

# La Red ARGO para mejorar la monitorización de la circulación oceánica en el mar del Perú



**Dr. Kobi Mosquera**  
INVESTIGADOR CIENTÍFICO DEL INSTITUTO  
GEOFÍSICO DEL PERÚ

*Doctor en oceanografía Física de la Universidad Sabatier de Francia , magister en Física- mención Geofísica y físico de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM). Actualmente es investigador científico en la Subdirección de Ciencias de la Atmósfera e Hidrósfera del IGP, y es representante del IGP en la Comisión Multisectorial encargada del Estudio Nacional del Fenómeno El Niño (ENFEN). Asimismo, su investigación se centra en el estudio de las ondas Kelvin oceánicas y su impacto en la dinámica y termodinámica del Pacífico Ecuatorial.*



**Dra. Ivonne Montes**  
INVESTIGADORA CIENTÍFICA DEL  
INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERÚ



**Boris Dewitte, Ph.D**  
INVESTIGADOR EN EL CENTRO DE  
ESTUDIOS EN ZONAS ÁRIDAS (CEAZA)

## INTRODUCCIÓN

La ciencia, mediante el uso del método científico, logra obtener resultados que permiten acercarnos a un entendimiento de la naturaleza y sus respectivos procesos. El objetivo final de entender la naturaleza es, en algún momento, modelarla y, finalmente, predecir su evolución hacia el futuro. Para alcanzar este objetivo la ciencia requiere, continuamente, corroborar los modelos con datos observacionales. En el caso de la ciencia asociada a entender el comportamiento del océano, en la actualidad, la investigación científica emplea datos observacionales (es decir, datos que han sido colectados de manera directa, o indirecta, mediante instrumentos de observación, como por ejemplo: termistores, correntímetros, radiómetros,

entre otros, instalados en diferentes plataformas, por ejemplo, barcos, anclajes, otros), así como de información obtenida del modelado numérico principalmente de los llamados Modelos Oceánicos de Circulación General (OGCM, por sus siglas en inglés). Si bien estos últimos son herramientas muy importantes, siempre requieren de información observacional para ser validados. No está demás indicar que los OGCM requieren de supercomputadores que le permitan realizar los cuantiosos cálculos de los experimentos.

Para el caso particular del mar peruano, en lo que respecta a los datos observacionales, entre los años 70 y 80, la colecta de datos por medio de barcos de oportunidad e investigación fueron el medio más frecuente para colectar información oceanográfica y conocer así sus características, desde la superficie hacia

el fondo en zonas específicas, principalmente motivado por el boom pesquero (Strama et al., 2010a; Chavez et al., 2008). Hay que resaltar también que en los años 90 se desarrolló, a nivel internacional, un sistema de observación en el Pacífico Tropical, la red TAO (Tropical Atmosphere Ocean Project, MacPhaden et al., 1998), el cual, debido en parte a la exposición al vandalismo de las flotas de pesca industrial internacionales, no incluyó el extremo del Pacífico Oriental, i.e. al este de 95°W, punto en donde se encuentran las boyas más orientales de ese sistema de observación. Este arreglo de boyas obtiene información entre los 10°S y 10°N y hasta los 500 metros de profundidad aproximadamente. Afortunadamente, en los últimos treinta años, una serie de satélites dedicados a la observación meteorológica y oceanográfica han generado una amplia base de datos para monitorizar y estudiar las características superficiales del mar, así como los procesos de interacción entre el océano y atmósfera, tal como el fenómeno El Niño. Más recientemente, el uso de vehículos y/o plataformas autónomas (por ejemplo, los *gliders*, flotadores) vienen proporcionando mayor información oceanográfica por debajo de la superficie, aunque, en nuestra región, en la actualidad, no se cuenta con suficientes instrumentos de este tipo.

