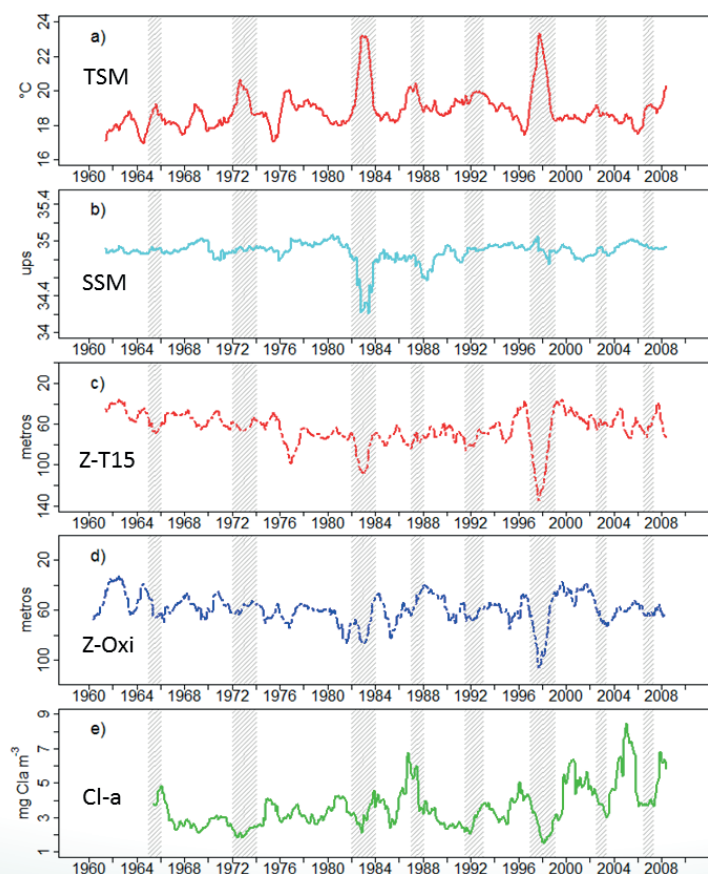


Programa Presupuestal por Resultados N° 68 “Reducción de vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres”. Producto: “Estudios para la estimación del riesgo de desastres”

“Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño”

Boletín Técnico

Variabilidad climática, procesos oceanográficos y producción primaria frente al Perú



Series de tiempo oceanográficas computadas a partir de la base de datos histórica del IMARPE (adaptado de Gutiérrez et al., 2014)

Contenido

2 - 3 Introducción

4 - 8 Artículo de Divulgación Científica

9 - 10 Avances Científicos

11 - 13 Resumen Informe Técnico

14 - 15 Comunicado Oficial ENFEN

Programa Presupuestal por Resultados N° 68 “Reducción de vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres”.
Producto: “Estudios para la estimación del riesgo de desastres”.

Actividad: “Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño”.

Manuel Pulgar Vidal
Ministro del Ambiente

Ronald Woodman
Presidente Ejecutivo IGP

José Macharé
Director Científico IGP

Ken Takahashi
Responsable Producto El Niño - IGP

Equipo científico: Ken Takahashi, Kobi Mosquera, Jorge Reupo, Berlín Segura

Edición: Cristiana Leucci
Diseño y Diagramación: Dante Guerra

Carátula: adaptado de Gutiérrez et al., 2014

Instituto Geofísico del Perú
Calle Badajoz 169 Mayorazgo
IV Etapa - Ate
Teléfono (511) 3172300

Impreso por: Imprenta Editora Gráfica Real SAC.
Jr. Independencia 953 – Trujillo – La Libertad

Lima, julio del 2016

Hecho el Depósito Legal en la
Biblioteca Nacional del Perú N° 2016-08847

Introducción

El Programa Presupuestal por Resultados (PPR) es una estrategia de gestión pública que vincula la asignación de recursos a productos y resultados medibles a favor de la población. Dichos resultados se vienen implementando progresivamente a través de los programas presupuestales, las acciones de seguimiento del desempeño sobre la base de indicadores, las evaluaciones y los incentivos a la gestión, entre otros instrumentos que determina el Ministerio de Economía y Finanzas (MEF) a través de la Dirección General de Presupuesto Público, en colaboración con las demás entidades del Estado.

El Instituto Geofísico del Perú (IGP) viene participando en el Programa Presupuestal por Resultados 068: “Reducción de vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres”. A partir del año 2014, algunas de las instituciones integrantes del Comité Multisectorial para el Estudio Nacional del Fenómeno El Niño (ENFEN) participan en este PPR con el producto denominado “Estudios para la estimación del riesgo de desastres”, que consiste en la entrega en forma oportuna de información científica sobre el monitoreo y pronóstico de este evento natural océano-atmosférico, mediante informes técnicos mensuales, que permitan la toma de decisiones a autoridades a nivel nacional y regional.

A este producto, el IGP contribuye con la actividad “Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño”, la cual incluye la síntesis y evaluación de los pronósticos de modelos climáticos internacionales, el desarrollo y validación de nuevos modelos de pronóstico, así como el desarrollo de estudios científicos que fortalecerá en forma continua la capacidad para este fin.

El presente Boletín tiene como objetivo difundir conocimientos científicos, avances científicos y noticias relacionadas a este tema, con la finalidad de mantener informados a los usuarios y proporcionarles las herramientas para un uso óptimo de la información presentada. Además, comparte una versión resumida del Informe Técnico que el IGP elabora mensualmente para cumplir con los compromisos asumidos en el marco del PPR 068. Dicho Informe contiene información actualizada operativamente y proporcionada por el IGP como insumo para que el ENFEN genere en forma colegiada la evaluación final que será diseminada a los usuarios. Se advierte que, en caso de discrepancias, el Informe Técnico del ENFEN prevalecerá.

Los resultados de esta actividad están disponibles en:
www.igp.gob.pe/sysppr.



IGP



ENFEN

El Instituto Geofísico del Perú es una institución pública al servicio del país, adscrito al Ministerio del Ambiente, que genera, utiliza y transfiere conocimientos e información científica y tecnológica en el campo de la geofísica y ciencias afines, forma parte de la comunidad científica internacional y contribuye a la gestión del ambiente geofísico con énfasis en la prevención y mitigación de desastres naturales y de origen antrópico. En el marco del Comité Multisectorial para el Estudio Nacional del Fenómeno El Niño (ENFEN), el IGP rutinariamente aporta información experta sobre modelos y pronósticos relacionados con El Niño y fenómenos asociados.

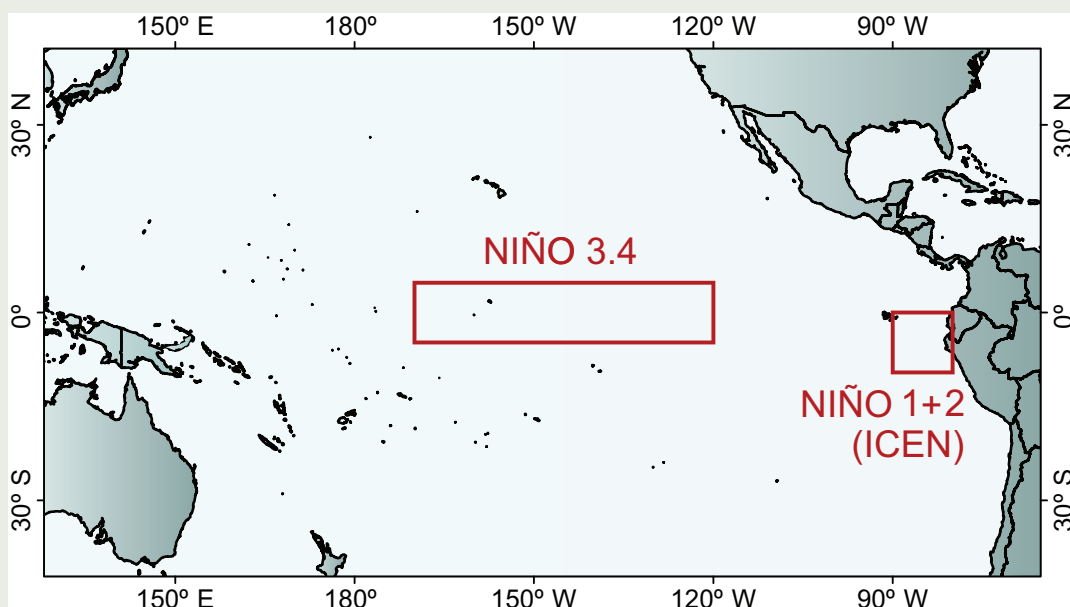
El
ENFEN es el
ente que genera la
información oficial de
monitoreo y pronóstico
del Fenómeno El Niño y
otros asociados.

El Comité Multisectorial para el Estudio Nacional del Fenómeno El Niño (ENFEN), conformado por representantes de IMARPE, DHN, IGP, SENAMHI, ANA e Indeci, es el ente que genera la información oficial de monitoreo y pronóstico del Fenómeno El Niño y otros asociados.

Según Resolución Ministerial 761-97-PE, el ENFEN tiene entre sus funciones el “mantener informado sobre la posible ocurrencia del Fenómeno El Niño, para que con ello se permita adoptar decisiones para adecuar y proteger la infraestructura existente en los distintos sectores, en prevención a los posibles daños que pudiera causar este fenómeno a la economía nacional y la población peruana”, así como “orientar a los diversos sectores medidas pragmáticas de previsión que permitan reducir daños y/o aprovechar beneficios”.

Para este fin, el ENFEN realiza el pronóstico, monitoreo y estudio continuo de las anomalías del océano y la atmósfera del mar peruano y a nivel global, a través de la elaboración de estudios y análisis científicos basados en la información proveniente de diversas redes de observación y modelos de variables oceanográficas, meteorológicas, hidrológicas y biológico-pesqueras. También, al menos mensualmente, emite pronunciamientos que son “preparados colegiadamente, acopiando la mejor información científica disponible y de competencia de cada institución respecto de su sector y genera la información técnica en forma colegiada para su difusión a los usuarios”.

Además, un objetivo central del ENFEN es “estudiar el Fenómeno El Niño, con el fin de lograr una mejor comprensión del mismo, poder predecirlo y determinar sus probables consecuencias”, lo cual se desarrolla mediante la investigación científica.



El mapa muestra las dos regiones que definen los principales índices de temperatura superficial del mar utilizadas para monitorizar El Niño y La Niña. La región Niño 1+2 (90°-80°W, 10°S-0°), en la que se basa el Índice Costero El Niño (ICEN), se relaciona con impactos en la costa peruana, mientras que la región Niño 3.4 (5°S-5°N, 170°W-120°W) se asocia a impactos remotos en todo el mundo, incluyendo los Andes y Amazonía peruana.

