



Temporal oceanographic variation using satellite imagery data in the central Mexican Pacific convergence zone

Variación oceanográfica temporal según datos de imágenes satelitales de la zona de convergencia del Pacífico central mexicano

[Carlos Vladimir Pérez-de Silva](#)¹, [Amílcar Leví Cupul-Magaña](#)^{1*}, [Fabián Alejandro Rodríguez-Zaragoza](#)², [Alma Paola Rodríguez-Troncoso](#)¹

¹ Laboratorio de Ecología Marina, Departamento de Ciencias Biológicas, Centro Universitario de la Costa, Universidad de Guadalajara, 48280 Puerto Vallarta, Jalisco, Mexico.

² Laboratorio de Ecología Molecular, Microbiología y Taxonomía, Departamento de Ecología, Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad de Guadalajara, 45200 Zapopan, Jalisco, Mexico.

* Corresponding author: E-mail: amilcar.cupul@gmail.com

ABSTRACT. The oceanographic variation of the central Mexican Pacific (CMP) is mainly driven by the California Current and the Mexican Coastal Current, which generate a convergence zone. Little information is available regarding changes in oceanographic variables at the meso-scale level in the CMP. Therefore, this study characterized 6 oceanographic variables (sea surface temperature, chlorophyll concentration [Chl], primary productivity [PP], diffuse attenuation coefficient [K490], and particulate inorganic/organic carbon concentration [PIC, POC]) in the CMP from 2010 to 2017 and their relationships with El Niño/Southern Oscillation (ENSO). The variables were standardized to monthly pixel values of 0.08 latitude degrees, and the study area covered 48,846.48 km². Friedman tests were used to compare the temporal variation in the variables, while Spearman correlations were used to evaluate the relationship between each variable and the Multivariate ENSO Index (MEI). A cross-correlation analysis was performed to determine the temporal lag between the oceanographic variables and the MEI. The cyclicity of the variation in the CMP was determined by spectral analysis. All variables showed significant differences between months and years. Two seasons defined by temperature were also detected: a cold season (December–June), in which high values of these variables were observed, and a warm season (July–November), in which low values of these variables were observed. No variables were correlated with the MEI; however, a 4-month time lag was identified between the variables and the MEI. The cyclicity of the variables corresponded to the cold and warm seasons. The cold phase of ENSO increased the values of PP, Chl, and K490 up to 4 times compared to those of other years. Taken together, the observed variation in oceanographic conditions makes the CMP one of the most dynamic coastal regions of the Mexican Pacific.

Key words: Mexican coast, oceanographic variability, ENSO.

RESUMEN. La variación oceanográfica del Pacífico central mexicano (PCM) está influenciada por la corriente de California y la corriente costera Mexicana, que generan una zona de convergencia. Existe poca información acerca de los cambios en las variables oceanográficas a nivel de mesoescala en el PCM. Por lo tanto, este estudio caracterizó 6 variables oceanográficas (temperatura superficial del mar, concentración de clorofila [Cl], productividad primaria [PP], coeficiente de atenuación difusa [K490] y concentración de carbono inorgánico/orgánico particulado [CIP, COP]) en el PCM de 2010 a 2017 y su relación con El Niño/Oscilación del Sur (ENOS). Las variables se estandarizaron a valores mensuales en píxeles de 0.08 grados latitudinales, y el área de estudio cubrió 48,846.48 km². Para comparar la variación temporal en las variables, se utilizó la prueba de Friedman, y la relación entre cada variable y el Índice Multivariado de ENOS (IME) se obtuvo con una correlación de Spearman. Para establecer el desfase temporal entre las variables y el IME, se realizó una correlación cruzada. La ciclicidad de la variación en el PCM se determinó mediante un análisis espectral. Todas las variables mostraron diferencias significativas entre meses y años. Se detectaron 2 temporadas definidas por la temperatura, una temporada fría (diciembre-junio), con valores de las variables altos, y una temporada cálida (julio-noviembre), con valores de las variables bajos. Ninguna variable mostró correlación con el IME; sin embargo, se determinó un lapso de respuesta de 4 meses entre estas y el IME. La ciclicidad de las variables corresponde a la estación fría y la estación cálida. La fase fría del ENOS incrementó los valores de PP, Cl y K490 hasta 4 veces más en comparación con aquellos observados en otros años. La variación observada en las condiciones oceanográficas convierte al PCM en una de las regiones costeras más dinámicas del Pacífico mexicano.

Palabras clave: costa mexicana, variabilidad oceanográfica, ENOS.



INTRODUCTION

The central Mexican Pacific (CMP) constitutes a marine convergence zone that is mainly influenced by the water masses of the California Current (CC) and Mexican Coastal Current (MCC) (Lavín and Marinone 2003, López-Sandoval et al. 2009b). Changes in temperature, primary productivity, and light attenuation can influence the biological attributes of marine regions (Espinosa-Carreón and Valdez-Holguín 2007, Ribas-Ribas et al. 2011, Speers et al. 2016). Particulate organic and inorganic carbon (POC and PIC, respectively) are both indicators of CO₂ production, and variations in their content can alter the air–sea flux of CO₂ at the surface and carbon cycle in the water column (Gafar et al. 2019, Hopkins et al. 2019). Variations in energy flow, temperature, water quality, and carbon availability can affect biodiversity, coastal ecosystems, and ecosystem services (IPCC 2002). Moreover, the convergence of 2 biogeographical regions (Spalding et al. 2007) in the CMP highlights spatiotemporal transitions in the area from both oceanographic and biological perspectives.

Seasonal, annual, and interannual environmental conditions are influenced by mesoscale processes, such as El Niño/Southern Oscillation (ENSO) events and oceanographic patterns, especially over transition areas like the CMP (Maul et al. 1984, Brodeur et al. 2003, Ballance et al. 2006, Palacios et al. 2006, Robertson and Cramer 2009). This affects species richness and community composition as well as oceanographic processes like upwelling (Harley et al. 2006, Carpenter et al. 2008).

ENSO events are the primary source of interannual variation in the CMP (Lavín and Marinone 2003), and the organisms present within this transition zone have adapted to annual cyclical changes in their environment (Green and Fisher 2004). However, anomalous changes in environmental conditions can negatively affect their growth (e.g., reduced carbonate assimilation by calcifying organisms like corals) and reproduction (e.g., reduced fecundity in various fish species; Brander 2010, Wild et al. 2011, Rodríguez-Troncoso et al. 2016). Therefore, the recent changes in the intensity and periodicity of ENSO events may threaten the organisms of the CMP (Palacios et al. 2006). These unexpected changes often occur over short time periods (i.e., a few months), which are insufficient for organisms to adequately respond. In particular, important life cycle stages (e.g., breeding, feeding, and growth) can be severely affected by sudden environmental change (Donelson et al. 2010).

In the CMP, the warm phase of ENSO (El Niño) is characterized by the intrusion of warm southern waters from the central Pacific that increase sea surface temperature and deepen the thermocline and nutricline, followed by a reduction in primary productivity in shallow, coastal waters (McPhaden and Zhang 2002, Páez-Osuna et al. 2016). Regional variation coupled with the recently enhanced ENSO effects have generated a zone of oceanographic instability that affects resident species (Magaña-Rueda et al. 1997, Reyes-Coca and

INTRODUCCIÓN

El Pacífico central mexicano (PCM) es una zona de convergencia marina influenciada principalmente por las masas de agua de la corriente de California (CC) y la corriente costera mexicana (CCM) (Lavín y Marinone 2003, López-Sandoval et al. 2009b). Los cambios en la temperatura, productividad primaria y atenuación de la luz pueden afectar las propiedades biológicas de las regiones marinas (Espinosa-Carreón y Valdez-Holguín 2007, Ribas-Ribas et al. 2011, Speers et al. 2016). El carbono orgánico particulado (COP) y el carbono inorgánico particulado (CIP) son indicadores de la producción de CO₂ y las variaciones en su contenido pueden alterar tanto el flujo aire-mar de CO₂ en la superficie del mar como el ciclo de carbono en la columna de agua (Gafar et al. 2019, Hopkins et al. 2019). Las variaciones en el flujo de energía, la temperatura, la calidad del agua y la disponibilidad de carbono pueden afectar la biodiversidad, los ecosistemas costeros y los servicios de los ecosistemas (IPCC 2002). Además, la convergencia de 2 regiones biogeográficas (Spalding et al. 2007) en el PCM destaca las transiciones espaciotemporales en el área, tanto desde perspectivas oceanográficas como biológicas.

Las condiciones ambientales estacionales, anuales e interanuales están influenciadas por procesos de mesoescala, como los eventos de El Niño/Oscilación del Sur (ENOS), y patrones oceanográficos, especialmente en áreas de transición como el PCM (Maul et al. 1984, Brodeur et al. 2003, Ballance et al. 2006, Palacios et al. 2006, Robertson y Cramer 2009). Esto afecta la riqueza de las especies, la composición de la comunidad y los procesos oceanográficos como las surgencias (Harley et al. 2006, Carpenter et al. 2008).

Los eventos ENOS son la principal fuente de variación interanual en el PCM (Lavín y Marinone 2003) y los organismos presentes en esta zona de transición se han adaptado a los cambios cíclicos anuales en su medio ambiente (Green y Fisher 2004). Sin embargo, los cambios anómalos en las condiciones ambientales pueden afectar negativamente su crecimiento (por ejemplo, la asimilación reducida de carbonatos por organismos calcificantes como los corales) y reproducción (por ejemplo, la fecundidad reducida en varias especies de peces; Brander 2010, Wild et al. 2011, Rodríguez-Troncoso et al. 2016). Por lo tanto, los cambios recientes en la intensidad y periodicidad de los eventos ENOS pueden amenazar a los organismos del PCM (Palacios et al. 2006). Estos cambios inesperados a menudo ocurren en periodos de tiempo cortos (es decir, unos pocos meses), que son insuficientes para que los organismos respondan adecuadamente. En particular, las etapas importantes del ciclo de vida (por ejemplo, crianza, alimentación y crecimiento) pueden verse gravemente afectadas por cambios ambientales repentinos (Donelson et al. 2010).

En el PCM, la fase cálida de ENOS (El Niño) se caracteriza por la intrusión de aguas cálidas del sur provenientes del Pacífico central que aumentan la temperatura de la

Troncoso-Gaytán 2001, Lee and McPhaden 2010). Within the Gulf of California (GC), oceanographic variability and ENSO effects have been well documented (Alvarez-Borrego et al. 1979, Álvarez-Borrego and Lara-Lara 1991, Lavín and Marinone 2003, Espinosa-Carreón and Valdez-Holguín 2007, Ledesma-Vázquez et al. 2009, Mercado-Santana et al. 2017); however, these phenomena remain understudied in areas outside the GC, such as the CMP (Filonov et al. 2000, López-Sandoval et al. 2009b), even when these areas harbor species of both commercial and scientific interest (Moncayo-Estrada et al. 2006).

