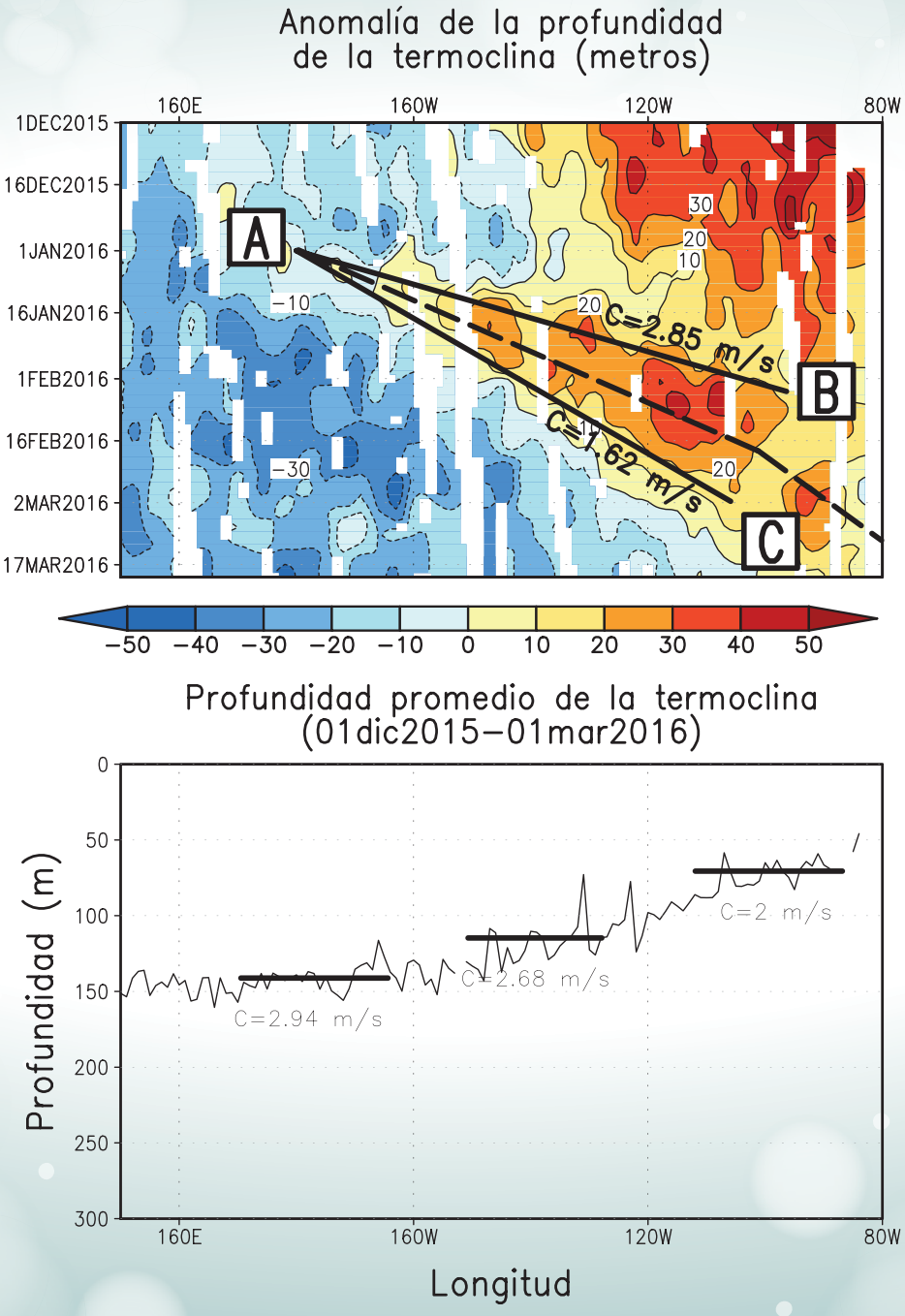
PERÚ Ministerio del Ambiente | Instituto Geofísico del Perú - IGP

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



Artículo de Divulgación Científica

¿Por qué las ondas Kelvin oceánicas no impactaron tanto la TSM en la costa de Perú durante el evento El Niño 2015/16?

