

# ANÁLISIS DE SERIES DE TIEMPO DE LAS ONDAS ATRAPADAS A LA COSTA Y LA CLOROFILA-A SATELITAL EN EL ECOSISTEMA DE LA CORRIENTE DE HUMBOLDT

## TIME SERIES ANALYSIS OF COASTAL-TRAPPED WAVES AND SATELLITE CHLOROPHYLL-A IN THE HUMBOLDT CURRENT ECOSYSTEM

Cinthia Arellano<sup>1</sup>

Carlos Quispe

Jorge Tam

<https://doi.org/10.53554/boletin.v37i1.366>

### RESUMEN

ARELLANO, C., QUISPE, C., TAM, J. (2022). *Análisis de series de tiempo de las ondas atrapadas a la costa y la clorofila-a satelital en el ecosistema de la corriente de Humboldt*. *Bol Inst Mar Perú*. 37(1): 191-207.- Los procesos físicos tienen un impacto en la dinámica oceánica y en la productividad primaria de los ecosistemas marinos, en particular dentro de los ecosistemas del Borde Este. En el presente trabajo se realizó un análisis estadístico entre la dinámica física y la productividad primaria. Para ello, se estudió una franja costera de 200 km de ancho a lo largo de la costa peruana, dentro del Norte Ecosistema de la Corriente de Humboldt, para el periodo 2008 - 2015. Para reducir la dimensionalidad de los datos y caracterizar la variabilidad temporal se aplicaron análisis de Función Ortogonal Empírica (FOE) y análisis de ondículas. Los resultados mostraron que la primera Función Ortogonal Empírica (FOE1) del nivel medio del mar (NMM) representa más del 76% de la varianza a lo largo de la costa. El análisis de ondículas indicó que la frecuencia que identifica las ondas atrapadas a la costa fue de alrededor de 53 días. La velocidad de la OAC es de  $\sim 1,9 \text{ m.s}^{-1}$ , por lo que el tiempo que demora en pasar a lo largo de la costa peruana es de 10 días, aproximadamente. Para la temperatura superficial del mar (TSM), la FOE1 explica el 68% de la varianza total. En el caso de la clorofila-a (CHLO) la FOE1 mostró mayor variabilidad dentro de la influencia de la OAC. Se encontró buena relación entre el paso de las OACs y la TSM, sin embargo, en el caso de la CHLO, a pesar de tener picos energéticos dentro del rango de propagación de la OAC, la correlación cruzada mostró un desfase de 4 días, con una correlación de 0,2. Por lo tanto, la variabilidad de la CHLO se encuentra afectada por otros procesos físicos que ocurren en el rango de 30 y 60 días.

**PALABRAS CLAVE:** función ortogonal empírica, ondas atrapadas a la costa, clorofila-a, ecosistema de corriente de Humboldt

### ABSTRACT

ARELLANO, C., QUISPE, C., TAM, J. (2022). *Time series analysis of coastal-trapped waves and satellite chlorophyll-a in the Humboldt Current ecosystem*. *Bol Inst Mar Peru*. 37(1): 191-207.- Physical processes impact ocean dynamics and primary productivity of marine ecosystems, particularly within the Eastern Boundary Upwelling System (EBUS). Thus, our work presents a statistical analysis between physical dynamics and primary productivity. Therefore, we studied a 200 km wide coastal strip along the Peruvian coast, within the Northern Humboldt Current Ecosystem (NHCE) between 2008 and 2015. We applied Empirical Orthogonal Function (EOF) and wavelet analyses to reduce the dimensionality of the data and characterize the temporal variability. The results showed that the first Empirical Orthogonal Function (EOF1) of mean sea level (MSL) accounts for more than 76% of the variance along the coast. The wavelet analysis indicated that the frequency of identifying coastal-trapped waves (CTW) was about 53 days. The speed of the CTW was estimated at  $\sim 1.9 \text{ m.s}^{-1}$ , so it takes about 10 days to pass along the Peruvian coast. Regarding sea surface temperature (SST), EOF1 explains 68% of the total variance. For chlorophyll-a (CHLO), EOF1 showed greater variability within the influence of CTW. A good relationship was found between CTWs passage and SST, although for CHLO, despite having energetic peaks within the range of CTW propagation, the cross-correlation showed a lag of 4 days, with a correlation of 0.2. Therefore, the variability of the CHLO is affected by other physical processes occurring between 30 and 60 days.

**KEYWORDS:** empirical orthogonal function, shore-trapped waves, chlorophyll-a, Humboldt Current ecosystem

## 1. INTRODUCCIÓN

El Ecosistema de la Corriente de Humboldt (ECH) es uno de los cuatro Ecosistemas de afloramiento del borde este (EBUS) con mayor importancia

## 1. INTRODUCTION

The Humboldt Current Ecosystem (HCE) is one of the four most important Eastern Boundary Upwelling Systems (EBUS) for fish production. It

<sup>1</sup> IMARPE, DGIOCC, Esq. Gamarra y Gral. Valle s/n, Callao, Perú. carellano@imarpe.gob.pe

en términos de producción de peces. El ECH tiene productividad primaria media, pero aporta más del 15% de la pesca mundial (CHAVEZ *et al.*, 2008). Este ecosistema presenta características particulares, soporta una intensa y muy somera zona de mínimo oxígeno (FUENZALIDA *et al.*, 2009), a su vez es impactado por alta variabilidad de procesos físicos que son clave para su dinámica biogeoquímica y ecológica (BERTRAND *et al.*, 2008). Estos procesos físicos interactúan a diferentes escalas espacio/temporales que van desde las ondas internas (<1 km), procesos de submesoescala (~1 - 10 km) y mesoescala (~10-100 km) (BERTRAND *et al.*, 2008; LÉVY *et al.*, 2012) hasta procesos de larga escala como son el arribo de ondas Rossby y Kelvin Ecuatoriales. Dentro de estos procesos de larga escala, el arribo de las Ondas Kelvin Ecuatoriales (OKE) a las costas del ECH impacta la variabilidad física/biológica. Estas OKE son generadas en el Pacífico Central-Oeste y se propagan en dirección este, viajan a la velocidad entre 1 y 3 m.s<sup>-1</sup>. Una vez que la OKE alcanza las costas de Sudamérica, parte de su energía es reflejada como Onda Rossby y otra parte se propaga a lo largo de la costa de Sudamérica en dirección a los polos. Esta onda propagada a lo largo de la costa se le conoce como Onda Atrapada a la Costa (OAC) (GILL, 1981; BRINK, 1982; PIZARRO *et al.*, 2001).

El paso de esta OAC a lo largo de la costa de Sudamérica produce desplazamiento vertical de la termoclina, frecuentemente de decenas de metros, e incremento en el nivel del mar de algunos centímetros (BRINK *et al.*, 1983; BERTRAND *et al.*, 2008). La OAC también impacta la dinámica de los procesos físicos y la distribución espacial y vertical de los organismos biológicos (BERTRAND *et al.*, 2008).

Previos estudios de simulación han sido realizados con respecto a la dinámica de las OAC y su efecto en el ecosistema, analizando su variabilidad intraestacional (ECHEVIN *et al.*, 2014; PIETRI *et al.*, 2014) basado en datos reales de pesca, se encontró un impacto negativo (positivo) dependiendo del tipo de OAC (afloramiento o hundimiento) en el ecosistema y en particular sobre el recurso anchoveta (BERTRAND *et al.*, 2008). Pero aún queda un vacío en el conocimiento del impacto de las OAC en la productividad primaria a nivel superficial. Es así que, para incrementar el conocimiento del impacto de la OAC en los

provides more than 15% of the world's fish catch despite its medium primary productivity (CHAVEZ *et al.*, 2008). This ecosystem is characterized by an intense and very shallow oxygen minimum zone (FUENZALIDA *et al.*, 2009), and is impacted by a high variability of physical processes that are key to its biogeochemical and ecological dynamics (BERTRAND *et al.*, 2008). These physical processes interact at different spatial/temporal scales ranging from internal waves (<1 km), sub-mesoscale (~1 - 10 km), and mesoscale (~10-100 km) processes (BERTRAND *et al.*, 2008; LÉVY *et al.*, 2012) to long-scale processes such as the arrival of equatorial Rossby and Kelvin waves. As part of these large-scale processes, the arrival of Equatorial Kelvin Waves (EKW) to the HCE coasts impacts the physical/biological variability. These EKWs are generated in the west-central Pacific and propagate in an easterly direction, traveling at a speed between 1 and 3 m.s<sup>-1</sup>. Once the EKW reaches the South American coast, part of its energy is reflected as a Rossby Wave and another part propagates along the South American coast in a poleward direction. This wave propagating along the coast is known as the Coastal-Trapped Wave (CTW) (GILL, 1981; BRINK, 1982; PIZARRO *et al.*, 2001).

The passage of this CTW along the South American coast produces a vertical displacement of the thermocline, often by tens of meters, and an increase in sea level of a few centimeters (BRINK *et al.*, 1983; BERTRAND *et al.*, 2008). The CTW also impacts the dynamics of physical processes and the spatial and vertical distribution of biological organisms (BERTRAND *et al.*, 2008).

There have been previous simulation studies on the dynamics of CTWs and their effect on the ecosystem, analyzing their intra-seasonal variability (ECHEVIN *et al.*, 2014; PIETRI *et al.*, 2014) based on real fishing data and they found a negative (positive) impact depending on the type of CTW (upwelling or downwelling) on the ecosystem and especially on the anchoveta resource (BERTRAND *et al.*, 2008). Nevertheless, there is still a gap in the knowledge of the impact of CTWs on primary productivity at the surface level. Thus, to increase the

componentes biológicos, el presente trabajo tiene el objetivo de analizar la relación que existe entre la onda atrapada a la costa (OAC) con los componentes bióticos y abióticos del ecosistema, tomando como componente biótico a la clorofila-a y como componentes abióticos a la temperatura superficial del mar y nivel medio del mar. Para ello se utilizaron datos provenientes de diferentes fuentes satelitales durante el periodo 2008 - 2015.