Por tanto, al hacer un recuento de los datos disponibles hasta la actualidad en el mar peruano, se llega a la conclusión que la información es muy escasa, principalmente, por debajo de la superficie y, peor aún, con baja resolución vertical y temporal. Esta falencia no permite tener una visión completa de esta región, grandemente conocida por su alta productividad pesquera, que no sólo interviene en la economía nacional sino en el mundo. Es importante señalar que la alta productividad se debe a su conexión con la atmósfera, la que mantiene el proceso dinámico denominado 'Afloramiento Costero', en donde, los vientos alisios del sudeste, que "soplan" de manera permanente hacia el norte, provocan el ascenso de aguas de regiones subsuperficiales frías y ricas en nutrientes.

Es importante indicar también que uno de los factores relevantes que modulan la dinámica en la costa peruana, de manera remota, es la presencia de la onda Kelvin ecuatorial, ya sea del tipo de afloramiento (*upwelling*) o hundimiento (*downwelling*). Esta perturbación que se genera en el Pacífico ecuatorial, principalmente en la zona occidental y central, afecta la presión (el nivel del mar) y el campo de corrientes (Mosquera, 2014) en la franja ecuatorial e incluso la costa americana. Asimismo, dependiendo de su tipo, esta onda puede producir incrementos o disminución de la temperatura por medio de procesos "advectivos". La llegada de la onda Kelvin de hundimiento durante el verano puede ser crítico pues podría incrementar la Temperatura Superficial del Mar (TSM) al límite en el cual es más probable que se desarrollen precipitaciones muy fuertes en la costa norte del Perú (Woodman y Takahashi, 2014). Frente a esto, monitorizar las ondas Kelvin oceánicas, tanto a una escala de la cuenca del Pacífico como a lo largo de

la costa americana, es de suma importancia, por lo que se requiere contar con información de alta resolución vertical y temporal para entender mejor sus impactos.

La poca información por debajo de la superficie del mar del Perú para realizar investigación científica también puede limitar el entendimiento de fenómenos que se dan en esta región, tal como El Niño. Como se sabe, El Niño es la fase cálida del proceso de interacción océano-atmósfera denominado ENSO (*El Niño – Southern Oscillation*); donde se evidencia un calentamiento anómalo de la zona ecuatorial pudiendo estar localizado en el Pacífico Central o Pacífico Este (e.g., Takahashi et al., 2011). El fenómeno El Niño, según el clásico modelo conceptual, está íntimamente relacionado a la onda Kelvin ecuatorial, la cual ha sido considerada, en su periodo intraestacional, como mecanismo "disparador" de dicho fenómeno y, en su forma interanual, como parte de la dinámica determinista (Zebiak and Cane, 1987). La onda Kelvin transmite la energía del Pacífico Central al Pacífico Este y puede incrementar la TSM en la costa americana. Sin embargo, a inicios del año 2017, la TSM experimentó un incremento repentino de la TSM que provocó lluvias intensas, desborde de ríos, huacos y, lo peor, muertes (INDECI, 2017). Este evento ha sido denominado El Niño Costero 2017 y, según las últimas investigaciones e informes, no fue provocado, al menos en su inicio, por la presencia de ondas Kelvin ecuatoriales (ENFEN 2017; Takahashi et al., 2018), por lo que no pudo ser evidenciado con meses de antelación (ENFEN, 2017). Más bien, este evento, el que pudo haberse iniciado por anomalías del viento zonal en el extremo oriental del Pacífico en enero de 2017 (Takahashi et al., 2018; Hu et al., 2018), o por forzamientos remotos de la región de Oceanía (Garreaud, 2018), se compara con el que se dio en el verano de 1925; el cual tuvo como escenario, según la poca información de esa época, la presencia repentina de vientos del norte en la zona ecuatorial, así como la intensificación de la segunda banda de la Zona de Convergencia Intertropical (Takahashi y Martinez, 2017). Sin embargo, a pesar de estas primeras investigaciones, se requiere aún mayor estudio para entender cómo se desarrolló dicho fenómeno a lo largo de la columna vertical del océano.