Kobi Mosquera-Vásquez, Dr.
Investigador Científico del Instituto Geofísico del Perú

Doctor en Oceanografía Física de la Universidad Paul Sabatier de Francia, Magíster en Física – Mención Geofísica y Físico de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Actualmente es investigador científico superior de la Sudirección de Ciencias de la Atmósfera e Hidrósfera del Instituto Geofísico del Perú (IGP) y es representante alterno del IGP en el Comité Técnico para el Estudio Nacional del Fenómeno El Niño (ENFEN). En la actualidad se dedica al estudio de las ondas Kelvin oceánicas y su impacto en la dinámica y termodinámica del Pacífico Ecuatorial. Para esto utiliza información in situ, satelital y modelos numéricos simples.

Los años 2015 y 2016 han sido muy interesantes para la comunidad científica internacional dedicada al estudio del Fenómeno El Niño, ya que luego de 18 años se dio un evento cálido con una magnitud comparable a la que se alcanzó en 1997/1998 y 1982/1983. Hay que indicar que en el Pacífico Central el evento, basado en la Temperatura Superficial del Mar (TSM), fue superior en su pico máximo (noviembre - diciembre) a los eventos de aquellos años. Sin embargo, frente al Perú, según la anomalía de la TSM en la región Niño 1+2 y basado en la definición del ICEN (ENFEN, 2012), el evento alcanzó la magnitud fuerte en invierno mas no extraordinaria, tal como sucedió en 1997/1998 y 1982/1983. Uno de los posibles factores habría sido el menor impacto de las ondas Kelvin oceánicas sobre la TSM a lo largo de la costa peruana. Estas ondas, al parecer, se debilitaron poco antes de alcanzar el extremo oriental, tal como se puede apreciar en la Figura 1, donde se muestran los diagramas longitud – tiempo a lo largo de la franja ecuatorial del evento El Niño 2015/2016 de distintas variables, como el esfuerzo de viento zonal, la profundidad de la termoclina y el nivel del mar. Se observa que la anomalía del esfuerzo de viento zonal presentó seis pulsos de viento del oeste intensos y recurrentes (ver cuadros verdes en la Figura 1a) durante el año 2015, los cuales produjeron la formación de seis ondas Kelvin cálidas (ver Figura 1bcd) que se esperaba habrían incrementado la temperatura del mar en el Pacífico Ecuatorial por medio de procesos advectivos tanto horizontales como

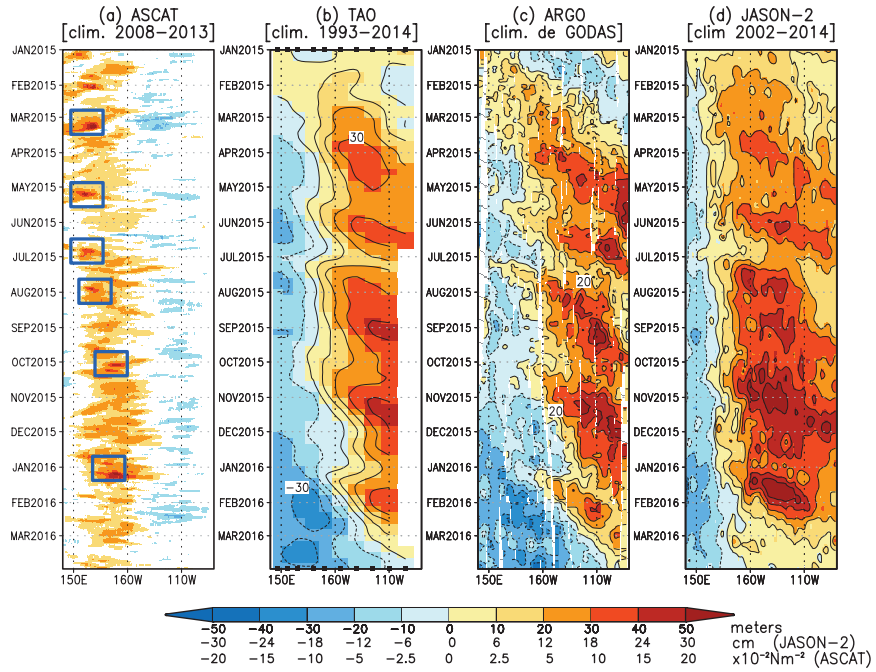


Figura 1. Diagramas longitud-tiempo de las anomalías de esfuerzo de viento zonal ecuatorial basados en datos del escaterómetro ASCAT (a), anomalía de la profundidad de la isoterma de 20°C datos de TAO (b) y los derivadores de Argo (c), datos del nivel del mar de JASON-2 (d). Los cuadrados azules de (a) indican pulsos de viento.