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

### Data

El periodo utilizado de los datos satelitales va del 2008 al 2015, a una escala diaria para TSM, NMM y CHLO.

Se usaron datos de diferentes fuentes satelitales: el Nivel Medio del Mar (NMM), con resolución espacial de  $0,25^\circ$  y frecuencia diaria fue obtenido desde AVISO (*Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data*), disponible en (<http://www.aviso.altimetry.fr/en/home.html>). La Temperatura Superficial del Mar (TSM), con la misma resolución espacial y frecuencia diaria, se obtuvo desde NOAA NCDC OISST versión 2 (NCDC: *National Climatic Data Center, NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration, OISST: Optimum Interpolation Sea Surface Temperature*) (<ftp://eclipse.ncdc.noaa.gov/>). Finalmente, la Clorofila-a (CHLO), disponible a una resolución espacial de 4 km fue obtenida de Modis-Aqua (<http://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/>) con una resolución temporal diaria.

### Métodos

Con el fin de extraer las características de la dinámica cerca de la costa a una escala intraestacional, se calculó las anomalías del nivel medio del mar. Existen varios métodos para el cálculo de las anomalías intraestacionales. Como DEWITTE *et al.* (2011) explican, uno de esos métodos consiste en promediar mensualmente los datos diarios y luego se calcula la climatología mensual; posteriormente, con la climatología mensual se interpola a una escala diaria para luego calcular la diferencia con la data diaria y finalmente obtener las anomalías diarias. Otro método, es aplicar un filtro de paso-alto, que deja pasar los periodos inferiores (frecuencias superiores) a un cierto umbral, en nuestro caso utilizaremos un filtro  $> 90$  días para eliminar la señal estacional, debido a que existe una variabilidad estacional mayor a 90

knowledge of the impact of the CTW on the biological components, our goal is to analyze the relationship between the CTW and the biotic and abiotic components of the ecosystem, with chlorophyll-a as the biotic component and SST and MSL as the abiotic components. Therefore, we used data from different satellite sources for the period 2008 - 2015.

## 2. MATERIAL AND METHODS

### Data

The period used for the satellite data is from 2008 to 2015, on a daily scale for SST, MSL, and CHLO.

Data from different satellite sources were used: Mean Sea Level (MSL), with a spatial resolution of  $0.25^\circ$  and daily frequency, was obtained from AVISO (*Archiving, Validation, and Interpretation of Satellite Oceanographic data*), available at (<http://www.aviso.altimetry.fr/en/home.html>). Sea Surface Temperature (SST), with the same spatial resolution and daily frequency, was obtained from NOAA NCDC OISST version 2 (NCDC: *National Climatic Data Center, NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration, OISST: Optimum Interpolation Sea Surface Temperature*) (<ftp://eclipse.ncdc.noaa.gov/>). Finally, Chlorophyll-a (CHLO), available at a spatial resolution of 4 km, was obtained from Modis-Aqua (<http://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/>) with a daily temporal resolution.

### Methods

We estimated sea level anomalies (SLA) to extract the characteristics of the nearshore dynamics on an intraseasonal scale. Several methods exist for the computation of intraseasonal anomalies. As DEWITTE *et al.* (2011) explain, one such method consists of monthly averaging of the daily data and then calculating the monthly climatology; then, the monthly climatology is interpolated to a daily scale to later estimate the difference with the daily data, and finally obtain the daily anomalies. Another method is to apply a high-pass filter, which allows periods below (frequencies above) a certain threshold to pass, in our case we will use a filter  $> 90$  days to eliminate the seasonal

días, que son escalas que están fuera del objetivo de nuestro estudio. Este último método se aplicó a las variables TSM y NMM. A partir de aquí, se referirá a las variables filtradas de TSM y NMM como TSM-F y NMM-F, respectivamente.

Para el caso de la CHLO se calculó la media móvil centrada de 8 días debido a los datos faltantes en la base de datos. Posteriormente, se aplicó el filtro ya mencionado, y la serie filtrada de CHLO se denominó CHLO-F.

Con la finalidad de reducir la dimensionalidad de los datos y extraer alguna estructura de variabilidad espacial y temporal de las variables filtradas se aplicó el análisis de Funciones Ortogonales Empíricas (FOE) (también conocido como Análisis de Componentes Principales) sobre las variables TSM-F, NMM-F y CHLO-F, para obtener las series de tiempo de las Componentes Principales (CP) y los mapas de las FOE de las matrices de cada una de las variables.

En la figura 1, se muestran los mapas de distribución de FOE1 y FOE2 del NMM-F con una varianza explicada de 67,3% y 32,6% respectivamente, como resultado de la aplicación de la FOE al NMM-F, considerando el área que cubre gran parte de la costa peruana. En esta misma figura, se observa que el área de mayor variabilidad del NMM-F se encuentra a lo largo de la costa, con mayor extensión longitudinal en la parte norte reduciéndose en dirección sur. Esto nos permite reducir el área de estudio a una franja costera de hasta 200 km de ancho a lo largo de la costa que va desde 2°S hasta 18°S.

Con el fin de identificar las variaciones tiempo-frecuencia y calcular el espectro de potencia se aplicó la transformada de ondículas (TORRENCE & COMPO, 1998) sobre las primeras dos Componentes Principales (CP). Así también, se calculó el promedio global del espectro de potencia de ondículas, el cual está compuesto por las contribuciones de la varianza local para el total de potencia de la serie de tiempo, descrito en GOUBANOVA *et al.* (2013). Los promedios globales de cada espectro de potencia de ondículas identifican los picos de mayor potencia, y considerando esta información se determina que el rango de periodos entre 30 y 80 días contiene los picos de mayor potencia de todas las variables analizadas.

signal since there is a seasonal variability greater than 90 days, which are scales that are outside our study's goal. The latter method was applied to the SST and MSL variables. Hereafter, the filtered SST and MSL variables will be referred to as SST-F and MSL-F, respectively.

For CHLO, the 8-day centered moving average was estimated due to missing data in the database. Afterward, the aforementioned filter was applied, and the filtered CHLO series was named CHLO-F.

Empirical Orthogonal Functions (EOF) analysis (also known as Principal Component Analysis) was applied to the SST-F, MSL-F, and CHLO-F variables to reduce the dimensionality of the data and extract some structure of spatial and temporal variability of the filtered variables, to obtain the time series of the Principal Components (PC) and the EOF maps of the matrices of each of the variables.

Figure 1 shows the distribution maps of EOF1 and EOF2 of the MSL-NMF with an explained variance of 67.3% and 32.6% respectively, as a result of the application of the EOF to the MSL-F, considering the area that covers a large part of the Peruvian coast. In this same figure, it is observed that the area of greater variability of the MSL-F is found along the coast, with greater longitudinal extension in the north, decreasing southwards. This allows us to reduce the study area to a coastal strip of up to 200 km wide along the coast from 2°S to 18°S.

We applied the wavelet transform (TORRENCE & COMPO, 1998) on the first two Principal Components (PC) to identify the time-frequency variations and estimate the power spectrum. Likewise, the global average of the wavelet power spectrum was calculated, which is composed of the local variance contributions for the total power of the time series, described in GOUBANOVA *et al.* (2013). The global averages of each wavelet power spectrum identify the peaks of the highest power and considering this information it is determined that the range of periods between 30 and 80 days contains the peaks of the highest power of all the variables analyzed.

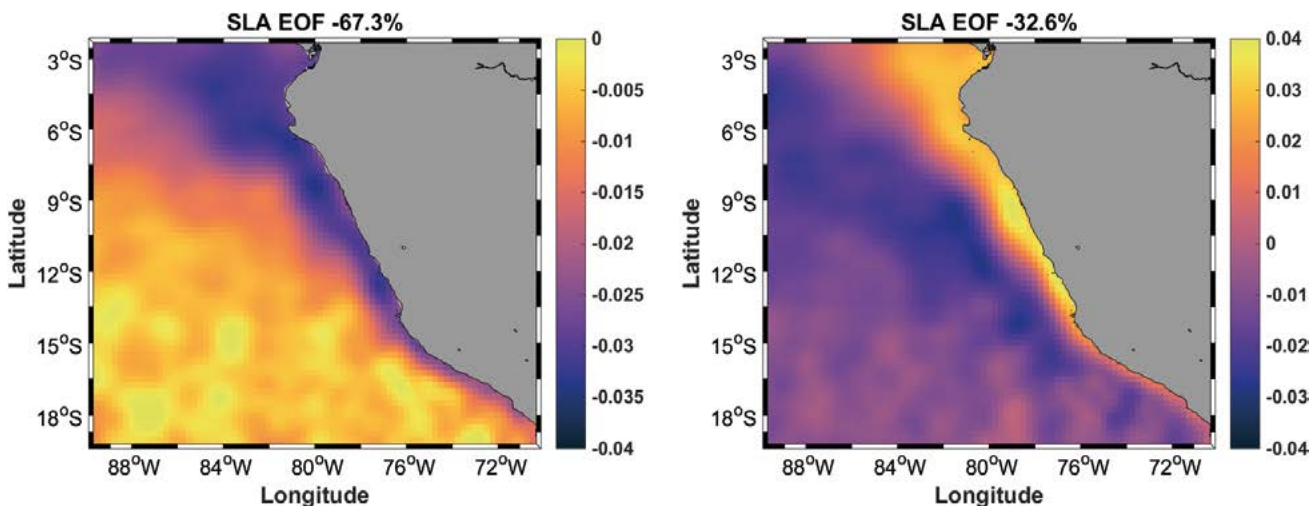


Figura 1.- Distribución de autovectores de NMM-F de la FOE1 (izquierda), con 67,3% de varianza explicada y de la FOE2 (derecha) con 32,6% de varianza explicada  
 Figure 1. Distribution of MSL-F eigenvectors of EOF1 (left), with 67.3% of variance explained and EOF2 (right) with 32.6% of variance explained

### 3. RESULTADOS

#### Ondas atrapadas a la costa (OAC)

Los constantes arribos de Ondas Kelvin Ecuatoriales (OKE) provenientes del Pacífico Ecuatorial Central impactan y se propagan a lo largo de la costa peruana como Ondas Atrapadas a la Costa (OAC). Una variable sensible a esta propagación es el Nivel Medio del Mar (NMM). El análisis de la FOE para el NMM-F en la región peruana, indicó una varianza explicada del 67,3% para la FOE1 y una varianza explicada de 32,6% para la FOE2. La FOE1 mostró un área de mayor variabilidad cerca de la costa, con una extensión longitudinal que disminuye de norte a sur, es decir al norte presentó un ancho de aproximadamente 150 km (10°S) y fue reduciéndose en dirección sur con un ancho de 50 km (15°S), correspondiente al área de influencia de propagación de las OAC. Debido al reflejo de las ondas Rossby ecuatoriales (CLARKE & SHI, 1991) el ancho del área de influencia de la OAC es mayor al norte de la latitud de 8°S. Por otro lado, la FOE2 del NMM-F mostró dos áreas de mayor variabilidad, uno costero y otro oceánico, que contribuirán de manera opuesta a la CP2 que explica el 32,6% de la variancia total.

