

VARIABILIDAD ESTACIONAL A DECENAL DE LA TEMPERATURA DEL OCEÁNO FRENTE A LA COSTA PERUANA: RELACIÓN CON LA VARIABILIDAD ECUATORIAL

SEASONAL-TO-DECADAL VARIABILITY OF THE OCEAN TEMPERATURE OFF THE PERUVIAN COAST: CONNECTION WITH THE EQUATORIAL VARIABILITY

Sara Purca^{1,*} Boris Dewitte² Serena Illig^{1,2}
Michelle Graco¹ Jorge Vazquez-Cuervo³ Luis Vasquez¹

¹ Instituto del Mar del Perú (IMARPE) Dirección General de Investigaciones Oceanográficas y Cambio Climático, Callao, Perú.

² Laboratoire d'Etude en Géophysique et Océanographie Spatiales. Toulouse-France

³ Jet Propulsion Laboratory. Pasadena, Estados Unidos.

* Correspondencia: spurca@imarpe.gob.pe

RESUMEN

Se estudia la variabilidad desde la escala estacional a decenal de las temperaturas del mar del Perú, forzada por la modulación intraestacional de baja frecuencia ecuatorial de las ondas Kelvin (OKEI). Se usó datos *in situ* de temperaturas superficiales del mar y de profundidad de la isoterma de 15 °C en la costa peruana (Z15), procedentes de las estaciones costeras y de los cruceros del IMARPE, respectivamente. Se usaron datos del modelo del océano de circulación general de asimilación para calcular el primer y segundo modo baroclínico de las ondas Kelvin (OK). Se presenta la variabilidad estacional en los vientos que fuerzan el afloramiento y la temperatura superficial del mar; el viento favorable al afloramiento se asoció con aguas frías superficiales. El ciclo El Niño Oscilación Sur, se observa como una señal de variabilidad interanual en las anomalías de Temperaturas y Z15. En relación a la modulación de baja frecuencia (>7 años), se observó que el primer modo (AK1) de la OK está correlacionado con la modulación de 120 días de energía máxima en la TSM, mientras que la modulación del máximo de energía de 120 días del segundo modo (AK2) de OK presentó alta correlación con la serie de tiempo de baja frecuencia de variabilidad de Z15. En décadas pasadas, la variabilidad de baja frecuencia del primer (AK1) y segundo (AK2) modo baroclínico de las OK podría explicar la variabilidad intraestacional en la capa de mezcla frente a Perú. Se concluye que los filtros de baja frecuencia de la variabilidad de los modos 1 y 2 de la OK están conduciendo los tres patrones de variabilidad de los Z15 a lo largo de la costa de Perú: 1) patrón decenal al norte; 2) patrón interanual en el centro; 3) patrón de tendencia a mayor variabilidad intraestacional en el sur. Se prevé encontrar algunas consecuencias a escala decenal en la zona de mínimo oxígeno y la nutriclina del Sistema de la Corriente del Perú (parte norte).

PALABRAS CLAVE: temperatura del océano, costa peruana, variabilidad estacional y decenal

ABSTRACT

This work investigates seasonal to decadal variability in ocean temperatures off the Peruvian coast, driven by the low-frequency intraseasonal modulation of equatorial Kelvin waves (IEKWs). The analysis combines *in situ* sea surface temperature (SST) data from coastal stations with depth measurements of the 15 °C isotherm (Z15) from IMARPE research cruises. Additionally, outputs from the SODA ocean general circulation reanalysis were used to estimate the first and second baroclinic modes of KW. Seasonal variability is evident in the wind forcing that regulates upwelling and SST, with stronger upwelling-favorable winds associated with cooler surface waters. Interannual variability is expressed through the El Niño–Southern Oscillation (ENSO), visible in SST and Z15 anomalies. At lower frequencies (>7 years), the first baroclinic mode (AK1) of KW shows a significant correlation with the 120-day modulation of maximum SST energy, while the second mode (AK2) correlates strongly with the low-frequency variability of Z15. Historical records suggest that the low-frequency behavior of both AK1 and AK2 can account for much of the intraseasonal variability in the mixed layer off Peru. Three distinct variability patterns of Z15 emerge along the Peruvian coast, linked to the low-frequency dynamics of KW modes 1 and 2: (1) a decadal-scale signal in northern, (2) an interannual signal in central, and (3) an increasing trend toward intraseasonal variability in the south. These results point to potential decadal impacts on the oxygen minimum zone and the nutricline within the northern Current System (also known as Humboldt Current System, NHCS).

KEYWORDS: ocean temperature, Peruvian coast, seasonal variability, decadal variability

COMO REFERENCIAR ESTE ARTÍCULO (APA 7ed): Purca, S., Dewitte, B., Illig, S., Graco, M., Vásquez-Cuervo, J. & Vasquez, L. (2026). Variabilidad estacional a decenal de la temperatura del océano frente a la costa peruana: relación con la variabilidad ecuatorial. En J. Csirke & R. Guevara-Carrasco (Eds.), *La Anchoqueta peruana (Engraulis ringens). Stock Norte-Centro (1950-2009): Construyendo las Bases Científicas para un Enfoque Ecosistémico* (Tomo I, pp. 46-61). Instituto del Mar del Perú.

1. INTRODUCCIÓN

Una consideración crucial que se debe tomar en cuenta (cuando se enfoca en las escalas de variabilidad estacional a decenal) sobre la temperatura superficial del mar a lo largo de la costa de Perú, es el acoplamiento ecuatorial y el forzamiento remoto. Estudios y análisis previos indican que la temperatura anual, la variabilidad de la profundidad de la isoterma de 15 °C y el nivel del mar frente a la costa peruana, varían, principalmente, debido al efecto local de los vientos a lo largo de la costa y a la variación intraestacional forzada remotamente por las ondas Kelvin Ecuatoriales (OKE) (ENFIELD & ALLEN, 1980; ENFIELD, 1987; CLARKE & SHI, 1991; CLARKE, 1992; CLARKE & AHMED, 1999; CLARKE & LEBEDEV, 1999; DEWITTE *et al.*, 2011).

Durante los eventos de El Niño (EN), la variabilidad interanual provoca que los vientos del Pacífico occidental y central disminuyan o cambien de dirección, generando ondas Kelvin (OK) que se propagan hacia el este. Esto provoca la depresión de la termoclina y el aumento del tamaño de la capa cálida superficial del océano en el Pacífico oriental (ENFIELD, 1988). En 2002, la comparación de la tendencia a largo plazo de la temperatura superficial del mar (TSM) y de los vientos en los sistemas de corrientes de California y Perú-Chile, sugiere un proceso más global que regional (MENDELSSOHN & SCHWING, 2002). Sin embargo, el patrón decadal de las fluctuaciones de El Niño Oscilación Sur (ENOS) es similar a las porciones más persistentes de la evolución estacional del patrón ENOS (NEWMAN *et al.*, 2016). En el Pacífico Tropical, las variaciones interanuales asociadas a fuertes procesos regionales interanuales, como ENOS, podrían provocar que los peces pelágicos quedaran fuera de la ventana ambiental óptima durante períodos decenales, lo que llevaría a un calentamiento de las masas de agua de afloramiento y a una reducción del oxígeno y los nutrientes (PURCA *et al.*, 2010). En consecuencia, el reclutamiento de peces pelágicos podría fallar en áreas de afloramiento (CURY & PAULY, 2000). Por otro lado, algunos estudios han mostrado una notable relación positiva entre el primer modo baroclínico de ondas Kelvin ecuatoriales intraestacionales (AK1) y el segundo (AK2) y el Índice del Niño Oceánico (INO) (DEWITTE *et al.*, 2012). ASHOK *et al.* (2007) también muestran que, en los últimos 100 años debido a la variabilidad climática, EN ocurre con mayor frecuencia en el Pacífico ecuatorial central y con menor frecuencia en el Pa-

1. INTRODUCTION

Understanding the variability of ocean temperatures off the Peruvian coast requires considering both local forcing mechanisms and large-scale equatorial dynamics. From seasonal to decadal timescales, sea surface temperature (SST) fluctuations, changes in the depth of the 15 °C isotherm (Z15), and sea level variability have been shown to reflect the combined influence of coastal winds and remotely forced intraseasonal signals associated with Equatorial Kelvin Waves (EKWs) (ENFIELD & ALLEN, 1980; ENFIELD, 1987; CLARKE & SHI, 1991; CLARKE, 1992; CLARKE & AHMED, 1999; CLARKE & LEBEDEV, 1999; DEWITTE *et al.*, 2011).

During El Niño (EN) events, changes in the western and central Pacific trade winds—either weakening or reversing—generate Kelvin waves that propagate eastward, depressing the thermocline and thickening the warm upper-ocean layer in the eastern Pacific (ENFIELD, 1988). A comparative study in 2002 examining long-term SST and wind trends in the California and Peru–Chile Current systems suggested a broader, more global-scale process rather than a purely regional dynamic (MENDELSSOHN & SCHWING, 2002). However, the decadal fluctuations of the El Niño–Southern Oscillation (ENSO) closely resemble the most persistent aspects of its seasonal cycle (NEWMAN *et al.*, 2016). In the Tropical Pacific, strong interannual variability linked to ENSO may push pelagic fish outside their optimal environmental window over decadal timescales, as warming of upwelling waters reduces oxygen and nutrient availability (PURCA *et al.*, 2010). As a result, recruitment failures in pelagic fish populations may occur in upwelling regions (CURY & PAULY, 2000). Other studies have identified a notable positive correlation between the first (AK1) and second (AK2) baroclinic modes of intraseasonal Equatorial Kelvin Waves (IEKWs) activity and the Oceanic Niño Index (ONI) (DEWITTE *et al.*, 2012). Meanwhile, ASHOK *et al.* (2007) reported that over the past century, EN events have occurred more frequently in the central equatorial Pacific and less frequently in the

cífico ecuatorial oriental, mientras que, a lo largo de la costa peruana, después del año 2000, solo hubo periodos cortos de condiciones cálidas, similares, pero no clasificadas como eventos El Niño. DEWITTE *et al.* (2012) quienes analizaron las condiciones frías (termoclina superficial) durante los eventos El Niño CP, encontraron que el afloramiento costero se moduló débilmente por los vientos después del 2000, lo que sugiere la existencia de otros factores, planteándose que el afloramiento costero estuvo más inducido por la variabilidad ecuatorial de la actividad de las ondas Kelvin ecuatoriales (OKE) durante ese periodo.

Diversos artículos describen la amplitud y frecuencia de propagación de las ondas Kelvin atrapadas en la costa, así como el efecto de un límite no meridional en OKE. BOHLE-CARBONELL (1989) ha propuesto un concepto alternativo de ondas de impacto que se propagan hacia los polos y la señal de onda interanual puede considerarse como un índice de El Niño (CLARKE, 1992). El primer modo baroclínico (AK1) de OKEI parece desarrollarse durante el inicio de los eventos de El Niño Oscilación del Sur (ENOS) (ENFIELD, 1987) mientras que el segundo modo baroclínico (AK2) de OKEI se correlaciona significativamente con la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP) (DEWITTE *et al.*, 2008). Estos últimos autores, indican (en sentido lineal) que la modulación de la actividad del primer modo baroclínico (AK1) de OKEI está determinada principalmente por la fuerza del viento local en escalas intraestacionales, mientras que la modulación del segundo modo baroclínico (AK2) de OKEI, particularmente dentro de los días 90-70, está forzada por el cambio de baja frecuencia de la variabilidad ecuatorial

En ese contexto, nuestro objetivo es utilizar la base de datos "ASIMILACIÓN SIMPLE DE DATOS OCEÁNICOS" (ASDA) y la temperatura de la superficie del mar (TSM) de alta resolución del satélite *Pathfinder* (VAZQUEZ-CUERVO *et al.*, 2010) para realizar un análisis integral de la frecuencia de ondas de los dos primeros modos baroclínicos de OKEI en relación con la TSM y la profundidad de la isoterma de 15 °C (Z15) frente a Perú. Por tanto, en este estudio analizamos la variabilidad de la temperatura superficial y subsuperficial costera a lo largo del Perú y su conexión con la variabilidad ecuatorial. Se muestra una amplia gama de frecuencias, desde estacionales hasta decenales. Usamos datos *in situ* y perfiles de cruceros del IMARPE y comparamos estos datos con índices de OKEI del modelo ASDA.

eastern equatorial Pacific. Along the Peruvian coast, after 2000, only brief warm episodes were recorded—similar to but not classified as EN events. DEWITTE *et al.* (2012), analyzing cold conditions (shoaling thermocline) during Coastal El Niño events, found that after 2000, coastal upwelling was only weakly modulated by winds, suggesting the influence of additional factors. They proposed that equatorial variability in EKW activity was more influential in driving coastal upwelling during this period.

Numerous works have described the amplitude and propagation frequency of coastal-trapped Kelvin waves, as well as the influence of non-meridional boundaries on EKW dynamics. BOHLE-CARBONELL (1989) proposed an alternative concept of poleward-propagating impact waves, and the interannual wave signal itself has been considered an index of EN (CLARKE, 1992). The first baroclinic mode (AK1) of IEKW appears to develop at the onset of ENSO events (ENFIELD, 1987), whereas the second baroclinic mode (AK2) shows a strong correlation with the Pacific Decadal Oscillation (PDO) (DEWITTE *et al.*, 2008). These authors further argued that modulation of IEKW activity in AK1 is primarily driven by local wind forcing at intraseasonal scales, while modulation of AK2, particularly within the 70–90-day band, is governed by low-frequency equatorial variability.

In this context, we aim to use the Simple Ocean Data Assimilation (SODA) reanalysis, together with high-resolution satellite SST data from *Pathfinder* (VAZQUEZ-CUERVO *et al.*, 2010), to conduct a comprehensive analysis of the frequency characteristics of the first two baroclinic modes of IEKW in relation to SST and the 15 °C isotherm depth (Z15) off Peru. The study examines both surface and subsurface coastal temperature variability along the Peruvian margin and its connection with equatorial variability, across timescales ranging from seasonal to decadal. For this purpose, we combine *in situ* measurements and cruise profiles from IMARPE with IEKW indices and the SODA dataset.

A continuación, se presenta una sección que describe los datos y los métodos utilizados, seguida de otra que muestra nuestros resultados y la discusión basada en covarianza, correlación cruzada y descomposición de ondas de potencia entre los índices de modulación de la variabilidad a lo largo de la costa peruana y los modos de OKEI.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Datos *in situ*

Los datos mensuales de TSM costera durante el período 1961-2018, se obtuvieron de cinco estaciones de muelle del Instituto del Mar del Perú (IMARPE) ubicadas entre 4° - 14°S (Tumbes: 3°37'49''S-80°35'07''W; Paita: 5°4'45''S-81°06'21''W; Chicama: 7°41'27''S-79°26'16''W; Callao: 12°3'00''S-77°9'00''W y Pisco: 13°48'09''S-76°17'23''W). Se hizo uso extensivo de diagramas espacio-temporales (Hovmöller) para investigar la evolución de la temperatura a lo largo de la costa peruana.

Datos satelitales

Los datos de TSM por satélite de 1981 a 2008 se obtuvieron del Proyecto *Pathfinder* de NOAA (<http://pathfinder.nodc.noaa.gov>) utilizando *Pathfinder* Versión 5.0. Se obtuvieron datos de alta resolución (4 km) para estudiar la propagación de las olas en la costa peruana. Los mapas se derivaron para explorar los patrones estacionales de TSM y las diferencias latitudinales.

Índices ecuatoriales y del Pacífico

La Oscilación Decadal del Pacífico (ODP) se obtuvo de la base de datos del Instituto para el Estudio Conjunto de la Atmósfera y el Océano (JISAO). El índice mensual de ODP (MANTUA *et al.*, 1997) de 1950 a 2018, se describe como un patrón de variabilidad climática tipo El Niño de larga duración (ZHANG *et al.*, 1997). Como ocurre con El Niño Oscilación del Sur (ENOS), los extremos en el patrón ODP están marcados por variaciones generalizadas en la cuenca del Pacífico y el clima de América del norte. Paralelamente al evento ENOS, las fases extremas de la ODP se han clasificado como cálidas o frías, según lo definido por las anomalías de la temperatura del océano en el noreste y el océano Pacífico tropical.

The paper is structured as follows: a section describing the data and methods is followed by one presenting the results and discussion, based on covariance analysis, cross-correlation, and wavelet power decomposition between modulation indices of coastal variability and IEKW modes.

2. MATERIALS AND METHODS

In situ data

Monthly records of coastal sea surface temperature (SST) for the period 1961–2018 were obtained from five pier-based stations operated by the *Instituto del Mar del Perú* (IMARPE), located between 4°S and 14°S: Tumbes (3°37'49''S–80°35'07''W), Paita (5°4'45''S–81°06'21''W), Chicama (7°41'27''S–79°26'16''W), Callao (12°3'00''S–77°9'00''W), and Pisco (13°48'09''S–76°17'23''W). Extensive use of Hovmöller space–time diagrams was made to analyze the evolution of temperature along the Peruvian coast.

Satellite data

Satellite-derived SST data for 1981–2008 were obtained from NOAA's Pathfinder Project (<http://pathfinder.nodc.noaa.gov>), version 5.0. High-resolution (4 km) datasets were used to examine wave propagation along the Peruvian coast. Maps were derived to investigate seasonal SST patterns and latitudinal differences.

Equatorial and Pacific indices

The Pacific Decadal Oscillation (PDO) index was retrieved from the Joint Institute for the Study of the Atmosphere and Ocean (JISAO). The monthly PDO index (MANTUA *et al.*, 1997), available from 1950–2018, is described as a long-term El Niño-like climate variability pattern (ZHANG *et al.*, 1997). Similar to the El Niño–Southern Oscillation (ENSO), the PDO's extreme phases are associated with widespread changes across the Pacific Basin and climate variability in North America. As with ENSO, PDO extremes are classified as warm or cool phases, depending on the anomalies of sea surface temperature in the northeastern and tropical Pacific.

El Índice de Oscilación Sur (IOS) se calcula a partir de las fluctuaciones mensuales o estacionales en la diferencia de presión de aire entre Tahití y Darwin. Este conjunto de datos de 1950 a 2018 está disponible en el JISAO (s.f.).

La serie de tiempo mensual de TSM desde 1950 a 2018, para la región El Niño 3.4 (NINO 3.4, delimitada por 5°N-5°S y 170°W-120°W) se obtuvo del Centro de Predicción Climática de la NOAA (CPC, 2006) y se utilizó para definir El Niño con fines cuantitativos (TRENBERTH, 1997). Se considera que se produce un fenómeno de El Niño cuando la media móvil de tres meses de las anomalías de la temperatura superficial del mar (TSM) en la región Niño 3.4 supera los +0,4 °C durante seis meses consecutivos o más. Esta medida también se conoce como Índice Oceánico de El Niño (ONI).

Los datos del índice mensual de vientos alisios (IMVA) de 1979 a 2018, fue tomado del Centro de Predicción Climática de la NOAA (CPC, 2006) y se utilizó para mostrar la variabilidad del viento zonal del Pacífico central, a 850 mb de altura geopotencial (175°W-140°W, 5°N-5°S).

Con los datos de las estaciones costeras de IMARPE a lo largo de la costa peruana (4°S-14°S, 80°W-75°W) de 1950 a 2006 (PURCA *et al.*, 2010), se calculó el índice de oscilación peruano (IOP) el que se define por la primera función ortogonal empírica de anomalías mensuales de TSM.

Estimación de la onda Kelvin Ecuatorial

Por las peculiaridades de la termoclina ecuatorial del Pacífico, la energía asociada a la Onda Kelvin Ecuatorial oceánica (OKE) se distribuye en varios modos baroclínicos y se propaga con diferentes velocidades de fase y estructuras meridionales (DEWITTE *et al.*, 1999). Estas características son transmitidas por las OK atrapadas en la costa, lo que resulta en una respuesta específica del sistema costero al forzamiento del modo baroclínico.

Debido a la escasez de datos subsuperficiales del Pacífico ecuatorial, se tienen que usar los resultados del modelo oceánico, para estimar las características de los diferentes modos baroclínicos y la amplitud de la OKE asociada (DEWITTE *et al.*, 2003). Aquí, utilizamos los resultados del análisis de asimilación simple de datos oceánicos (ASDA) (CARTON & GIESE, 2008). El producto actualizado, forzado con flujos atmosféricos realistas y con la

The Southern Oscillation Index (SOI) is calculated from monthly or seasonal fluctuations in air pressure differences between Tahiti and Darwin. This dataset, covering 1950–2018, is available from JISAO.

The monthly SST time series for the El Niño 3.4 region (5°N–5°S, 170°W–120°W) was obtained from NOAA CPC (CPC, 2006) for 1950–2018, and was used to define EN events quantitatively (TRENBERTH, 1997). An El Niño is considered to occur when the 3-month running mean of SST anomalies in Niño 3.4 exceeds +0.4°C for six consecutive months or longer. This metric is also known as the Oceanic Niño Index (ONI).

The monthly Trade Wind Index (TWI), also referred to as the trade-wind transit index, was taken from the NOAA CPC dataset (CPC, 2006) for 1979–2018. It represents zonal wind variability at 850 mb over the central Pacific (175°W–140°W, 5°N–5°S).

The Peruvian Oscillation Index (POI), defined as the first empirical orthogonal function (EOF) of monthly SST anomalies along the Peruvian coast (4°S–14°S, 80°W–75°W), was calculated using IMARPE's coastal station data for 1950–2006 (PURCA *et al.*, 2010).

Equatorial Kelvin wave estimation

Because of the peculiar structure of the equatorial Pacific thermocline, the energy associated with oceanic equatorial Kelvin waves (EKWs) is distributed across several baroclinic modes, propagating with distinct phase speeds and meridional structures (DEWITTE *et al.*, 1999). These characteristics are transmitted by coastal-trapped Kelvin waves, producing a specific coastal response to baroclinic forcing.

Given the scarcity of subsurface observations in the equatorial Pacific, ocean model outputs are required to estimate the characteristics of different baroclinic modes and the amplitude of associated EKWs (DEWITTE *et al.*, 2003). In this study, we used results from the Simple Ocean Data Assimilation (SODA) analysis (CARTON & GIESE, 2008). The updated SODA 1.4.2 dataset, forced with realistic atmospheric fluxes and

asimilación de los perfiles de temperatura y salinidad, se encuentra en la biblioteca de datos del Instituto internacional de investigación sobre el clima y la sociedad (IRI s.f.). El conjunto de datos ASDA 1.4.2 abarcó el período comprendido entre enero 1982 y diciembre 2001 (CARTON & GIESE, 2008). Las contribuciones de la OKE a la anomalía del nivel del mar se derivaron utilizando la metodología de DEWITTE *et al.*, (1999, 2008). Siguiendo estudios anteriores (MCPHADEN, 1999; DEWITTE *et al.*, 1999, 2003) consideraremos en este estudio el primer y el segundo modo baroclínico. Estos modos son los más energéticos y los que exhiben características de propagación. Hay que indicar que consideramos las medias mensuales o los promedios de 5 días, dependiendo de los datos *in situ* con los que se comparan las OKE.

Métodos

La transformada de ondículas se usó para expandir la serie temporal en un mapa espectral localizado en frecuencias de tiempo para ambas series, tanto las anomalías de TSM como la Z15, estandarizadas mensualmente. También se consideraron las anomalías mensuales interanuales relativas a la climatología mensual estimada para todo el período (1961-2006), siendo posible localizar las periodicidades intermitentes (GRINSTED *et al.*, 2004). Examinamos la señal espectral más amplia posible para 540 meses de TSM en tres estaciones costeras peruanas.

GRINSTED *et al.* (2004) propusieron un método que combina la transformada wavelet continua y la transformada wavelet cruzada. La cruzada puede interpretarse como la correlación local entre dos series temporales en el dominio tiempo-frecuencia. En este estudio, correlacionamos la temperatura de la superficie del mar (SST) con Z15 y con la serie temporal del segundo modo Kelvin, siguiendo a DEWITTE *et al.* (2008), para evaluar la variabilidad intraestacional compartida.

También realizamos un análisis de función ortogonal empírica (EMERY & THOMSON, 1998) de las series de tiempo *in situ* de TSM y Z15 en las cinco ubicaciones (5°S, 7°S, 9°S, 12°S y 18°S) a lo largo de la costa peruana. Nos centramos en el primer componente principal (PC1) que explicaba el 80,64% y el 77,98% de la variabilidad, respectivamente. La PC1 del análisis de la TSM se denomina Índice de Oscilación Peruano (IOP).

assimilating temperature and salinity profiles, is available from the IRI data library and spans January 1982 to December 2001 (CARTON & GIESE, 2008). Contributions of EKW's to sea-level anomalies were derived following the methodology of DEWITTE *et al.* (1999, 2008). In line with earlier studies (MCPHADEN, 1999; DEWITTE *et al.*, 1999, 2003), this work focuses on the first and second baroclinic modes, which are the most energetic and exhibit clear propagation characteristics. Monthly or 5-day averages were considered depending on the availability of *in situ* datasets used for comparison with EKW's.

Methods

Wavelet transform analysis was applied to expand the time series into a time–frequency spectrum for both standardized monthly SST and Z15 anomalies. Anomalies were computed relative to the monthly climatology over the full record (1961–2006). This method also enables detection of intermittent periodicities (GRINSTED *et al.*, 2004). The analysis covered 540 months of SST records from three Peruvian coastal stations, seeking the broadest possible spectral signal.

GRINSTED *et al.* (2004) proposed a method that combines continuous wavelet transform (CWT) and cross-wavelet transform (XWT). The XWT can be interpreted as the local correlation between two time series in the time–frequency domain. In this study, we cross-correlated sea surface temperature (SST) with Z15 and with the time series of the second Kelvin mode, following DEWITTE *et al.* (2008), to assess shared intraseasonal variability.

Additionally, an empirical orthogonal function (EOF) analysis (EMERY & THOMSON, 1998) was applied to *in situ* SST and Z15 time series at five locations along the Peruvian coast (5°S, 7°S, 9°S, 12°S, and 18°S). We focused on the first principal component (PC1), which accounted for 80.64% and 77.98% of the variability, respectively. The SST-based PC1 is referred to as the Peruvian Oscillation Index (POI).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Variabilidad estacional TSM y Z15

La figura 1 muestra diagramas de Hovmöller de anomalías mensuales estandarizadas de TSM y la profundidad de la isoterma de 15 °C (Z15) a lo largo de la costa norte-central del Perú (4°S a 14°S) relativas a la climatología de 1961-2006. En ambos diagramas, se ha eliminado el ciclo anual medio y se muestran las anomalías mensuales interanuales. La Figura 1a muestra fuertes anomalías positivas de TSM (> +4) a lo largo de la costa de Perú, asociadas con la ocurrencia de los episodios más intensos de El Niño (EN) durante las últimas cuatro décadas, EN 1982-83 y EN 1997-98. Se puede ver claramente las anomalías de TSM durante el ENOS, y las anomalías positivas casi continuas de TSM que ocurren alrededor de 6°-8°S hasta 1976. Después de eso, las anomalías positivas son más frecuentes a lo largo de toda la costa, pero menos intensas.

FLORES *et al.* (2009) utilizaron temperaturas calculadas a partir de datos de cruceros efectuados por IMARPE de 1961 a 2006, con resolución temporal mensual, para estimar la profundidad promedio de la Z15. Los perfiles se compilaron

3. RESULTS AND DISCUSSION

Seasonal Variability of SST and Z15

Figure 1 shows Hovmöller diagrams of standardized monthly anomalies of sea surface temperature (SST) and the depth of the 15 °C isotherm (Z15) along the north-central coast of Peru (4°S–14°S), referenced to the 1961–2006 climatology. The mean annual cycle was removed from both series, isolating interannual anomalies. In Figure 1a, large positive SST anomalies (> +4) are evident along the Peruvian coast during the strongest EN events of the past four decades: 1982/83 and 1997/98. ENSO-related SST anomalies are clearly visible, with persistent warm conditions around 6°–8°S until 1976. Afterward, positive anomalies appeared more frequently across the coast, though with reduced intensity.

FLORES *et al.* (2009) estimated Z15 from temperature profiles obtained during IMARPE cruises between 1961 and 2006, with monthly resolution. Profiles were gridded at 1° × 1° intervals at five coastal stations. The propagation of oceanic EKWs influences the depth of the thermocline—defined as Z20 (20 °C isotherm)

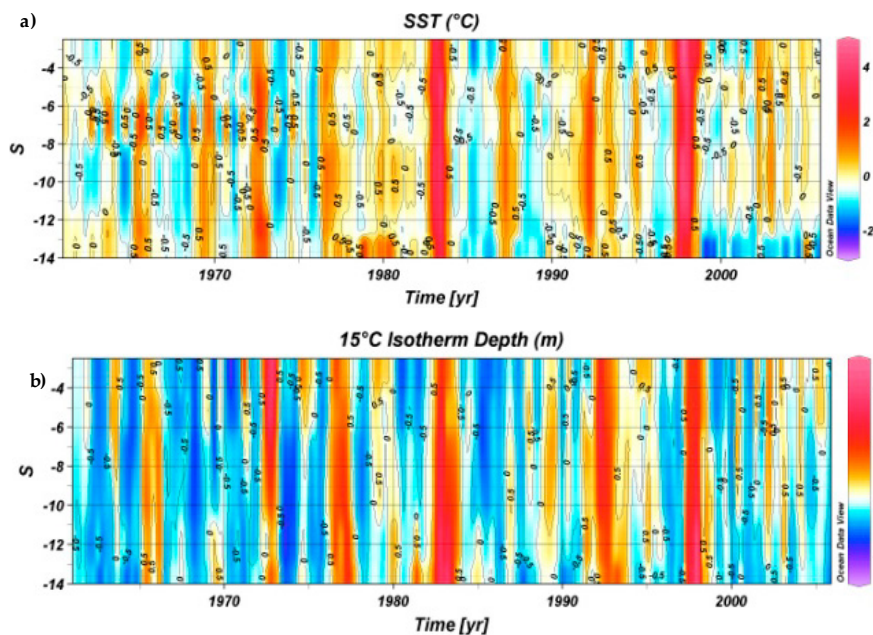


Figura 1.- Diagrama de Hovmöller de las anomalías mensuales de TSM y profundidad de la isoterma de 15 °C (Z15) a lo largo de la zona norte–centro de la costa peruana (4°-14°S). Las anomalías fueron calculadas para el periodo base 1961-2006. Las unidades son °C para TSM y metros para la profundidad de la isoterma de 15 °C

Figure 1. Hovmöller diagram of monthly SST anomalies and depth of the 15 °C isotherm (Z15) along the north-central Peruvian coast (4°-14°S). Anomalies were estimated for the base period 1961-2006. The units are °C for SST and meters for the depth of the 15 °C isotherm

en una cuadrícula de $1^\circ \times 1^\circ$ cerca de las cinco estaciones costeras del muelle. La propagación de la OKE oceánica afecta la profundidad de la termoclina (profundidad de la isoterma de 20°C , Z20) en el Pacífico Central Tropical a través del sistema acoplado reflexivo-advectivo (PICAUT *et al.*, 1997), y la profundidad de la isoterma de 15°C en la frontera oriental a través del proceso de hundimiento (DEWITTE *et al.*, 2012). La figura 1a, b, muestran anomalías positivas de la temperatura de la superficie del mar (TSM) y la profundidad de la isoterma de 15°C (Z15) en color rojo. Ambas, caracterizaron períodos como los ciclos ENOS 1965-66, 1972-73, 1977-78, 1982-83, 1992-93 y 1997-98, y las anomalías positivas bajas de Z15 y TSM están asociadas con la OKE. Las anomalías de Z15 están dominadas por las variaciones decenales, alternando distribución positiva (hundimiento) y negativa (elevación) alrededor de $4^\circ\text{--}6^\circ\text{S}$ antes de 1980, y $6^\circ\text{--}12^\circ\text{S}$ después de 1990 (Fig. 1b).

La climatología espacial durante el período enero 1982-diciembre 2008, se presenta en la Figura 2 y, como se puede observar, durante el verano (EFM: enero, febrero marzo) y otoño (AMJ: abril, mayo, junio) la isoterma de 24°C se encontró en la costa. La extensión de la zona de afloramiento fue delimitada por la isoterma de 20°C en un área angosta frente a la costa peruana. Durante el invierno (JAS: julio, agosto setiembre) y primavera (OND: octubre, noviembre, diciembre), la isoterma de 24°C se encontró lejos de la costa, y la extensión de la zona de afloramiento fue de más de cien kilómetros desde la costa.

Variabilidad interanual a decenal de TSM y Z15

La presencia entre 1950 y 2006 de dos fases en la cuenca del Pacífico con una resolución decenal, se puede evidenciar claramente por el índice de la oscilación decadal del Pacífico (ODP) que se muestra en la Figura 3, donde el predominio de anomalías negativas indica una fase fría antes de 1980 y las anomalías positivas después de 1980 indican una fase cálida decenal. Los otros índices (ecuatoriales y costeros) en esa figura muestran el ciclo ENOS. Las anomalías positivas y negativas del índice NIÑO 3.4 y del índice de oscilación peruana (IOP) muestran, respectivamente, la ocurrencia de eventos de El Niño y La Niña en las últimas décadas.

in the central Pacific through the advective-reflective system (PICAUT *et al.*, 1997), and as Z15 (15°C isotherm) in the eastern boundary through downwelling (DEWITTE *et al.*, 2012). Figure 1a, b, highlights positive anomalies of SST and Z15 (in red), associated with ENSO episodes in 1965/66, 1972/73, 1977/78, 1982/83, 1992/93, and 1997/98. Smaller positive anomalies of both variables were also linked to IEKW activity. Decadal variability dominated Z15 anomalies, with alternating positive (deepening) and negative (shoaling) phases: positive around $4^\circ\text{--}6^\circ\text{S}$ prior to 1980, and around $6^\circ\text{--}12^\circ\text{S}$ after 1990 (Fig. 1b).

Figure 2 presents the spatial climatology for January 1982–December 2008. During summer (January–February–March, JFM) and autumn (April–May–June, AMJ), the 24°C isotherm was confined near the coast, while the upwelling zone—bounded by the 20°C isotherm—was restricted to a narrow coastal band. In contrast, during winter (July–August–September, JAS) and spring (October–November–December, OND), the 24°C isotherm shifted offshore, and the upwelling zone expanded more than 100 km from the coast.

Interannual to Decadal Variability of SST and Z15

Between 1950 and 2006, the Pacific basin exhibited two clear decadal phases, reflected in the PDO index (Figure 3): a cold phase dominated by negative anomalies until 1980, and a subsequent warm phase with mostly positive anomalies. Other equatorial and coastal indices in the figure describe ENSO variability, with Niño 3.4 and the Peruvian Oscillation Index (POI) capturing El Niño and La Niña events of recent decades.

During 1999–2006, the POI registered negative anomalies, whereas the monthly TWI index showed mostly positive anomalies (Fig. 3iv). This period coincided with intensified Kelvin wave activity and higher SST in the central equatorial Pacific (Fig. 3v, vi). PURCA *et al.* (2010) and DEWITTE *et al.* (2012) proposed that slightly cooler conditions off Peru (associated with a shallower thermocline) during central Pacific EN events favored the accumulation of cold SST anomalies along the coast, linked to surface forcing from equatorial Kelvin waves (modes 1 and 2).

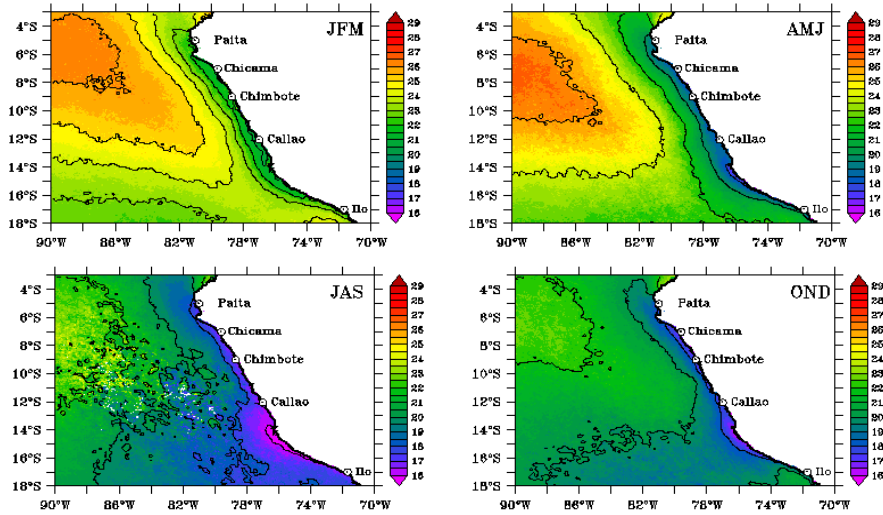


Figura 2.- Patrones espaciales estacionales de TSM de noche de la data satelital Pathfinder V5.0 mostrando la climatología entre 1982 hasta 2008. Unidades en °C

Figure 2. Seasonal spatial patterns of nighttime sea surface temperature from Pathfinder V5.0 satellite data showing climatology from 1982 to 2008. Units in °C

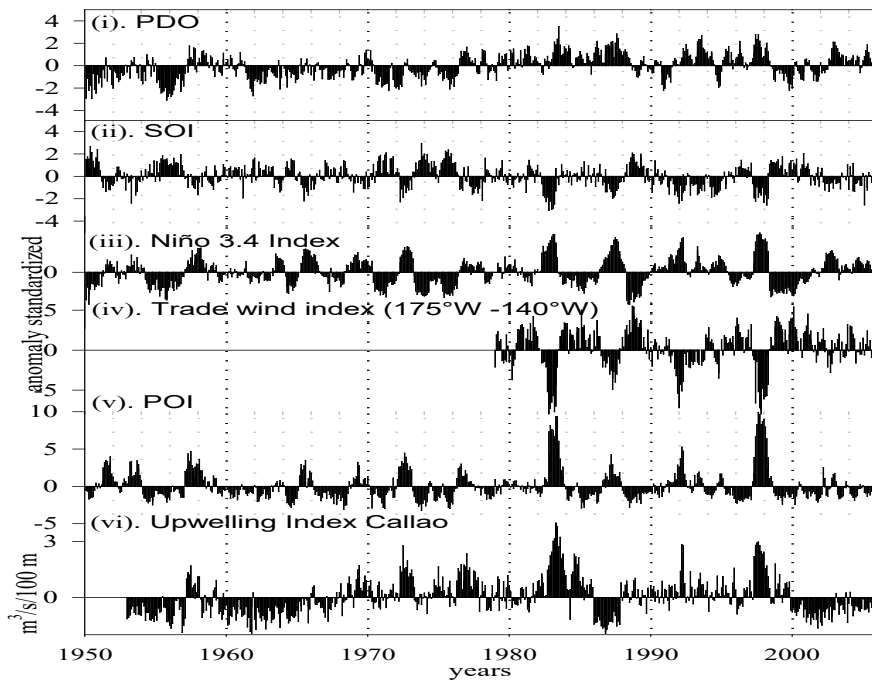


Figura 3.- Cuenca del Pacífico Ecuatorial y los índices locales para los años 1950-2006.

Se describe la variabilidad de: i) Oscilación decadal del Pacífico (ODP), ii) Índice de Oscilación del Sur (IOS), iii) Índice Niño 3.4; iv) Índice de tránsito del viento 175°W-140°W (ITV), v) Índice de Oscilación peruana (IOP), vi) Índice de afloramiento del Callao (IAC)

Figure 3. Equatorial Pacific Basin and local indices for the years 1950-2006. The variability of the following is described: i) Pacific Decadal Oscillation (PDO), ii) Southern Oscillation Index (SOI), iii) Niño 3.4 Index; iv) 175°W-140°W wind transit index (WTI), v) Peruvian Oscillation Index (POI), vi) Callao upwelling index (CUI)

En los últimos siete a ocho años que abarca este estudio, el índice POI (1999-2006) mostró anomalías negativas, mientras que el índice mensual de vientos alisios (IMVA) mostró principalmente anomalías positivas (Fig. 3iv), coincidiendo con la intensificación de la actividad de ondas Kelvin, que ocurrió junto con la TSM más alta en el Pacífico Ecuatorial Central (Fig. 3v, vi). PURCA *et al.* (2010) y DEWITTE *et al.* (2012) plantean la hipótesis que, la presencia de condiciones ligeramente más frías frente a Perú (termoclina poco profunda) durante un periodo de TSM más altas en el Pacífico Ecuatorial Central (llamado El Niño del Pacífico Central), favorece la acumulación de anomalías de TSM más frías a lo largo de la costa peruana, debido a que se produce un forzamiento superficial por efecto de las ondas Kelvin ecuatoriales (modos 1 y 2).

El primer componente de TSM (SST-PC1, Fig. 4a) y de Z15 (Z15 PC1, Fig. 4b) mensual, así como sus respectivos filtros de paso bajo (Fig. 4c) mostraron los valores positivos más altos durante los eventos de El Niño 1982-1983 y 1997-1998. Los modos baroclínicos 1 y 2 (AK1, AK2) de IOKE diarios fueron procesados con filtros

The first principal components of SST (SST PC1, Fig. 4a) and Z15 (Z15 PC1, Fig. 4b), and their low-pass filters (Fig. 4c), reached peak values during the 1982–83 and 1997–98 El Niño events. Baroclinic modes of IEKW were extracted: mode 1 (AK1) with a 50-day band-pass (AK1d50) representing surface variability, and mode 2 (AK2) with a 120-day low-pass (AK2d120) representing deeper variability. The low-pass filters of SST PC1 and Z15 PC1 were compared with AK1d50 and AK2d120, filtered at a 7-year timescale. The analysis revealed strong amplitudes in AK1d50 and AK2d120, along with positive anomalies in SST PC1 and Z15 PC1 (Fig. 4c, Fig. 6).

ENSO emerged as the dominant driver of coupled ocean–atmosphere variability along the Peruvian coast, with SST and Z15 anomalies as dependent variables. The degree of correlation between central equatorial Pacific variables, coastal SST, and Z15 off Peru provides insights into the patterns of interannual variability along the Peruvian coast. During EN events, both SST PC1 and Z15 PC1 showed significant covariance with the Niño 3.4 region (Table 1). These indices, along with Niño 3.4, also exhibited strong

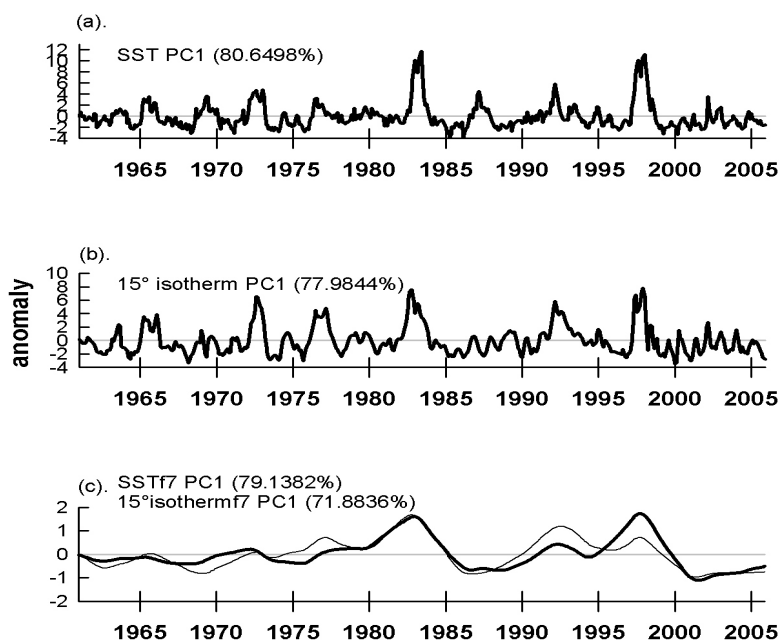


Figura 4.- Primera componente principal (PC1) del análisis de ecuaciones empíricas ortogonales (EEO) para las anomalías mensuales costeras de datos in situ (1960-2006). (a) TSM, (b) profundidad de la isoterma de 15 °C (Z15), (c) series de tiempo del filtro paso bajo de 7 años para la primera componente principal (PC1) de la Z15 (línea delgada) y TSM (línea gruesa)

Figure 4.- First principal component (PC1) of the empirical orthogonal function (EOF) analysis for monthly coastal anomalies of in situ data (1960–2006). (a) SST, (b) depth of the 15 °C isotherm (Z15), (c) 7-year low-pass filter time series for the first principal component (PC1) of Z15 (thin line) and SST (thick line)

alto y bajo; el AK1 filtrado a 50 días de paso de banda (AK1d50) representó el filtro de paso alto del modo superficial (modo 1) de IOKE, mientras que el AK2 filtrado a los 120 días (AK2d120) mostró el filtro de paso bajo del modo profundo (modo 2) de IOKE. Los filtros de paso bajo de SST PC1 y Z15 PC1 se compararon con las series de AK1d50 y AK2d120 filtradas con paso de 7 años. Las principales características que surgen de estas comparaciones son alta amplitud de AK1d50 y AK2d120 y anomalías positivas de SST PC1 y Z15 PC1 (Fig. 4c, Fig. 6).

Se conoce que ENOS es la variable independiente que impulsa la variabilidad océano-atmósfera superficial a lo largo de la costa de Perú, y en este contexto las variables dependientes serían las anomalías de TSM y de Z15 frente a Perú. El grado de correlación entre las variables del Pacífico ecuatorial central, la TSM y Z15 de la costa peruana, permitirá explicar cómo ha sido la variabilidad interanual frente a Perú. Durante los eventos El Niño, el SST-PC1 y Z15-PC1 presentaron covarianza significativa con la región Niño 3.4 (Tabla 1). También esos índices y El Niño 3.4 mostraron alta covarianza con los filtros del modo baroclínico 2 (AK2) de la IOKE (Tabla 1). Una revisión exhaustiva sobre la variabilidad ENOS y el Pacífico tropical oriental (WANG & FIEDLER, 2006) encontró que el período dominante de variabilidad de la TSM en el Pacífico ecuatorial central (región Niño 3.4) y oriental (región Niño 3) pasó de 3,3 años durante el periodo 1967-1973 a 4,2 años durante 1980 –1993. PHILANDER y FEDOROV (2003) sugieren que existen múltiples modos de ENOS, los cuales son oscilaciones débilmente amortiguadas sostenidas por perturbaciones aleatorias, que dependen del estado dominante del sistema océano-atmósfera del Pacífico tropical.

Durante el período 1961-2001, el primer componente de la Z15 mostró correlación lineal significativa con el Z20 (ASDA) en un área amplia, a lo largo del Pacífico Ecuatorial Oriental hasta la línea de cambio de fecha (Fig. 5). El Pacífico Ecuatorial Oriental y la zona costera (Tumbes a Callao) mostraron el área de mayor correlación, sugiriendo la relación más alta de temperatura en el máximo gradiente de profundidad, entre la zona ecuatorial y la costera (áreas rojas más oscuras en la Figura 5).

covariance with the baroclinic mode-2 (AK2) filters of the IEKW (Table 1). WANG and FIEDLER (2006) noted that ENSO's dominant period shifted from ~3.3 years (1967–1973) to ~4.2 years (1980–1993). PHILANDER and FEDOROV (2003) proposed that ENSO reflects several modes of weakly damped oscillations sustained by stochastic perturbations, conditioned by the state of the tropical Pacific climate system.

Between 1961 and 2001, Z15 PC1 correlated significantly with Z20 (SODA) across the eastern equatorial Pacific, extending to the dateline (Fig. 5). Strongest correlations appeared in the eastern equatorial region and the Peruvian coast (Tumbes to Callao), underscoring the strong coupling between equatorial and coastal thermocline variability (dark red areas in Figure 5).

The baroclinic modes of IEKW displayed dominant timescales of ~50 days for AK1 and ~120 days for AK2 (Fig. 6), consistent with CRAVATTE *et al.* (2003).

The low-frequency filtered series revealed that SST PC1 correlated significantly with Niño 3.4 (Table 2); however, the highest correlations were observed between the coastal index and IEKW baroclinic modes (Table 3). Z15 PC1 was most strongly linked to AK2d120, while its association with AK1d50 was weaker (Table 3).

From a linear perspective, intraseasonal variability along the Peruvian coast over the past three decades has been largely modulated by IEKW. Previous studies have established its role during the onset of El Niño events (ENFIELD & ALLEN, 1980; ENFIELD, 1987; CLARKE & SHI, 1991; CLARKE, 1992; CLARKE & LEBEDEV, 1999; CLARKE & AHMED, 1999). Our findings indicate that sea surface temperature (SST) anomalies were primarily forced by the first baroclinic mode of the IEKW, whereas Z15 PC1 was forced by the second baroclinic mode (Table 3). The strongest correlations for the first baroclinic mode occurred between AK1d120 and SST PC1, while for the second mode, they were observed between AK2d120 and Z15 PC1. Complementary evidence from satellite records (2000–2008) of SST and wind stress confirmed strong intraseasonal variability off Peru, with covariability

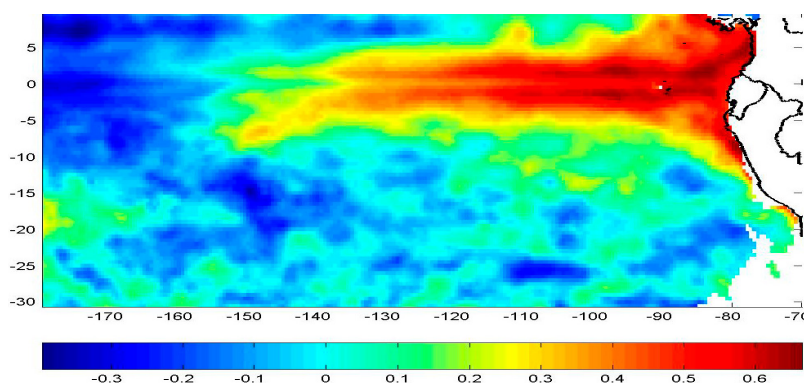


Figura 5.- Mapa de correlación entre la profundidad de la isoterma de 20 °C (data ASDA) y la primera componente principal de profundidad de Z15 frente a Perú entre 1961 y 2001

Figure 5. Map showing the correlation between the depth of the 20 °C isotherm (SODA data) and the first principal component of the Z15 depth off the coast of Peru between 1961 and 2001

El primer modo baroclínico del IOKE (AK1) predomina alrededor de 50 días, mientras que el segundo modo baroclínico (AK2) predomina alrededor de 120 días (Fig. 6). CRAVATTE *et al.* (2003) obtuvieron resultados similares en estudios previos.

En la correlación lineal entre las series filtradas con pasos de baja frecuencia, la del índice SST-PC1 y el índice Niño 3.4 fue significativa (Tabla 2), pero los valores más altos de correlación se mostraron entre el índice costero y los modos baroclínicos del IEKW (Tabla 3). Asimismo, Z15-PC1 y AK2d120 mostraron la mayor correlación, mientras que Z15-PC1 y AK1d50 mostraron la más baja correlación (Tabla 3).

En un sentido lineal, la variabilidad intraestacional frente a la costa peruana fue forzada por la IOKE en los últimos 30 años. Muchos estudios sugieren la conexión durante el inicio de El Niño (ENFIELD & ALLEN, 1980; ENFIELD, 1987; CLARKE & SHI, 1991; CLARKE, 1992; CLARKE & LEBEDEV, 1999; CLARKE & AHMED, 1999) y nuestro estudio sugiere que la TSM fue forzada por el primer modo baroclínico de la IOKE, mientras que la Z15PC1 fue forzada por el segundo modo baroclínico de la IOKE (Tabla 3). En esa Tabla, los valores de correlación más altos del primer modo baroclínico se muestran entre AK1d120 y SST PC1, mientras que para el segundo modo baroclínico la mayor correlación fue entre AK2d120 y Z15PC1. Recientes estudios, mostraron alta relación entre la variabilidad intraestacional de la costa de Perú con observaciones de satélite durante 2000-2008 (TSM

Tabla 1.- Covarianza entre las anomalías estandarizadas mensuales y el modelo intraestacional de la onda Kelvin (IOKE)

Table 1. Covariance between monthly standardized anomalies and intraseasonal modulation of the Kelvin wave (IEKW)

	Series de covarianza mensual con $p > 0,05$ (**)			
	Ene 1961 -Dic 2001		Niño 3.4	ODP
	z15pc1	sstpc1		
Niño 3.4	0,59	0,74		
ODP	0,25	0,35	0,39	
AK1	0,36	0,24	0,26	n.s.
AK2	0,59	0,64	0,58	0,13

Tabla 2.- Correlación entre el filtro paso bajo de los datos *in situ* y el modelo

Table 2. Correlation between the low-pass filter of the *in situ* data and the model

	Correlación lineal, filtro paso bajo [> 7 años] (**)			
	Ene 1961 -Dic 2001		Niño 3.4	Z15pc1
	SST PC1	ODP		
uicallaod70	n.s.	0,32	n.s.	0,31
uicallaod120	-0,46	-0,55	-0,26	0,17
Niño 3.4d70		n.s.	0,49	0,34
Niño 3.4d120		0,62	0,87	-0,29
sstpc1d70			0,6	-0,49
sstpc1d120			0,6	-0,51
ODPd70				0,15
ODPd120				-0,19

modes showing peak energy near 50-day periods (DEWITTE *et al.*, 2011).

This study takes advantage of the long time series (1961–2005) from coastal stations and

y estrés del viento), y se encontró que los modos de covariabilidad exhibieron mayor energía en el período de ~ 50 días (DEWITTE *et al.*, 2011).

El presente estudio saca ventaja de las largas series de tiempo (1961-2005) de las estaciones costeras y de los cruceros de investigación de IMARPE, para investigar las frecuencias más grandes de 180 días de las series de tiempo de TSM y Z15 (Fig. 7). Frecuencias mayores de 180 días de las series de anomalías *in situ* de TSM (línea negra) y Z15 (línea roja) en las cercanías de Tumbes (3°-4°S) mostraron potencia significativa alrededor de 2 años⁻¹ en el período 1970-1985 y 1990-2000 (Fig. 7a). Para Callao (11°-12°S), presentaron una potencia significativa de energía de ~3 años⁻¹ para el período 1990 y 2000 (Fig. 7b), y frente a Pisco (13°-14°S) mostró potencia significativa a los 3 y 4 años⁻¹ en los años 1970, 1985, 1995-2000 (Fig. 7c).

La variabilidad de la Z15 en Tumbes y Callao estuvo asociada con frecuencias menores de 120 días (1987, 1992, 2002, 2004) (Figs. 7a, b) mientras que, en el área de Pisco se asoció con frecuencias menores de 90 días, después de 1975 (Fig. 7c).

Tabla 3.- Correlación lineal entre los modos de la Kelvin y los índices costeros

Table 3. Linear correlation between Kelvin baroclinic modes and coastal indices

	Correlación lineal, filtro paso bajo (>7 años) (**)	
	Ene 1962- Dic 1998	
	SSTPC1	Z15pci
AK1d50	0,41	0,19
AK1d90	0,49	0,50
AK1d120	0,69	0,44
AK2d90	0,68	0,28
AK2d120	0,67	0,88

IMARPE research cruises to investigate variability at periods longer than 180 days in the SST and Z15 records (Fig. 7). Spectral analysis of *in situ* anomalies of SST (black line) and Z15 (red line) near Tumbes (3°-4°S) revealed significant power around the 2 years⁻¹ band during 1970-1985 and 1990-2000 (Fig. 7a). At Callao (11°-12°S), significant peaks near 3 years⁻¹ were found during the 1990s and 2000 (Fig. 7b), while off Pisco (13°-14°S), significant variability at 3 and 4 years⁻¹ was detected during the 1970s, 1985, and 1995-2000 (Fig. 7c).

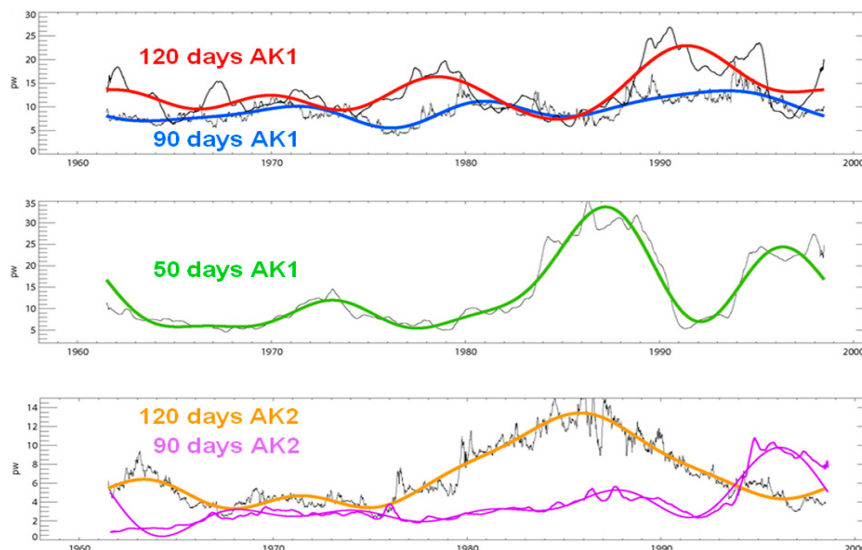


Figura 6.- El panel superior muestra la serie de tiempo del primer modo baroclinico de la onda ecuatorial Kelvin (AK1) con amplitud a 100°W. Las series de tiempo fueron filtradas con un filtro de paso bajo de 7 años para resaltar la componente de baja frecuencia a los 120 días⁻¹ (rojo) y 90 días⁻¹ (azul). El panel central muestra la serie filtrada a 50 días⁻¹ (verde). El panel inferior muestra el segundo modo baroclinico de la amplitud de la onda Kelvin ecuatorial (AK2) con amplitud a 100°W. Las series de tiempo fueron filtradas con un filtro paso bajo de 7 años para resaltar la componente de baja frecuencia a los 120 días⁻¹ (amarillo oscuro) y 90 días⁻¹ (morado)

Figure 6. The upper panel shows the time series of the first baroclinic mode of the equatorial Kelvin wave (AK1) with amplitude at 100°W. The time series was filtered with a 7-year low-pass filter to highlight the low-frequency component at 120 days⁻¹ (red) and 90 days⁻¹ (blue). The middle panel shows the filtered series at 50 days⁻¹ (green). The bottom panel shows the second baroclinic mode of the equatorial Kelvin wave amplitude (AK2) with amplitude at 100°W. The time series was filtered with a 7-year low-pass filter to highlight the low-frequency component at 120 days⁻¹ (dark yellow) and 90 days⁻¹ (purple)

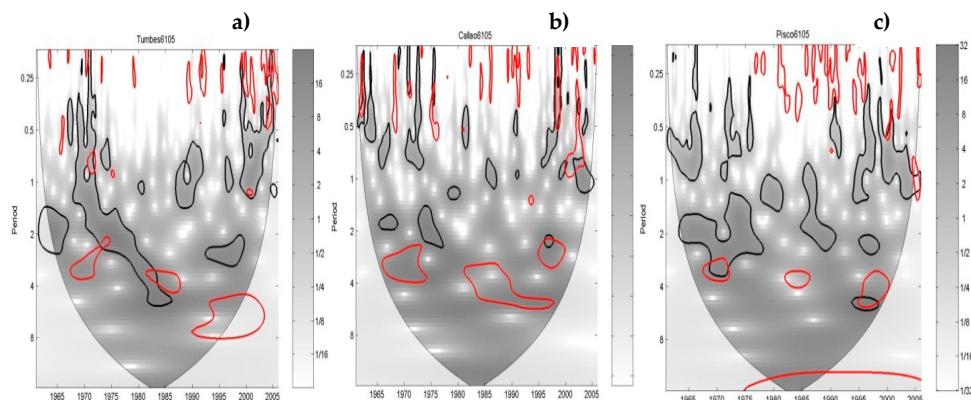


Figura 7.- Espectro de potencia de la ondícula para la TSM en color negro y para la profundidad de la isoterma de 15 °C en color rojo entre 1961 y 2005 para tres localidades peruanas: a) Tumbes (3°S-4°S), b) Callao (11°S-12°S), c) Pisco (13°S-14°S). El área sombreada representa la potencia del espectro de la ondícula, la línea de contorno (negro/rojo) es el nivel de confianza al 95%

Figure 7. Wavelet power spectrum of sea surface temperature (black) and the depth of the 15 °C isotherm (red) from 1961 to 2005 at three Peruvian sites: a) Tumbes (3°-4°S), b) Callao (11°-12°S), and c) Pisco (13°-14°S). The shaded area indicates the wavelet power, while the black/red contour line denotes the 95% confidence level

A lo largo de la zona ecuatorial, durante 1984-1999, la descomposición de los resultados del ASDA, de los modos de la IOKE en períodos de 70 y 90 días, podría tener un efecto en el inicio de los Niños (CRAVATTE *et al.*, 2003). Nuestros resultados mostraron el incremento del espectro de la potencia de la ondícula en la Z15 durante el período de 70 a 90 días, en la parte central-sur de la costa peruana, después de 1975. Al mismo tiempo, fueron observadas anomalías positivas de la Z15 (hundimiento) a una escala de variación entre décadas, en la parte central (11°-12°S), mientras que en la parte sur (13°-14°S) ocurrieron anomalías negativas de Z15 (elevación). Después de 1975, los cambios fueron principalmente impulsados remotamente por el reforzamiento y debilitamiento de los vientos alisios ecuatoriales a una escala decenal y mayor, lo cual hundió y elevó la termoclina y afectó los ecosistemas a lo largo de miles de kilómetros de la costa oeste del continente americano (CLARKE & LEBEDEV, 1999).

Se concluyó que con los filtros de baja frecuencia intraestacional la variabilidad de los modos 1 y 2 de las ondas Kelvin de baja frecuencia están impulsando tres patrones de variabilidad en la profundidad de la isoterma de 15 °C a lo largo de la costa peruana: 1) patrón decenal en la zona norte (Fig. 7a); 2) patrón interanual en

At shorter timescales, Z15 variability in Tumbes and Callao was associated with periods shorter than 120 days (1987, 1992, 2002, 2004) (Figs. 7a, b), whereas in the Pisco region it was linked to periods below 90 days after 1975 (Fig. 7c).

Along the equatorial Pacific, SODA reanalysis decompositions of IEKW modes revealed activity in the 70-90-day band during 1984-1999, which may have played a role in the onset of El Niño events (CRAVATTE *et al.*, 2003). Consistently, our results show increased wavelet power in Z15 at 70-90-day periods along the central-southern Peruvian coast after 1975. Over longer timescales, positive Z15 anomalies (deepening) at interdecadal scales were observed in the central region (11°-12°S), while negative anomalies (shoaling) prevailed further south (13°-14°S). After 1975, these changes appear to have been primarily driven remotely by the strengthening and weakening of equatorial trade winds at decadal and longer scales, which in turn modulated thermocline depth and impacted ecosystems over thousands of kilometers along the western coast of South America (CLARKE & LEBEDEV, 1999).

Analysis of low-frequency intraseasonal filters indicates that variability in the first and second modes of low-frequency Kelvin waves drives three distinct patterns in the depth of the 15 °C isotherm along the Peruvian coast: (1) a decadal

la zona centro (Fig. 7b); 3) patrón de tendencia a mayor variabilidad intraestacional en la zona sur (Fig. 7c). Se prevén algunas consecuencias a escala decenal sobre la variabilidad de la nutriclina y la zona de mínimo oxígeno (ZMO) en el sistema de la corriente del Perú (Humboldt norte). En avance, se comprobó el dominio de la variabilidad interanual en la serie de la ZMO y la nutriclina frente a Callao (zona central de la costa peruana) forzado remotamente por los modos 1 y 2 de la onda Kelvin ecuatorial (GRACO *et al.*, 2017).

Agradecimientos

Gracias al Dr. Jorge Csirke, Ing. Jorge Zuzunaga y al Blgo. Renato Guevara-Carrasco por sus sugerencias que ayudaron a mejorar la primera versión del manuscrito. Los autores están muy agradecidos al equipo de oceanografía física de IMARPE. El Dr. Benjamin Giese asesoró y proveyó la data ASDA.

pattern in the north (Fig. 7a); 2) an interannual pattern in the central region (Fig. 7b); and 3) a trend toward increasing intraseasonal variability in the south (Fig. 7c). These patterns suggest decadal-scale implications for the variability of the nutricline and the oxygen minimum zone (OMZ) within the northern Humboldt Current system. In line with this, interannual variability has been shown to dominate OMZ and nutricline records off Callao (central Peru), remotely forced by the first and second equatorial Kelvin wave modes (GRACO *et al.*, 2017).

Acknowledgments

We thank Dr. Jorge Csirke, Engr. Jorge Zuzunaga, and Biol. Renato Guevara-Carrasco for their constructive comments on earlier versions of this manuscript. We are also indebted to the IMARPE physical oceanography team for their support. Special acknowledgment is extended to Dr. Benjamin Giese for his guidance and for providing the SODA dataset.