Variabilidad climática, procesos oceanográficos y producción primaria frente al Perú

Introducción

El sistema de corrientes del Pacífico Tropical Sudeste (PTSE) frente al Perú se distingue por la excepcional productividad biológica de su capa superficial -acompañada por una marcada deficiencia de oxígeno de su capa sub-superficial. Estas características son generadas por la interacción de procesos atmosféricos y oceánicos a diferentes escalas espaciales y temporales.

Entre los procesos de gran escala espacial se señala a la circulación de Walker, asociada a la presencia de los vientos alisios y que sostiene la asimetría zonal de la termoclina -y, por ende, de la nutriclina- en la banda tropical del Pacífico (más superficial en el borde oriental). Las perturbaciones de la circulación de Walker se transmiten mediante ondas Kelvin oceánicas (OKE) a través de la columna de agua hacia el Pacífico Oriental, modificando también su estructura vertical en una escala de tiempo intraestacional. El principal proceso a mesoescala es el



Dimitri Gutiérrez, Dr.
Investigador Científico
del Instituto del Mar del Perú

Doctor en Oceanografía de la Universidad de Concepción (Chile) y Biólogo de la Universidad Nacional Agraria La Molina. Actualmente es Director General de Investigaciones en Oceanografía y Cambio Climático del Instituto del Mar del Perú y Coordinador de la Maestría en Ciencias del Mar de la Universidad Peruana Cayetano Heredia. Recientemente su investigación está enfocada en estudiar la relación entre escenarios climáticos del pasado, tendencias recientes, dinámica de la Zona de Mínima de Oxígeno, productividad y bentos frente al Perú.

afloramiento costero, asociado a los vientos superficiales paralelos a la costa con dirección al ecuador, que advecta aguas subsuperficiales, normalmente más ricas en nutrientes, hacia la superficie marina. La fertilización de la capa superficial propicia entonces el gran crecimiento del fitoplancton y de los niveles tróficos superiores. Por su parte, la pobre ventilación de la capa subsuperficial del Pacífico Oriental, a causa del patrón de circulación general marina, así como las altas tasas de respiración de la materia orgánica particulada producida en la capa superficial, provocan la deficiencia del oxígeno en las capas subsuperficiales e intermedias (zona de mínima de oxígeno, ZMO).

Es claro entonces que, en su origen, la productividad marina y la deficiencia de oxígeno en la capa subsuperficial son controladas por factores climáticos, sea a través de la circulación atmosférica o a través de la circulación marina, así como del acoplamiento entre ambas. En la cuenca del Pacífico, la variabilidad climática de tipo interanual es especialmente importante, siendo asociada al ciclo El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), mas existen otros modos de menor frecuencia, de escalas interdecenal, centenal o milenial, que también ejercen profundas influencias en la circulación, biogeoquímica y productividad del PTSE. En este artículo haremos una revisión de los procesos más importantes que afectan la fertilidad y la producción primaria en relación al efecto de la variabilidad climática en el PTSE y particularmente en el sistema de afloramiento costero peruano, procurando señalar algunas preguntas aún pendientes de solución en el estado del conocimiento actual.

Estratificación, afloramiento y producción primaria

La producción primaria en los sistemas marinos, sostenida en gran medida por el fitoplancton, está controlada por la

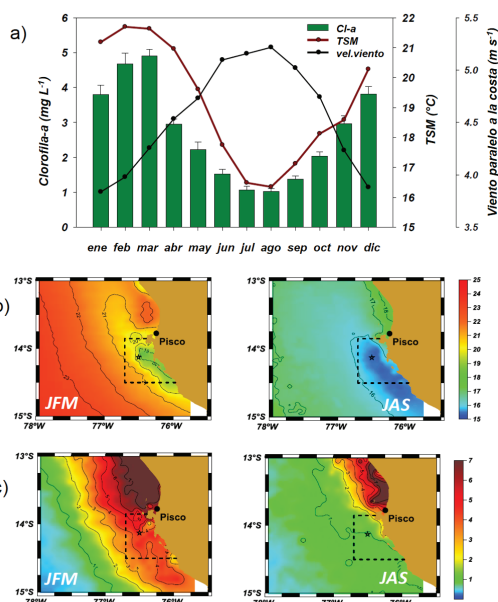


Figura 1. Producción primaria, forzamiento de los vientos y temperatura superficial del mar (TSM) frente a Pisco (14°S). a) Ciclo anual de la clorofila-a superficial, vientos favorables al afloramiento paralelos a la costa y TSM; b) Distribución de TSM en verano (JFM, izquierda) y en invierno (JAS, derecha); c) Distribución de clorofila-a superficial en verano (izquierda) e invierno (derecha). Las climatologías de clorofila-a y de los vientos costeros en (a) se basan en datos de color de mar del satélite SeaWiFS (1997 – 2006) y del reanálisis ECMWF-ERA40, para la caja costera mostrada en (b) y en (c). Adaptado de Gutiérrez et al. (2011).

Variabilidad climática, procesos oceanográficos y producción primaria frente al Perú

Gutiérrez D.

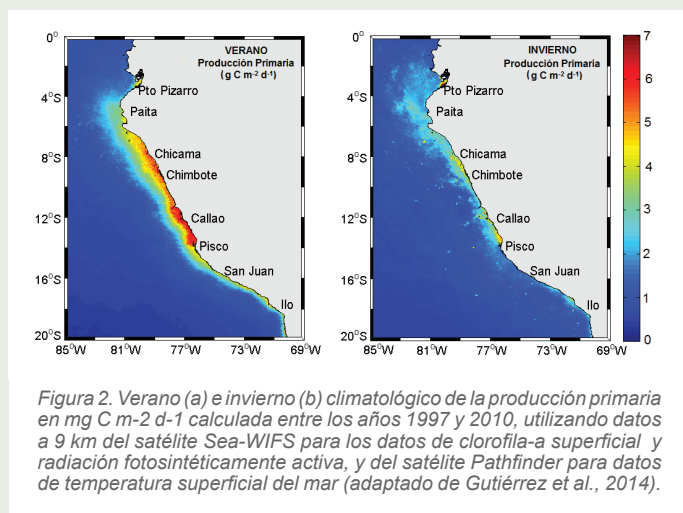
conjugación de la disponibilidad de luz y de nutrientes. El grado de estratificación de la columna de agua por un lado favorece la retención del fitoplancton y de nutrientes en la capa iluminada, por otro lado limita el transporte de nutrientes desde las capas más profundas hacia la superficie por difusión turbulenta, la cual es el proceso natural de fertilización de la capa superficial más común en los sistemas marinos. Por lo general, en latitudes bajas y medias existe una relación negativa entre la estratificación y la productividad, reflejando la limitación dominante de los nutrientes en dichas regiones (Behrenfeldt et al., 2006), mientras que en altas latitudes la relación es positiva, debido a la limitación dominante de la radiación solar en el ciclo anual.

A diferencia de la mayor parte de sistemas marinos, en los sistemas de afloramiento costero los nutrientes son principalmente transportados a la superficie por advección, en respuesta a la divergencia ocasionada por los vientos costeros y la rotación de la Tierra. Como los eventos de afloramiento se dan en escalas de días a semanas, la fertilización del agua superficial es más persistente y el potencial del crecimiento del fitoplancton es mayor.

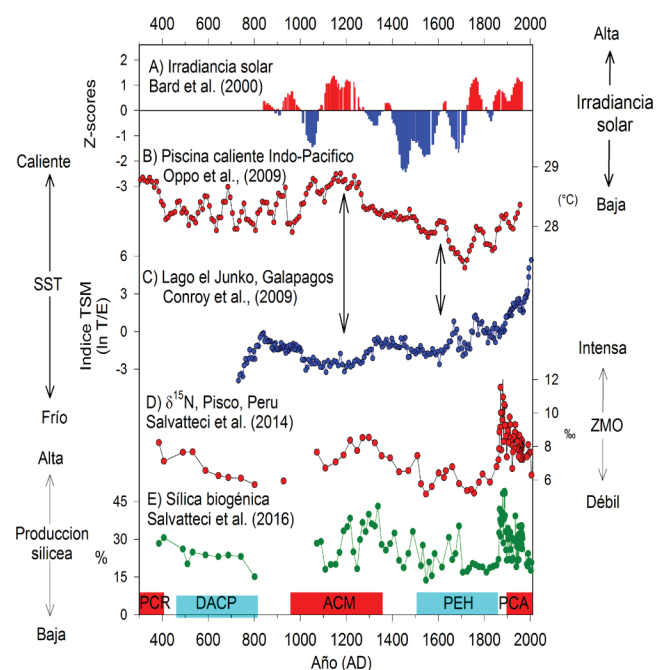
provocando el hundimiento o ascenso de la termoclina, respectivamente. En el primer caso (segundo caso), los eventos de afloramiento generan una menor (mayor) fertilización de la capa superficial.

Variabilidad y procesos a múltiples escalas

Los registros históricos y de *proxies* paleoclimáticos muestran la sensibilidad de la productividad del PTSE a la variabilidad climática en múltiples escalas. La variabilidad en escalas de tiempo mileniales y centenales del clima del planeta, asociadas a cambios de la insolación y del vulcanismo, afecta a la circulación de Walker, la posición de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) y al tamaño y posición de las celdas de Hadley. Existe evidencia que en períodos globales cálidos centenales o mileniales, el calentamiento de los trópicos ocasionó un aumento del gradiente zonal de temperatura en el Pacífico Ecuatorial, de acuerdo al mecanismo del 'termostato oceánico' (Clement et al., 1996), provocando condiciones



Por lo general, en los sistemas de afloramiento costero, mayormente ubicados en latitudes medias, la producción biológica es máxima en el verano, cuando los vientos favorables al afloramiento son más intensos. En el caso del PTSE frente al Perú, los vientos favorables al afloramiento costero persisten todo el año pero alcanzan su mayor intensidad en invierno; sin embargo, la productividad presenta su máximo climatológico en verano (Figuras 1 y 2). Esta paradoja es explicada posiblemente por la limitación lumínica dada la mezcla vertical más profunda, que reduce el crecimiento de los productores primarios durante invierno (Calienes et al., 1985; Echevin et al., 2008). En el verano, las surgencias aún ocurren pero son menos intensas o frecuentes. La relajación de la surgencia permite el rápido establecimiento de ventanas de tiempo de estratificación termal, el cual gatilla las floraciones del fitoplancton. A este mecanismo básico se añade el impacto de las ondas costeras atrapadas que se propagan desde la zona ecuatorial, derivadas de las OKE intraestacionales, que pueden ser 'cálidas' o 'frías',



base de afloramiento intensificado y expansión de la ZMO (tipo 'La Niña') y condiciones opuestas, o tipo 'El Niño', en períodos globales fríos a las mismas escalas (Figura 3). En consecuencia, los patrones de circulación, productividad y oxigenación en el PTSE variaron significativamente (Mollier-Vogel et al., 2013; Gutiérrez et al., 2009; Salvatelli et al., 2014). Así, para el último milenio, existen archivos sedimentarios marinos que sugieren condiciones base tipo 'La Niña' y 'El Niño' en lo relacionado a la productividad y la oxigenación para la segunda fase del período global cálido denominado Anomalía Climática del Medioevo (1000 – 1250 AD) y para el período global frío llamado Pequeña Edad de Hielo (1500 – 1820 AD) (Gutiérrez et al., 2009; Salvatelli et al., 2014).