Currently, no recent studies have described changes in the oceanographic conditions of the CMP, which are increasing in both intensity and frequency due to climate change (IPCC 2002, di Lorenzo et al. 2010, Lee and McPhaden 2010). Understanding how these changes occur within the CMP is important to evaluate their effects on resident species. Therefore, the aim of this study was to describe the variation in 6 environmental variables within the CMP over a 7-year period, which included 2 intense ENSO events.

MATERIALS AND METHODS

Study area

The CMP comprises the coasts of Michoacán, Colima, Jalisco, and Nayarit. The study area (17–23°N, 108–102°W) covered 48,846.48 km² of oceanic and coastal zones. The CMP is characterized by a narrow continental shelf (~100 km) that further narrows to the south and by depths >2,000 m throughout the region, with the deepest areas reaching 5,000 m. In the northern portion of the study area off Nayarit and Jalisco, the shelf is shallow (<200 m), whereas in the southern area off Colima and Michoacán, the shelf is narrow (<10 km) with deep waters near the coast. Finally, this area includes 3 insular systems, Marias Islands, Isabel Island, and Marietas Islands, which are located on the continental platform of Nayarit in the northern CMP (Reyes-Bonilla 2003).

The CMP is influenced nearly year-round by northwesterly winds (Fiedler and Talley 2006, Pantoja et al. 2012) that increase the number of eddies and meanders, which in turn promote an increase in productivity near the coast (Lavín et al. 2006). In the summer, the CMP is influenced by the poleward MCC, which is characterized by high temperature and nutrient-poor water (Badan-Dangon 1998, Fiedler and Talley 2006). During winter, the CMP is influenced by the CC, which is characterized by cold water with high nutrient and oxygen concentrations (Cepeda-Morales et al. 2009). In addition, the cyclonic season in the CMP generates rainfall from June to October (García-Oliva et al. 1991, 2002).

Data collection

To characterize the temporal oceanographic variation in the CMP, variables that have a major influence on the distribution

superficie del mar y profundizan la termoclina y nutriclina, lo cual reduce la productividad primaria en las aguas costeras poco profundas (McPhaden y Zhang 2002, Páez-Osuna et al. 2016). La variación regional junto con los efectos recientemente intensificados de ENOS han generado una zona de inestabilidad oceanográfica que afecta a las especies residentes (Magaña-Rueda et al. 1997, Reyes-Coca y Troncoso-Gaytán 2001, Lee y McPhaden 2010). Dentro del golfo de California (GC), la variabilidad oceanográfica y los efectos de ENOS han sido ampliamente documentados (Alvarez-Borrego et al. 1979, Álvarez-Borrego y Lara-Lara 1991, Lavín y Marinone 2003, Espinosa-Carreón y Valdez-Holguín 2007, Ledesma-Vázquez et al. 2009, Mercado-Santana et al. 2017); sin embargo, estos fenómenos siguen siendo poco estudiados en áreas fuera del GC, como el PCM (Filonov et al. 2000, López-Sandoval et al. 2009b), incluso cuando estas áreas albergan especies de interés comercial y científico (Moncayo-Estrada et al. 2006).

Actualmente, ningún estudio reciente ha descrito cambios en las condiciones oceanográficas del PCM, que están aumentando en intensidad y frecuencia debido al cambio climático (IPCC 2002, di Lorenzo et al. 2010, Lee y McPhaden 2010). Comprender cómo ocurren estos cambios dentro del PCM es importante para evaluar sus efectos sobre las especies residentes. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue describir la variación en 6 variables ambientales dentro del PCM durante un periodo de 7 años, que incluyó 2 eventos ENOS intensos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El PCM comprende las costas de Michoacán, Colima, Jalisco y Nayarit. El área de estudio (17–23°N, 108–102°W) cubrió 48,846.48 km² de zonas oceánicas y costeras. El PCM se caracteriza por una plataforma continental estrecha (~100 km), que se estrecha aún más hacia el sur, y por profundidades >2,000 m en toda la región, con las áreas más profundas alcanzando los 5,000 m. En la porción norte del área de estudio frente a Nayarit y Jalisco, la plataforma es poco profunda (<200 m), mientras que en la zona sur de Colima y Michoacán, la plataforma es estrecha (<10 km) con aguas profundas cerca de la costa. Finalmente, esta área incluye 3 sistemas insulares, las islas Marias, la isla Isabel y las islas Marietas, que se encuentran en la plataforma continental de Nayarit en el norte del PCM (Reyes-Bonilla 2003).

El PCM está influenciado casi todo el año por los vientos del noroeste (Fiedler y Talley 2006, Pantoja et al. 2012) que aumentan el número de remolinos y meandros, que a su vez promueven un aumento de la productividad cerca de la costa (Lavín et al. 2006). En el verano, el PCM está influenciado por la CCM hacia los polos, que se caracteriza por valores altos de temperatura y concentraciones bajas de nutrientes (Badan-Dangon 1998, Fiedler y Talley 2006). Durante el

of resident species were evaluated. These variables were sea surface temperature (SST), primary productivity (PP), chlorophyll concentration (Chl), and water clarity based on the diffuse attenuation coefficient (K490). In addition, the availability of both particulate inorganic carbon (PIC) and particulate organic carbon (POC) were included, as these determine the distribution of zones with high CO₂ concentrations, which in turn affect the zooplankton distributions throughout the water column (Gafar et al. 2019, Hopkins et al. 2019).

The numerical values of the oceanographic variables for the period 2010 to 2017 were obtained through the ERDDAP platform of the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA; Simons and Mendelssohn 2012, <https://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/index.html>). Data corresponding to the aforementioned variables collected by the Aqua/MODIS sensor with monthly periodicity and a minimum pixel value of 0.025° latitude were used in the analyses. An atmospheric correction was applied to the data to obtain a measurement of the outflow radiance of the water. These radiance values were processed for each of the environmental variables using the OC3M algorithm developed by the National Aeronautics and Space Administration (NASA). Prior to the analyses, all oceanographic variables were standardized to a pixel resolution of 0.08 × 0.08 latitude degrees (8.45 km², 5,625.00 pixels per image) and to mean monthly values (total data sets = 94). Finally, the monthly Multivariate ENSO Index (MEI) was obtained from the NOAA physical sciences laboratory (Wolter and Timlin 2011) and used to perform the statistical procedures described below.

Data analyses

As the data did not comply with the assumptions of parametric statistics, nonparametric tests were used. To compare temporal variation among the variables, 2 Friedman tests (nonparametric repeated-measures analysis of variance) were conducted for each variable using 2 sources of primary variation: month-to-month for intrannual variation and year-to-year for interannual variation. To determine the differences between months and years, an *a posteriori* nonparametric Tukey test was performed. A comparison of anomalies standardized to the mean was conducted based on the monthly average value of each variable and the corresponding yearly average to identify differences with respect to the general trend of each variable.

The variables were standardized to zero mean and were used to establish the relationships between the variables based on nonparametric Spearman correlations, the monthly values of each oceanographic measurement, and the monthly MEI values. In addition, a cross-correlation test was performed to identify the lag between the highest value of each oceanographic variable and the MEI. Finally, a spectral analysis was performed to determine the frequency of variation of the time series corresponding to the 6 variables. All data analyses and graphics were performed using

invierno, el PCM está influenciado por la CC, que se caracteriza por agua fría con altas concentraciones de nutrientes y oxígeno (Cepeda-Morales et al. 2009). Además, la temporada ciclónica en el PCM genera lluvias de junio a octubre (García-Oliva et al. 1991, 2002).

Recolección de datos

Para caracterizar la variación oceanográfica temporal en el PCM, se evaluaron variables que tienen una influencia importante en la distribución de las especies residentes. Estas variables fueron la temperatura superficial del mar (TSM), la productividad primaria (PP), la concentración de clorofila (Cl) y la claridad del agua basada en el coeficiente de atenuación difusa (K490). Además, se incluyó la disponibilidad de carbono inorgánico particulado (CIP) y carbono orgánico particulado (COP), ya que estos determinan la distribución de las zonas con altas concentraciones de CO₂, que a su vez afectan a la distribución de zooplancton en toda la columna de agua (Gafar et al. 2019, Hopkins et al. 2019).

Los valores numéricos de las variables oceanográficas para el periodo 2010-2017 se obtuvieron a través de la plataforma ERDDAP de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA; Simons y Mendelssohn 2012, <https://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/index.html>). En los análisis se utilizaron los datos correspondientes a las variables mencionadas recolectados por el sensor Aqua/MODIS con periodicidad mensual y un valor mínimo de pixel de 0.025° de latitud. Se aplicó una corrección atmosférica a los datos para obtener una medición de la radiación de salida del agua. Estos valores de radiancia se procesaron para cada una de las variables ambientales utilizando el algoritmo OC3M desarrollado por la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA). Antes de los análisis, todas las variables oceanográficas se estandarizaron a una resolución de 0.08 × 0.08 grados de latitud por pixel (8.45 km², 5,625.00 píxeles por imagen) y a valores mensuales medios (conjuntos de datos totales = 94). Por último, se obtuvo el Índice Multivariado de ENOS (IME) mensual del laboratorio de ciencias físicas de la NOAA (Wolter y Timlin 2011) para realizar los procedimientos estadísticos descritos a continuación.

Análisis de datos

Como los datos no cumplían con los supuestos de las estadísticas paramétricas, se utilizaron pruebas no paramétricas. Para comparar la variación temporal entre las variables, se realizaron 2 pruebas de Friedman (análisis de varianza de medidas repetidas no paramétricas) para cada variable utilizando 2 fuentes de variación primaria: de mes a mes para la variación intraanual y de año a año para la variación interanual. Para determinar las diferencias entre meses y años, se realizó una prueba de Tukey no paramétrica *a posteriori*. Se realizó una comparación de anomalías estandarizadas a la media basada en el valor promedio mensual de cada variable

the packages ‘stats’ (statistical analysis) and ‘ggplot2’ and ‘gplots’ (graphing) (R Core Team 2021).

RESULTS

Temporal characterization and anomaly analysis

Sea surface temperature

The mean SST was 28 °C (SD = 2.08, Fig. 1a), with maximum and minimum monthly values of 31.19 °C in July 2014 and 23.34 °C in February 2011, respectively (Fig. 1a). Differences among monthly SST were observed in all months (Table 1) except in February and March, which showed the lowest values (Fig. 2a). The results showed that the region is characterized by a cold season from December to May and a warm season from July to November.

Differences were also observed among years (Table 1), with 2011 and 2015 being the coldest and warmest years, respectively (Fig. 3a). Cold years (defined as having an average value lower than the average value of all years) corresponded to 2010–2013, whereas warm years (defined as having an average value higher than the average value of all years) were 2014 and 2015 (Fig. 3a). The analysis of the annual averages with respect to the average SST value for each year indicated that 2010–2012 exhibited the highest proportion of negative variation based on the average monthly values. In contrast, 2014–2016 exhibited the highest proportion of positive variation in SST based on the average monthly values (Fig. 2a).

Primary productivity

The average PP value in the study area was 818.41 mg C·m⁻²·d⁻¹ (SD = 2,511.62), with the highest value observed in February 2011 (4,375.07 mg C·m⁻²·d⁻¹) and the lowest value observed in November 2016 (319.28 mg C·m⁻²·d⁻¹) (Fig. 1b). The monthly pattern highlighted an increase in PP during February 2011 that was 5 times greater than the overall average (Fig. 1b). PP showed differences among months, with the highest and lowest values corresponding to January–May and June–December, respectively (Fig. 2b).