### 3. RESULTS

#### Coastal-trapped waves (CTW)

The constant arrivals of Equatorial Kelvin Waves (EKW) from the Central Equatorial Pacific impact and propagate along the Peruvian coast as CTW. A sensitive variable to this propagation is the Mean Sea Level (MSL). The analysis of the EOF for the MSL-F in the Peruvian region indicated an explained variance of 67.3% for EOF1 and an explained variance of 32.6% for EOF2. EOF1 showed a nearshore area of greater variability, with a longitudinal extension that decreases from north to south, *i.e.*, in the north it had a width of approximately 150 km (10°S) and was reduced in the southern direction with a width of 50 km (15°S), corresponding to the area of influence of the CTWs propagation. Due to the reflection of the equatorial Rossby waves (CLARKE & SHI, 1991), the width of the area of influence of the CTW is greater north of the 8°S latitude. On the other hand, the EOF2 of the MSL-F showed two areas of greater variability, one coastal and the other oceanic, which will contribute in the opposite way to the PC2 which explains 32.6% of the total variance.

En la figura 2, se muestra el análisis de espectro de potencia de ondículas de la serie temporal del CP1 del NMM-F y el promedio global del espectro de potencia. El espectro de ondículas mostró el pico de mayor potencia entre 52 y 55 días. En los años 2008, 2010, 2014 y 2015 se puede indicar la presencia de ondas con mayor potencia.

Figure 2 shows the wavelet power spectrum analysis of the MSL-F PC1 time series and the overall average power spectrum. The wavelet spectrum showed the highest power peak between 52 and 55 days. The presence of wavelets with higher power could be indicated in 2008, 2010, 2014, and 2015.

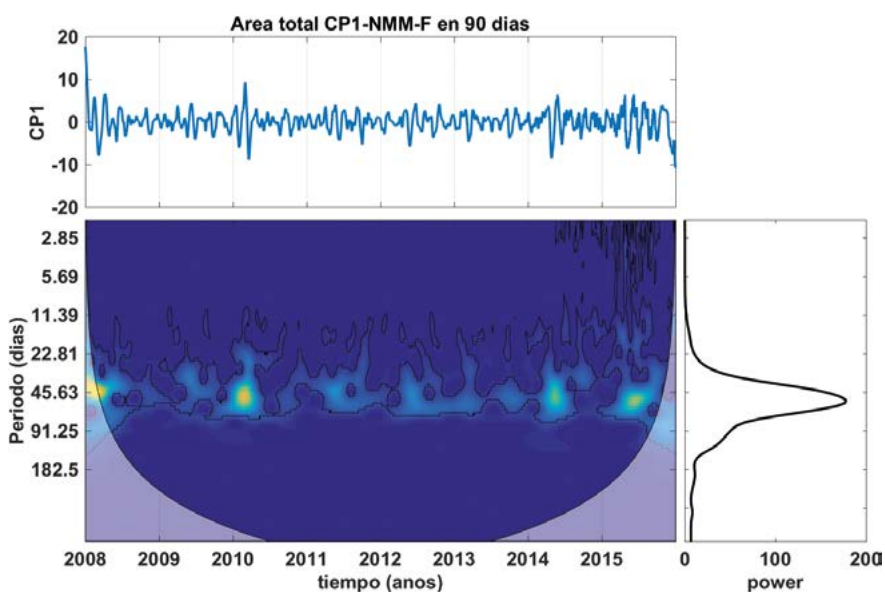


Figura 2.- Serie temporal de la CP1 del NMM-F (parte superior). Espectro de potencia de ondículas de la CP1 del NMM-F (Parte inferior izquierda) y promedio global del espectro de potencia (parte inferior derecha)

Figure 2. MSL-F PC1 time series (top). MSL-F PC1 wavelet power spectrum (bottom left) and overall average power spectrum (bottom right)

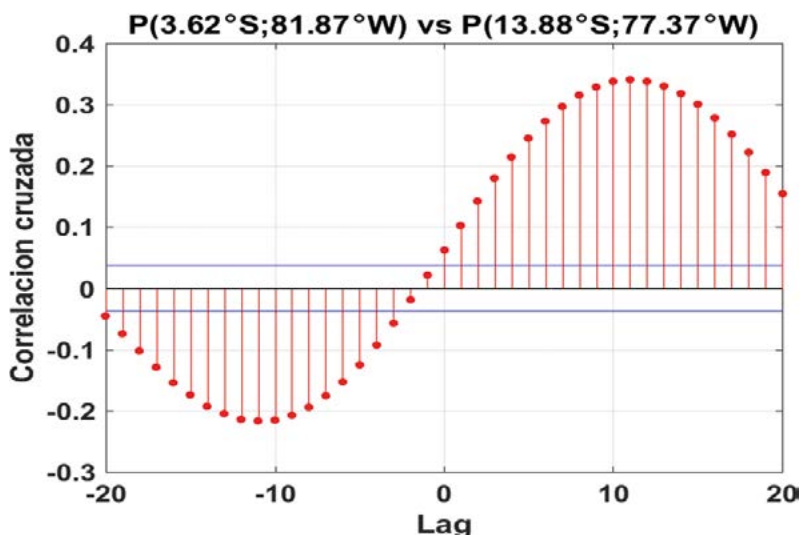


Figura 3.- Correlación cruzada entre la serie temporal de NMM-F en un rango de periodo entre 30 y 80 días de un punto al norte (3°S) y de otro punto al sur (18°S), ubicados a 28 km de la costa

Figure 3. Cross-correlation between the MSL-F time series in a 30-to-80-day period range from a spot to the north (3°S) and another spot to the south (18°S), located 28 km offshore

A partir del rango de periodos entre 30 y 80 días, extraído de la señal del nivel del mar, se calculó las características principales de las OAC, como la velocidad promedio con la cual se propaga la onda a lo largo de la costa que fue estimada en  $1,9 \text{ m.s}^{-1}$ . Con esa velocidad, el tiempo que toma la OAC en propagarse desde  $3^{\circ}\text{S}$  hasta  $18^{\circ}\text{S}$  es de aproximadamente 11 días, tal como lo muestra la correlación cruzada del NMM entre dos puntos de la costa peruana (Fig. 3).

**Impacto de la onda atrapada a la costa sobre la temperatura superficial del mar**

En el caso de la TSM-F (Fig. 4) a una escala intraestacional, la FOE1 explica el 68% de la varianza en la zona dentro de los 200 km hacia la costa y, muestra un área de mayor variabilidad en la parte norte entre  $4^{\circ}\text{S}$  y  $7^{\circ}\text{S}$  (frente a Paita). Asimismo, otra área de mayor variabilidad fue observada en la parte central entre  $12^{\circ}$  y  $15^{\circ}\text{S}$ , muy cerca de la costa, estas áreas serían generadas por la propagación de las OAC. Por otro lado, la FOE2 de la TSM-F tiene una varianza explicada de 31%, y mostró un área de mayor variabilidad al norte de  $6^{\circ}\text{S}$ .

We estimated the main characteristics of the CTWs such as the mean speed with which the wave propagates along the coast, estimated at  $1.9 \text{ m.s}^{-1}$ , from the 30-to-80 day period range, extracted from the sea level signal. At that speed, the time it takes for the CTW to propagate from  $3^{\circ}\text{S}$  to  $18^{\circ}\text{S}$  is approximately 11 days, as shown by the MSL cross-correlation between two spots along the Peruvian coast (Fig. 3).

**Impact of the coastal-trapped waves on sea surface temperature**

Regarding intraseasonal SST-F (Fig. 4), EOF1 explains 68% of the variance in the area within 200 km towards the coast and shows an area of greater variability in the north between  $4^{\circ}\text{S}$  and  $7^{\circ}\text{S}$  (off Paita). Likewise, another area of greater variability was observed in the central part between  $12^{\circ}$  and  $15^{\circ}\text{S}$ , very nearshore, these areas would be generated by the CTWs propagation. On the other hand, the EOF2 of the SST-F has an explained variance of 31% and showed an area of greater variability north of  $6^{\circ}\text{S}$ .