Otro proceso regional de crucial importancia para el desarrollo de la biodiversidad marina, así como para el clima de la región y el planeta es la denominada Zona Mínima de Oxígeno (OMZ, por siglas en inglés) del Pacífico Este. Esta región que se extiende entre 50 y 1000 m de profundidad está caracterizada por aguas con bajo contenido de oxígeno, como resultado de la alta exportación de materia orgánica acompañada de una ventilación lenta (e.g., Paulmier and Ruiz-Pino, 2009). Su importancia radica en que representan una barrera respiratoria para las especies marinas e interviene en los ciclos biogeoquímicos de los nutrientes en el agua de mar. Esto pueden afectar la biodiversidad marina (por ejemplo en su función y estructura) y la producción de gases de efecto invernadero. A nivel global, estas zonas, asociadas a las áreas más productivas del planeta (tales

como los Sistemas de Humboldt, California, Canarias, Benguela), han registrado una expansión (es decir una reducción en su contenido de oxígeno) tanto en zonas oceánicas como zonas costeras asociada al cambio climático (Stramma et al., 2010b), lo cual podría tener consecuencias negativas sobre la biodiversidad marina y el calentamiento global (Breitburg et al., 2018). En el caso particular del Pacífico Este, como se ha mencionado antes, esta zona está altamente influenciada por El Niño, lo cual podría promover cambios en la productividad biológica, en las tasas de descomposición de materia orgánica, en el consumo de oxígeno disuelto, en la disponibilidad de nutrientes, en la producción y en la liberación de gases de efecto invernadero, entre otros. Por lo que, es sin duda de crucial importancia monitorizar y entender los procesos dinámicos asociados a su desarrollo, mantenimiento y efectos.

Estas preguntas científicas de mayor importancia para el Perú empujan a mejorar la red de observaciones, la cual puede ahora contar con instrumentos con capacidad de medir variables oceanográficas en alta resolución vertical y temporal. El desafío y objetivo es entender mejor la dinámica y termodinámica del mar peruano, así como comprobar modelos conceptuales de los fenómenos que se dan en esta región.

## SOBRE LOS FLOTADORES ARGO

Una alternativa instrumental, de bajo costo (ya que no necesita de un mantenimiento), son los denominados flotadores ARGO. Estos son instrumentos oceanográficos que, a diferencia de las boyas, tienen la característica de obtener información de alta resolución vertical (desde la superficie hasta los 1000 o 2000 metros) y a pesar de no hacerlo de forma continua en el tiempo sino entre 5 y 10 días aproximadamente (dependiendo de la programación que tengan), se acercan a la frecuencia de información que se transmite por el satélite. La información obtenida por este instrumento es principalmente Temperatura, Salinidad, Presión y, en los últimos tiempos, Oxígeno y variables bioquímicas. En la actualidad, existen un gran número de flotadores ARGO que están distribuidos alrededor de los océanos del mundo, gracias a la colaboración de muchos países. Asimismo, los flotadores pueden ser de mucha utilidad para medir las corrientes en las profundidades donde derivan y obtener un campo de velocidades (Lebedev et al., 2007; Katsumata et al., 2010).

Como se ha indicado arriba, los flotadores ARGO son instrumentos sofisticados, que desde su aparición han permitido entender mejor algunos procesos físicos, y en los últimos tiempos bioquímicos, que se dan en el océano. Asimismo, la información de los flotadores, al existir muchos diseminados en el mar, son de suma utilidad para validar la información de los modelos numéricos de circulación general, y asimismo contribuir, mediante la asimilación de datos, en la generación de los productos conocidos como *Reanalysis* e iniciación de los modelos de pronóstico climático. Basta con

ingresar a su página web (<http://www.argo.ucsd.edu/Bibliography.html>) para observar la gran cantidad de trabajos de investigación que se han logrado gracias a estos instrumentos.

