

10

Impacto del cambio climático sobre el mar peruano: tendencias actuales y futuras

Gutierrez D.¹

Echevin V.^{2,3,4}

Tam J.^{1,2}

Takahashi K.⁵

Bertrand A.^{2,3}



¹ Instituto del Mar del Perú - IMARPE, Lima, Perú

² Laboratoire Mixte International Dynamiques du Système du Courant de Humboldt – LMI DISCOH (IRD France, IMARPE Perú)

³ Institut de Recherche pour le Développement - IRD

⁴ Laboratoire d’Océanographie et du Climat : expérimentations et approches numériques – LOCEAN (CNRS, IRD, Museum National d’Histoire Naturelle, Université Paris 6), Paris, France

⁵ Instituto Geofísico del Perú - IGP, Lima, Perú

⁶ Ecosystèmes Marins Exploités – EME (IFREMER, IRD, Université Montpellier 2), Sète, France

RESUMEN

Español

El Sistema de la Corriente de Humboldt es uno de los ecosistemas de producción de peces más eficientes del mundo gracias a la abundancia de fitoplancton que aflora con aguas frías y ricas en nutrientes hacia las capas iluminadas superficiales del océano. Se ha observado que la temperatura de la capa superficial del mar muestra un enfriamiento desde hace más de 150 años, lo cual sería favorable al ecosistema. Las investigaciones actuales buscan entender si la tendencia de enfriamiento observada en la segunda parte del siglo 20 es natural o forzada por el cambio climático. También buscan elaborar diferentes escenarios posibles de cambio climático futuro y sus impactos sobre el ecosistema de afloramiento costero del Perú y sus recursos pesqueros. Para obtener proyecciones más acertadas, los modelos utilizados actualmente para simular cambios regionales futuros deben mejorar la integración de varios efectos, tanto físicos como bioquímicos (como los vientos costeros y la desoxigenación) y tener una resolución espacial más fina para representar mejor los procesos costeros en las zonas claves del afloramiento.

Francés

Impact du changement climatique sur la mer au Pérou: tendances actuelles et futures

Le système du Courant de Humboldt est l'un des écosystèmes de production de poissons parmi les plus efficaces au monde grâce à l'abondance de phytoplancton qui affleure dans les eaux froides et riches en nutriments des couches superficielles illuminées de l'océan. Un refroidissement de la couche superficielle de l'océan depuis plus de 150 ans a été observé, lequel serait favorable à l'écosystème. Les recherches actuelles cherchent à comprendre si la tendance au refroidissement observée dans la deuxième moitié du 20ème siècle est naturelle ou forcée par le changement climatique. Elles cherchent également à élaborer différents scénarios de changement climatique futur et ses impacts sur les écosystèmes d'affleurement côtier au Pérou et les ressources halieutiques. Pour obtenir des projections plus justes, les modèles utilisés actuellement pour simuler les changements régionaux futurs doivent améliorer l'intégration de plusieurs facteurs, tant physiques que biochimiques (comme les vents côtiers et la désoxygénation) et avoir une résolution spatiale plus fine pour mieux représenter les processus côtiers dans les zones clé d'affleurement.

Inglés

Climate change impact on the Peruvian sea: current trends and future

The Humboldt Current is one of the most efficient fish production ecosystems of the world, thanks to the abundance of phytoplankton that surfaces with cold water and rich nutrients to the illuminated surface of the ocean. It has been observed that the temperature of the sea surface shows cooling for more than 150 years ago, which would be favorable the ecosystem. Current research seeks to understand whether the cooling trend observed in the second half of the 20th century is natural or forced by climate change. They also seek to develop possible future scenarios of climate change impacts on the coastal ecosystem of Peru and its fishery resources. For more accurate projections, models currently used to simulate future regional changes should improve the integration of various effects, both physical and biochemical (such as coastal winds and deoxygenation), and have a finer spatial resolution to better represent coastal processes in key areas of outcrop.