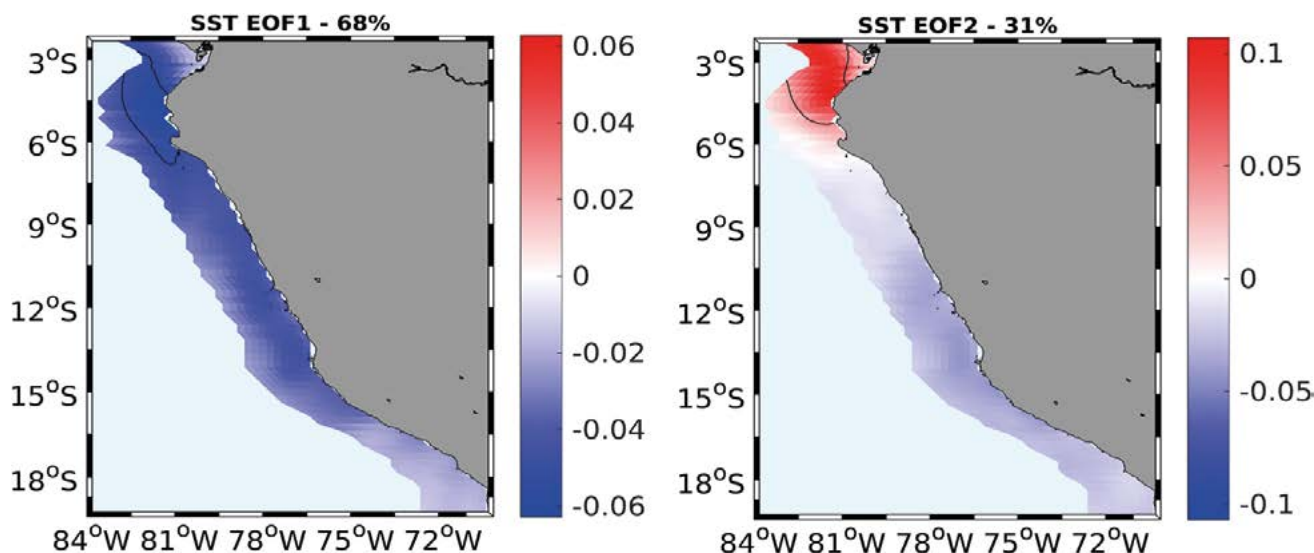


Figura 4.- Distribución de autovectores de TSM-F de la FOE1 (izquierda), con 68% de varianza explicada, y de la FOE2 (derecha), con 31% de varianza explicada, para el periodo 2008 – 2015

Figure 4. Distribution of SST-F eigenvectors of EOF1 (left), with 68% of variance explained, and EOF2 (right), with 31% of variance explained, for the period 2008-2015

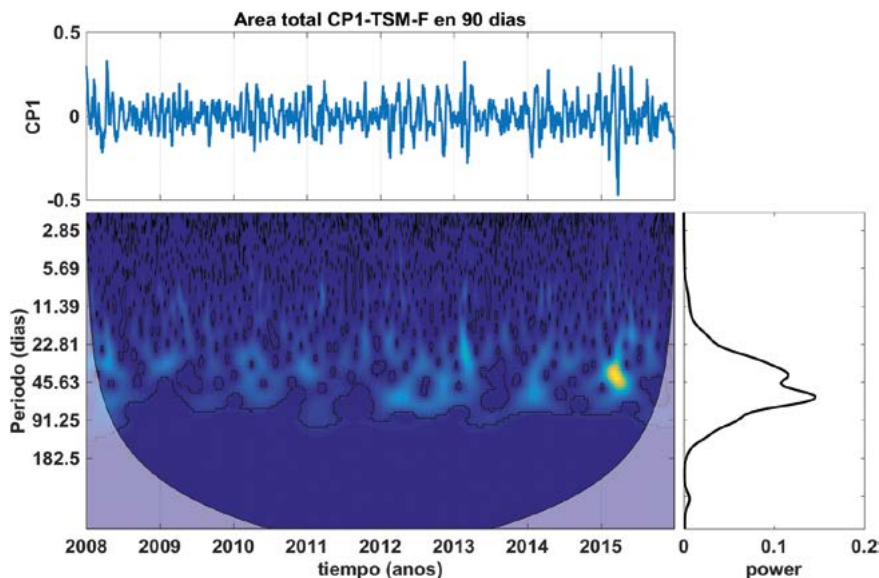


Figura 5.- Serie temporal del CP1 de la TSM-F (figura superior), espectro de potencia de ondículas aplicado a la CP1 del TSM-F (figura inferior izquierda) y el promedio global del espectro de potencia (figura inferior derecha)

Figure 5. SST-F PC1 time series (top figure), wavelet power spectrum applied to SST-F PC1 (bottom left figure) and the overall average power spectrum (bottom right figure)

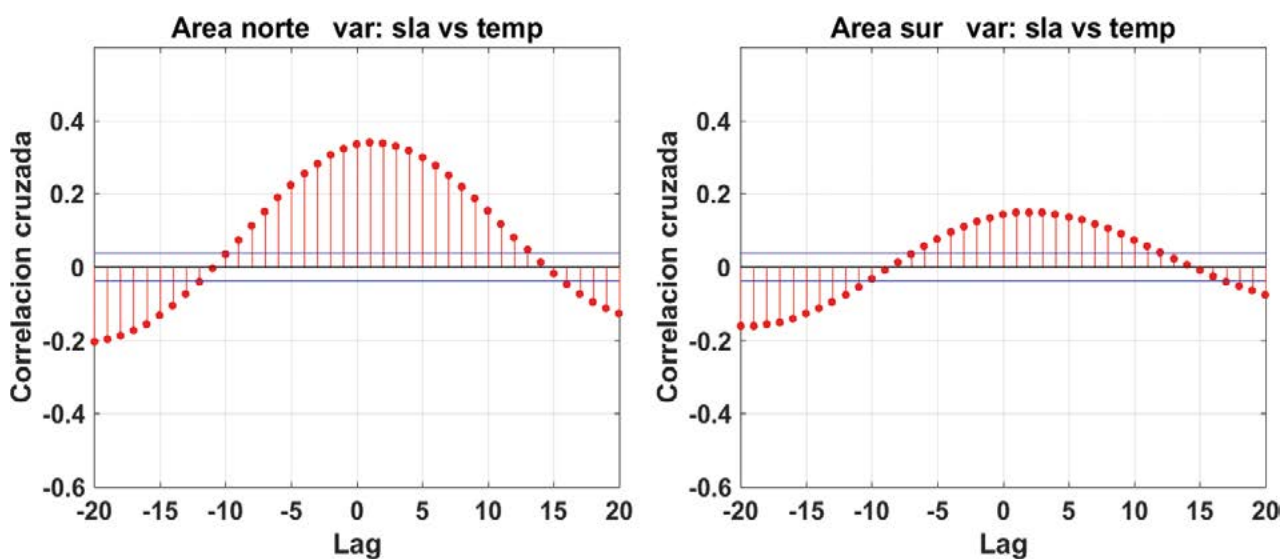


Figura 6.- Correlación cruzada entre las series filtradas (30 y 80 días) del NMM y de la TSM para la región norte entre 2°S y 8°S (izquierda) y la región sur entre 10°S y 18°S (derecha), ambas con un ancho de 200 km desde la costa. Uno de los impactos de la propagación de las OAC es el calentamiento o enfriamiento de las aguas costeras debido al hundimiento o afloramiento de las isoterms, generadas por el arribo de Ondas Kelvin Ecuatoriales (OKE de afloramiento o hundimiento)

Figure 6. Cross-correlation between the filtered series (30 and 80 days) of the MSL and SST for the northern region, between 2°S and 8°S (left), and the southern region, between 10°S and 18°S (right), both with a width of 200 km offshore. One of the impacts of the CTW propagation is the warming or cooling of coastal waters due to the downwelling or upwelling of isotherms, generated by the arrival of Equatorial Kelvin Waves (upwelling or downwelling EKW)

La figura 5 muestra la serie temporal de la CP1 de la TSM-F además del espectro de ondículas aplicado a dicha serie, donde se observó mayor potencia en el rango de periodos entre 23 y 70 días. El promedio global del espectro de potencia indica 2 picos de potencia entre 40 y 59 días.

Figure 5 shows the PC1 time series of SST-F as well as the wavelet spectrum applied to that series, where higher power was observed in the 23- to-70-day period range. The global average of the power spectrum indicates 2 power peaks between 40 and 59 days.



La figura 6 muestra la correlación cruzada entre la TSM-F y el NMM-F en un rango de periodo entre 30 y 80 días, para la región norte se observa un desfase de +1 día con una correlación de +0,4; mientras que, para la región sur se observa un desfase de +3 días y correlación de +0,17; este análisis indica que el cambio en la NMM-F antecede al paso de OAC.

**Impacto de la onda atrapada a la costa sobre la clorofila-a**

En el caso de la Clorofila-a, la varianza explicada de la FOE1 es de 60% y de la FOE2 es de 39% (Fig. 7). La FOE1 mostró un área de mayor variabilidad de la concentración de clorofila-a muy cerca de la costa, con valores más altos entre 3°S y 13°S, disminuyendo al sur. La FOE2 mostró también un área de mayor variabilidad al norte de 6°S y un área de menor variabilidad entre 12°S y 14°S.

La figura 8 muestra el análisis de espectro de ondículas de la serie temporal de la CP1 de la CHLO-F, en la cual se observó mayor potencia en un rango de periodos entre 52 y 56 días. El promedio global del espectro de potencia indica un pico de potencia alrededor de un periodo de 53 días.

Figure 6 shows the cross-correlation between SST-F and MSL-F in the 30-to-80-day period range. There is a lag of +1 day for the northern region with a correlation of +0.4, while for the southern region there is a lag of +3 days and a correlation of +0.17. This analysis indicates that the change in MSL-F precedes the CTW passage.

**Impact of the costal-trapped wave on Chlorophyll-a**

Regarding Chlorophyll-a, the explained variance of EOF1 is 60% and that of EOF2 is 39% (Fig. 7). EOF1 showed a nearshore area of higher variability of chlorophyll-a concentration, with higher values between 3°S and 13°S, decreasing to the south. EOF2 also showed an area of higher variability north of 6°S and an area of lower variability between 12°S and 14°S.

Figure 8 shows the wavelet spectrum analysis of the PC1 time series of the CHLO-F, in which higher power was observed in the 52-to-56-day period range. The overall average of the power spectrum indicates a power peak around a period of 53 days.

