

# PROPAGACIÓN DE ONDAS DE KELVIN ECUATORIALES Y ONDAS ATRAPADAS A LA COSTA DURANTE EL NIÑO 2015-16 Y EL NIÑO COSTERO 2017 FRENTE A PERÚ: SIMULACIONES Y OBSERVACIONES

## PROPAGATION OF EQUATORIAL KELVIN WAVES AND COASTAL TRAPPED WAVES DURING EL NIÑO 2015-16 AND THE 2017 COASTAL EL NIÑO OFF PERU: SIMULATIONS AND OBSERVATIONS

Carlos Quispe-Ccalluari<sup>1</sup>Adolfo Chamorro<sup>1</sup>Cinthia Arellano<sup>1</sup>Jorge Tam<sup>1</sup><https://doi.org/10.53554/boletin.v36i2.342>

### RESUMEN

QUISPE-CCALLUARI C, CHAMORRO A, ARELLANO C, TAM J. 2021. Propagación de ondas de Kelvin ecuatoriales y ondas atrapadas a la costa durante El Niño 2015-16 y El Niño costero 2017 frente a Perú: simulaciones y observaciones. *Bol Inst Mar Perú*. 36(2): 349-361.- El Ecosistema de Afloramiento Peruano (EAP) es frecuentemente perturbado por el arribo de las Ondas Kelvin de hundimiento en el Pacífico Ecuatorial Oriental, ocasionando efectos en el ecosistema marino y la hidrología frente al Perú. Este trabajo tiene como objetivo comparar las propagaciones de las Ondas Kelvin Ecuatoriales (OKE) durante El Niño 2015-2016 y El Niño Costero 2017 (ENC 2017) frente a Perú, usando modelos de simulación y datos observacionales. Los resultados muestran que durante El Niño 2015-2016, se propagaron siete OKEs de hundimiento (modo 1), de las cuales seis de ellas se propagaron como ondas atrapadas a la costa de hundimiento, mientras que durante la ocurrencia de ENC 2017 frente al Perú, se propagó una OKE de hundimiento (modo 1). Así, mientras que las OKEs de hundimiento jugaron un papel clave en el inicio y desarrollo del calentamiento asociado al evento EN 2015-2016 frente al Perú, para ENC 2017 su rol fue secundario, contribuyendo a extender el calentamiento, ya iniciado por otros procesos.

PALABRAS CLAVE: Ondas de Kelvin, ondas atrapadas, El Niño 2015-2016, El Niño Costero 2017

### ABSTRACT

QUISPE-CCALLUARI C, CHAMORRO A, ARELLANO C, TAM J. 2021. Propagation of equatorial Kelvin waves and coastal trapped waves during El Niño 2015-16 and the 2017 coastal El Niño off Peru: simulations and observations. *Bol Inst Mar Peru*. 36(2): 349-361.- The frequent arrival of downwelling Kelvin waves in the Eastern Equatorial Pacific altered the Peruvian Upwelling Ecosystem (PUE) thus affecting the marine ecosystem and hydrology off Peru. Therefore, we aim to compare the propagation of the Equatorial Kelvin Waves (EKW) during El Niño 2015/16 and the 2017 coastal El Niño (2017 CEN) off Peru through simulation models and observational data. Our results show that 7 downwelling EKWs (mode 1) propagated along the equator, and then 6 of them propagated as downwelling Coastal-Trapped Waves (CTW) during EN 2015/16. On the other hand, during the 2017 CEN off Peru, only one downwelling EKW (mode 1) was propagated. We can conclude that the downwelling EKWs played a key role in triggering and developing the warming associated with the EN 2015/16 event off Peru, while they had a secondary role during the 2017 CEN, just extending the warming, which was already initiated by other processes.

KEYWORDS: Kelvin waves, coastal-trapped waves, El Niño 2015/16, the 2017 coastal El Niño

## 1. INTRODUCCIÓN

Uno de los forzantes remotos que impactan las condiciones del Ecosistema de Afloramiento Peruano (EAP) es la propagación de las Ondas de Kelvin Ecuatoriales (OKE); estas son perturbaciones generadas por pulsos de vientos del oeste en el Pacífico Ecuatorial Occidental-Central y la reflexión de Ondas de Rossby en el extremo del Pacífico Ecuatorial Occidental (KESSLER *et al.*, 1995; KESSLER & McPHADEN, 1995). Las OKE de hundimiento (Ondas de Kelvin "cálidas") se propagan hacia el este, mientras profundizan la termoclina e incrementan el nivel del mar en el Pacífico Ecuatorial. Al alcanzar las costas de Sudamérica, debido a la rotación

## 1. INTRODUCTION

The propagation of Equatorial Kelvin Waves (EKWs) is one of the remote forcings impacting the conditions of the Peruvian Upwelling Ecosystem (PUE). EKWs are disturbances generated by westerly wind pulses in the Western-Central Equatorial Pacific and the reflection of Rossby Waves in the extreme Western Equatorial Pacific (KESSLER *et al.*, 1995; KESSLER & McPHADEN, 1995). Easterly downwelling EKWs ("warm" Kelvin Waves) deepen the thermocline and increase sea level in the equatorial Pacific. Upon reaching the South American coast, due to the Earth's rotation,

1 IMARPE, (DGIIOC), Esquina Gamarra y Gral. Valle, Chucuito, Callao. [cquispe@imarpe.gob.pe](mailto:cquispe@imarpe.gob.pe)

de la Tierra, parte de su energía es atrapada a la costa y se propaga hacia los polos como Onda Atrapada a la Costa (OAC) de hundimiento (SHAFFER *et al.*, 1997).

La ocurrencia de El Niño (fase cálida de El Niño-Oscilación Sur, ENOS) fue definida operativamente a partir del índice oceánico de El Niño (ONI, por sus siglas en inglés) y representa el calentamiento anómalo de temperaturas superficiales del mar (TSM), en la región central y oriental del Océano Pacífico Tropical (Niño 3.4) cuando tiene valores superiores a +0,5 °C, por al menos cinco trimestres consecutivos (NOAA, 2019). Según el ONI, los eventos ocurridos en 1982-1983, 1997-1998 y 2015-2016, fueron catalogados como extremos. Sin embargo, se registraron períodos cálidos en el EAP, identificados con el Índice Térmico Costero Peruano (ITCP), mientras el ONI indica condiciones neutras en el Pacífico central (QUISPE-CCALLUARI *et al.*, 2018).

El paso de las OKE de hundimiento, tiene un impacto importante en las condiciones oceanográficas e hidrológicas frente a las costas peruanas (COLAS *et al.*, 2008; DEWITTE *et al.*, 2012). Durante un evento extremo El Niño, casos 1982-83 y 1997-98, intensas OKEs de hundimiento se generaron por intensos pulsos de vientos del oeste. Al alcanzar el extremo del Pacífico Ecuatorial Oriental, se incrementó anormalmente el nivel del mar, profundizando la termoclina y nutriclina frente a la costa peruana (BARBER & CHAVEZ, 1983; GUTIÉRREZ *et al.*, 2008; ESPINOZA-MORRIBERÓN *et al.*, 2017).

El Niño Costero 2017 (ENC 2017), evento cálido anómalo tuvo como escenario la costa norte y centro del Perú. El ITCP indicó una corta duración, del primer al segundo trimestre del 2017, con importantes efectos en diferentes sectores socio-económicos causando grandes pérdidas (ENFEN, 2017; RAMÍREZ & BRIONES, 2017; ECHEVIN *et al.*, 2018; TAKAHASHI & MARTINEZ, 2017). El evento ocurrió en condiciones neutras del ENOS (Fig. 1), las OKEs son características del Pacífico Ecuatorial, incluso cuando no se presenta El Niño, por ello la generación de estas ondas de hundimiento no es suficiente para su ocurrencia (KESSLER *et al.*, 1995). Por su intensidad y duración, ENC 2017 es considerado como una Ola de Calor Marina (TAKAHASHI *et al.*, 2018). En cambio, El Niño 2015-2016 estuvo relacionado a la fase cálida del ENOS, pero su impacto en el verano de 2016 fue moderado - débil frente a la costa peruana (ENFEN, 2016). La hipótesis del presente estudio indica que las OKE no participaron en la generación de ENC 2017, aunque pudieron contribuir a su persistencia. Por ello, el objetivo general es comparar la propagación tanto de OKEs como OACs durante El Niño 2015-16 y ENC 2017; así como evaluar la contribución de estas ondas en el desarrollo de estos eventos.

part of its energy is trapped offshore and propagates poleward as a downwelling Coastal-Trapped Wave (CTW) (SHAFFER *et al.*, 1997).

