Se supone que su producción quedara estable o disminuyera en todos los escenarios debido a la disminución de la demanda que resulta de la generalización de otras formas de preservación más modernas y más económicas.

El consumo interno actual de pescado puede cambiar hacia un leve aumento del consumo al principio del escenario 1, debido al aumento de la producción y de la

demanda interna. Pero después, y aun más en el escenario 2, la situación actual podría perdurar, salvo si se toman medidas de manejo para favorecer la producción nacional de pollos y puerco, incluso para exportación a nivel regional.

En el escenario 1, se espera al principio un aumento del CHD, de todas categorías salvo el curado, con una modulación de acuerdo a la disponibilidad de los recursos y del valor en el mercado internacional. En el escenario 2, es probable que el alto precio de productos dedicados a la exportación va a impedir el crecimiento del consumo interno, salvo si se toman medidas correctivas de manejo.

El ritmo de expansión de la acuicultura debería seguir por varios años. La demanda va seguir aumentando a pesar de los progresos en la investigación biotecnológica y el aumento del cultivo de especies herbívoras y omnívoras, los cuales van a favorecer un mayor uso de proteínas de origen vegetal (soya en primer lugar) y un menor uso de proteínas y grasas animales (Naylor et al., 2000; Delgado, 2003). De hecho la sustitución de proteínas y grasas de pescado no es posible para algunas etapas críticas del ciclo de vida, y además deteriora el gusto de los productos acuícolas. La demanda mundial, ligada a la demografía y al aumento del consumo de proteínas animales asociado al desarrollo de los países, permite predecir que los precios de harina y aceite de pescado deberían seguir aumentando sobre todo en el escenario 2 por la escasez del recurso. En este caso se va a favorecer la contracción del mercado interno que no podrá competir con el mercado externo. No obstante, no se puede descartar por completo un escenario donde, por manipulación genética en particular, la demanda en harina y aceite de pescado podría disminuir a largo plazo, entrenando una baja de los precios (Delgado, 2003).

7.8.4. Exportaciones y empleos

Se espera un aumento o una estabilidad de los ingresos de exportaciones para CHD durante los dos primeros periodos de ambos escenarios, aunque por distintas razones. En el escenario 1, al principio el aumento podría resultar de una mayor transformación de anchoveta y pota, mientras que después, y al igual que en el escenario 2, resultaría mas de un aumento de los precios. Este aumento se debería a tres factores: i) el aumento cuantitativo de la demanda internacional; ii) un aumento cualitativo de la misma demanda (productos de más alta calidad, con certificación sanitaria y eco-etiquetado, etc); iii) una exportación de especies de mas alta valor comercial que la anchoveta, a pesar de las cantidades exportadas no necesariamente muy altas.

En todos los escenarios, las proporciones de exportaciones a varios países no deberían cambiar mucho, salvo que se espera una acentuación del papel de los países asiático (mas que todo China y Vietnam) a nivel de importación de harina y aceite de pescado, y un aumento de las exportaciones de productos para CHD hacia países en vía de desarrollo sin mucho recursos pesqueros, tanto en el sub-continente Americano como en África y Asia. Los Estados Unidos se encontrara mas afectados por los efectos del CC sobre sus propios recursos pesqueros, en particular en California que por los efectos en El Perú (Fréon et al., 2009).

La evolución del empleo en los dos sectores (CHI y CHD) debería seguir los patrones indicados por las plantas de harina de pescado y de congelado/enlatado. La Tabla 6 resume las tendencias expuestas previamente en término de exportaciones, consumo y empleos. No se considera la acuicultura en la Tabla 6, aunque se espera su desarrollo en el futuro, lo que vendría compensar por parte las pérdidas de empleos.

Tabla 6. Situación y tendencias actuales (1998-2008), y escenarios de exportaciones, consumos y empleos (2010-2060).