Si bien estos instrumentos representan una buena alternativa para tomar datos del océano, al no contar con suficiente energía para modificar su flotabilidad y ascender, termina siendo arrastrada por las corrientes profundas hasta que termine en el fondo marino. Se indica que algunos (muy pocos) pueden llegar a las playas. Por eso se necesita desplegar, de manera regular, flotadores para mantener una densidad suficiente. Hasta la fecha, el objetivo era mantener una densidad de 3 boyas en un área de  $6^{\circ} \times 6^{\circ}$ , sin embargo se está viendo la posibilidad de duplicar esto a partir del año 2020 en la región tropical.

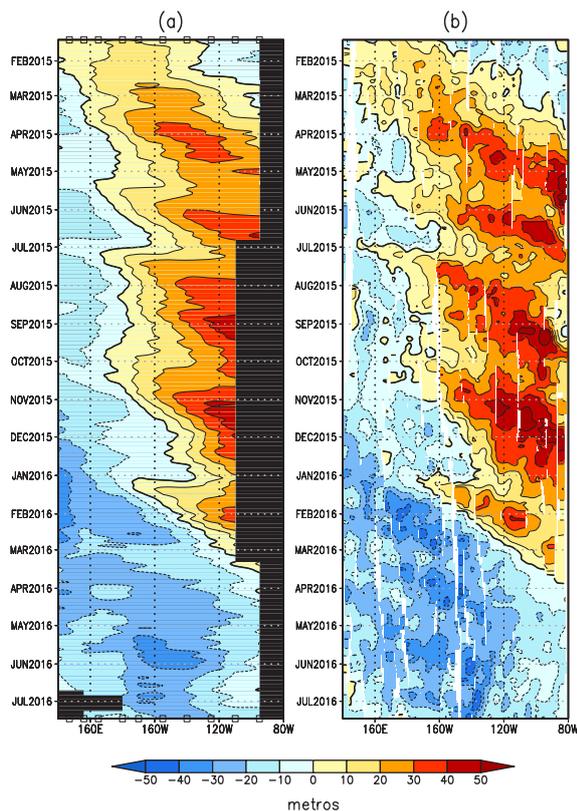
## USO DE LAS DATOS ARGO EN EL IGP

En el Perú, las entidades científicas utilizan la información que obtienen de los flotadores ARGO para el monitoreo de la temperatura subsuperficial del mar. En el caso particular del IGP, desde el año 2014, se viene procesando la información de estos instrumentos para el monitoreo de las ondas Kelvin a lo largo del Pacífico Ecuatorial por medio de la anomalía de la profundidad de la termoclina ecuatorial (Aparco et al., 2014). Esta información permite prever, por ejemplo, el tiempo de llegada de las ondas Kelvin hacia al extremo oriental y, además, qué magnitud podría tener (ver Figura 1). Otro beneficio de este producto es que permite observar, con una mayor cobertura espacial, las ondas Kelvin ecuatoriales, tal como se puede apreciar en la Figura 1, específicamente durante la transición de El Niño 2015-16 hacia La Niña 2016, cuando un tren de ondas Kelvin de afloramiento estuvieron presentes en la franja ecuatorial.

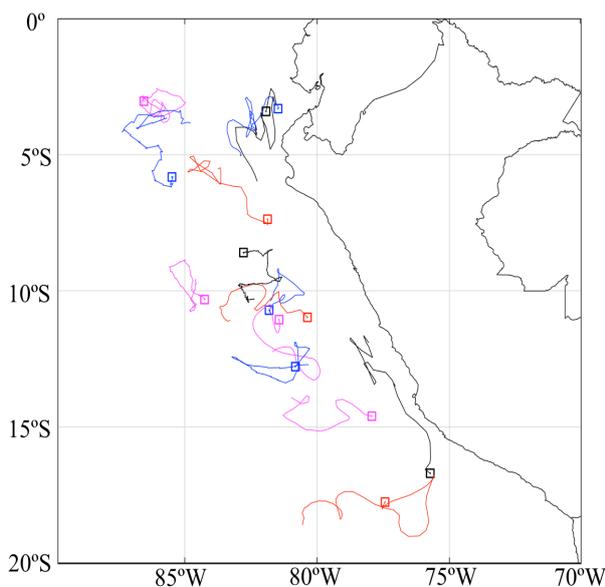
Frente al mar peruano existen flotadores ARGO que en los últimos años han permitido monitorizar las condiciones oceánicas pero lamentablemente, por no contar con un sistema de anclaje terminan alejándose de la costa tal como se puede ver en la Figura 2, la cual indica las trayectorias de este tipo de flotadores desde enero de 2018 hasta la fecha actual.