INTRODUCCIÓN

El mar peruano es uno de los más productivos del mundo. Su riqueza está vinculada a los vientos costeros que soplan a lo largo de gran parte de la costa: las corrientes forzadas por el viento generan localmente un afloramiento costero de aguas profundas, frías y ricas en nutrientes. Gracias a la presencia de luz disponible para la fotosíntesis en las capas superficiales del océano, el fitoplancton abunda en esta zona. El fitoplancton está compuesto por micro-organismos vegetales que son la base de la cadena alimentaria marina, lo cual origina un ecosistema marino rico en recursos pesqueros ampliamente explotados [1]. Los recursos de este ecosistema marino, consisten principalmente en abundantes peces pelágicos, que viven cerca de la superficie, como la anchoveta, la sardina, el jurel y la caballa. La abundancia de estos peces presenta grandes fluctuaciones que ocurren a escalas de tiempo interanuales en relación con El Niño y La Niña, pero también a escalas decenales y centenales en relación a variaciones climáticas que abarcan todo el Pacífico [2,3].

El ecosistema de afloramiento peruano forma parte del Sistema de la Corriente de Humboldt (SCH) y es análogo a otros grandes ecosistemas de afloramiento del mundo, como los sistemas de California, de Canarias y de Benguela. Pero el ecosistema peruano es mucho más eficiente en términos de producción de peces [1]. Además, a diferencia de los otros sistemas, el mar peruano tiene la particularidad de tener aguas muy pobres en oxígeno cerca de la superficie, lo que restringe el hábitat de las numerosas especies marinas que necesitan oxígeno para su metabolismo [4].

Hace casi 25 años, un estudio de Bakun [5], basado en observaciones de viento durante varias décadas desde barcos a lo largo del Perú y en otros sistemas de afloramiento, sugirió que los vientos paralelos a la costa se podrían intensificar en respuesta al calentamiento global y de ese modo, intensificar el afloramiento costero. Si bien ahora sabemos que este resultado, para el caso del Perú, fue exagerado por la falta de correcciones a los datos originales de viento [6,7], se ha observado una fuerte disminución de la temperatura superficial medida en diferentes puertos de la costa central y sur del Perú a partir de inicios de la década de los años 1980s (en algunas estaciones a partir de 1950). También se ha observado que la temperatura de la capa superficial del océano, derivada gracias a mediciones en el sedimento frente a Ica, muestra un enfriamiento desde 1860, siendo esta tendencia mayor desde 1950 [8]. Esos elementos indicarían que el flujo de aguas profundas hacia las capas superficiales de los últimos 30 años podría transportar aguas más profundas, frías y ricas en nutrientes que anteriormente. El enfriamiento de estos últimos 30 años es coherente con lo reportado para la costa norte de Chile [9], pero aún no existe consenso en si este enfriamiento es resultado de la variabilidad climática natural o del cambio climático generado por la actividad humana, ni sobre cuál es el mecanismo físico que lo originó.

Una manera alternativa y complementaria para estudiar y entender los procesos físicos, químicos y biológicos que controlan el cambio climático en zonas de afloramiento es el modelado numérico: utilizando potentes herramientas de cálculo, diferentes grupos

10 Impacto del cambio climático sobre el mar peruano: tendencias actuales y futuras

científicos producen simulaciones que representan las características físicas y bioquímicas de las masas de aguas, la circulación y su variabilidad temporal, al nivel del océano global. Estas simulaciones sirven para validar o refutar modelos conceptuales, propuestos a partir de observaciones o derivados de teorías anteriores. Esos modelos tienen un nivel de realismo que puede ser evaluado utilizando datos medidos durante cruceros oceanográficos y sensoramiento remoto, entre otros. Además, los modelos que participan en el proyecto CMIP5 (el quinto proyecto de comparación de modelos acoplados océano-atmósfera) proporcionan las proyecciones futuras, según diferentes escenarios de emisión de gases de efecto invernadero, para el siguiente siglo. Estas proyecciones son analizadas por científicos del Panel Intergubernamental en Cambio Climático (IPCC) de las Naciones Unidas. Lamentablemente, en las zonas de afloramiento como el Sistema de la Corriente de Humboldt, la estructura espacial de fina escala del viento es sumamente importante para la dinámica, y la mayoría de los modelos climáticos de gran escala dividen el espacio geográfico en mallas gruesas, es decir un nivel de resolución que no permite representar los procesos físicos adecuadamente. La alternativa más práctica es desarrollar modelos regionales de alta resolución [10] en zonas más localizadas, forzadas en sus límites por las condiciones brindadas por los resultados de los

modelos globales tipo IPCC, con el fin de representar mejor los procesos clave en esas zonas.