			Escenario 1 (mayor surgencia)			Escenario 2 (menor surgencia)		
Variable	Valor promedio histórico	Tendencia histórica	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 1	Periodo	Periodo 3
Exportaciones CHD	0,2 millones TM 200 millones US\$	↑	↑	↔	↓	↔	↑	↑
Exportaciones CHI	1,8 millones TM 1 200 millones US\$	↑	↑*	↔	↓	↓	↓↓	↓↓
Consumo interno CHD	90 000 TM	↑	↑	↔	↓	↔	↔	↔
Consumo interno CHI	200 000 TM	↓	↔	↓	↓↓	↓	↓	↓↓
Empleos directos pesca industrial	20 000 personas	↔	↓	↔	↔	↓	↓	↓↓
Empleos directos pesca artesanal	35 000 personas	↑	↔	↔	↓	↔	↓	↓
Empleos indirectos, todas categorías	50 000 personas	↑	↔	↓	↓	↓	↓	↓↓

* Estabilidad o decrecimiento en volumen pero aumento (↑) en valor

La Tabla 7 combina las tendencias expuestas previamente en término de capacidad de producción y PBI. A pesar de la disminución de la producción y de las exportaciones, el balance del PBI no debería ser tan negativo como lo esperado, dado esencialmente al aumento a largo plazo de los precios de productos del mar, dado a su baja disponibilidad, a cambio de hábitos alimentarios y al aumento de la mayoría de los PBIs.

Tabla 7. Situación y tendencias actuales (1998-2008), y escenarios capacidades de producción y PBI ligados a las pesquerías (2010-2060).

			Escenario 1 (mayor surgencia)			Escenario 2 (menor surgencia)		
Variable	Valor promedio histórico (1990-2008)	Tendencia histórica	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 1	Periodo	Periodo 3
Capacidad de bodega pesca industrial	170 000 TM	↔	↓	↔	↓	↓↓	↓	↔
Capacidad de bodega pesca artesanal	40 000 TM	↑	↑	↔	↔	↓	↔	↔
Capacidad plantas CHI	6 000 TM/H	↑↑	↓↓	↓	↓	↓↓↓	↓↓	↓
Capacidad plantas de CHD	100 000 cajas/turno 4000 TM/día	↑	↑	↔	↓	↔	↑	↔
PBI ligado a las pesquerías*	1500 millones N\$ (1,3%)	↑↑	↑	↔	↓	↓	↔	↔

*Nuevos soles (N\$) a valores constantes de 1994

7.9 sugerencia de medidas para limitar los impactos socio-económicos del cambio climático

Hoy en día, la única medida que se conoce para controlar el cambio climático, es reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Aun así, la inercia del sistema acoplado tierra-océano-atmósfera es tan grande que solo se puede esperar a mediano plazo (unas décadas) una disminución del recalentamiento global (cuyos efectos locales no se traduzcan necesariamente por un aumento de TSM, como hemos visto anteriormente). Además, estas medidas deben ser tomadas a nivel internacional para tener efectos tangibles, y más que todo por los países que más producen estos gases, que son los países desarrollados. Entonces, lo único que se puede hacer de manera concreta en El Perú es implementar medidas de mitigación de los efectos climáticos. Dado que en la mayoría de los distintos periodos de tiempo de los varios escenarios la abundancia de los recursos va a disminuir, las medidas correctivas deberían tratar de:

- 1) **asegurarse que el buen manejo de los recursos no se deteriore bajo la presión** socio-económica creciente del sector. El riesgo se encuentra no solamente a nivel de cada stock individual sino también a nivel de todo el ecosistema que se va encontrar bajo una diversificación de la explotación, sobre todo de parte del sector artesanal que tiene una capacidad adaptativa muy alta para explorar y explotar nuevo recursos (peces, invertebrados, algas, etc.). No dudo que el ecosistema va a cambiar de régimen debido al cambio climático, pero este cambio puede ser alterado significativamente por la sobre explotación. Algunos regímenes son preferibles a otros; uno de los peores ejemplos es el caso del ecosistema del Namibia, donde dominan medusas y gobios que no se pueden explotar;
- 2) **favorecer el aumento del valor agregado de los productos del mar.** En otros términos, ganar más con menos pescado. Eso significa más que todo acelerar el cambio actual de procesamiento de productos para CHD en lugar de CHI. Dentro de la categoría CHD, se recomienda favorecer los productos elaborados y de alto valor comercial tal como los enlatados, preparaciones culinarias preservadas y congelado. En cuanto a lo que quede de CHI, el mejoramiento de la calidad y del acondicionamiento y preservación de la harina y del aceite debe continuar. Además, para todos estos productos, se debe anticipar la ventaja creciente que representara el eco-etiquetado. Para conseguir la ecoetiqueta, se debe cumplir de antemano ciertas normas acerca de i) Estándar medioambiental para la pesca sostenible (comprende la sostenibilidad de la explotación a nivel del stock, el impacto ambiental a nivel de estructura, función y biodiversidad del ecosistema y un buen manejo pesquero); ii) Estándar para la cadena de custodia MSC para la trazabilidad de productos pesqueros. Es un trabajo de largo plazo que se debe empezar lo antes posible.
- 3) **proteger la pesca artesanal** porque es la más flexible de todas las pesquerías. Desde ahora se deben tomarse medidas de protección a la pesca artesanal, frente a la protección de los recursos explotados, (control y vigilancia