## FLOTADORES ARGO EN TPOS2020

El proyecto TPOS2020 (*Tropical Pacific Observing System 2020 project*) es una iniciativa de la comunidad científica internacional que tiene como objetivo principal ampliar y rediseñar el sistema de observación océano-atmósfera en la región del Pacífico Ecuatorial, zona en la que, como se sabe, se desarrolla el fenómeno El Niño. Asimismo, lo que impulsó la elaboración de este proyecto es la necesidad de contar con nuevas tecnologías para observar el océano (tales como *sail drone*, *gliders*), que permitan responder la demanda de la comunidad para monitorizar de manera más precisa, tanto en el espacio como en el tiempo, las



**Figura 1.** Diagramas longitud-tiempo, promediados entre 2°S-2°N, de la anomalía de la profundidad de la isoterma de 20°C (termoclina) para a) TAO y b) ARGO. La climatología usada abarca 1981-2010 y es obtenida de GODAS. A información de TAO (ARGO) se le aplicó una media corrida de tres (once) días y se le aplicó dos (ocho) veces un filtro espacio-temporal, con una matriz de convolución  $a_{i,j}$  ( $i=j=1, 2$  y  $3$ ) donde  $a_{1,1}=a_{3,1}=a_{3,3}=0.3$ ;  $a_{1,2}=a_{2,1}=a_{2,3}=a_{3,2}=0.5$  y  $a_{2,2}=1$  con la finalidad de eliminar la alta frecuencia y número de onda grande (ver Aparco et al., 2014). En (a) los cuadrados abiertos en los bordes superior e inferior indican la posición sobre la franja ecuatorial de las boyas TAO en la actualidad.



**Figura 2.** Trayectorias de distintos flotadores ARGO cercanos a la costa peruana desde enero de 2018 hasta la actualidad. Los colores utilizados en cada trayectoria son simplemente para diferenciar el camino recorrido y el cuadrado en el extremo de cada línea indica la última posición registrada. Esta información fue obtenida de la base de datos de IFREMER (L'Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer): <http://www.ifremer.fr/co-dataSelection/?theme=argo>

variabilidades que existen en la región, así como parámetros biogeoquímicos. Este proyecto tiene como objetivo el incrementar la resiliencia del sistema de observación, por ejemplo, para disminuir el riesgo de pérdida de información como consecuencia del deterioro del actual sistema de monitoreo en dicha región, tal como se dio entre los años 2012 y 2014, particularmente en el Pacífico Ecuatorial Oriental. Este tipo de incidentes tiene consecuencia en los sistemas de pronóstico del ENSO y, por lo tanto, afectar en la toma de decisiones oportuna.

Entre las sugerencias que establece TPOS2020 para mejorar el sistema de monitoreo que permita responder a preguntas científicas aún no resueltas, como incrementos de boyas cerca de la línea ecuatorial para contar con mayor información que nos permita entender mejor el afloramiento ecuatorial, o instalar más sensores en las boyas para medir los flujos de calor, etc., TPOS 2020 sugiere también el uso más intensivo de flotadores ARGO para complementar la información que se obtienen en las boyas. La sugerencia consiste en duplicar el número de estos en la región Ecuatorial. Esta información, si bien no es continua en el tiempo, permitirá observar con mayor detalle la estructura vertical del océano.

