

Artículo de Divulgación Científica

Actividad de las ondas ecuatoriales y su impacto en la Temperatura Superficial del Mar en el Fenómeno El Niño 2002/2003

Es conocida la importancia para el Perú de pronosticar el Fenómeno El Niño (FEN) con la mayor confiabilidad y tiempo de anticipación posible. Para mejorar estos pronósticos, es necesario conocer y entender de manera precisa cada uno de los procesos físicos que están involucrados en el cambio de la Temperatura Superficial del Mar (TSM), variable que caracteriza la presencia de El Niño. Desde hace muchos años la comunidad científica está envuelta en alcanzar este objetivo, para lo cual se ha desarrollado mucho trabajo técnico-científico realizando observaciones *in situ* o mediante satélites, estudios estadísticos y teóricos, así como simulaciones con modelos numéricos complejos y simples del océano y atmósfera. Lamentablemente, como ya se sabía, y se ha vuelto a ver en este año 2014, los eventos El Niño pueden diferir bastante entre ellos y, además, aún existen vacíos científicos que limitan las predicciones del FEN.

El objetivo del presente documento es mostrar, basándose en el trabajo de Mosquera-Vásquez et al. (2013), la actividad de las ondas Kelvin y Rossby ecuatoriales, así como su contribución en el cambio de la anomalía de la TSM en el Fenómeno El Niño 2002/2003, que puede ser considerado del tipo de "Pacífico Central" o "Modoki" (ver Takahashi, 2014).

Para esto se realizó un análisis del balance de energía utilizando los datos oceánicos de un Modelo Oceánico de Circulación General (OGCM, por sus siglas en inglés) perteneciente a MERCATOR (http://www.mercator-ocean.fr/html/produits/index_en.html). Este modelo fue forzado por datos de viento y flujos de calor y agua superficiales observados, pero sin asimilación de datos oceánicos subsuperficiales. Los resultados fueron validados exitosamente con información *in situ* y satelital.

Método del balance de energía

Para obtener la contribución de las ondas Kelvin y Rossby en las corrientes zonales y en la profundidad de la termoclina en el OGCM, se asume que la dinámica del océano es lineal¹ y que la propagación de las ondas solo ocurre en la dirección horizontal, mientras que en la dirección vertical se asume que las oscilaciones son estacionarias (i.e. "modos normales"). El desarrollo de las ecuaciones para los modos normales en cada punto de la región ecuatorial permite obtener unos coeficientes, conocidos como baroclínicos, que luego son usados para calcular la contribución de las ondas Kelvin y Rossby a variables



Ph. D. (c) Kobi A. Mosquera Vásquez
Investigador Científico del
Instituto Geofísico del Perú

*Físico de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM), con un grado de Magister en Física - Mención Geofísica - obtenido en la misma casa de estudios. Actualmente es candidato a doctor en Oceanografía Física en la Universidad Paul Sabatier (Francia). Su investigación está relacionada con los procesos físicos involucrados en el Fenómeno El Niño, con énfasis en las ondas largas ecuatoriales: Kelvin y Rossby. Tiene experiencia en el modelado oceánico en el Pacífico Tropical, así como en el procesamiento de grandes volúmenes de información tales como datos *in situ*, remotos o resultados de modelos numéricos.*

como la profundidad de la termoclina y la velocidad zonal (oeste-este). Para esto se usa el método desarrollado por Dewitte et al. (1999), quien ha demostrado la utilidad de este para identificar características importantes de la dinámica de las ondas ecuatoriales en todos los océanos tropicales (Dewitte et al., 1999; Illig et al., 2004; Illig et al., 2007).