¿Por qué las ondas Kelvin oceánicas no impactaron tanto la TSM en la costa de Perú durante el evento El Niño 2015/16?

Mosquera K. y Dewitte B.

Boris Dewitte, Dr.
Investigador Científico del Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales

Doctor en Oceanografía Física de la Université Paul Sabatier, Toulouse, Francia, e Ingeniero en mecánica de fluido de la Escuela Nacional de Aeronáutica y Espacio (Supaero). Desde el año 1999 es investigador científico del Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales (LEGOS), donde se desempeña como especialista en oceanografía física y dinámica tropical. Forma parte de varios comités científicos internacionales, incluyendo el Scientific Steering Group del programa Climate Variability (CLIVAR). Recientemente su investigación está enfocada en la interacción océano-atmósfera en el Pacífico sur-este y cómo el cambio climático afecta la circulación oceánica y el ciclo hidrológico en la costa.

verticales (ENFEN, 2015a-f; Mosquera, 2014). Estas ondas impactaron la profundidad de la termoclina, tal como se aprecia en la Figura 1bc, y también el nivel del mar (Figura 1d). Todo esto se desarrolló de la manera que se espera cuando se produce un evento El Niño. Estas ondas ecuatoriales, en general, contribuyen en el incremento de la TSM que luego produce más anomalías de viento del oeste a través del proceso de acoplamiento océano-atmósfera (*Bjerknes feedback*; Bjerknes, 1969) que lleva al crecimiento de un evento El Niño. Entre julio y diciembre, según la información de la profundidad de la termoclina de TAO (Figura 1b) y nivel del mar satelital de JASON (Figura 1c), estuvieron presentes las ondas más intensas en el Pacífico Ecuatorial Central. Lo interesante es que las ondas Kelvin, luego del mes de julio, provocaron menor calentamiento frente a la costa peruana que lo esperado. Las ondas no mantuvieron su magnitud original en el extremo oriental e, incluso, parecieron desaparecer poco antes de su llegada esperada a la costa sudamericana (agosto-setiembre 2015 y febrero-marzo 2016; Figura 2cd) ¿Qué puede haber pasado?

La onda Kelvin ecuatorial, desde el punto de vista lineal, es una onda de gravedad no-dispersiva, la cual viaja hacia el este restringida a la banda ecuatorial debido a la rotación de la Tierra (Wang, 2003). Teóricamente, la onda Kelvin puede ser representada en la aproximación del modelo de "gravedad reducida" (Philander, 1991), la cual representa, en forma simplificada, la estructura térmica del océano como si este último solo tuviera dos capas de agua: una cálida (superior) de profundidad H y densidad ρ_1, y otra fría (inferior) de profundidad infinita y densidad ρ_2 ($>\rho_1$). El parámetro H representa la profundidad de la termoclina. Bajo esta aproximación, las ondas Kelvin tendrían una velocidad de propagación $C=(g'H)^{1/2}$, donde g' es conocida como gravedad reducida y es igual a $g.(\rho_2-\rho_1)/\rho_1$, y g es la aceleración de la gravedad (9.8 m/s^2). Según este modelo, si la profundidad y estratificación de la termoclina fueran homogéneas en el Pacífico Ecuatorial, se esperaría que la ondas Kelvin forzadas por el viento se desplacen libremente hacia el este, sin ningún cambio en sus características de propagación (velocidad de fase, amplitud, estructura vertical), excepto por la pérdida o disipación de energía asociada a la propagación vertical, lo cual puede reducir su amplitud. No obstante, este tipo de disipación no puede explicar la magnitud de la tasa de decaimiento de la amplitud de la onda de Kelvin intraestacional (Mosquera et al., 2014).