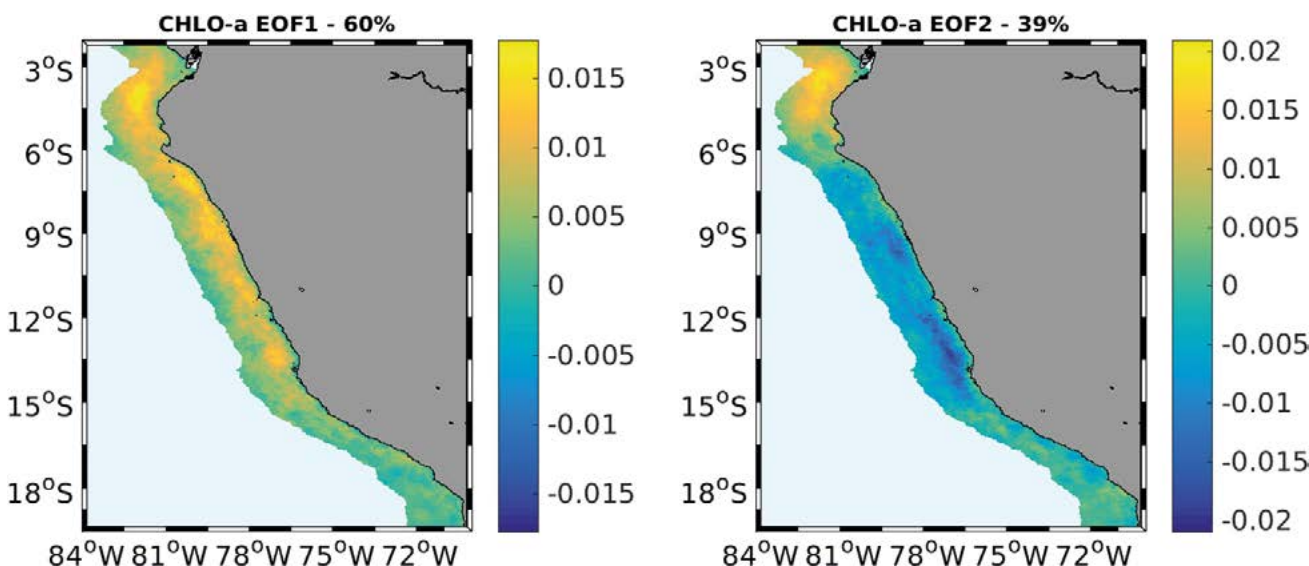


Figura 7.- Distribución de autovectores de la CHLO-F de la FOE1 (izquierda), con 60% de varianza explicada, y de la FOE2 (derecha), con 39 % de varianza explicada, periodo 2008 – 2015

Figure 7. Distribution of CHLO-F eigenvectors of EOF1 (left), with 60% of variance explained, and EOF2 (right), with 39 % of variance explained, period 2008-2015

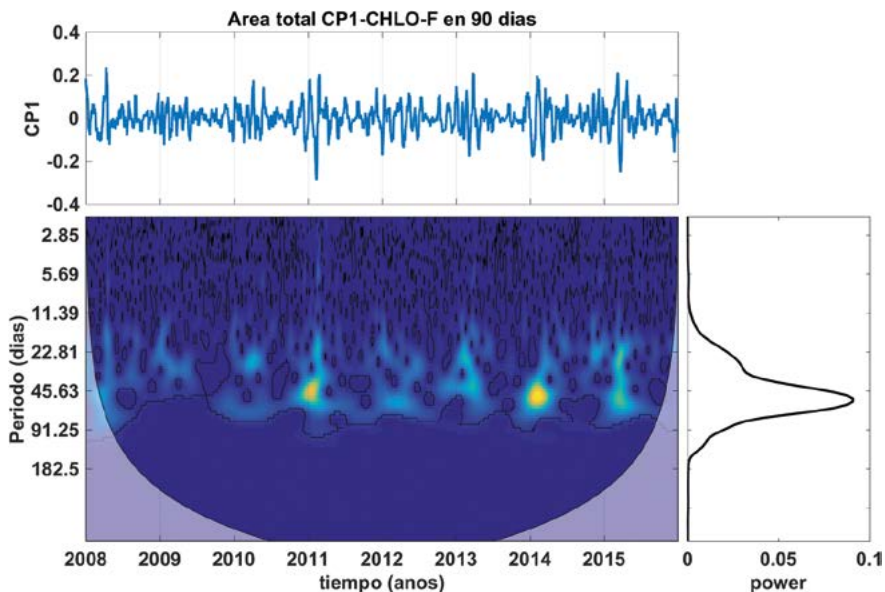


Figura 8.- Serie temporal de CP1 de la CHLO-F (parte superior). Espectro de potencia de ondículas de la CP1 de la Clorofila-F (parte inferior izquierda) y el promedio global del espectro de potencia (parte inferior derecha), periodo 2008-2015

Figure 8. PC1 time series of the CHLO-F (upper part). PC1 wavelet power spectrum of Chlorophyll-F (lower left) and the global average power spectrum (lower right), period 2008-2015

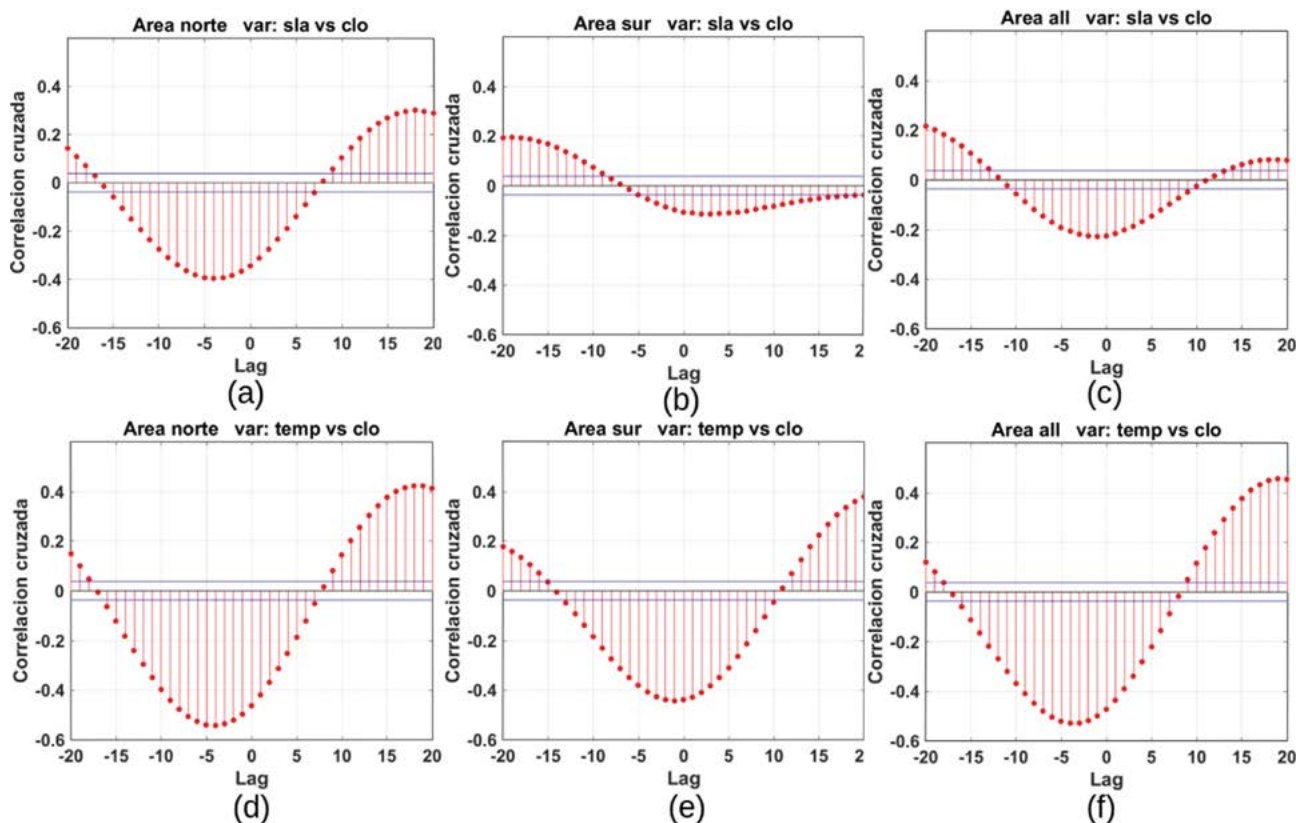


Figura 9.- Correlación cruzada entre el nivel medio del mar y la clorofila-a para las regiones (a) norte, (b) sur y (c) toda la zona costera; así mismo, correlaciones cruzadas entre TSM y la clorofila-a para las regiones (d) norte, (e) sur y (f) toda la zona costera

Figure 9. Cross-correlation between MSL and CHLO for regions (a) north, (b) south, and (c) the entire coastal zone. Likewise, cross-correlations between SST and CHLO for regions (d) north, (e) south, and (f) the entire coastal zone

En la figura 9 se muestran las correlaciones cruzadas entre el NMM-F vs CHLO-F (Fig. 9a, b, c), y la TSM-F vs, CHLO-F (Fig. 9d, e, f), para el rango de periodo entre 30 y 80 días, sobre una región norte ( $2^{\circ}\text{S}$  a  $8^{\circ}\text{S}$ ), una región sur ( $10^{\circ}\text{S}$  a  $18^{\circ}\text{S}$ ) y sobre toda la zona costera. La correlación cruzada entre el NMM-F y la CHLO-F, para la región norte indica un desfase de -4 días con una correlación de -0,3, es decir la clorofila-a tendría un efecto inverso por el paso de la OAC luego de 4 días, mientras que para la región sur el desfase es de +3 días con una correlación de -0,1. Cabe señalar que correlación cruzada en toda la zona costera mostró un desfase de -1 día con una correlación de -0,1; por lo que la mayor influencia del NMM sobre la clorofila-a se da en la región norte.

La correlación cruzada entre la TSM-F y la CHLO-F, para la región norte indica un desfase de -4 días con una correlación de -0,5; para la región sur un desfase de -2 días con una correlación de -0,4 y para toda la zona costera un desfase -3 días con una correlación de -0,5. Por lo cual, el análisis indicaría que el cambio de la TSM tiene un efecto inverso sobre la concentración de la CHLO a lo largo de la costa.

#### 4. DISCUSIÓN

El análisis de la FOE1 del NNM-F mostró un área de alta variabilidad asociada a la propagación de las OAC. Del espectro promedio de potencia del NMM-F se determinó que el periodo de la OAC es de 53 días. Este periodo coincide con BELMADANI *et al.* (2012), quienes muestran que la propagación de las Ondas de Kelvin hacia el este y de las Ondas de Rossby hacia el oeste, ocurren en un rango de 50 y 80 días, además mencionan que estas propagaciones ocurren al norte de la latitud crítica de  $12^{\circ}\text{S}$ , lo cual podría contribuir al aumento de la extensión longitudinal del área de mayor variabilidad en dirección norte de la FOE1 del NMM-F. Considerando el NMM-F como principal identificador de la OAC, el análisis basado en las correlaciones cruzadas entre un punto norte y un punto sur, indicó que una OAC demoraría 11 días en propagarse a lo largo de la costa peruana, con una velocidad de  $1,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , la cual se encuentra dentro del rango de velocidad calculada por PIZARRO *et al.*, (2001) ( $0,5 - 2,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,

Figure 9 shows the cross-correlations between MSL-F vs CHLO-F (Fig. 9a, b, c), and SST-F vs CHLO-F (Fig. 9d, e, f), for the 30-to-80-day period range, over the northern region ( $2^{\circ}\text{S}$  to  $8^{\circ}\text{S}$ ), the southern region ( $10^{\circ}\text{S}$  to  $18^{\circ}\text{S}$ ), and the entire coastal zone. The cross-correlation between the MSL-F and the CHLO-F, for the northern region, indicates a lag of -4 days with a correlation of -0.3, *i.e.*, the chlorophyll-a would have an inverse effect due to the CTW passage after 4 days, while for the southern region the lag is +3 days with a correlation of -0.1. It is noteworthy that cross-correlation in the entire coastal zone showed a lag of -1 day with a correlation of -0.1; thus, the greatest influence of the MSL on chlorophyll-a occurs in the northern region.

The cross-correlation between SST-F and CHLO-F, for the northern region, indicates a lag of -4 days with a correlation of -0.5, while for the southern region, there was a lag of -2 days with a correlation of -0.4 and for the entire coastal zone a lag of -3 days with a correlation of -0.5. Therefore, the analysis would indicate that the change in SST has an inverse effect on the concentration of CHLO along the coast.

#### 4. DISCUSSION

The analysis of the EOF1 of the MSL-F showed an area of high variability associated with the CTW propagation. From the average power spectrum of the MSL-F, the CTW period was determined to be 53 days. This period coincides with BELMADANI *et al.* (2012), who show that the easterly and westerly propagation of Kelvin Waves and Rossby Waves, respectively, occur in the 50-to-80-day range. They also mention that these propagations occur north of the critical latitude of  $12^{\circ}\text{S}$ , which could contribute to the increase of the longitudinal extension of the area of higher variability in the north direction of the EOF1 of MSL-F. When considering the MSL-F as the main identifier of the CTW, the analysis based on cross-correlations between a northern and southern spot indicated that a CTW would take 11 days to propagate along the Peruvian coast, with a speed of  $1.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , which is within the speed range calculated by PIZARRO *et al.*, (2001) ( $0.5 - 2.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , varying latitudinally) and

variando latitudinalmente) y así también próximo a la velocidad de  $1,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , estimada por PIETRI *et al.* (2014).

La varianza asociada a la TSM también mostró una extensión longitudinal que es más ancha al norte ( $3^{\circ}\text{S}$ ) y se estrecha hacia el sur ( $15^{\circ}\text{S}$ ). La relación que existe entre el NMM y la TSM mostró tener mayor presencia en la costa norte a pesar de tener un ligero desfase de 2 días. En el caso de la FOE2 tanto del NMM como de la TSM mostraron mayor varianza en Tumbes, sugiriendo un forzante local atmosférico generado en esa región, y en Pisco posiblemente debido al afloramiento costero generado por los fuertes vientos del sur.

La FOE1 de la CHLO-F mostró estructuras similares a las FOE1 del NMM-F y la TSM-F, lo que nos estaría indicando la posible fuerte relación con ambas variables, sin embargo, la correlación cruzada mostró que la CHLO-F es afectada negativamente por el NMM en la costa norte y su impacto afecta a la CHLO después de 4 días; mientras que en la costa sur este impacto es muy débil. Por otro lado, se pudo observar que la TSM-F y la CHLO-F guardan relación inversa y desfase de 4 días en el norte, y de 2 días en el sur. Aún queda un porcentaje de varianza no explicada del 40% que indica que existen otros procesos que estarían influenciando la variabilidad de FOE2 del CHLO-F en la región sur.

En la figura 10 se muestra el análisis del promedio global del espectro de ondículas normalizado del NMM-F, TSM-F y CHLO-F para la región norte y sur, así como para toda la zona costera. El NMM presentó un pico alrededor de los 50 días en ambas regiones, ligeramente más energético en la región sur, indicando la propagación de la OAC. Esta onda puede impactar al afloramiento a través de la advección vertical de la anomalía de temperatura (GUTIÉRREZ *et al.*, 2008; DEWITTE *et al.*, 2011). Este impacto puede observarse en el perfil promedio del espectro de potencia de la temperatura (Fig. 10, línea negra), donde se observa la presencia de picos energéticos alrededor de los 50 días. Sin embargo, en la región sur el perfil promedio del espectro de la TSM-F muestra un pico más energético alrededor de los 40 días, que podría ser explicado por el impacto del forzante remoto atmosférico, como es el desplazamiento latitudinal y longitudinal del sistema de presiones a nivel del

also close to the speed of  $1.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , estimated by PIETRI *et al.* (2014).

In addition, the variance associated with SST showed a longitudinal extension that is wider to the north ( $3^{\circ}\text{S}$ ) and narrows towards the south ( $15^{\circ}\text{S}$ ). The relationship between the MSL and SST showed a greater presence on the north coast despite a slight lag of 2 days. Regarding EOF2, both MSL and SST showed greater variance in Tumbes, which suggests a local atmospheric forcing generated in that region, and in Pisco, possibly caused by the coastal upwelling generated by the strong winds from the south.

The EOF1 of CHLO-F showed similar structures to the EOF1 of MSL-F and SST-F, which would indicate the possible strong relationship with both variables. Nevertheless, the cross-correlation showed that CHLO-F is negatively affected by the MSL on the north coast and its impact affects CHLO after 4 days, while on the south coast this impact is very weak. On the other hand, we could observe that SST-F and CHLO-F have an inverse relationship and a lag of 4 days in the north, and 2 days in the south. There is still a percentage of the unexplained variance of 40%, which indicates that there are other processes influencing the variability of EOF2 of the CHLO-F in the southern region.

Figure 10 shows the global average analysis of the MSL-F, SST-F, and CHLO-F normalized wavelet spectra for the northern and southern regions, as well as for the entire coastal zone. The MSL peaked around 50 days in both regions, which was slightly more energetic in the southern region, thus indicating the CTW propagation. This wave can impact the upwelling through vertical advection of the temperature anomaly (GUTIÉRREZ *et al.*, 2008; DEWITTE *et al.*, 2011). Such impact can be observed in the average profile of the temperature power spectrum (Fig. 10, black line), where the presence of energetic peaks around 50 days is observed. Nonetheless, in the southern region, the average profile of the SST-F spectrum shows a more energetic peak around 40 days, which could be explained by the impact of the atmospheric remote forcing, such as the latitudinal and longitudinal displacement

mar, en la banda de periodos entre 30 y 60 días (DEWITTE *et al.*, 2011). Por lo tanto, la variación del afloramiento costero sería afectada por el paso de la OAC y el forzante remoto atmosférico dentro del rango de 30 y 60 días, aproximadamente.

En el caso de la clorofila-a, el espectro de potencia tanto en la región sur como en la región norte muestra un pico de energía alrededor de los 50 días, siendo este más energético en la región norte. El hecho de que sea más energético en el norte nos permite pensar que la CHLO es también dominada por la advección horizontal producida por las ondas Rossby, tal como lo menciona BONHOMME *et al.* (2007), considerando que existe una señal de Rossby que está presente en el rango de períodos entre 50 y 80 días (BELMADANI *et al.*, 2012). Adicionalmente, el espectro de la clorofila-a en la región sur muestra un pico alrededor del período de 20 días; debido a la alta frecuencia de este pico, podría estar relacionado a forzantes locales como el esfuerzo de viento. A través de simulaciones físico-biogeoquímicas ECHEVIN *et al.* (2014) mostraron que la clorofila-a se propaga hacia los polos a una velocidad de 0,4 m.s<sup>-1</sup> en las capas superficiales y a 1,0 m.s<sup>-1</sup> en la subsuperficie; esta diferencia es explicada debido al impacto de la OAC de afloramiento/hundimiento sobre el ecosistema: enriqueciendo/agotando los nutrientes de la zona costera, lo cual modula la producción primaria.

of the sea level pressure system, in the 30- to 60-day period range (DEWITTE *et al.*, 2011). Therefore, the variation of the coastal upwelling would be affected by the CTW passage and the atmospheric remote forcing within the 30-to-60-day range, approximately.

Regarding chlorophyll-*a*, the power spectrum in both the southern and northern regions shows an energy peak of around 50 days, being more energetic in the northern region. This leads us to think that the CHLO is also dominated by horizontal advection produced by Rossby waves, as mentioned by BONHOMME *et al.* (2007), by considering that there is a Rossby signal that is present in the 50-to-80-day period range (BELMADANI *et al.*, 2012). Furthermore, the chlorophyll-*a* spectrum in the southern region peaks around 20 days, and the high frequency of this peak could be related to local forcings such as wind stress. ECHEVIN *et al.* (2014) showed through physical-biogeochemical simulations that chlorophyll-*a* propagates poleward at a rate of 0.4 m.s<sup>-1</sup> in the surface layers and 1.0 m.s<sup>-1</sup> in the subsurface. This difference is explained due to the impact of the upwelling/downwelling CTW on the ecosystem: enriching/depleting nutrients in the coastal zone, which modulates the primary production.