Preguntas claves

Dada la alta variabilidad temporal de los recursos en el sistema de afloramiento del Perú, ¿sería la tendencia observada en la segunda parte del siglo 20 natural o forzada por el cambio climático? Además, ¿cuáles son los escenarios posibles para el futuro? Un afloramiento más fuerte, forzado por el viento costero, podría traer más nutrientes a la superficie, pero el aumento en la turbulencia podría sacar al ecosistema de su rango óptimo y ser menos productivo en peces [11]. Al contrario, si el afloramiento es forzado no por vientos costeros sino por cambios en la circulación ecuatorial, se presentaría un afloramiento más eficiente de aguas frías y fértiles, no tendría el problema de la turbulencia y se esperaría mayor productividad primaria, es decir más plancton y más recursos pesqueros. Por otro lado, si el afloramiento fuera más débil o si su aumento fuera menor que lo necesario para amortiguar los cambios en la estratificación de la columna de agua por el calentamiento global, esperaríamos menos productividad con consecuencias negativas para la actividad pesquera. Además, es importante poder determinar ¿cuáles son los impactos sobre la concentración de oxígeno en las aguas subsuperficiales del Sistema de la Corriente de Humboldt, y consecuentemente sobre el hábitat de las especies?

El flujo de aguas profundas hacia las capas superficiales de los últimos 30 años podría transportar aguas más profundas, frías y ricas en nutrientes que anteriormente

Los últimos años han presentado una predominancia de los eventos llamados "El Niño del Pacífico Central", también conocido como "El

10 Impacto del cambio climático sobre el mar peruano: tendencias actuales y futuras

Niño Modoki” [12], que no presentan un aumento significativo en la temperatura del agua cerca de la costa del Perú, sino que el máximo calentamiento se observa en el Pacífico Ecuatorial Central. Aunque pocos estudios existen sobre este tema, un estudio utilizando simulaciones numéricas de la zona peruana durante el período 1950-2000 sugiere que la disminución de la temperatura superficial cerca de la costa podría estar asociada a una menor frecuencia de las fuertes anomalías de temperatura cerca de Perú debido justamente al desplazamiento de la variabilidad de El Niño hacia el Pacífico central [13]. De esta manera, las anomalías de temperatura han sido menos fuertes que anteriormente cerca de la costa del Perú, creando un efecto de enfriamiento a largo plazo. Según este escenario, el papel del viento local no sería clave. Por otro lado, la intensificación multidecadal (durante varias décadas) reciente de los vientos del este en el Pacífico Ecuatorial (conocidos como la parte baja de la circulación de Walker) [14] también podría explicar el enfriamiento observado frente al Perú. El enfriamiento podría propagarse hacia el este a lo largo del ecuador y hacia el sur a lo largo de la costa del Perú en forma de ondas oceánicas frías, sin necesidad de cambios en los vientos costeros. Además de los mecanismos físicos, trabajos con modelos biogeoquímicos están en curso para tratar de entender los procesos responsables del aumento de la productividad observado cerca de Pisco.

Por otra parte, numerosos trabajos recientes se han realizado sobre proyecciones para períodos de tiempo en el futuro, por ejemplo el periodo 050-2100. Esas proyecciones dependen bastante de los modelos del IPCC, que en su mayoría tienen problemas

en reproducir correctamente el clima del Pacífico Sudeste, y de los escenarios de emisión de dióxido de carbono. Si bien los modelos globales concuerdan en un aumento del viento de gran escala frente a Chile Central, frente al Perú los resultados son menos asegurados [15] (Fig.a). Como el viento es el primer factor forzante del afloramiento costero y los efectos de pequeña escala pueden ser críticos, los primeros trabajos han sido focalizados sobre el cambio de viento costero propiamente. Para esto, una hipótesis fuerte es que los métodos estadísticos y dinámicos, calibrados con