According to NOAA (2019), El Niño (warm phase of the El Niño-Southern Oscillation, ENSO) is the anomalous warming of sea surface temperature (SST) in the central and eastern Tropical Pacific Ocean (Niño 3.4) when it has values above +0.5 °C for at least five consecutive quarters. Its occurrence was operationally defined from the Oceanic Niño Index (ONI) which categorized the events that occurred in 1982/83, 1997/98, and 2015/16 as extreme. Nonetheless, warm periods were recorded in the PUE, identified with the Peruvian Coastal Thermal Index (PCTI), while the ONI indicates neutral conditions in the central Pacific (QUISPE-CCALLUARI *et al.*, 2018).

The passage of downwelling EKWs has an important impact on oceanographic and hydrological conditions off the Peruvian coast (COLAS *et al.*, 2008; DEWITTE *et al.*, 2012). Intense downwelling EKWs were generated by intense westerly wind pulses during the extreme 1982/83 and 1997/98 EN events. Upon reaching the edge of the eastern equatorial Pacific, there was an abnormal increase in sea level, deepening the thermocline and nutricline off the coast of Peru (BARBER & CHAVEZ, 1983; GUTIÉRREZ *et al.*, 2008; ESPINOZA-MORRIBERÓN *et al.*, 2017).

The 2017 coastal El Niño (2017 CEN) was an anomalous, short-lived warm event that took place on the northern and central Peruvian coast. According to the PCTI, it lasted from the first to the second quarter of 2017, with important effects on different socio-economic sectors causing large losses (ENFEN, 2017; RAMÍREZ & BRIONES, 2017; ECHEVIN *et al.*, 2018; TAKAHASHI & MARTINEZ, 2017). This event occurred under ENSO neutral conditions (Fig. 1). EKWs are typical of the Equatorial Pacific, even when El Niño is not present, thus their generation is not sufficient for its occurrence (KESSLER *et al.*, 1995). Given its intensity and duration, 2017 CEN is considered a marine heatwave (MHW) (TAKAHASHI *et al.*, 2018). On the other hand, the EN 2015/16 was related to the warm phase of ENSO, but it had a moderate-weak impact off the Peruvian coast in summer 2016 (ENFEN, 2016). This study's hypothesis indicates that EKWs did not trigger 2017 CEN, although they could have contributed to its persistence; so, we aim to compare the propagation of both EKWs and CTWs during EN 2015/16 and 2017 CEN, as well as to evaluate the contribution of these waves in the development of these events.

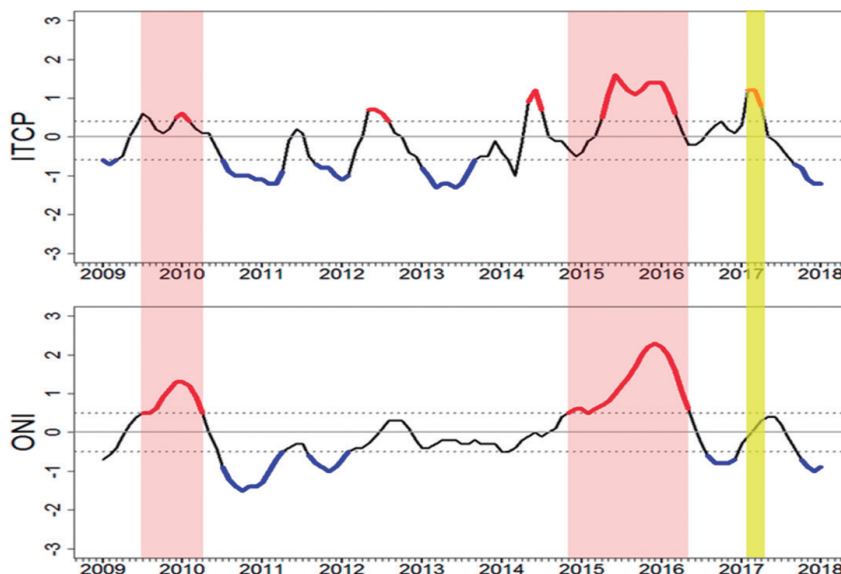


Figura 1.- Serie de tiempo mensual del ITCP y ONI de 2006 al 2018. La líneas negras indican periodos neutros, las líneas rojas periodos cálidos y la líneas azules periodos fríos; las áreas sombreadas de rosado representan eventos El Niño y el área sombreada en amarillo indica El Niño Costero 2017

Figure 1. PCTI and ONI monthly time series from 2006 to 2018. Black lines indicate neutral periods, red lines indicate warm periods, and blue lines indicate cold periods. Pink shaded areas represent EN events while the yellow shaded area is for 2017 CEN

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

### Datos

Se procesaron datos del área de estudio que abarca el Pacífico Ecuatorial (120°E-95°W, 1°N-1°S) y la zona oceánica frente a las costas de Sudamérica (0°S-19°S), entre 2015 y 2017. Se emplearon datos diarios satelitales de anomalía del nivel del mar con resolución espacial de 0,25°, proveniente del *Copernicus Marine Environment Monitoring Service*, que compila varias fuentes de información de altimetría (Topex/Poseidón, ERS, Jason, etc.), para validar los datos del modelo y estimar el paso de OAC a lo largo de la costa. Para la información diaria de TSM se usaron los datos OISST (*Optimum Interpolation Sea Surface Temperature*) version 2 obtenido de la NOAA NCDC (*National Climatic Data Center of the National Oceanic and Atmospheric Administration*) con resolución espacial de 0,25° (REYNOLDS *et al.*, 2007).

### Análisis

Las Anomalías de Temperatura Superficial del Mar (ATSM) se calcularon eliminando el ciclo anual de datos TSM (1985-2015 fue el periodo de base climatológica). Las Anomalías del Nivel del Mar (ANM), eliminando el ciclo anual de datos satelitales de NM (1993-2015) fue el periodo de base climatológica.

## 2. MATERIAL AND METHODS

### Data

The study area covered the Equatorial Pacific (120°E-95°W, 1°N-1°S) and the oceanic zone off the South American coast (0°S-19°S), between 2015 and 2017. We used daily satellite sea level anomaly data with 0.25° spatial resolution from the Copernicus Marine Environment Monitoring Service, which compiles several sources of altimetry information (Topex/Poseidon, ERS, Jason, etc.) to validate model data and estimate the CTW passage along the coast. For the daily SST information, the OISST (Optimum Interpolation Sea Surface Temperature) version 2 data obtained from the NOAA NCDC (National Climatic Data Center of the National Oceanic and Atmospheric Administration) with a spatial resolution of 0.25° were used (REYNOLDS *et al.*, 2007).

### Analysis

Sea Surface Temperature Anomalies (SSTA) were estimated by removing the annual cycle of SST data (1985-2015 was the climatological base period). Sea Level Anomalies (SLA) were calculated by removing the annual cycle of SL satellite data (1993-2015) was the climatological base period.



Se identificaron Ondas Atrapadas a la Costa (cm), analizando espectros de frecuencia de anomalías del nivel del mar dentro de 100 km (60 millas náuticas), desde 0°N hasta 19°S en periodos inferiores a 180 días (Fig. 2). Se encontró mayor variabilidad en los rangos de [40 - 70] días y [90 - 180] días, por ello se le aplicaron filtros con el fin de identificar las propagaciones de OAC y su conexión con el forzante ecuatorial.

Asimismo, se utilizaron y compararon los siguientes índices regionales: ITCP para identificar periodos cálidos y fríos en el Ecosistema de Afloramiento Peruano (QUISPE *et al.*, 2018), ATSM de la región Niño 1+2 (0°-10°S y 90°W-80°W) obtenida de la NOAA/CPC y el índice promedio de anomalía del nivel del mar filtrado en 4°S-16°S como indicador del paso de la OAC.

### Modelado

Se analizaron las salidas de una simulación forzada por anomalías del esfuerzo de viento NCEP (KALNAY *et al.*, 1996) sobre el Pacífico ecuatorial entre 2015-2017, y de la componente oceánica del Modelo Acoplado Océano-Atmosfera con Complejidad Intermedia (MOACI, DEWITTE, 2000). Este es una modificación del modelo ZEBIAK & CANE (1987) en la estructura vertical de la componente oceánica, logrando representar mejor las fluctuaciones de la termoclina ecuatorial. Simula la contribución de los tres primeros modos verticales a las anomalías del nivel del mar, siguiendo la metodología de ILLIG *et al.* (2004) en el océano Atlántico Ecuatorial y DEWITTE *et al.* (1999, 2002, 2003) en el Pacífico Ecuatorial. El modo 1, distingue Ondas Kelvin con velocidades de propagación de 2,7 m/s y el modo 2 Ondas Kelvin con velocidades de propagación de 1,6 m/s. Además, en el Pacífico Ecuatorial Oriental, tanto el modo 1 como el 2 aumenta su contribución baroclínica con la profundidad, siendo el segundo, más sensible a esta (DEWITTE, 2000).