A escala interanual, el ENOS es el modo dominante de variabilidad del clima y el océano Pacífico Tropical. La actividad del ENOS es a su vez modulada por la variabilidad climática en escalas más largas, por ejemplo las oscilaciones interdecenales del clima en el Pacífico, con las cuales comparte parcialmente el patrón espacial de anomalías (Chávez et al., 2011; Henley et al., 2015). Cuando ambas fuentes de variabilidad están en fase, las anomalías de El Niño son amplificadas generando impactos más fuertes en los ecosistemas.

El conocimiento actual establece que, durante El Niño, la termoclina en el PTSE se profundiza, asociada al debilitamiento de los vientos alisios y de la circulación de Walker. Además, las OKE de hundimiento son generadas con más frecuencia y, al arribar al Pacífico Oriental, se propagan en dirección al polo como ondas costeras atrapadas que profundizan la termoclina, la oxiclina y la nutriclina, reduciendo la fertilidad de las aguas superficiales costeras y modificando además la circulación superficial y subsuperficial (Brink, 1982; Echevin et al., 2014) (Figura 4). Si bien los vientos costeros pueden intensificarse en El Niño (Bakun et al., 2010), las aguas que afloran provienen ahora de la capa encima de la nutriclina, de modo que el sistema se torna limitado en nutrientes, lo cual reduce la productividad del sistema de afloramiento costero (Barber & Chavez, 1983; Calienes et al., 1985) (Figura 4). A más distancia del litoral, la reducción del gradiente perpendicular a la costa del esfuerzo de viento, así como la propagación al oeste de ondas Rossby, jugarían un papel en amplificar la profundización de la termoclina y en la reducción de la producción primaria (Halpern, 2002; Correa-Ramírez et al., 2012). Por otro lado, la profundización de la oxiclina, la propagación hacia el sur de ondas atrapadas a la costa, así como la menor respiración de la materia orgánica, contribuyen al debilitamiento de la ZMO y cambios en la biogeoquímica asociada (Brink, 1982; Morales et al., 1994; Graco et al., 2016).

El Niño, no obstante, presenta dos tipos dominantes: El Niño del Pacífico Oriental, también conocido como El Niño canónico y El Niño del Pacífico Central o 'Niño Modoki', de los cuales el segundo modo ha sido identificado solo recientemente (Kao & Yu, 2009; Takahashi et al., 2011). Mientras que los impactos de El Niño canónico en la productividad del PTSE son ampliamente conocidos y han

sido descritos en forma sucinta más arriba, el conocimiento de los impactos de El Niño Modoki en la productividad y otros procesos ecológicos es aún incipiente (Dewitte et al., 2012; Graco et al., 2016).

Sin embargo, la variabilidad a escala intraestacional del PTSE, asociada a la propagación de las OKE de hundimiento y de surgencia, puede dar luces sobre los impactos diferenciados sobre la productividad de El Niño canónico y El Niño Modoki en las últimas decenias. Dewitte et al. (2012) mostraron que los dos tipos de El Niño difieren en las características de las OKE. Mientras que en El Niño canónico las OKE se encuentran fuertemente sesgadas hacia el modo de hundimiento en el Pacífico Oriental, en El Niño Modoki las OKE más bien se presentan sesgadas hacia el modo de ascenso de la termoclina en el Pacífico Oriental, generando enfriamiento y favoreciendo la fertilización de la capa superficial. Este último es especialmente cierto para el caso de las OKE de modo 2, de período más largo (~100 d) que las de modo 1 (~70 d) (Dewitte et al., 2012). Cabe indicar que las OKE de modo 2 son más energéticas en el Pacífico Oriental, debido a la termoclina más superficial en esta región (Dewitte et al., 2008), e influyen más sobre la estructura vertical de la columna de agua (Echevin et al., 2014). Recientemente, Graco et al. (2016) documentaron cambios en la señal

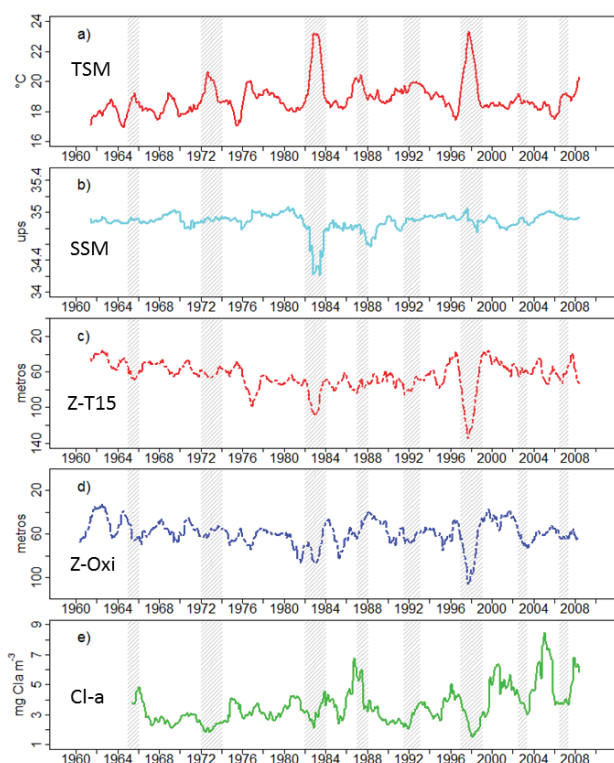


Figura 4. Series interanuales de (a) temperatura superficial del mar en °C; (b) salinidad superficial (UPS); (c) profundidad de la isoterma de 15°C (metros); (d) profundidad de la oxiclina, inferida de la iso-oxígeno de 1 ml L⁻¹ (metros); (e) concentración superficial de clorofila-a (mg Cl a m⁻³), computadas en base a los datos históricos del IMARPE, en el período de 1960 al 2008 (3.5°S – 20°S, 0 – 100 km de la costa), en resolución mensual (adaptado de Gutiérrez et al., 2014).

Variabilidad climática, procesos oceanográficos y producción primaria frente al Perú

Gutiérrez D.

de la fertilización y la oxigenación sobre la plataforma de Callao en respuesta a la variación de la señal de las OKE de modos 1 y 2. Así, el período 2002 – 2009, caracterizado por la ocurrencia de eventos El Niño del Pacífico Central, se distinguió por la dominancia de OKE ‘frías’ de modo 2, seguida en menor medida por la ocurrencia de OKE de hundimiento de modo 1. Este patrón habría propiciado una mayor variabilidad temporal en la estructura vertical de la columna de agua, dando lugar a la alternancia de períodos de mayor y menor oxigenación, advección vertical de nutrientes y déficit de nitrógeno en la columna de agua.

Algunas interrogantes y perspectivas

En esta revisión nos hemos referido a algunos procesos físicos asociados a la variabilidad climática que influyen sobre la fertilidad y la productividad, sin embargo estos últimos también dependen de procesos biogeoquímicos como la remineralización de los nutrientes y las reacciones de óxido-reducción. Por ejemplo, la deficiencia de oxígeno en la columna de agua y las condiciones anóxicas en los sedimentos superficiales dan lugar al déficit de nitrato y al exceso de fosfato disuelto en las aguas costeras, en relación a la razón N:P que prima a nivel del océano abierto (‘razón de Redfield’), limitando posiblemente la composición del fitoplancton y su crecimiento. Existen observaciones que sugieren que durante El Niño, o bajo condiciones ‘tipo El Niño’, al producirse la oxigenación de la capa subsuperficial, tanto la utilización del nitrato en la respiración como la liberación del fosfato de los sedimentos disminuyen, normalizando la razón N:P (Graco et al., 2016). En qué medida este impacto puede influir en la composición de los productores primarios y sus tasas de crecimiento (floraciones algales) en la zona costera bajo condiciones de El Niño aún no ha sido suficientemente estudiado.

Asimismo, los mecanismos descritos son válidos especialmente para el ‘microfitoplancton’, el grupo que presenta el mayor rango de tamaño dentro de los productores primarios del plancton, compuesto por diatomeas y dinoflagelados. Menos estudiados en el PTSE son los mecanismos que explican el crecimiento de los productores primarios más pequeños, como el nanoplancton calcáreo (Alvites, 2016) y el bacteriofitoplancton. Para estos grupos, el ambiente biogeoquímico, como el pH y la disponibilidad del oxígeno, son factores críticos que controlan su distribución. La influencia de la variabilidad climática sobre estos factores ocurre a través de la circulación y/o la estratificación, que afectan los flujos y solubilidad del carbono y oxígeno disueltos.

Por otro lado, el efecto de la propagación de ondas costeras atrapadas, de ondas internas y vórtices de mesoescala sobre el crecimiento, concentración y transporte de los productores primarios también requiere más investigaciones. A través de un estudio de reanálisis y modelado, Echevin et al. (2014) han indicado que el paso de las ondas costeras atrapadas ‘frías’ favorece el desarrollo de núcleos de fitoplancton que migran lentamente hacia el sur, como resultado de la advección

vertical de los nutrientes y el efecto de la circulación costera (Figura 5). Otros estudios han revelado la importancia de ondas internas sobre la formación de estructuras de meso- y submesoescala en las aguas de la plataforma (Grados et al., 2016), favoreciendo la agregación de organismos e interacciones tróficas (Bertrand et al., 2014). Sin embargo su impacto en la producción primaria aún no ha sido determinado. Por último, también se ha documentado la formación de vórtices ciclónicos asociados al frente térmico costero, los cuales transportan las propiedades de ricas condiciones de nutrientes mar afuera (Chaigneau et al., 2011). Los estudios realizados sugieren que, durante períodos cálidos, la intensificación de los frentes térmicos favorece la formación de los vórtices de mesoescala, pero la mayor estratificación reduce el impacto de las ondas internas en la formación de estructuras (Chaigneau et al., 2011; Grados et al., 2016). Se desconoce aún cómo estos procesos contribuyen a la variabilidad espacial y temporal de la productividad.