## FLOTADORES ARGO EN EL PROYECTO SEPICAF

Como se ha indicado párrafos arriba, la OMZ en la región del Pacífico este, por su gran cobertura, es de suma importancia para el planeta por su impacto en la biodiversidad y clima, por lo que la búsqueda de su entendimiento es de relevancia para la sociedad. Si bien se ha avanzado en el entendimiento de la OMZ, aún se requiere responder algunas preguntas como: ¿Cuál es el rol del ENSO, y sus procesos oceánicos asociados (ondas Kelvin), en la variabilidad de la OMZ frente a la costa peruana?

Para poder responder a estas preguntas se requiere recordar que frente a la costa peruana, si bien se cuenta con información histórica obtenida de barcos, aún existe deficiencia en la frecuencia de la toma de datos y la resolución vertical, que no permitirían responder parte de la preguntas formuladas, como lo es el impacto de las ondas Kelvin. Para esto se requiere contar con instrumentos que permitan resolver no solo las variables de temperatura y salinidad, sino también de oxígeno. Solo de esta manera se podrá avanzar en el entendimiento de la OMZ, más aún cuando el planeta se encuentra inmerso en un Cambio Climático y se requiere saber el futuro de los ecosistemas marinos y la retroalimentación con el clima. Esto es el contexto del proyecto SEPICAF (South Eastern Pacific Circulation from ARGO Floats) que entre sus actividades se encuentra el lanzamiento de un conjunto de flotadores ARGO en el Mar Peruano para la obtención de información de alta resolución vertical de temperatura, salinidad y oxígeno. Estos instrumentos también serán de mucha

importancia para el monitoreo de las condiciones oceanográficas, con énfasis en el Fenómeno El Niño.

SEPICAF se ve como una contribución al proyecto TPOS2020, el cual recomienda duplicar la densidad de flotadores ARGO a partir del año 2020. En este sentido, el Perú puede jugar un papel importante en la región para impulsar una dinámica regional que colabore en el mantenimiento de la red de observación en el Pacífico tropical, lo cual ayudará a entender mejor la dinámica oceánica del Mar Peruano.

Una recomendación importante del informe del proyecto TPOS2020 es también mejorar la coordinación regional para poner a disposición de la comunidad científica las observaciones que ya están colectadas por las instituciones de la región. Estos datos pueden complementar la información obtenida de la red ARGO para mejorar el sistema de pronóstico de los impactos de El Niño en la región.