When comparing differences among years, 2011 showed the highest PP concentration (1,630.00 mg C·m⁻²·d⁻¹), which was twice the average of all years. The a posteriori tests revealed significant differences among all years except for 2013, 2014, and 2017 (Fig. 3b). For this variable, the years with the highest proportion of positive monthly anomalies with respect to the mean for all years corresponded to the period of 2010–2013 (Fig. 2b), whereas 2016 predominantly exhibited negative anomalies.

Diffuse attenuation coefficient

Overall, the mean K490 value in the study area was 0.060 m⁻¹ (SD = 0.120). The highest and lowest K490

y el promedio anual correspondiente para identificar diferencias con respecto a la tendencia general de cada variable.

Las variables se estandarizaron a media cero y se utilizaron para establecer las relaciones entre las variables basadas en correlaciones no paramétricas de Spearman, los valores mensuales de cada medición oceanográfica y los valores mensuales del IME. Además, se realizó una prueba de correlación cruzada para identificar el desfase entre el valor más alto de cada variable oceanográfica y el IME. Finalmente, se realizó un análisis espectral para determinar la frecuencia de variación de las series temporales correspondientes a las 6 variables. Todos los análisis de datos y gráficos se realizaron utilizando los paquetes ‘stats’ (análisis estadístico) y ‘ggplot2’ y ‘gplots’ (gráficos) (R Core Team 2021).

RESULTADOS

Caracterización temporal y análisis de anomalías

Temperatura superficial del mar

La media de TSM fue de 28 °C (DE = 2.08, Fig. 1a), con valores mensuales máximos y mínimos de 31.19 °C en julio de 2014 y 23.34 °C en febrero de 2011, respectivamente (Fig. 1a). Se observaron diferencias entre la TSM mensual en todos los meses (Tabla 1) excepto en febrero y marzo, que mostraron los valores más bajos (Fig. 2a). Los resultados mostraron que la región se caracteriza por una estación fría de diciembre a mayo y una estación cálida de julio a noviembre.

También se observaron diferencias entre años (Tabla 1), siendo 2011 y 2015 los años más fríos y cálidos, respectivamente (Fig. 3a). Los años fríos (definidos como un valor medio inferior al valor medio de todos los años) correspondieron a 2010–2013, mientras que los años cálidos (definidos como un valor medio superior al valor medio de todos los años) fueron 2014 y 2015 (Fig. 3a). El análisis de las medias anuales con respecto al valor medio de la TSM para cada año indicó que 2010–2012 mostró la mayor proporción de variación negativa basada en los valores mensuales medios. Por el contrario, en 2014–2016 se registró la mayor proporción de variación positiva en el TSM con base en los promedios mensuales (Fig. 2a).

Productividad primaria

El valor promedio de la PP en el área de estudio fue de 818.41 C·m⁻²·d⁻¹ (DE = 2,511.62), con el valor más alto observado en febrero de 2011 (4,375.07 mg C·m⁻²·d⁻¹) y el valor más bajo observado en noviembre de 2016 (319.28 mg C·m⁻²·d⁻¹) (Fig. 1b). El patrón mensual evidenció un aumento de la PP durante febrero de 2011 que fue 5 veces mayor que el promedio general (Fig. 1b). La PP mostró diferencias entre meses, con los valores más altos y más bajos correspondientes a enero–mayo y junio–diciembre, respectivamente (Fig. 2b).

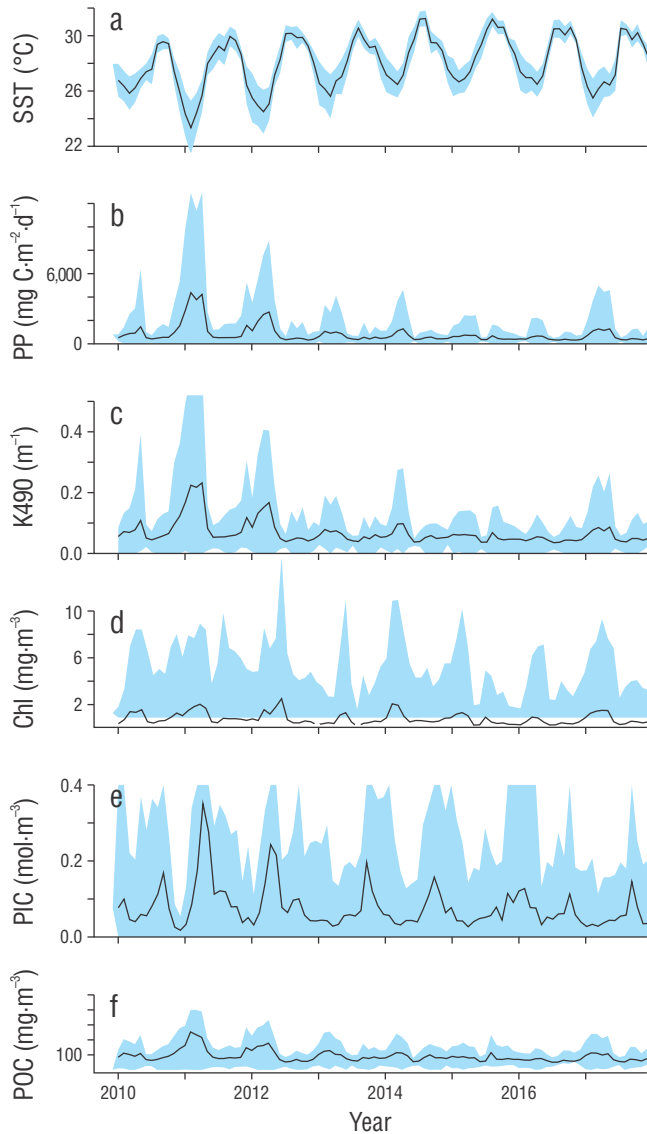


Figure 1. Mean monthly values of 6 oceanographic variables from 2010 to 2017 in the central Mexican Pacific. Blue shade represents standard deviation values. (a) Sea surface temperature (SST, °C), (b) primary productivity (PP, $\text{mg C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$), (c) diffuse attenuation coefficient (K490, m^{-1}), (d) chlorophyll concentration (Chl, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$), (e) particulate inorganic carbon (PIC, $\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$), and (f) particulate organic carbon (POC, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$).

Figura 1. Valores medios mensuales de 6 variables oceanográficas de 2010 a 2017 en el Pacífico central mexicano. La sombra azul representa valores de desviación estándar. (a) Temperatura superficial del mar (SST, °C), (b) productividad primaria (PP, $\text{mg C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$), (c) coeficiente de atenuación difusa (K490, m^{-1}), (d) concentración de clorofila (Chl, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$), (e) carbono inorgánico particulado (PIC, $\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$) y (f) carbono orgánico particulado (POC, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$).

Al comparar las diferencias entre los años, 2011 mostró la mayor concentración de PP ($1,630.00 \text{ mg C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$), que fue el doble de la media de todos los años. Las pruebas *a posteriori* mostraron diferencias significativas entre todos los años, excepto en 2013, 2014 y 2017 (Fig. 3b). Para esta variable, los años con mayor proporción de anomalías mensuales positivas con respecto a la media para todos los años correspondieron al periodo 2010-2013 (Fig. 2b), mientras que 2016 presentó anomalías negativas predominantemente.

Coefficiente de atenuación difusa

En general, el valor medio de K490 en el área de estudio fue de 0.060 m^{-1} (DE = 0.120). Los valores más altos y más bajos de K490 se observaron en abril de 2011 (0.232 m^{-1}) y julio de 2012 (0.035 m^{-1}) (Fig. 1c). Las comparaciones mensuales dieron lugar a diferencias significativas (Tabla 1) y revelaron 2 periodos: uno de enero a mayo con valores por encima del promedio mensual para todos los años y el otro de junio a diciembre con valores por debajo del promedio mensual para todos los años (Tabla 1, Fig. 2c).

También se observaron diferencias entre años, con valores en 2010-2012 superiores a la media total (Fig. 3c). Las mayores anomalías positivas en K490 se observaron entre 2010 y 2013 (Fig. 2c). Además, las anomalías negativas en K490 se encontraron más cercanas al promedio total que las anomalías positivas en K490, y en 2016 se observó la mayor anomalía negativa.

Clorofila

La concentración media de Cl en el área de estudio fue de $0.793 \text{ mg Cl}\cdot\text{m}^{-3}$ (DE = 4.300), con los valores más altos y más bajos observados en mayo de 2012 ($2.507 \text{ mg Cl}\cdot\text{m}^{-3}$) y junio de 2013 ($0.124 \text{ mg Cl}\cdot\text{m}^{-3}$), respectivamente (Fig. 1d). Las comparaciones mensuales revelaron 2 periodos: uno de febrero a mayo caracterizado por altas concentraciones de Cl y el otro de junio a diciembre caracterizado por una disminución en la concentración de Cl (Fig. 2d, Tabla 1). Las diferencias en la concentración de Cl entre años fueron menos marcadas que las observadas entre meses y las diferencias entre años se encontraron principalmente en 2010, 2011, 2012 y 2014, los cuales exhibieron las concentraciones medias de Cl más altas (Fig. 3d). Las anomalías positivas de Cl se observaron durante 2010-2013, mientras que las mayores anomalías negativas de Cl se observaron en 2016 (Fig. 2d).

Concentración de carbono inorgánico particulado

La concentración media de CIP en el área de estudio fue de $0.077 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$ (DE = 0.260), con las concentraciones más altas y más bajas observadas en abril 2011 ($0.035 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$) y diciembre 2012 ($0.017 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$), respectivamente (Fig. 1e). Las comparaciones por pares dieron lugar a diferencias

Table 1. Friedman test results showing interannual and monthly differences SST: sea surface temperature; PP: primary productivity; K490: diffuse attenuation coefficient; Chl: chlorophyll concentration; PIC: particulate inorganic carbon concentration; and POC: particulate organic carbon concentration.

Tabla 1. Resultados de la prueba de Friedman que muestran diferencias interanuales y mensuales de SST: temperatura superficial del mar; PP: productividad primaria; K490: coeficiente de atenuación difusa; Chl: concentración de clorofila; PIC: concentración de carbono inorgánico particulado; y POC: concentración de carbono orgánico particulado.

Factor	SST		PP		K490	
	Friedman χ^2	<i>P</i> value	Friedman χ^2	<i>P</i> value	Friedman χ^2	<i>P</i> value
Months	38.361	<0.001	44.720	<0.001	46.889	<0.001
Year	79.840	<0.002	60.231	<0.001	59.212	<0.001
Factor	Chl		PIC		POC	
	Friedman χ^2	<i>P</i> value	Friedman χ^2	<i>P</i> value	Friedman χ^2	<i>P</i> value
Months	23.750	<0.001	18.303	0.010	43.667	<0.001
Year	36.667	<0.001	23.374	0.010	58.000	<0.001

values were observed in April 2011 (0.232 m^{-1}) and July 2012 (0.035 m^{-1}) (Fig. 1c). Monthly comparisons resulted in significant differences (Table 1) and revealed 2 periods: one from January to May with values above the monthly average for all years and the other from June to December with values below the monthly average for all years (Table 1, Fig. 2c).