El análisis de datos históricos instrumentales y de *proxies* en los sedimentos marinos ha revelado tendencias de enfriamiento y de aumento de la productividad en las aguas costeras en los últimos 35 años (Gutiérrez et al., 2011), que se encuentra superpuesta a la variabilidad interanual asociada al ENSO. En cambio, las primeras proyecciones desarrolladas en relación a escenarios del cambio climático para la región sugieren el aumento de la estratificación, el debilitamiento del afloramiento y la reducción de la productividad en el largo plazo (Brochier et al., 2013). Dada la relación directa (opuesta) entre productividad y la estratificación (intensidad del afloramiento) en el ciclo anual (Figura 4), es necesario que las futuras investigaciones ahonden en las variaciones

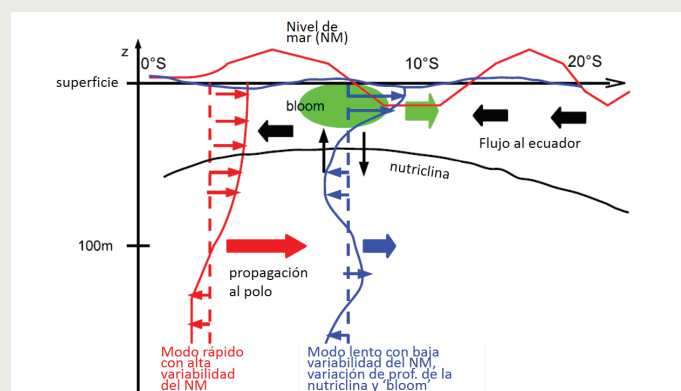


Figura 5. Modelo conceptual de la estructura vertical y paralela a la costa de las ondas costeras atrapadas (OCA) y su impacto en la producción primaria. Los modos rápido y lento de las ondas se muestran en rojo y azul, respectivamente. La propagación de las OCA se presenta en flechas de color y los flujos costeros hacia el ecuador, en flechas negras. El modo más veloz de OCA, asociado con una alta variabilidad del nivel de mar (NM), se propaga rápidamente hacia el sur sin desplazar la nutriclina. Entre tanto, un modo más lento con baja variabilidad en el NM, se propaga lentamente y genera un desplazamiento vertical de la nutriclina, favoreciendo el bombeo de nutrientes dentro y fuera de la capa superficial, lo cual favorece o mitiga la producción primaria. Debido al flujo superficial hacia el ecuador, las floraciones de fitoplancton se desplazan hacia el sur más lentamente que la propagación del desplazamiento de la nutriclina (adaptado de Echevin et al., 2014).

en la estacionalidad tanto de los factores climáticos y oceanográficos para la interpretación de las tendencias y las proyecciones. Asimismo, la incorporación de la evolución futura del ENOS (IPCC, 2013; Cai et al., 2014) y de los tipos de El Niño (Kao & Yu, 2009) ciertamente robustecerá las proyecciones futuras de la productividad del PTSE.

Agradecimientos

El autor agradece al IMARPE y al equipo de la DGIOCC por la información facilitada para la presente revisión. Asimismo, agradece al Dr. Renato Salvatelli (Instituto de Geociencias, Universidad de Kiel) y al Dr. Vincent Echevin (LOCEAN, IRD) por autorizar la publicación de las figuras 3 y 5 del artículo.

Referencias

Alvites, D., 2016: Variabilidad espacial y calcificación de las comunidades de cocolitoforidos en el sistema de afloramiento costero frente al Callao-Perú, Tesis de Maestría en Ciencias del Mar, Universidad Peruana Cayetano Heredia, Lima, Perú, 136.

Bakun, A., D. Field, A. Redondo-Rodriguez, S.J. Weeks, 2010: Greenhouse gas, upwelling favourable winds, and the future of upwelling systems, *Global Change Biology*, 16:1213–1228, doi:10.1111/j.1365-2486.2009.02094.x.

Barber, R.T., & F.P. Chavez, 1983: Biological consequences of El Niño, *Science*, 222:1203–1210.

Bard, E., G. Raisbeck, F. Yiou, J. Jouzel, 2000: Solar irradiance during the last 1200 years based on cosmogenic nuclides, *Tellus*, 52B: 985–992.

Behrenfeld, M., R.T. O'Malley, D. Siegel, C. McClain, J. L. Sarmiento, G. Feldman, A. Milligan, P. Falkowski, R. Letelier & E. Boss, 2006: Climate-driven trends in contemporary ocean productivity, *Nature*, 444, doi:10.1038/nature05317.

Bertrand, A., D. Grados, F. Colas, S. Bertrand, X. Capet, A. Chaigneau, G. Vargas, A. Mousseigne, R. Fablet, 2014: Broad impacts of fine-scale dynamics on seascape structure from zooplankton to seabirds, *Nature Communications*, 5, 5239.

Brink, K.H., 1982: A comparison of long coastal trapped wave theory with observations off Peru, *Journal of Physical Oceanography*, 12, 897–913.

Brochier, T., V. Echevin, J. Tam, A. Chaigneau, K. Goubanova, & A. Bertrand, 2013: Climate change scenarios experiments predict a future reduction in small pelagic fish recruitment in the Humboldt Current system, *Global Change Biology*, doi: 10.1111/gcb.12184.

Cai, W.J., S. Borlace, M. Lengaigne, V.P. McPhaden, L.X. Wu, M.H. England, G.J. Wang, E. Guilyardi, & F.F. Jin, 2014: Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming, *Nature Clim. Change*, 4, 111–116.

Calienes, R., O. Guillén, & N. Lostanau, 1985: Variabilidad espacio-temporal de clorofila, producción primaria y nutrientes frentes a la costa peruana, *Boletín del Instituto del Mar del Perú, Callao*, 10:1–44.

Chavez, F.P., M. Messié, & J. T. Pennington, 2011: Marine Primary Production in Relation to Climate Variability and Change, *Annual Review of Marine Science*, 3:227–60.

Clement, A. C., R. Seager, M.A. Cane, & S.E. Zebiak, 1996: An Ocean dynamical thermostat, *Journal of Climate*, 9, 2190–2196.

Conroy, J. L., A. Restrepo, J.T. Overpeck, M. Steinitz-Kannan, J.E. Cole, M.B. Bush, & P.A. Colinvaux, 2009: Unprecedented recent warming of surface temperatures in the eastern tropical Pacific Ocean, *Nature Geoscience*, 2, 46–50.

Conroy, J. L., J.T. Overpeck, and J.E. Cole, 2010: El Niño/Southern Oscillation and changes in the zonal gradient of tropical Pacific sea surface temperature over the last 1.2 ka, *PAGES News*, 18, 32–34.

Correa-Ramirez, M., S. Hormazabal, & C. Morales, 2012: Spatial patterns of annual and interannual surface chlorophyll-a variability in the Peru–Chile Current System, *Progress in Oceanography*, 92–95, 8–17.

Dewitte, B., J. Vazquez-Cuervo, 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 II*, 77–80, 143–156.

Echevin, V., O. Aumont, J. Ledesma, & G. Flores, 2008: The seasonal cycle of surface chlorophyll in the Peru upwelling system: a modelling study, *Progress in Oceanography*, 79, 167–176.

Echevin, V., A. Albert, M. Lévy, M. Graco, O. Aumont, A. Piétri, G. Garric, & B. Dewitte, 2014: Intraseasonal variability of nearshore productivity in the Northern Humboldt Current System: The role of coastal trapped waves, *Continental Shelf Research*, 73: 14–30.

Graco, M., S. Purca, B. Dewitte, O. Morón, J. Ledesma, G. Flores, C. Castro, & D. Gutiérrez, 2016: The OMZ and nutrients features as a signature of interannual and low frequency variability off the Peruvian upwelling system, *Biogeosciences Discussions*, doi:10.5194/bg-2015-567.

Grados, D., A. Bertrand, F. Colas, V. Echevin, A. Chaigneau, D. Gutiérrez, G. Vargas, & R. Fablet, 2016: Spatial and seasonal patterns of fine-scale to mesoscale upper ocean dynamics in an eastern Boundary Current system, *Progress in Oceanography*, 142, 105–116.

Gutiérrez, D., A. Sifeddine, D. Field, L. Ortlieb, G. Vargas, F. Chávez, F. Velasco, V. Ferreira, P. Tapia, R. Salvatelli, H. Boucher, M. Morales, J. Valdés, J.-L. Reyss, A. Campusano, M. Boussafir, M. Mandeng-Yogo, M. García, and T. Baumgartner, 2009: Rapid reorganization in ocean biogeochemistry off Peru towards the end of the Little Ice Age, *Biogeosciences*, 6, 835–848.

Gutiérrez, D., I. Bouloubassi, A. Sifeddine, S. Purca, K. Goubanova, M. Graco, D. Field, L. Méjanelle, F. Velasco, A. Lorre, R. Salvatelli, D. Quispe, G. Vargas, B. Dewitte, & L. Ortlieb, 2011: Coastal cooling and increased productivity in the main upwelling cell off Peru since the mid-twentieth century, *Geophysical Research Letters*, 38, L07603–1–L07603-6.

Gutiérrez, D., C. Grados, M. Graco, L. Vásquez, F. Velasco, S. Sánchez, P. Ayón, J. Tam, O. Morón, R. Flores, C. Quispe, & L. Pizarro, 2014: El Mar Peruano y su Dinámica, En: IMARPE, Libro de Oro, Callao, Perú, 34–59.

Halpern, D., 2002: Offshore Ekman Transport and Ekman Pumping off Peru during the 1997–98 El Niño, *Geophysical Research Letters*, 29(5), 10.1029/2001GL014097.

Henley, B., J. Gergis, D. Karoly, S. Power, J. Kennedy, C. K. Folland, 2015: A Tripole Index for the Interdecadal Pacific Oscillation, *Climate Dynamics*, doi:10.1007/s00382-015-2525-1.

IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P.M. Midgley], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535.

Kao, H.Y., & J.Y. Yu, 2009: Contrasting eastern-Pacific and central-Pacific types of El Niño, *Journal of Climate*, 22, 615–632.

Mollier-Vogel, E., G. Leduc, T. Böschén, P. Martinez, & R. Schneider, 2013: Rainfall response to orbital and millennial forcing in northern Peru over the last 18 ka, *Quaternary Science Reviews*, 76, 29–38.