Contando con la contribución de las ondas Kelvin y Rossby a las perturbaciones en la profundidad de la termoclina y velocidad zonal, se puede estimar cómo las ondas Kelvin y Rossby podrían estar cambiando la TSM a lo largo del Pacífico Ecuatorial. En la Figura 1 se aprecian cinco diagramas Hovmöller (diagrama longitud vs tiempo) que muestran la anomalía del esfuerzo de viento (Fig. 1a en colores), la contribución de la onda Kelvin en la profundidad de la termoclina (Fig. 1a en tonos grises y 1b-d en contornos negros) y en las corrientes zonales (Fig. 1e en tonos grises), la contribución de la onda Rossby en las corrientes zonales (Fig. 1e en tonos azules), anomalía de TSM (Fig. 1b-d en colores), e isoterma de 28°C (Fig. 1a-d con línea color azul). Con este gráfico se puede deducir que en el Fenómeno El Niño 2002/2003 las ondas Kelvin ecuatoriales fueron forzadas por anomalías positivas de esfuerzo de viento zonal en el Extremo Oeste, que luego provocaron la advección (transporte) de aguas cálidas del oeste hacia el este. Esto se manifiesta con el desplazamiento de la isoterma de 28°C hacia el este en la Figura 1. Conforme las ondas Kelvin se desplazaron hacia el este, la anomalía de la TSM se incrementó a lo largo del Pacífico Ecuatorial. Asimismo, se presume que la presencia de las ondas Rossby, producidas por el rebote de las ondas Kelvin en la inclinación de la termoclina y en el borde continental, pudo contribuir al proceso de enfriamiento del evento.

¹ Matemáticamente hablando, significa que las perturbaciones con respecto al estado climático base son suficientemente pequeñas que las ondas se pueden superponer sin modificarse mutuamente.

Actividad de las ondas ecuatoriales y su impacto en la Temperatura Superficial del Mar en el Fenómeno El Niño 2002/2003

Mosquera K., Dewitte B., Illig S., Takahashi K., Garric G.