para mantenerlos en los niveles óptimos), así como, limitar su acceso (que aun es abierto para esta pesquería). En contra parte, como esta pesquería es también la más difícil de controlar (y de certificar con eco-etiquetas), se le debe seguir, estudiar y analizar con mucho cuidado para evitar una sobre explotación (punto 1), dando oportunidad y apoyo a la investigación científica al respecto.

- 4) **Reducir la huella de carbono del sector a la vez que incrementar los beneficios económicos del mismo, a través de la mejora de la eficiencia energética, incluyendo el uso del gas peruano.** Frente a la casi certidumbre de un aumento de los costos energéticos debido al agotamiento de las energías fósiles, Perú tiene la gran ventaja de ser poseedor de reservas de gas natural. La conversión a este tipo de combustible limitaría los impactos económicos del CC. Podría ser favorecida, en primer lugar para las plantas de harina y aceite de pescado y transporte en tierra, pero también por los mismos barcos pesqueros.
- 5) **Reforzar las investigaciones científicas relacionado al CC y sus efectos, de la física hasta los aspectos socio-económicos.** Se debe seguir el esfuerzo de modelación abordando la relación atmósfera-océano regional, resultante de una reducción de escala (downscaling) de modelos disponibles a la escala del Océano Pacífico en modo predicativo. Estos modelos deben ser acoplados en tiempo real a modelos enfocados en productividad primaria tipo NPZD o mejor con más compartimiento, los cuales, a su turno pueden ser acoplado o integrado a modelos focussing on producción secundaria (zooplancton) y terciaria (peces). Finalmente, estos modelos físico-biológicos debe ser ligados a modelos económicos. Para implementar este largo proceso, se debe primero afinar nuestros conocimientos de los parámetros actuales de los modelos y validar los modelos regionales sobre el periodo histórico. Luego tendremos que estimar los parámetros para condiciones futuras cuando se pueda (experimentos y Vitro) o bien simular varios valores e implementar estudios de sensibilidad.

8. CONCLUSION GENERAL

Hemos presentado tres escenarios físicos del efecto del cambio climático durante los 50 próximos años: dos muy contrastados y uno que antes que un escenario intermedio de los dos es una combinación basada en la distinción entre la zona costera y la zona de mar abierto. Los escenarios son descritos en términos de tendencias y no de cifras precisas porque hoy en día no se puede cuantificar los cambios de manera realista. Además, no se hizo ningún intento de cuantificación de la variabilidad a escala intermedias (interanual y estacional) por la misma razón, aunque lo más probable es que el cambio climático va a aumentar esta variabilidad. Asociada a los dos primeros escenarios, se hicieron proyecciones biológicas del ecosistema y socio-económicas del sector pesquero. No se ha mencionado el escenario 3 en estas proyecciones porque, al contrario de la física, se puede pensar que en la mayoría de los casos el escenario 3 resultaría en una situación intermedia entre los escenarios 1 y 2. Los escenarios 1 y 2 fueron subdivididos en periodos de tiempo de igual duración, pero

con dos periodos de tiempo para la física y tres periodos para la biología y socioeconomía. Cabe insistir en que las predicciones quedan muy inciertas, dado el nivel de conocimiento actual y la complejidad de los procesos involucrados a las escalas regional (Perú) e internacional.