Oppo, D. W., Y. Rosenthal, and B.K. Linsley, 2009: 2,000-year-long temperature and hydrology reconstructions from the Indo-Pacific warm pool, *Nature*, 460, 1113–1116.

Salvatelli, R., D. Gutiérrez, D. Field, A. Sifeddine, L. Ortlieb, I. Bouloubassi, M. Boussafir, H. Boucher, and F. Cetin, 2014: The response of the Peruvian Upwelling Ecosystem to centennial-scale global change during the last two millennia, *Climate of the Past*, 10, 715–73.

Takahashi, K., A. Montecinos, K. Goubanova, & B. Dewitte, 2011: ENSO regimes: Reinterpreting the canonical and Modoki El Niño, *Geophysical Research Letters*, 38, L10704, doi:10.1029/2011GL047364.

Estudio numérico de la evolución de la onda Kelvin en el Pacífico Ecuatorial

Jeancarlo Fajardo, Lic.¹; Ken Takahashi, Ph.D.¹; Kobi Mosquera, Dr.¹
¹Instituto Geofísico del Perú

Introducción

Según la teoría lineal las anomalías de viento zonal en el Pacífico Ecuatorial pueden producir ondas oceánicas ecuatoriales la más importante de las cuales, para nosotros, es la onda Kelvin ecuatorial que se propaga siempre hacia el este, ya que puede producir calentamiento o enfriamiento de nuestra costa según si la onda es cálida o fría. La onda cálida se caracteriza por aumentar el nivel del mar, profundizar la termoclina, inducir corrientes ecuatoriales anómalas del oeste y hacia el sur a lo largo de nuestra costa, lo cual puede producir calentamiento costero ya sea por advección zonal o vertical, como se observa durante El Niño (ver Mosquera et al., 2013 para el caso particular del evento El Niño 2002/2003). Si bien se tiene un buen entendimiento de los mecanismos básicos de las ondas Kelvin, hay pocos estudios sobre los procesos de dispersión o reflexión que experimentan estas ondas al aproximarse al Pacífico Oriental donde la termoclina se vuelve más somera (Mosquera et al., 2013; 2014), así como sobre los posibles efectos no-lineales que pueden ser sustanciales (Giese y Harrison, 1990). Estos procesos podrían ser importantes para el tipo de evento El Niño que se puede presentar (Dewitte et al., 2012) y, para mejorar su entendimiento, se han realizado simulaciones idealizadas, en las cuales se tiene un control casi total de las condiciones experimentales y se permite aislar e identificar los mecanismos, particularmente el efecto del estado base sobre las características de las ondas. Esto ha llevado a la continuación de la investigación desarrollada por Fajardo et al. (2015), en la cual se utilizó el modelo numérico POM (Princeton Ocean Model) para estudiar la evolución adiabática de la onda Kelvin en el Pacífico Ecuatorial. En el presente trabajo se ha empleado el modelo oceánico sbPOM (Stony Brook Parallel Ocean Model, <http://imedeia.uib-csic.es/users/toni/sbpom/>), el cual es la versión del modelo POM que permite usar, simultáneamente, varios procesadores.

Experimentos realizados

El estado base es uno de reposo, sin corrientes pero con una distribución vertical de temperatura y densidad uniforme sobre el dominio. En este contexto se realizaron experimentos en los que se aplicó esfuerzos de viento ecuatorial del oeste para generar ondas Kelvin. Se consideraron casos con la profundidad de la termoclina a 160 y 40 metros de profundidad, típicos del Pacífico Occidental y Oriental, respectivamente (Figura 1a). El forzante de viento se distribuyó en forma gaussiana alrededor de los 160°W, con escala de 40° de longitud y 6° de latitud, y se aplicó en los primeros 28 días de simulación. Para evaluar los efectos no-lineales, se utilizaron forzantes de viento de 0.005 y 0.2 Nm⁻², donde el primero produce un efecto casi lineal, mientras que el segundo es una magnitud más típica observada. Las características de estos cuatro experimentos (Exp1-Exp4) se resume en las dos primeras filas de la Tabla 1, en las cuales se empleó un coeficiente vertical de viscosidad (difusividad) de 0.00002 (0.0). Adicionalmente, se realizaron dos experimentos similares a los experimentos 3 y 4 (Exp5 y Exp6), pero con un coeficiente de viscosidad calculado con el esquema turbulento que emplea por defecto el modelo numérico (Mellor y Yamada, 1982).

Amplitud del forzante de viento (N/m ²)		0.05		0.2	
Profundidad de la termoclina (m)		Exp1: 160	Exp2: 40	Exp3: 160	Exp4: 40
Comparación de la velocidad de fase de la onda Kelvin (c) con su valor teórico.	Modo 1	+1%	+1%	+6%	+5%
	Modo 2	igual	igual	-2%	+6%
	Modo 3	igual	igual	igual	-
	Modo 4	igual	+1%	-	-

Tabla 1. Resumen de los resultados de la comparación de la velocidad de fase de la onda Kelvin con su valor teórico de los experimentos realizados con coeficiente vertical de viscosidad constante de 0.00002.

En todos los casos se triplicó la extensión zonal del Pacífico Ecuatorial con la finalidad de evitar la reflexión de ondas en los bordes costeros. Además, se impuso condiciones de radiación en las fronteras norte y sur, profundidad constante de 4 km (con 66 niveles verticales), y espaciamiento horizontal (temporal) de 0.5° (15 min). Las salidas del modelo fueron promediadas durante un día y posteriormente se les aplicó un filtro pasa bajo de 10 días.

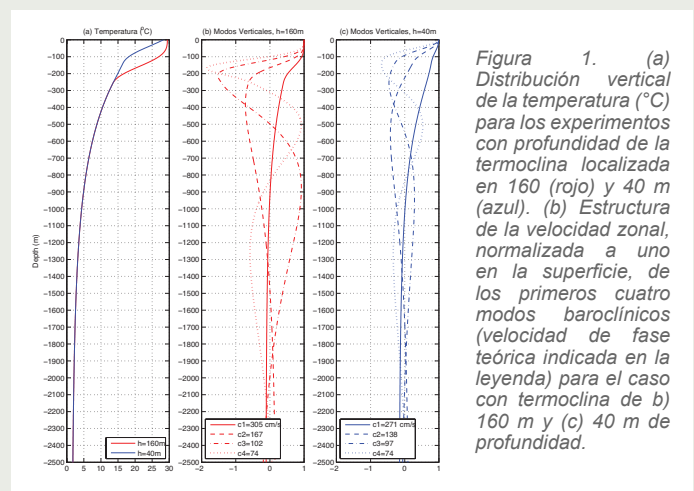


Figura 1. (a) Distribución vertical de la temperatura (°C) para los experimentos con profundidad de la termoclina localizada en 160 y 40 m (rojo y azul). (b) Estructura de la velocidad zonal, normalizada a uno en la superficie, de los primeros cuatro modos baroclinicos (velocidad de fase teórica indicada en la leyenda) para el caso con termoclina de b) 160 m y c) 40 m de profundidad.

Resultados preliminares

Los experimentos realizados con esfuerzos de viento pequeño sirvieron para contrastar los resultados del modelo con la teoría lineal, en la cual los valores teóricos para la velocidad de propagación y para la estructura vertical (Figura 1b-c) fueron obtenidos al resolver la ecuación de valores propios correspondientes a los modos normales verticales (Fjeldstad, 1933). La velocidad de propagación de cada modo baroclinico simulado por el modelo fue estimada observando el desplazamiento de los valores máximos de velocidad zonal y/o nivel del mar correspondientes a los modos 1 a 4 (Figura 2a-b). Los resultados de los dos primeros experimentos (Tabla 1) muestran que para los modos 2, 3 y 4 del Exp1 y los modos 2 y 3 del Exp2 el modelo reproduce exactamente el valor de la velocidad de propagación, mientras que para los casos restantes estimamos que la velocidad discrepa en 1% de la teórica. De igual forma, los nodos verticales (puntos de velocidad zonal U cero en la estructura vertical; Figura 3a-d) corresponden bastante bien a los valores predichos por la teoría lineal para ambos experimentos (Figura 1b-c).

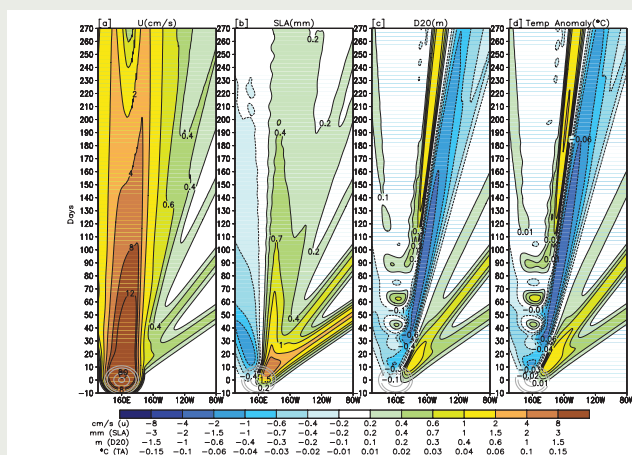


Figura 2. Diagrama longitud-tiempo del Exp1 a lo largo de la línea ecuatorial para: (a) la velocidad zonal (U), (b) la anomalía del nivel del mar (SLA), (c) la anomalía de la profundidad de la isoterma de 20°C (D20), y (d) la anomalía de temperatura (TA). En todos los gráficos se ha representado con contornos grises el esfuerzo de viento, y $t=0$ corresponde al instante del máximo esfuerzo.

Para el caso con termoclina de 160 m (Exp1), las mayores velocidades zonales superficiales (~ 0.5 cm/s) se obtienen para el primer y segundo modo (Figura 3a-b), lo cual corresponde, según la teoría lineal ($\eta = U/c/g$, donde c es la velocidad de propagación, g es la aceleración de la gravedad, U es la amplitud de la velocidad superficial y η el nivel del mar), a niveles del mar de 1.6 y 0.8 mm, respectivamente; en conformidad con lo simulado (Figura 2b). Asimismo, se observan celdas de circulación asociadas a cada modo con máximos valores de la velocidad vertical W en los nodos. Las máximas anomalías de temperatura (TA) de 0.03°C y 0.04°C , muy pequeñas debido al pequeño forzante, se presentan alrededor de la termoclina de 20°C para el primer y segundo modo (Figura 2d y Figura 3e-f), mientras que para los modos restantes (Figura 3g-h) el calentamiento es más superficial y ligeramente menor en amplitud y extensión. Consistente con lo anterior, las anomalías de la profundidad de la termoclina de 20°C (D20) para los dos primeros modos son de 0.2 y 0.4 m (Figura 2c).