Por otro lado, si una onda Kelvin cálida atravesara una región donde hay anomalías de viento del este/oeste, su amplitud podría verse reducida/aumentada. Como se puede apreciar en la Figura 2, vientos anómalos del este estuvieron presentes en el Pacífico Oriental durante casi todo el 2015 y debieron contribuir a la formación de ondas Kelvin frías que pudieron interferir

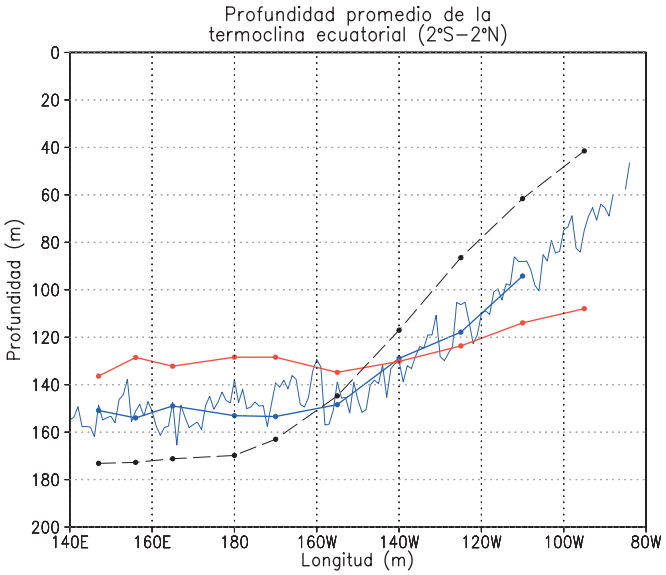


Figura 2. Profundidad promedio (octubre - febrero) de la termoclina en el Pacífico Ecuatorial (2°S-2°N) obtenida para el periodo octubre 2015 – febrero 2016 de TAO (línea azul gruesa) y ARGO (línea azul delgada) y para el periodo octubre 1997 – febrero 1998 de TAO (línea roja gruesa). La línea cortada delgada y de color negro indica la profundidad de la termoclina promedio obtenida de la climatología de TAO (1993-2014) para el periodo octubre – febrero.

parcialmente en la evolución de las ondas Kelvin cálidas en dicha región justo antes de llegar al extremo oriental. Esto aparentemente tuvo un rol importante en evitar que El Niño se desarrollara intensamente en el año 2014 (Dewitte et al., 2016). En los resultados preliminares de Mosquera y Segura (2015), quienes usaron un modelo oceánico de una capa homogénea (Mosquera, 2009) forzado con anomalías de esfuerzo de viento zonal del satélite ASCAT, se muestra la importancia de la anomalía de vientos del este en el Pacífico Ecuatorial Oriental para la formación de ondas Kelvin frías que atenuaron las ondas cálidas que se produjeron durante El Niño 2015-2016, en particular la formada a inicios de julio de 2015.

