

## Paleoceanographic and paleoclimatic reconstruction based on marine palynomorphs in the period 1811–1907 CE in the Magdalena Basin, Baja California Sur, Mexico

## Reconstrucción paleoceanográfica y paleoclimática basada en palinomorfos marinos durante el periodo 1811–1907 EC en cuenca Magdalena, Baja California Sur, México

Laura Cristina López-Velázquez<sup>1\*</sup>, Javier Helenes<sup>1</sup>, Juan Gabriel Flores-Trujillo<sup>2</sup>, Ana Carolina Ruiz-Fernández<sup>3</sup>, Joan Albert Sanchez-Cabeza<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Geología, Ciencias de la Tierra, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, Carretera Ensenada-Tijuana, no. 3918, Zona Playitas, CP 22860, Ensenada, Baja California, Mexico.

<sup>2</sup> Dependencia Académica de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma del Carmen, Calle 56, no. 4, Esquina Av. Concordia, CP 24180, Ciudad del Carmen, Campeche, Mexico.

<sup>3</sup> Unidad Académica Mazatlán, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Av. Joel Montes Camarena S/N, CP 82040, Mazatlán, Sinaloa, Mexico.

<sup>4</sup> Unidad Procesos Oceánicos y Costeros, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, CP 04510, Mexico City, Mexico.

\* Corresponding author. E-mail: lvelazquez@outlook.com

**ABSTRACT.** Biennial variations of marine palynomorph concentrations mirrored oceanographic conditions in the Magdalena Basin, Baja California Sur (Mexico), in the period from 1811 to 1907 (common era, CE), for which the sea surface temperature index (SSTI) showed predominantly negative anomalies. We analyzed 49 samples of laminated sediments taken from a core extracted at a water depth of 520 m. Changes in dinoflagellate assemblages and copepod egg abundances were compared to SSTI records and to El Niño Southern Oscillation (ENSO) and Pacific Decadal Oscillation (PDO) reconstructions. Copepods were the most abundant and showed a significant correlation with SSTI. Among the dinoflagellates, heterotrophs were the most abundant and did not correlate with SSTI. The lowest concentration of autotrophs showed a significant and inverse correlation with SSTI. The canonical correlation analysis also indicated that copepods and autotrophs were modulated by variations in SSTI. Dinoflagellate richness and concentrations and copepod egg concentrations were low, indicating low productivity, and these values coincided with the negative SSTI anomalies. In contrast, the increase in concentrations from 1881 to 1907 CE coincided with positive SSTI anomalies. Also, even when marine palynomorphs showed no significant correlation with either ENSO or PDO, their concentrations increased during age intervals with combined negative conditions (La Niña, negative PDO) and decreased during combined warm conditions (El Niño, positive PDO).

*Key words:* dinoflagellates, copepods, sea surface temperature, El Niño Southern/Oscillation, Pacific Decadal Oscillation.

**RESUMEN.** Las variaciones bianuales de las concentraciones de palinomorfos marinos reflejaron las condiciones oceanográficas en la cuenca Magdalena, Baja California Sur (México), en el periodo de 1811 a 1907 (era común, EC), para el cual el índice de la temperatura superficial del mar (ITSM) demostró, predominantemente, anomalías negativas. Se analizaron 49 muestras de sedimentos laminados tomadas de un núcleo extraído a 520 m de profundidad del agua. Los cambios observados en los conjuntos de quistes de dinoflagelados y las abundancias de huevos de copépodos fueron comparadas con registros del ITSM y reconstrucciones de El Niño Oscilación del Sur (ENOS) y la Oscilación Decenal del Pacífico (ODP). Los copépodos fueron los más abundantes y presentaron una correlación significativa con el ITSM. Entre los dinoflagelados, los heterótrofos fueron los más abundantes y no se correlacionaron con el ITSM. La concentración más baja de autótrofos mostró una correlación significativa e inversa con el ITSM. El análisis de correlación canónica también indicó que las abundancias de copépodos y autótrofos estuvieron modulados por las variaciones del ITSM. La riqueza y la concentración de dinoflagelados, así como las concentraciones de huevos de copépodos, fueron bajas, indicativo de baja productividad, y coincidieron con las anomalías negativas del ITSM. En contraste, se observó un incremento en las concentraciones de 1881 a 1907 EC, correspondiente a un aumento del ITSM. Además, aunque los palinomorfos marinos no mostraron una correlación significativa con ENOS ni con la ODP, las concentraciones aumentaron cuando se presentó la combinación de condiciones negativas de estos índices (La Niña, ODP negativa), pero disminuyeron en condiciones cálidas combinadas (El Niño, OPD positiva).

*Palabras clave:* dinoflagelados, copépodos, temperatura superficial del mar, El Niño/Oscilación del Sur, Oscilación Decenal del Pacífico.

## INTRODUCTION

The ocean floor provides an excellent sedimentary record that can help us recognize and understand paleoceanographic and paleoclimatic changes (Esparza-Álvarez 1999). The biogenic component in these sediments is important because it is largely represented by phyto- and zooplankton (Aguirre 1989). Moreover, it provides a record of the dominant organic productivity and the sedimentological and climatological conditions in the basin where it settled (Emery and Hülsemann 1961). Much of this record is made up of minerals and consequently tends to be affected by dissolution during diagenesis (Molina 2017). Nevertheless, palynomorphs are highly resistant to acidification and are very useful when reconstructing paleoceanographic characteristics. Laminated sediments, in particular, tend to preserve organic matter with almost no alteration and thus make for high-resolution records. Marine palynomorphs comprise the resistant cysts of different algae (e.g., Chlorophyceae), dinoflagellates, acritarchs, and diapausing copepods.

