

EFFECTOS DE EL NIÑO COSTERO 2017 SOBRE LA OXIGENACIÓN, FERTILIDAD Y PRODUCTIVIDAD DEL MAR FRENTE A LAS COSTAS DEL PERÚ

EFFECTS OF THE 2017 COASTAL EL NIÑO ON OXYGENATION, FERTILITY, AND PRODUCTIVITY OF THE PERUVIAN SEA

Jesús Ledesma¹ Michelle Graco¹ Jorge Tam¹ Kevin Díaz¹
 Tony Anculle¹ Walter García¹ Aoy Bernales¹ Daniel Quispe¹
 Dante Espinoza¹ Wilson Carhuapoma¹ Dimitri Gutiérrez¹

<https://doi.org/10.53554/boletin.v36i2.345>

RESUMEN

LEDESMA J, GRACO M, TAM J, DÍAZ K, ANCULLE T, GARCÍA W, BERNALES A, QUISPE D, ESPINOZA D, CARHUAPOMA W, GUTIÉRREZ D. 2021. Efectos de El Niño Costero 2017 sobre la oxigenación, fertilidad y productividad del mar frente a las costas del Perú. *Bol Inst Mar Perú*. 36(2): 409-427.- En el presente estudio describimos la asociación entre la variación de la temperatura del mar y los cambios en oxigenación, fertilidad y productividad durante el período 2016 - 2017 frente a la costa peruana. Para ello se utilizaron tanto datos *in situ* como satelitales, con énfasis frente al norte del Perú. El Niño Costero 2017 ocasionó disminución de las concentraciones de nutrientes y una reducción significativa del área productiva frente a la costa para el verano, marzo 2017, hasta de 49% particularmente al norte de Callao (12°S). En cambio, frente a la costa sur los impactos fueron débiles o inclusive se registraron concentraciones elevadas de clorofila-a, posiblemente asociadas a la recuperación más rápida del afloramiento costero en dicha región. Asimismo, durante el verano 2017 se detectaron mayores concentraciones de oxígeno disuelto que lo habitual en la capa superior de la columna de agua y poca variación en la profundidad del límite superior de la zona de mínima de oxígeno.

PALABRAS CLAVE: temperatura, Clorofila-a, fertilidad, Perú, El Niño Costero 2017

ABSTRACT

LEDESMA J, GRACO M, TAM J, DÍAZ K, ANCULLE T, GARCÍA W, BERNALES A, QUISPE D, ESPINOZA D, CARHUAPOMA W, GUTIÉRREZ D. 2021. Effects of the 2017 coastal El Niño on oxygenation, fertility, and productivity of the Peruvian sea. *Bol Inst Mar Peru*. 36(2): 409-427.- We describe herein the association between sea temperature variation and changes in oxygenation, fertility, and productivity between 2016 and 2017 off the Peruvian coast, especially in the northern area. Therefore, both *in situ* and satellite data, were considered. In summer (March), the 2017 Coastal El Niño triggered a decrease in nutrient concentrations and a significant reduction of the productive area off the coast, up to 49%, particularly north of Callao (12°S). Conversely, off the southern coast, the impacts were weak or even elevated chlorophyll-a concentrations were recorded, possibly associated with the faster recovery of coastal upwelling in that region. Also, during the same period, we detected dissolved oxygen concentrations, above normal, in the upper layer of the water column and little variation in the depth of the upper boundary of the oxygen minimum zone.

KEYWORDS: temperature, Chlorophyll-a, fertility, Peru, the 2017 coastal El Niño

1. INTRODUCCIÓN

El ciclo El Niño Oscilación del Sur (ENOS) es un fenómeno acoplado océano atmósfera que se desarrolla en el Pacífico Ecuatorial (LIU & ALEXANDER, 2007). En su fase cálida, conocida como El Niño, se ha identificado que los vientos alisios se debilitan o se invierten y en consecuencia se induce la propagación hacia el este de anomalías de calor mediante ondas Kelvin de hundimiento que llegan a la costa (WYRTKI, 1975; CANE, 1983; MC PHADEN, 1999; DEWITTE *et al.*, 2012; MOSQUERA-VÁSQUEZ *et al.*, 2013). Recientemente se ha reconocido que existe diversidad en la distribución espacial de El Niño, diferenciándose El Niño en el Pacífico Oriental, cuyo calentamiento se extiende hasta la costa peruana y “El Niño Modoki” con un calentamiento anómalo en el

1. INTRODUCTION

El Niño Southern Oscillation (ENSO) is an ocean-atmosphere coupled phenomenon occurring in the equatorial Pacific (LIU & ALEXANDER, 2007). During its warm phase (El Niño), the trade winds weaken or reverse and thus induce the eastward propagation of heat anomalies through downwelling equatorial Kelvin waves that reach the coast (WYRTKI, 1975; CANE, 1983; MC PHADEN, 1999; DEWITTE *et al.*, 2012; MOSQUERA-VÁSQUEZ *et al.*, 2013). Recently, two spatial distributions were recognized for the phenomenon: El Niño in the Eastern Pacific, whose warming extends up to the Peruvian coast, and “El Niño Modoki”, with anomalous warming in the Central Pacific (CHAVEZ *et al.*, 1999; ASHOK *et al.*, 2007; KARNAUSKAS, 2013; CAPOTONDI *et al.*, 2015).

1 IMARPE, Dirección General de Investigaciones en Oceanografía y Cambio Climático. jledesma@imarpe.gob.pe

Pacífico Central (CHAVEZ *et al.*, 1999; ASHOK *et al.*, 2007; KARNAUSKAS, 2013; CAPOTONDI *et al.*, 2015).

Sin embargo, en el registro histórico existen otros eventos cálidos en la costa peruana, norte y central, que no están necesariamente relacionados al ENOS y donde el papel principal en su desarrollo está relacionado con factores locales y la alteración de la circulación atmosférica frente a la costa del Perú. Uno de estos eventos se observó como un calentamiento extremo en el verano de 1925 (TAKAHASHI & MARTÍNEZ, 2017), y el más reciente ocurrió en el verano y otoño del 2017 (GARREAUD, 2018; ECHEVIN *et al.*, 2018), siendo denominados El Niño Costero 1925 y El Niño Costero 2017, respectivamente (TAKAHASHI & MARTÍNEZ, 2017; ECHEVIN *et al.*, 2018).

Es conocido que El Niño modula la temperatura, salinidad y densidad, así como la profundidad de la capa mezcla, la profundidad de la oxiclina y la extensión vertical de la Zona de Mínimo de Oxígeno (ZMO) (FUENZALIDA *et al.*, 2009; ESPINOZA *et al.*, 2019). Eventos fuertes El Niño (EN), como el de 1997-1998, afectan la distribución de masas de agua y la circulación, causando la profundización de la ZMO y la ocurrencia de eventos de gran oxigenación en la columna de agua y en los sedimentos a lo largo de las costas de Perú y Chile (MORALES *et al.*, 1999; SÁNCHEZ *et al.*, 2000; GUTIÉRREZ *et al.*, 2008). Asimismo, en los eventos EN débiles o moderados de los años 2002, 2006 y 2008, (LEDESMA *et al.*, 2011) se registraron la profundización del límite superior de la ZMO de ca. 30 m a 100 m de profundidad a 20 mn de Callao.

La propagación de ondas Kelvin de hundimiento que profundiza la termoclina, el debilitamiento del afloramiento costero y/o el reforzamiento de la advección de las aguas superficiales subtropicales cálidas y pobres en nutrientes hacia la costa, caracterizan los cambios oceanográficos asociados a El Niño (ESPINOZA-MORRIBERÓN *et al.*, 2017). Consecuentemente, durante los eventos de El Niño, las aguas costeras peruanas son más cálidas, más oxigenadas y menos ricas en nutrientes (STRAMMA *et al.*, 2016; GRACO *et al.*, 2017). Por ejemplo, durante El Niño 1997-98, frente a la costa central (Callao), se registraron concentraciones mínimas e incluso nulas de nitrito y niveles bajos de fosfato, menores a $1,0 \mu\text{mol.L}^{-1}$ (GRACO *et al.*, 2017). Asimismo, la ocurrencia de El Niño modifica la proporción nitrógeno/fósforo (N/P) de las aguas costeras. Por ejemplo, frente a la costa central la proporción N:P varía por debajo de 10 en años normales, mientras que en condiciones cálidas aumenta a un mayor rango de variación, acercándose en algunos casos a la clásica razón de Redfield de 16 (FRANZ *et al.*, 2012; GRACO *et al.*, 2017). Los altos valores de N/P podrían asociarse a la profundización de la ZMO lo cual determinaría menor reciclaje y menor pérdida de nitrógeno, mientras que, en años normales, la posición más somera de la ZMO favorece mayor pérdida de

Nevertheless, there are other warm events on the northern and central coast of Peru in the historical record, which are not necessarily related to ENSO and where the main role in their development is related to local factors and the alteration of the atmospheric circulation off the Peruvian coast. One of these events was observed as extreme warming in the summer of 1925 (TAKAHASHI & MARTÍNEZ, 2017), and the most recent one occurred during the summer and autumn of 2017 (GARREAUD, 2018; ECHEVIN *et al.*, 2018). They are known as 1925 coastal El Niño and 2017 coastal El Niño, respectively (TAKAHASHI & MARTÍNEZ, 2017; ECHEVIN *et al.*, 2018).

El Niño (EN) influences temperature, salinity, and density, as well as the mixed layer depth, the oxycline depth, and the vertical extent of the Oxygen Minimum Zone (OMZ) (FUENZALIDA *et al.*, 2009; ESPINOZA *et al.*, 2019). Strong events, such as EN 1997/98, affect the water mass distribution and circulation, causing the deepening of the OMZ and the occurrence of high oxygenation events in the water column and the sediments along the Peruvian and Chilean coasts (MORALES *et al.*, 1999; SÁNCHEZ *et al.*, 2000; GUTIÉRREZ *et al.*, 2008). Likewise, during the occurrence of the weak to moderate EN events of 2002, 2006, and 2008 (LEDESMA *et al.*, 2011), it was recorded the deepening of the upper boundary of the OMZ from a depth of ca. 30 m to 100 m at 20 nm off Callao.

The oceanographic changes associated with EN are characterized by the propagation of downwelling equatorial Kelvin waves that deepen the thermocline, the weakening of coastal upwelling, and/or the strengthening of advection of warm, nutrient-poor subtropical surface waters towards the coast (ESPINOZA-MORRIBERÓN *et al.*, 2017). During EN events, Peruvian coastal waters are warmer, more oxygenated, and less nutrient-rich (STRAMMA *et al.*, 2016; GRACO *et al.*, 2017). For example, during EN 1997/98, minimal or even zero nitrite concentrations and low phosphate levels of less than $1.0 \mu\text{mol.L}^{-1}$ were recorded off Callao, at the central coast (GRACO *et al.*, 2017). Likewise, the occurrence of EN modifies the nitrogen/phosphorus (N/P) ratio of coastal waters. Thus, off the central coast, the N:P ratio varies below 10 in normal years, while in warm conditions it increases to a wider range of variation, approaching in some cases the classical Redfield ratio of 16 (FRANZ *et al.*, 2012; GRACO *et al.*, 2017). The high N/P values could be associated with the deepening of the OMZ which would determine lower recycling and lower nitrogen loss, whereas, in normal years, the shallower position of the OMZ favors a higher nitrogen loss by denitrification or anammox (GRACO *et al.*, 2017).

nitrógeno por desnitrificación o anammox (GRACO *et al.*, 2017).

Estudios en diversos sistemas de afloramiento muestran que la producción del fitoplancton, inferida en base a la concentración de clorofila-a, alcanza su punto máximo en verano, cuando la dirección de los vientos a lo largo de la costa se vuelve favorable al afloramiento costero y se produce la advección de nutrientes a la capa superficial (MONTECINO y PIZARRO, 2006; FARÍAS *et al.*, 2015). En el caso de Perú igualmente se observa un máximo hacia el período de verano-otoño, aunque desfasado del período máximo de afloramiento costero (CHAVEZ & MESSIÉ, 2009). La producción primaria se correlaciona negativamente con la intensidad de los vientos a lo largo de la costa, que son permanentemente favorables a la surgencia costera y son más intensos en invierno (CHAVEZ & MESSIÉ, 2009; GUTIÉRREZ *et al.*, 2016). Esta aparente paradoja probablemente se explica por la limitación de la luz debido a la mezcla más profunda del viento, lo que reduce el rendimiento de crecimiento de los productores primarios (CALIENES *et al.*, 1985; ECHEVIN *et al.*, 2008). En verano, la intensidad del viento es, sin embargo, suficiente para el ascenso de aguas fértiles en la zona costera, que durante la relajación favorece una estratificación térmica que fomenta las floraciones de fitoplancton.

Durante El Niño, la reducción de la fertilidad de las aguas costeras, asociada a la profundización de la nutriclina (BARBER & CHAVEZ, 1983) y a los cambios en la circulación (ESPINOZA-MORRIBERÓN *et al.*, 2017) resulta en la disminución de la producción primaria (THOMAS *et al.*, 2009; CALIENES, 2014; GUTIÉRREZ *et al.*, 2016). El mayor impacto de El Niño ocurre durante primavera tardía - verano, cuando existe limitación de nutrientes, a diferencia del invierno, cuando existe mayor limitación de luz (ECHEVIN *et al.*, 2008). Esta limitación por nutrientes en verano se vería más afectada por la profundización de la nutriclina durante El Niño, resultando en el mayor efecto sobre la producción primaria, evidenciada en mayores anomalías negativas de clorofila-a (ESPINOZA-MORRIBERÓN *et al.*, 2017).