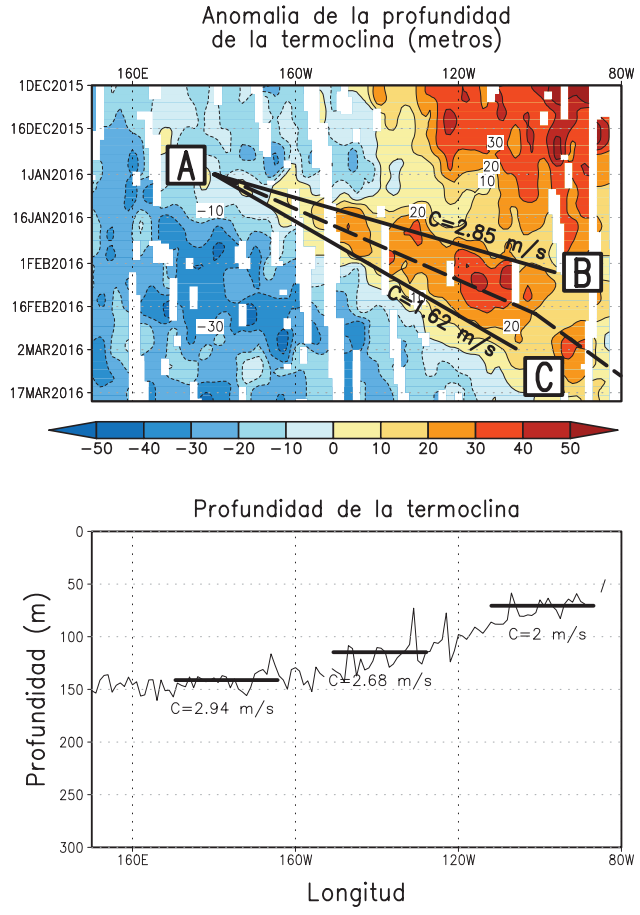


Figura 3. En el panel superior se muestra la evolución de la anomalía de la profundidad de la termoclina obtenida de los flotadores ARGO y de la climatología de GODAS. Las líneas negras representan la trayectoria que tendría una onda Kelvin con una velocidad de 2.85 m/s (AB) y 1.62 m/s (AC). El panel inferior indica la profundidad promedio de la termoclina entre 01 de diciembre de 2015 y 01 de marzo de 2016. Las líneas rectas horizontales indican aproximadamente el promedio de la profundidad (m) de la termoclina (145, 120, 70) y más abajo la velocidad teórica (m/s) que debe tener una onda Kelvin con dicha profundidad de termoclina (2.94, 2.68 y 2) usando la fórmula $C=(g'H)^{0.5}$, donde g' es la gravedad reducida y H la profundida de la termoclina.

Por otro lado, es conocido que la profundidad de la termoclina en promedio no es uniforme a lo largo del Pacífico Ecuatorial, siendo mayor en el oeste que en el este, como consecuencia de la acción de los vientos alisios ecuatoriales que provocan un fuerte afloramiento de aguas frías en la región oriental. Solo en eventos El Niño la termoclina se vuelve más profunda en el este. Durante El Niño 2015/2016, a pesar de ser un evento muy fuerte en el Pacífico Ecuatorial, la termoclina no estuvo tan horizontal en el extremo oriental como en El Niño 1997-1998 (ver Figura 2). Por lo tanto, al pasar las ondas Kelvin ecuatoriales a lo largo de una termoclina de profundidad variable, estas debieron haber modificado sus características, tal como lo explican Yang y Yu (1992). Ellos estudian el caso en el que la profundidad de la termoclina se reduce hacia el este sobre escalas menores que la longitud de la onda Kelvin ecuatorial y encuentran que esta sufre una disminución en su longitud de onda y un incremento en su magnitud para conservar la energía total. Por otro lado, los científicos explican también que si el cambio oeste-este fuera abrupto debería haber una reflexión de la onda Kelvin como ondas Rossby, que haría perder energía a la primera. Mosquera-Vásquez et al. (2014), usando datos observados, muestran que en eventos El Niño del Pacífico Central, en los que la profundidad de la termoclina no es uniforme a lo largo del Pacífico Ecuatorial, la onda Kelvin se refleja parcialmente como ondas Rossby y no logra alcanzar la costa americana con la misma intensidad con la que se formó. Si vemos el gráfico inferior de la Figura 3, el cual representa la profundidad de la isoterma de 20ºC (termoclina), obtenida de los datos de los flotadores ARGO, para el periodo diciembre 2015 – febrero 2016, se puede calcular, usando los resultados del modelo de "capa y media" y asumiendo una gravedad reducida g'=0.06 m/s^2, que una onda Kelvin formada en el extremo occidental tendría una velocidad de 2.94 m/s alrededor de la línea de cambio de fecha, pasando por el valor de 2.68 m/s, entre 160ºW y 120ºW, para terminar con una velocidad aproximada de 2 m/s en el extremo oriental. Esto podría haber sucedido con la onda Kelvin que se formó a mediados de diciembre cuya señal se aprecia en el panel superior de la Figura 3. Una vez formada la onda, esta cambia su velocidad entre 100º y 110ºW, tal como se muestra en las líneas punteadas. Como la velocidad está ligada también a su estructura meridional, por la continuidad de la corriente zonal y presión y asumiendo que no existe dispersión modal, se debería ver un incremento de su amplitud a lo largo del ecuador. Asimismo, habría que hacer un análisis para detectar si hubo reflexión de ondas Rossby en esta longitud.

¿Por qué las ondas Kelvin oceánicas no impactaron tanto la TSM en la costa de Perú durante el evento El Niño 2015/16?

Mosquera K. y Dewitte B.