Por otro lado, para el caso con termoclina de 40 m (Exp2), las velocidades de propagación son menores y las estructuras verticales son más superficiales, con predominancia de los modos de segundo y tercer orden muy similar a lo que se esperaría en la zona oriental del Pacífico Ecuatorial (Dewitte et al., 1999). La máxima amplitud para U , η , TA y D20 corresponde al tercer modo, con valores de 1.9 cm/s, 1.8 mm, 0.1°C y 1 m respectivamente.

Cuando se repiten los experimentos con el esfuerzo de viento más realista (0.2 Nm^{-2}), para el experimento con termoclina de 160 m (Exp3), la velocidad de propagación del primer modo aumenta en 6%, en el segundo modo disminuye en 2% y para el tercer modo permanece inalterada. Tal como para el caso lineal, la mayor variabilidad se observa en los dos primeros modos, con máxima amplitud para η y U (TA y D20) de 90 mm y 29 cm/s (1.9°C y 18 m), correspondiente al primer (segundo) modo. Estos valores corresponden a un incremento de 41, 45, 19 y 13% para η , U , TA y D20, con respecto a lo que se esperaría en el caso lineal. Asimismo, la aparición de frentes, tanto en la velocidad zonal como en la anomalía de temperatura, es evidencia de efectos no lineales y que las ondas parecen alcanzar los 80°W en menor tiempo que en el caso lineal, a pesar de que las velocidades de propagación estimadas son similares. Esto se debe a que el bajo coeficiente de viscosidad empleado ha causado velocidades zonales superiores a los 4 m/s en la región del forzante durante los días que estuvo activo el viento, lo cual, debido a la no linealidad asociada a números de

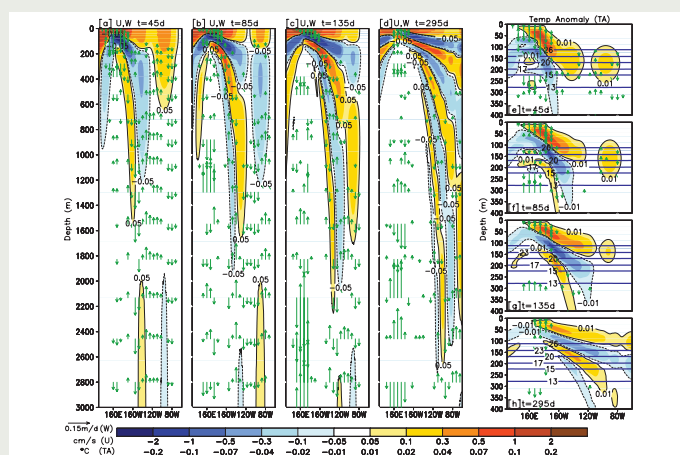


Figura 3. Diagrama longitud-profundidad a largo de la línea ecuatorial para el caso con termoclina ubicada en 160 m, durante los días 45, 85, 135 y 295 luego del pico del esfuerzo de viento de 0.005 Nm^{-2} (Exp1). (a)-(d) corresponde a la velocidad zonal (U) mientras que (e)-(h) a la anomalía de temperatura (TA). En todos los casos la velocidad vertical (W) se ha representado mediante flechas.

Froude altos ($U/c > 1$), ha producido fuerte advección zonal de las ondas baroclínicas generadas durante este periodo y el rompimiento de las mismas (formación de frentes). No obstante, estos efectos desaparecen al emplear un coeficiente de viscosidad calculado con el esquema de Mellor y Yamada (Exp5). Por otra parte, en el experimento con termoclina de 40 m (Exp4), solo se pudo estimar las velocidades de propagación para los dos primeros modos verticales, las cuales se incrementaron en 5 y 6 % con respecto al caso lineal. En este caso la máxima amplitud para η (U , TA y D20) de 85 mm (64 cm/s, 3°C y 34 m) se observó en el primer (segundo) modo vertical. A diferencia del caso anterior, el fuerte frente observado en el segundo modo no se atenuó al emplear el esquema turbulento (Exp6), debido a que la D20 presenta valores del orden de la profundidad de la termoclina. Queda pendiente realizar mayor cantidad de simulaciones intermedias entre los esfuerzos de viento y profundidades de la termoclina empleados, así como el modelado de la evolución adiabática de la onda Kelvin en una termoclina inclinada. Los resultados finales de estos experimentos idealizados serán de utilidad para establecer escenarios de impacto de la onda Kelvin en la dinámica y termodinámica a lo largo de la costa peruana.

Referencias

- Dewitte, B., J. Vazquez-Cuervo, 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 Part II*, 77–80, 143–156, doi:10.1016/j.dsr2.2012.04.011.
- Dewitte, B., G. Reverdin, and C. Maes, 1999: Vertical structure of an OGCM simulation of the equatorial Pacific Ocean in 1985–1994, *Journal of Physical Oceanography*, 29, 1542–1570.
- Fajardo, J., K. Mosquera, y K. Takahashi, 2015: Modelo numérico tridimensional de la onda Kelvin en el Pacífico Ecuatorial, *Boletín Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño"*, 2, 10, 9–10, Instituto Geofísico del Perú.
- Fjølstad, J. E., 1933: *Interne Wellen*, *Geofysiske Publikasjoner*, 10 (6), 35.
- Giese, B. S., D. E. Harrison, 1990: Aspects of the Kelvin wave response to episodic wind forcing, *Journal of Geophysical Research*, 95 (C5), 7289–7312.
- Mellor, G. L., and T. Yamada, 1982: Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, *Rev. Geophys. Space Phys.*, 20, 851–875.
- Mosquera-Vásquez, K., B. Dewitte, S. Illig, K. Takahashi, and G. Garric, 2013: The 2002–03 El Niño: Equatorial waves sequence and their impact on sea surface temperature, *Journal of Geophysical Research Oceans*, 118, 346–357, doi:10.1029/2012JC008551.
- Mosquera-Vásquez, K., B. Dewitte, S. Illig, 2014: The Central Pacific El Niño intraseasonal Kelvin wave, *Journal of Geophysical Research Oceans*, doi:10.1002/2014JC010044.

Resumen del Informe Técnico

PPR/El Niño - IGP/ 2016-6

Advertencia: El presente informe sirve como insumo para el Comité Multisectorial para el Estudio Nacional del Fenómeno El Niño (ENFEN). El pronunciamiento colegiado del ENFEN es la información oficial definitiva. La presente información podrá ser utilizada bajo su propia responsabilidad.

Resumen

Según el valor del Índice Costero El Niño (ICEN), para el mes de mayo las condiciones climáticas de la costa peruana fueron cálidas débiles (0.54°C). Los valores temporales del ICEN (ICENTmp), 1 y 2, indican que para los meses de junio y julio las condiciones serían neutras, lo que estaría indicando que, según el criterio del ENFEN (2012), el evento El Niño habría durado hasta mayo. El pronóstico de la temperatura superficial del mar (TSM) de los modelos numéricos internacionales para la región del Pacífico Oriental, con condiciones iniciales del mes de junio, indican en promedio condiciones neutras para los meses de julio y agosto. Estos mismos resultados numéricos predicen que para el Pacífico Central las condiciones serían frías débiles para esos meses.

La tercera onda Kelvin fría del año en curso, cuya llegada se esperaba para el mes de junio, perdió intensidad antes de llegar a 110°W , probablemente debido a las anomalías de viento del oeste ecuatorial de los 130°W que se observaron en la primera quincena de junio. En la tercera semana de junio se observó un pulso de viento del este, localizado entre 150°E y 150°W , aparentemente asociado a la oscilación Madden-Julian, la cual ya habría pasado. Si esto genera una onda Kelvin fría, esta llegaría al extremo oriental en el mes de agosto.

Índice Costero El Niño

Utilizando los datos de TSM promediados sobre la región Niño1+2, actualizados hasta el mes de junio de 2016 del producto ERSST v3b, generados por el Climate Prediction Center (CPC) de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, EE.UU.), se ha calculado el Índice Costero El Niño (ICEN; ENFEN, 2012) hasta el mes de mayo de 2016. Los valores se muestran en la Tabla 1.

Año	Mes	ICEN	Condiciones costeras del mes
2016	Febrero	1.49	Cálida Moderada
2016	Marzo	1.07	Cálida Moderada
2016	Abril	0.77	Cálida Débil
2016	Mayo	0.54	Cálida Débil

Tabla 1. Valores recientes del ICEN.
(Descarga: <http://www.met.igp.gob.pe/datos/icen.txt>)

Según el valor del ICEN para el mes de mayo, la señal de El Niño costero 2015/2016 continúa su disipación.

Diagnóstico del Pacífico Ecuatorial

En el océano Pacífico Ecuatorial las principales variables climáticas mostraron, en promedio, valores alrededor de su normal. A la fecha no se aprecian señales de un acoplamiento océano-atmósfera favorable para el desarrollo de un enfriamiento, a diferencia del año 1998 en el que se observaban anomalías de viento del este por estas fechas. La anomalía de la TSM (ATSM) en la región Niño 3.4, en promedio (IR, ME, OSTIA), continúa con una tendencia negativa y en la actualidad se ubica dentro de su rango normal, muy similar a lo que ocurrió en el invierno de 1983 y superior a 1998. Por otro lado, en la región Niño 1+2 la anomalía de la TSM fue próxima a sus condiciones normales, con valores superiores a los observados anteriormente en años La Niña costera. Las anomalías de viento del oeste en el Pacífico Central (160°E - 160°W ; 5°S - 5°N) mostraron, en promedio, anomalías negativas, sin embargo fueron próximas a su condición normal. La convección en el Pacífico Central-Oriental es ligeramente inferior a su climatología, lo que indica que no existe un acoplamiento entre la atmósfera y el océano para generar un evento La Niña. La termoclina en el Pacífico Oriental, en los puntos 110°W y 95°W , continúa mostrando anomalías negativas debido al paso de las ondas Kelvin frías. Por otro lado, la