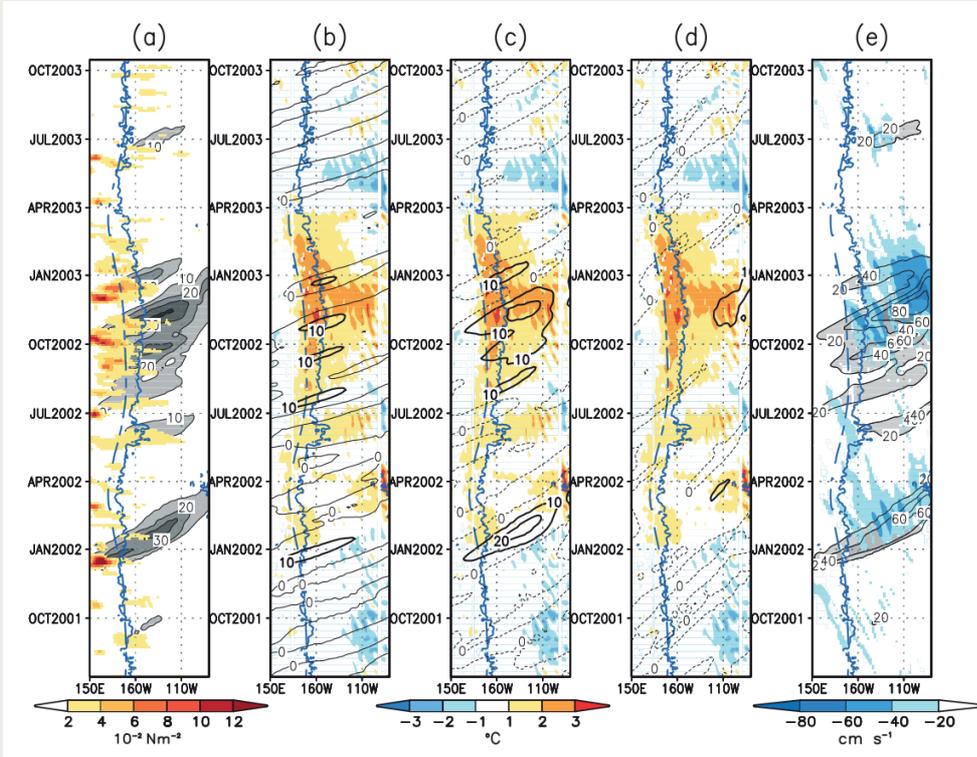


Figura 1. Diagramas Hovmöller que muestra: la anomalía del esfuerzo de viento en colores (a); la contribución de la onda Kelvin en la profundidad de la termoclina en tonos grises (a) y en contornos negros (b, c y d); la contribución de la onda Kelvin en las corrientes zonales en tonos grises (e); la contribución de la onda Rossby en las corrientes zonales en tonos azules (e); anomalía de TSM en colores (b, c y d); e isoterma de 28°C con línea color azul (a, b, c, d y e).

Lo descrito en el párrafo anterior es una manera de interpretar lo que aconteció en el Fenómeno El Niño 2002/2003. Para conocer, de manera objetiva, qué procesos físicos influyen en el incremento o disminución de la anomalía de la TSM en el tiempo, podemos hacer el cálculo del balance de calor en la capa superior del océano Pacífico Ecuatorial. Este cálculo contiene, de manera explícita, los procesos de transporte horizontal y vertical de la temperatura, así como los flujos de calor superficial. De existir un término residual (R) en el balance, se asume que este se asocia a procesos de mezcla vertical, aunque también incluiría los errores en el cálculo. En el estudio de Mosquera-Vásquez et al. (2013), se realizó el balance en la capa superficial hasta 50 metros de profundidad y se calcularon los cambios mensuales de la anomalía de la temperatura del mar promediada en esta capa (T_A).

El proceso de advección horizontal de temperatura se puede descomponer en: zonal (en la dirección este-oeste, denotada por x) y meridional (en la dirección norte-sur, denotada por y). Las corrientes zonales anómalas (u) están dadas por la suma de las contribuciones de las ondas Kelvin (u_K), ondas Rossby (u_R) y el efecto del viento local (u_l), por lo que los cambios en temperatura por advección zonal asociados a estos procesos se calculan como $-u_K \frac{\partial T_A}{\partial x}$, $-u_R \frac{\partial T_A}{\partial x}$ y $-u_l \frac{\partial T_A}{\partial x}$ respectivamente.

En lo que respecta a los flujos verticales de calor anómalos (F_A), estos se calculan siguiendo el método de Wang and McPhaden (1999). Esto es: $F_A = \frac{Q_0 + Q_p}{\rho_0 C_p h}$ donde Q_0 es la suma de los flujos de radiación de onda corta (Q_{SW}), radiación de onda larga (Q_{LW}), calor latente (Q_L) y calor sensible (Q_S) (es decir $Q_0 = Q_{SW} + Q_{LW} + Q_L + Q_S$), mientras que Q_p es el flujo de calor de onda corta que escapa del fondo de la capa de profundidad h : $Q_p = -0.45 \cdot Q_{SW} \cdot e^{-\gamma|h|}$.

C_p es la capacidad de calor ($=3940 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$), ρ_0 es la densidad del agua de mar ($\approx 1022 \text{ kg m}^{-3}$) y γ^{-1} es la escala de profundidad de atenuación de la radiación solar (≈ 25 metros). Los flujos del modelo fueron calculados a partir de los resultados del *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Integrated Forecast System analysis*.

Por lo tanto, basado en lo descrito líneas arriba, el balance de energía de la capa oceánica está dado por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_A}{\partial t} = & -u_K \frac{\partial T_C}{\partial x} - u_R \frac{\partial T_C}{\partial x} - u_l \frac{\partial T_C}{\partial x} - v_A \frac{\partial T_C}{\partial y} - w_A \frac{\partial T_C}{\partial z} \\ & - u_C \frac{\partial T_A}{\partial x} - v_C \frac{\partial T_A}{\partial y} - w_C \frac{\partial T_A}{\partial z} \\ & - u_K \frac{\partial T_A}{\partial x} - u_R \frac{\partial T_A}{\partial x} - u_l \frac{\partial T_A}{\partial x} - v_A \frac{\partial T_A}{\partial y} - w_A \frac{\partial T_A}{\partial z} \\ & + \frac{Q_{SW}}{\rho_0 C_p h} + \frac{Q_{LW}}{\rho_0 C_p h} + \frac{Q_L}{\rho_0 C_p h} + \frac{Q_S}{\rho_0 C_p h} + \frac{Q_p}{\rho_0 C_p h} \\ & + R \end{aligned} \quad (1)$$

Los subíndices C y A indican climatología y anomalía, respectivamente. Los resultados de este modelo han sido promediados: a) temporalmente para la fase de calentamiento (desde abril hasta noviembre del año 2002) y enfriamiento (desde diciembre de 2002 hasta abril de 2003); y b) espacialmente para las regiones Niño 4 (N4), Niño 3.4 (N3.4) y Niño 3 (N3).

Efecto de las ondas en la temperatura oceánica

Los resultados se muestran en la Figura 2, en donde cada cuadro representa algún término (los más importantes para cada fase) de la ecuación 1 y cada barra, dentro de este cuadro, indica una de las regiones Niño en el Pacífico Ecuatorial.

disminuye en la región N4, debido a una disminución de la radiación solar y a un incremento de la evaporación a lo largo del Ecuador.

El análisis también indica que el término residual (R'), el cual contiene la mezcla vertical, tiene una cierta contribución en los cambios, por lo que es necesario poder separar los procesos que están involucrados en este, tal como la difusión vertical y *entrainment*.

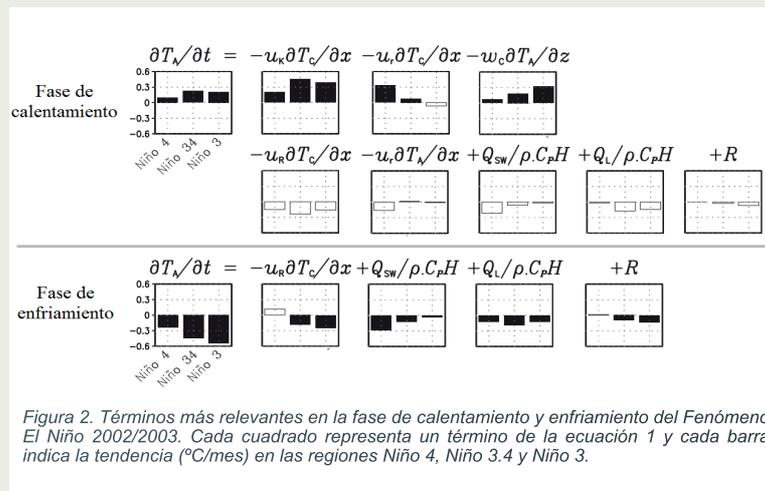


Figura 2. Términos más relevantes en la fase de calentamiento y enfriamiento del Fenómeno El Niño 2002/2003. Cada cuadrado representa un término de la ecuación 1 y cada barra indica la tendencia (°C/mes) en las regiones Niño 4, Niño 3.4 y Niño 3.

Entonces, en la fase de calentamiento (ver Figura 2) se observa que la onda Kelvin, por medio de la advección zonal del gradiente climatológico de la temperatura ($-u_r \frac{\partial T_c}{\partial x}$) domina en las regiones N3.4 y N3. En la región N4, las corrientes zonales producidas localmente por la anomalía del esfuerzo de viento zonal ($-u_e \frac{\partial T_c}{\partial x}$) son las principales fuentes de advección zonal. Finalmente, el efecto de la profundización de la termoclina, que se manifiesta como la advección vertical de la anomalía de la temperatura por medio de la velocidad vertical climatológica ($-w_c \frac{\partial T_v}{\partial z}$), es más importante en la región N3. En esta fase, las ondas Rossby ($-u_r \frac{\partial T_c}{\partial x}$) tienen un rol de enfriamiento, principalmente, en la región N3.4. De la misma manera, las radiaciones de onda corta y calor latente en N4 y N3.4, respectivamente, son importantes en el enfriamiento. Esto es consistente con el incremento de la convección en N4 que provoca un incremento en la convergencia al este durante el calentamiento de la "piscina caliente". El término residual tiene un ligero rol de enfriamiento en N3 y estaría conectado al incremento de la mezcla vertical al paso de la onda Kelvin o a la inusual extensión de las anomalías de esfuerzos de viento del este durante este evento (comparar con la Figura 5 de McPhaden, 2004).

En la fase de enfriamiento (ver Figura 2), la advección, debido a la onda de Rossby ($-u_r \frac{\partial T_c}{\partial x}$), es fundamental en las regiones N3.4 y N3. Como ya se indicó en la descripción de la secuencia de ondas en El Niño 2002/2003, las ondas Rossby son producto de la reflexión de la onda Kelvin cuando esta incide sobre la termoclina en el Pacífico Oriental (donde su inclinación zonal es mayor), y además cuando alcanza la costa sudamericana. Asimismo, en lo que se refiere a los flujos superficiales de calor, la radiación de onda corta ($\frac{Q_{sw}}{\rho C_p H}$)

Resumen

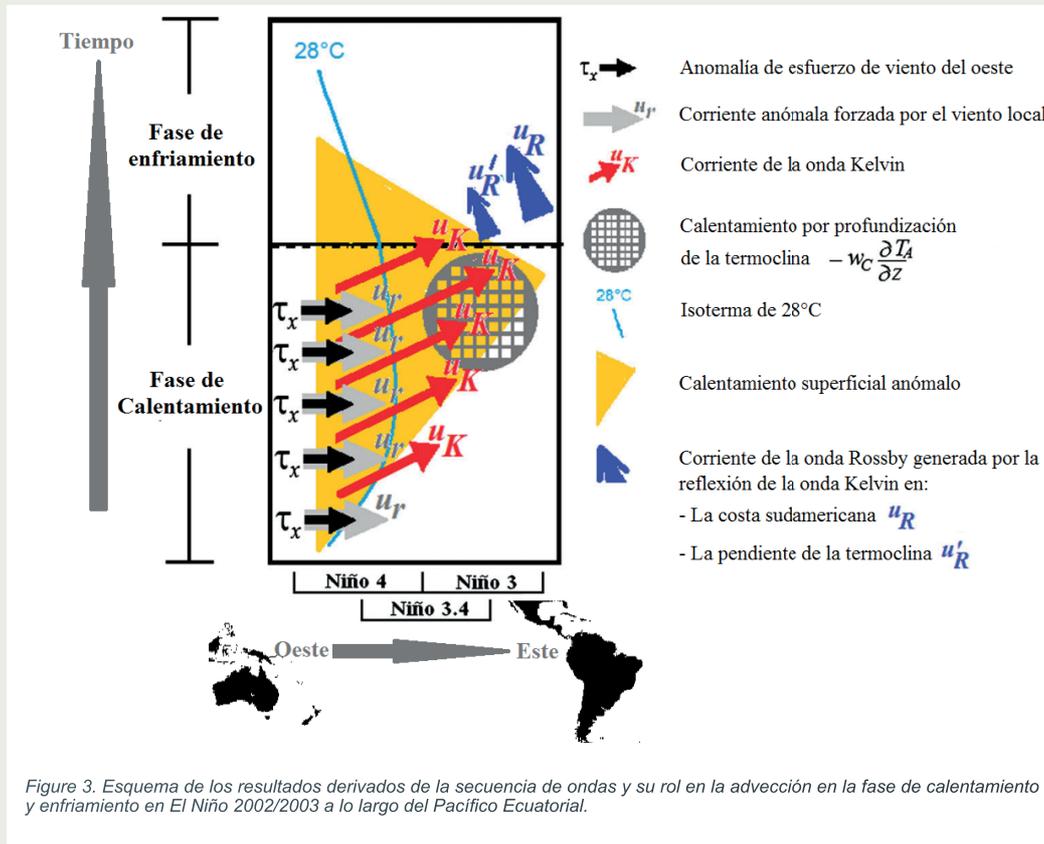
El esquema en la Figura 3 resume el rol de las ondas ecuatoriales en el Fenómeno El Niño 2002/2003. En este evento cinco pulsos de anomalías de esfuerzo de viento del oeste en el Pacífico Occidental transmitieron al océano su momentum, el cual se repartió entre a) las corrientes locales del oeste y b) las ondas Kelvin cálidas. Ambas contribuciones a las corrientes zonales provocaron el desplazamiento del borde de la piscina cálida del Pacífico Occidental (isoterma de 28°C) hacia el este, resultando en una anomalía positiva de la TSM en la región N4. A medida que continuaron su propagación, las ondas Kelvin cálidas extendieron su efecto más hacia el este, provocando más anomalías cálidas de la TSM. En la región oriental (N3), la profundización de la termoclina debida a estas ondas Kelvin también produjo un calentamiento superficial a través del afloramiento de las anomalías de temperatura subsuperficiales asociadas.

En la fase de enfriamiento, las ondas Rossby tuvieron un rol fundamental en la región N3 debido a que las anomalías negativas asociadas a la velocidad zonal ecuatorial regresaron las isotermas superficiales a su posición original más al oeste. Estas ondas Rossby fueron generadas como reflexión de ondas Kelvin, primero en la pendiente de la termoclina en el Pacífico Oriental y posteriormente en la costa sudamericana.

Este análisis nos muestra claramente el rol importante de las ondas ecuatoriales (Kelvin y Rossby) en los procesos de calentamiento y

Actividad de las ondas ecuatoriales y su impacto en la Temperatura Superficial del Mar en el Fenómeno El Niño 2002/2003

Mosquera K., Dewitte B., Illig S., Takahashi K., Garric G.



enfriamiento del evento El Niño del Pacífico Central de 2002/2003. Sin embargo, es importante investigar más las diferencias en dicho rol asociadas a los distintos tipos de El Niño y sus razones.

Referencias

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.

Illig, S., B. Dewitte, N. Ayoub, Y. du Penhoat, G. Reverdin, P. De Mey, F. Bonjean and G. S. E. Lagerloef, 2004: Interannual Long Equatorial Waves in the Tropical Atlantic from a High Resolution OGCM Experiment in 1981-2000, *Journal of Geophysical Research*, 109, C02022, doi:10.1029/2003jc001771.

Illig, S., B. Dewitte, C. Périgaud and C. Derval, 2007: Equatorial wave intra-seasonal variability in the Indian and Pacific oceans in the Mercator Ocean POG05B simulation, *Mercator Ocean Quarterly Newsletter*, July 2007 issue, 45-56.

McPhaden, M. J.: 2004: Evolution of the 2002/03 El Niño, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85, 677-695.

Mosquera-Vásquez, K., B. Dewitte, S. Illig, K. Takahashi, and G. Garric, 2013: The 2002/2003 El Niño: Equatorial waves sequence and their impact on sea surface temperature, *Journal of Geophysical Research*:

Oceans, 118, 346-357, doi:10.1029/2012JC008551.

Takahashi, K., 2014: *Variedades de El Niño*, Boletín Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño", Vol. 1, No. 2, Febrero, Instituto Geofísico del Perú.

Wang, W., and M. J. McPhaden, 1999: The surface layer heat balance in the equatorial Pacific ocean, Part I: Mean seasonal cycle, *Journal of Physical Oceanography*, 29, 1812-1831.