Differences among years were also observed, with 2010–2012 exhibiting values higher than the total average (Fig. 3c). The largest positive anomalies in K490 were observed from 2010 to 2013 (Fig. 2c). In addition, the negative anomalies in K490 were found closer to the total average than were the positive K490 anomalies, with 2016 exhibiting the greatest negative anomaly value.

Chlorophyll concentration

The mean Chl concentration in the study area was $0.793 \text{ mg Chl} \cdot \text{m}^{-3}$ ($\text{SD} = 4.300$), with the highest and lowest values observed in May 2012 ($2.507 \text{ mg Chl} \cdot \text{m}^{-3}$) and June 2013 ($0.124 \text{ mg Chl} \cdot \text{m}^{-3}$), respectively (Fig. 1d). Monthly comparisons revealed 2 periods: one from February to May characterized by high Chl concentrations and the other from June to December characterized by a decrease in the Chl concentration (Fig. 2d, Table 1). Differences in the Chl concentration among years were less marked than those observed among months, and differences across years were mainly found in 2010, 2011, 2012, and 2014, all of which exhibited the highest mean Chl concentrations (Fig. 3d). The positive Chl anomalies were observed during 2010–2013, whereas the greatest negative Chl anomalies were observed in 2016 (Fig. 2d).

significativas entre las concentraciones mensuales de CIP. Se observaron 2 picos cada año: uno de agosto a octubre y el otro de abril a mayo (Fig. 2e).

Las diferencias anuales se explicaron principalmente en 2011 y 2012, que presentaron las concentraciones de CIP más altas, y en 2017, que mostraron las concentraciones de CIP más bajas (Fig. 3e). Al igual que con las otras variables, las mayores anomalías positivas se observaron entre 2010 y 2013, aunque no se observó ningún patrón particular con anomalías mensuales negativas durante el periodo de estudio (Fig. 2e).

Concentración de carbono orgánico particulado

La concentración media de COP en el área de estudio fue de $90.52 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ($\text{DE} = 94.38$), con el valor más alto ($252.92 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$) en febrero 2011 y el valor más bajo ($50.78 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$) en julio 2016. Entre todos los años, 2011 y 2012 mostraron los rangos más amplios entre los valores mensuales máximos y mínimos (Fig. 1f). Además, hubo diferencias significativas entre los meses, con las concentraciones de COP más altas y bajas observadas de enero a mayo y de junio a diciembre, respectivamente (Fig. 2f). Sin embargo, no se observaron diferencias significativas entre los meses con las concentraciones de COP más altas o bajas.

En contraste, también se observaron diferencias significativas entre los años, con las concentraciones de COP más altas y más bajas en 2011 y 2016, respectivamente. En general, las concentraciones de COP más altas se observaron entre 2010 y 2012, mientras que las concentraciones de COP más bajas se observaron entre 2013 y 2017 (Fig. 3f). Las anomalías positivas de COP se presentaron en 2011 y 2012,

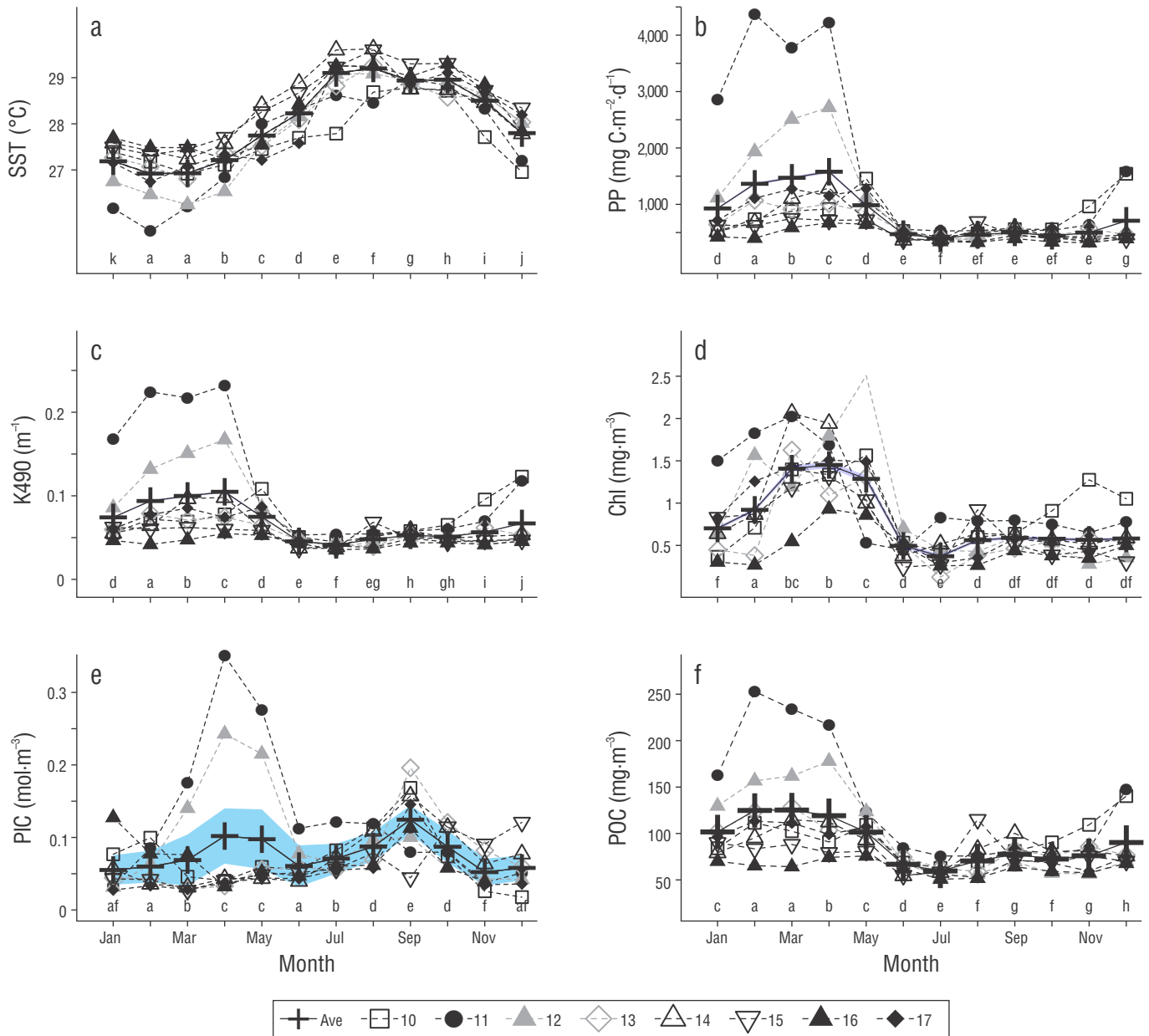


Figure 2. Monthly mean values of 6 oceanographic variables from 2010 to 2017 in the central Mexican Pacific. Blue shade represents standard error values. **(a)** Sea surface temperature (SST, °C), **(b)** primary productivity (PP, $\text{mg C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$), **(c)** diffuse attenuation coefficient (K490, m^{-1}), **(d)** chlorophyll concentration (Chl, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$), **(e)** particulate inorganic carbon (PIC, $\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$), **(f)** Particulate organic carbon (POC, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$). Ave: monthly average value of the variable constructed from the years of observations. Names and months with the same letter are similar according to Tukey *a posteriori* tests.

Figura 2. Valores medios mensuales de 6 variables oceanográficas de 2010 a 2017 en el Pacífico central mexicano. La sombra azul representa los valores de error estándar. **(a)** Temperatura superficial del mar (SST, °C), **(b)** productividad primaria (PP, $\text{mg C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$), **(c)** coeficiente de atenuación difusa (K490, m^{-1}), **(d)** concentración de clorofila (Chl, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$), **(e)** carbono inorgánico particulado (PIC, $\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$), **(f)** carbono orgánico particulado (POC, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$). Ave: valor medio mensual de la variable construida a partir de los años de observación. Los nombres y meses con la misma letra son similares según las pruebas de Tukey *a posteriori*.

Concentration of particulate inorganic carbon

The mean PIC concentration in the study area was $0.077 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$ (SD = 0.260), with the highest and lowest concentrations observed in April 2011 ($0.035 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$) and December 2012 ($0.017 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-3}$), respectively (Fig. 1e). Pairwise comparisons resulted in significant differences among monthly PIC concentrations. Two peaks were observed each year: one from August to October and the other from April to May (Fig. 2e).

Annual differences were mainly explained by 2011 and 2012, which showed the highest PIC concentrations, and by 2017, which showed the lowest PIC concentrations (Fig. 3e). As with the other variables, the greatest positive anomalies were observed from 2010 to 2013, although no particular pattern was observed with negative monthly anomalies over the study period (Fig. 2e).

Concentration of particulate organic carbon

The mean POC concentration in the study area was $90.52 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (SD = 94.38), with February 2011 exhibiting the highest value ($252.92 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$) and July 2016 exhibiting the lowest value ($50.78 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$). Among all years, 2011 and 2012 showed the widest ranges between maximum and minimum monthly values (Fig. 1f). In addition, significant differences were present among months, with higher and lower POC concentrations observed from January to May and June to December, respectively (Fig. 2f). However, no significant differences were observed among the months with either the highest or lowest POC concentrations.

In contrast, significant differences were also observed among years, with 2011 and 2016 showing the highest and lowest POC concentrations, respectively. Overall, the highest POC concentrations were observed from 2010 to 2012, whereas the lowest POC concentrations were observed from 2013 to 2017 (Fig. 3f). Positive POC anomalies were present in 2011 and 2012, whereas 2016 was characterized by negative anomalies (Fig. 2f).

Multivariate El Niño/Southern Oscillation Index

Our analyses indicated that the MEI varied among and within years. From August 2010 to March 2011, the MEI values were lower than 1.5 SD. Thus, this period can be considered a cold phase of an ENSO event (La Niña). In contrast, from May 2015 to May 2016, the MEI values were higher than 1.5 SD, which indicate that this period of time constituted a warm phase of an ENSO event (El Niño). When comparing both the cold and warm phases, the El Niño years exhibited higher variations in both time and MEI values than those of the La Niña years (Fig. 4).