Algo que lo descrito en el párrafo anterior no puede explicar es la propagación en forma de abanico que se observa en la señal de algunas ondas Kelvin sobre la profundidad de la termoclina, presentando un rango de velocidades de onda en lugar de una sola. Es decir, la onda Kelvin, al parecer, sufrió una especie de dispersión de su energía desde que se formó y mantuvo su señal máxima casi al centro de este "abanico" y una mayor dispersión entre 100º y 110ºW. Los extremos de esta estructura corresponden a velocidades de onda de aproximadamente 2.85 m/s (AB) y 1.62 m/s (AC). Tomando el concepto de Busalacchi y Cane (1988), lo que podría haber ocurrido es que, debido al cambio de la densidad horizontal del océano, la onda Kelvin cálida se habría transmitido como: 1) un paquete de ondas Kelvin, de igual o menor velocidad que la original, y 2) otro paquete de ondas Rossby cortas (las que viajan al este). Adicionalmente, habría una reflexión de la onda Kelvin original como un paquete de ondas Rossby largas (las que viajan al oeste). Este proceso depende de la estructura de la termoclina, la cual determina la estructura vertical de las ondas (i.e. modos baroclinicos) y el intercambio de *momemtum* (y energia) entre distintas ondas. Este proceso de reflexión/transmisión habría sido más intenso entre 110º y 100ºW, donde la termoclina presentó una mayor inclinación, por lo que la estructura vertical de las ondas pudo modificarse y tener mayor variabilidad vertical. Esto se resume en forma gráfica en la Figura 4. El trabajo de Dewitte et al. (1999), quienes usaron información de un modelo de circulación general, concluyó que en este proceso de dispersión de energía, la amplitud de las ondas Kelvin más lentas se incrementarían en el extremo oriental. Por otro lado, procesos no-lineales pueden también contribuir a que la onda Kelvin se pueda disipar; tal idea la plantean Dewitte et. al. (2016). En su trabajo los autores resaltan el rol de la "advección" en la ecuación de *momentum* (términos no-lineales de la forma $u'.\frac{\partial u'}{\partial x}$) en la disipación de las ondas Kelvin por medio de dispersión modal. Esto pudo contribuir a que El Niño 2014 no se desarrollara. Más aún, el estudio numérico de Giese y Harrison (1990) muestra que la poca profundidad de la termoclina en el Pacífico Oriental hace que los efectos no-lineales en las ondas Kelvin sean importantes debido a que la amplitud de las corrientes asociadas a las ondas alcanzan un nivel comparable al de las corientes promedio, por lo cual las aproximaciones lineales podrían no ser adecuadas en esta región. Lo explicado arriba son procesos físicos que serán importantes para interpretar la dinámica de la onda Kelvin en el Pacífico Ecuatorial, particularmente para aquellas que se presentaron en el periodo 2015/2016. Saber exactamente cuál es el mecanismo que determina la propagación de una onda Kelvin específica hacia el continente americano nos permitirá realizar un mejor pronóstico de su impacto en la temperatura superficial del mar en la costa peruana. Esto es un trabajo complejo, que amerita mucho esfuerzo tanto para la obtención y procesamiento de información *in situ* y satelital, como para la implementación de modelos oceánicos simples y de circulación general. Sin embargo, experimentos con modelos oceánicos de circulación general requieren de sistemas de