4. REFERENCIAS

- ASHOK, K., BEHERA, S. K., RAO, S. A., WENG, H. & YAMAGATA, T. (2007). El Niño Modoki and its possible teleconnection. *Journal of Geophysical Research*, 112, C11007. <https://doi.org/10.1029/2006JC003798>
- BOHLE-CARBONELL, M. (1989). Are Peruvian El Niño events transmitted by coastal Kelvin waves. En D. Pauly, P. Muck, J. Mendo & I. Tsukayama (Eds.), *The Peruvian Upwelling Ecosystem: Dynamics and Interactions* (pp. 45–49). Instituto del Mar del Perú (Imarpe), Deutsche Gesellschaft Fur Technische Zusammenarbeit (GTZ), International Center for Living Aquatic Resources Management (ICLARM). <https://acortar.link/N3gzpH>
- CARTON, J. A. & GIESE, B. S. (2008). A reanalysis of ocean climate using Simple Ocean Data Assimilation (SODA). *Monthly Weather Review*, 136, 2999-3017. <https://doi.org/10.1175/2007MWR1978.1>
- CLARKE, A. J. (1992). Low-frequency reflection from a nonmeridional Eastern Ocean Boundary and the use of coastal sea level to monitor Eastern Pacific Equatorial Kelvin waves. *Journal of Physical Oceanography*, 22, 163-183. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1992\)022%3C0163:LRFAN%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1992)022%3C0163:LRFAN%3E2.0.CO;2)
- CLARKE, A. J. & SHI, C. (1991). Critical frequencies at ocean boundaries. *Journal of Geophysical Research*, 96(C6), 10731-10738. <https://doi.org/10.1029/91JC00933>
- CLARKE, A. J. & AHMED, R. (1999). Dynamics of remotely forced intraseasonal oscillations off the Western coast of South America. *Journal of Physical Oceanography*, 29, 240-258. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1999\)029%3C0240:DORFIO%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1999)029%3C0240:DORFIO%3E2.0.CO;2)
- CLARKE, A. J. & LEBEDEV, A. (1999). Remotely driven decadal and longer changes in the coastal Pacific waters of the Americas. *Journal of Physical Oceanography*, 29, 828-835. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1999\)029%3C0828:RDDALC%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1999)029%3C0828:RDDALC%3E2.0.CO;2)
- CLIMATE PREDICTION CENTER [CPC]. (2006). *Monthly atmospheric & SST Indices*. National Weather Service, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/>
- CRAVATTE, S., PICAUT, J. & EL DIN, G. (2003). Second and first baroclinic kelvin modes in the equatorial pacific intraseasonal timescales. *Journal of Geophysical Research*, 108(C8), 3266. <https://doi.org/10.1029/2002JC001511>
- CURY, P. & PAULY, D. (2000). Patterns and propensities in reproduction and growth of marine fishes. *Ecological Research*, 15, 101-106. <https://doi.org/10.1046/j.1440-1703.2000.00321.x>
- DEWITTE, B., REVERDIN, G. & MAES, C. (1999). Vertical structure of an OGCM simulation of the equatorial Pacific Ocean in 1985-1994. *Journal of Physical Oceanography*, 29, 1542-1570. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1999\)029%3C1542:VSOAOS%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1999)029%3C1542:VSOAOS%3E2.0.CO;2)
- DEWITTE, B., PURCA, S., ILLIG, S., RENAULT, L. & GIESE, B. S. (2008). Low-frequency modulation of the intraseasonal equatorial Kelvin wave activity in the Pacific SODA: 1958-2001. *Journal of Climate*, 21, 6060-6069. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2277.1>
- DEWITTE, B., ILLIG, S., PARENT, L., DU PENHOAT, Y., GOURDEAU, L. & VERRON, J. (2003). Tropical Pacific baroclinic mode contribution and associated long waves for the 1994-1999 period from an assimilation experiment with altimetric data. *Journal of Geophysical Research*, 108(C4), 3121. <https://doi.org/10.1029/2002JC001362>

- DEWITTE, B., ILLIG, S., RENAULT, L., GOUBANOVA, K., TAKAHASHI, K., GUSHINA, D., MOSQUERA, K. & PURCA, S. (2011). Modes of covariability between sea surface temperature and wind stress intraseasonal anomalies along the coast of Peru from satellite observations (2000-2008). *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116, C04028. <https://doi.org/10.1029/2010JC006495>
- DEWITTE, B., VÁZQUEZ-CUERVO, J., GOUBANOVA, K., ILLIG, S., TAKAHASHI, K., CAMBON, G., PURCA, S., CORREA, D., GUTIÉRREZ, D., SIFEDDINE, A. & 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>
- EMERY, W. J. & THOMSON, R. E. (1998). *Data analysis methods in physical oceanography*. Pergamon.
- ENFIELD, D. B. (1987). The intraseasonal oscillation in Eastern Pacific Sea levels: How is it forced? *Journal of Physical Oceanography*, 17, 1860-1876. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1987\)017%3C1860:TIOIEP%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1987)017%3C1860:TIOIEP%3E2.0.CO;2)
- ENFIELD, D. B. (1988). Is El Niño becoming more common? *Oceanography*, 1(2), 23-27. <https://www.jstor.org/stable/43924417>
- ENFIELD, D. B. & ALLEN, J. S. (1980). On the structure and dynamics of monthly mean sea level anomalies along the Pacific coast of North and South America. *Journal of Physical Oceanography*, 10, 557-578. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1980\)010%3C0557:OTSADO%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1980)010%3C0557:OTSADO%3E2.0.CO;2)
- FLORES, R., TENORIO, T. & DOMÍNGUEZ, N. (2009). Variaciones de la extensión sur de la Corriente de Cromwell frente al Perú entre los 3 y 14° S. *Bol Inst Mar Perú*, 24(1-2), 45-58. <https://hdl.handle.net/20.500.12958/1091>
- GRACO, M. I., PURCA, S., DEWITTE, B., CASTRO, C. G., MORÓN, O., LEDESMA, J., FLORES, G. & GUTIÉRREZ, D. (2017). The OMZ and nutrients features as a signature of interannual and low-frequency variability in the peruvian upwelling system. *Biogeosciences*, 14, 4601-4617. <https://doi.org/10.5194/bg-14-4601-2017>
- GRINSTED, A., MOORE, J. C. & JEVREJEVA, S. (2004). Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 11, 561-566. <https://doi.org/10.5194/npg-11-561-2004>
- INTERNATIONAL RESEARCH INSTITUTE FOR CLIMATE AND SOCIETY [IRI] (s.f). *Biblioteca de datos*. Recuperado el 5 de agosto del 2014 de, <https://iridl.ldeo.columbia.edu/index.html?Set-Language=es>
- INSTITUTO CONJUNTO PARA EL ESTUDIO DE LA ATMÓSFERA Y EL OCÉANO [JISAO]. (s.f.). *Base de datos del JISAO*. Recuperado el 5 de agosto del 2014.
- MANTUA, N. J., HARE, S. R., ZHANG, Y., WALLACE, J. M. & FRANCIS, R. C. (1997). A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(6), 1069-1079. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078%3C1069:APICOW%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078%3C1069:APICOW%3E2.0.CO;2)
- MC PHADEN, M. J. (1999). Genesis and evolution of the 1997-98 El Niño. *Science*, 283, 950-954. <https://doi.org/10.1126/science.283.5404.950>
- MENDELSSOHN, R. & SCHWING, F. B. (2002). Common and uncommon trends in SST and winds stress in the California and Peru-Chile current systems. *Progress in Oceanography*, 53, 141-162. [https://doi.org/10.1016/S0079-6611\(02\)00028-9](https://doi.org/10.1016/S0079-6611(02)00028-9)
- NEWMAN, M., ALEXANDER, M. A., AULT, T. R., COBB, K. M., DESER, C., DI LORENZO, E., MANTUA, N. J., MILLER, A. J., MINOBE, S., NAKAMURA, H., SCHNEIDER, N., VIMONT, D. J., PHILLIPS, A. S., SCOTT, J. D. & SMITH, C. A. (2016). The Pacific decadal oscillation, revisited. *Journal of Climate*, 29, 4399-4427. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0508.1>
- PHILANDER, S. G. & FEDOROV, A. (2003). Is El Niño sporadic or cyclic? *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 31, 579-94. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.31.100901.141255>
- PICAUT, J., MASIA, F. & DU PENHOAT, Y. (1997). An advective-reflective conceptual model for the oscillatory nature of the ENSO. *Science*, 277, 663-666. <https://doi.org/10.1126/science.277.5326.663>
- PURCA, S., GRACO, M., GUTIÉRREZ, D., DEWITTE, B., TAM, J., BERTRAND, A., CHAVEZ, F., FLORES, R., LEDESMA, J., VÁSQUEZ, L., MESSIE, M., GOUBANOVA, K., MORON, O., NAKAZAKI, C., PERALTILLA, S. & SANCHEZ, S. (2010). Relación entre anchoveta y ambiente a diferentes escalas temporales. *Bol Inst Mar Perú*, 25(1-2), 13-21. <https://hdl.handle.net/20.500.12958/1092>
- TRENBERTH, K. E. (1997). The definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(12), 2771-2777. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078%3C2771:TDOENO%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078%3C2771:TDOENO%3E2.0.CO;2)
- VÁSQUEZ-CUERVO, J., ARMSTRONG, E. M., CASEY, K. S., EVANS, R. & KILPATRICK, K. (2010). Comparison between the Pathfinder Versions 5.0 and 4.1 Sea Surface Temperature Datasets: A Case Study for High Resolution. *Journal Climate*, 23, 1047-1059. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2839.1>
- WANG, C. & FIEDLER, P. C. (2006). ENSO variability and the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, 69, 239-236. <https://doi.org/10.1016/j.pocan.2006.03.004>
- ZHANG, Y., WALLACE, J. M. & BATTISTI, D. S. (1997). ENSO-like interdecadal variability: 1900-93. *Journal of Climate*, 10, 1004-1020. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1997\)010%3C1004:ELIV%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1997)010%3C1004:ELIV%3E2.0.CO;2)