Resumen del Informe Técnico

PPR/EI Niño - IGP/ 2016-6

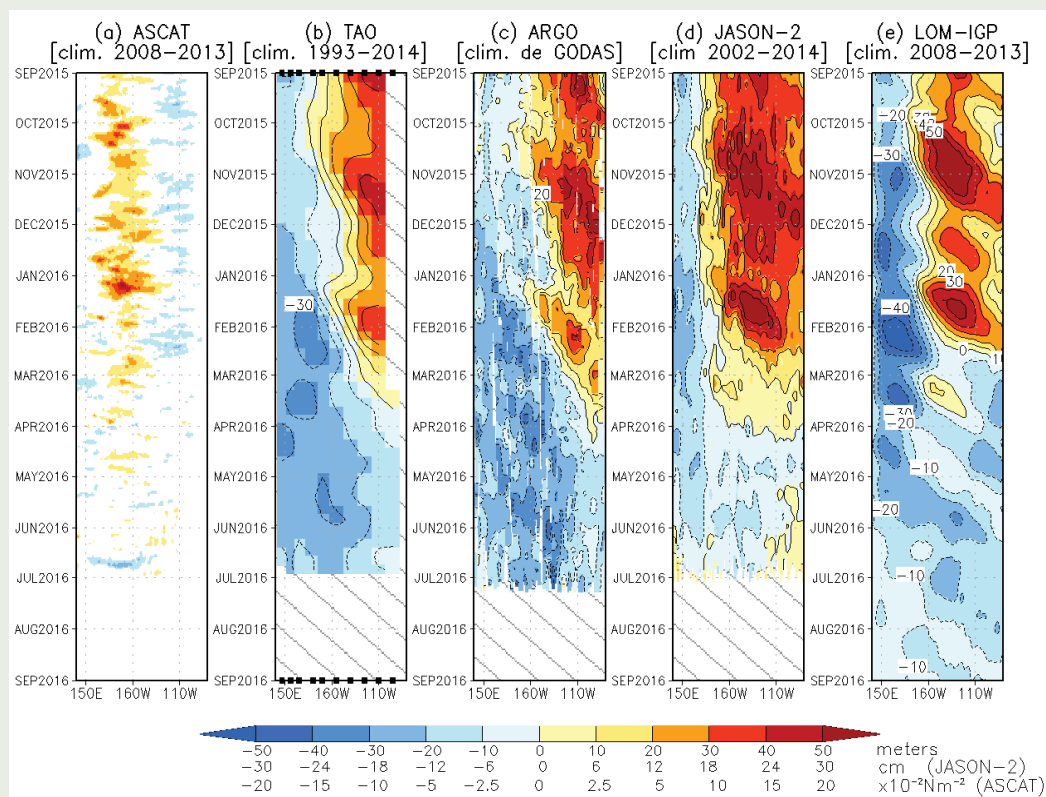


Figura 1. Diagrama longitud-tiempo de las anomalías de esfuerzo de viento zonal ecuatorial basado en datos del escatérómetro ASCAT (a), anomalía de la profundidad de la isoterma de 20°C datos de TAO (b) y los derivadores de Argo (c), datos del nivel del mar de JASON-2 (d). Finalmente en (e) se muestra la anomalía de la profundidad de la termoclina calculada con el modelo LOM-IGP (forzado por ASCAT y $\tau_{\text{aux}}=0$ para el pronóstico). Las líneas diagonales representan una propagación hacia el este con velocidad de 2.6 m/s (Elaboración: IGP).

inclinación este-oeste de la termoclina ecuatorial está en condiciones normales, mientras que la descarga de calor durante el mes de mayo parece haberse revertido en junio. En la primera quincena de junio se observaron anomalías de viento del oeste ecuatoriales alrededor de los 130°W, lo cual probablemente causó que la anomalía de la profundidad de la termoclina, asociada a la tercera onda Kelvin fría cuyo arribo se esperaba en junio, perdiera intensidad antes de llegar a 110°W (Figura 1c).

Pronóstico a corto plazo con modelo de ondas y observaciones

En la tercera semana de junio se observó un pulso de viento del este, localizado entre 150°E y 150°W, aparentemente asociado a la oscilación Madden-Julian, la cual ya habría pasado. Si esto generara una onda Kelvin, esta llegaría al extremo oriental en el mes de agosto. Sin embargo, en el caso de debilitarse la onda fría como ocurrió con las ondas frías anteriores, las temperaturas podrían mantenerse en un rango neutral.

Pronóstico estacional con modelos climáticos

Los ocho modelos climáticos inicializados en junio (excepto el CFSv2 actualizado en julio) indican que para los meses de julio y agosto los pronósticos de la anomalía de TSM en el Pacífico Oriental (región Niño 1+2), serían negativos, sin embargo estas condiciones son neutras (Figura 2). Por otro lado, en el Pacífico Central (Niño 3.4) los modelos indican que las condiciones en promedio para los meses de julio y agosto serían frías débiles; las condiciones para los trimestres julio – setiembre y octubre – diciembre 2016 serían frías débiles.

Un análisis retrospectivo de eventos La Niña en la región Niño 3.4 muestra una tendencia general a la sobreestimación de estos eventos, lo cual nos indica la necesidad de tomar con precaución los pronósticos actuales.

Conclusiones

1. El ICEN para mayo de 2016 fue de 0.54 (cálida débil). Asimismo, el ICENTmp para junio y julio es 0.27 y 0.02 respectivamente, ambos siendo condiciones neutras.

Resumen del Informe Técnico

PPR/El Niño - IGP/ 2016-6

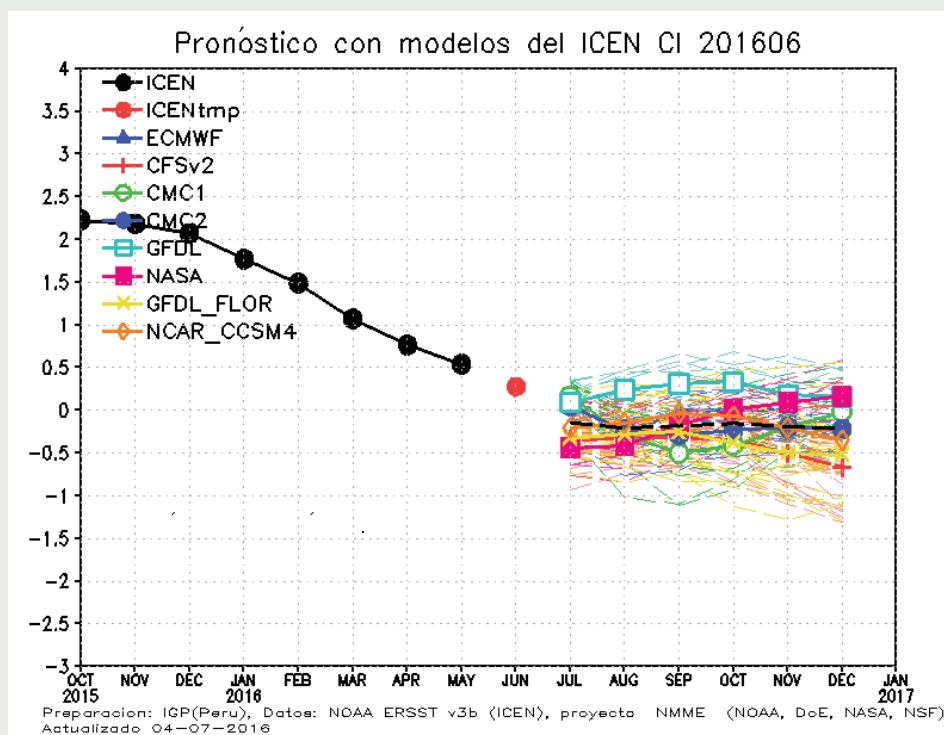


Figura 2. Índice Costero El Niño (ICEN, negro con círculos llenos) y su valor temporal (ICENtmp, rojo con círculo lleno). Además, pronósticos numéricos del ICEN (media móvil de tres meses de las anomalías pronosticadas de TSM en Niño 1+2) por diferentes modelos climáticos. Las líneas entrecortadas corresponden a los miembros de los "ensembles". Los pronósticos de los modelos CFSv2, CMC1, CMC2, GFDL, NASA GFDL_FLOR y NCAR_CCSM4 tienen como condición inicial el mes de junio de 2016. El modelo ECMWF tiene como condición inicial el mes de junio de 2016 (Fuente: IGP, NOAA, proyecto NMME, ECMWF).

2. Durante el mes de junio, la ATSM en la región Niño 1+2 continuó oscilando en $\pm 1^{\circ}\text{C}$ alrededor de su valor climatológico, superior a lo observado en años La Niña costera. Los tres productos (infrarrojo, microondas y OSTIA) mostraron esta variación.

3. La ATSM en la región Niño 3.4, durante este mes, ha mostrado valores dentro de lo normal.

4. En la primera quincena de junio se observaron anomalías de viento del oeste ecuatoriales alrededor de los 130°W , lo cual probablemente causó que la anomalía de la profundidad de la termoclina, asociada a la onda Kelvin que se esperaba arribara en junio (tercera onda Kelvin fría del año en curso), perdiera intensidad antes de llegar a 110°W .

5. En la tercera semana de junio se observó un pulso de viento del este, localizado entre 150°E y 150°W , aparentemente asociado a la oscilación Madden-Julian, la cual ya habría pasado. Si esto generara una onda Kelvin, esta llegaría al extremo oriental en el mes de agosto.

6. La convección en el Pacífico Oriental y Central se encontró ligeramente menos activa que lo normal para la época. Sin embargo, en general no hay señales claras de acoplamiento océano-atmósfera que pueda hacer crecer a un evento La Niña en el Pacífico Central.

7. La inclinación de la termoclina ecuatorial está normal, mientras que la descarga de calor ecuatorial durante el mes de mayo parece haberse revertido en junio.

8. Para el Pacífico Oriental (Niño 1+2), los ocho modelos inicializados en junio (salvo el CFSv2 actualizado en julio) indican que el mes de agosto presentaría condiciones neutras. En general, estos pronósticos son menos fríos que los inicializados en mayo.

9. Para el Pacífico Central (Niño 3.4), todos los modelos que han sido considerados, y que fueron inicializados en junio, indican que El Niño continuaría su declinación y presentaría condiciones frías débiles en promedio para agosto. Para los siguientes meses, los modelos predicen La Niña en el Pacífico Central de magnitud entre débil y moderada en promedio. Se nota que los modelos han exagerado las magnitudes de eventos La Niña pasados y, dado que la descarga de calor se ha frenado (al menos temporalmente), es posible que el enfriamiento ecuatorial no sea tan pronunciado como pronosticado.

Referencias

ENFEN, 2012: Definición operacional de los eventos "El Niño" y "La Niña" y sus magnitudes en la costa del Perú, Nota Técnica ENFEN.

