

Variabilidad interanual y tendencia de la concentración de clorofila-a y temperatura superficial en el mar peruano durante el periodo de 2003-2021

 Michel Chocaña^{*1}, Dante Espinoza², Joel Rojas¹, Jhon Guerrero¹ y Rolando Badaracco¹

¹ Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Lima, Perú

² Laboratorio de Modelado Oceanográfico, Ecosistémico y de Cambio Climático (LMOECC), Instituto del Mar del Perú (IMARPE), Callao, Perú

Recibido 18 Jun 2024 – Aceptado 30 Jul 2024 – Publicado 02 Ago 2024

Resumen

La concentración de clorofila-a en los océanos es un indicador confiable de biomasa de fitoplancton que desempeña un papel importante en el control del ecosistema marino. El objetivo principal de este estudio es analizar la variabilidad de la concentración de clorofila-a (Chl-a) y temperatura superficial del mar (TSM) en el ecosistema de afloramiento peruano en la escala de tiempo interanual, utilizando información satelital del sensor MODIS a bordo del satélite Aqua en el periodo de 2003 hasta 2021. El área de estudio está delimitada por la isobata de 1 mg m^{-3} de clorofila-a y las latitudes de 5°S y 20°S , esta área se divide en dos zonas, norte-centro (5°S - 16°S) y sur (16°S - 20°S). Iniciamos investigando las tendencias lineales, donde los resultados indicaron que se produjeron tendencias negativas de los dos parámetros en el área de estudio, notando que para la TSM es mayor este enfriamiento en la zona norte-centro ($\approx -0.076^{\circ}\text{C década}^{-1}$), en el caso de la Chl-a también muestra un mayor decrecimiento en la zona sur ($\approx -0.07\text{ mg m}^{-3}\text{ década}^{-1}$). Para determinar el periodo de variabilidad interanual de cada parámetro usamos el análisis del espectro de potencia de wavelet (EPW) y para determinar el periodo común de los dos parámetros usamos la transformada de ondas cruzadas (CWT), ambos análisis son basados en la transformada wavelet, aplicamos estos análisis a la componente principal (PC1) de cada parámetro. Los resultados permitieron identificar que en la zona norte-centro el periodo significativo de cada uno de los parámetros es mayor a 3 años y en la zona sur los periodos significativos también son mayores a 3 años. En cuanto al periodo común de variabilidad interanual de los parámetros en la zona norte-centro es de 3.4 años y en la zona sur el periodo común es de 3.3 años. Estos periodos de variabilidad interanual (>3 años) de la TSM y Chl-a en toda el área de estudio son principalmente relacionados al ENSO, estos periodos tienen mayor energía en la zona norte-centro y menor energía en la zona sur, esto estaría en concordancia con la disminución en amplitud y energía de la onda de Kelvin a medida que se propaga a lo largo de la costa peruana.

Palabras clave: Clorofila-a, temperatura superficial, tendencia lineal, transformada wavelet, variabilidad interanual.

* michel.chocana@unmsm.edu.pe

© Los autores. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0) que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada de su fuente original.



Interannual variability and trend of chlorophyll-a concentration and surface temperature in the Peruvian sea during the period 2003-2021

Abstract

Chlorophyll-a concentration in the oceans is a reliable indicator of phytoplankton biomass that plays an important role in controlling the marine ecosystem. The main objective of this study is to analyze the variability of chlorophyll-a concentration (Chl-a) and sea surface temperature (SST) in the Peruvian upwelling ecosystem on the interannual time scale, using satellite information from the MODIS sensor on board the Aqua satellite in the period from 2003 to 2021. The study area is delimited by the 1 mg m⁻³ chlorophyll-a isobath and the latitudes of 5°S and 20°S, this area is divided into two zones, north-center (5°S-16°S) and south (16°S-20°S). We began by investigating the linear trends, where the results indicated that negative trends of the two parameters occurred in the study area, noting that for the SST this cooling is greater in the north-central zone ($\approx -0.076^\circ\text{C decade}^{-1}$), in the case of Chl-a it also shows a greater decrease in the south zone ($\approx -0.07 \text{ mg m}^{-3} \text{ decade}^{-1}$). To determine the interannual variability period of each parameter we used the wavelet power spectrum (EPW) analysis and to determine the common period of the two parameters we used the cross-wavelet transform (CWT), both analyses are based on the wavelet transform, we apply these analyses to the principal component (PC1) of each parameter. The results allowed us to identify that in the north-central zone the significant period of each of the parameters is greater than 3 years and in the south zone the significant periods are also greater than 3 years. Regarding the common period of interannual variability of the parameters in the north-central zone it is 3.4 years and in the south zone the common period is 3.3 years. These periods of interannual variability (>3 years) of the SST and Chl-a in the entire study area are mainly related to ENSO, these periods have greater energy in the north-central zone and less energy in the south zone, this would be in accordance with the decrease in amplitude and energy of the Kelvin wave as it propagates along the Peruvian coast.

Keywords: Chlorophyll-a, surface temperature, linear trend, wavelet transform, interannual variability.

1. Introducción

Aunque el área de la zona costera cercana al Perú representa menos del 1% del océano mundial, aporta más del 8% de la producción pesquera mundial [1, 2], esto en gran medida a la corriente costera de Perú (o Humboldt) (4-15 cm s⁻¹) está más cerca de la costa y confinada sobre los 200 m de profundidad, transportando agua fría (14-16°C) en verano. También la corriente oceánica del Perú (hasta 700 m de profundidad) alcanza velocidades más altas que la corriente costera del Perú. La temperatura de la superficie del mar (TSM) y la clorofila-a (Chl-a) son los parámetros más importantes utilizados para estudiar la variabilidad y la dinámica de los ecosistemas marinos [3]. La TSM tiene una gran influencia en el clima y el tiempo, y se utiliza como indicador de productividad, contaminación y cambio climático global [4]. La Chl-a es el pigmento principal del fitoplancton y se considera un indicador o índice de la biomasa del fitoplancton, y refleja la producción primaria en ambientes marinos [5]. Los ecosistemas marinos cambian continuamente en diferentes escalas espaciales y temporales debido a procesos naturales y actividades antropogénicas. El sistema de surgencia peruano (del inglés: PUS, *Peruvian upwelling system*) muestra variabilidad en una amplia gama de escalas de tiempo, incluidas las intraestacionales [6, 7],

estacionales [8] e interanuales a decadal [9]. Se ha identificado un vínculo claro entre la variabilidad interanual de los vientos, las surgencias costeras, la profundidad de la termoclina, las anomalías del nivel del mar y la TSM a lo largo de las costas occidentales de América del Sur con índices climáticos, como El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) [10, 11] y la Oscilación Decenal del Pacífico. El afloramiento costero peruano es peculiar porque los vientos sostienen el proceso de afloramiento durante todo el año y los ciclos de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) inducen una distinta variabilidad interanual del ecosistema. La banda de frecuencia interanual, de 2 a 9 años [12], está asociada con el "ciclo ENSO". La estructura espacial de la variabilidad interanual refleja la influencia del forzante remoto oceánico asociado a las ondas Kelvin oceánicas ecuatoriales [13]. Los datos de teledetección se han utilizado ampliamente para estudiar el patrón de distribución espacial y temporal de la TSM y Chl-a a lo largo de la costa de Sudamérica [14-17]. Se han utilizado varias técnicas estadísticas, como el análisis de funciones ortogonales empíricas (EOF) y sus componentes principales (PC), la transformada Wavelet (WT), para extraer los patrones temporales y espaciales de los componentes de TSM y Chl-a [17]. El análisis de regresión lineal se ha utilizado a menudo para el análisis de tendencias de datos marinos y atmosféricos debido a su simplicidad. Debido

a que la regresión lineal se ve afectada por la pendiente de regresión y el coeficiente de correlación de series no lineales, no puede indicar la tendencia precisa y no puede simular los cambios en el futuro. En este caso, técnicas de análisis de tendencias más sólidas, como la pendiente de Sen y la prueba de Mann-Kendall, podrían ser más eficientes para el análisis de tendencias de los parámetros meteorológicos y oceánicos [18]. Nuestro objetivo general es encontrar el vínculo entre la Chl-a y TSM en el ecosistema de afloramiento peruano en la escala de tiempo interanual durante el período 2003- 2021. Nuestros objetivos específicos son los siguientes: 1) identificar los principales modos de variabilidad dentro de cada conjunto de datos derivados de satélites (TSM y Chl-a), 2) estudiar las tendencias de los dos campos, y 3) definir el periodo común de variabilidad conjunta de los parámetros Chl-a y TSM en la zona norte-centro y zona sur.

1.1. Área de estudio

El área de estudio fue efectuada en un segmento del océano costero peruano, obtenida a partir de la imagen promedio de Clorofila-a del sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) a bordo del satélite Aqua, para el periodo 2003-2021 (Figura 1b), esta área es delimitada por las latitudes de 5°S y 20°S con la isobata de 1 mg m⁻³, esta área es dividida en dos zonas: Norte-Centro (5°S - 16°S) y Sur (16°S - 20°S) (Figura 1a).

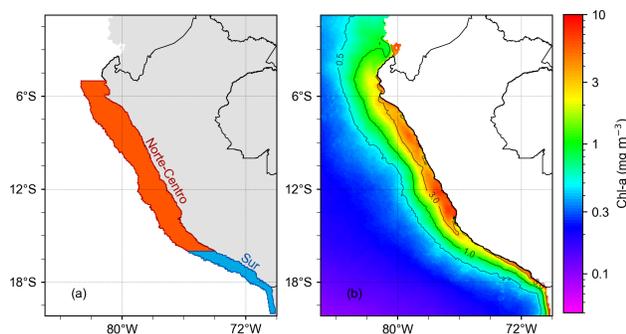


Figura 1: a) Área de estudio zona Norte-centro (naranja) y Sur (celeste), b) mapa promedio de Chl-a y sus isobatas de 3, 1 y 0.5 mg m⁻³.

2. Materiales y métodos

2.1. Datos utilizados

Las imágenes satelitales empleadas para este estudio son los productos de Clorofila-a (Chl-a, 1mg m⁻³) y Temperatura Superficial del Mar (TSM, °C) del sensor MODIS/Aqua este conjunto de datos tiene una resolución espacial de 9 × 9 km, diarias en el Nivel 3

(V2022.0) y cubre 19 años (de 2003 a 2021), disponible en (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/13/>).

2.2. Metodología

En la presente sección se muestra la metodología utilizada en el estudio para el análisis de variabilidad en la escala interanual de la Chl-a y TSM en base a técnicas estadísticas. El procesamiento de estas imágenes de satélite se realizará con el software ENVI y el lenguaje de programación IDL para la georreferenciación y extracción de las variables geofísicas, para el análisis estadístico se usará el lenguaje de programación en MATLAB y R, (ver Figura 2).

a. Arreglos a la data satelital original

En principio los datos diarios son promediados cada 5 días (pentada) a fin de obtener 6 valores mensuales, obteniendo de esta manera 72 datos anuales y 1368 para todo el periodo de estudio, es decir de enero del 2003 a diciembre del 2021.

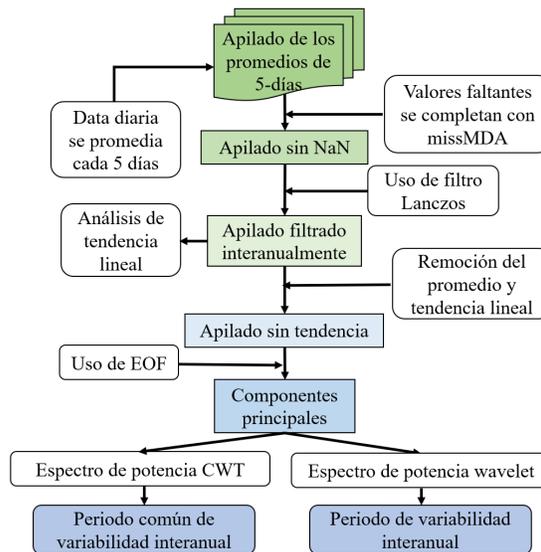


Figura 2: Diagrama de flujo de los procedimientos aplicados para realizar análisis estadístico de la data satelital de Chl-a y TSM.

b. Reemplazo de observaciones satelitales faltantes de Chl-a y TSM

Seguidamente, los datos satelitales contienen vacíos (NaN) en los mapas imágenes de TSM y Chl-a, entonces se realiza algunas estadísticas descriptivas de cuantos valores faltan en cada serie de tiempo debido a nubes o mal funcionamiento, se calculó el porcentaje de observaciones validas (OV) de Chl-a y TSM válido en cada

punto del área. Las OV en cada punto de la cuadrícula se calcularon como $OV = 100\% \times \frac{N_V}{N_T}$, donde $N_T = 1368$ fue el número total de datos y N_V fue el número de datos con observaciones válidas durante todo el período de interés. Los puntos de la cuadrícula con porcentajes de observaciones satelitales válidas inferiores al 10% se excluyeron de análisis adicionales. Tenga en cuenta que la sustitución de las observaciones satelitales faltantes se realizó solo en puntos de la cuadrícula donde los porcentajes de observaciones satelitales válidas eran superiores al 10%. Posteriormente las series se completan mediante un proceso de interpolación usando el paquete `missMDA` de R (<https://cran.r-project.org/web/packages/missMDA/index.html>), los valores faltantes se predicen utilizando el algoritmo PCA (*Principal component analysis*) iterativo para un número predefinido de dimensiones [19].

c. Cálculo de la anomalía interanual y tendencia lineal

Como el presente estudio se centra en investigar las variaciones en la escala interanual, se calcularon las anomalías interanuales, todas las cuadrículas de las variables se someten a un filtro Lanczos, por lo que consideramos un paso alto Lanczos con una frecuencia de corte igual a $1/10$ años⁻¹ [$\approx 1/720$ pentadas⁻¹] y un paso bajo Lanczos con una frecuencia de corte igual a $1/2$ años⁻¹ [$\approx 1/144$ pentadas⁻¹], de esta manera se obtiene un conjunto de datos libre de señales de alta y baja frecuencia, esta banda de 2 a 10 años está asociada con el “ciclo ENSO” [11,12], el código fuente del filtro Lanczos está disponible en: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/>, la tendencia lineal de las anomalías interanuales se calculó aplicando regresión lineal mediante el método de ajuste de mínimos cuadrados, se utilizó la prueba no paramétrica de Mann-Kendall [20] para evaluar la significación estadística de la tendencia lineal.

e. Análisis EOF

En la literatura, el análisis EOF (del inglés EOF: *Empirical Orthogonal Functions*) ha sido una poderosa herramienta para la compresión de datos y la reducción de dimensionalidad en la ciencia de la atmósfera y los océanos [21,22]. Dado cualquier campo meteorológico u oceanográfico espacio-temporal, el análisis EOF encuentra un conjunto de patrones espaciales ortogonales junto con un conjunto de series temporales asociadas no correlacionadas, y da una medida de la importancia de cada patrón. Los patrones espaciales se denominan EOF y las series de tiempo asociadas generalmente se denominan componentes principales (del inglés PC: *Principal component*) [23]. En el estudio actual, se realizó un análisis EOF para extraer los modos dominantes de variacio-

nes espacio-temporales en la región especificada durante 2003-2021.

f. Análisis de wavelet

La Transformada Wavelet (del inglés WT: *Wavelet transform*) permite el análisis de la periodicidad de distintos parámetros (TSM, Chl-a, vientos, etc.) en diferentes escalas de variabilidad temporal y no necesita series estacionarias [24]. La nomenclatura wavelet se refiere al conjunto de pequeñas ondas formadas por dilatación y traslación de una función, cuadráticamente integrable en el rango de los números reales, es decir, debe tener energía finita [25]. Esta función se llama onda-madre y sus funciones derivadas son las formas de onda hijas [26]. Por lo tanto, se puede utilizar para analizar series de tiempo con energía no estacionaria a diferentes frecuencias [27].

Para ser admisible como onda, la función debe tener media cero y localizarse tanto en el espacio de tiempo como el de frecuencia [28]. Una función que satisface esta condición es la wavelet de Morlet, que consiste en una onda exponencial compleja (onda sinusoidal) multiplicada por una envolvente gaussiana, que es adecuada para el análisis de señales geofísicas y series de tiempo por su gran número de oscilaciones. La WT continua se puede obtener mediante una convolución entre series temporales con función wavelet dilatada/trasladada. El espectro de potencia de wavelet (EPW) representa la densidad de energía de la wavelet a través del tiempo y los dominios de frecuencia se obtienen como la potencia al cuadrado de la amplitud de la wavelet. En muchas aplicaciones, la estimación de la potencia de las ondas para frecuencias de muestreo altas debería mejorarse con la ayuda de una función del parámetro de expansión, evitando la subestimación [29].

La transformada de ondas cruzadas (del inglés CWT: *cross wavelet transforms*) es una poderosa herramienta utilizada para probar la dependencia propuesta entre diferentes variables en series de tiempo. El CWT es análogo a la covarianza. La diferencia de fase es otra variable importante utilizada para analizar señales multiescala. Los valores de fase indican entonces la diferencia angular de los máximos de las wavelets. El espectro integrado de wavelets (EIW) es una forma de trazar el comportamiento de la varianza explicada asociada con cada período de wavelets, mostrando aquellas con mayor potencia entre la separación de períodos. El espectro integrado de wavelets se obtiene por consolidación a lo largo del tiempo de análisis. En este trabajo, el análisis de EPW se obtuvo mediante su aplicación en Matlab (<https://github.com/ct6502/wavelets>) y CWT de la biblioteca R WaveletComp (<https://cran.r-project.org/web/packages/WaveletComp/index.html>) [30].

3. Resultados y discusión

A fin de registrar los patrones sobresalientes, agentes de variación de largo y corto periodo de variabilidad en la isobata de 1mg m^{-3} desde los 5°S hasta 20°S , esta se analizara en dos regiones Norte-Centro (5°S - 16°S) y Sur (16°S - 20°S) (ver Figura 1a), como etapa inicial determinamos espacialmente las tendencias lineales y temporalmente mediante series de tiempo, obtenidos como promedios del área delimitada por la tendencia estadísticamente significativa (+) con un nivel de confianza del 95%. Luego aplicamos el análisis EOF para registrar el primer patrón o modo de las anomalías interanuales, luego obtenemos el EPW asociada a la primera componente principal y su espectro integrado de wavelet (EIW), donde determinaremos los periodos más importantes de cada parámetro. Finalizando con el análisis del espectro de potencia CWT de la primera componente principal de los parámetros en estudio.

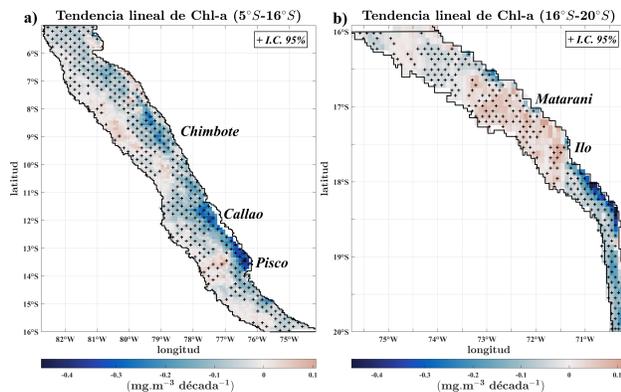


Figura 3: Distribución espacial de las tendencias de Chl-a interanual en a) 5°S - 16°S y b) 16°S - 20°S , durante el periodo 2003-2021. La cruz (+) indica que la tendencia es estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95% según el método no paramétrico de Mann-Kendall.

3.1 Anomalía interanual de Chl-a

Calculamos la distribución espacial de las tendencias lineales de Chl-a durante 2003-2021, en la zona norte-centro y sur, mostramos los resultados en la Figura 3. Donde se encontró que las tendencias estadísticamente significativas (nivel de confianza del 95%) son negativas en la mayor parte del área de estudio con mayor incidencia en el borde costero (Figura 3a), también en menor cantidad las tendencias son positivas, pero generalmente fueron insignificantes. En aguas costeras, las magnitudes de las tendencias negativas fueron más fuertes y significativas a lo largo de la costa de Callao y Pisco (Figura 3a) y al sur de Ilo (Figura 3b). Este análisis mostró que la distribución espacial de las tendencias lineales de Chl-a Figura 3a y 3b se asemejan a los patrones espaciales

del EOF-2 (Figura 5b) y EOF-2 (Figura 6b) respectivamente. Se realizó el promedio espacial del apilado de anomalía interanual de Chl-a, donde las tendencias son significativas (+).