Relationships among variables

Among all variables, the highest correlations were observed between SST and PP, followed by the correlations

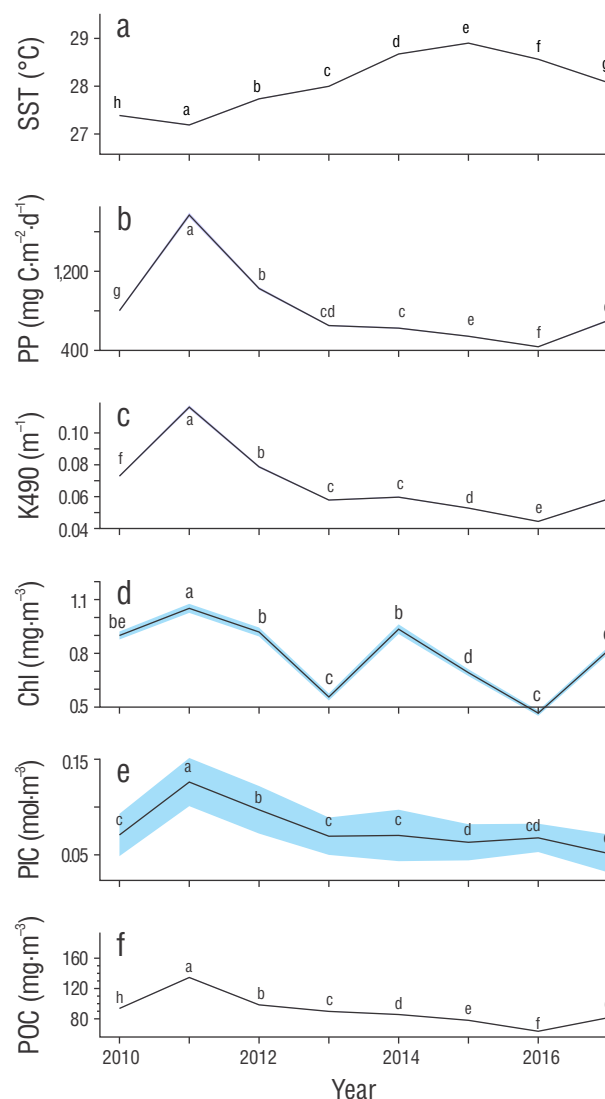


Figure 3. Mean annual values of 6 oceanographic variables from 2010 to 2017 in the central Mexican Pacific. Blue shade represents standard error values. (a) Sea surface temperature (SST, °C), (b) primary productivity (PP, $\text{mg C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$), (c) diffuse attenuation coefficient (K490, m^{-1}), (d) chlorophyll concentration (Chl, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$), (e) particulate inorganic carbon (PIC, $\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$), (f) particulate organic carbon (POC, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$). Names and years with the same letter are similar according to Tukey a posteriori tests.

Figura 3. Valores anuales medios de 6 variables oceanográficas de 2010 a 2017 en el Pacífico central mexicano. La sombra azul representa valores de error estándar. (a) Temperatura superficial del mar (SST, °C), (b) productividad primaria (PP, $\text{mg C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$), (c) coeficiente de atenuación difusa (K490, m^{-1}), (d) concentración de clorofila (Chl, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$), (e) carbono inorgánico particulado (PIC, $\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$), (f) carbono orgánico particulado (POC, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$). Los nombres y años con la misma letra son similares según las pruebas de Tukey a posteriori.

between K490 and Chl and K490 and POC (Fig. 5). Both the MEI and PIC showed the lowest correlations with the other variables (Fig. 5). The cross-correlation analysis of SST with MEI revealed a time lag of 3 months between the highest MEI values and the highest SST values ($r = 0.041$, Table 2). Moreover, the highest MEI values were associated with time lags greater than 3 months in all comparisons (Table 2).

Spectral analysis

The spectral analysis revealed that the main frequency influencing the variables in this study was 0.0833333. The inverse of this frequency ($1/0.0833333$) represents a period of 12, which in this study implies an annual cycle represented by 12 months (Fig. 6). In this context, temperature and PIC had the highest and lowest values of the spectrum, respectively.

DISCUSSION

SST, POC, K490, and Chl are essential variables to the dynamics of coastal and pelagic ecosystems (Palacios et al. 2006, Escalante et al. 2013, Audzijonyte et al. 2020). Unlike SST, which shows little variability based on the distance from the coast, PP, Chl, K490, and POC values increase toward the coast (Zeitzschel 1969, Mercado-Santana et al. 2017). SST is not the only variable that affects environmental conditions, local processes, such as land runoff during the rainy season, coastal upwelling, and human activities, can also modify the environment (Zamudio et al. 2001, García-Oliva et al. 2002). Therefore, other processes beyond SST also contribute

mientras que 2016 se caracterizó por anomalías negativas (Fig. 2f).

Índice multivariado de El Niño/Oscilación del Sur

Nuestros análisis indicaron que el IME varió entre y dentro de los años. De agosto de 2010 a marzo de 2011, los valores del IME fueron inferiores a 1.5 DE. Por lo tanto, este periodo puede considerarse una fase fría de un evento ENOS (La Niña). En contraste, de mayo de 2015 a mayo de 2016, los valores de IME fueron superiores a 1.5 DE, lo que indica que este periodo de tiempo constituyó una fase cálida de un evento ENOS (El Niño). Al comparar las fases fría y cálida, los años de El Niño mostraron mayores variaciones en los valores de tiempo e IME que los de La Niña (Fig. 4).

Relaciones entre las variables

Las correlaciones más altas entre todas las variables se observaron entre TSM y PP, seguidas por las correlaciones entre K490 y Cl y entre K490 y COP (Fig. 5). Tanto el IME como el CIP mostraron las correlaciones más bajas con las otras variables (Fig. 5). El análisis de correlación cruzada de TSM con IME mostró un desfase temporal de 3 meses entre los valores más altos de IME y los valores más altos de TSM ($r = 0.041$, Tabla 2). Además, los valores más altos de IME se asociaron con desfases temporales superiores a 3 meses en todas las comparaciones (Tabla 2).

Análisis espectral

El análisis espectral indicó que la frecuencia principal que influyó en las variables en este estudio fue 0.0833333. La inversa de esta frecuencia ($1/0.0833333$) representa un periodo de 12, lo que en este estudio implica un ciclo anual representado por 12 meses (Fig. 6). En este contexto, la temperatura y el CIP mostraron los valores más altos y más bajos del espectro, respectivamente.

DISCUSIÓN

La TSM, COP, K490 y Cl son variables esenciales para la dinámica de los ecosistemas costeros y pelágicos (Palacios et al. 2006, Escalante et al. 2013, Audzijonyte et al. 2020). A diferencia de la TSM, que muestra poca variabilidad respecto a la distancia de la costa, los valores de PP, Cl, K490 y COP aumentan hacia la costa (Zeitzschel 1969, Mercado-Santana et al. 2017). La TSM no es la única variable que afecta las condiciones ambientales, los procesos locales, como la escorrentía de lluvia, la surgencia costera y las actividades humanas, también pueden modificar el medio ambiente (Zamudio et al. 2001, García-Oliva et al. 2002). Por lo tanto, otros procesos más allá de la TSM también contribuyen a la variabilidad ambiental oceanográfica, especialmente en las zonas costeras como el PCM. En este estudio, las anomalías

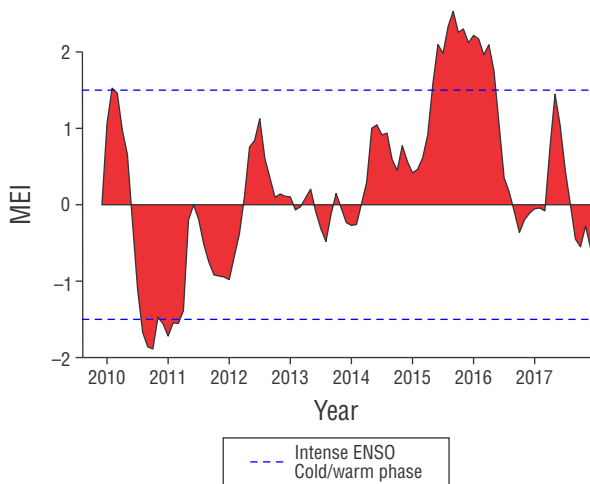


Figure 4. Multivariate El Niño/Southern Oscillation (ENSO) Index (MEI) values and their intensity during 2010–2017 (data from Wolter and Timlin 2011).

Figura 4. Valores del Índice Multivariado de El Niño/Oscilación del Sur (ENOS) (MEI) y su intensidad durante 2010–2017 (datos de Wolter y Timlin 2011).

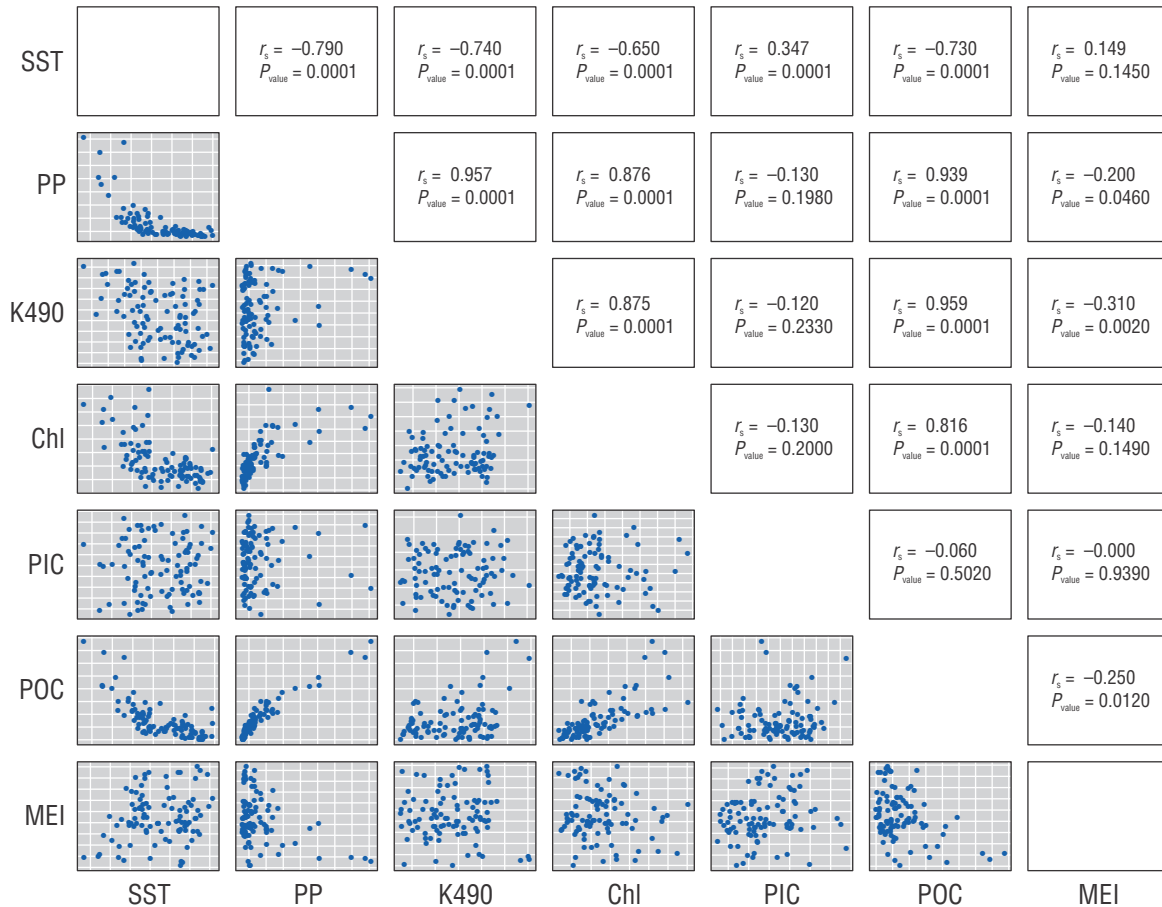


Figure 5. Correlogram of the environmental variables and Multivariate El Niño/Southern Oscillation Index (MEI). The top right shows the results and significance of the Spearman correlations. The lower left shows the correlation diagrams between the variables. SST: sea surface temperature; PP: primary productivity; K490: diffuse attenuation coefficient; Chl: chlorophyll concentration; PIC: particulate inorganic carbon concentration; and POC: particulate organic carbon concentration.

Figura 5. Correlograma de las variables ambientales y el Índice Multivariado El Niño/Oscilación del Sur (MEI). La parte superior derecha muestra los resultados y la importancia de las correlaciones de Spearman. La parte inferior izquierda muestra los diagramas de correlación entre las variables. SST: temperatura de la superficie del mar; PP: productividad primaria; K490: coeficiente de atenuación difusa; Chl: concentración de clorofila; PIC: concentración de carbono inorgánico particulado; y POC: concentración de carbono orgánico particulado.

to oceanographic environmental variability, especially in coastal areas such as the CMP. In this study, the anomalies were consistent over the months and years in that the greatest anomalies were present during the same period (February–March) each year. During this period in 2011, the CMP was affected by the intense effects of a cold ENSO phase.

Given that the correlations between the variables depend on the characteristics of the water masses that converge in the area during cold (December to May) and warm (June to November) seasons, the CC has a more notable influence on the study area during winter (Palacios et al. 2006), whereas the MCC has a greater influence during summer (Collins et al. 1997). The convergence of these currents in the CMP affects the oceanographic conditions present throughout the year. Our results showed that in months with low-temperature values, the mean values of PP, POC, Chl, and K490 increased, and the greatest Chl concentration was present during the cold season

fueron consistentes en los meses y años en que las mayores anomalías estuvieron presentes durante el mismo periodo (febrero-marzo) cada año. Durante este periodo en 2011, el PCM se vio afectado por los efectos intensos de una fase fría de ENOS.

Dado que las correlaciones entre las variables dependen de las características de las masas de agua que convergen en el área durante las estaciones frías (diciembre a mayo) y cálidas (junio a noviembre), la CC tiene una influencia más notable en el área de estudio durante el invierno (Palacios et al. 2006), mientras que la CCM tiene una mayor influencia durante el verano (Collins et al. 1997). La convergencia de estas corrientes en el PCM afecta las condiciones oceanográficas presentes a lo largo del año. Nuestros resultados mostraron que en meses con valores bajos de temperatura, los valores medios de PP, COP, Cl y K490 aumentaron, y la mayor concentración de Cl se presentó durante la estación

in 2011, which agrees with previous observations of the area (Cepeda-Morales et al. 2017). The presence of the CC, which is characterized by high oxygen concentrations (Cepeda-Morales et al. 2013), coincided with an increase in PP, POC, Chl, and K490 during the cold season from December to May (Collins et al. 1997). In addition, intensified northwesterly winds (López-Sandoval et al. 2009a, b) promote upwelling events in the coastal area during this season. Cold and oxygen-rich water coupled with upwelling promotes microalgae blooms (Anderson et al. 2002, Cepeda-Morales et al. 2009, Cortés-Lara et al. 2012), which increase PP and Chl values in the coastal area during the cold ENSO phase. The increase in the periodicity of ENSO may further extend the cold season with increased nutrient availability and turbidity in the CMP.

During the years included in this study (2010–2017), an El Niño event occurred (2015–2016) during which the influence of the MCC increased in the CMP. This current was characterized by higher temperatures than those of the CC and severely hypoxic waters (Cepeda-Morales et al. 2013). These characteristics, combined with the diminished intensity of the northwesterly winds in the area during the same months (López-Sandoval et al. 2009b), suppressed upwelling events. As oxygen and nutrients are essential for the growth of photosynthetic microorganisms that generate up to 90% of the Chl and biomass in the CMP (Cepeda-Morales et al. 2009), the biological processes in the region may have been severely compromised during this intense and extended warm ENSO phase. The time lags between the variables considered in this study and the effects of El Niño events have been extensively studied, and the results of this study agree with the lag of

fría en 2011, lo que concuerda con observaciones anteriores del área (Cepeda-Morales et al. 2017). La presencia de la CC, que se caracteriza por altas concentraciones de oxígeno (Cepeda-Morales et al. 2013), coincidió con un aumento de PP, COP, Cl y K490 durante la estación fría de diciembre a mayo (Collins et al. 1997). Además, los vientos del noroeste intensificados (López-Sandoval et al. 2009a, b) promueven eventos de surgencia en la zona costera durante esta temporada. Junto con la surgencia, el agua fría y rica en oxígeno promueve la proliferación de microalgas (Anderson et al. 2002, Cepeda-Morales et al. 2009, Cortés-Lara et al. 2012), que aumentan los valores de PP y Cl en la zona costera durante la fase fría de ENOS. El aumento de la periodicidad de ENOS puede extender aún más la estación fría con una mayor disponibilidad de nutrientes y turbiedad en el PCM.

Durante los años incluidos en este estudio (2010–2017), se produjo un evento de El Niño (2015–2016) durante el cual la influencia de la CCM aumentó en el PCM. Esta corriente se caracterizó por temperaturas más altas que las de la CC y aguas severamente hipóxicas (Cepeda-Morales et al. 2013). Estas características, combinadas con la menor intensidad de los vientos del noroeste en la zona durante los mismos meses (López-Sandoval et al. 2009b), reprimieron eventos de surgencia. Como el oxígeno y los nutrientes son esenciales para el crecimiento de microorganismos fotosintéticos que generan hasta el 90% de la Cl y la biomasa en el PCM (Cepeda-Morales et al. 2009), los procesos biológicos en la región pudieron haber sido gravemente comprometidos durante esta fase cálida, intensa y extendida de ENOS. Los desfases entre las variables consideradas en este estudio y los efectos de los eventos de El Niño han sido ampliamente estudiados, y los

Table 2. Temporal cross-correlation analysis. The first value represents the time lag (months), and the second value represents the correlation value between the higher average values of 6 oceanographic variables. SST: sea surface temperature; PP: primary productivity; K490: diffuse attenuation coefficient; Chl: chlorophyll concentration; PIC: particulate inorganic carbon concentration; POC: particulate organic carbon concentration; MEI: Multivariate El Niño/Southern Oscillation Index.

Tabla 2. Análisis de correlación cruzada temporal. El primer valor representa el desfase temporal (meses), y el segundo valor representa el valor de correlación entre los valores medios superiores de 6 variables oceanográficas. SST: temperatura de la superficie del mar; PP: productividad primaria; K490: coeficiente de atenuación difusa; Chl: concentración de clorofila; PIC: concentración de carbono inorgánico particulado; POC: concentración de carbono orgánico particulado; MEI: Índice Multivariado de El Niño/Oscilación del Sur (ENOS).

	PP	K490	Chl	PIC	POC	MEI
SST	0.00, -0.69	0.00, -0.70	-1.00, -0.66	-4.00, 0.38	0.00, -0.74	-4.00, 0.41
PP		0.00, 0.98	0.00, 0.75	-2.00, 0.61	0.00, 0.94	4.00, 0.54
K490			0.00, 0.77	-2.00, 0.56	0.00, 0.96	3.00, -0.57
Chl				-4.00, 0.37	0.00, 0.76	5.00, -0.48
PIC					2.00, 0.54	7.00, -0.40
POC						4.00, -0.58

1–3 months that was described by Kumar in 2003, which has been observed since 1950. However, this phenomenon has increased in periodicity and intensity as of late, which may be affecting the annual cycle of oceanographic variation in the CMP and the variables in this study. The lag observed in this study was not only found in SST but also in the cross-correlation analysis, in which we observed that with respect to the other variables, the effect of the 2015–2016 El Niño event was also detected months after the highest values of this MEI were present.

Unlike the other physicochemical variables, PIC showed no differences between the cold and warm seasons. However, PIC exhibited 2 periods of increase based on monthly measurements. The first period occurred from April to May and was related to the influence of the CC and the resuspension of seafloor material by upwelling events in the coastal zone. The second period, which was stronger than the first, was observed from August to October and was a consequence of the intense rainy season that resulted in the runoff of terrigenous materials via different rivers (the Ameca River, Grande de Santiago River, and Armeria River) and brackish water lagoons (Marismas Nacionales). During this period, PIC increased primarily during September (Figs. 1e, 2e).

Overall, the cold seasons observed in 2010 and 2011 in the CMP were related to a La Niña event. As such, this cold season coincided with the most abrupt changes in the other variables considered in this study. The interannual variation in SST during this period reflected a change of 6 °C in only 6 months, which was greater than the temperature difference observed over the same period in the other years considered in this study (i.e., 4 °C). While low La Niña MEI values were recorded in September 2010, the effects of this phenomena were observed 4 months later (January–February) in the CMP. This apparent lack of relationship between the MEI and the more extreme values can be attributed to the time it takes severe La Niña and El Niño events to influence the region. During 2015–2016, an increase in temperature was observed due to the strong and extended El Niño event, which further intensified the characteristics of the warm-water period. The effects of this event were observed after 6 months and were characterized by the lowest PP, Chl, K490, POC, and PIC values.

The intraannual variability in this study was consistent with that of previous studies of the GC. However, these studies also acknowledge that the variability of the CMP is particularly high compared to that of the rest of the gulf (Mercado-Santana et al. 2017). The PP values in Mexican seas indicate that a highly productive period occurs within the area covered by this study during the cold season, which is only surpassed by the high productivity of the northern GC (Sosa-Ávalos et al. 2017). Additionally, the CMP shows great environmental variability between the cold and warm periods throughout the year (Mercado-Santana et al. 2017, Sosa-Ávalos et al. 2017). This study shows that the main cycle of variation for the 6 oceanographic variables

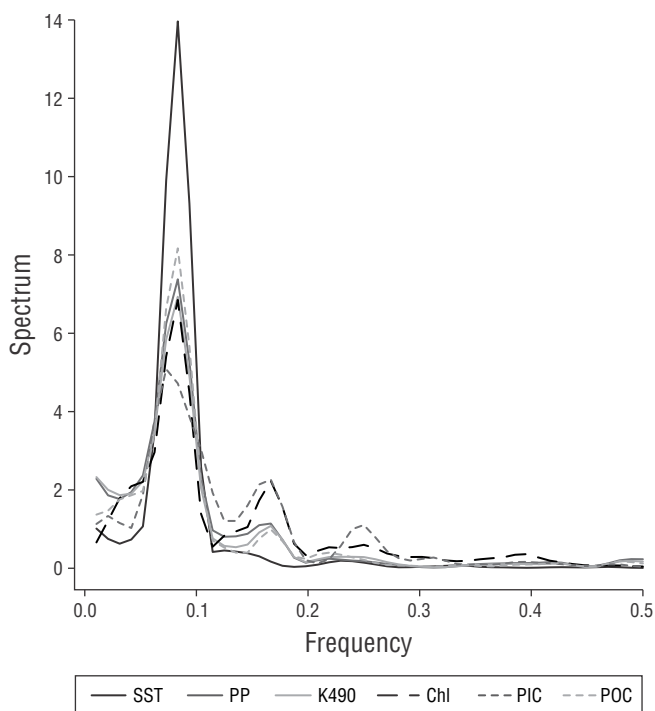


Figure 6. Spectral analysis of the standardized environmental variables used in this study for the central Mexican Pacific. SST: Sea surface temperature; PP: primary productivity; K490: diffuse attenuation coefficient; Chl: chlorophyll concentration; PIC: particulate inorganic carbon; POC: particulate organic carbon.

Figura 6. Análisis espectral de las variables ambientales estandarizadas utilizadas en este estudio para el Pacífico central mexicano. SST: Temperatura superficial del mar; PP: productividad primaria; K490: coeficiente de atenuación difusa; Chl: concentración de clorofila; PIC: carbono inorgánico particulado; POC: carbono orgánico particulado.

resultados de este estudio coinciden con el desfase de 1–3 meses descrito por Kumar en 2003, que se ha observado desde 1950. Sin embargo, este fenómeno ha aumentado en periodicidad e intensidad en los últimos tiempos, lo que puede estar afectando el ciclo anual de variación oceanográfica en el PCM y las variables de este estudio. El desfase observado en este estudio no solo se encontró en la TSM, sino también en el análisis de correlación cruzada, en el cual se observó que, en comparación con otras variables, el efecto del evento de El Niño 2015–2016 también fue detectado meses después de que se presentaran los valores más altos del IME.

A diferencia de las otras variables fisicoquímicas, el CIP no mostró diferencias entre las estaciones frías y cálidas. Sin embargo, el CIP mostró 2 periodos de aumento basados en mediciones mensuales. El primer periodo ocurrió de abril a mayo y estuvo relacionado con la influencia de la CC y la resuspensión del material del fondo marino por eventos de surgencia en la zona costera. El segundo periodo, que fue más fuerte que el primero, se observó de agosto a octubre y fue una consecuencia de la intensa temporada de lluvias que

evaluated corresponds to 12 months, which further supports the importance and influence of currents on the CMP and its biological resources. Indeed, the CMP is considered a temporary convergence zone for 2 marine currents. The natural oceanographic variability of the CMP combined with the increasingly intense and long-lasting effects of ENSO events augment the existing oceanographic variation within the CMP region.

ACKNOWLEDGMENTS

CVPS received a PhD Scholarship from the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT, 388102/252832). The present research was supported by the projects PROSNI2018/P3E/243453 and 249708 supervised by ALCM.

REFERENCES

- Álvarez-Borrego S, Lara-Lara JR. 1991. The physical environment and primary productivity of the Gulf of California. In: Dauphin JP, Simonet BRT (eds.), *The Gulf and Peninsular Province of the Californias*. Tulsa (OK): AAPG. p. 555-567. <http://doi.org/10.1306/M47542C26>
- Álvarez-Borrego SA, Schwartzlose RA. 1979. Masas de agua del Golfo de California = Water masses of the Gulf of California. *Cienc Mar*. 6(1-2):43-63. <https://doi.org/10.7773/cm.v6i1.350>
- Anderson DM, Glibert PM, Burkholder JM. 2002. Harmful algal blooms and eutrophication: Nutrient sources, composition, and consequences. *Estuaries*. 25:704-726. <https://doi.org/10.1007/BF02804901>
- Audzijonyte A, Richards SA, Stuart-Smith RD, Peel G, Edgar GJ, Barrett NS, Payne N, Blanchard JL. 2020. Fish body sizes change with temperature but not all species shrink with warming. *Nat Ecol Evol*. 4:809-814. <https://doi.org/10.1038/s41559-020-1171-0>
- Badan-Dangon A. 1998. Coastal circulation from the Galápagos to the Gulf of California. In: Robinson AR, Brink, KH (eds.), *The Sea, The Global Coastal Ocean Regional Studies and Syntheses*, vol. 11. Cambridge (MA): John Wiley and Sons. p. 315-334.
- Ballance LT, Pitman RL, Fiedler PC. 2006. Oceanographic influences on seabirds and cetaceans of the eastern tropical Pacific: A review. *Prog Oceanogr*. 69(2-4):360-390. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.03.013>
- Brander K. 2010. Impacts of climate change on fisheries. *J Mar Syst*. 79(3-4):389-402. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2008.12.015>
- Brodeur RD, Pearcy WG, Ralston S. 2003. Abundance and distribution patterns of nekton and micronekton in the Northern California Current transition zone. *J Oceanogr*. 59:515-535. <https://doi.org/10.1023/A:1025548801541>
- Carpenter KE, Abrar M, Aeby G, Aronson RB, Banks S, Bruckner A, Chiriboga A, Cortés J, Delbeek JC, DeVantier L, et al. 2008. One-third of reef-building corals face elevated extinction risk from climate change and local impacts. *Science*. 321(5888):560-563. <https://doi.org/10.1126/science.1159196>
- Cepeda-Morales J, Beier E, Gaxiola-Castro G, Lavín MF, Godínez VM. 2009. Effect of the oxygen minimum zone on the second chlorophyll maximum in the Eastern Tropical Pacific off Mexico = Efecto de la zona del mínimo de oxígeno en el segundo máximo de clorofila en el Pacífico Oriental Tropical Mexicano.

dio lugar a la escorrentía de materiales terrígenos a través de diferentes ríos (el río Ameca, el río Grande de Santiago y el río Armería) y lagunas de agua salobre (Marismas Nacionales). Durante este periodo, el CIP aumentó principalmente durante septiembre (Figs. 1e, 2e).

En general, las estaciones frías observadas en 2010 y 2011 en el PCM se relacionaron con un evento de La Niña. Como tal, esta estación fría coincidió con los cambios más abruptos en las otras variables consideradas en este estudio. La variación interanual en TSM durante este periodo reflejó un cambio de 6 °C en solo 6 meses, que fue mayor que la diferencia de temperatura observada durante el mismo periodo en los otros años considerados en este estudio (es decir, 4 °C). Si bien en septiembre 2010 se registraron valores bajos de IME de La Niña, los efectos de este fenómeno se observaron 4 meses después (enero-febrero) en el PCM. Esta aparente falta de relación entre el IME y los valores más extremos se puede atribuir al tiempo que toman los eventos severos de La Niña y El Niño para influir en la región. Durante 2015-2016, se observó un aumento de la temperatura debido al fuerte y prolongado evento de El Niño, que intensificó aún más las características del periodo de agua caliente. Los efectos de este evento se observaron después de 6 meses y se caracterizaron por los valores más bajos de PP, CI, K490, COP y CIP.

La variabilidad intraanual en este estudio fue consistente con la de estudios previos del GC. Sin embargo, estos estudios también reconocen que la variabilidad del PCM es particularmente alta en comparación con la del resto del golfo (Mercado-Santana et al. 2017). Los valores de PP en los mares mexicanos indican que se produce un periodo altamente productivo dentro del área cubierta por este estudio durante la estación fría, que solo es superado por la alta productividad del norte del GC (Sosa-Ávalos et al. 2017). Además, el PCM muestra gran variabilidad ambiental entre los periodos fríos y cálidos a lo largo del año (Mercado-Santana et al. 2017, Sosa-Ávalos et al. 2017). Este estudio muestra que el ciclo principal de variación para las 6 variables oceanográficas evaluadas corresponde a 12 meses, lo que apoya aún más la importancia y la influencia de las corrientes en el PCM y sus recursos biológicos. De hecho, el PCM se considera una zona de convergencia temporal para 2 corrientes marinas. La variabilidad oceanográfica natural del PCM combinada con los efectos cada vez más intensos y duraderos de los eventos de ENOS aumentan la variación oceanográfica existente dentro de la región del PCM.

AGRADECIMIENTOS

CVPS recibió una beca de doctorado del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT, 388102/252832). La presente investigación fue apoyada por los proyectos PROSNI2018/P3E/243453 y 249708 supervisados por ALCM.

Traducido al español por MacTavish Scientific Editing.