Comunicado Oficial ENFEN

COMITÉ MULTISECTORIAL ENCARGADO DEL ESTUDIO NACIONAL DEL FENÓMENO EL NIÑO (ENFEN)



COMUNICADO OFICIAL ENFEN N° 11-2016

Condiciones normales a ligeramente frías en la costa del Perú en lo que resta del invierno

El Comité Multisectorial encargado del Estudio Nacional del Fenómeno El Niño (ENFEN) mantiene al estado de Alerta "No activo"¹, debido a que en la actualidad en promedio se presentan condiciones normales de temperatura superficial del mar (TSM) en la región Niño 1+2, así como a lo largo de la costa del Perú.

En lo que resta del invierno, en promedio para la costa peruana, se esperan condiciones normales a ligeramente frías, debido a la estacionalidad del viento costero y al posible arribo de una nueva onda Kelvin fría para agosto, respectivamente. No se descarta el desarrollo de un evento La Niña costera a partir de la primavera.

El Comité encargado del Estudio Nacional del Fenómeno El Niño (ENFEN) se reunió para analizar y actualizar la información de las condiciones meteorológicas, oceanográficas, biológico-pesqueras e hidrológicas correspondiente al mes de junio del 2016 y sus perspectivas.

La disminución del contenido de calor en el océano ecuatorial se ha revertido ligeramente, pero mantiene una anomalía negativa. En la región del Pacífico Ecuatorial Central (Niño 3.4)², la anomalía de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) mantuvo una tendencia negativa, con una anomalía mensual de $-0,1^{\circ}\text{C}$. Sin embargo, la actividad convectiva, la subsidencia³ y el viento zonal en el Pacífico Ecuatorial hasta el momento continúan sin mostrar un acoplamiento favorable al desarrollo de un mayor enfriamiento.

En el Pacífico Ecuatorial Oriental (región Niño 1+2), la TSM mostró valores fluctuantes con una anomalía promedio mensual de $+0,4^{\circ}\text{C}$. El valor del Índice Costero El Niño (ICEN) para mayo fue de $+0,54^{\circ}\text{C}$ (Condición Cálida Débil). El valor estimado del ICEN para junio (ICEN_{tmp}) es $+0,27^{\circ}\text{C}$ (Condición Neutral).

El Anticiclón del Pacífico Sur (APS) presentó una intensificación con respecto al mes anterior, alcanzando en su núcleo una anomalía mensual positiva de $+3\text{hPa}$ como consecuencia en promedio, los vientos alisios del

sudeste, al sur de los 15°S y a gran distancia de la costa, mostraron intensidades por encima de lo normal, mientras que los vientos costeros mostraron un comportamiento normal a lo largo del litoral.

Las temperaturas extremas del aire en la costa norte y central se presentaron por encima de lo normal con anomalías de $+1,7^{\circ}\text{C}$ para la temperatura máxima y $+0,9^{\circ}\text{C}$ para la temperatura mínima. En la costa sur, las anomalías fueron $+0,9^{\circ}\text{C}$ y $+0,7^{\circ}\text{C}$, respectivamente. En cuanto a las anomalías de la TSM en el litoral, estas presentaron en promedio valores de $+0,4^{\circ}\text{C}$ desde Paita hasta Ilo, aunque en Talara la anomalía promedio fue $-1,9^{\circ}\text{C}$ (Figura 1). Por otro lado, se mantiene la presencia de aguas oceánicas de alta salinidad fuera de las 10 mn entre Chicama y Callao.

La tercera onda Kelvin fría del año, alcanzó la costa peruana a mediados de junio con magnitud débil, con un impacto leve en el nivel medio del mar y en la temperatura de la capa superficial. Cabe indicar que la intensidad de esta onda, al igual que en el caso de la segunda onda Kelvin fría, disminuyó en su propagación hacia Sudamérica debido a anomalías débiles de vientos del oeste en la región oriental del Pacífico.

En la Estación Fija Paita, localizada a 7 mn de la costa, la columna de agua mostró condiciones neutras de temperatura en los 100 m de la columna de agua, en promedio. Dentro de las 100 mn de la costa, frente a Paita, se registraron anomalías negativas ($<-1^{\circ}\text{C}$) en los primeros 50 m y condiciones neutras hasta los 500 m de profundidad. Frente a Chicama, se observaron anomalías positivas de temperatura de hasta $+3^{\circ}\text{C}$ fuera de las 20 mn hasta los 150 m de profundidad asociada a la presencia de aguas oceánicas, mientras que cerca de la costa se presentaron condiciones neutras.

¹Estado de Alerta "No activo": Corresponde a condiciones neutras o cuando el Comité ENFEN espera que El Niño o La Niña costeros están próximos a finalizar

²Región Niño 3.4: $5^{\circ}\text{S} - 5^{\circ}\text{N}$, $170^{\circ}\text{W} - 120^{\circ}\text{W}$

³Subsidencia es el descenso del aire frío hacia la superficie terrestre



Comunicado Oficial ENFEN

Los caudales de los ríos de la costa mostraron características propias del período de estiaje, con hidrogramas de tipo descendente y en su mayoría con caudales promedios diarios por debajo de lo normal. Los reservorios en la costa norte y sur vienen operando en promedio al 77% y 59% de su capacidad hidráulica útil, respectivamente.

La clorofila-a, indicador de la producción del fitoplancton que es base de la cadena alimenticia en el mar, presentó condiciones normales para el mes a lo largo de toda la franja costera. La anchoveta se presentó dentro de las 40 mn desde Talara hacia el sur, con sus máximas concentraciones frente a San Juan. La pesca industrial se desarrolló principalmente entre Chimbote y Bahía Independencia. Durante la primera quincena de junio, los indicadores de la actividad reproductiva de la anchoveta mantuvieron los valores propios de la finalización del periodo de desove de verano, sin embargo en la última semana de junio, con información de la Primera Temporada de Pesca, se registra un leve incremento de la actividad de desove.

Continuó la presencia de especies asociadas a aguas cálidas, como la caballa, jurel fino, bonito, barrilete y merluza frente a la costa centro-norte. De otro lado, se detectó la presencia de munida dentro de las 20 millas de la zona costera central y sur, asociada a las aguas costeras frías.

PERSPECTIVAS

De acuerdo a la estacionalidad, se espera que la TSM continúe descendiendo, debido a la intensificación del Anticiclón del Pacífico Sur (APS) y de los vientos costeros del sur. El posible arribo de una nueva onda Kelvin fría para el mes de agosto podría favorecer el desarrollo de anomalías negativas de la TSM en la costa de Sudamérica. Sin embargo, de debilitarse esta onda fría, como ocurrió con las ondas frías anteriores, las temperaturas podrían mantenerse en un rango neutral.

Asimismo, se espera que estas condiciones estén acompañadas por la continuación de la cobertura nubosa y lloviznas a lo largo de la costa en los próximos meses, propios de la estación.

Todos los modelos globales pronostican el desarrollo de condiciones La Niña débil o moderada para el Pacífico Ecuatorial Central (región Niño 3.4) a partir de agosto. No obstante, se ha observado que los modelos han tendido a sobreestimar la magnitud de enfriamientos pasados en esta región. Además, la reversión temporal de la descarga del contenido de calor y la falta de acoplamiento entre la atmósfera y el océano observadas generan incertidumbre en el desarrollo de este escenario. Para el Pacífico Oriental (región Niño 1+2), la mayoría de modelos globales pronostican anomalías negativas aunque dentro del rango neutral para lo que resta del invierno.

El Comité Multisectorial ENFEN, en base al análisis de los

pronósticos internacionales y de las observaciones, tales como las anomalías de TSM actuales en la región Niño 1+2 comparadas con las de años cuando se presentó un evento La Niña (Figura 2), considera probable que en lo que resta del invierno se presenten condiciones oceánicas normales a ligeramente más frías, sin descartar un posible desarrollo de un evento “La Niña Costera” a partir de la primavera.

El Comité Multisectorial ENFEN continuará informando sobre la evolución de las condiciones observadas y sus perspectivas.

Comité Multisectorial ENFEN
Callao-Perú, 07 de julio de 2016

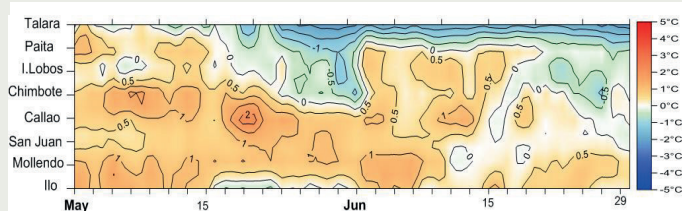


Figura 1. Diagrama Hovmöller de la evolución de la anomalía de la TSM a lo largo del litoral desde mayo 2016, en base a las observaciones diarias en las estaciones de la DHN, al 30 de junio.

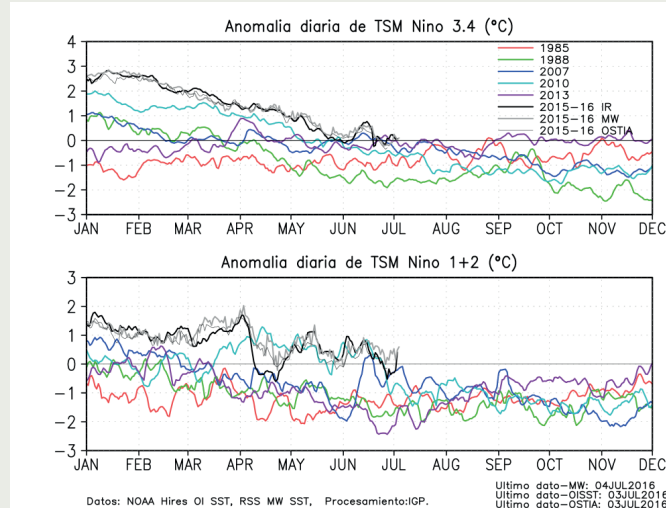


Figura 2. Series de tiempo de la anomalía diaria de la TSM en la región Niño 3.4 (arriba) y en la región Niño 1+2 (abajo). Las líneas en color negro (gruesa), gris y negro (fina) indican la evolución de la anomalía de la TSM en el presente año usando información infrarroja (IR), microondas (MW) y del producto OSTIA, respectivamente. Las líneas de color rojo, azul, celeste y verde, indican la evolución de la anomalía de la TSM para los años de Niña costera 1985, 2007, 2010 y 1988.



© Instituto Geofísico del Perú
Calle Badajoz 169, Urb. Mayorazgo IV Etapa, Ate, Lima, Perú
Central Telefónica: (511) 317 2300
<http://www.igp.gob.pe>
[f http://www.facebook.com/igp.peru](http://www.facebook.com/igp.peru)
[t http://twitter.com/igp_peru](http://twitter.com/igp_peru)

En el marco del:

