

## Los impactos de la marea y la onda Kelvin en los manglares de Tumbes

Jeancarlo Fajardo<sup>1</sup>, Ken Takahashi<sup>1</sup>, Kobi Mosquera<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Instituto Geofísico del Perú

El nivel del mar a lo largo de la costa peruana está expuesto a muchos procesos ondulatorios, entre los que se encuentran los oleajes, mareas, tsunamis, ondas ecuatoriales y otros producidos por efecto de los vientos locales. Estos pueden, en mayor o menor medida y de manera independiente o en conjunto, afectar la costa. En este artículo se describe el caso particular del impacto de la marea y la onda Kelvin en la región de los manglares de Tumbes.

Si bien existen diferencias considerables en las características de las mareas a lo largo del océano, la respuesta local se encuentra modulada principalmente por las fases lunares y por la distancia orbital de la Luna en torno a la Tierra<sup>1</sup>. Esto es básicamente cierto cerca de la línea ecuatorial; sin embargo, se debe tener en cuenta que en regiones alejadas de los trópicos los efectos de declinación lunar y solar<sup>2</sup> adquieren mayor importancia.

En el ecosistema de los manglares de Tumbes, basado en la información de la estación El Salto<sup>3</sup>, se observa que el nivel de agua es influenciado principalmente por el régimen de mareas (Figura 1), cuya amplitud varía de acuerdo a las fases lunares: con máximos cerca de las fases de Luna nueva y Luna llena, lo cual da origen a las mareas de sicigias (componentes  $M_2$  y  $S_2$  en fase, ver Tabla 1). Sin embargo, las amplitudes no son iguales ya que los niveles de marea son modulados por los perigeos y apogeos lunares. Las mareas en esta región poseen carácter semidiurno (dos máximas y dos mínimas durante un día), pero con marea baja más aplanada y de mayor duración que las pleamares. Esto es el resultado de la distorsión que sufre la onda de marea en áreas someras.

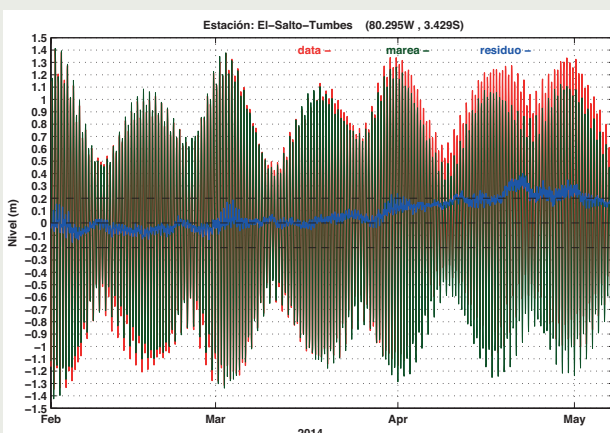


Figura 1. Serie horaria del nivel del mar (rojo), marea (verde) y residuo (azul) para el periodo de febrero a inicios de mayo del 2014 en la estación El Salto, ubicada en el Santuario Nacional de Los Manglares de Tumbes (SNLMT).

Para cuantificar el aporte de la marea en el nivel del agua es necesario separarla de otras posibles perturbaciones, lo cual se realiza usualmente mediante la técnica del análisis armónico. Con este método se ajusta la serie de nivel de agua a funciones

armónicas con periodos asociados a variaciones astronómicas conocidas del sistema Sol-Tierra-Luna y a las interacciones no lineales que surgen en las regiones costeras (Pawlowicz et al., 2002); las principales constituyentes usadas son mostradas en la Tabla 1. De estas componentes, la que predomina en gran parte del océano es el armónico principal lunar  $M_2$ ; para el caso particular de la estación El Salto esta representa aproximadamente el 60% del mayor nivel registrado durante el periodo de agosto del 2012 a mayo del 2014.

Especie	Nombre	Símbolo	Periodo (h)
Semidiurna	Principal lunar	$M_2$	12.42
	Principal solar	$S_2$	12.00
	Elíptica lunar larga	$N_2$	12.66
Diurna	Diurno luni-solar	$K_1$	23.93
	Diurno lunar principal	$O_1$	25.82

Tabla 1. Principales constituyentes o armónicos de marea.

En nuestra región, otro de los mecanismos de gran variabilidad que impactan continuamente las costas peruanas son las llamadas ondas Kelvin ecuatoriales, las cuales son esencialmente ondas de gravedad afectadas por la fuerza de Coriolis (Mosquera, 2014). Durante el periodo comprendido entre agosto del 2013 a agosto del 2014 se produjeron cuatro pulsos anómalos de ondas Kelvin de hundimiento en el extremo oeste del Pacífico Ecuatorial (160°E–180°E), caracterizadas por elevar el nivel del mar y profundizar la termoclina en dicha región (Figura 2). Estas ondas generadas en agosto y octubre del 2013, y durante marzo y abril del 2014, llegaron al extremo este del Pacífico Ecuatorial aproximadamente dos meses después (Figura 2f), con una velocidad de propagación próxima al valor teórico de 2.6m/s del primer modo baroclínico (Mosquera et al., 2014a). El primer grupo de ondas, generado en el 2013, empezó a disiparse fuertemente a partir de los 120°W, región que coincide con la zona de máximo gradiente zonal de la profundidad de la termoclina y con el punto de generación de las ondas de Rossby intraestacionales (Mosquera et al., 2014b). Por otra parte, el segundo grupo de ondas sufrió amplificación a lo largo de su recorrido hasta alcanzar el extremo este (100°W–80°W), cuyo efecto se vio reflejado en las anomalías positivas de nivel del mar<sup>4</sup> y

<sup>1</sup>Durante la traslación de la Luna en torno a su órbita elíptica, que dura aproximadamente un mes, esta pasa por el punto más cercano (alejado) llamado perigeo (apogeo), lo que da lugar a mareas más intensas (débiles).

<sup>2</sup>La declinación es la medida al norte y sur del ecuador terrestre del ángulo que describe el movimiento aparente del astro (Sol o Luna para nuestro caso), cuyo valor es nulo cuando el astro pasa por el ecuador.

<sup>3</sup>Estación de fuente propia, ubicada en el Santuario Nacional de Los Manglares de Tumbes (SNLMT).

<sup>4</sup>Las anomalías del nivel del mar calculadas en este trabajo están referenciadas con respecto a la media de la serie.

# Los impactos de la marea y la onda Kelvin en los manglares de Tumbes

Fajardo J., Takahashi K., Mosquera K.

en la profundidad de la termoclina de 20°C con valores próximos a 20 cm y 40 m respectivamente.

Para analizar el efecto de las ondas Kelvin en los manglares de Tumbes, se ha graficado la anomalía del nivel del mar en la estación El Salto (Figura 2g). Se observa anomalías negativas del nivel del mar durante la segunda mitad del 2013, consistente con el evento La Niña reportado por el Estudio Nacional del Fenómeno El Niño (ENFEN) para la región Niño 1+2 ([www.imarpe.pe/](http://www.imarpe.pe/)); sin embargo, en el Pacífico Tropical Ecuatorial se produjo actividad de dos ondas Kelvin durante el mismo periodo (Figura 2 a-f). En cambio, sí se observó un aumento sustancial del nivel del mar con pico de aproximadamente 33 cm a finales de abril del 2014, el cual fue producido por el arribo de las ondas Kelvin generadas a principios de marzo del mismo año.

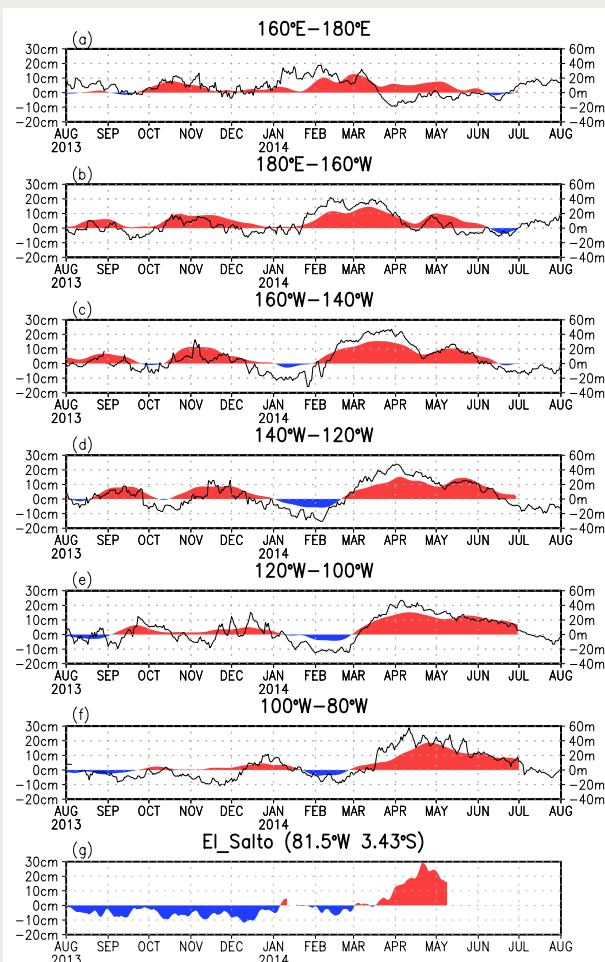


Figura 2. (a)-(f): En colores se muestra la serie temporal de la anomalía del nivel del mar ecuatorial (cm) del altímetro JASON-2, promediada en seis sectores del Pacífico y con una media móvil de cinco días. La línea negra corresponde a la anomalía de la profundidad (m) de la termoclina calculada de los flotadores ARGO promediada entre 2°S-2°N (ver Aparco et al., 2014). (g): Anomalía del nivel del mar en la estación El Salto, con una media móvil de cinco días.

Por otro lado, el análisis armónico clásico aplicado a los datos de la estación El Salto muestra que la marea representa el 99% de la varianza total. Esto es ilustrado en la Figura 1, donde se ve claramente que, a pesar del efecto de la onda Kelvin (obtenida al quitar la componente de marea astronómica a la data de nivel del mar<sup>5</sup>), la variabilidad es modulada principalmente por las mareas. Se observa que durante las mareas máximas de sicigias de mediados y finales de abril del 2014, la onda Kelvin solo compensó un poco la disminución de la marea astronómica; decremento producido por el desfase de aproximadamente siete días entre el perigeo y estas sicigias (componente  $N_2$  desfasada con  $M_2$  y  $S_2$ ). Si la onda hubiera llegado a comienzos de febrero la situación hubiera sido extraordinaria, puesto que se habrían alcanzado máximos de hasta 173 cm (140 cm de marea + 33 cm de onda Kelvin). Estos niveles anómalos de agua habrían tenido el potencial de producir inundaciones y afectar diversas actividades extractivas que se desarrollan dentro de los manglares de Tumbes. Además, queda pendiente entender la variación que podría presentarse en la dinámica de esta región debido a la colmatación de esteros, ya que en eventos El Niño extremo los caudales específicos sólidos a lo largo del Perú se incrementan de 1 a 65 veces el promedio histórico anual; con valores extremos en el norte (Morera, 2014).

## Referencias

- Aparco J., K. Mosquera y K. Takahashi, 2014: Flotadores Argo para el cálculo de la anomalía de la profundidad de la termoclina ecuatorial (Aplicación Operacional), Boletín Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño", Vol. 1, No. 5, Mayo, Instituto Geofísico del Perú.
- Morera, S., 2014: Erosión y transporte de sedimentos durante eventos el Niño a lo largo de los Andes Occidentales, Boletín técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del fenómeno del Niño", Vol. 1, No 7, Julio, 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 del Niño", Vol. 1, No 1, Enero, Instituto Geofísico del Perú.
- Mosquera, K., D. Pareja y K. Takahashi, 2014a: Altimetría satelital para el monitoreo de la onda Kelvin ecuatorial en el Océano Pacífico, Boletín Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del fenómeno del Niño", Vol. 1, No 4, Abril, Instituto Geofísico del Perú.
- Mosquera, K., B. Dewitte y S. Illig, 2014b: Ondas Kelvin intraestacionales en el evento El Niño del Pacífico central, Boletín Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño", Vol. 1, No 7, Julio, Instituto Geofísico del Perú.
- Pawlóicz, R., B. Beardsley, y S. Lentz, 2002: Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T\_TIDE, Computers and Geosciences, 28, 929-937.

<sup>5</sup>En realidad este residuo tiene incorporado otros procesos ondulatorios, pero para los fines de este trabajo es suficiente con la metodología propuesta.