### 3. RESULTADOS

Del 2015 al 2017, se advierte que el modelo MOACI reprodujo de manera aceptable las anomalías del nivel del mar en el Océano Pacífico Ecuatorial (OPE) en comparación con las observaciones (Fig. 3). Según el ONI, en el Pacífico Ecuatorial Central ocurrieron dos eventos ENOS: El Niño (octubre 2014-mayo 2016) que duró 19 meses y La Niña (agosto 2016-diciembre 2016) que duró 5 meses. El ITCP indicó solo dos condiciones cálidas: en el EAP abril 2015-marzo 2016 y febrero-abril 2017 (Fig. 1). Las diferencias más grandes se detectaron entre enero y marzo 2017 en la región central oriental, estudiando la propagación de anomalías negativas del nivel del mar en el modelo, así como anomalías positivas en las observaciones (Fig. 1).

Coastal-Trapped Waves (cm) were identified by analyzing frequency spectra of sea level anomalies within 100 km (60 nm), from 0°N to 19°S in periods shorter than 180 days (Fig. 2). There was greater variability in the [40 - 70] day and [90 - 180] day ranges, so filters were applied to identify CTW propagations and their connection with the equatorial forcing.

Likewise, the following regional indexes were used and compared: PCTI to identify warm and cold periods in the PUE (QUISPE *et al.*, 2018), SSTA of the Niño 1+2 region (0°-10°S and 90°W-80°W) obtained from NOAA/CPC, and the mean sea level anomaly index filtered at 4°S-16°S as an indicator of the passage of the CTW.

### Modeling

We analyzed the outputs of a simulation forced by NCEP wind stress anomalies (KALNAY *et al.*, 1996) over the equatorial Pacific between 2015-2017, and of the ocean component of the intermediate ocean-atmosphere coupled model (ICM, DEWITTE, 2000). This is a modification of the ZEBIAK & CANE (1987) model in the vertical structure of the ocean component, thus better representing the fluctuations of the equatorial thermocline and simulating the contribution of the first three vertical modes to sea level anomalies, following the methodology of ILLIG *et al.* (2004) in the equatorial Atlantic Ocean and DEWITTE *et al.* (1999, 2002, 2003) in the equatorial Pacific. Mode 1 distinguishes Kelvin waves with propagation speeds of 2.7 m/s while mode 2 identifies Kelvin waves with propagation velocities of 1.6 m/s. Furthermore, in the eastern equatorial Pacific, both modes increase their baroclinic contribution with depth, being mode 2 more sensitive to the latter (DEWITTE, 2000).

### 3. RESULTS

We noticed that the ICM model reproduced in an acceptable way the SLA in the Equatorial Pacific Ocean (EPO) compared to the observations between 2015 and 2017 (Fig. 3). According to the ONI, two ENSO events occurred in the Central Equatorial Pacific: El Niño (October 2014-May 2016) that lasted 19 months and La Niña (August 2016 - December 2016) that lasted 5 months. The PCTI indicated only two warm conditions in the PUE: April 2015-March 2016 and February-April 2017 (Fig. 1). The largest differences were detected between January and March 2017 in the eastern central region, studying the propagation of negative sea level anomalies in the model as well as positive anomalies in the observations (Fig. 1).

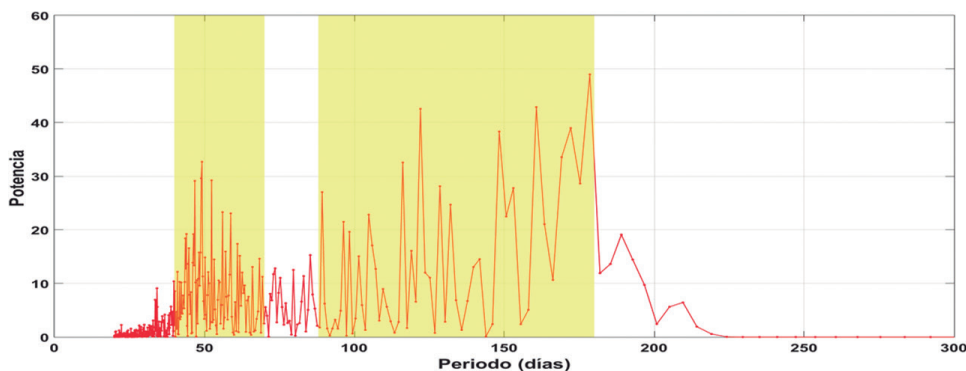


Figura 2.- Espectros de frecuencia de las anomalías del nivel del mar dentro de los 100 km desde la costa peruana de 0°N hasta 19°S en periodos inferiores a 200 días. Las áreas sombreadas de amarillo indican rangos de periodos de mayor variabilidad

Figure 2. Frequency spectra of SLA within 100 km off the Peruvian coast from 0°N to 19°S for periods less than 200 days. Yellow shaded areas indicate higher variability periods

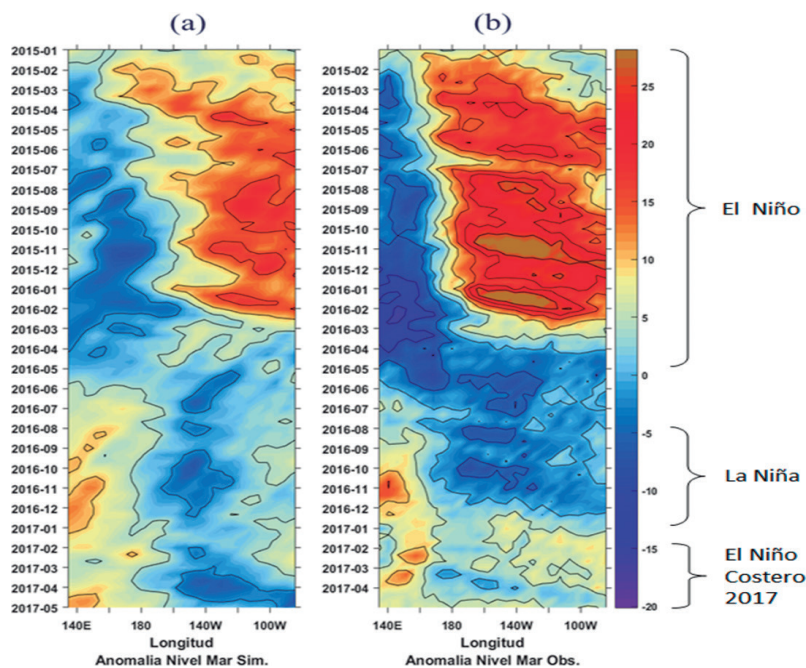


Figura 3.- Validación de la anomalía de nivel del mar simulada y observada 2015-2016. Según el ONI, ocurrió un evento cálido El Niño (octubre 2014 - mayo 2016) y un evento frío La Niña (agosto 2016 - diciembre 2016) en el Pacífico Ecuatorial; según el ITCP ocurrió una condición cálida, El Niño Costero, frente al Perú

Figure 3. Validation of the simulated and observed SLA (2015-2016). According to the ONI, a warm El Niño event (October 2014 - May 2016) and a cold La Niña event (August 2016 - December 2016) occurred in the equatorial Pacific. According to the PCTI, a warm coastal El Niño occurred off Peru

**a. Propagación de las Ondas de Kelvin Ecuatoriales durante El Niño 2015-2016**

Durante el verano austral 2015 (febrero y marzo), anomalías intensas de vientos del oeste generaron intensas OKEs de hundimiento (modo 1 y 2), alcanzando el extremo del Pacífico Ecuatorial Oriental en el otoño austral 2015 (abril y mayo) (Fig. 4). Entre junio y julio, se dieron nuevamente estas intensas anomalías extendiéndose al Pacífico Ecuatorial Central, ello generó intensas OKEs de

**a. Propagation of EKW's during the 2015/16 EN**

In summer 2015 (February and March), intense westerly wind anomalies generated intense downwelling EKW's (modes 1 and 2), reaching the edge of the Eastern Equatorial Pacific in autumn 2015 (April and May) (Fig. 4). These intense anomalies extended into the Central Equatorial Pacific between June and July, thus triggering intense downwelling EKW's (mode 1 and mode 2) that reached the edge of the Eastern Equatorial

hundimiento (modo 1 y modo 2) que llegaron al extremo del Pacífico Ecuatorial Oriental entre agosto y setiembre 2015 (Fig. 4c). El desplazamiento del borde oriental de la piscina cálida, producida por el cambio de pendiente del nivel del mar en el Pacífico Ecuatorial (PICAUT *et al.*, 1986), causó incremento de anomalías TSM a lo largo del Pacífico Ecuatorial (Fig. 4d) y las OKE de hundimiento, la profundización de termoclina incrementando el espesor de la capa cálida. Entre setiembre-octubre y noviembre-diciembre 2015, nuevos pulsos de anomalías de vientos del oeste generaron secuencias de OKEs de hundimiento, alcanzando el extremo del Pacífico Ecuatorial Oriental entre noviembre-diciembre 2015 y enero-febrero 2016, respectivamente (Fig. 4c). En total, se identificó, entre abril 2015 y marzo 2016, la propagación de siete OKEs intensas de hundimiento (modo 1) y siete OKEs de hundimiento (modo 2), las que fueron forzadas por pulsos de anomalías de vientos del oeste observados desde febrero 2015 hasta enero 2016 en el Pacífico Ecuatorial Occidental y Central. Según el ONI, los máximos valores en promedio de anomalías positivas en el Pacífico Ecuatorial Central y Oriental, fueron alrededor de +2,3 °C que se manifestaron en el trimestre noviembre-diciembre-enero 2015-16.