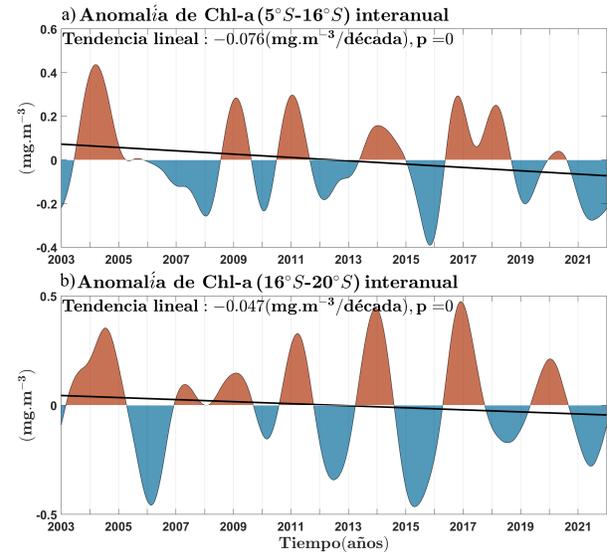


Figura 4: Anomalía interanual de Chl-a en a) 5°S - 16°S y b) 16°S - 20°S , obtenido como el promedio del área delimitada por la tendencia estadísticamente significativa (+) con un nivel de confianza del 95%.

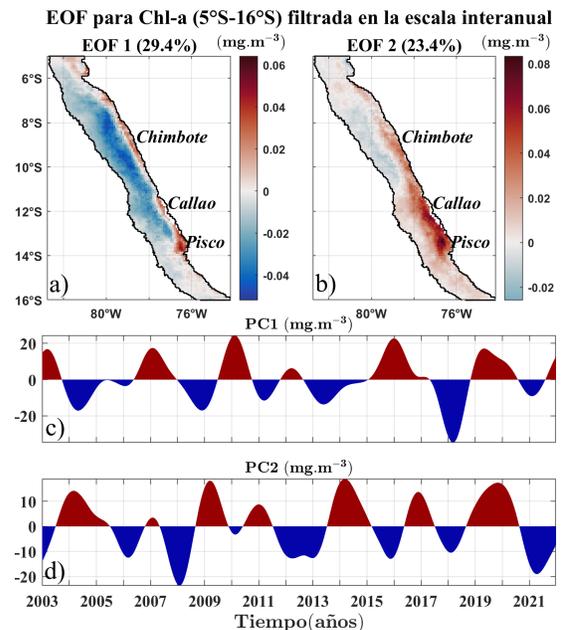


Figura 5: Patrones espaciales del a) EOF-1 y b) EOF-2 para la Chl-a (5°S - 16°S) interanual con su porcentaje de varianza explicada y sus correspondientes series de tiempo de las componentes principales c) PC1 y d) PC2.

Por lo tanto, la tendencia promedio del área de estudio muestra una tendencia negativa, a un ritmo de aproximadamente $-0.076 \text{ mg m}^{-3}/\text{década}$ con $p=0$ (Figura 4a) y $-0.047 \text{ mg m}^{-3}/\text{década}$ con $p=0$ (Figura 4b), aunque hubo una relajación a principios de la década de 2004, 2009, 2011, 2014, 2017 y 2018 (Figura 4a) y 2004, 2007, 2009, 2011, 2014, 2017 y 2018 (Figura 4b). Encontramos que hubo dos eventos fuertes de tendencia al incremento y decremento que ocurrieron durante 2010 (La Niña Costera-Moderado), 2013 (La Niña Costera-Fuerte) y 2006/2007 (El Niño Costero-Débil), 2009 (El Niño Costero-Débil), 2014/2015 (El Niño Costero-Débil) (Figura 4a) (Fuente: http://met.igp.gob.pe/el_niño/lista_eventos.html)

En el caso del patrón espacial del EOF modo 1 de Chl-a [$5^{\circ}\text{S}-16^{\circ}\text{S}$] con una fracción de varianza de 29.4%, define un comportamiento bipolar, negativo mar adentro y positivo en el borde costero, donde existe una banda estrecha desde Paita ($\sim 5^{\circ}\text{S}$) hasta Pisco ($\sim 14^{\circ}\text{S}$) (Figura 5a), el patrón espacial del EOF modo 2 de Chl-a, define un núcleo de variación de forma más clara entre Callao y Pisco, su varianza es 23.4% del total. En el caso del patrón espacial del EOF modo 1 de Chl-a [$16^{\circ}\text{S}-20^{\circ}\text{S}$] (Figura 6a) define un comportamiento uniforme positivo, con una fracción de varianza de 50.9%, el patrón espacial del EOF modo 2 de Chl-a, define dos núcleos de variación de forma más clara en el norte y sur siendo la línea de la longitud de 75°W la que separa estos núcleos, su varianza es 21.0% del total.

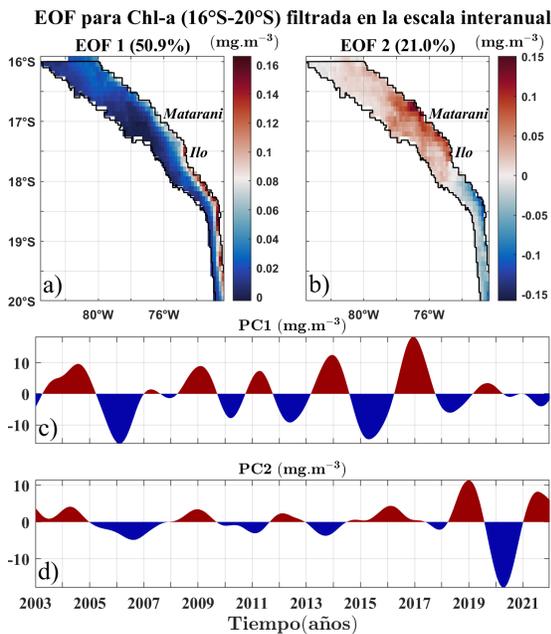


Figura 6: Patrones espaciales del a) EOF modo 1 y b) EOF modo 2 para la Chl-a ($16^{\circ}\text{S}-20^{\circ}\text{S}$) interanual con su porcentaje de varianza explicada y sus correspondientes series de tiempo de las componentes principales c)PC1 y d)PC2.

El análisis wavelet a la serie de tiempo PC1 de Chl-a ($5^{\circ}\text{S}-16^{\circ}\text{S}$) (Figura 7a), mostró la presencia de 2 señales fuertemente pronunciadas cercanas al periodo de 3.4 y 4.4 años (Figura 7b) los cuales son significativos. Se encontró que la contribución cercana al periodo de 4.4 años es fuertemente pronunciada. Vemos que la contribución del periodo se produce con mayor intensidad en todos los años de estudio. En el caso de la serie de tiempo PC1 de Chl-a ($16^{\circ}\text{S}-20^{\circ}\text{S}$) (Figura 7d), se detectaron 3 señales de 3, 4.4 y 7 años, siendo las 3 señales significativas. Vemos que la contribución cercana al periodo de 3 años es fuertemente pronunciada. Notamos que la intensidad (potencia) de estas señales predominantes son distintas, siendo mayor en la zona norte-centro ($5^{\circ}\text{S}-16^{\circ}\text{S}$) ($T=4.4$ años) en comparación a la zona sur ($16^{\circ}\text{S}-20^{\circ}\text{S}$) ($T=3$ años).

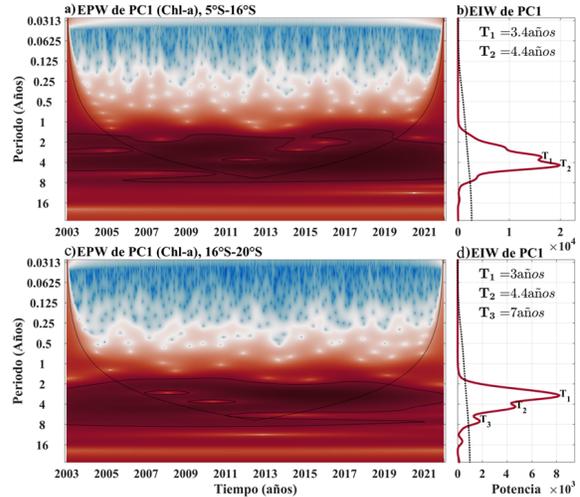


Figura 7: a) EPW para la Chl-a en $5^{\circ}\text{S}-16^{\circ}\text{S}$ y su b) EIW. También el c) EPW y su d) EIW en $16^{\circ}\text{S}-20^{\circ}\text{S}$.

3.2 Anomalia interanual de TSM en la costa del Perú

Calculamos la distribución espacial de las tendencias lineales de TSM durante 2003-2021, en la zona norte-centro ($5^{\circ}\text{S}-16^{\circ}\text{S}$) y sur ($16^{\circ}\text{S}-20^{\circ}\text{S}$), mostramos los resultados en la Figura 8a y 8b. Donde se encontró que las tendencias estadísticamente significativas (nivel de confianza del 95%) son negativas en la mayor parte del área de estudio desde los 11°S hasta los 16°S (Figura 8a) y en toda el área (Figura 8b). En aguas costeras, las magnitudes de las tendencias que tienden al enfriamiento fueron más fuertes y significativas a lo largo de la costa de Callao y Pisco (Figura 8a) y al norte de Matarani (Figura 8b). Este análisis mostró que la distribución espacial de las tendencias lineales de TSM Figura 8a y Figura 8b se asemejan a los patrones espaciales del EOF-

1 (Figura 5a) y EOF-1 (Figura 6a) respectivamente. Se realizó el promedio espacial del apilado de anomalía interanual de TSM, donde las tendencias son significativas (+). Por lo tanto, la tendencia promedio del área de estudio muestra una tendencia negativa, a un ritmo de aproximadamente $-0.047^{\circ}\text{C}/\text{década}$ con $p=0.003$ (Figura 9a) y $-0.071^{\circ}\text{C}/\text{década}$ con $p=0$ (Figura 9b). Encontramos que hubo dos eventos fuertes de tendencia al calentamiento y enfriamiento que ocurrieron durante 2008 (El Niño Costero-Débil), 2014 (El Niño Costero-Débil), 2018/2019 (El Niño Costero-Débil) y 2007 (La Niña Costera-Moderado), 2010 (La Niña Costera-Moderado), 2017 (La Niña Costera-Débil) (Figura 9a) (Fuente: http://met.igp.gob.pe/elnino/lista_eventos.html).

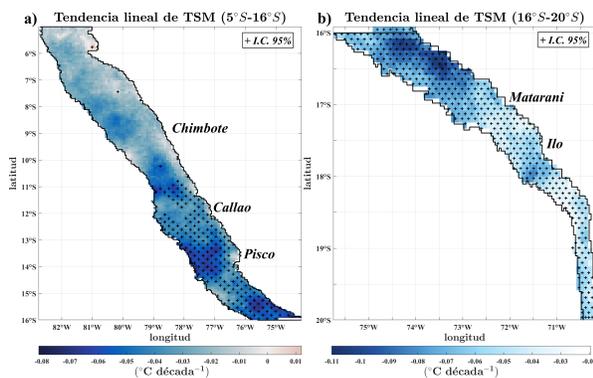


Figura 8: Distribución espacial de las tendencias de TSM interanual en a) $5^{\circ}\text{S}-16^{\circ}\text{S}$ y b) $16^{\circ}\text{S}-20^{\circ}\text{S}$, durante el periodo 2003-2021. La cruz (+) indica que la tendencia es estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95% según el método no paramétrico de Mann-Kendall.

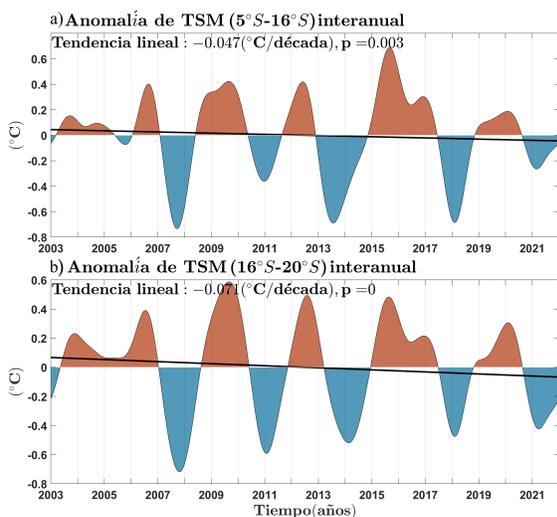


Figura 9: Anomalía interanual de TSM en a) $5^{\circ}\text{S}-16^{\circ}\text{S}$ y b) $16^{\circ}\text{S}-20^{\circ}\text{S}$, obtenido como el promedio del área delimitada por la tendencia estadísticamente significativa (+) con un nivel de confianza del 95%.

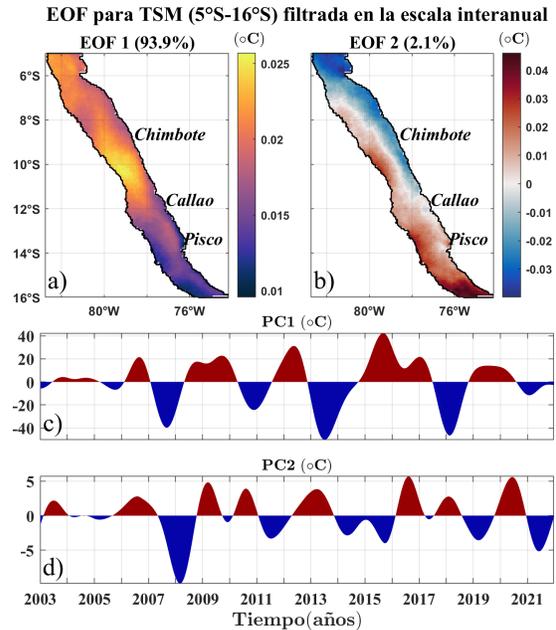


Figura 10: Patrones espaciales del a) EOF modo 1 y b) EOF modo 2 para la TSM ($16^{\circ}\text{S}-20^{\circ}\text{S}$) interanual con su porcentaje de varianza explicada y sus correspondientes series de tiempo de las componentes principales c)PC1 y d)PC2.

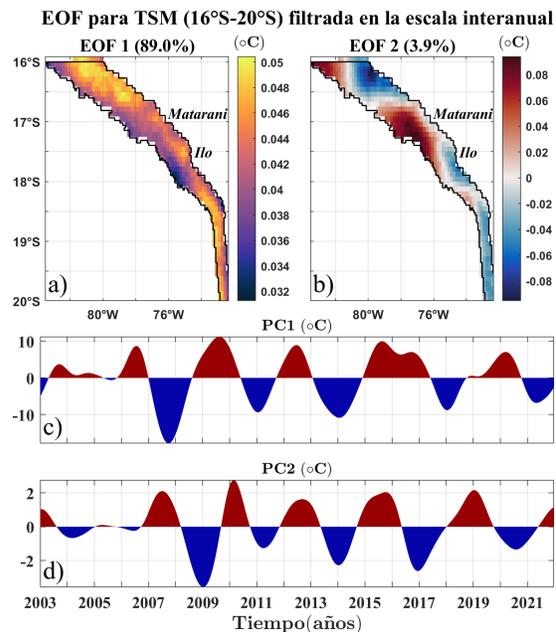


Figura 11: Patrones espaciales del EOF-1 y EOF-2 para la TSM ($16^{\circ}\text{S}-20^{\circ}\text{S}$) interanual con su porcentaje de varianza explicada y sus correspondientes series de tiempo de las componentes principales.

En el caso del patrón espacial del EOF modo 1 de TSM [$5^{\circ}\text{S}-16^{\circ}\text{S}$] (Figura 10a) con una fracción de varian-

za de 93.9 %, define un comportamiento uniforme positivo (núcleo intenso en la latitud de 10°S), que se propaga desde el norte (5°S) disminuyendo progresivamente hasta los 16°S, el patrón espacial del EOF modo 2 de TSM, define dos núcleos de variación de forma más clara en el norte y sur siendo la línea de latitud de 11°S la que separa estos núcleos, su varianza es 2.1 % del total.

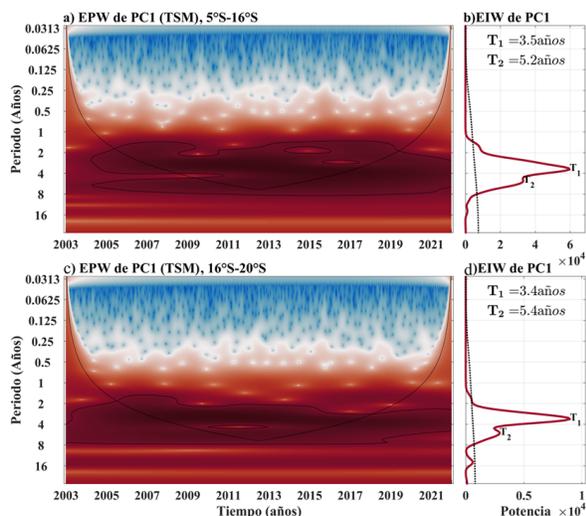


Figura 12: a) EPW para la TSM en 5°S-16°S y su b) EIW. Tambien el c) EPW y su d) EIW en 16°S-20°S.

En el caso del patrón espacial del EOF modo 1 de TSM [16°S-20°S] (Figura 11a) define un comportamiento uniforme positivo con núcleo en la latitud de 16°S, con una fracción de varianza de 89.0 %, el patrón espacial del EOF modo 2 de TSM, define dos núcleos de variación de forma más clara en el norte y sur siendo la línea de la longitud de 80°W la que separa estos núcleos, su varianza es 3.9 % del total.

Mediante el análisis wavelet a la serie de tiempo PC1 de TSM (5°S-16°S) (Figura 10c), se detectaron 2 señales de 3.5 y 5.2 años, siendo señales significativas (Figura 12b). Vemos que la contribución cercana al periodo de 3.5 años es una señal fuertemente pronunciada y se produce con mayor intensidad a lo largo de todos los años en estudio. En el caso de la serie de tiempo PC1 de TSM (16°S - 20°S) (Figura 11c), mostró la presencia de 2 señales fuertemente pronunciadas cercanas al periodo de 3.4 y 5.4 años (Figura 12d) los cuales son significativos. Vemos que la contribución del periodo se produce con mayor intensidad a lo largo de todos los años de estudio. Notamos que la intensidad (potencia) de estas señales predominantes son distintas, siendo mayor en la zona norte-centro (5°S-16°S) en comparación a la zona sur (16°S-20°S).

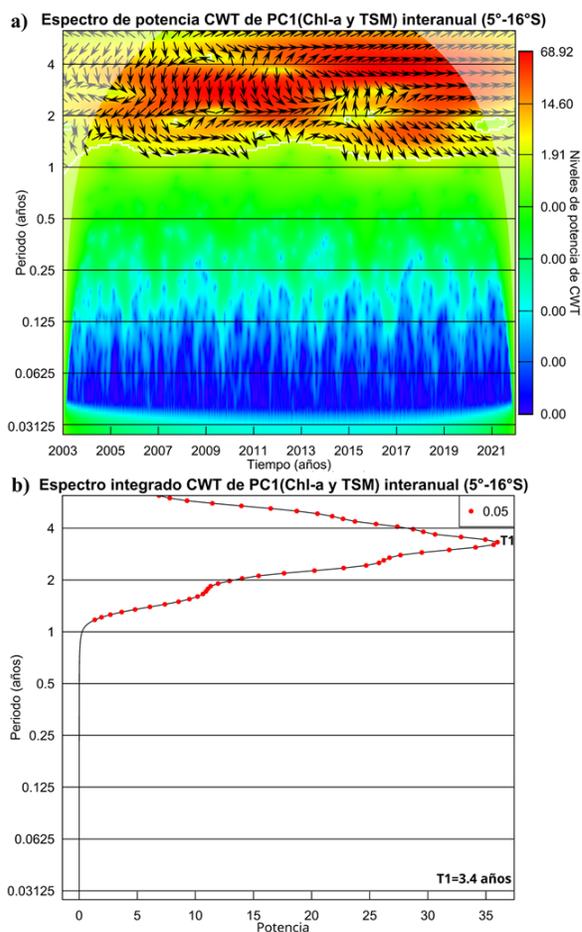


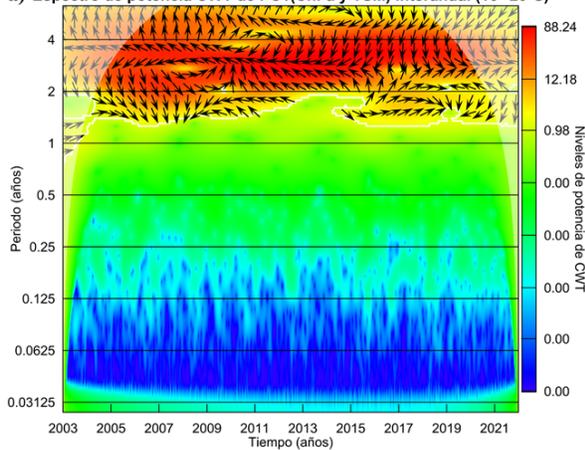
Figura 13: a) Espectro de potencia CWT para la Chl-a en 5°S-16°S de la PC1 de Chl-a y TSM filtrado en la escala interanual, las flechas indican las diferencias de fase entre las señales. b) Espectro integrado CWT, los puntos en rojos indican los valores significativos del espectro de ondas cruzadas de potencia global para un nivel de significancia de 5 % (0.05).

Los datos considerados en el análisis mediante la transformada de ondas cruzadas (CWT) son la PC1 de Chl-a y TSM filtrados en la escala interanual en la región de 5°S-16°S y 16°S-20°S. La señal más fuerte y estadísticamente significativa dentro del espectro integrado CWT de PC1 (Chl-a y TSM) interanual se ubica en el periodo de 3.4 años (Figura 13b) y 3.3 años (Figura 14b). Se detectaron fases muy distintas en la Figura 13a, en fase (~ 180°) no está presente en ningún año, en desfase (~ 0°) en los años 2017 hasta el 2021, y de máximo en diferentes momentos (~ 270°) en el año 2005 hasta el 2016. En el caso de la Figura 14a, en fase (~ 0°) presente en el año 2020 y 2021, en desfase (~ 180°) en los años 2005 hasta el 2014, y de máximo en diferentes momentos (~ 270°) en el año 2015 hasta el año 2019.

Periodos dominantes de variabilidad interanual(años)			
Región	PCI del Parámetro	Análisis	Periodo significativo en energía
5°-16°S	Chl-a	EPW	$T_1=3.4 < T_2=4.4$
16°-20°S		EPW	$T_3=7 < T_2=4.4 < T_1=3$
5°-16°S	TSM	EPW	$T_2=5.2 < T_1=3.5$
16°-20°S		EPW	$T_2=5.4 < T_1=3.4$
5°-16°S	Chl-a y TSM	CWT	$T_1=3.4$
16°-20°S		CWT	$T_1=3.3$

Tabla 1: Periodos dominantes de variabilidad interanual.

a) Espectro de potencia CWT de PC1(Chl-a y TSM) interanual (16°-20°S)



b) Espectro integrado CWT de PC1(Chl-a y TSM) interanual (16°-20°S)

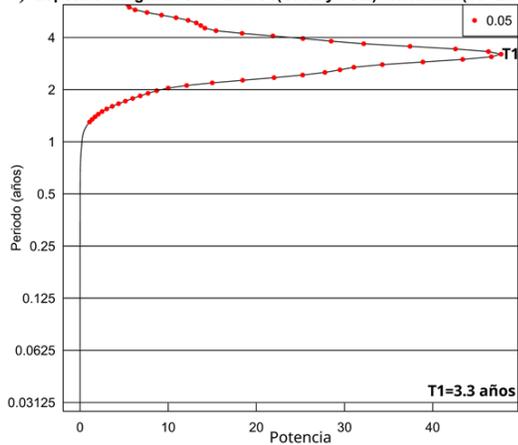


Figura 14: a) Espectro de potencia CWT para la Chl-a en 16°S-20°S de la PC1 de Chl-a y TSM filtrado en la escala interanual, las flechas indican las diferencias de fase entre las señales. b) Espectro integrado CWT, los puntos en rojos indican los valores significativos del espectro de ondas cruzadas de potencia global para un nivel de significancia de 5% (0.05).

4. Conclusiones

Se observa que en la distribución espacial de la tendencia de TSM entre los 11°S-16°S presenta un enfriamiento estadísticamente significativo (intervalo de confianza de 95%) de moderado a intenso ($\approx -0.08^\circ\text{C}$ década $^{-1}$) mientras que para la Chl-a se presenta una disminución estadísticamente significativo de moderado a lo largo de todo el borde costero ($\approx -0.4 \text{ mg m}^{-3}$ década $^{-1}$), luego a partir de estos mapas de distribución de tendencias se resaltan los pixeles estadísticamente significativos de las anomalías interanuales de Chl-a y TSM, estos pixeles se promedian para obtener series de tiempo, donde la Chl-a mostró una tendencia de -0.076 mg m^{-3} década $^{-1}$ en promedio y la TSM mostró una tendencia de -0.047°C década $^{-1}$ en promedio, durante 2003-2021 en la zona norte-centro.

Se observa que en la distribución espacial del primer modo de las anomalías interanuales (EOF1) en la zona norte-centro (5°S-16°S) de la Chl-a muestra un núcleo de mayor intensidad enmarcada en la plataforma continental disminuyendo a medida que se aleja de esta, la TSM muestra una menor intensidad a medida que se aleja de la línea ecuatorial.

También se determinó los periodos individuales y conjunto de variabilidad en la escala interanual de Chl-a y TSM en las zonas de estudio para el período 2003-2021, se determinaron usando el análisis EPW en cada uno de los parámetros, para la zona norte-centro (5°S-16°S) sus periodos son de: 4.4 años (Chl-a), 3.5 años (TSM) y en la zona sur (16°S-20°S) sus periodos son de: 3 años (Chl-a), 3.4 años (TSM), y el período dominante de variabilidad conjunta usando el análisis CWT es: 3.4 años (Chl-a y TSM) en la zona norte-centro y 3.3 años (Chl-a y TSM) en la zona sur, se concluye que los periodos mayores a 3 años son más intensos de forma individual y conjunta en la zona norte-centro y sur.

Estos periodos de variabilidad interanual (mayores a 3 años) de la TSM y Chl-a en toda el área de estudio son principalmente relacionados al ENSO, estos periodos tienen mayor energía en la zona norte-centro (5°S-16°S) y menor energía en la zona sur (16°S-20°S) esto estaría en concordancia con la disminución en amplitud y energía de la onda de Kelvin a medida que se propaga hacia el sur.

Agradecimientos

Un agradecimiento al Grupo de Investigación Física de Cambios Ambientales y la Teledetección (LABTEL).

Referencias

- [1] D. Pauly and V. Christensen. Primary production required to sustain global fisheries, *Nature*, 374(6519), 255–257, (1995). Doi: <https://doi.org/10.1038/374255a0>
- [2] L. Hutchings, C. Van der Lingen, L. Shannon, R. Crawford, H. Verheye, C. Bartholomae et al. The Benguela Current: An ecosystem of four components. *Progress in Oceanography*, 83(14), 15–32, (2009). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.07.046>
- [3] H. Demarcq, RG Barlow, F.A. Shillington. Climatology and variability of sea surface temperature and surface chlorophyll in the Benguela and Agulhas ecosystems as observed by satellite imagery. *Afr. J. Mar. Sci.* 25, 363–372. (2003). Doi: <https://doi.org/10.2989/18142320309504022>
- [4] M. Edwards and A.J. Richardson. Impact of climate change on marine pelagic phenology and trophic mismatch. *Nature* 430, 881–884. (2004). Doi: <https://doi.org/10.1038/nature02808>
- [5] H. Song, R. Ji, C. Stock, Z. Wang. Phenology of phytoplankton blooms in the Nova Scotian Shelf–Gulf of Maine region: remote sensing and modeling analysis. *J. Plankton Res.* 32, 1485–1499. (2010). Doi: <https://doi.org/10.1093/plankt/fbq086>
- [6] D. Gutiérrez, E. Enríquez, S. Purca, L. Quipúzcoa, R. Marquina, G. Flores, G. and M. Graco. Oxygenation episodes on the continental shelf of central Peru: Remote forcing and benthic ecosystem response, *Prog. Oceanogr.*, 79, 177–189, (2008). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2008.10.025>
- [7] S. Illig, E. Cadier, M. Bachelery and Kersalé. Subseasonal Coastal-Trapped Wave Propagations in the Southeastern Pacific and Atlantic Oceans: 1. A New Approach to Estimate Wave Amplitude, *J. Geophys. Res. Oceans*, 123, 3915–3941, (2018). Doi: <https://doi.org/10.1029/2017JC013539>
- [8] O. Pizarro, G. Shaffer, B. Dewitte and M. Ramos. Dynamics of seasonal and interannual variability of the Peru-Chile Undercurrent, *Geophys. Res. Lett.*, 29, 22-1–22-4, (2002). Doi: <https://doi.org/10.1029/2002GL014790>
- [9] M.I. Graco, S. Purca, B. Dewitte, C. Castro, O. Morón, J. Ledesma, G. Flores and D. Gutiérrez. The OMZ and nutrient features as a signature of interannual and low-frequency variability in the Peruvian upwelling system, *Biogeosciences*, 14, 4601–4617, (2017). Doi: <https://doi.org/10.5194/bg-14-4601-2017>
- [10] D. Espinoza-Morriberón, V. Echevin, F. Colas, J. Tam, J. Ledesma, L. Vásquez and M. Graco. Impacts of El Niño events on the Peruvian upwelling system productivity. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(7), 5423–5444 (2017). Doi: <https://doi.org/10.1002/2016JC012439>
- [11] K. Goubanova, S. Illig, B. Dewitte y K. Takahashi. Variaciones intraestacionales de la Temperatura Superficial del Mar en la costa del Perú - Variaciones de la TSM en el mar peruano, Boletín Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño", Instituto Geofísico del Perú, Setiembre, 2, 9, 4-8 (2015). web: http://met.igp.gob.pe/publicaciones/Divulgacion_PPR_El_Niño_IGP_201509.pdf
- [12] CE Duchon and E. Lanczos. Filtering in One and Two Dimensions. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 18, 1016-1022. (1979). Doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1979\)018%3C1016:LFI0AT%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1979)018%3C1016:LFI0AT%3E2.0.CO;2)
- [13] B. Dewitte, J. Vasquez-Cuervo, K. Goubanova, S. Illig, K. Takahashi, G. Cambon, S. Purca, D. Correa, B. Giese, D. Gutierrez, A. Sifeddine, and L. Ortlieb. 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. (2012). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2012.04.011>
- [14] A. Montecinos, S. Purca, O. Pizarro. Interannual-to-interdecadal sea surface temperature variability along the western coast of South America. *Geophysical Research Letters - GEOPHYS RES LETT.* 30 (2003). Doi: <https://doi.org/10.1029/2003GL017345>
- [15] Y. Wang, J. Liu, H. Liu, P- Lin, Y. Yuan and F. Chai. Seasonal and interannual variability in the sea surface temperature front in the eastern Pacific Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 126, e2020JC016356. (2021). Doi: <https://doi.org/10.1029/2020JC016356>
- [16] G. Ramírez. Estimación de la concentración de clorofila-a en la superficie de la Bahía de Sechura usando datos de imágenes de satélite. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Unidad de Posgrado]. *Repositorio institucional Cybertesis UNMSM*. (2021). web: <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/item/1e6ae480-4291-482f-803a-4b9b0fec7e2a>

- [17] c. Arellano, C. Quispe, J. Tam. 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. (2022). web: <https://repositorio.imarpe.gob.pe/handle/20.500.12958/4871>
- [18] Y. Wang. Trends of satellite derived chlorophyll-a (1997–2011) in the Bohai and Yellow Seas, China: effects of bathymetry on seasonal and inter-annual patterns. *Prog. Oceanogr.* 116, 154–166. (2013). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2013.07.003>
- [19] J. Josse, F. Husson, missMDA: A Package for Handling Missing Values in Multivariate Data Analysis. *Journal of Statistical Software*, 70(1), 1–31. (2016). Doi: <https://doi.org/10.18637/jss.v070.i01>
- [20] M.E. Mann. On smoothing potentially non-stationary climate time series. *Geophysical Research Letters*, 31(7), L07214. (2004). Doi: <https://doi.org/10.1029/2004GL019569>
- [21] I.T. Jolliffe. Principal component analysis: A beginner's guide–1. Introduction and application. *Weather*, 45(10), 375–382. (1990). Doi: <https://doi.org/10.1002/j.1477-8696.1990.tb05558.x>
- [22] B.E. Web and D.L. Rudnick. Remarkable changes in the dominant modes of North Pacific Sea surface temperature. *Geophysical Research Letters*, 50, e2022GL101078. (2023). Doi: <https://doi.org/10.1029/2022GL101078>
- [23] A. Hannachi, I.T. Jolliffe and D.B. Stephenson. Empirical orthogonal functions and related techniques in atmospheric science: A review. *International Journal of Climatology*, 27(9), 1119–1152. (2007). Doi: <https://doi.org/10.1002/joc.1499>
- [24] C. Santos, P. Freire and C. Torrence. A transformada wavelet e sua aplicação na análise de séries hidrológicas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 18, 271–280. (2013). Doi: <https://doi.org/10.21168/rbrh.v18n3.p271-280>
- [25] M.S. Reboita. Elementos da Variabilidade Climática no Extremo Sul do Brasil, no período de 1990 a 2001, Rio Grande-RS. *Master's Thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre*, 211 p. (2004). web: <http://repositorio.furg.br/handle/1/3488>
- [26] H. Weng and K.M. Lau. Wavelets, Period-Doubling, and Time-Frequency Localization with Application to the Organization of Convection over the Tropical Western Pacific. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 51, 2523–2541. (1994).
- [27] I. Daubechies. The Wavelet transform Time-Frequency Localization and Signal Analysis. *IEEE Transactions on Information Theory*, 36, 961–1005. (1990). Doi: <https://doi.org/10.1109/18.57199>
- [28] M. Farge. Wavelet Transforms and Their Applications to Turbulence. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 24, 395–458. (1992). Doi: <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.24.010192.002143>
- [29] Y. Liu, X. San Liang R. and Weisberg. Rectification of the Bias in the Wavelet Power Spectrum. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 24, 2093–2102. (2007). Doi: <https://doi.org/10.1175/2007JTECH0511.1>
- [30] A. Rösch and H. Schmidbauer. WaveletComp 1.1: A Guided Tour through the R Package. (2016). web: http://www.hs-stat.com/projects/WaveletComp/WaveletComp_guided_tour.pdf