Lo que domina en la mayoría de las respuestas socio-económicas en cada periodo de tiempo son los efectos negativos, a pesar de algunos efectos positivos a nivel de unos recursos. Dado a un crecimiento esperado de la demanda, tanto internacional como nacional, se espera que los efectos negativos estén en parte compensados. Se predice que el sector más afectado por los cambios climáticos será el sector de pesca industrial, sobre todo la extracción pelágica en el escenario 2 y las exportaciones correspondientes, en particular hacia China y lo demás países asiáticos. Al contrario, la pesca artesanal debería ser menos afectada y por consecuencia, dentro de las medidas de mitigación, se propone de proteger esta pesquería. Otras medidas que pueden limitar los efectos negativos del cambio climáticos son de asegurarse que el buen manejo de los recursos no se va a deteriorar bajo la presión socio-económica creciente del sector, y favorecer el aumento del valor agregado de los productos del mar. Por fin, se recomienda estudiar la posibilidad técnica y los beneficios económicos potenciales del uso de gas peruano en el sector.

AUTORES QUE CONTRIBUYERON A ESTE INFORME

Arnaud Bertrand^{a,b} (Coordinador), Pierre Fréon^a (Coordinador), Alexis Chaigneau^{b,c}, Vincent Echevin^c, Cartola Estrella^b, Hervé Demarcq^a, Dimitri Gutiérrez^b, Juan Carlos Sueiro^d

^a Institut de Recherche pour le Développement (IRD), UMR212 EME, Avenue Jean Monnet, BP 171, 34203 Sète Cedex, France (Contacto : Arnaud.Bertrand@ird.fr; Pierre.Fréon@ird.fr).

^b Instituto del Mar del Perú, Esquina Gamarra y Gral. Valle s/n, Apartado 22, Callao, Lima, Peru

^c IRD, Laboratoire d'Océanographie et de Climatologie: Expérimentation et Approches Numériques (LOCEAN), Paris, France.

^d CooperAcción Acción Solidaria para el Desarrollo, Calle Berlín 1353, Miraflores, Peru

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ACIA. 2004. Impacts of a Warming Arctic. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Agnihotri, R., Altabet, M.A., Herbert, T.D. and Tierney, J. E. 2008. Subdecadally resolved paleoceanography of the Peru margin during the last two millennia. *Geochem. Geophys. Geosys.*, 9, Q05013, doi:10.1029/2007GC001744.
- Alheit, J. and Niquen, M. 2004. Regime shifts in the Humboldt Current ecosystem. *Progress in Oceanography*, 60: 201-222.
- Altabet, M.A., Francois, R., Murray, D.W. and Prell, W.L. 1995. Climate-related variations in denitrification in the Arabian Sea from sediment 15N/14N ratios. *Nature*, 373: 506-509.
- Aranda, M. 2008 Developments on fisheries management in Peru: The new individual vessel quota system for the anchoveta fishery. *Fisheries Research*, 96: 308–312.
- Bakun, A. 1990. Global climate change and intensification of coastal ocean upwelling. *Science*, 247: 198–201.
- Bakun, A. 1996. Patterns in the ocean: ocean process and marine population dynamics. Centro de Investigaciones biológicas del Nordeste, La Paz, Mexico and University of California Sea Grant, San Diego, USA, 325p.
- Bakun, A. and Weeks, S.J. 2008. The marine ecosystem off Peru: what are the secrets of its fishery productivity and what might its future hold? *Progress in Oceanography*, 79: 290–299.
- Barber, R.T. and Chavez, F.P. 1983. Biological consequences of El Niño. *Science*, 222: 1203-1210.
- Behrenfeld, M.J., O'Malley, R.T., Siegel, D.A. et al. 2006. Climate-driven trends in contemporary ocean productivity. *Nature*, 444: 752–755.

- Belmadani, A., Dewitte, B. and An, S-I. In press. ENSO feedbacks and associated timescales of variability in a multi-model ensemble. *Journal of Climate*.
- Bertrand, A., Gerlotto, F., Bertrand, S., Gutiérrez, M., Alza, L., Chipollini, A., Diaz, E., Espinoza, P., Ledesma, L., Quesquén, R., Peraltilla, S. and Chavez, F. 2008. Schooling behaviour and environmental forcing in relation to anchoveta distribution: an analysis across multiple spatial scales. *Progress in Oceanography*, 79: 264-277.
- Bertrand, A., Guevara, R., Soler, P., Csirke J. and Chavez, F. (Eds). 2008. The Northern Humboldt Current System: ocean dynamics, ecosystem processes, and fisheries. Special issue of *Progress in Oceanography*, 79: 95-412.
- Bertrand, A., Segura, M., Gutiérrez, M. and Vásquez, L. 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: 296-316.
- Bograd, S. Castro, C.G., Di Lorenzo, E., Palacios, D.M., Bailey, H., Gilly, W. and Chavez F.P. 2008. Oxygen declines and the shoaling of the hypoxic boundary in the California Current. *Geophysical Research Letters* 35, L12607, doi:10.1029/2008GL034185.
- Brink, K.H., Halpern, D., Huyer A. and Smith, R.L. 1983. The physical environment of the Peruvian upwelling system. *Progress in Oceanography*, 12: 285-305
- Broecker, W. 2000. Was a change in thermohaline circulation responsible for the Little Ice Age? *Proceedings of the National Academy of Science*, 97: 1339-1342.
- Cane, M.A. 2005. The evolution of El Niño, past and future. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 230: 227 –240.
- Chavez, F.P., Bertrand, A., Guevara-Carrasco, R., Soler, P. and Csirke, J. 2008. The northern Humboldt Current System: brief history, present status and a view towards the future. *Progress in Oceanography*, 79: 95-105.
- Chavez, F.P., Ryan, J., Lluch-Cota, S.E. and Niquen, M. 2003. From anchovies to sardines and back: multidecadal change in the Pacific Ocean. *Science*, 299: 217-221.
- Clark, B.M. 2006. Climate change: a looming challenge for fisheries management in southern Africa. *Marine Policy*, 30: 84-95.
- Costanza, R., D'Arge, R., De Groot, R. et al. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387: 253-260.
- Cronin, T., Dwyer, G., Kamiya, T., Schwede, S., and Willard, D. 2003. Medieval Warm Period, Little Ice Age and 20th century temperature variability from Chesapeake Bay. *Global Planet. Change*, 36: 17-29.
- Crutzen, P.J. 1970. The influence of nitrogen oxides on the atmospheric ozone content. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 408: 320-325.
- Cury, P. and Roy, C. 1989. Optimal environmental window and pelagic fish recruitment success in upwelling areas. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 46: 670-680.
- Delgado, C.L., Wada, N., Rosegrant, M.W., Meijer, S. and Ahmed, M. 2003. *Fish to 2020 Supply and Demand in Changing Global Markets*. International Food Policy Research Institute, Washington, D.C.
- Demarcq, H. 2009. Trends in primary production, sea surface temperature and wind in upwelling systems (1998-2007). *Progress in Oceanography*, 83: 376-385.
- DeVries, T.J. and Pearcy, W.G. 1982. Fish debris in sediments of the upwelling zone off central Peru: a late Quaternary record. *Deep Sea Research*, 28: 87-109.
- Escobar, D. 1993. Evaluación climatológica y sinóptica del Fenómeno de Vientos Paracas. Tesis para optar el título de Ingeniero Meteorólogo. Universidad Nacional Agraria La Molina, 62p.
- Field, J.G., Hempel, G. and Summerhayes, C.P. 2002. *OCEANS 2020: Science, Trends, and Challenge of Sustainability*. Washington, DC, Island Press.
- Fréon, P., Bouchon, M., Mullon, C., García, C. and Niquen, C. 2008. Interdecadal variability of anchoveta abundance and overcapacity of the fishery in Peru. *Progr. Oceanogr.* 79: 401-412.
- Fréon, P., Werner, F., Chavez, F. P. 2009. Conjectures on the influence of climate change on ocean ecosystems dominated by small pelagic fish. In Checkley, D., Roy, C., Alheit, J., editors, *Predicted effects of climate change on SPACC systems*. Cambridge University Press, pp. 312-343.
- Garreaud, R.D. and Muñoz, R.C. 2005. The Low-Level Jet off the West Coast of Subtropical South America: Structure and Variability. *Monthly Weather Review*, 133: 2246-2261.
- Graham, N., Hughes, M., Ammann, C., Cobb, K., Hoerling, M., Kennett, D., Kennett, J., Rein, B., Stott, L., Wigand, P., and Xu, T.Y. 2007. Tropical Pacific – mid-latitude teleconnections in medieval times. *Clim. Change*, 83: 241-285.
- Guevara-Carrasco, R. and Leonart, J. 2008. Dynamics and Fishery of the Peruvian hake: between the nature and the man. *Journal of Marine Systems*, 71: 249-259.
- Gunther, E.R. 1936. A report on oceanographical investigations in the Peru Coastal Current. University Press.
- Gutierrez M., Swartzman G., Bertrand A. and Bertrand S. 2007. Anchovy and sardine spatial dynamics and aggregation patterns in the Humboldt Current ecosystem, Peru, from 1983-2003. *Fisheries Oceanography*, 16: 155-168.
- Gutiérrez, D., Sifeddine, A., Bouloubassi, I., Salvatelli, R., Tapia, P., Field, D., Méjanelle, L., Velazco, F., Vargas G., and Ortlieb, L. 2008. Upwelling enhancement and pelagic ecosystem responses off Peru since the late nineteenth century. In: *Eastern Boundary Upwelling Ecosystems Symposium*, Las Palmas, Gran Canaria, Spain, 2-6 June 2008. Abstracts Book, p. 59.

- Gutiérrez, D., Sifeddine, A., Field, D., Ortlieb, L., Vargas, G., Chávez, F., Velazco, F., Ferreira, V., Tapia, P., Salvattecí, R., Boucher, H., Morales, M., Valdés, J., Reyss, J.-L., Campusano, A., Boussafir, M., Mandeng-Yogo, M., García, M. and Baumgartner, T. 2009. Rapid reorganization in ocean biogeochemistry off Peru towards the end of the Little Ice Age. *Biogeosciences*, 6: 835- 848.
- Hansen, J., Sato, M., Ruedy, R., Lo, K., Lea, D.W. and Medina-Elizade, M. 2006. Global temperature change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103: 14288–14293.
- Harley, C.D.G., Hughes, R.A., Hultgren, K.M. et al. 2006. The impacts of climate change in coastal marine systems. *Ecology Letters*, 9: 228 –241.
- Haug, G.H., Hughen, K.A., Sigman, D.M., Peterson, L.C. and Röhl, U. 2001. Southward migration of the Intertropical Convergence Zone through the Holocene. *Science*, 293: 1304– 1308.
- Higginson, M. and Altabet, M. 2004 Initial test of the silicic acid leakage hypothesis using sedimentary biomarkers. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L18303, doi:10.1029/2004GL020511.
- Hsieh, C.H., Reiss, C.S., Hunter, J.R., Beddington, J.R., May R.M. and Sugihara, G. 2006. Fishing elevates variability in the abundance of exploited species. *Nature*, 443: 859–862.
- Jahncke, J., Checkley, D. and Hunt, G.L. 2004. Trends in carbon flux to seabirds in the Peruvian upwelling system: effects of wind and fisheries on population regulation. *Fisheries Oceanography*, 13: 208–223.
- Jickells, T.D., An, Z.S., Andersen, K.K. et al. 2005. Global iron connections between desert dust, ocean biogeochemistry, and climate. *Science*, 308: 67–71.
- Karstensen, J., Stramma, L. Visbeck M. 2008. The oxygen minimum zones in the eastern tropical Atlantic and Pacific oceans. *Progress in Oceanography*, 77: 331-350.
- Keeling, R.F. and Garcia, H.E. 2002. The change in oceanic O₂ inventory associated with recent global warming. *Proceedings of the National Academy of Science*, 99: 7848-7853.
- Koutavas, A. and Lynch-Stieglitz, J. 2004. Variability of the marine ITCZ over the eastern Pacific during the past 30,000 years: Regional perspective and global context. In: *The Hadley Circulation: Present, Past and Future*, R.S. Bradley and Diaz, H.F. (Eds), 347-369, Kluwer Academic Publishers.
- Lam, P., Lavik, G., Jensen, M.M., van de Vossenberg, J., Schmid, M., Woebken, D., Gutiérrez, D., Amann, R., Jetten, M.S.M. and Kuypers, M.M.M. 2009. *Proceedings of the National Academy of Science*, 106: 4752-4757.
- Manganello, J.V. and Huang, B. 2009. The influence of systematic errors in the Southeast Pacific on ENSO variability and prediction in a coupled GCM. *Climate Dynamics*, 32:1015–1034.
- Mann, M., Cane, M., Zebiak, S., and Clement, A. 2005. Volcanic and Solar Forcing of the Tropical Pacific over the Past 1000 Years. *Journal of Climate*, 18: 447 – 456.
- McGowan, J.A., Bograd, S.J., Lynn, R.J. and Miller, A.J. 2003. The biological response to the 1977 regime shift in the California Current. *Deep-Sea Res.*, 50: 2567–2582.
- McTainsh, G. and Strong C. 2006. The role of Aeolian dust in ecosystems. *Geomorphology*, doi:10.1016/j.geomorph.2006.07.028.
- Meehl, G.A., Stocker, T.F., Collins, W.D. et al. 2007. Global climate projections. In *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Solomon, S., Qin, D., Manning, M. et al. (Eds), Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA : Cambridge University Press, pp. 747–845.
- Moseley, M.E. 2001. *The Incas and Their Ancestors: The Archaeology of Peru*. 2nd Ed. London: Thames and Hudson.
- Naylor, R. L., Goldburg, R. J., Primavera, J. H., Kautsky, N., Beveridge, M.C.M., Clay, J., Folke, C., Lubchenco, J., Mooney, H., and Troell, M. 2000. Effect of aquaculture on world fish supplies. *Nature* 405: 1017–1024.
- Parmesan, C. and Yohe, G. 2003. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 421: 37–42.
- Paulmier, A. and Ruiz-Pino, D. 2009. Oxygen minimum zones (OMZs) in the modern ocean. *Progress in Oceanography*, 80: 113-128.
- Peterson, L. and Haug, G. 2006. Variability in the mean latitude of the Atlantic Intertropical Convergence Zone as recorded by riverine input of sediments to the Cariaco Basin (Venezuela). *Palaeogeog., Palaeoclim., Palaeoecol.*, 234: 97– 113.
- Reichart, G.J., Lourens, L.J. and Zachariasse, W.J. 1998. Temporal Variability in the Northern Arabian Sea Oxygen Minimum Zone (OMZ) during the Last 225,000 Years. *Paleoceanography*, 13: 607–621.
- Rein, B., Lückge, A. and Sirocko, F. 2004. A major Holocene ENSO anomaly during the Medieval period. *Geophys. Res. Lett.* 31, L17211. doi:10.1029/2004GL020161.
- Rickaby, R.E.M. and Halloran, P.R. 2005. Cool La Nina During the Warmth of the Pliocene? *Science*, 307: 1948–1952.
- Roemmich, D., 1992: Ocean warming and sea-level rise along the southwest United States coast. *Science*, 257, 373–375.
- Saha, S., Nadiga, S., Thiaw, C., Wang, J. and Wang W. 2006. The NCEP climate forecast system. *Journal of Climate*, 19 : 3483–3517.
- Sanchez, G., Calienes, R. and Zuta, S. 1999. The 1997–98 El Niño and its effect on the marine coastal system off Peru. *CALCOFI Reports* 41, pp. 62–86.
- Schwartzlose, R., Alheit, J., Bakun, A., Baumgartner, T., Cloete, R., Crawford, R., Fletcher, W., Green-Ruiz, Y., Hagen, E., Kawasaki, T., Lluch-Belda, D., Lluch-Cota, S., Maccall, A., Matsuura, Y., Nevárez, M., Parrish, R., Roy, C., Serra, R., Shust, K., Ward, M., Zuzunaga, J., 1999. Worldwide large-scale