Pacific between August and September 2015 (Fig. 4c). The change of sea level gradient in the equatorial Pacific produced the displacement of the eastern edge of the warm pool (PICAUT *et al.*, 1986), thus increasing SSTA along the region (Fig. 4d) and downwelling EKWs, thermocline deepening increasing the thickness of the warm layer. New westerly wind anomaly pulses generated sequences of downwelling EKWs between September-October and November-December 2015, reaching the edge of the eastern Equatorial Pacific between November-December 2015 and January-February 2016, respectively (Fig. 4c). A total of seven intense downwelling EKWs (mode 1) and seven downwelling EKWs (mode 2) were identified between April 2015 and March 2016. These were forced by westerly wind anomaly pulses observed from February 2015 to January 2016 in the Western and Central Equatorial Pacific. According to the ONI, on average, the maximum values of positive anomalies in the Central and Eastern Equatorial Pacific were around +2.3 °C, which occurred in the November-December-January 2015-16 quarter.

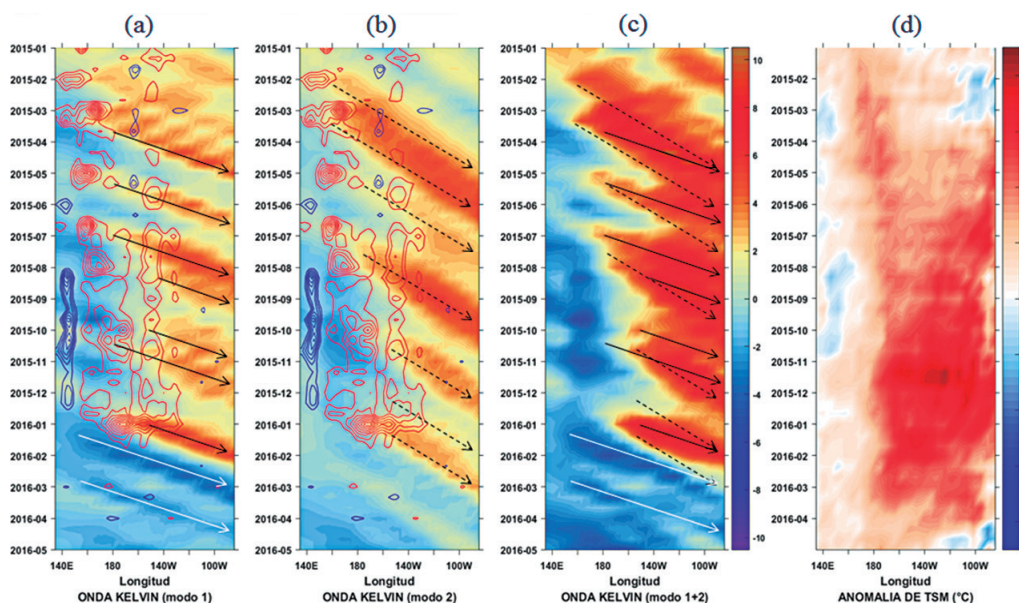


Figura 4.- Diagramas Hovmöller longitudin-tiempo de las Ondas de Kelvin simuladas: [a] Contribución del modo 1 a las anomalías del nivel del mar en cm (línea continua), [b] Contribución del modo 2 a las anomalías del nivel del mar en cm (línea punteada), [c] Contribución conjunta de los modos 1+2 a las anomalías del nivel del mar en cm; [d] anomalías de TSM en el Pacífico Ecuatorial (1°N-1°S) durante el periodo 2015-2016. Las anomalías positivas y negativas del esfuerzo del viento zonal se representan como contornos rojos y azules, respectivamente. Las ondas de hundimiento “cálidas” se identifican con flechas negras y las de afloramiento frías con flechas blancas; la contribución de los modos 1 y 2 se representan como flechas continuas y flechas discontinuas, respectivamente

Figure 4. Longitude-time Hovmöller diagrams of the simulated Kelvin Waves: [a] Contribution of mode 1 to SLA in cm (solid line), [b] Contribution of mode 2 to SLA in cm (dashed line), [c] Joint contribution of modes 1+2 to SLA in cm; [d] SSTA in the equatorial Pacific (1°N-1°S) during 2015-2016. Positive and negative zonal wind stress anomalies are represented as red and blue contours, respectively. “Warm” downwelling waves are identified by black arrows and cold upwelling waves by white arrows. The contribution of modes 1 and 2 are depicted as solid and dashed arrows, respectively



Entre enero y febrero 2016, se detectó la propagación de dos OKE de afloramiento que alcanzaron el extremo del Pacífico Ecuatorial Oriental en marzo-abril 2016 (Fig. 4). Su propagación elevó a la termoclina ecuatorial, según información de las boyas de TAO-TRITON (no mostrada), contribuyendo al debilitamiento de El Niño 2015-2016. Ello se pudo observar en la disminución de anomalías positivas de TSM a lo largo del Pacífico Ecuatorial (Fig. 4d) y su transición hacia una condición neutra en el Pacífico Ecuatorial en junio 2016, según el índice ONI (con un valor de +0,1 °C; Fig. 1b).

**b. Propagación de Ondas Atrapadas a la Costa durante El Niño 2015-2016**

Durante abril, junio, agosto, setiembre, nov-dic 2015, así como feb-mar 2016, se detectó el paso de siete OAC de hundimiento (cálidas) a lo largo del litoral peruano. Seis de ellas estarían asociadas a los arribos de OKE de hundimiento. El paso de OAC de hundimiento durante abril 2015 coincidió con el inicio de condiciones cálidas en el área del EAP, según el ITCP (QUISPE-CCALLUARI *et al.*, 2018) asociadas al desarrollo del episodio El Niño 2015-2016 (Figs. 1a, 5).

Between January and February 2016, two upwelling EKW were propagated and reached the edge of the eastern equatorial Pacific in March-April 2016 (Fig. 4). According to TAO-TRITON buoy data (not shown), their propagation elevated the equatorial thermocline, contributing to the weakening of the 2015/16 EN. This could be observed in the decrease of positive SST anomalies along the equatorial Pacific (Fig. 4d) and its transition to a neutral condition in June 2016, as indicated by the ONI index (with a value of +0.1 °C; Fig. 1b).

**b. Propagation of CTW during the 2015/16 EN**

During April, June, August, September, Nov-Dec 2015, as well as Feb-Mar 2016, seven downwelling (warm) CTWs were detected along the Peruvian coast. Six of them would be associated with downwelling EKW arrivals. In April 2015, the passage of sinking CTWs coincided with the onset of warm conditions in the PUE, according to the PCTI (QUISPE-CCALLUARI *et al.*, 2018) associated with the development of the 2015/16 EN (Figs. 1a, 5).