## REFERENCIAS

- Aparco, J., K. Mosquera y K. Takahashi. 2014. Flotadores ARGO para el cálculo de la anomalía de la profundidad de la termoclina ecuatorial (Aplicación Operacional), Boletín Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño", Instituto Geofísico del Perú, Mayo, 1, 5.
- Breitburg, D., A. Levin, A. Oschlies, M. Grégoire, F.P. Chavez, D.J. Conley, V. Garçon, D. Gilbert, D. Gutiérrez, K. Isensee, G. S. Jacinto, K.E. Limburg, I. Montes, S.W.A. Naqvi, G.C. Pitcher, N.N. Rabalais, M.R. Roman, K.A. Rose, B.A. Seibel, M. Telszewski, M. Yasuhara, J. Zhang. 2018. Declining oxygen in the global ocean and coastal waters, *Science*, 359, doi:10.1126/science.aam7240.
- Chavez, F.P., Bertrand, Arnaud., Guevara, Carrasco., R. Soler Pierre., Csirke, J. 2008. The northern Humboldt current system : brief history, present status and a view towards the future. In : Werner F. (ed.), Lough R.G. (ed.), Bertrand Arnaud (ed.), Guevara Carrasco R. (ed.), Soler Pierre (ed.), Csirke J. (ed.), Chavez F.P. (ed.) The northern Humboldt current system : ocean dynamics, ecosystem processes and fisheries. *Progress in Oceanography*, 79 (special issue 2-4), 95-105. ISSN 0079-6611
- ENFEN, 2017: El Niño costero 2017. Inf. Tecn. Extraord. N°001-2017/ENFEN, 31 pp.
- Garreaud, R. D. 2018. A plausible atmospheric trigger for the 2017 coastal El Niño. *Int. J. Climatol*, 38: e1296-e1302. doi:10.1002/joc.5426.
- Hu, Zeng-Zhen, B. Huang, J. Zhu, A. Kumar, & J. McPhaden. 2018. On the Variety of Coastal El Niño Events. *Climate Dynamics*. 10.1007/s00382-018-4290-4.
- INDECI, 2017: Resumen ejecutivo—Temporada de lluvias Diciembre 2016—Marzo 2017. <https://www.indeci.gob.pe/objetos/alerta/MjE0NQ==/20170503150251.pdf>
- Katsumata, K., H. Yoshinari. 2010. Uncertainties in global mapping of ARGO drift data at the parking level, *Journal of Oceanography*, 66, 553-569
- Lebedev, K., H. Yoshinari, N. A. Maximenko, and P. W. Hacker. YoMaHa'07: Velocity data assessed from trajectories of ARGO floats at parking level and at the sea surface, IPRC Technical Note No. 4(2), June 12, 2007, 16p.
- McPhaden, M.J., A.J. Busalacchi, R. Cheney, J.-R. Donguy, K.S. Gage, D. Halpern, M. Ji, P. Julian, G. Meyers, G.T. Mitchum, P.P. Niiler, J. Picaut, R.W. Reynolds, N. Smith, and K. Takeuchi. 1998. The Tropical Ocean Global Atmosphere observing system: A decade of progress. *J. Geophys. Res.*, 103(C7), 14,169-14,240, doi: 10.1029/97JC02906.
- Mosquera, K. 2014. Ondas Kelvin oceánicas y un modelo oceánico simple para su diagnóstico y pronóstico, Boletín Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño", Instituto Geofísico del Perú, Enero, 1, 1, 4-7.
- Paulmier, A., and D. Ruiz-Pino. 2009. Oxygen minimum zones (OMZs) in the modern ocean, *Prog. Oceanogr.*, 80(3-4), 113-128, doi: 10.1029/j.pocean.2008.08.001.
- Stramma, L., Schmidtko, S., Levin, LA., Johnson, GC. 2010a. Ocean oxygen minima expansions and their biological impacts. *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers*. 57:587-595.
- Stramma, L., G. C. Johnson, E. Firing, and S. Schmidtko, 2010b. Eastern Pacific oxygen minimum zones: Supply paths and multidecadal changes, *J. Geophys. Res.*, 115, C09011, doi:10.1029/2009JC005976.
- Takahashi, K., A. Montecinos, K. Goubanova, and B. Dewitte. 2011. ENSO regimes: Reinterpreting the canonical and Modoki El Niño, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L10704, doi:10.1029/2011GL047364.
- Takahashi, K. & Martínez, A.G. 2017. The very strong coastal El Niño in 1925 in the far-eastern Pacific, *Clim Dyn*, <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3702-1>
- Takahashi, K., V. Aliaga-Nestares, G. Avalos, M. Bouchon, A. Castro, L. Cruzado, B. Dewitte, D. Gutierrez, W. Lavado-Casimiro, J. Marengo, A. G. Martinez, K. Mosquera-Vasquez and N. Quispe, 2018: The 2017 Coastal El Niño [in "State of the Climate in 2017"]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 99 (8), S150-S152, doi:10.1175/2018BAMSStateoftheClimate.1.
- Woodman, R. y Takahashi, K. 2014. ¿Por qué no llueve en la costa del Perú (salvo durante El Niño)? Boletín Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño", Instituto Geofísico del Perú, Junio, 1, 6, 4-7
- Zebiak, S.E., and M.A., Cane. 1987. Model El Niño - Southern Oscillation. *Monthly Weather Review*, 115, 2262-2278.