- Cienc Mar. 35(4):389-403.
<https://doi.org/10.7773/cm.v35i4.1622>
- Cepeda-Morales J, Gaxiola-Castro G, Beier E, Godínez VM. 2013. The mechanisms involved in defining the northern boundary of the shallow oxygen minimum zone in the eastern tropical Pacific Ocean off Mexico. *Deep Sea Res Part I*. 76:1-12.
<https://doi.org/10.1016/j.dsr.2013.02.004>
- Cepeda-Morales J, Hernández-Vásquez F, Rivera-Caicedo J, Romero-Bañuelos C, Inda-Díaz E, Hernández-Almeida O. 2017. Seasonal variability of satellite derived chlorophyll and sea surface temperature on the continental shelf of Nayarit, Mexico = Variabilidad estacional de clorofila y temperatura superficial del mar satelital en la plataforma continental de Nayarit, México. *BioCien*. 4(6):1-17.
<https://doi.org/10.15741/revbio.04.06.07>
- Collins CA, Garfield N, Mascarenhas ASJ, Spearman MG, Rago TA. 1997. Ocean current across the entrance to the Gulf of California. *J Geophys Res*. 102(C9):20927-20936.
<https://doi.org/10.1029/97JC01302>
- Cortés-Lara M, Cortés-Altamirano R, Cupul-Magaña AL, Rodríguez-Nava LV, Vega-Villasante F. 2012. Guía de Florecimientos Microalgales (2000–2011) Causantes de Mareas Rojas en la Bahía de Banderas Jalisco-Nayarit. Guadalajara (Mexico): Universidad de Guadalajara. 104 p.
- Di Lorenzo E, Cobb KM, Furtado JC, Schneider N, Anderson BT, Bracco A, Alexander MA, Vimont DJ. 2010. Central Pacific El Niño and decadal climate change in the North Pacific Ocean. *Nat Geosci*. 3:762-765.
<https://doi.org/10.1038/ngeo984>
- Donelson JM, Munday PL, McCormick MI, Pankhurst NW, Pankhurst PM. 2010. Effects of elevated water temperature and food availability on the reproductive performance of a coral reef fish. *Mar Ecol Prog Ser*. 401:233-243.
<https://doi.org/10.3354/meps08366>
- Espinosa-Carreón LE, Valdez-Holguín JE. 2007. Variabilidad interanual de clorofila en el golfo de California = Gulf of California interannual chlorophyll variability. *Ecol Appl*. 6:83-92.
- Escalante F, Valdez-Holguín JE, Álvarez-Borrego S, Lara-Lara JR. 2013. Temporal and spatial variation of sea surface temperature, chlorophyll *a*, and primary productivity in the Gulf of California = Variación temporal y espacial de temperatura superficial del mar, clorofila *a* y productividad primaria en el golfo de California. *Cienc Mar*. 39(2):203-215.
<https://doi.org/10.7773/cm.v39i2.2233>
- Fiedler PC, Talley LD. 2006. Hydrography of the eastern tropical Pacific: A review. *Prog Oceanogr*. 69(2–4):143-180.
<https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.03.008>
- Filonov AE, Tereshchenko IE, Monzón CO, González-Ruelas ME, Godínez-Domínguez E. 2000. Variabilidad estacional de los campos de temperatura y salinidad de la zona costera de los estados de Jalisco y Colima, México = Seasonal variability of the temperature and salinity fields in the coastal zone of the states of Jalisco and Colima, Mexico. *Cienc Mar*. 26(2):303-321.
<http://doi.org/10.7773/cm.v26i2.577>
- Gafar NA, Eyre BD, Schulz KG. 2019. Particulate inorganic to organic carbon production as a predictor for coccolithophorid sensitivity to ongoing ocean acidification. *Limnol Ocean Lett*. 4(3):62-70.
<https://doi.org/10.1002/lo12.10105>
- García-Oliva F, Camou A, Maass M. 2002. El clima de la región central de la costa del Pacífico mexicano. In: Noguera FA, Vega JH, García-Aldrete AN, Quesada M (eds.), *Historia Natural del Bosque Caducifolio de Chamela*. Mexico: Instituto de Biología de la UNAM. p. 3-10.
- García-Oliva F, Ezcurra E, Galicia L. 1991. Pattern of rainfall distribution in the central Pacific coast of Mexico. *Geogr Ann Ser A*. 73(3–4):179-186.
<https://doi.org/10.1080/04353676.1991.11880343>
- [IPCC] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2002. *Climate change and biodiversity*, Technical Paper V. [place unknown]: IPCC. 86 p; accessed 2020 Jul 17.
<https://wedocs.unep.org/20.500.11822/32705>
- Green BS, Fisher R. 2004. Temperature influences swimming speed, growth and larval duration in coral reef fish larvae. *J Exp Mar Biol Ecol*. 299:115-132.
<https://doi.org/10.1016/j.jembe.2003.09.001>
- Harley CDG, Randall Hughes A, Hultgren KM, Miner BG, Sorte CJB, Thornber CS, Rodriguez LF, Tomanek L, Williams SL. 2006. The impacts of climate change in coastal marine systems. *Ecol Lett*. 9(2):228-241.
<https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00871.x>
- Hopkins J, Henson SA, Poulton AJ, Balch WM. 2019. Regional characteristics of the temporal variability in the global particulate inorganic carbon inventory. *Glob Biogeo Cycles*. 33(11):1328-1338.
<https://doi.org/10.1029/2019GB006300>
- Kumar A, Hoerling MP. 2003. The nature and causes for the delayed atmospheric response to El Niño. *J Clim*. 16(9):1391-1403.
<https://doi.org/10.1175/1520-0442-16.9.1391>
- Lavín MF, Beier E, Gómez-Valdés J, Godínez VM, García J. 2006. On the summer poleward coastal current off SW México. *Geophys Res Lett*. 33(2):2-5.
<https://doi.org/10.1029/2005GL024686>
- Lavín MF, Marinone SG. 2003. An overview of the physical oceanography of the Gulf of California. In: Velasco Fuentes OU, Sheinbaum J, Ochoa J (eds.), *Nonlinear Processes in Geophysical Fluid Dynamics*. Dordrecht (Netherlands): Springer. 378 p.
https://doi.org/10.1007/978-94-010-0074-1_11
- Ledesma-Vázquez J, Johnson ME, González- Yajimovich O, Santamaría-del-Angel E. 2009. Gulf of California Geography, Geological Origins, Oceanography, and Sedimentation Patterns. In: Johnson ME, Ledesma-Vázquez J (eds.), *Atlas of Coastal Ecosystems in the Gulf of California: Tracking Limestone Deposits on The Margin of a Young Sea*. Tucson (AZ): The University of Arizona Press. p. 1-10.
- Lee T, McPhaden MJ. 2010. Increasing intensity of El Niño in the central-equatorial Pacific. *Geophys Res Lett*. 37(14):1-5.
<https://doi.org/10.1029/2010GL044007>
- López-Sandoval DC, Lara-Lara JR, Álvarez-Borrego S. 2009a. Phytoplankton production by remote sensing in the region off Cabo Corrientes, Mexico = Producción fitoplanctónica por sensores remotos en la región frente a Cabo Corrientes, México. *Hidrobiol*. 19:185-192.
- López-Sandoval DC, Lara-Lara JR, Lavín MF, Álvarez-Borrego S, Gaxiola-Castro G. 2009b. Primary productivity in the eastern tropical Pacific off Cabo Corrientes, Mexico = Productividad primaria en el Pacífico oriental tropical adyacente a Cabo Corrientes, México. *Cienc Mar*. 35(2):169-182.
<https://doi.org/10.7773/cm.v35i2.1530>
- Magaña-Rueda V, Pérez JL, Conde C. 1997. El fenómeno de El Niño y la Oscilación del Sur y sus impactos en México. *Ciencias*. 51:14-18.
- Maul GA, Williams F, Roffer M, Sousa FM. 1984. Remotely sensed oceanographic patterns and variability of bluefin tuna catch in the Gulf of Mexico. *Oceanol Acta*. 7(4):469-479.
- McPhaden MJ, Zhang D. 2002. Slowdown of the meridional overturning circulation in the upper Pacific Ocean. *Nature*. 415:603-608.
<https://doi.org/10.1038/415603a>

- Mercado-Santana JA, Santamaría-del-Ángel E, González-Silvera A, Sánchez-Velasco L, Gracia-Escobar MF, Millán-Núñez R, Torres-Navarrete C. 2017. Productivity in the Gulf of California large marine ecosystem. *Environ Dev*. 22:18-29. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2017.01.003>
- Moncayo-Estrada R, Castro-Aguirre JL, De La-Cruz Agüero J. 2006. Lista sistemática de la ictiofauna de Bahía de Banderas. México. *Rev Mex Biodivers*. 77:67-80.
- Páez-Osuna F, Sanchez-Cabeza JA, Ruiz-Fernández AC, Alonso-Rodríguez R, Piñón-Gimate A, Cardoso-Mohedano JG, Flores-Verdugo FJ, Carballo JL, Cisneros-Mata MA, Álvarez-Borrego S. 2016. Environmental status of the Gulf of California: A review of responses to climate change and climate variability. *Earth-Sci Rev*. 162:253-268. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.09.015>
- Palacios DM, Bograd SJ, Foley DG, Schwing FB. 2006. Oceanographic characteristics of biological hot spots in the North Pacific: A remote sensing perspective. *Deep Sea Res Part II*. 53(3-4):250-269. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2006.03.004>
- Pantoja DA, Marinone SG, Parés-Sierra A, Gómez-Valdivia F. 2012. Numerical modeling of seasonal and mesoscale hydrography and circulation in the Mexican Central Pacific = Modelación numérica de la hidrografía y circulación estacional y de mesoescala en el Pacífico central mexicano. *Cienc Mar*. 38(2):363-379. <https://doi.org/10.7773/cm.v38i2.2007>
- Reyes-Bonilla H. 2003. Coral reefs of the Pacific coast of México. In: Cortés J (ed.), *Latin American Coral Reefs*. Amsterdam (Netherlands): Elsevier Science B.V. p. 331-349. <https://doi.org/10.1016/B978-044451388-5/50015-1>
- Reyes-Coca S, Troncoso-Gaytán R. 2001. "El Niño Oscilación del Sur" y los fenómenos hidrometeorológicos en Baja California: el evento de 1997-1998. INP. SAGARPA. México. *Ciencia Pesquera*. 15:89-96.
- Ribas-Ribas M, Hernández-Ayón JM, Camacho-Ibar VF, Cabello-Pasini A, Mejía-Trejo A, Durazo R, Galindo-Bect S, Souza AJ, Forja JM, Siqueiros-Valencia A. 2011. Effects of upwelling, tides and biological processes on the inorganic carbon system of a coastal lagoon in Baja California. *Estuar Coast Shelf Sci*. 95(4):367-376. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2011.09.017>
- R Core Team. 2021. R: A language and environment for statistical computing. Vienna (Austria): R Foundation for Statistical Computing; accessed 08 December 2021. <https://www.R-project.org/>.
- Robertson DR, Cramer KL. 2009. Shore fishes and biogeographic subdivisions of the Tropical Eastern Pacific. *Mar Ecol Prog Ser*. 380:1-17. <https://doi.org/10.3354/meps07925>
- Rodríguez-Troncoso AP, Carpizo-Ituarte E, Cupul-Magaña AL. 2016. Physiological response to high temperature in the Tropical Eastern Pacific coral *Pocillopora verrucosa*. *Mar Ecol*. 37:1168-1175. <https://doi.org/10.1111/maec.12392>
- Simons RA, Mendelssohn R. 2012. ERDDAP-A Brokering Data Server for Gridded and Tabular Datasets. In: [AGU] American Geophysical Union (ed.), *Fall Meeting Abstracts Vol. 2012*. San Francisco (CA): American Geophysical Union. p. IN21B-1473; accessed 2018 May. <https://coastwatch.pfeg.noaa.gov/erddap/index>.
- Sosa-Ávalos R, Espinosa-Carreón TL, Santamaría-del-Ángel E, Cepeda-Morales J, Mercado-Santana A, De la Cruz-Orozco ME, Lara-Lara JR, Álvarez-Borrego S, Gaxiola-Castro G. 2017. Diagnóstico y análisis de la producción primaria neta en los mares de México. *Elem Pol Púb*. 2(3):164-185.
- Spalding MD, Fox HE, Allen GR, Davidson N, Ferdaña ZA, Finlayson M, Halpern BS, Jorge MA, Lombana A, Lourie SA, et al. 2007. Marine ecoregions of the world: a bioregionalization of coastal and shelf areas. *BioScience*. 57(7):573-583. <https://doi.org/10.1641/B570707>
- Speers AE, Besedin EY, Palardy JE, Moore C. 2016. Impacts of climate change and ocean acidification on coral reef fisheries: An integrated ecological-economic model. *Ecol Econ*. 128:33-43. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.04.012>
- Wild C, Hoegh-Guldberg O, Naumann MS, Colombo-Pallotta MF, Ateweberhan M, Fitt WK, Iglesias-Prieto R, Palmer C, Bythell JC, Ortiz J, et al. 2011. Climate change impedes reef ecosystem engineers. *Mar Freshw Res*. 62(2):205-215. <https://doi.org/10.1071/MF10254>
- Wolter K, Timlin MS. 2011. El Niño/Southern Oscillation behaviour since 1871 as diagnosed in an extended multivariate ENSO index. *Int J Climatol*. 31(7):1074-1087. <https://doi.org/10.1002/joc.2336>
- Zamudio L, Leonardi AP, Meyers SD, O'Brien JJ. 2001. ENSO and eddies on the southwest coast of Mexico. *Geophys Res Lett*. 28(1):13-16. <https://doi.org/10.1029/2000GL011814>
- Zeitzschel B. 1969. Primary productivity in the Gulf of California. *Mar Biol*. 3:201-207. <https://doi.org/10.1007/BF00360952>