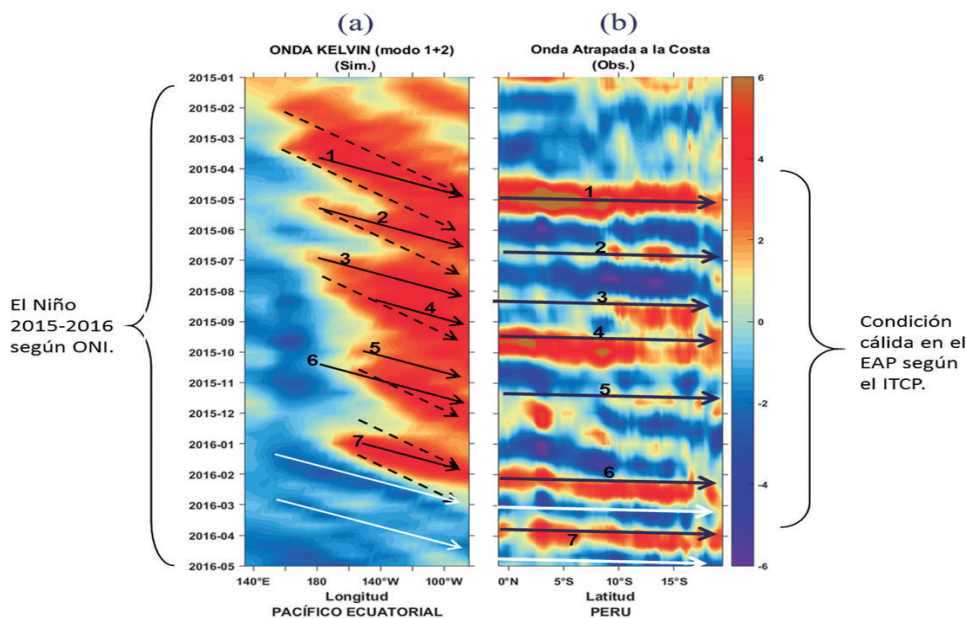


Figura 5.- Diagrama Hovmöller longitud-tiempo (izq.) de Ondas de Kelvin simuladas (contribución conjunta de los modos 1+2 a las anomalías del nivel del mar en cm) en el Pacífico Ecuatorial (0°N) durante el evento El Niño 2015-2016. Diagrama Hovmöller Latitud-tiempo (der.) de las anomalías del nivel del mar filtrado en cm para la identificación de Ondas Atrapadas a la Costa observadas (Perú) periodo 2015-2016. La longitud de ambos diagramas no está a la misma escala. Según la Fig. 5b, La 7ma Onda Atrapada a la costa de hundimiento, no está relacionada con ninguna de las Ondas de Kelvin de hundimiento de la Fig. 5a

Figure 5. Longitude-time Hovmöller diagram (left) of simulated Kelvin Waves (joint contribution of modes 1+2 to SLA in cm) in the Equatorial Pacific (0°N) during EN 2015/16. Latitude-time Hovmöller diagram (right) of the filtered SLA in cm for the identification of observed Coastal-Trapped Waves (Peru) between 2015-2016. The length of both diagrams is not at the same scale. According to Fig. 5b, the 7th downwelling Coastal-Trapped Wave is not related to any of the downwelling Kelvin Waves in Fig. 5a

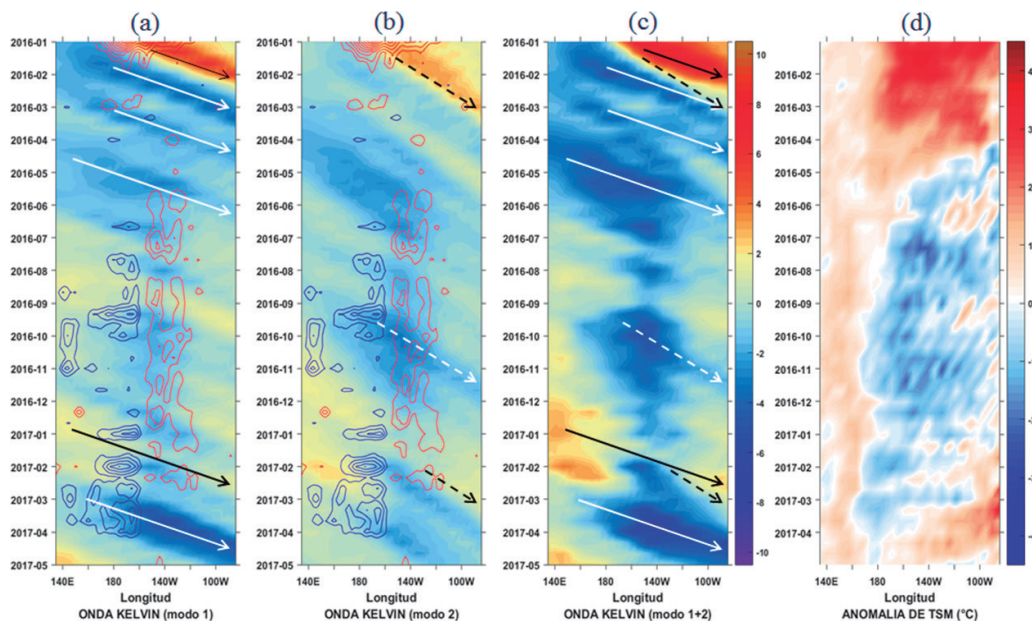


Figura 6.- Diagrama Hovmöller longitud-tiempo de las Ondas de Kelvin simuladas: [a] Contribución del modo 1 a las anomalías del nivel del mar en cm (línea continua), [b] Contribución del modo 2 a las anomalías del nivel del mar en cm (línea punteada), [c] Contribución conjunta de los modos 1+2 a las anomalías del nivel del mar en cm y [d] Anomalías de temperatura superficial del mar observado en el Pacífico Ecuatorial (0°N) durante periodo 2016-2017

Figure 6. Longitude-time Hovmöller diagram of the simulated Kelvin Waves: [a] Contribution of mode 1 to SLA in cm (solid line), [b] Contribution of mode 2 to SLA in cm (dashed line), [c] Joint contribution of modes 1+2 to SLA in cm, and [d] Observed SSTA in the Equatorial Pacific (0°N) between 2016-2017

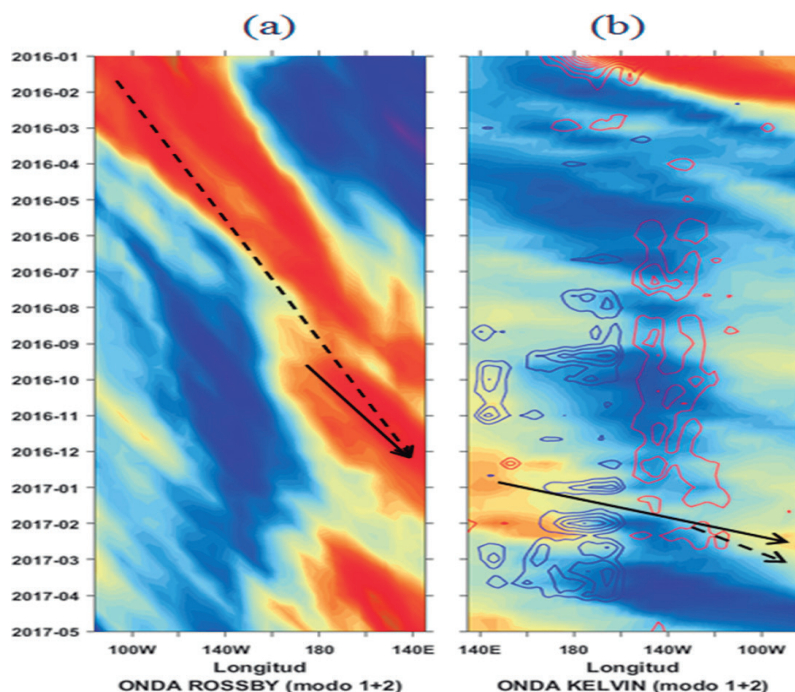


Figura 7.- Diagrama Hovmöller longitud-tiempo (izq.) de Ondas Rossby (contribución conjunta de los modos 1+2 a las anomalías del nivel del mar en cm) en 3°S-5°S durante 2016-2017. Diagrama Hovmöller Latitud-tiempo (der.) de Ondas de Kelvin (contribución conjunta de los modos 1+2 a las anomalías del nivel del mar en cm) en el Pacífico Ecuatorial (0°N) durante ENC 2017

Figure 7. Diagrama Hovmöller longitud-tiempo (izq.) de Ondas Rossby (contribución conjunta de los modos 1+2 a las anomalías del nivel del mar en cm) en 3°S-5°S durante 2016-2017. Diagrama Hovmöller Latitud-tiempo (der.) de Ondas de Kelvin (contribución conjunta de los modos 1+2 a las anomalías del nivel del mar en cm) en el Pacífico Ecuatorial (0°N) durante 2017 CEN



### c. Propagación de las Ondas de Kelvin Ecuatoriales durante El Niño Costero 2017

De acuerdo con el ONI, entre agosto y diciembre 2016, se desarrolló La Niña débil en el Pacífico Ecuatorial. Se observaron anomalías de vientos del este en el Pacífico Ecuatorial Occidental, entre agosto y noviembre 2016. Asociadas a esas anomalías del viento del este, se detectó la propagación de una OKE de afloramiento generada en setiembre (Fig. 6b), que alcanzó el extremo del Pacífico Ecuatorial Oriental en noviembre. Asimismo, se registraron anomalías de los vientos del este en el Pacífico Ecuatorial Central entre junio y diciembre, acompañadas por anomalías negativas de TSM en el Pacífico Ecuatorial Central y Oriental (Fig. 6d).

En diciembre 2016 se detectó la generación de una OKE de hundimiento (modo 1) en el Pacífico Ecuatorial Occidental, debido a la reflexión de una onda Rossby de hundimiento (Fig. 7). Esta OKE se habría reforzado por anomalías de vientos del oeste en el Pacífico Ecuatorial Oriental entre enero y febrero 2017, alcanzando el extremo del mismo en la segunda quincena de febrero 2017 (Fig. 6a). Entre fines de enero e inicios de febrero del mismo año, una OKE de hundimiento (modo 2) también se generó debido a las mismas anomalías en el Pacífico Ecuatorial Oriental, alcanzando el extremo del Pacífico Ecuatorial Oriental en marzo 2017. Por otro lado, entre febrero y marzo, se generó una OKE de afloramiento (modo 1) debido a la intensificación de vientos alisios en el Pacífico Ecuatorial Occidental, alcanzando al extremo del Pacífico Ecuatorial Oriental en abril 2017 (Fig. 6a). Sin embargo, esta OKE fría fue menos intensa en los datos observados que en los simulados (Fig. 3).

### d. Propagación de Ondas Atrapadas a la Costa durante El Niño Costero 2017

La OKE de afloramiento que alcanzó el extremo del Pacífico Ecuatorial Oriental en noviembre 2016, se propagó como OAC de afloramiento frente a la costa peruana (Figs. 3, 6, 8). Por otro lado, las anomalías de vientos del este observadas entre agosto y noviembre 2016 en el Pacífico Ecuatorial Occidental (Fig. 7b), habrían generado una onda Rossby de hundimiento con dirección al oeste (Fig. 7a), que al alcanzar el extremo del Pacífico Ecuatorial Occidental, por reflexión, habría generado a su vez una OKE de hundimiento (modo 1) en diciembre 2016 (Fig. 7) que llegó al extremo del Pacífico Ecuatorial Oriental en febrero 2017 (Fig. 7b). En dicho mes, se detectaron anomalías positivas del nivel del mar a lo largo del litoral peruano (Fig. 8), que sería consistente con el arribo de la OKE de hundimiento señalada. Además de esta OAC, se observaron otras probablemente generadas por señales ecuatoriales más débiles.

### c. Propagation of EKW during 2017 CEN

Between August and December 2016, a weak La Niña developed in the Equatorial Pacific, as indicated by the ONI. Easterly wind anomalies were observed in the Western Equatorial Pacific between August and November 2016, associated with the propagation of an upwelling EKW generated in September (Fig. 6b), which reached the edge of the eastern Equatorial Pacific in November. Also, easterly wind anomalies were recorded in the Central Equatorial Pacific between June and December, along with negative SSTA in the Central and Eastern Equatorial Pacific (Fig. 6d).

In December 2016, a downwelling Rossby wave reflected into downwelling EKW (mode 1) which was detected in the Western Equatorial Pacific (Fig. 7). Westerly wind anomalies would have reinforced this EKW in the Eastern Equatorial Pacific between January and February 2017, reaching its edge in the second half of February 2017 (Fig. 6a). A downwelling EKW (mode 2) was also generated between late January and early February as a result of the same anomalies in the Eastern Equatorial Pacific, reaching the edge of the Eastern Equatorial Pacific in March 2017. On the other hand, between February and March, an upwelling EKW (mode 1) was generated due to intensified trade winds in the Western Equatorial Pacific, reaching the edge of the Eastern Equatorial Pacific in April 2017 (Fig. 6a). Nevertheless, this cold EKW was less intense in the observed data than in the simulated data (Fig. 3).

### d. Propagation of CTW during 2017 CEN

In November 2016, the upwelling EKW, that reached the edge of the Eastern Equatorial Pacific, propagated as an upwelling CTW off the Peruvian coast (Figs. 3, 6, 8). Easterly wind anomalies, which were observed between August and November 2016 in the Western Equatorial Pacific (Fig. 7b), would have generated a westerly downwelling Rossby wave (Fig. 7a), which upon reaching the edge of the Western Equatorial Pacific, reflected into a downwelling EKW (mode 1) in December 2016 (Fig. 7) that reached the edge of the Eastern Equatorial Pacific in February 2017 (Fig. 7b). Positive SLAs were detected along the Peruvian coastline in that month (Fig. 8), which would be consistent with the arrival of the reported downwelling EKW. Besides this CTW, other CTWs were observed, probably generated by weaker equatorial signals.

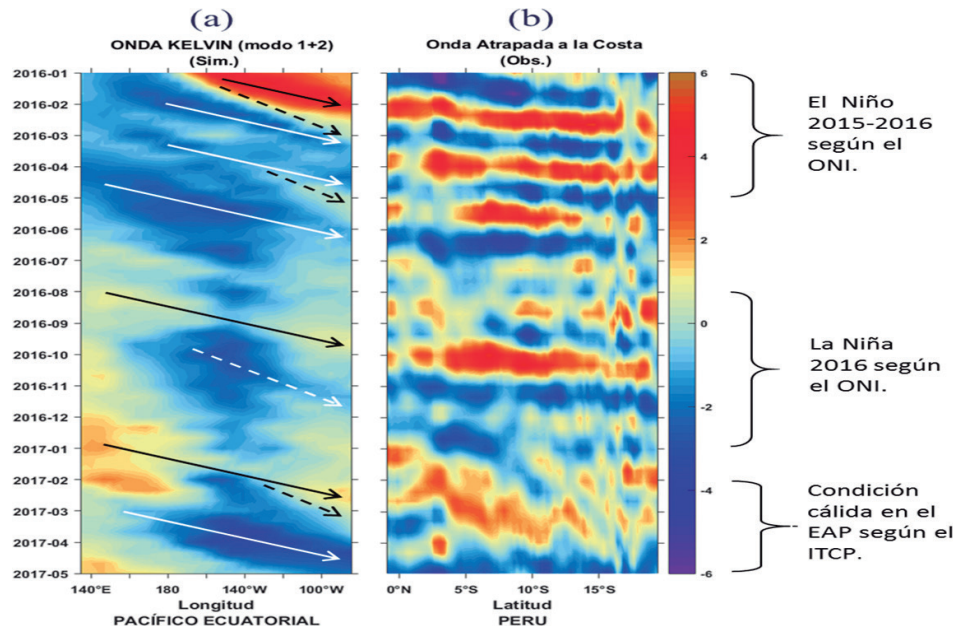


Figura 8.- Diagrama Hovmöller longitud-tiempo (izq.) de Ondas de Kelvin simuladas (contribución conjunta de los modos 1+2 a las anomalías del nivel del mar en cm) en el Pacífico Ecuatorial (0°N) durante El Niño Costero 2017. Diagrama Hovmöller latitud-tiempo de la ANM filtrada (der.) para detectar Ondas Atrapadas a la Costa (cm), durante ENC 2017. La longitud de ambos diagramas no está a la misma escala

Figure 8. Longitude-time Hovmöller diagram (left) of simulated Kelvin Waves (joint contribution of modes 1+2 to SLA in cm) in the Equatorial Pacific (0°N) during 2017 CEN. Latitude-time Hovmöller diagram of the filtered SLA (right) to detect Coastal-Trapped Waves (cm), during 2017 CEN. The longitude of both diagrams is not at the same scale

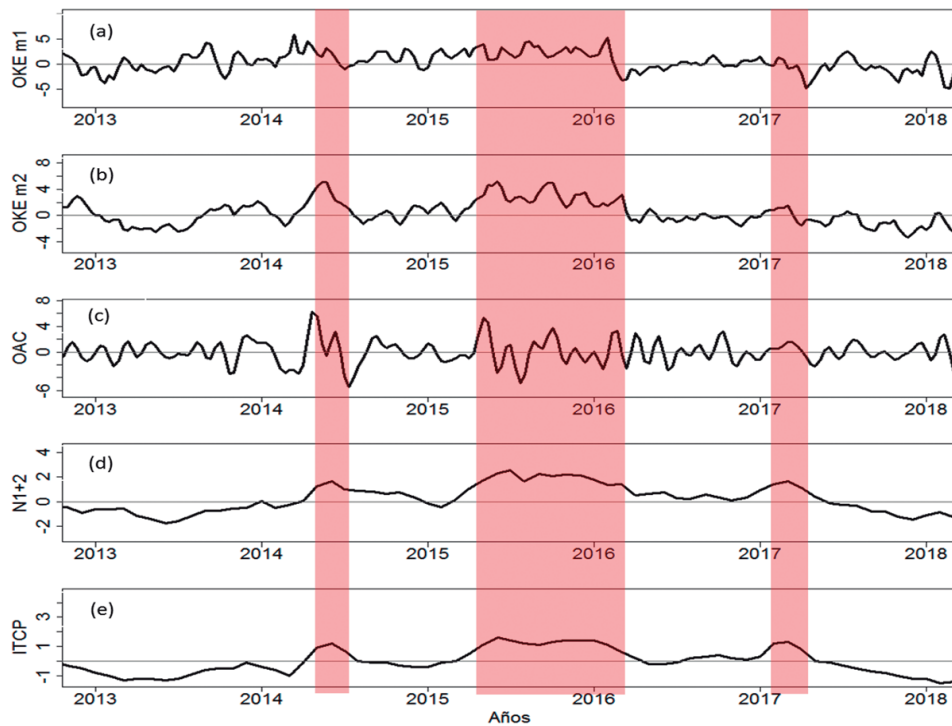


Figura 9.- Series de tiempo: (a) OKE simuladas (modo 1) en el punto 90°W, 0°N, (b) OKE simuladas (modo 2) en el punto 90°W, 0°N, (c) ANM promedio filtrada 4°S-16°S dentro 100 km a la costa, (d) ATSM Niño 1+2 y (e) ITCP. Área sombreada en rojo indica periodo cálido del ITCP

Figure 9. Time series: (a) simulated EKW (mode 1) at 90°W, 0°N, (b) simulated EKW (mode 2) at 90°W, 0°N, (c) mean SLA filtered 4°S-16°S within 100 km offshore, (d) SSTA Niño 1+2 and (e) PCTI. Red shaded area indicates PCTI warm period

#### e. Asociación entre Ondas de Kelvin Ecuatoriales y Ondas Atrapadas a la Costa en periodos cálidos en el área del ecosistema de afloramiento peruano durante 2013-2018

Entre 2013-2018, ocurrieron tres eventos cálidos en los periodos 2014, 2015-2016 y 2017 (Fig. 9), de los que se identificaron arribos de OKE de hundimiento (Fig. 9a, b) en un punto próximo a los 90°W en el Océano Pacífico Ecuatorial y posteriormente su paso como OAC de hundimiento a lo largo del litoral peruano. Así, durante el periodo cálido del 2014 arribaron dos OKEs intensas de hundimiento (una de cada modo), en el periodo cálido entre 2015-2016 arribaron catorce (siete de cada modo), y durante el ENC2017, arribaron dos (una de cada modo) con menor intensidad en comparación con los dos periodos cálidos ya mencionados.

#### 4. DISCUSIÓN

Durante El Niño 2015-2016, las anomalías positivas de TSM en el extremo del Pacífico Tropical Oriental (incluyendo la costa peruana) estuvieron asociadas a las propagaciones de intensas OKEs de hundimiento forzadas por pulsos de vientos del oeste. Sin embargo, un escenario muy diferente se observó durante ENC 2017, cuya consideración como una Ola de Calor Marina (TAKAHASHI *et al.*, 2018) se confirmó siguiendo la metodología de HOBDAI *et al.* (2016) (Pietri, com. pers.). No se produjeron pulsos intensos de viento del oeste en el Pacífico Ecuatorial Central durante ENC 2017. Por ello, el calentamiento anómalo en la costa peruana no estaría principalmente asociado al forzamiento remoto ecuatorial, sino a factores locales o regionales, como lo ocurrido en 1925 (TAKAHASHI & MARTINEZ, 2017) bajo un escenario neutral del ENSO. ECHEVIN *et al.* (2018) y GARREAUD (2018) señalaron que el calentamiento inicial estuvo asociado a la disminución regional de vientos del sudeste en el extremo Pacífico Oriental. Es así que los vientos costeros y oceánicos del sudeste fueron débiles desde el último trimestre de 2016 hasta enero 2017 (ECHEVIN *et al.*, 2018), atenuando el afloramiento costero y favoreciendo la estratificación térmica de las capas superficiales.

En el diagrama Hovmöller de ANM filtradas (Fig. 5b), durante El Niño 2015-2016, la señal de propagación de siete OACs en la ANM se observó con claridad. Seis de ellas estuvieron principalmente asociadas a seis OKE de hundimiento (modo 1). En cambio, durante ENC 2017 (entre febrero y marzo), la distribución latitudinal de ANM positivas fue más difusa. Probablemente asociada a la contribución conjunta de la llegada de la OKE de hundimiento (modo 1) y de factores locales anómalos como el debilitamiento del bombeo de Ekman (ECHEVIN *et al.*, 2018).

#### e. Association between EKW and CTW during warm periods in the PUE between 2013-2018

Between 2013-2018, three warm events occurred in the periods 2014, 2015-2016, and 2017 (Fig. 9). Of these, downwelling EKW arrivals (Fig. 9a, b) were identified at a point near 90°W in the equatorial Pacific Ocean and subsequently their passage as downwelling CTWs along the Peruvian coastline. Therefore, in 2014 (warm period), two intense downwelling EKWs arrived (one of each mode). A total of fourteen (seven of each mode) arrived in the warm period 2015-2016 and during 2017 CEN, two (one of each mode) arrived with less intensity compared to the two previous warm periods.

#### 4. DISCUSSION

Westerly wind pulses forced the propagation of intense downwelling EKWs, which resulted in positive SST anomalies in the far Eastern Tropical Pacific (including the Peruvian coast) during EN 2015/16, although a very different scenario was observed during 2017 CEN, whose classification as a marine heatwave (TAKAHASHI *et al.*, 2018) was confirmed following the methodology of HOBDAI *et al.* (2016) (Pietri, pers. comm.). No intense westerly wind pulses occurred in the Central Equatorial Pacific during 2017 CEN, so the anomalous warming along the Peruvian coast would not be primarily associated with remote equatorial forcing, but with local or regional factors, as what occurred in 1925 (TAKAHASHI & MARTINEZ, 2017) under a neutral ENSO scenario. ECHEVIN *et al.* (2018) and GARREAUD (2018) noted that the initial warming was associated with the regional decrease of southeasterly winds in the far eastern Pacific. Thus, coastal and oceanic southeasterly winds were weak from the last quarter of 2016 to January 2017 (ECHEVIN *et al.*, 2018), attenuating the coastal upwelling and favoring the thermal stratification of surface layers.

In the Hovmöller diagram of filtered SLA (Fig. 5b), during EN 2015/16, the propagation signal of seven CTWs in the SLA was observed. Six of them were mainly associated with six downwelling EKWs (mode 1). Conversely, during 2017 CEN (between February and March), the latitudinal distribution of positive SLA was more diffuse and it was possibly associated with the joint contribution of the downwelling EKW (mode 1) and anomalous local factors such as the weakening of Ekman pumping (ECHEVIN *et al.*, 2018).



Como se ha mencionado, en febrero 2017 una OKE de hundimiento modo 1, llegó frente a las costas de Sudamérica, cuando el calentamiento costero ya se había iniciado en enero 2017 (ENFEN, 2017). Esta OKE se habría amplificado por anomalías de vientos del oeste en el Pacífico Ecuatorial Oriental durante febrero 2017 (ENFEN, 2017). Estas anomalías también podrían haber generado OKE de hundimiento (modo 2), que llegó en marzo 2017 (Fig. 8a) según las simulaciones. Esta última habría contribuido al calentamiento anómalo frente a la costa norte del Perú, coincidiendo con las anomalías positivas de TSM que alcanzaron sus máximos valores (Fig. 9) (ENFEN, 2017). Sin embargo, el arribo de estas dos OKE de hundimiento se produjo cuando ENC 2017 ya se había iniciado, por ello su rol habría sido contribuir a la extensión temporal del calentamiento.

## 5. CONCLUSIONES

A diferencia de los efectos de El Niño 2015-2016 ocurridos sobre el EAP, el calentamiento anómalo en la costa peruana durante ENC 2017, no estuvo principalmente asociado al forzamiento remoto ecuatorial.

Durante El Niño 2015-2016, se propagaron siete OKEs de hundimiento (modo 1) generadas por pulsos de vientos del oeste en el Pacífico Ecuatorial. Seis de ellas se propagaron como OAC de hundimiento frente a la costa, sin embargo, durante la ocurrencia ENC 2017, arribaron dos OKEs: una OKE de hundimiento (modo 1) en febrero 2017, se generó por la reflexión de una onda Rossby en el extremo occidental del Pacífico Ecuatorial, y otra OKE de hundimiento (modo 2) en marzo 2017, generada por anomalías de vientos del oeste en el Pacífico Ecuatorial Oriental.

Ambas OKEs de hundimiento que arribaron al extremo del Pacífico Ecuatorial Oriental en febrero y marzo, contribuyeron con el desarrollo de ENC 2017, aunque la OKE de hundimiento de modo 2, tuvo un impacto con mayor duración.

In February 2017, a downwelling mode 1 EKW arrived off the South American coast when the coastal warming had already started in January 2017 (ENFEN, 2017). Westerly wind anomalies in the eastern equatorial Pacific (February 2017) would have amplified this EKW (ENFEN, 2017). Such anomalies could also have generated downwelling EKW (mode 2), which arrived in March 2017 (Fig. 8a) based on the simulations. The latter would have contributed to the anomalous warming off the northern Peruvian coast, coinciding with the positive SST anomalies that reached their maximum values (Fig. 9) (ENFEN, 2017). Nonetheless, the arrival of these two downwelling EKWs occurred when 2017 CEN had already started, so their role would have been to contribute to the temporal extension of the warming.