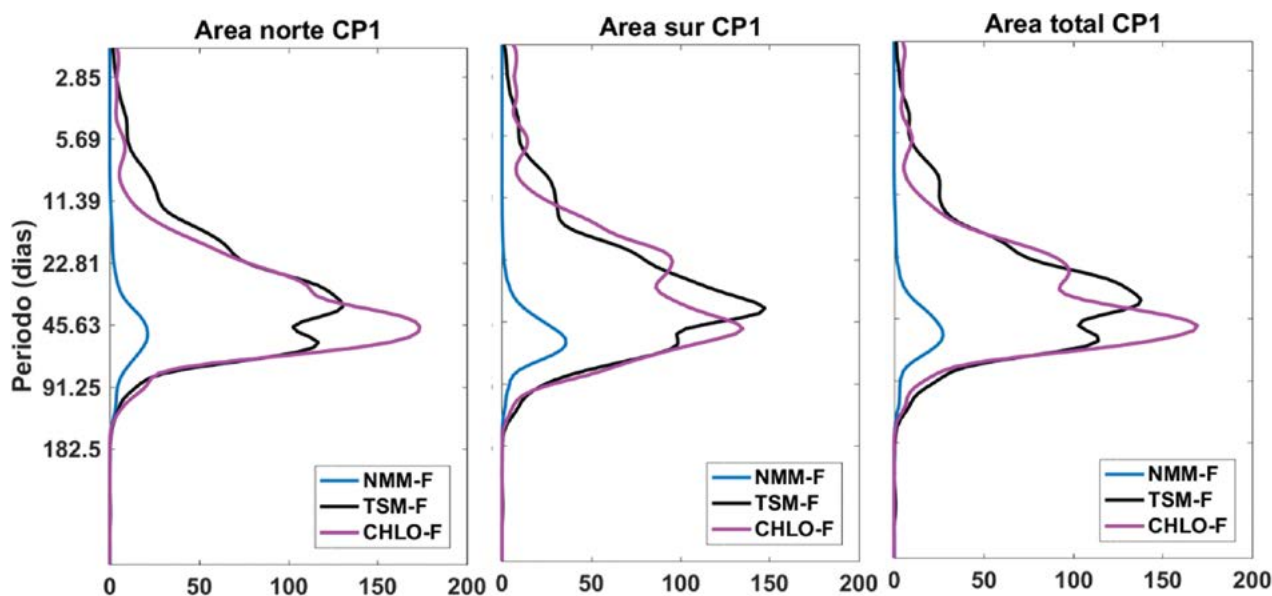


Figura 10.- Promedio global del espectro de ondículas de NMM-F (línea azul), TSM-F (línea negra) y CHLO (línea magenta) en diferentes regiones: a) zona norte, b) zona sur, c) toda la región costera

Figure 10. Global average of MSL-F (blue line), SST-F (black line), and CHLO (magenta line) wavelet spectra in different regions: a) northern zone, b) southern zone, c) the entire coastal region

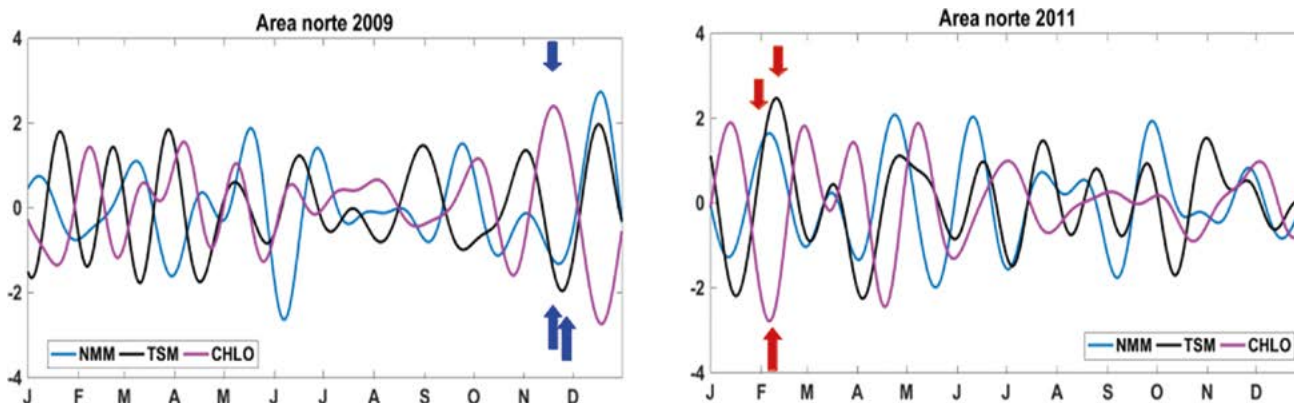


Figura 11.- Variación temporal de las series de tiempo filtradas para un rango de periodos entre 30 y 80 días para el NMM (línea azul), TSM (línea negra) y la clorofila-a (línea magenta) para los años 2009 y 2011. Las flechas rojas (azules) indican propagación de OAC de hundimiento (cálida) o afloramiento (fría)

Figure 11. Temporal variation of filtered time series for the 30-to-80-day period range for MLS (blue line), SST (black line), and chlorophyll-a (magenta line) for the years 2009 and 2011. Red arrows (blue) indicate propagation of downwelling (warm) or upwelling (cold) CTW

Por lo tanto, podemos decir que los procesos que involucran a la OAC se encuentran dentro del rango de 30 y 80 días. En la figura 11 se muestran las series temporales filtradas en un rango de periodos entre 30 y 80 días para las variables NMM, TSM y CHLO en la región norte. Las flechas rojas (azules) indican el paso de una OAC de hundimiento o cálida (afloramiento o fría) asociada al arribo de una Onda Kelvin Ecuatorial de hundimiento o cálida (afloramiento o fría). En febrero 2011, el paso de una OAC de hundimiento (flechas rojas) estuvo asociada a un pico de temperatura y a un mínimo en la clorofila-a, lo cual indicaría que un aumento de temperatura no se asocia necesariamente a un incremento de concentración de clorofila-a. Por otro lado, en noviembre del 2009 se identificó el paso de una OAC de afloramiento (flechas azules), asociada a un mínimo de temperatura y a un pico de la clorofila-a; sugiriendo que el paso de una onda de afloramiento puede impactar sobre la concentración de la clorofila-a. Por lo tanto, este análisis muestra que a escalas intraestacionales las OAC de afloramiento detectadas mediante el NMM-F, podrían contribuir a explicar la variabilidad de la clorofila-a en la región norte, tal como lo proponen ECHEVIN *et al.* (2014). Por el contrario, en la región sur no se encontró una relación entre el NMM-F y la clorofila-a (no mostrado). En el caso de la TSM-F se observó que a escalas intraestacionales existe una buena asociación con las OAC, en toda la región costera. Cabe señalar que tanto el NMM-F como la TSM-F presentaron desfases con la clorofila-a.

Therefore, we can say that the CTW processes are within the 30-to-80-day range. Figure 11 shows the filtered time series in a range of periods between 30 and 80 days for the variables MSL, SST, and CHLO in the northern region. The red (blue) arrows indicate the passage of a downwelling or warm (upwelling or cold) CTW associated with the arrival of a downwelling or warm (upwelling or cold) Equatorial Kelvin Wave. In February 2011, the passage of a downwelling CTW (red arrows) was associated with a temperature peak and a minimum in chlorophyll-a, which would indicate that an increase in temperature is not necessarily associated with an increase in chlorophyll-a concentration. On the other hand, in November 2009, we identified the passage of an upwelling CTW (blue arrows), associated with a minimum temperature and a peak in chlorophyll-a, suggesting that the passage of an upwelling wave may impact chlorophyll-a concentration. Thus, our analysis shows that intraseasonally, the upwelling CTWs detected by MLS-F could contribute to explaining the variability of chlorophyll-a in the northern region, as proposed by ECHEVIN *et al.* (2014). In contrast, no relationship between MLS-F and chlorophyll-a was found in the southern region (not shown). For SST-F, it was observed that at intraseasonal scales there is a good association with CTWs, throughout the coastal region. It should be noted that both MLS-F and SST-F were out of phase with chlorophyll-a.

Similar análisis podría ser desarrollado con modelos regionales de alta resolución donde se podría estudiar no solo variables superficiales, sino también variables en la dimensión vertical. Además, otros procesos estarían involucrados en la variabilidad de la clorofila-a; BELMADANI *et al.* (2012) mostraron que el paso de la OAC impacta sobre la Energía Cinética Turbulenta (ECT) y ésta a su vez podría impactar sobre los procesos de mesoescala, como los remolinos cercanos a la costa. Asimismo, las ondas de Rossby pueden contribuir en la variabilidad de estos procesos con la propagación hacia el oeste. BONHOMME *et al.* (2007) mostraron que la variabilidad intraestacional de las ondas Rossby en la región de afloramiento peruano pueden contribuir hasta en 8% en la variabilidad de la clorofila. Existen estudios indicando el efecto que tienen los remolinos sobre la concentración de la clorofila-a (YANG *et al.*, 2019); las anomalías de la clorofila-a están estrechamente relacionadas con fuertes remolinos ciclónicos y anticiclónicos, así como a su distancia al centro del remolino (WANG *et al.*, 2018; DUFOIS *et al.*, 2014), lo cual podría explicar la alta variabilidad que se observa con respecto a la clorofila-a. Nuestro análisis se limita a la superficie, por lo que nos deja otras hipótesis por explorar, por ejemplo, el paso de la OAC impactaría sobre los remolinos aumentando la Energía Cinética Turbulenta (ECT), lo que indirectamente afectaría los patrones espaciales de la clorofila-a; por otro lado, la propagación de las OAC se combinaría con el efecto de forzantes atmosféricos remotos y locales sobre el afloramiento, impactando la variabilidad de la clorofila-a.

## 5. CONCLUSIONES

El mapa de la FOE1 del nivel del mar mostró la zona de influencia de las OAC, cuyo ancho disminuye de norte (~ 150 km a 10°S) a sur (~ 50 km a 15°S). El espectro de potencia del nivel del mar, en el área de influencia de las OAC, mostró un pico de potencia a un periodo de 53 días, el cual correspondería al periodo de las OAC. Se calculó que la OAC se propaga a lo largo de la costa con una velocidad promedio de 1,9 m.s<sup>-1</sup>, por lo que el tiempo que demora la OAC en ir desde el norte (~3°S) hasta el sur (~14°S) es de aproximadamente 11 días.

We could develop a similar analysis with high-resolution regional models where we could study not only surface variables, but also variables in the vertical dimension. Other processes would also be involved in the variability of chlorophyll-a; BELMADANI *et al.* (2012) showed that the CTW passage impacts the Turbulence Kinetic Energy (TKE) and this, in turn, could impact mesoscale processes, such as nearshore eddies. Likewise, Rossby waves may contribute to the variability of these processes with their westerly propagation. BONHOMME *et al.* (2007) showed that the intraseasonal variability of Rossby waves in the Peruvian upwelling region can contribute up to 8% to chlorophyll variability. There are studies indicating the effect that eddies have on chlorophyll-a concentration (YANG *et al.*, 2019), while chlorophyll-a anomalies are closely related to strong cyclonic and anticyclonic eddies, as well as to their distance from the eddy center (WANG *et al.*, 2018; DUFOIS *et al.*, 2014), which could explain the high variability observed regarding chlorophyll-a. Our analysis is limited to the surface, thus leaving us other hypotheses to explore, *i.e.*, the CTW passage would impact the eddies by increasing the Turbulence Kinetic Energy (TKE), which would indirectly affect the spatial patterns of chlorophyll-a; on the other hand, the CTW propagation would combine with the effect of remote and local atmospheric forcings on the upwelling, impacting the variability of chlorophyll-a.

## 5. CONCLUSIONS

The sea level EOF1 map showed the area of influence of the CTWs, whose width decreases from north (~ 150 km at 10°S) to south (~ 50 km at 15°S). The power spectrum of sea level, in the area of influence of the CTWs, showed a power peak at a period of 53 days, which would correspond to the period of the CTWs. We estimated that the CTW propagates along the coast with a mean velocity of 1.9 m.s<sup>-1</sup>, so the time it takes for the CTW to travel from the north (~3°S) to the south (~14°S) is approximately 11 days.

A escala intraestacional, el análisis de correlación cruzada entre las variables (NMM, TSM y CHLO) dentro del rango de periodos entre 30 y 80 días para dos diferentes regiones (región norte entre 2°S y 8°S y región sur entre 10°S y 17°S), mostró mayor asociación entre el NMM y la TSM con desfase de +1 día ( $r = 0,4$ ,  $p < 0,05$ ) en la zona norte. Se encontró mayor asociación entre el NMM y la clorofila-a ( $r = -0,3$ ,  $p < 0,05$ ) en la región norte, en comparación a la región sur ( $r = -0,1$ ,  $p < 0,05$ ); el análisis mostró que en la zona norte el efecto del NMM sobre la CHLO ocurriría 4 días después del paso de la OAC. La relación entre la TSM y la CHLO en toda costa peruana ( $r = -0,5$ ,  $p < 0,05$ ) mostró un desfase de +4 días.

En general, el paso de las OACs (afloramiento/hundimiento) a pesar de tener un desfase con la TSM, guarda estrecha relación con la distribución horizontal de la TSM a lo largo de la costa en un período de alrededor de 50 días. Sin embargo, en el caso de la concentración de clorofila-a, a pesar de mostrar un pico de energía a un período de 50 días, las correlaciones cruzadas con el NMM y con la TSM son inferiores a 0,2, lo cual indica que otros factores afectan la dinámica de la clorofila-a (por ejemplo, procesos de mesoescala, biogeoquímicos o biológicos).

At the intraseasonal scale, the cross-correlation analysis between the variables (MSL, SST, and CHLO) within the 30-to-80-day period range for two different regions (the northern region between 2°S and 8°S and the southern region between 10°S and 17°S), showed a greater association between MSL and SST with +1-day lag ( $r = 0.4$ ,  $p < 0.05$ ) in the northern region. A stronger association between MSL and chlorophyll-a ( $r = -0.3$ ,  $p < 0.05$ ) was found in the northern region compared to the southern region ( $r = -0.1$ ,  $p < 0.05$ ). The analysis showed that in the northern region the effect of MSL on CHLO would occur 4 days after the CTW passage. The relationship between SST and CHLO along the Peruvian coast ( $r = -0.5$ ,  $p < 0.05$ ) showed a lag of +4 days.

Overall, the CTWs passage (upwelling/downwelling) despite having a lag with SST, is closely related to the horizontal distribution of SST along the coast over about 50 days. Nevertheless, regarding chlorophyll-*a* concentration, even though it shows an energy peak at a period of 50 days, the cross-correlations with MSL and SST are less than 0.2, which indicates that other factors affect the chlorophyll-*a* dynamics (*e.g.*, mesoscale, biogeochemical, or biological processes).

## 6. REFERENCIAS

- BELMADANI, A., ECHEVIN, V., DEWITTE, B., COLAS, F. (2012). Equatorially forced intraseasonal propagations along the Peru-Chile coast and their relation with the nearshore eddy activity in 1992–2000: A modeling study. *J. Geophys. Res.*, 117, C04025.
- BERTRAND, S., DEWITTE, B., TAM, J., DÍAZ, E., BERTRAND, A. (2008). Impacts of Kelvin wave forcing in the Peru Humboldt Current system: Scenarios of spatial reorganizations from physics to fishers. *Progress in Oceanography*, 79, 278-289.
- BRINK, K. H. (1982). A comparison of long coastal trapped wave theory with observations off Peru. *J. Phys. Oceanogr.*, 12, 897-913.
- BRINK, K. H., HALPERN, D., HUYER, A., SMITH, R. L. (1983). The physical environment of the Peruvian upwelling system. *Prog. Oceanogr.*, 12, 285–305.
- BONHOMME, C., AUMONT, O., ECHEVIN, V. (2007). Advective transport caused by intraseasonal Rossby waves: A key player of the high chlorophyll variability off the Peru upwelling region. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 112.
- CAPET, X., MCWILLIAMS, M., MOLEMAKER, M., SHCHEPETKIN, A. F. (2008). Mesoscale to Submesoscale Transition in the California Current System. Part III: Energy Balance and Flux. *Journal of Physical Oceanography*, 38.
- CHAVEZ, F., MESSIÉ, M. (2009). A comparison of Eastern Boundary Upwelling Ecosystems. *Progress in Oceanography*, 83, 80-96.
- CHAVEZ, F., BERTRAND, A., GUEVARA-CARRASCO, R., SOLER, P., CSIRKE, J. (2008). The northern Humboldt Current System: brief history, present status and a view towards the future. *Progress in Oceanography*, 79, 95-105.
- CLARKE, A. J., SHI, C. (1991). Critical frequencies at ocean boundaries. *J. Geophys. Res.*, 96, 10.731–10.738, doi:10.1029/91JC00933
- DEWITTE, B., RENAULT, L., GOUBANOVA, K., TAKAHASHI, K., GUSHCHINA D., MOSQUERA, K., PURCA, S. (2011). Modes of covariability between sea surface temperature and wind stress intraseasonal anomalies along the coast of Perú from satellite observations (2000-2008). *Journal of Geophysical Research*, Vol 116.
- DUFOIS, F., HARDMAN-MOUNFORD, N. J., GREENWOOD, J., RICHARDSON, A. J., FENG, M., HERBETTE, S., MATEAR, R. (2014). Impact of eddies on surface chlorophyll in the South Indian Ocean. *Journal of Geophysical Research: Ocean*, 119, 8061–8077.



- EHEVIN, V., AURÉLIE, A., LÉVY, M., GRACO, M., AUMONT, O., PIÉTRI, A., GARRIC, G. (2014). Intraseasonal variability of nearshore productivity in the Northern Humboldt Current System: The role of coastal trapped waves. *Continental Shelf Research*, 73,14–30.
- FUENZALIDA, R., SCHNEIDER, W., GARCÉS-VARGAS, J., BRAVO, L., LANGE, C. (2009). Vertical and horizontal extension of the oxygen minimum zone in the eastern South Pacific Ocean. *Deep-Sea Research, Part II: Topical Studies in Oceanography*, 56, 992-1003.
- GILL, A. E. (1982). *Atmosphere-Ocean Dynamics*, 664p. New York: Academic Press.
- GOUBANOVA, K., ILLIG, S., MACHU, E., ACHU, GARCON, V., DEWITTE, B. (2013). SST subseasonal variability in the Benguela upwelling system as inferred from satellite observations (2000–2008). *J. Geophys. Res. Oceans*, 118, 4092–4110, doi:10.1002/jgrc.20287
- GUTIÉRREZ, D., ENRIQUEZ, E., PURCA, S., QUIPUZCOA, 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, doi: 10.1016/j.pocean.2008.10.025
- LÉVY, M., FERRARI, R., FRANKS, P., MARTIN, A., RIVIERE. (2012). Bringing physics to life at the submesoscale. *Geophysical Research Letters*, 39, L14602.
- PIZARRO, O., CLARKE, A. J., VAN GORDER, S. (2001). El Niño Sea level and currents along the South American coast: comparison of observations with theory. *Journal of Physical Oceanography*, 31, 1891–1903.
- PIETRI, A., EHEVIN, V., TESTOR, P., CHAIGNEAU, A., MORTIER, L., GRADOS, C., ALBERT, A. (2014). Impact of a coastal-trapped wave on the near-coastal circulation of the Peru upwelling from glider data. *J. Geophys. Res. Oceans*, 119, 2109-2120.
- TORRENCE, C., COMPO, G. P. (1998). A practical guide to wavelet analysis. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 79, 61-78.
- YANG, G., ZHAO, X., LI, Y., LUI, L., WANG, F., YU, W. (2019). Chlorophyll variability induced by mesoscale eddies in the southeastern tropical Indian Ocean. *Journal of Marine Systems*, 199.
- WANG, Y., ZHANG, H-R., CHAI, F., YUAN, Y. (2018). Impact of mesoscale eddies on chlorophyll variability off the coast of Chile. *PLoS ONE*, 13(9), e0203598. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203598>