Es así que mientras para El Niño, asociado al ciclo ENOS, los impactos en la fertilidad, productividad y oxigenación de las aguas costeras peruanas han sido ampliamente estudiados, el conocimiento de los impactos biogeoquímicos de El Niño Costero es aún incipiente. En este trabajo investigamos cómo influyó y cuáles fueron los efectos de El Niño Costero 2017 sobre la oxigenación, fertilidad y productividad del mar frente a las costas del Perú. Para ello se analizaron datos de temperatura, salinidad, nutrientes, oxígeno disuelto (OD) y clorofila-a registrados antes, durante y después de El Niño Costero 2017, comparándolos con valores climatológicos y con los de eventos El Niño propiamente dichos.

Studies in various upwelling systems show that phytoplankton production, estimated from chlorophyll-a concentration, peaks in summer, when the wind direction along the coast becomes favorable to coastal upwelling and nutrient advection to the surface layer occurs (MONTECINO & PIZARRO, 2006; FARÍAS *et al.*, 2015). In Peru, there is also a peak occurring between summer and autumn, although it is out of phase with the maximum period of coastal upwelling (CHAVEZ & MESSIÉ, 2009). Primary production is negatively correlated with the intensity of winds along the coast, which are permanently favorable to coastal upwelling and are more intense in winter (CHAVEZ & MESSIÉ, 2009; GUTIÉRREZ *et al.*, 2016). This seeming paradox is probably explained by light limitation due to deeper wind mixing, which reduces the growth performance of primary producers (CALIENES *et al.*, 1985; ECHEVIN *et al.*, 2008). However, the wind intensity in summer is strong enough for the upwelling of fertile waters in the coastal zone, which during relaxation favors a thermal stratification that promotes phytoplankton blooms.

A reduction in coastal water fertility during El Niño, associated with nutricline deepening (BARBER & CHAVEZ, 1983) and changes in circulation (ESPINOZA-MORRIBERÓN *et al.*, 2017) results in decreased primary production (THOMAS *et al.*, 2009; CALIENES, 2014; GUTIÉRREZ *et al.*, 2016). The greatest impact of EN occurs during late spring and summer, when there is a nutrient limitation, unlike in winter, when there is a greater light limitation (ECHEVIN *et al.*, 2008). This nutrient limitation would be more affected by the nutricline deepening during El Niño, resulting in the greatest effect on primary production, as evidenced by higher negative chlorophyll-a anomalies (ESPINOZA-MORRIBERÓN *et al.*, 2017).

Thus, while the impacts of El Niño, associated with the ENSO cycle, on the fertility, productivity, and oxygenation of Peruvian coastal waters have been extensively studied, we are still at an early stage of understanding the biogeochemical impacts of coastal El Niño (CEN). Our goal is to investigate how 2017 CEN influenced and what were its effects on the oxygenation, fertility, and productivity of the Peruvian sea. Therefore, we analyzed data on temperature, salinity, nutrients, dissolved oxygen (DO), and chlorophyll-a recorded before, during, and after the occurrence of 2017 CEN, comparing them with climatological values and with those of previous EN events.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

El área de estudio estuvo comprendida entre 03°00'S y 21°00'S, alcanzando información *in situ* y satelital. En cuanto a la primera, se emplearon datos oceanográficos de cruceros, secciones y estaciones fijas oceanográficas dentro de las 100 mn (Fig. 1). Los datos provenientes del satélite MODIS AQUA y la agencia NOAA tuvieron una extensión máxima de 1,200 mn frente al litoral de Paita (5°S). Los datos de clorofila-a, considerada como indicador de la productividad primaria (ESPINOZA-MORRIBERÓN *et al.*, 2017), y de temperatura superficial del mar (TSM) proveniente del satélite MODIS AQUA, tuvieron una resolución por 9 km, estimándose la climatología para ambas variables en base al período 2003-2016. Se utilizó el umbral de concentración de 1,0 mg.m³ para demarcar la zona de alta concentración de clorofila-a (CARR, 2002; DEUSER *et al.*, 1990; NIXON & THOMAS, 2001; STRUB *et al.*, 1991). Siguiendo a NIXON & THOMAS (2001), la distancia de la costa de dicho umbral fue adoptada para estimar el área productiva asociada al afloramiento costero.

2. MATERIAL AND METHODS

The study area spanned from latitudes 03°00'S to 21°00'S and included *in situ* and satellite information. As for the former, oceanographic data from cruises, sections, and fixed oceanographic stations within 100 nm were used (Fig. 1). Data from the MODIS AQUA satellite and the NOAA agency had a maximum extension of 1,200 nm off the coast of Paita (5°S). Chlorophyll-*a*, considered as an indicator of primary productivity (ESPINOZA-MORRIBERÓN *et al.*, 2017), and sea surface temperature (SST) data, coming from the MODIS AQUA satellite, had a resolution of 9 km, estimating the climatology for both variables between 2003 and 2016. The concentration threshold of 1.0 mg.m⁻³ was used to define the zone of high chlorophyll-*a* concentration (CARR, 2002; DEUSER *et al.*, 1990; NIXON & THOMAS, 2001; STRUB *et al.*, 1991). According to NIXON & THOMAS (2001), the distance from the coast of such a threshold was adopted to estimate the productive area associated with the coastal upwelling.

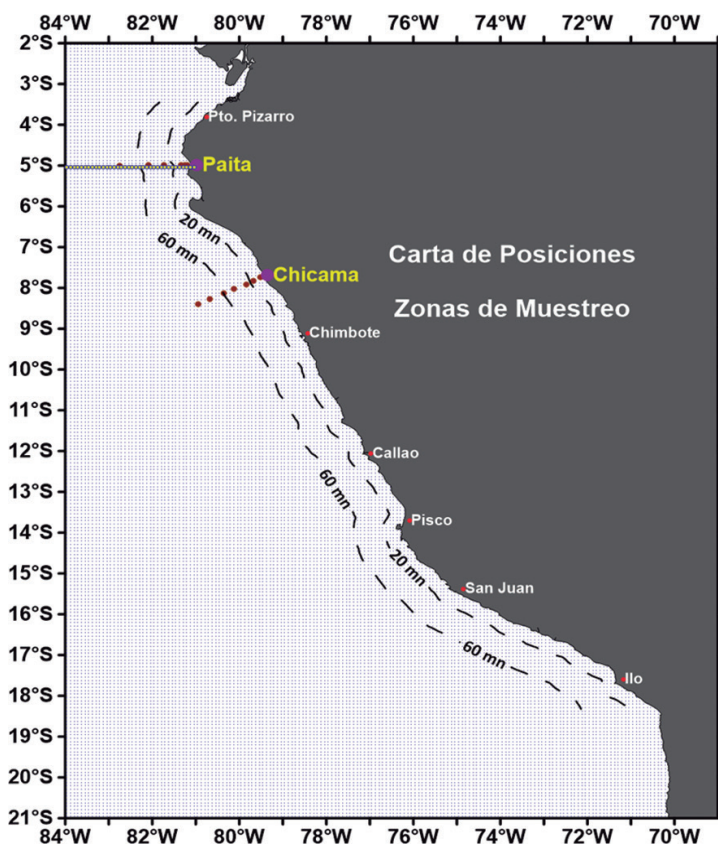


Figura 1.- Carta de localización de puntos de muestreo. Basado en: a) Paita – Chicama: Secciones de distribución vertical costa – océano, Puntos fijos y Estaciones fijas costeras de Muelle; b) Cruceros IMARPE y c) Información satelital MODIS AQUA clorofila-a y temperatura – Resolución 9 km

Figure 1. Location Chart of Sampling Points. Based on: a) Paita - Chicama: Coast - Ocean Vertical Distribution Sections, Fixed Points, and Coastal Fixed Dock Stations; b) IMARPE Cruises, and c) MODIS AQUA Chlorophyll-*a* and Temperature Satellite Data - Resolution of 9 km

La temperatura, salinidad y oxígeno disuelto (OD) de las secciones verticales fueron estimadas empleando un perfilador *Seabird Scientific* de conductividad, temperatura, presión (CTD), equipado además con un sensor de OD en base de membrana polarográfica. Además, se recolectaron muestras de agua a niveles estándar de 0, 10, 25, 50, 75, 100, 200 y 300 m. Las determinaciones de OD (mL.L^{-1}) *in situ*, fueron empleando el método volumétrico de Winkler modificado por CARRIT & CARPENTER (1966). Las determinaciones de fosfato, silicato, nitrato y nitrito se realizaron de acuerdo a las técnicas y modificaciones dadas por Strickland y Parsons (1972). Para la estimación de clorofila-a de las secciones verticales de Paita – Chicama 2017-03, se utilizó la extracción en acetona al 90%, de acuerdo a JEFFREY & WELSCHMEYER (1997); las unidades utilizadas fueron en mg.m^{-3} .

Por otro lado, para la interpretación de los registros, se determinó el promedio climatológico para las variables de OD y nutrientes a las 60 mn de Paita y Chicama, con ± 12 mn en su entorno, utilizando la base de datos de IMARPE 1964–2016 y a los niveles de 0, 10, 25, 50, 75, 100 y 150 m (Tabla 1). Finalmente, para el mapeo de la distribución espacial, se utilizó el método de *krigging* de interpolación, en base a la minimización de la varianza, estimando los valores desconocidos a través de datos vecinos cercanos (KRIGE, 1951; OLIVER, 1990). Para fines de comparación entre el evento El Niño Costero 2017 y El Niño 2015–16 se aplicó el criterio del ENFEN (2012) para delimitar la duración de los eventos.

We estimated the temperature, salinity, and dissolved oxygen (DO) of the vertical sections using a *Seabird Scientific* conductivity, temperature, pressure (CTD) profiler, equipped with a polarographic membrane-based DO sensor. Also, water samples were collected at 0, 10, 25, 50, 75, 100, 200, and 300 m standard levels. *In situ* DO determinations (mL.L^{-1}) were made using the Winkler volumetric method modified by CARRIT & CARPENTER (1966). Phosphate, silicate, nitrate, and nitrite determinations were carried out according to the techniques and modifications that were given by Strickland & Parsons (1972). A 90% acetone extraction was used for the estimation of chlorophyll-a from the vertical sections of Paita - Chicama 2017-03, according to JEFFREY & WELSCHMEYER (1997). The units used were expressed in mg.m^{-3} .

The climatological average for the DO and nutrient variables was determined, for the interpretation of the records, at 60 nm from Paita and Chicama, with ± 12 nm in their surroundings, using the IMARPE's database 1964-2016 and at the levels of 0, 10, 25, 50, 50, 75, 100, and 150 m (Table 1). Finally, for the mapping of the spatial distribution, the interpolation krigging method was used, based on variance minimization, estimating the unknown values through close neighboring data (KRIGE, 1951; OLIVER, 1990). The ENFEN (2012) criterion was applied to delimit the duration of 2017 CEN and EN 2015/16 in order to compare them.

Tabla 1.- Porcentaje de áreas enmarcadas por la isolínea de $1,0 \text{ mg.m}^{-3}$ con respecto a lo habitual del promedio mensual de la base MODIS AQUA 2003 – 2016

Table 1. Percentage of areas framed by the 1.0 mg.m^{-3} isoline compared to the usual monthly average of the MODIS AQUA 2003 - 2016 database

| Mes Año Month/Year | % Área 3°S - 21°S | % Área 4°S - 13°S | Mes / Año Month/Year | % Área 3°S - 21°S | % Área 4°S - 13°S |
|-----------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|----------------------|
| Dic 2015 | -41,73 | -54,39 | Feb 2017 | -29,78 | -41,93 |
| Ene 2016 | -34,22 | -46,43 | Mar 2017 | -49,22 | -67,02 |
| Feb 2016 | -27,32 | -34,73 | Abr 2017 | 0,53 | -17,17 |
| Mar 2016 | -13,45 | -15,52 | May 2017 | -4,64 | -20,50 |
| Abr 2016 | -2,86 | -9,45 | Jun 2017 | -21,92 | -21,43 |
| May 2016 | -8,33 | -3,49 | Jul 2017 | -15,83 | -41,25 |
| Jun 2016 | 2,47 | 21,03 | Ago 2017 | -22,90 | -8,62 |
| Jul 2016 | 47,89 | 35,92 | Sep 2017 | -5,82 | -13,80 |
| Ago 2016 | 35,59 | 32,56 | Oct 2017 | 4,19 | -15,31 |
| Sep 2016 | 22,55 | -1,88 | Nov 2017 | 7,05 | 1,16 |
| Oct 2016 | 22,39 | -4,41 | Dic 2017 | 33,50 | 22,13 |
| Nov 2016 | 28,87 | 31,63 | Ene 2018 | 30,15 | 33,16 |
| Dic 2016 | 31,88 | 33,16 | Ver 2016 | -24,99 | -32,23 |
| Ene 2017 | 7,04 | 8,75 | Ver 2017 | -23,99 | -33,41 |

3. RESULTADOS

Series de tiempo oceanográficas

La TSM y su anomalía (ATSM) exhibieron un incremento en la región Niño 1+2 desde inicios del verano 2016–2017. En este sentido, para diciembre 2016 se tuvo un registro promedio de 23,35 °C (+0,53 °C) y en enero 2017 fue de 25,75 °C (+1,23 °C). En el muelle de Paita la TSM alcanzó valores promedio de 27,71 °C (+4,71 °C) en febrero y 28,06 °C (+5,26 °C) en marzo 2017. La magnitud de las anomalías fue mucho mayor a las registradas en el verano 2016, durante el cual estas no excedieron los +2 °C en Paita (Fig. 2a, b).

Asimismo, dentro de las 100 mn frente a Paita, durante el verano del 2016, caracterizado por TSMs entre 23 y 26 °C, se manifestó disminución de las concentraciones de nutrientes, exhibiendo valores predominantes de 0,5 a 1,0 μmol.L⁻¹ de fosfatos y alrededor de 5,0 μmol.L⁻¹ para los nitratos, con razones N:P de 5,0 a 10,0 (Figs. 3, 4). Las condiciones oceanográficas se tornaron frías asociadas a un activo afloramiento costero desde mediados del otoño hasta la primavera 2016, registrándose valores de TSM entre 17,0 y 19,0 °C. Dentro de las 20 mn de la costa la isoterma predominante fue de 17,0 °C y el contenido de OD estuvo de 3,0 a 4,0 mL.L⁻¹. Los fosfatos alcanzaron concentraciones de 1,0 a 2,0 μmol.L⁻¹, los nitratos, de 10,0 a 15,0 μmol.L⁻¹, y la razón N:P varió entre 10,0 y 20,0 (Figs. 3, 4). A inicios de la primavera 2016, la clorofila-a se incrementó dentro de las 20 mn, con valores desde 5,0 hasta 15,0 mg.m⁻³, para luego disminuir rápidamente a inicios de diciembre 2016, generando anomalías entre -5,0 mg.m⁻³ y -1,0 mg.m⁻³ (Figs. 3, 4).

3. RESULTS

Oceanographic time series

SST and SSTA showed an increase in the Niño 1+2 region since early summer 2016–2017. Thus, for December 2016, the mean record was 23.35 °C (+0.53 °C) and in January 2017 it was 25.75 °C (+1.23 °C). The SST at the Paita dock reached mean values of 27.71 °C (+4.71 °C) in February and 28.06 °C (+5.26 °C) in March 2017. The magnitude of the anomalies was much higher than those recorded in summer 2016 when they did not exceed +2 °C at Paita (Fig. 2a, b).

Within 100 nm off Paita, summer 2016 was characterized by SSTs between 23 and 26 °C. There were decreasing nutrient concentrations, showing predominant values of 0.5 to 1.0 μmol.L⁻¹ for phosphates and around 5.0 μmol.L⁻¹ for nitrates, with N:P ratios of 5.0 to 10.0 (Figs. 3, 4). Oceanographic conditions became cold associated with active coastal upwelling from mid-autumn to spring 2016. SST values between 17.0 and 19.0 °C were recorded. Within 20 nm offshore, the predominant isotherm was 17.0 °C, and DO content ranged from 3.0 to 4.0 mL.L⁻¹. Phosphates reached concentrations of 1.0 to 2.0 μmol.L⁻¹, while nitrates ranged from 10.0 to 15.0 μmol.L⁻¹, and the N:P ratio ranged from 10.0 to 20.0 (Figs. 3, 4). In early spring 2016, chlorophyll-a increased within 20 mn, with values from 5.0 to 15.0 mg.m⁻³, then rapidly decreased in early December 2016, generating anomalies between -5.0 mg.m⁻³ and -1.0 mg.m⁻³ (Figs. 3, 4).

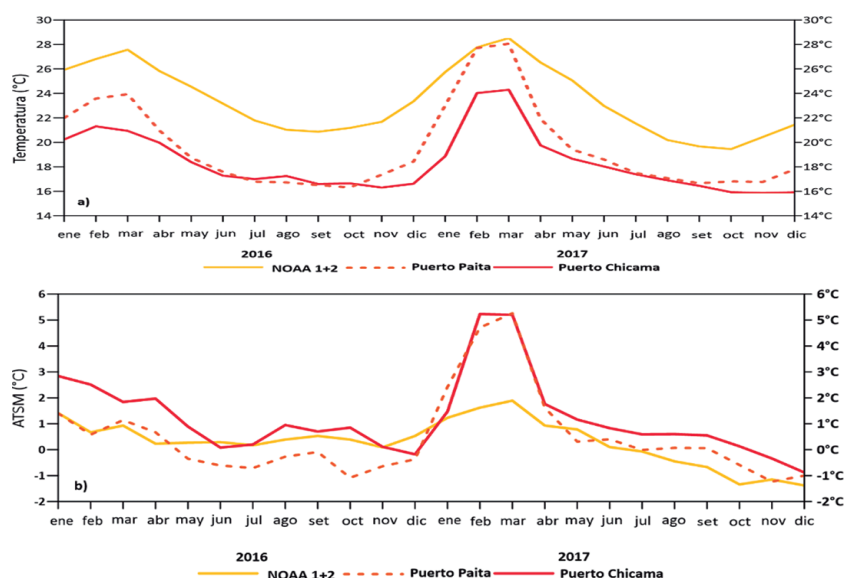


Figura 2.- Serie de tiempo de: a) Temperatura superficial del mar, b) Anomalías térmicas de la superficie del mar. En la región Niño 1+2 (0 – 10°S, 90°W – 80°W), Estación Costera Muelle Paita y Estación Costera Muelle Chicama

Figure 2. Time series of a) SST, b) SSTA in the Niño 1+2 region (0-10°S, 90°W-80°W), Paita Dock Coastal Station and Chicama Dock Coastal Station

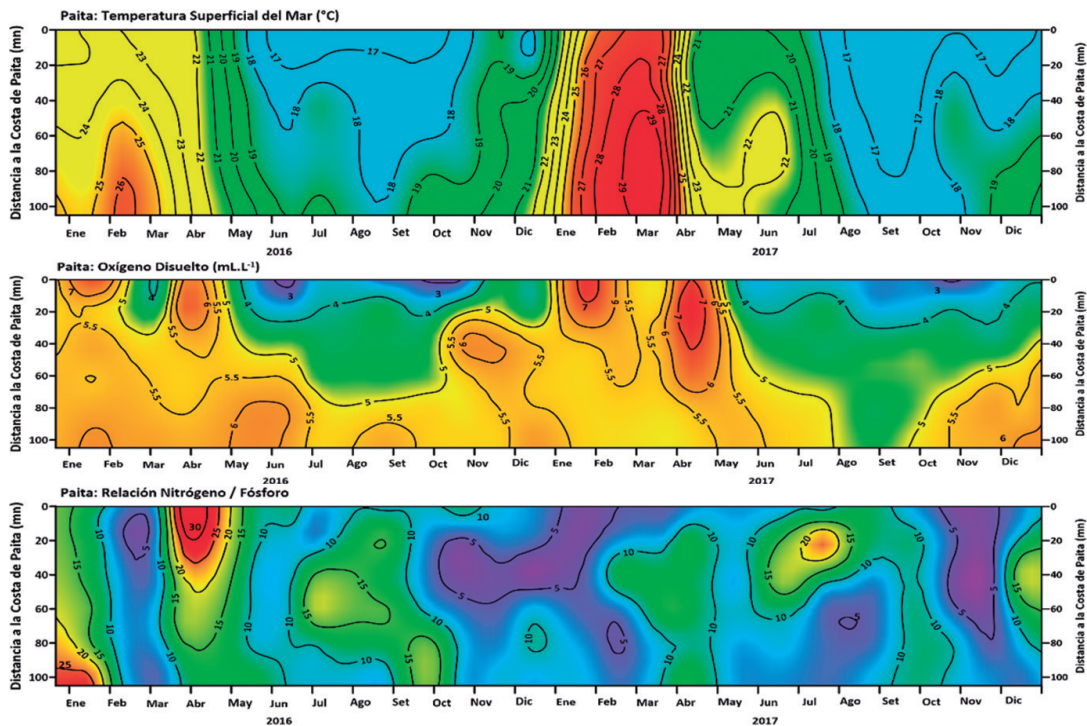


Figura 3.- Serie Hovmuller con respecto al tiempo y la distancia a la costa, de variables oceanográficas en la superficie del mar: Temperatura (°C), Oxígeno disuelto (mL.L-1) y Tasa Redfield N/P. Monitoreo Paita – 2016 / 2017

Figure 3. Hovmöller series regarding time and distance from the coast of oceanographic variables at the sea surface: Temperature (°C), Dissolved Oxygen (mL.L-1), and Redfield Rate N/P. Paita Monitoring - 2016 / 2017

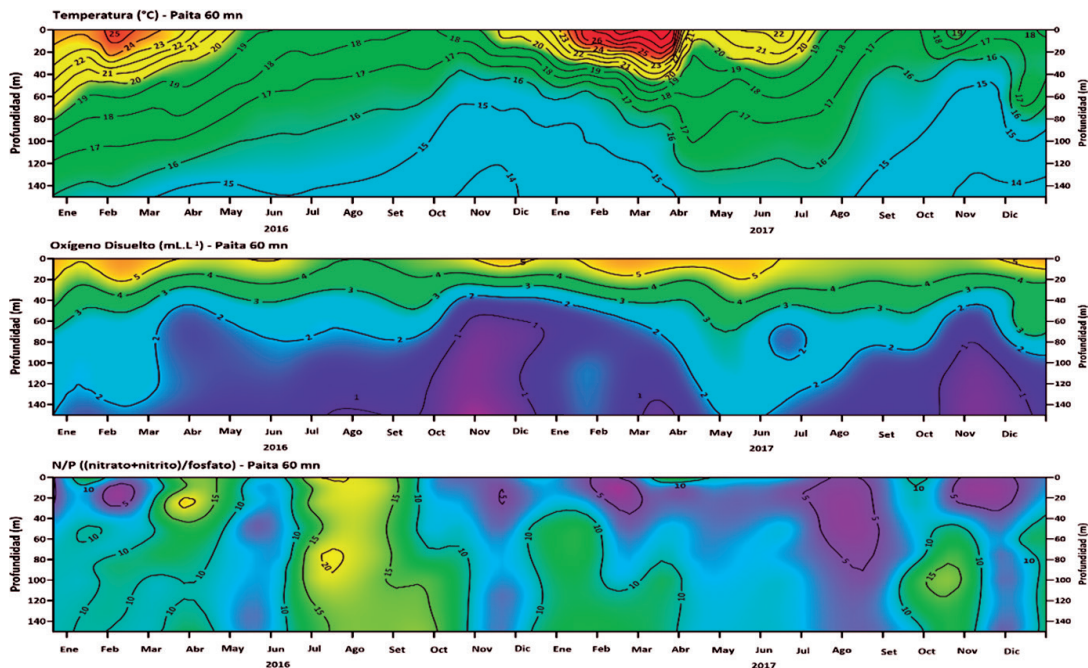


Figura 4.- Serie Hovmuller con respecto al tiempo, profundidad y las 60 mn de costa, variables oceanográficas de temperatura (°C), Oxígeno disuelto (mL.L-1) y tasa Redfield N/P ((nitrate+nitrite)/fosfato). Monitoreo Paita – 2016 / 2017

Figure 4. Hovmöller series regarding time, depth, and 60 nm offshore, oceanographic variables of temperature (°C), Dissolved Oxygen (mL.L-1) and Redfield N/P ((nitrate+nitrite)/phosphate) rate. Paita Monitoring - 2016 / 2017

Posteriormente, en el verano e inicios del otoño 2017, como ya hemos descrito, se presentaron condiciones extraordinariamente cálidas al norte del Perú por el evento El Niño Costero, con isotermas de 25,0 a 29,0 °C en superficie. Se registraron fosfatos de 0,5 $\mu\text{mol.L}^{-1}$, nitratos de 2,5 $\mu\text{mol.L}^{-1}$, nitritos de 0,1 $\mu\text{mol.L}^{-1}$, y una razón de N/P cercana a 5,0, inferior a lo detectado en el verano 2016 (Fig. 3).

Condiciones observadas en marzo 2017 según MODIS AQUA (macroescala)

La información del MODIS AQUA frente a Paita indica que en marzo 2017 se presentaron ATSM entre +1,5 y +2 °C desde 100°W (1,200 mn de Paita) hasta aproximadamente 85°W (a unas 250 mn), punto a partir del cual las ATSM aumentaron hacia la costa, superando los +4,0 °C a 140 mn de la costa para luego alcanzar +6,0 °C dentro de las 60 mn. Cabe indicar que, en marzo 2016, en la fase declinante de El Niño 2015-2016 (EN 2015-2016), las ATSM dentro de las 250 mn de la costa se mantuvieron entre +1 y +2 °C, sin exhibir el incremento hacia el litoral (Fig. 5). En marzo 2017 las anomalías de +6,0 °C se extendieron hasta Chimbote dentro de las 20 mn de la costa (Figs. 6, 7), mientras que las de +5,0 °C se registraron en la franja de 60 mn entre Talara y Chimbote, proyectándose hacia el noroeste fuera de la costa. Dentro de las 120 mn se registraron anomalías superiores a + 2,0 °C desde Puerto Pizarro hasta Huacho. Al sur de 11°S, las ATSM disminuyeron rápidamente, variando en el rango entre +1,0 y +2,0 °C entre Callao (12°02'S) y San Juan de Marcona (15°21'S), para luego disminuir a valores cercanos a cero al sur de este punto, salvo una pequeña celda cálida al sur de Ilo (Fig. 7).

Por otro lado, la concentración de clorofila-a frente a Paita se encontró en su rango normal al oeste de 85°W, e igualmente, a partir de ese punto, exhibió anomalías negativas que aumentaron en magnitud hacia la zona costera, superando valores de -2,0 mg.m^{-3} a 60 mn de la costa alcanzando una magnitud máxima de -4,95 mg.m^{-3} dentro de las 25 mn (Fig. 5). Latitudinalmente, dentro de las 100 mn entre Puerto Pizarro y Huacho (11°S), se observaron anomalías negativas entre -1,0 mg.m^{-3} y -5,0 mg.m^{-3} , en promedio, detectándose las de mayor magnitud entre Punta Falsa (6°S) y Chimbote, superiores a -5,0 mg.m^{-3} , dentro de las 20 mn en esa zona (Figs. 6, 7). Las anomalías negativas predominaron hasta la zona de Callao, aunque se registró un núcleo costero de anomalías positivas en Huacho. A partir de 13°S destacaron núcleos de anomalías positivas (+2,5 mg.m^{-3}), como Pisco, al norte de San Juan de Marcona, Atico e Ilo, alternados con áreas de anomalías negativas (-1,0 mg.m^{-3}) (Fig. 7a).

Then, extraordinary warming occurred, as described above, in summer and early autumn 2017, in northern Peru due to the CEN event, with isotherms of 25.0 to 29.0 °C at the surface. Phosphates were recorded at 0.5 $\mu\text{mol.L}^{-1}$, nitrates at 2.5 $\mu\text{mol.L}^{-1}$, nitrites at 0.1 $\mu\text{mol.L}^{-1}$, and an N/P ratio close to 5.0, lower than that detected in summer 2016 (Fig. 3).

Conditions observed in March 2017 according to MODIS AQUA (macroscale)

MODIS AQUA data off Paita indicate that in March 2017, SSTA between +1.5 and +2 °C occurred from 100°W (1,200 nm from Paita) to approximately 85°W (about 250 nm) and increased towards the coast, exceeding +4.0 °C at 140 nm offshore and then reaching +6.0 °C within 60 nm. It should be noted that, in March 2016, when EN 2015/16 was declining, the SSTAs within 250 nm offshore remained between +1 and +2 °C, without increasing towards the coast (Fig. 5). In March 2017, anomalies of +6.0 °C extended to Chimbote within 20 nm offshore (Figs. 6, 7), while those of +5.0 °C were recorded in the 60 nm strip between Talara and Chimbote, projecting northwestward offshore. Within 120 nm, anomalies above +2.0 °C were recorded from Puerto Pizarro to Huacho. South of 11°S, the SSTA decreased rapidly, varying in the range between +1.0 and +2.0 °C between Callao (12°02'S) and San Juan de Marcona (15°21'S), and then decreasing to near zero south of this point, except for a small warm cell south of Ilo (Fig. 7).

Off Paita, the chlorophyll-a concentration was found to be in its normal range west of 85°W, although negative anomalies increased in magnitude towards the coastal zone, exceeding values of -2.0 mg.m^{-3} at 60 nm offshore and peaking at -4.95 mg.m^{-3} within 25 nm (Fig. 5). Latitudinally, within 100 nm between Puerto Pizarro and Huacho (11°S), negative anomalies ranging from -1.0 mg.m^{-3} and -5.0 mg.m^{-3} on average, were observed, with peaks detected between Punta Falsa (6°S) and Chimbote, exceeding -5.0 mg.m^{-3} , within 20 nm in that area (Figs. 6, 7). Negative anomalies predominated up to Callao, although a coastal nucleus of positive anomalies was recorded in Huacho. From 13°S on, positive anomaly nuclei (+2.5 mg.m^{-3}) stood out, such as Pisco, north of San Juan de Marcona, Atico, and Ilo, alternating with areas of negative anomalies (-1.0 mg.m^{-3}) (Fig. 7a).

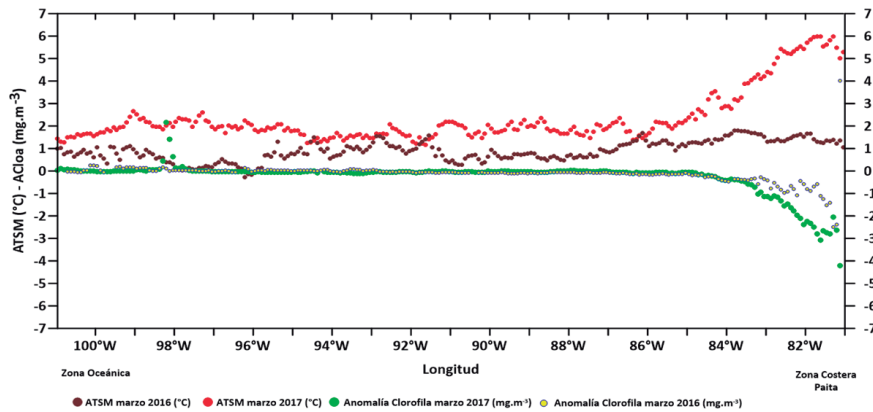


Figura 5.- Anomalías Térmicas y Clorofila-a Superficiales del Mar frente a Paita: 5°2,5'S, 81°2,5'W-100°57,5'W. Fuente: MODIS AQUA

Figure 5. SSTA and Sea Surface Chlorophyll-a off Paita - 05°02.5' S - 81°02.5' W / 100°57.5' W. Source: MODIS AQUA

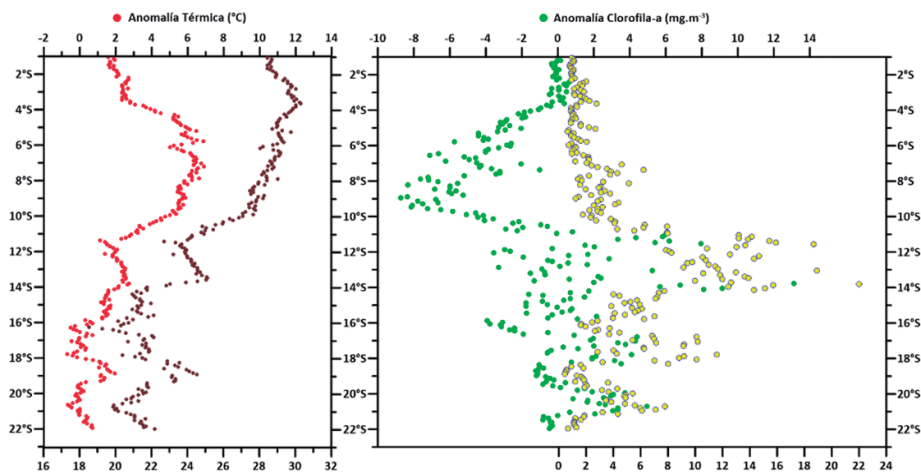


Figura 6.- Temperatura superficial del mar (°C), anomalías térmicas (°C), Clorofila-a (mg.m⁻³), anomalías de clorofila-a (mg.m⁻³) registradas a las 20 mn de costa. Marzo 2017. Fuente: MODIS AQUA

Figure 6. SST (°C), SSTA (°C), Chlorophyll-a (mg.m⁻³), and Chlorophyll-a anomalies (mg.m⁻³) recorded at 20 nm offshore in March 2017. Source: MODIS AQUA

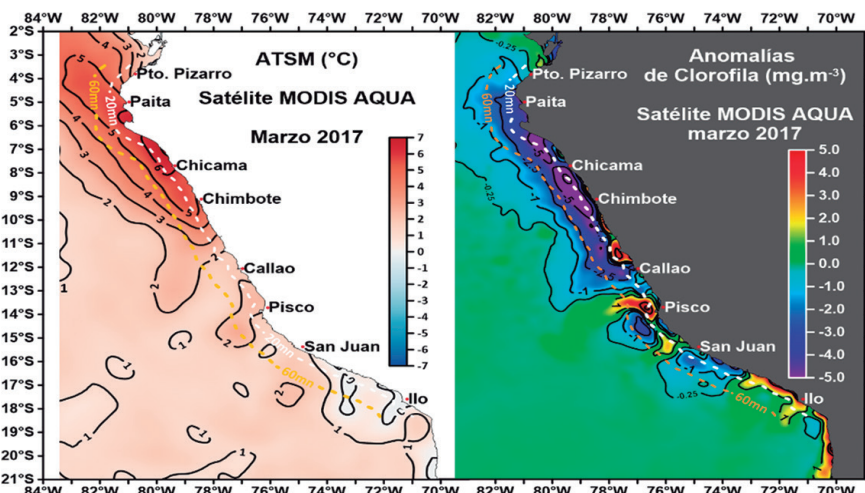


Figura 7.- Distribución de las Anomalías de Temperatura Superficial del mar (°C) y Anomalías de clorofila-a (mg.m⁻³), registradas frente a las costas. Marzo 2017, referenciando las isoparalitorales de 20 mn y 60 mn. Fuente: MODIS AQUA

Figure 7. Distribution of SSTA (°C) and Chlorophyll-a Anomalies (mg.m⁻³), recorded off the coasts in March 2017, referenced to the 20 nm and 60 nm isoparalittorals. Source: MODIS AQUA

Los cambios en la relación entre las anomalías térmicas y las anomalías de clorofila-a se evidencia con mayor claridad en la franja de las 20 mn costeras (Fig. 6). Por ejemplo, entre 1° y 4°S, las anomalías de clorofila-a cercanas a cero estuvieron asociadas a anomalías térmicas de alrededor de +2,0 °C, mientras que, entre 4° y 10°S, donde las ATSM alcanzaron valores máximos de hasta +6,0 °C, las anomalías de clorofila-a variaron entre -2,0 mg.m⁻³ y -8,0 mg.m⁻³, indicando que la productividad en esta región fue la más afectada por las condiciones cálidas de El Niño Costero (ENC 2017) (Figs. 5, 6, 7). En cambio, desde 11°S hasta 16°S, las anomalías térmicas disminuyeron a +2,0 °C, mientras que las anomalías de clorofila-a presentaron gran variabilidad (entre -4,0 a +13,0 mg.m⁻³). Finalmente, entre 16°S y 18°S las condiciones térmicas fueron normales, y las anomalías de clorofila-a fluctuaron entre -0,5 mg.m⁻³ y +4,2 mg.m⁻³ (Figs. 6, 7).

En cuanto a la variabilidad del tamaño del área productiva, en diciembre 2015 se registró una anomalía de -41,7%, la cual fue seguida por tendencia a la normalización durante el verano y otoño 2016. Posteriormente, se desarrolló un período con áreas productivas más amplias que lo normal durante el invierno y primavera 2016. Con El Niño Costero 2017, en enero se observó reducción del tamaño del área productiva (+7,04%), dando paso a un período de notables anomalías negativas hasta la primavera 2017, para finalmente iniciarse un nuevo período de expansión del área productiva (Fig. 8). Cabe resaltar que, para marzo, climatológicamente el área productiva alcanza las 150 mn frente a la costa norte de Perú y una extensión total de 120,722.8 mn² para el área entre 3° y 21°S. En marzo 2017, el área productiva se replegó a 40 mn frente a Paita y a 60 mn frente a Chicama y su extensión se redujo a 49,2% de lo normal (Fig. 8); aunque para el área entre 4° y 13°S la reducción alcanzó 67,0%. Para el verano, la extensión del área productiva se redujo en 24,0% en 2017 y en 25,0% en 2016, en toda el área evaluada. De considerarse solo el área entre 4° y 13°S, la contracción del área productiva en el verano fue de 33,4% y 32,2%, respectivamente (Tabla 1).

Condiciones físicas y biogeoquímicas en marzo 2017 frente a Paita y a Chicama de acuerdo a información *in situ*

Paita

A fines de marzo 2017 se registraron anomalías térmicas entre +2,0 y +7,0 °C en la capa superior de los 40 m. La salinidad fue inferior a 34,9, disminuyendo hacia la superficie y hacia la costa, posiblemente por efecto de las precipitaciones, registrando un valor mínimo de 28,5 a 11 mn de Paita. Bajo estas condiciones termohalinas el contenido de OD varió entre 4,0 y 4,5

Changes in the relationship between thermal anomalies and chlorophyll-a anomalies are most clearly evident in the 20 nm coastal strip (Fig. 6). For example, between 1° and 4°S, chlorophyll-a anomalies near zero were associated with thermal anomalies of about +2.0 °C, whereas, between 4° and 10°S, where SSTAs peaked as high as +6.0 °C, chlorophyll-a anomalies ranged from -2.0 mg.m⁻³ and -8.0 mg.m⁻³, thus suggesting that productivity in this region was the most affected by the warm conditions of 2017 CEN (Figs. 5, 6, 7). Conversely, from 11°S to 16°S, thermal anomalies decreased to +2.0 °C, while chlorophyll-a anomalies were highly variable (between -4.0 to +13.0 mg.m⁻³). Finally, between 16°S and 18°S, thermal conditions were normal, and chlorophyll-a anomalies fluctuated between -0.5 mg.m⁻³ and +4.2 mg.m⁻³ (Figs. 6, 7).

Regarding the variability of the size of the productive area, an anomaly of -41.7% was recorded in December 2015, which was followed by a normalization pattern in summer and autumn 2016. Then, a period with larger-than-normal productive areas developed in winter and spring 2016. With the occurrence of 2017 CEN, a reduction in the size of the productive area was observed in January (+7.04%), leading to a period of significant negative anomalies until spring 2017, to finally initiate a new period of expansion of the productive area (Fig. 8). It is noteworthy that, in March, climatologically, the productive area reached 150 nm off the northern coast of Peru and a total extension of 120,722.8 nm² for the area between 3°S and 21°S. In March 2017, the productive area retreated to 40 nm off Paita and 60 nm off Chicama, and its extent was reduced to 49.2% (Fig. 8). However, for the area between 4° and 13°S, the reduction reached 67.0%. In summer, the extent of the productive area was reduced by 24.0% in 2017 and by 25.0% in 2016 for the entire area evaluated. If only the area between 4° and 13°S is considered, the contraction of the productive area in the summer was 33.4% and 32.2%, respectively (Table 1).

Physical and biogeochemical conditions in March 2017 off Paita and Chicama according to *in situ* information

Paita

Thermal anomalies between +2.0 °C and +7.0 °C were recorded in the upper 40 m layer by late March 2017. Salinity was below 34.9, decreasing towards the surface and the coast, possibly as a result of rainfall, recording a minimum value of 28.5 at 11 nm from Paita. Under these thermohaline conditions, the DO content varied between 4.0

mL.L⁻¹ entre 30 m y 5 m de profundidad, entre la zona oceánica y costera, respectivamente. Se observó el efecto de las aguas cálidas en la solubilidad del OD, manifestado en el grado de saturación de las aguas superficiales, especialmente fuera de las 80 mn. La iso-oxígena de 3,0 mL.L⁻¹ se ubicó desde 50 m hasta 20 m en la zona costera, muy similar a la isoterma de 20,0 °C. En cambio, la iso-oxígena de 2,0 mL.L⁻¹ se presentó a 50 m y 100 mn de la costa y se profundizó hasta 85 m dentro de 20 mn, del mismo modo que la isoterma de 18,0 °C, indicando la presencia de un flujo subsuperficial hacia el sur. La oxiclina se presentó entre 25 y 60 mn fuera de 40 mn de la costa, mientras que el límite superior de la ZMO (OD < 0,5 mL/L) se detectó a 130 m de profundidad, asociado a valores de saturación de 10% de OD.

La distribución de nutrientes presentó en los primeros 20 m, concentraciones de fosfatos de 0,5 µmol.L⁻¹, silicatos - nitratos de 2,5 µmol.L⁻¹ y nitritos de 0,1 µmol.L⁻¹. La razón N:P en esta capa estuvo entre 2,5 y 5,0. Por debajo de 50 m de profundidad, se encontraron concentraciones de nutrientes habituales de aguas frías, con fosfatos superiores a 1,0 µmol.L⁻¹ y silicatos - nitratos mayores a 5,0 µmol.L⁻¹. Además, se apreció tendencia al afloramiento de concentraciones de 1,0 µmol.L⁻¹ de fosfatos y 5,0 µmol.L⁻¹ de silicatos - nitratos, alcanzando la superficie del mar en la zona costera y generando valores N:P entre 5,0 y 7,5 en las aguas afloradas (Fig. 9).

mL.L⁻¹ and 4.5 mL.L⁻¹ at depths ranging from 30 m to 5 m, between the oceanic and coastal zones, respectively. The effect of warm waters on DO solubility was observed, as evidenced by the degree of saturation of surface waters, especially outside of 80 nm. The 3.0 mL.L⁻¹ iso-oxygen was located from 50 m to 20 m in the coastal zone, very similar to the 20.0 °C isotherm. In contrast, the 2.0 mL.L⁻¹ iso-oxygen occurred at 50 m within 100 nm offshore and deepened to 85 m within 20 nm, similar to the 18.0°C isotherm, indicating the presence of a subsurface flow to the south. Oxycline occurred between 25 and 60 nm out to 40 nm offshore, while the upper limit of the OMZ (DO < 0.5 mL/L) was detected at a depth of 130 m, associated with saturation values of 10% of DO.

The nutrient distribution in the first 20 m showed phosphate concentrations of 0.5 µmol.L⁻¹, silicate - nitrate concentrations of 2.5 µmol.L⁻¹, and nitrite concentrations of 0.1 µmol.L⁻¹. The N:P ratio in this layer was between 2.5 and 5.0. At levels below 50 m, the usual nutrient concentrations of cold waters were found, with phosphates greater than 1.0 µmol.L⁻¹ and silicates-nitrates greater than 5.0 µmol.L⁻¹. There was also a noticeable upwelling pattern of concentrations of 1.0 µmol.L⁻¹ of phosphates and 5.0 µmol.L⁻¹ of silicates - nitrates, reaching the sea surface in the coastal zone and generating N:P values between 5.0 and 7.5 in the upwelled waters (Fig. 9).

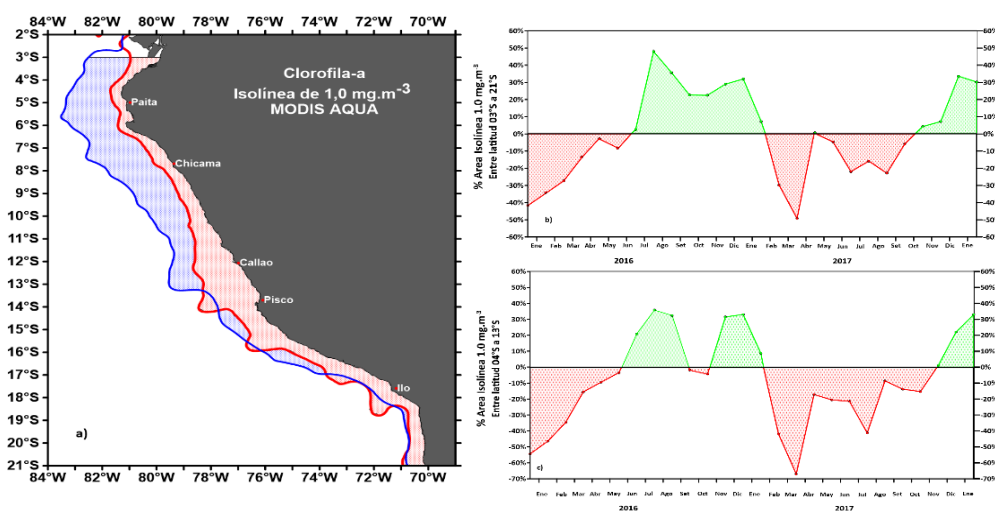


Figura 8.- Distribución de la isolinia de 1,0 de Clorofila-a (mg.m⁻³), a) estimación de las áreas acotadas al perfil costero en marzo 2017 en rojo – área habitual climatología 2003 – 2016, b) serie de porcentajes de áreas limitadas entre 3°S-21°S, perfil del litoral y la isolinia de 1,0 mg.m⁻³, registradas sobre lo habitual entre diciembre 2015 y enero 2018, c) serie de porcentajes de áreas limitadas entre 4°S-13°S, perfil del litoral y la isolinia de 1,0 mg.m⁻³, registradas sobre lo habitual entre diciembre 2015 y enero 2018. Fuente: MODIS AQUA

Figure 8. Distribution of the 1.0 Chlorophyll-a isoline (mg.m⁻³), a) estimation of the areas bounded to the coastal profile in March 2017 in red - climatological area 2003 - 2016, b) series of percentages of limited areas between latitudes 03°S-21°S, coastal profile and the 1.0mg.m⁻³ isoline, recorded above usual between December 2015 to January 2018, and c) series of percentages of limited areas between latitudes 04°S-13°S, coastal profile and the isoline of 1.0 mg.m⁻³, recorded above usual between December 2015 to January 2018. Source: MODIS AQUA

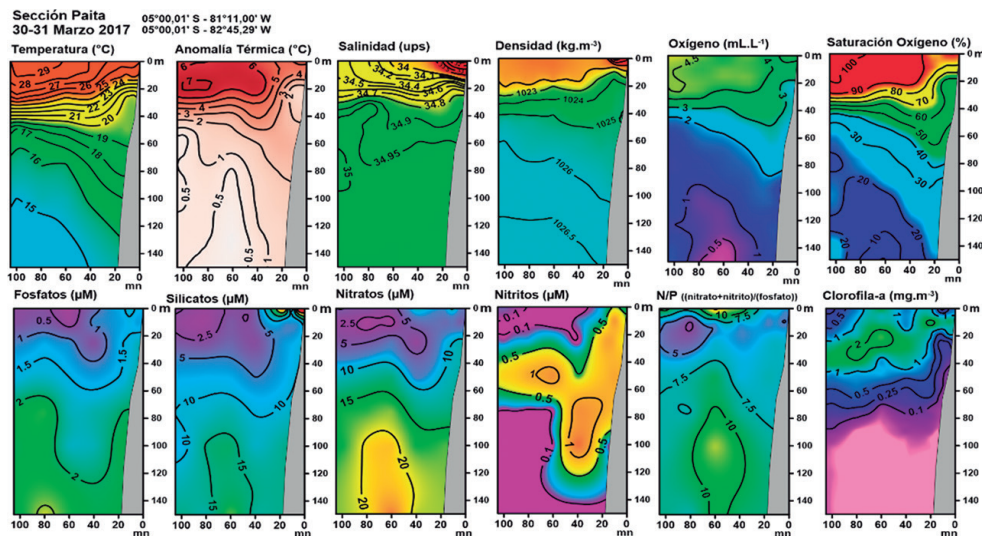


Figura 9.- Sección Paita – Distribución Vertical de Temperatura (°C), Anomalia Térmica (°C), Salinidad (ups), Densidad (kg.m-3), Oxígeno Disuelto (mL.L-1), Saturación de Oxígeno (%), Fosfato (µM), Silicato (µM), Nitrato (µM), Nitrito (µM), Tasa NP y Clorofila-a (mg.m-3). Monitoreo marzo 2017

Figure 9. Paita Section - Vertical Distribution of Temperature (°C), Thermal Anomaly (°C), Salinity (PSU), Density (kg.m-3), Dissolved Oxygen (mL.L-1), Oxygen Saturation (%), Phosphate (µM), Silicate (µM), Nitrate (µM), Nitrite (µM), NP Rate, and Chlorophyll-a (mg.m-3). March 2017 monitoring

A 60 mn de la costa, se detectaron anomalías positivas de OD en la capa de los 150 m, con un máximo de +1,04 mL.L⁻¹, asociadas a temperaturas cálidas y salinidades bajas. Por su parte, a 60 mn de costa se estimaron anomalías negativas en las concentraciones de fosfatos de hasta -0,86 µmol.L⁻¹ y de silicatos hasta -6,06 µmol.L⁻¹ en la capa de 150 m, mientras que para los nitratos, las anomalías negativas se presentaron en los primeros 25 m, con valores de hasta -3,76 µmol.L⁻¹ (Tabla 2).

La clorofila-a presentó valores de 0,5 a 1,0 mg.m⁻³ en la capa superficial, acorde con la presencia de aguas cálidas de baja salinidad. En una capa intermedia (20 – 40 m fuera de las 20 mn y, 5 – 20 m en la zona costera) se observaron núcleos de 2,0 mg.m⁻³, debajo de los cuales las concentraciones disminuyeron rápidamente con la profundidad, registrando valores de 0,25 mg.m⁻³ a 60 m de profundidad fuera de las 20 mn, y a 30 m en la zona más cercana de la costa.

Chicama

Las condiciones cálidas se apreciaron con mayor intensidad sobre los 40 m de profundidad, destacando las isoterms entre 23,0 °C y 28,0 °C que afloraron hacia la costa. En tanto las anomalías térmicas en dicha capa variaron entre +7 °C y +2,0 °C, en la zona oceánica y costera, respectivamente. La salinidad exhibió valores menores a 34,8 en la capa superficial (< 20 m) y un núcleo subsuperficial de altos valores fuera de las 60 mn alcanzando valores superiores a 35,2, señalando la presencia de aguas subtropicales

Positive DO anomalies were detected in the 150 m layer at 60 nm offshore, with a maximum of +1.04 mL.L⁻¹, associated with warm temperatures and low salinities. Likewise, negative anomalies were estimated for phosphate concentrations up to -0.86 µmol.L⁻¹ and up to -6.06 µmol.L⁻¹ for silicates in the same layer. Finally, for nitrates, negative anomalies occurred in the first 25 m, with values up to -3.76 µmol.L⁻¹ (Table 2).

Chlorophyll-a had values of 0.5 to 1.0 mg.m⁻³ in the surface layer, which is consistent with the presence of warm waters with low salinity. In an intermediate layer (20 - 40 m outside the 20 nm and 5 - 20 m in the coastal zone) nuclei of 2.0 mg.m⁻³ were observed, below which concentrations decreased rapidly with depth, with values of 0.25 mg.m⁻³ at a depth of 60 m outside the 20 nm, and 30 m in the nearshore zone.

Chicama

The warm conditions were more intense above a depth of 40 m, with isotherms between 23.0 °C and 28.0 °C that surfaced towards the coast. In the oceanic and coastal zones, the thermal anomalies in this layer varied between +7°C and +2.0 °C, respectively. Salinity showed values below 34.8 in the surface layer (< 20 m) and a subsurface nucleus of high values outside 60 nm reaching values above 35.2, which indicated the presence of shallow subtropical waters (Fig. 10). The DO in the mixing layer had concentrations between

superficiales (Fig. 10). El OD en la capa de mezcla, presentó concentraciones entre 4,0 mL.L⁻¹ y 5,0 mL.L⁻¹ por fuera de 20 mn, disminuyendo hacia la zona costera, donde las iso-oxígenas de 2,0 mL.L⁻¹ y 3,0 mL.L⁻¹ ascendieron desde 50 y 40 m hasta 10 m y 5 m de profundidad, respectivamente. La oxiclina se ubicó entre 20 y 40 m de profundidad, tendiendo a ascender hacia la costa, mientras que el límite superior de la ZMO fue detectable a partir de 100 m de profundidad. La saturación de oxígeno presentó valores de 80% a 110% en la capa superficial más cálida, disminuyendo hacia la zona costera. En la ZMO la saturación de oxígeno varió entre 5% y 10%.

En la capa de 40 m por fuera de las 30 mn de la costa (25 – 28 °C; +4,0 a +7,0 °C), se determinaron fosfatos de 0,5 µmol.L⁻¹, silicatos-nitratos de 2,5 µmol.L⁻¹ y nitritos de 0,1 µmol.L⁻¹. Sobre los 10 m, se determinó una relación N/P superior a 15,0 por fuera de 80 mn y dentro de 40 mn, así como de alrededor de 10,0 en la zona intermedia; sin embargo, entre 10 y 40 m la razón N:P se redujo significativamente, alcanzando valores menores a 5,0 entre 40 y 80 mn. Dentro de las 25 mn costeras, se evidenció un afloramiento, con ascenso de concentraciones de 1,0 µmol.L⁻¹ de fosfatos desde 50 m hasta 10 m, así como de 10,0 µmol.L⁻¹ de silicatos y nitratos, que alcanzaron la superficie del mar desde 100 y 50 m, respectivamente. Además, se detectaron nitritos en esta franja con concentraciones de 1,0 a 2,0 µmol.L⁻¹, asociados al ascenso de aguas hipóxicas dentro de las 20 mn y a pequeños núcleos de clorofila-a de 2,0 a 3,0 mg.m⁻³ (Fig. 10).

4.0 mL.L⁻¹ and 5.0 mL.L⁻¹ outside 20 nm, then decreasing towards the coastal zone, where iso-oxygen of 2.0 mL.L⁻¹ and 3.0 mL.L⁻¹ ascended from depths of 50 and 40 m to 10 m and 5 m, respectively. Oxycline was located between about 20 and 40 m deep and ascended towards the shore, while the upper limit of the OMZ was detectable from 100 m deep. Oxygen saturation values ranged from 80% to 110% in the warmer surface layer, decreasing towards the coastal zone. In the OMZ, oxygen saturation varied between 5% and 10%.

In the 40 m layer, outside 30 nm offshore (25 – 28 °C; +4.0 to +7.0 °C), we found phosphates of 0.5 µmol.L⁻¹, silicates - nitrates of 2.5 µmol.L⁻¹, and nitrites of 0.1 µmol.L⁻¹. Above 10 m, an N/P ratio above 15.0 was determined outside 80 nm and within 40 nm, as well as around 10.0 in the intermediate zone. Nevertheless, between 10 and 40 m, the N:P ratio was significantly reduced, reaching values below 5.0 between 40 and 80 nm. Upwelling was evident within the coastal 25 nm with ascending concentrations of phosphates of 1.0 µmol.L⁻¹ from 50 m to 10 m, as well as silicates-nitrates of 10.0 µmol.L⁻¹, which reached the sea surface from 100 m and 50 m, respectively. Furthermore, nitrites were detected in this strip with concentrations of 1.0 to 2.0 µmol.L⁻¹, associated with the ascent of hypoxic waters within 20 nm and small chlorophyll-a nuclei of 2.0 to 3.0 mg.m⁻³. (Fig. 10).

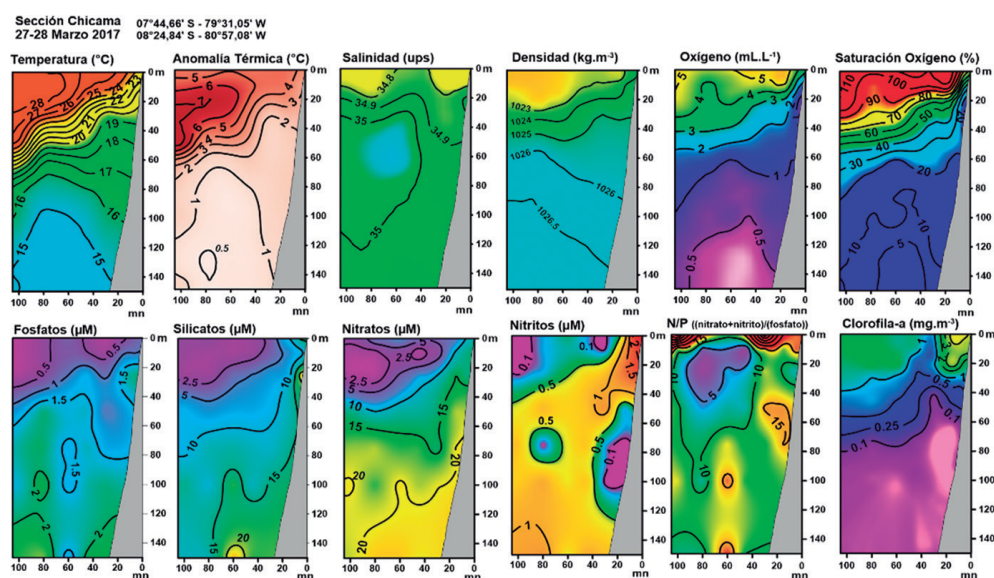


Figura 10.- Sección Chicama – Distribución Vertical de Temperatura (°C), Anomalia Térmica (°C), Salinidad (ups), Densidad (kg.m⁻³), Oxígeno Disuelto (mL.L⁻¹), Saturación de Oxígeno (%), Fosfato (µM), Silicato (µM), Nitrato (µM), Nitrito (µM), Tasa NP y Clorofila-a (mg.m⁻³). Monitoreo marzo 2017

Figure 10. Chicama Section – Vertical Distribution of Temperature (°C), Thermal Anomaly (°C), Salinity (PSU), Density (kg.m⁻³), Dissolved Oxygen (mL.L⁻¹), Oxygen Saturation (%), Phosphate (µM), Silicate (µM), Nitrate (µM), Nitrite (µM), NP Rate, and Chlorophyll-a (mg.m⁻³). March 2017

Tabla 2.- Anomalías de Variables Oceanográficas a 60 mn de la costa de Paita para marzo 2017 y patrones de marzo con datos de IMARPE 1964 – 2016

Table 2. Oceanographic Variables Anomalies at 60 nm off the coast of Paita for March 2017 and March patterns with IMARPE data 1964 - 2016

| Zona / Marzo Zone/ March 2017 | Profundidad (m) | Anomalia de Temperatura | Anomalia de Salinidad (ups) | Anomalia de Oxígeno Patrón O ₂ (mL.L ⁻¹) | Anomalia de Fosfato / Patrón P (μmol.L ⁻¹) | Anomalia de Silicato/ Patrón S (μmol.L ⁻¹) | Anomalia de Nitrato / Patrón N (μmol.L ⁻¹) | Anomalia de N/P / Patrón N/P |
|--|--------------------|----------------------------|-----------------------------------|--|---|---|--|------------------------------------|
| Paita | 0 | +6,25 | -0,78 | +0,48 / 5,17 | -0,86 / 1,08 | -4,64 / 7,17 | -0,66 / 4,76 | +11,46 / 4,94 |
| Paita | 10 | +7,07 | -0,84 | +0,85 / 4,42 | -0,83 / 1,14 | -3,33 / 6,75 | -3,76 / 5,22 | -0,04 / 5,25 |
| Paita | 25 | +5,11 | -0,14 | +0,46 / 3,49 | -0,20 / 1,38 | -5,51 / 9,48 | -0,23 / 7,75 | +0,36 / 6,32 |
| Paita | 50 | +2,06 | -0,17 | +0,54 / 1,94 | -0,14 / 1,64 | -6,06 / 14,06 | +1,19 / 12,01 | +1,78 / 7,89 |
| Paita | 75 | +0,67 | -0,06 | +1,04 / 1,19 | -0,15 / 1,88 | -3,46 / 16,37 | +3,08 / 15,01 | +2,11 / 8,35 |
| Paita | 100 | +0,55 | -0,04 | +0,18 / 0,81 | -0,27 / 1,97 | -3,06 / 19,68 | +5,56 / 16,00 | +4,10 / 8,58 |
| Paita | 150 | +0,37 | -0,03 | -0,20 / 0,58 | +0,24 / 2,02 | -1,18 / 20,34 | +7,38 / 16,80 | +1,87 / 8,83 |
| Chicama | 0 | +4,77 | -0,19 | -0,07 / 5,47 | -0,30 / 1,11 | -2,72 / 4,13 | +4,57 / 4,40 | +7,16 / 4,38 |
| Chicama | 10 | +5,91 | -0,16 | +0,07 / 5,15 | -0,52 / 1,14 | -3,67 / 4,68 | -1,73 / 4,44 | +0,68 / 4,16 |
| Chicama | 25 | +6,55 | -0,07 | +0,93 / 3,02 | -0,64 / 1,62 | -4,13 / 8,38 | -2,33 / 7,71 | +0,21 / 5,74 |
| Chicama | 50 | +2,81 | 0,04 | +1,03 / 1,55 | -0,30 / 1,86 | -6,45 / 14,14 | -2,84 / 14,74 | -0,49 / 8,59 |
| Chicama | 75 | +0,59 | 0,02 | +0,13 / 0,72 | -0,65 / 1,94 | -2,03 / 15,39 | +1,31 / 15,38 | +5,13 / 8,27 |
| Chicama | 100 | +0,45 | -0,01 | +0,08 / 0,58 | -0,83 / 2,11 | +1,40 / 16,72 | +4,61 / 16,01 | +8,70 / 7,87 |
| Chicama | 150 | +0,72 | 0,00 | -0,07 / 0,40 | -1,03 / 2,27 | +4,77 / 18,34 | +3,50 / 17,89 | +9,63 / 8,09 |

A 60 mn de la costa, las anomalías de OD presentaron valores positivos en los primeros 100 m, a 50 m con un máximo de +1,03 mL.L⁻¹. Los nutrientes presentaron anomalías negativas; en el caso de los fosfatos, estos se presentaron en la capa de 150 m con valores de hasta -1,03 μmol.L⁻¹; los silicatos exhibieron anomalías negativas en la capa de 75 m hasta -6,45 μmol.L⁻¹ y los nitratos, en la capa de 50 m con valores de hasta -2,84 μmol.L⁻¹ (Tabla 2).

La concentración de clorofila-a en la capa de 30 m, por fuera de 30 mn varió entre 0,5 mg.m⁻³ y 1 mg.m⁻³ en promedio, mientras que en la zona costera se observó un núcleo de hasta 4,0 mg.m⁻³. Por debajo de esta capa las concentraciones disminuyeron rápidamente, alcanzando 0,25 mg.m⁻³ entre 40 y 60 m de profundidad (Fig. 10).

4. DISCUSIÓN

La magnitud que alcanzaron las anomalías térmicas costeras en el verano 2017, de hasta +6,0 °C en promedio, fue semejante a la registrada en los eventos El Niño extraordinario de 1982-83 o 1997-98 (CARR *et al.*, 2002; SÁNCHEZ *et al.*, 2000). Para la zona oceánica en cambio, las anomalías térmicas registradas al este de 100° W fueron similares a las del verano 2016, en la fase final de El Niño 2015-16 (Fig. 5). En tal sentido, es remarcable cómo un proceso desarrollado a partir de un forzamiento de carácter más local y no de tipo remoto (GARREAUD, 2018; ECHEVIN *et*

DO anomalies at 60 nm offshore showed positive values in the first 100 m, peaking at 50 m with +1.03 mL.L⁻¹. Nutrients had negative anomalies. Regarding phosphates, they occurred in the 150 m layer with values up to -1.03 μmol.L⁻¹, the silicates presented negative anomalies in the 75 m layer up to -6.45 μmol.L⁻¹, and the nitrates, in the 50 m layer, showed values up to -2.84 μmol.L⁻¹ (Table 2).

In the 30 m layer and outside 30 nm, chlorophyll-a concentrations ranged from 0.5 mg.m⁻³ and 1 mg.m⁻³ on average, while a nucleus of up to 4.0 mg.m⁻³ was observed in the coastal zone. Below this layer, concentrations decreased rapidly, reaching 0.25 mg.m⁻³ between depths of 40 m and 60 m (Fig. 10).

4. DISCUSSION

In summer 2017, the magnitude reached by the coastal thermal anomalies, up to +6.0 °C on average, was similar to that recorded in the extraordinary 1982/83 or 1997/98 EN events (CARR *et al.*, 2002; SÁNCHEZ *et al.*, 2000). On the other hand, the thermal anomalies recorded east of 100° W were similar to those of the summer of 2016, in the final phase of EN 2015/16 (Fig. 5). Thus, it is noteworthy how a process developed from a more local and not remote forcing (GARREAUD, 2018; ECHEVIN *et al.*, 2018; RODRÍGUEZ – MORATA *et al.*, 2019), resulted

al., 2018; RODRÍGUEZ – MORATA *et al.*, 2019), generó consecuencias similares en las condiciones térmicas y halinas frente al norte del Perú.

Desde el punto de vista de las condiciones biogeoquímicas, es conocido que el límite superior de la ZMO se profundiza en la fase cálida del ENSO (FUENZALIDA *et al.*, 2009; ESPINOZA *et al.*, 2019). En marzo 1998, el límite superior de la ZMO se ubicó a 280 m de profundidad frente a Paita (FLORES *et al.*, 1998). Para marzo 2017, el límite superior de la ZMO se ubicó a 140 m y 100 m de profundidad, frente a Paita y Chicama, respectivamente. Otras observaciones también han documentado mayor profundidad de la ZMO durante El Niño (MORALES *et al.*, 1999; SÁNCHEZ *et al.*, 2000; CHAVEZ *et al.*, 2008; GUTIÉRREZ *et al.*, 2008) que la registrada durante El Niño Costero 2017. Debe notarse además que, para marzo 2017, ya se había producido el arribo de ondas Kelvin de hundimiento, las cuales profundizaron la estructura vertical de la columna de agua, a diferencia de enero y febrero en los cuales el calentamiento se generó y se sostuvo principalmente por el debilitamiento del viento regional, afectando la capa superficial de la columna de agua (ANCULLE *et al.*, 2021). Es así que, frente a Paita, para enero 2017, concentraciones por debajo de 0,5 mL/L fueron detectadas entre 50 y 100 m de profundidad, y luego, nuevamente, por debajo de 170 m; mientras que, frente a Chicama, el límite superior de la ZMO se registró entre 30 y 50 m de profundidad en enero y febrero 2017, respectivamente (ENFEN, 2017). En síntesis, El Niño Costero 2017 generó impactos diferentes sobre la distribución del OD en la columna de agua en comparación a los eventos El Niño asociados al ENSO, induciendo una profundización significativamente menor del límite superior de la ZMO.

Las concentraciones superficiales de fosfatos ($<0,5 \mu\text{mol.L}^{-1}$) y nitratos ($\sim 2,5\text{--}5 \mu\text{mol.L}^{-1}$) detectadas en el verano 2017 tanto frente a Paita como frente a Chicama, estuvieron por debajo del promedio climatológico (Tabla 2, Figs. 9, 10), contrastando además con los valores típicos de las aguas del afloramiento costero ($>1,0 \mu\text{mol.L}^{-1}$ de fosfatos y $>12,0 \mu\text{mol.L}^{-1}$ de nitratos; CALIENES, 2014). Como se ha mencionado anteriormente, las razones N:P en las aguas costeras peruanas suelen estar por debajo de la proporción de Redfield (HAMERSLEY *et al.*, 2007; FRANZ *et al.*, 2012), pero se incrementan y aproximan a dicha proporción durante los eventos El Niño (GRACO *et al.*, 2017). En marzo 2017, la razón N:P tuvo un valor promedio de 5,0 entre 10 y 40 m frente a Paita y a Chicama dentro de las 100 mn de la costa, es decir dentro de la capa superior estratificada (Figs. 9 y 10). Asimismo, la serie de tiempo de N:P en la columna de agua frente a Paita, señala que valores $\leq 5,0$ de N:P estaban presentes en la capa superficial, principalmente en las aguas costeras, des-

in similar consequences in the thermal and haline conditions off northern Peru.

In terms of biogeochemical conditions, it is known that the upper limit of the OMZ deepens during the warm phase of ENSO (FUENZALIDA *et al.*, 2009; ESPINOZA *et al.*, 2019). In March 1998, the upper limit of the OMZ was located at a depth of 280 m off Paita (FLORES *et al.*, 1998). By March 2017, the upper limit of the OMZ was located at depths of 140 m and 100 m off Paita and Chicama, respectively. Other authors have also documented a greater depth of the OMZ during EN (MORALES *et al.*, 1999; SÁNCHEZ *et al.*, 2000; CHAVEZ *et al.*, 2008; GUTIÉRREZ *et al.*, 2008) than that recorded during 2017 CEN. We should also consider that, by March 2017, the arrival of downwelling equatorial Kelvin waves had already occurred. Therefore, the vertical structure of the water column deepened, unlike in January and February, when the warming was generated and sustained mainly by the weakening of the regional wind, affecting the surface layer of the water column (ANCULLE *et al.*, 2021). Thus, in January 2017, concentrations below 0.5 mL/L were detected between depths of 50 and 100 m off Paita, and then again below 170 m. Regarding Chicama, the upper limit of the OMZ was recorded between depths of 30 and 50 m in January and February 2017, respectively (ENFEN, 2017). To sum up, 2017 CEN triggered different impacts on the distribution of DO in the water column compared to the EN, associated with ENSO, producing a significantly shallower deepening of the upper limit of the OMZ.

In summer 2017, surface concentrations of phosphate ($<0.5 \mu\text{mol.L}^{-1}$) and nitrates ($\sim 2.5\text{--}5 \mu\text{mol.L}^{-1}$) detected off both Paita and Chicama were below the climatological average (Table 2, Figs. 9, 10), further contrasting with typical values for coastal upwelling waters ($>1.0 \mu\text{mol.L}^{-1}$ of phosphates and $>12.0 \mu\text{mol.L}^{-1}$ of nitrates; CALIENES, 2014). As previously mentioned, N:P ratios in Peruvian coastal waters are usually below the Redfield ratio (HAMERSLEY *et al.*, 2007; FRANZ *et al.*, 2012), but increase and approach that ratio during EN events (GRACO *et al.*, 2017). In March 2017, the N:P ratio averaged 5.0 between 10 and 40 m off Paita and Chicama within 100 nm offshore, *i.e.* within the upper stratified layer (Figs. 9, 10). Likewise, the time series of N:P in the water column off Paita indicates that values ≤ 5.0 of N:P were present in the surface layer, mainly in the coastal waters, since spring 2016, characterized by intense upwelling and shallow oxycline, extending into summer 2017 (Figs. 3, 4), a period

de la primavera 2016, caracterizada por afloramiento intenso y oxiclina superficial, prolongándose hasta el verano 2017 (Figs. 3, 4), período más bien caracterizado por un afloramiento muy debilitado y fuerte estratificación superficial (ESPINOZA *et al.*, 2021; J. QUISPE *et al.*, 2021). En consecuencia, los bajos valores de N:P de la primavera 2016 pueden atribuirse a los procesos de pérdida de N y elevadas concentraciones de fosfato que suelen caracterizar las aguas subsuperficiales y de afloramiento costero (FRANZ *et al.*, 2012; GRACO *et al.*, 2016), mientras que los del verano 2017 al consumo preferencial de N sobre el P en un ambiente fuertemente estratificado y limitado por nutrientes. No obstante, esta hipótesis requeriría un análisis ampliado de los datos recolectados en este período y/o el modelamiento biogeoquímico en este contexto temporal.

En periodos de activo afloramiento, la concentración de clorofila-a en superficie (MODIS-AQUA) alcanza valores entre 5,0 y 10,0 mg.m⁻³ de Paita a Chicama dentro de 20 mn de la costa, como patrón climatológico de marzo. La tendencia a la disminución promedio de la productividad durante los eventos El Niño ha sido ampliamente descrita (BARBER & CHAVEZ, 1983; CALIENES *et al.*, 1985; CALIENES, 2014; ESPINOZA *et al.*, 2017). Para los eventos extraordinarios de 1982-83 y 1997-98, existen registros *in situ* de concentraciones superficiales de clorofila-a inferiores a 0,30 mg.m⁻³ al norte de 14°S en el verano de 1983 (CALIENES, 2014), así como de valores entre 0,47 mg.m⁻³ y 1,00 mg.m⁻³ a lo largo de la franja adyacente a la costa peruana en el verano 1998 (CARR *et al.*, 2002). En marzo 2017, las concentraciones superficiales de clorofila-a dentro de las 20 mn entre Paita y Chicama variaron entre 0,85 y 5,45 mg.m⁻³, correspondiendo a anomalías negativas entre -5,94 mg.m⁻³ y -1,69 mg.m⁻³. Además, las concentraciones más bajas se registraron desde Talara hasta Chimbote, con valores de 1 mg⁻³ en promedio, mientras que las anomalías más intensas de clorofila-a superficial se ubicaron entre 6° y 11°S (Figs. 6, 7). En tal sentido, los mayores impactos estuvieron limitados al norte de Callao, donde se desarrolló el mayor calentamiento durante el evento y las aguas costeras se presentaron empobrecidas de nutrientes, asociadas a la fuerte estratificación (QUISPE *et al.*, 2021). Asimismo, en esta zona la superficie estuvo sujeta a una insolación menor a lo normal posiblemente asociada a las altas precipitaciones ocurridas durante el evento (ESPINOZA *et al.*, 2021). En cambio, al sur de 12°S, las concentraciones normales o altas son consistentes con la recuperación más rápida del afloramiento costero en esta región (ECHEVIN *et al.*, 2018) y con ello de la fertilidad de las aguas costeras.

Aunque el impacto de El Niño Costero 2017 sobre el tamaño del área productiva fue similar al de El Niño 2015-16 para el período de verano entre enero y marzo (~ 24%), la contracción observada en

rather characterized by very weakened upwelling and strong surface stratification (ESPINOZA *et al.*, 2021; QUISPE *et al.*, 2021). Therefore, the low N:P values of spring 2016 may be attributed to N loss processes and elevated phosphate concentrations that typically characterize subsurface and coastal upwelling waters (FRANZ *et al.*, 2012; GRACO *et al.*, 2016). On the other hand, in summer 2017, such low values could be explained by the preferential consumption of N over P in a strongly stratified and nutrient-limited environment. Nonetheless, this hypothesis would require extended analysis of data collected in this period and/or biogeochemical modeling in this temporal context.

When active upwelling occurs, the surface chlorophyll-*a* concentration (MODIS-AQUA) reaches values between 5.0 to 10.0 mg.m⁻³ from Paita to Chicama within 20 nm offshore, as a climatological pattern in March. The mean decreasing productivity pattern during EN has been widely described (BARBER & CHAVEZ, 1983; CALIENES *et al.* 1985; CALIENES 2014; ESPINOZA *et al.* 2017). There are *in situ* records for the extraordinary events of 1982/83 and 1997-/98, with chlorophyll-*a* surface concentrations below 0.30 mg.m⁻³ north of 14°S in the summer of 1983 (CALIENES, 2014), as well as values between 0.47 mg.m⁻³ and 1.00 mg.m⁻³ along the strip adjacent to the Peruvian coast in the summer of 1998 (CARR *et al.*, 2002). In March 2017, surface chlorophyll-*a* concentrations within 20 nm between Paita and Chicama ranged from 0.85 to 5.45 mg.m⁻³, corresponding to negative anomalies between -5.94 mg.m⁻³ and -1.69 mg.m⁻³. Also, the lowest concentrations were recorded from Talara to Chimbote, with values of 1 mg⁻³ on average, while the strongest surface chlorophyll-*a* anomalies were located between latitudes 06° and 11°S (Figures 6 and 7). In this regard, the greatest impacts were restricted to the north of Callao, where the greatest warming occurred during the event and the coastal waters were depleted of nutrients, associated with the strong stratification (QUISPE *et al.*, 2021). Likewise, the surface in this area was subject to lower-than-normal insolation, possibly associated with the heavy rainfall that occurred during the event (ESPINOZA *et al.*, 2021). Conversely, south of 12°S, normal or high concentrations are consistent with the more rapid recovery of coastal upwelling in this region (ECHEVIN *et al.*, 2018) and thereby of the fertility of coastal waters.

Even though the impact of both events, 2017 CEN and EN 2015/16, on the size of the productive area

marzo 2017 (-49%) fue mayor a la de cualquier mes del verano 2016, alcanzando una magnitud similar a la ocasionada por El Niño 1997-98 (-50%; NIXON & THOMAS, 2001). No obstante, como evento en su conjunto (diciembre 2016 a mayo 2017; ENFEN, 2017), el impacto sobre el área productiva (-7%) fue mucho menor al de EN 1997-98 o inclusive al de 2015-16 (abril 2015 a junio 2016; -14%). Esto sería consecuencia de la limitada escala espacial y temporal de las anomalías oceanográficas, debido posiblemente al contexto neutral del ENOS.

5. CONCLUSIONES

El Niño Costero 2017 tuvo registros elevados de anomalías térmicas, asociados a condiciones estratificadas, con máximos de la temperatura superficial del mar en marzo 2017, alcanzando al norte de 12°S condiciones críticas. Un efecto negativo cuantificable sobre la productividad y fertilidad del Ecosistema de la Corriente de Humboldt se observó, cambiando el patrón habitual a bajas concentraciones de nutrientes y clorofila-a.

Frente a la costa norte, los nutrientes exhibieron concentraciones debajo de lo normal, especialmente fosfatos y silicatos. La relación N:P se mantuvo en valores muy por debajo de la proporción de Redfield en la capa superior estratificada, con excepción de lo observado al final del verano.

Las condiciones de alta estratificación en la columna de agua estuvieron relacionadas a una disminución significativa de la concentración de clorofila-a. El efecto adverso a escala del ecosistema se evidenció en la reducción del área productiva ($chl-a \leq 1 \text{ mg m}^{-3}$) en un 49% para la costa entre 3° y 21°S y en 67% frente a la costa central y norte, en marzo 2017. A escala del verano la reducción del área productiva (-25%) fue similar a la ocurrida en el mismo período durante El Niño 2015-16; y a escala del evento El Niño 2017, la disminución del área productiva fue aún menor que en El Niño 2015-16.

El impacto de El Niño Costero 2017 sobre la distribución vertical del oxígeno disuelto frente a la costa norte se limitó a los primeros 50 – 100 m, a diferencia de lo habitual en eventos El Niño, en los cuales la oxigenación de la columna de agua suele afectar hasta los 200 m, inclusive.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a los colegas Carlos Robles y Miguel Sarmiento, por su trabajo y cooperación en los análisis químicos, toma de muestra y sus tiempos prolongados de navegación. Agradecemos al grupo Oceandata de la NASA por el conjunto de datos del MODIS AQUA y la agencia NOAA: *Center for Weather and Climate Prediction Climate Prediction Center*.

was very similar, the contraction observed in March 2017 (-49%) was greater than that of any month in summer 2016 (~24%), reaching a similar magnitude to that caused by EN 1997/98 (-50%; NIXON & THOMAS, 2001). Nevertheless, for the entire event (December 2016 to May 2017; ENFEN, 2017), the impact on the productive area (-7%) was much less than that of EN 1997/98 or even 2015/16 (April 2015 to June 2016; -14%). This would be the result of the limited spatial and temporal scale of the oceanographic anomalies, possibly due to the neutral ENSO context.

5. CONCLUSIONS

2017 CEN had elevated records of thermal anomalies, associated with stratified conditions, with peaks of sea surface temperature in March 2017, reaching critical conditions to the north of 12°S. A measurable negative effect on the productivity and fertility of the Humboldt Current Ecosystem was observed, changing the usual pattern to low nutrient concentrations and chlorophyll-a.

Nutrients, off the north coast, showed below-normal concentrations, especially phosphates and silicates. The N:P ratio remained at values well below the Redfield ratio in the upper stratified layer, except as observed in late summer.

High stratification conditions in the water column were related to a significant decrease in chlorophyll-a concentration. The adverse effect at the ecosystem scale was evidenced by a reduction in productive area ($chl-a \leq 1 \text{ mg m}^{-3}$) by 49% for the coast between 3° and 21°S and by 67% off the central and northern coast in March 2017. At the summer scale, the reduction in productive area (-25%) was similar to that which occurred in the same period during EN 2015/16 and at the scale of the 2017 CEN event, the decrease in the productive area was even smaller than in the previous event.

During the 2017 event, dissolved oxygen vertical distribution off the north coast was limited to the first 50 - 100 m, as opposed to the usual EN events, in which oxygenation of the water column is usually affected up to and including 200 m.

Acknowledgments

The authors would like to thank Carlos Robles and Miguel Sarmiento for their work and cooperation in chemical analysis, sampling, and extended sailing times. We thank the NASA Oceandata group for the MODIS AQUA dataset and the NOAA: *Center for Weather and Climate Prediction Center*.

REFERENCIAS / REFERENCES

- ANCULLE, T, GRACO M, VÁSQUEZ L, GARCÍA W, GUTIÉRREZ D. 2021. Contribución de las ondas Kelvin a las anomalías térmicas de las aguas costeras frente al Perú durante El Niño 2015-2016 y El Niño Costero 2017. *Bol Inst Mar Perú*. 36(2): 362-384.
- ASHOK K, BEHERA S K, RAO S A, WENG H, YAMAGATA T. 2007. El Niño Modoki and its possible teleconnection. *J. Geophys. Res.* 112: C11007. doi:10.1029/2006JC003798
- BARBER R T, CHAVEZ F P. 1983. Biological consequences of El Niño. *Science*. 222: 1203-1210. doi:10.1126/science.222.4629.1203
- CALIENES R. 2014. Producción primaria en el ambiente marino en el Pacífico sudeste, Perú, 1960-2000. *Bol Inst Mar Perú*. 29(1-2): 308.
- CALIENES R, GUILLÉN O, LOSTANAU N. 1985. Variabilidad espacio temporal de clorofila, producción primaria y nutrientes frente a la costa peruana. *Bol Inst Mar Perú*. 10(1): 1-44.
- CANE M A. 1983. Oceanographic events during El Niño. *Science*. 222: 1189-1195.
- CAPOTONDI A, SARDESHMUKH P D. 2015. Optimal precursors of different types of ENSO events. *Geophys. Res. Lett.* 42: 9952-9960.
- CARR M E, STRUB P T, THOMAS A C, BLANCO J L. 2002. Evolution of 1996-1999 La Niña and El Niño conditions off the western coast of South America: A remote sensing perspective. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 107(C12): 29-1-29-16. doi:10.1029/2001jc001183
- CARRIT D, CARPENTER J. 1966. Comparison and evaluation of currently y employed modifications of Winkler method for determination dissolved oxygen in sea water. *J. Mar. Res.* 24: 286-318.
- CHAVEZ F P, MESSIÉ M. 2009. A comparison of eastern boundary upwelling ecosystems. *Prog. Oceanogr.* 83: 80-96.
- CHAVEZ F P, 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.
- CHAVEZ F P, STRUTTON P G, FRIEDERICH G E, FEELY R A, FELDMAN G C, FOLEY D G, MCPHADEN M J. 1999. Biological and chemical response of the equatorial Pacific Ocean to the 1997-98 El Niño. *Science*. 286: 2126-2131.
- DEUSER W G, MULLER-KARGER F E, EVANS R H, BROWN O B, ESAIAS W E, FELDMAN G C. 1990. Surface-ocean color and deep-ocean carbon flux: How close a connection? *Deep Sea Res. Part A*. 37: 1331- 1343.
- DEWITTE B, J. CHOI J, S.-I. AN S-I, S. THUAL S. 2012. Vertical structure variability and equatorial waves during central Pacific and eastern Pacific El Niño in a coupled general circulation model. *Clim. Dyn.* 38: 2275-2289.
- ECHÉVIN V, AUMONT O, LEDESMA J, FLORES G. 2008. The seasonal cycle of surface chlorophyll in the Peruvian upwelling system: A modeling study *Prog. Oceanogr.* 72: 167-168.
- ECHÉVIN V, COLAS F, ESPINOZA-MORRIBERON D, VÁSQUEZ L, ANCULLE T, GUTIÉRREZ D. 2018. Forcings and Evolution of the 2017 Coastal El Niño Off Northern Peru and Ecuador. *Frontiers in Marine Science*. 5: 367. doi: 10.3389/fmars.2018.00367
- ENFEN. 2012. Definición operacional de los eventos El Niño y La Niña y sus magnitudes en la costa del Perú, Nota Técnica. <http://enfen.gob.pe/notas-tecnicas/>
- ENFEN. 2017. Informe Técnico Extraordinario N°001-2017/ ENFEN EL NIÑO COSTERO 2017. Julio 2017. <http://enfen.gob.pe/download/informe-tecnico-el-nino-costero-2017/>
- ESPINOZA-MORRIBERÓN D, ECHEVIN D, COLAS F, DÍAZ E, TAM J, ANCULLE T, LEDESMA J, GUTIÉRREZ D. 2021. Diferencias entre los impactos en la costa peruana de los eventos ENOS cálidos y El Niño Costero 2017: vientos, afloramiento, productividad y anchoveta. *Bol Inst Mar Perú*. 36(2): 329 - 348.
- ESPINOZA-MORRIBERÓN D, LEDESMA J, COLAS F, ECHEVIN V, ANCULLE T, TAM J. 2017. Productividad en el Sistema de Afloramiento Peruano durante El Niño 2015-2016. *Inf Inst Mar Perú*. Vol. 44(4): 460-466.
- ESPINOZA-MORRIBERÓN D, ECHEVIN V, COLAS F, TAM J, LEDESMA J, VÁSQUEZ L, GRACO M. 2017. Impacts of El Niño events on the Peruvian upwelling system productivity. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 122(7): 5423-5444.
- ESPINOZA-MORRIBERÓN D, ECHEVIN V, COLAS F, TAM J, GUTIÉRREZ D, GRACO M, LEDESMA J, QUISPE-CCALLUARI C. 2019. Oxygen variability during ENSO in the Tropical South Eastern Pacific. *Front. Mar. Sci.* 5: 526. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00526>
- FARIÁS L, BESOAIN V, GARCÍA-LOYOLA S. 2015. Presence of nitrous oxide hotspots in the coastal upwelling area off central Chile: an analysis of temporal variability based on ten years of a biogeochemical time series. *Environ. Res. Lett.* 10. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/10/4/044017>
- FLORES G, CÓRDOVA J, LEDESMA J, ROBLES C. 1998. Crucero de evaluación hidroacústica de recursos pelágicos BIC Humboldt 9803-05 de Tumbes a Tacna. Características químicas y de clorofila "a" del mar peruano durante el otoño 1998. Crucero BIC Humboldt 9803-05 de Tumbes a Tacna. *Inf Inst Mar Perú*. 135: 67-78.
- FRANZ J, KRAHMANN G, LAVIK G, GRASSE P, DITTMAR T, RIEBESELL U. 2012. Dynamics and stoichiometry of nutrients and phytoplankton in waters influenced by the oxygen minimum zone in the eastern tropical Pacific. *Deep-Sea Res. Part I Oceanogr. Res. Pap.* 62: 20-31. doi:10.1016/j.dsr.2011.12.004
- FUENZALIDA R, SCHNEIDER W, GARCES J, BRAVO L, LANGE C. 2009. Vertical and horizontal extension of the oxygen minimum zone in the eastern South Pacific Ocean. *Deep-Sea Res. II*. 56: 992-1003. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr2.2008.11.001>
- GARREAUD R D. 2018. A plausible atmospheric trigger for the 2017 coastal El Niño. *Int. J. Climatol.* 38: e1296-e1302. doi: 10.1002/joc.5426
- GRACO M, CORREA D, GARCÍA W, SARMIENTO M. 2016. Impactos del ENSO en la biogeoquímica del sistema de afloramiento frente a Perú central, febrero 2013-diciembre 2015. "Generación de Información y Monitoreo del Fenómeno El Niño". *Boletín Trimestral Oceanográfico*. 2(1): 2-6.
- GRACO M, PURCA S, DEWITTE B, CASTRO C G, MORÓN O, LEDESMA J, FLORES G, GUTIÉRREZ D. 2017. The OMZ and nutrient features as a signature of interannual and low-

- frequency variability in the Peruvian upwelling system. *Biogeosciences*. 14: 4601-4617. <https://doi.org/10.5194/bg-14-4601-2017>
- GUTIÉRREZ D, AKESTER M, NARANJO L. 2016. Productivity and Sustainable Management of the Humboldt Current Large Marine Ecosystem under climate change. *Environmental Development*. 17: 126-144. doi:10.1016/j.envdev.2015.11.004
- GUTIÉRREZ D, ENRÍQUEZ E, PURCA S, QUIPUZCÓA 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.
- HAMERSLEY M R, LAVIK G, WOEBKEN D, RATTRAY J E, LAM P, HOPMANS E C, SINNINGHE DAMSTÉ J S, KRÜGER S, GRACO M, GUTIÉRREZ D, KUYPERS M. 2007. Anaerobic ammonium oxidation in the Peruvian oxygen minimum zone. *Limnology and Oceanography*. 52: 923–933.
- JEFFREY S W, WELSCHMEYER N A. 1997. Spectrophotometric and fluorometric equations in common use in oceanography. En: *Phytoplankton Pigments in Oceanography. Monographs on Oceanographic Methodology*. 10: 597 – 615.
- KARNAUSKAS K B. 2013. Can we distinguish canonical El Niño from Modoki? *Geophys. Res. Lett.* 40(19): 5246–5251.
- KRIGE D G. 1951. A statistical apochromat to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *Journal of chem., metal. and mining*. 52: 119-139.
- LEDESMA J, TAM J, LEÓN V, FLORES G, MORÓN O. 2011. Caracterización de la Zona de Mínimo de Oxígeno (ZMO) frente a la costa peruana entre 3°N y 14°S, 1999–2009. *Bol Inst Mar Perú*. 26: 49–57.
- LIU Z, ALEXANDER M. 2007. Atmospheric bridge, oceanic tunnel, and global climatic teleconnections. *Reviews of Geophysics*. 45(2). Doi: 10.1029/2005RG000172
- MC PHADEN M J. 1999. Genesis and evolution of the 1997–98 El Niño. *Science*. 283(5404): 950–954. doi.org/10.1126
- MONTECINO V, PIZARRO G. 2006. Productividad primaria, biomasa y tamaño del fitoplancton en canales y fiordos australes: patrones primavera-verano. In: Silva, N., Palma, S. (Eds.), *Avances en el conocimiento oceanográfico de las aguas interiores chilenas, Puerto Montt a cabo de Hornos*. Comité Oceanográfico Nacional-Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso. pp. 93–97.
- MORALES C, HORMAZÁBAL S, BLANCO J L. 1999. Interannual variability in the mesoscale distribution of the depth of the upper boundary of the oxygen minimum layer off northern Chile (18–24°S): Implications for the pelagic system and biogeochemical cycling. *Journal of Marine Research*. 57: 909-932.
- MOSQUERA-VASQUEZ K, DEWITTE B, ILLIG S, TAKAHASHI K, GARRIC G. 2013. The 2002/2003 El Niño: Equatorial waves sequence and their impact on sea surface temperature. *J. Geophys. Res. Oceans*. 118. doi:10.1029/2012JC008551
- NIXON S, THOMAS A. 2001. On the size of the Peru upwelling ecosystem. *Deep-Sea Res. Pt. I*, 48(11): 2521–2528. doi:10.1016/S0967-0637(01)00023-1
- OLIVER M A. 1990. Kriging: A Method of Interpolation for Geographical Information Systems. *International Journal of Geographic Information Systems*. 4: 313–332.
- QUISPE, J, VÁSQUEZ L, GARCÍA W, CORREA D, PIZARRO L, TELLO E, DOMÍNGUEZ N, MORÓN O, FLORES R. 2021. Efectos de El Niño Costero 2017 en la estructura termohalina y flujos geostróficos frente a la costa norte del Perú. *Bol Inst Mar Perú*. 36(2): 385 - 408.
- RODRÍGUEZ-MORATA C, DÍAZ H, BALLESTEROS-CANOVAS F, ROHRER J A, STOFFEL M. 2019. The anomalous 2017 coastal El Niño event in Peru. *Climate Dynamics*. 52: 5606-5622. doi: 10.1007/s00382-018-4466-y
- SÁNCHEZ G, CALIENES R, ZUTA S. 2000. The 1997–1998 El Niño and its effect on the marine coastal system off Perú. *CALCOFI reports*. 41: 62–86.
- STRAMMA L, FISCHER T, GRUNDLE D S, KRAHMANN G, BANGE H W, MARANDINO C A. 2016. Observed El Niño conditions in the eastern tropical Pacific in October 2015. *Ocean Sci*. 12: 861-873. <https://doi.org/10.5194/os-12-861-2016>
- STRUB P, LEVINE M, ENFIELD D. 1991. Equatorial and eastern boundary current variability in the North and South Pacific Oceans. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19930005775>
- TAKAHASHI K, MARTÍNEZ A G, CLIM D. 2017. The very strong coastal El Niño in 1925 in the far-eastern Pacific. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3702-1>.
- THOMAS A C, BRICKLEY P, WEATHERBEE R. 2009. Interannual variability in chlorophyll concentrations in the Humboldt and California Current Systems. *Prog. Oceanogr.* 83: 386-392. doi:10.1016/j.pocean.2009.07.020
- WYRTKI K. 1975. El Niño—the dynamic response of the equatorial Pacific Ocean to atmospheric forcing. *J Phys Oceanogr.* 5: 572–584.