## 5. CONCLUSIONS

Unlike the EN 2015/16 effects that occurred over the PUE, the anomalous warming along the Peruvian coast during 2017 CEN was not primarily associated with equatorial remote forcing.

A total of seven downwelling EKWs (mode 1) generated by westerly wind pulses in the equatorial Pacific were propagated during EN 2015/16, of which six were propagated as downwelling CTWs off the coast. However, during the 2017 CEN occurrence, two EKWs arrived: one downwelling EKW (mode 1) in February 2017, generated by the reflection of a Rossby wave in the far western equatorial Pacific, and another downwelling EKW (mode 2) in March 2017, generated by westerly wind anomalies in the eastern equatorial Pacific.

Both downwelling EKWs that arrived at the edge of the eastern equatorial Pacific in February and March contributed to the development of 2017 CEN, although the Mode 2 downwelling EKW, had a longer duration of impact.

## REFERENCIAS / REFERENCES

- BARBER R T, CHAVEZ F P. 1983. Biological consequences of El Niño. *Science*. 222(4629): 1203-1210.
- COLAS F, CAPET X, McWILLIAMS J C, SHCHEPETKIN A. 2008. 1997-98 El Niño off Peru: A numerical study. *Progress in Oceanography*. 79: 138-155. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2008.10.015>
- DEWITTE B. 2000. Sensitivity of an intermediate ocean-atmosphere coupled model of the tropical Pacific to its oceanic vertical structure. *Journal of Climate*. 13(13): 2363-2388.
- DEWITTE B, REVERDIN G, MAES C. 1999. Vertical structure of an OGCM forced simulation of the tropical Pacific in 1985-1994. *J. Phys. Oceanogr.* 29: 1542-1570.
- DEWITTE B, GUSHCHINA D, DUPENHOAT Y, LAKEEV S. 2002. On the importance of subsurface variability for ENSO simulation and prediction with intermediate coupled models of the Tropical Pacific: A case study for the 1997-1998 El Niño. *Geoph. Res. Lett.* 29(14): 1666. [10.1029/2001GL014452](https://doi.org/10.1029/2001GL014452)
- DEWITTE B, ILLIG S, PARENT L, DUPENHOAT Y, GOURDEAU L Y J, VERRON. 2003. Tropical Pacific baroclinic mode contribution and associated long waves for the 1994-1999 period from an assimilation experiment with altimetric data. *J. Geophys. Res.* 108(C4): 3121.
- DEWITTE B, VAZQUEZ-CUERVO J, GOUBANOVA K, ILLIG S, TAKAHASHI K, CAMBON G, ... ORTLIEB L. 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: Topical Studies in Oceanography*. 77-80: 143-156. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2012.04.011>
- ECHEVIN V, COLAS F, ESPINOZA-MORRIBERON D, VASQUEZ L, ANCULLE T, GUTIERREZ D. 2018. Forcings and Evolution of the 2017 Coastal El Niño Off Northern Peru and Ecuador. *Front. Mar. Sci.* 5: 367. doi: 10.3389/fmars.2018.00367
- ENFEN. 2016. Comité Multisectorial Encargado del Estudio Nacional del Fenómeno El Niño (Informe Técnico Enfen. Año 2, No. 3, marzo 2016: 54 pp.). Lima, Perú. <http://enfen.gob.pe/download/informe-tecnico-2016-3/>
- ENFEN. 2017. El Niño Costero 2017 (Informe Técnico Extraordinario No.001-2017). Lima, Perú (pp. 1-31). [http://www.imarpe.pe/imarpe/archivos/informes/imarpe\\_infteo\\_informe\\_tecnico\\_extraordinario\\_001\\_2017.pdf](http://www.imarpe.pe/imarpe/archivos/informes/imarpe_infteo_informe_tecnico_extraordinario_001_2017.pdf).
- ESPINOZA-MORRIBERÓN D, ECHEVIN V, COLAS F, TAM J, LEDESMA J, VÁSQUEZ L, *et al.* 2017. Impacts of El Niño events on the Peruvian upwelling system productivity. *J. Geophys. Res. Oceans*. 122: 5423-5444. doi: 10.1002/2016JC012439
- ESPINOZA D, ECHEVIN V, COLAS F, GUTIERREZ D, GRACO M, LEDESMA J, TAM J, QUISPE C. 2019. Oxygen Variability during ENSO in the Tropical South Eastern Pacific. *Frontiers in Marine Science*. doi: 10.3389/fmars.2018.00526
- GARREAUD R D. 2018. A plausible atmospheric trigger for the 2017 coastal El Niño. *Int. J. Climatol.* 38: e1296-e1302. doi: 10.1002/joc.5426
- GUTIÉRREZ D, ENRIQUEZ E, PURCA S, QUIPÚZCOA L, MARQUINA R, FLORES G, GRACO M. 2008. Oxygenation episodes on the continental shelf of central Peru: remote forcing and benthic ecosystem response *Prog. Oceanogr.* 79: 177-189.
- HOBBDAY A J, *et al.* 2016. A hierarchical approach to defining marine heatwaves. *Progress in Oceanography*. 141: 227-238. doi: 10.1016/j.pocean.2015.12.014
- ILLIG S, DEWITTE B, AYOUB N, DUPENHOAT Y, REVERDIN G, DE MEY P, BONJEAN F, LAGERLOEF G S E. 2004. Interannual long equatorial waves in the Tropical Atlantic from a high resolution OGCM experiment in 1981-2000. *J. Geophys. Res.* 109(C2): C02022.
- KALNAY E, KANAMITSU M, KISTLER R, COLLINS W, DEAVEN D, GANDIN L, IREDELL M, SAHA S, WHITE G, WOOLLEN J, ZHU Y, LEETMAA A, REYNOLDS R, CHELLIAH M, EBISUZAKI W, HIGGINS W, JANOWIAK J, MO K C, ROPELEWSKI C, WANG J, JENNE R, JOSEPH D. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 77: 437-471.
- KESSLER W S, MCPHADEN M J. 1995. Oceanic equatorial waves and the 1991-1993 El Niño. *J. Clim.* 8: 1758-1774.
- KESSLER W S, MCPHADEN M J, WEICKMANN K M. 1995. Forcing of intraseasonal Kelvin waves in the equatorial Pacific. *J. Geophys. Res.* 100: 10,613-10,631. doi:10.1029/95JC00382
- KING B, STONE M, ZHANG H P, GERKEMA T, MARDER M, SCOTT R B, SWINNEY H L. 2012. Buoyancy frequency profiles and internal semidiurnal tide turning depths in the oceans. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 117, C04008, doi: 10.1029/2011JC007681
- NOAA. 2019. CPC: Oceanic EL Niño Index. Retrieved from [http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml)
- PICAUT J, M. IOUALALEN M, MENKES C, DELCROIX T, MCPHADEN M J. 1996. Mechanism of the Zonal Displacements of the Pacific Warm Pool: Implications for ENSO. *Science*. 274: 1486-1489.
- QUISPE-CALLUARI C, TAM J, DEMARCO H, CHAMORRO A, ESPINOZA-MORRIBERÓN D, ROMERO C, DOMINGUEZ N, RAMOS J, OLIVEROS-RAMOS R. 2018. An index of coastal thermal effects of El Niño Southern Oscillation on the Peruvian Upwelling Ecosystem. *Int. J. Climatol.* 1-11. <https://doi.org/10.1002/joc.5493>
- REYNOLDS R W, SMITH T M, LIU C, CHELTON D B, CASEY K S, SCHLAX M G. 2007. Daily high-resolution blended analyses for sea surface temperature. *J. Climate*. 20: 5473-5496.
- SHAFFER G, PIZARRO O, DJURFELDT L, SALINAS S, RUTTLANT J. 1997. Circulation and low frequency variability near the Chilean coast: remotely forced fluctuations during the 1991-1992 El Niño. *J. Physical Oceanography*. 27: 217-235.
- RAMÍREZ I J, BRIONES F. 2017. Understanding the El Niño Costero of 2017: The definition problem and challenges of climate forecasting and disaster responses. *International Journal of Disaster Risk Science*. 8: 489-492. <https://doi.org/10.1007/s13753-017-0151-8>
- TAKAHASHI K, MARTINEZ A G. 2017. The very strong coastal El Niño in 1925 in the far-eastern Pacific. *Climate Dynamics*. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3702-1>
- TAKAHASHI K, ALIAGA N, ÁVALOS G, BOUCHON M, CASTRO A, CRUZADO L, DEWITT B, QUISPE N. 2018. The 2017 coastal El Niño. In: *State of the climate in 2017*. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 99(8): S210-S242. Doi:10.1175/2018bamsstateoftheclimate.1
- ZEBIAK S E, CANE M A. 1987. A model El Niño southern oscillation. *Mon. Weather Rev.* 115: 2262-2278.