- fluctuations of sardine and anchovy populations. *South African Journal of Marine Sciences* 21, 289–347.
- Sifeddine, A., Gutiérrez, D., Gurgel, M., García, M., Ortlieb, L., Boussafir, M., Velazco, F., Boucher, H., Caquineau, S. and Valdés, J.. 2008a. Interdecadal to Centennial variability of paleoproductivity and redox conditions in the Peruvian continental margin during the last two millennia. In: *Eastern Boundary Upwelling Ecosystems Symposium*, Las Palmas, Gran Canaria, Spain, 2-6 June 2008. Abstracts Book, p. 79.
- Sifeddine, A., Gutierrez, D., Ortlieb, L., Boucher, H., Velazco, F., Field, D., Vargas, G., Boussafir, M., Salvateci, R., Ferreira, V., García, M., Valdes, J., Caquineau, S., Mandeng Yogo, M., Cetin, F., Solis, J., Soler, P. and Baumgartner, T. 2008b. 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.
- Snyder, M.A., Sloan, L.C., Diffenbaugh, N.S. and Bell, J.L. 2003. Future climate change and upwelling in the California Current. *Geophysical Research Letters*, 30: 1823–1826.
- Stramma, L., Johnson, G.C., Sprintall, J. and Mohrholz, V. 2008. Expanding oxygen-minimum zones in the tropical oceans. *Science*, 320: 655-658.
- Strub, P., Mesias, J., Montecinos, V., Rutllant, J. and Salinas, S. 1998. Coastal ocean circulation off western South America. In: *The Sea*, Vol. 11 Robinson, A. and Brink, K. (Eds.), 273-313, John Wiley Sons, New York.
- Swartzman, G., Bertrand, A., Gutiérrez, M., Bertrand, S. and Vasquez, L. 2008. The relationship of anchovy and sardine to water masses in the Peruvian Humboldt Current System from 1983-2005. *Progress in Oceanography*, 79, 228-237.
- Tagliabue A., Bopp, L. and Aumont, O. 2008. Ocean biogeochemistry exhibits contrasting responses to a large scale reduction in dust deposition. *Biogeosciences*, 5: 11-24
- Thiel, M., Macaya, E.C., Acuña, E., Arntz, W.E., Bastias, H., Brokordt, K., Camus, P.A., Castilla, J.C., Castro, L.R., Cortés, M., Dumont, C.P., Escribano, R., Fernández, M., Gajardo, J.A., Gaymer, C.F., Gomez, I., González, A.E., González, H.E., Haye, P.A., Illanes, J.-E., Iriarte, J.L., Lancellotti, D.A., Luna-Jorquera, G., Luxoro, C., Manríquez, P.H., Marín, V., Muñoz, P., Navarrete, S.A., Perez, E., Poulin, E., Sellanes, J., H.H., S., Stotz, W., Tala, F., Thomas, A., Vargas, C.A., Vásquez, J.A., J.M., A.V. 2007. The Humboldt Current System of Northern and Central Chile - Oceanographic Processes, Ecological Interactions and Socioeconomic Feedback *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, 45: 195-344
- 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.
- Vargas, G., Pantoja, S., Rutllant, J., Lange, C. and Ortlieb, L. 2007. Enhancement of coastal upwelling and interdecadal ENSO-like variability in the Peru-Chile Current since late 19th century. *Geophysical Research Letters*, 34, L13607, doi:10.1029/2006GL028812.
- Vecchi, G.A. and Soden, B.J. 2007. Global warming and the weakening of the tropical circulation. *Journal of Climate*, 20: 4316–4340.
- Vecchi, G.A., Soden, B.J., Wittenberg, A.T., Held, I. M., Leetmaa, A. and Harrison, M. J. 2006. Weakening of tropical Pacific atmospheric circulation due to anthropogenic forcing. *Nature*, 441: 73–76.
- Walther, G.-R. Post, E. Convey, P. et al. 2002. Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 416: 389–395.
- Wara, M.W., Ravelo, A.C. and Delaney, M.L. 2005. Permanent El Niño-like conditions during the Pliocene warm period. *Science*, 39: 758–761.
- Yamaguchi, K. and Noda, A. 2006. Global warming patterns over the North Pacific: ENSO versus AO. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 84: 221-241.