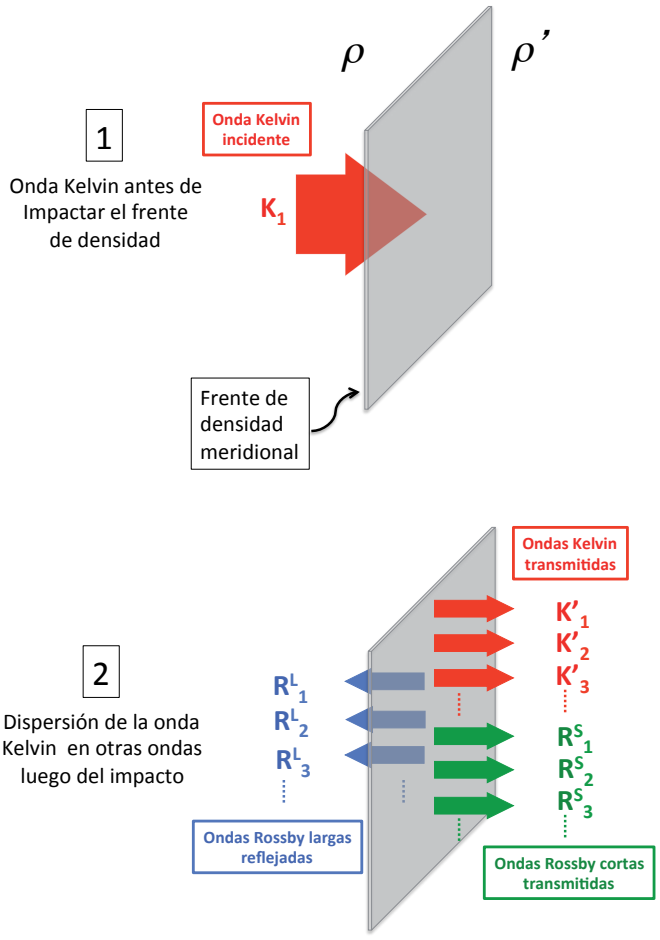


Figura 4. Proceso de dispersión de energía (dispersión modal) de la onda Kelvin cuando hay un cambio de densidad horizontal (de ρ a ρ'). El panel superior (1) representa un instante antes de que la onda Kelvin impacte la zona de cambio de densidad y el inferior (2) muestra un instante posterior al impacto de la onda Kelvin basado en la perspectiva de Busalacchi y Cane (1988).

cálculo de alto rendimiento (ej. Segura et al., 2014; Montes et al., 2016). Es este tipo de experimentos con los que se trabajará en el futuro para cuantificar el efecto de los procesos oceánicos no-lineales sobre la disipación/alteración de la onda de Kevin y poder interpretar mejor lo que aconteció a las ondas Kelvin para no impactar, con gran intensidad, la TSM de la costa en el evento El Niño 2015/2016. Es importante resaltar que este es un tema de investigación que deberá ser resuelto en los próximos años por la propia comunidad científica peruana, ya que no es prioritario para otros países pero sí para el Perú.

Referencias

Bjerknes, J., 1969: Atmospheric teleconnections from the equatorial pacific, Journal of Physical Oceanography, 97(3), 163-172.

Busalacchi, A. J., and M. A. Cane, 1988: The effect of varying stratification on low frequency equatorial motions, Journal of Physical Oceanography, 18, 801–812.

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.

Dewitte, B., K. Mosquera, y K. Takahashi, 2016: ¿Por qué El Niño 2014 no creció en el Pacífico Central?, Boletín Técnico "Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño", 3, 1, 4-8, Instituto Geofísico del Perú.

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

ENFEN, 2015a: Informe Técnico ENFEN, No.3 - 2015, marzo de 2015, 29.

ENFEN, 2015b: Informe Técnico ENFEN, Año 1, No. 02, mayo de 2015, 52.

ENFEN, 2015c: Informe Técnico ENFEN, Año 1, No. 04, julio de 2015, 51.

ENFEN, 2015d: Informe Técnico ENFEN, Año 1, No. 05, agosto de 2015, 59.

ENFEN, 2015e: Informe Técnico ENFEN, Año 1, No. 07, octubre de 2015, 61.

ENFEN, 2016: Informe Técnico ENFEN, Año 2, No. 02, enero de 2016, 61.

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.

Montes, I., K. Mosquera, M. R. Luna, H. Gilt, D. Gazen, y R. Woodman, 2016: Sistema computacional de alto rendimiento para la simulación de fluidos geofísicos HPC-Linux-Clúster, Boletín Técnico "Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño", 3, 3, 9-10, Instituto Geofísico del Perú.

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", 1, 1, 4-7, Instituto Geofísico del Perú.

Mosquera, K., y B. Segura, 2015: Experimentos con el modelo oceánico lineal, Boletín Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño", 2, 9, 9-10, Instituto Geofísico del Perú.

Mosquera, K., 2009: Variabilidad Intra-estacional de la Onda de Kelvin Ecuatorial en el Pacífico (2000-2007): Simulación Numérica y datos observados, Tesis para optar el grado de Magíster en Física - Mención Geofísica en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima.

Mosquera-Vásquez, K., B. Dewitte, and S. Illig, 2014: The Central Pacific El Niño Intraseasonal Kelvin wave, Journal of Geophysical Research, doi:10.1002/2014JC010044.

Philander, S. G., 1991: El Niño, La Niña, and Southern Oscillation, Academic Press, Londres, 289.

Segura, B., I. Montes, y K. Mosquera, 2014: Evolución del Sistema Computacional de Alto Rendimiento en el IGP para un mejor pronóstico y estudio de los fenómenos climáticos, Boletín Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño", 1, 11, 8-9, Instituto Geofísico del Perú.

Wang, B., 2003: Kelvin Waves, Encyclopedia of Meteorology, ED. J. Holton, Academic Press, 1062-1067.

Yang, J., and L. Yu, 1992: Propagation of equatorially trapped waves on a sloping thermocline, Journal of Physical Oceanography, 22, 573–583.