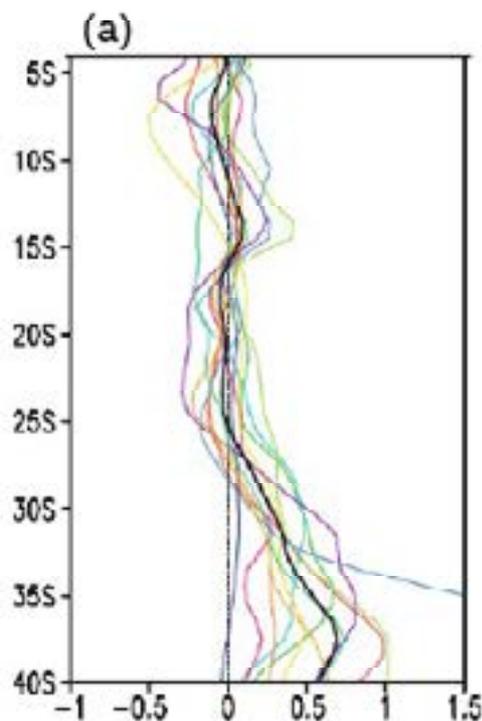


Figura a: Proyecciones del viento costero en invierno a lo largo de la costa del Sistema de la Corriente de Humboldt según los modelos globales de clima para el escenario climático extremo cuadruplicando la concentración de CO₂ en la atmósfera. Las líneas de color indican los diferentes modelos climáticos y la línea negra el promedio de los modelos. La línea naranja indica el modelo IPSL-CM4 que fue utilizado en los trabajos de regionalización [15].

10 Impacto del cambio climático sobre el mar peruano: tendencias actuales y futuras

observaciones del clima presente, se pueden aplicar para el futuro. Los primeros resultados con un método estadístico muestran que, según diferentes escenarios de cambio climático, el viento a lo largo del Perú no debería cambiar mucho en el futuro [16,17] a pesar de que el viento aumente en la región central de Chile, de acuerdo con las observaciones recientes. Estos resultados han sido confirmados posteriormente con un modelo atmosférico de alta resolución para la zona peruana [15]. Por otro lado, si bien el proceso físico atmosférico para explicar el aumento futuro de viento costero frente a Chile Central sería el desplazamiento del Anticiclón del Pacífico Sur hacia el Polo, que incrementa la fuerza de presión a lo largo de la costa controlando el viento [18], frente al Perú y norte de Chile, existe competencia entre este proceso y el aumento de la lluvia frente a la costa norte del Perú, que se asocia al debilitamiento del viento [15]. Además, en estos estudios basados en modelos, la hipótesis de que el aumento en el contraste de temperatura entre la tierra y el mar controla el cambio en el viento [5] no se verifica. En conclusión, las proyecciones futuras del viento en la costa del Perú basadas en los resultados de unos modelos del IPCC no anuncian grandes cambios. En consecuencia, otros mecanismos físicos oceánicos podrían ser más importantes.

Para estudiar el impacto regional del cambio climático en la circulación oceánica y la productividad en plancton, la base de la cadena trófica, se necesita acoplar los modelos físicos regionales con modelos biogeoquímicos representando el ciclo del carbono, y el oxígeno. Condiciones de borde del modelo global IPSL-CM4, uno de los escenarios seleccionado por su

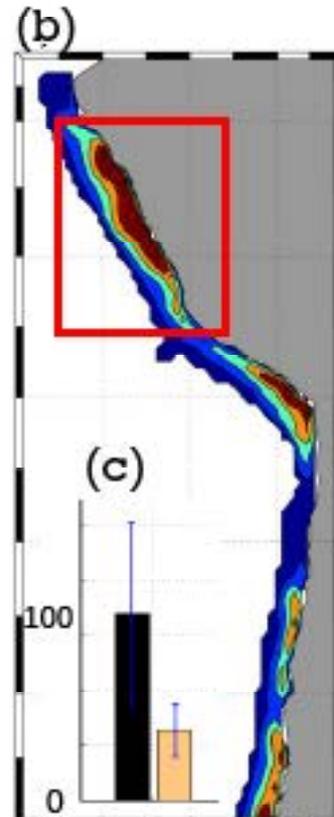


Figura b y c: mapa de las zonas de concentración de larvas de anchoveta cerca de la costa (en color rojo) simuladas con un modelo dinámico [21].

buena representación de la productividad primaria en el Pacífico Sudeste [19], han sido utilizadas para representar el afloramiento costero, los numerosos remolinos debidos a la inestabilidad de las corrientes [20] y las variaciones del plancton en la zona costera [21]. Este primer trabajo de modelado de cambios regionales de productividad muestra una fuerte disminución de la biomasa fitoplanctónica en la zona costera, debida a un empobrecimiento de las aguas profundas generado por cambios de circulación de gran escala. Esta disminución no estaría compensada por un afloramiento más fuerte

10 Impacto del cambio climático sobre el mar peruano: tendencias actuales y futuras

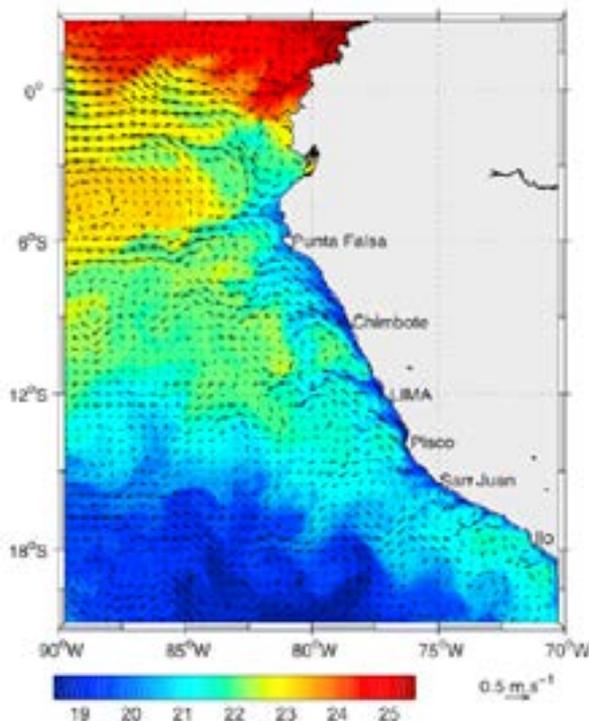


Figura d: variaciones de la tasa de supervivencia de larvas (%) en la zona peruana (indicada por el cuadro rojo) en el clima presente (negro) y en el clima futuro (naranja) con el escenario climático cuadruplicando la concentración de CO₂ en la atmósfera [21].

debido al aumento de viento como en Chile [18] o en California [22]. Las consecuencias sobre las condiciones de vida de la anchoveta serían negativas, con una reducción drástica del rango de hábitat favorable a las larvas [21] (Figs. b,c). Este tipo de modelado, que representa el primer esfuerzo por acoplar diferentes modelos atmosféricos, oceánicos y biológicos regionales de la costa peruana para estudiar el impacto de escenarios climáticos, debe seguir mejorando para confirmar esos resultados muy pesimistas. Cabe indicar además que en las condiciones actuales, la productividad del plancton del mar peruano es mayor en

verano, cuando la insolación aumenta, la estratificación es más intensa y los vientos más débiles. Por lo tanto, los escenarios futuros de la productividad del mar peruano deben mejorar la integración de los efectos no lineales combinados entre insolación, afloramiento y mezcla sobre la floración fitoplanctónica, en espacio y en tiempo.

Oxígeno y cambio climático

En cuanto al impacto del cambio climático reciente y futuro en la evolución de la Zona de Mínimo de Oxígeno (ZMO) en el Sistema de la Corriente de Humboldt, los resultados de los modelos no son muy claros. Si las observaciones históricas en la segunda mitad del siglo 20 muestran una ligera intensificación en el Pacífico Ecuatorial Este [23] y una somerización de la Zona de Mínimo de Oxígeno en la costa peruana (se acerca a la superficie) [4], los modelos globales no convergen en mostrar una tendencia similar ni en el pasado reciente [24], ni en las proyecciones para el futuro [25]. Pero se pueden identificar procesos físicos y biogeoquímicos cuyos efectos en el oxígeno pueden compensarse. Por ejemplo, el aumento de la estratificación en densidad, debida al calentamiento de aguas superficiales, tiende a disminuir la mezcla de aguas profundas pobres en oxígeno con las aguas someras (aguas de poca profundidad) en contacto con el atmósfera y con alta concentración de oxígeno [26]. Pero este mismo efecto reduce también el flujo de nutrientes en la capa iluminada, y potencialmente la producción de materia orgánica [27]. Por lo tanto, el consumo de oxígeno en la Zona de Mínimo de Oxígeno durante la descomposición de la materia orgánica podría

10 Impacto del cambio climático sobre el mar peruano: tendencias actuales y futuras

disminuir y así aumentar la concentración en oxígeno de las aguas sub-superficiales. Además, fluctuaciones en la oxigenación dentro de la Zona de Mínimo de Oxígeno dependen de las corrientes en la zona ecuatorial que transportan aguas oxigenadas hacia el Perú. Esas corrientes no son suficientemente bien representadas en los modelos climáticos [28,29], lo que aumenta la incertidumbre. Finalmente un estudio reciente enseñó que la mayoría de las interacciones tróficas ocurren en pequeñas estructuras físicas en la oxiclina (el límite entre aguas superficiales oxigenadas y aguas desoxigenadas) que crean oasis efímeros para la vida marina, desde el plancton hasta los depredadores superiores [30]. Si la estratificación del océano aumenta, el número y la profundidad de estas pequeñas estructuras físicas podría disminuir, afectando las interacciones biológicas con consecuencias negativas para los recursos [30].

Estudios futuros

Muchas preguntas quedan abiertas después de estos primeros estudios sobre el impacto posible del cambio climático en el afloramiento peruano. Las tendencias del pasado reciente no han sido bien explicadas, particularmente el papel del viento costero, y más simulaciones con nuevos modelos, más realistas, son necesarias para entender mejor los procesos en juego. Particularmente, aunque las interacciones entre el océano y la atmósfera son explícitas en los modelos de clima globales, no han sido tomadas en cuenta en los modelos regionales. En consecuencia todavía no se puede estimar precisamente el efecto de estas interacciones en la intensidad de remolinos costeros, que también participan en el transporte de nutrientes

entre zonas profundas y la capa superficial y afectan la productividad planctónica [31,32]. Las características de las tendencias futuras de los remolinos de meso-escala también dependen de la resolución espacial de los modelos regionales, que hasta ahora ha sido limitada a ~ 10-20 km en las proyecciones climáticas. Además, es necesario aumentar la resolución espacial de los modelos atmosféricos para representar mejor las variaciones del viento a lo largo y a través de la zona costera, que tiene una fuerte influencia sobre la estructura del afloramiento y de las corrientes costeras [33,34]. En consecuencia, las próximas etapas para estudiar el impacto del cambio climático sobre el ecosistema peruano deberían incluir el desarrollo de modelos de resolución espacial más fina, tomando en cuenta el acoplamiento a escalas finas entre el océano y la atmósfera, y correr esos modelos regionales de área limitada con condiciones de borde de no solamente uno, sino varios modelos globales de clima. Esto permitirá estimar un rango de incertidumbre debido a los errores de los modelos globales sobre las proyecciones. Por otro lado, los modelos de ecosistema utilizados hasta ahora [21] han sido bastante simplificados y generalmente representan la dinámica de solamente una especie, con un ciclo de vida simplificado sin interacciones con otros niveles tróficos. En el futuro tendremos que modelar el ecosistema de manera más fina, con modelos de ecosistema más complejos [35]. Finalmente este esfuerzo de modelado debe ser acompañado por un aumento de las observaciones in situ. En efecto, un monitoreo amplio de las condiciones es necesario para seguir la evolución fina del sistema, estudiar los procesos y nutrir los modelos. El camino para determinar exactamente cual serán los impactos

10 Impacto del cambio climático sobre el mar peruano: tendencias actuales y futuras

del cambio climático en el ecosistema marino es todavía largo. Sin embargo ya que nos encontramos actualmente en un periodo altamente productivo en recursos pesqueros comparado con los últimos siglos [3] es poco probable que el futuro sea tan favorable.

AGRADECIMIENTOS

Reconocimientos a todas las personas que han participado en los proyectos dedicados al cambio climático en el Perú en el marco de la cooperación IRD-Perú durante el proyecto de LMI DISCOH (2009-2014)

REFERENCIAS

- 1 - Chavez FP, Bertrand A, Guevara-Carrasco R, Soler P, Csirke J (2008) The northern Humboldt Current System: brief history, present status and a view towards the future. (editorial). *Progress in Oceanography*, 79, 95–105.
- 2 - Chavez, F.P., Ryan, J., Lluch-Cota, S.E., Niqun, M., 2003. From anchovies to sardines and back: multidecadal change in the Pacific Ocean. *Science* 299, 217–221.
- 3 - Gutierrez D., Sifeddine A., Field D. B., Ortlieb L., Vargas G., Chavez F. P., Velazco F., Ferreira V., Tapia P., Salvattecchi R., Boucher H., Morales M. C., Valdes J., Reyss J. L., Campusano A., Boussafir M., Mandeng Yogo M., Garcia M., Baumgartner T., Rapid reorganization in ocean biogeochemistry off Peru towards the end of the Little Ice Age. *Biogeosciences*, 2009, 6 (5), p. 835-848. ISSN 1726-4170
- 4 - Bertrand A, Chaigneau A, Peraltilla S, Ledesma J, Graco M, Monetti F, Chavez FP (2011) Oxygen: a Fundamental Property Regulating Pelagic Ecosystem Structure in the Coastal Southeastern Tropical Pacific. *PLoS ONE*, 6, e29558.
- 5 - Bakun, A., 1990. Global climate change and intensification of coastal ocean upwelling. *Science* 247, 198–201
- 6 - Cardone V, Greenwood JG, Cane MA, 1990. On trends in historical marine wind data. *J. Climate* 3, 113-127
- 7 - Tokinaga, H. & Xie, S.-P. (2011) Wave- and Anemometer-Based Sea Surface Wind (WASWind) for Climate Change Analysis. *J. Climate*, 24 (1), 267-285
- 8 - Gutierrez D., Bouloubassi I., Sifeddine A., Purca S., Goubanova K., Graco M., Field D., Mejanelle L., Velazco F., Lorre A., Salvattecchi R., Quispe D., Vargas G., Dewitte B. and Ortlieb L., 2011a: Coastal cooling and increased productivity in the main upwelling zone off Peru since the mid-twentieth century. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L07603, doi:10.1029/2010GL046324.
- 9 - Falvey M, Garreaud R (2009) Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979–2006). *J Geophys Res* 114:D04102. doi:10.1029/2008JD010519
- 10 - Penven, P., V. Echevin, J. Pasapera, F. Colas, and J. Tam (2005), Average circulation, seasonal cycle, and mesoscale dynamics of the Peru Current System: A modeling approach, *J. Geophys. Res.*, 110, C10021, doi:10.1029/2005JC002945.

10 Impacto del cambio climático sobre el mar peruano: tendencias actuales y futuras

11 - Cury, P., Roy, C. (1989). Optimal environmental window and pelagic fish recruitment success in upwelling areas. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 46(4), 670-680.

12 - Lee, T., and M. J. McPhaden (2010), Increasing intensity of El Niño in the central-equatorial Pacific, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L14603, doi:10.1029/2010GL044007.

13 - Dewitte, B., B. Dewitte, J. Vasquez, K. Goubanova, S. Illig, K. Takahashi, G. Cambon, S. Purca, D. Correa, D. Gutierrez, A. Sifeddine, L. Ortlieb, 2012. Change in El Niño flavours over 1958–2008: Implications for the long-term trend of the upwelling off Peru. *Deep Sea Research*, dx.doi.org/10.1016/j.dsr2.2012.04.011.

14 - L'Heureux M., Lee S., Lyon B., 2013. Recent multidecadal strengthening of the Walker circulation across the tropical Pacific. *Nature Clim. Change* 3, 571-576.

15 - Belmadani, A., Echevin V., Codron F., Takahashi K., Junquas C., 2013. What dynamics drive future wind scenarios for coastal upwelling off Peru and Chile?. *Climate Dynamics*, doi:10.1007/s00382-013-2015-2

16 - Goubanova K. and C. Ruiz Vasquez, 2010: Impact of climate change on wind-driven upwelling off the coasts of Peru-Chile in a multi-model ensemble. "Climate variability in the tropical Pacific: mechanisms, modeling and observations" (edited by Y. du Penhoat, A. V. Kislov), Moscow, Maks-Press, p. 194-201.

17 - Goubanova K, Echevin V, Dewitte B, Codron F, Takahashi K, Terray P, Vrac M (2011) Statistical downscaling of sea-surface wind over the Peru–Chile upwelling region: diagnosing the impact of climate change from the IPSL-CM4 model. *Climate Dynamics*, 36, 1365–137

18 - Garreaud R, Falvey M, 2009. The coastal winds off western subtropical South America in future climate scenarios. *Int J Climatol* 29 (4), 543–554, doi:10.1002/joc.1716

19 - Steinacher M, Joos F, Frölicher T et al. (2010) Projected 21st century decrease in marine productivity: a multi-model analysis. *Biogeosciences*, 7, 979–1005.

20 - Echevin, V., K. Goubanova, A. Belmadani, and B. Dewitte, 2012. Sensitivity of the Humboldt Current system to global warming: A downscaling experiment of the IPSL-CM4 model, *Clim. Dyn.*, 38(3–4), 761–774, doi:10.1007/s00382-011-1085-2.