### Dinoflagellates

Dinoflagellates are unicellular microorganisms living in fresh water and seawater that range between 50 and 200  $\mu\text{m}$  in size (Bütschli 1885, Fensome et al. 1993). Presently 1,555 free-living marine dinoflagellate species are recognized around the world's oceans (Gómez 2005). The life cycle of dinoflagellates has 2 main stages, one consisting of mobile planktonic cells and another of non-motile benthic cells that form cysts. Only 96 living species (6% of the total) produce resistant organic cysts (Zonneveld and Pospelova 2015). These cysts can persist for long periods of time, so they are known to have existed for longer than 200 million years (Evitt 1985, Fensome et al. 1993). In addition, cysts tend to be abundant along continental margins (Stover et al. 1996), where the areas with the highest primary productivity are found. The concentrations of these cysts in sediments are directly associated with the abundance of copepods in their planktonic phase (Peña-Manjarrez et al. 2009).

### Copepods

Copepods are a group of small crustaceans (0.2–28 mm) comprising ~12,000 species (Vives and Shmeleva 2007). Although they live in all types of environments and are found at every latitude, these species are mostly marine copepods. Marine planktonic copepods belonging to the order Calanoida produce diapausing eggs when environmental conditions (temperature, salinity, light, etc.) are not suitable for a dormant state (Fernández-de-Puelles 2015). These eggs are so resistant that they have been described in pre-Holocene marine sediments (Uye et al. 1979). This crustacean order can be used as a proxy for water masses and marine currents (Lavaniegos 2014), and it has even

## INTRODUCCIÓN

Los fondos oceánicos contienen un excelente registro sedimentario que puede ayudarnos a reconocer y entender cambios paleoceanográficos y paleoclimáticos (Esparza-Álvarez 1999). El componente biogénico en estos sedimentos es importante porque está representado, en gran parte, por el fito- y zooplancton (Aguirre 1989). Además, representa un registro de la productividad orgánica predominante y de las condiciones sedimentológicas y climáticas en la cuenca donde se depositó (Emery y Hülsemann 1961). Gran parte de este registro es de composición mineral, y tiende a ser afectado por la disolución durante la diagenesis (Molina 2017). No obstante, los palinomorfos son estructuras altamente resistentes a ataques ácidos y resultan muy útiles para reconstruir las características paleoceanográficas. En particular, los sedimentos laminados tienden a preservar la materia orgánica casi sin alterar, por lo que contienen registros de alta resolución. Los palinomorfos marinos incluyen los quistes de resistencia de diversas algas (e.g., las clorofíceas), dinoflagelados, acritarcos y estructuras diapáusicas de copépodos.

### Dinoflagelados

Los dinoflagelados son microorganismos unicelulares que se encuentran en aguas marinas y dulces cuyo tamaño oscila entre 50 y 200  $\mu\text{m}$  (Bütschli 1885, Fensome et al. 1993). Actualmente, se han reconocido 1,555 especies de dinoflagelados de vida libre en los océanos del mundo (Gómez 2005). El ciclo vital de los dinoflagelados presenta 2 estadios principales, uno de células planctónicas móviles y otro de células bentónicas no móviles que forman quistes. Únicamente 96 especies vivientes (6% del total) producen quistes orgánicos de resistencia (Zonneveld y Pospelova 2015). Estos quistes se pueden conservar por largos periodos de tiempo, por lo que se sabe que existen desde hace más de 200 millones de años (Evitt 1985, Fensome et al. 1993). Además, estos quistes suelen ser abundantes en los márgenes continentales (Stover et al. 1996), donde se encuentran las áreas con mayor productividad primaria. Las concentraciones de estos quistes en el sedimento están directamente relacionadas con las abundancias de copépodos en su fase planctónica (Peña-Manjarrez et al. 2009).

### Copépodos

Los copépodos son un grupo de pequeños crustáceos (0.2–28 mm) que incluye ~12,000 especies (Vives y Shmeleva 2007). Aunque viven en todos los ambientes y se encuentran en todas las latitudes, estas especies son mayoritariamente marinas. El orden de copépodos planctónicos marinos Calanoida produce huevos diapáusicos cuando las condiciones ambientales (temperatura, salinidad, luz, etc.) no son adecuadas para el estado latente (Fernández-de-Puelles 2015).

been used as a biological indicator of the effects of climate phenomena such as El Niño (Jiménez-Pérez and Lara-Lara 1988).

### Regional climatic factors

Two major climate events occurring in the northeastern Pacific Ocean have been studied, namely El Niño/Southern Oscillation (ENSO) and the Pacific Decadal Oscillation (PDO). The ENSO phenomenon exhibits interannual periodicity, is significantly associated with sea surface temperature (SST) anomalies, and presents phases that range from positive, or warm (El Niño), to negative, or cold (La Niña). During El Niño events surface waters in the eastern Pacific Ocean become warmer and subtropical and tropical water masses shift to mid latitudes. Conversely, La Niña events are characterized by the cooling of waters in the central and eastern equatorial Pacific. Under La Niña conditions, trade winds strengthen and upwelling of cold waters intensifies along the eastern equatorial Pacific (NOAA 2018). The PDO exhibits a periodicity of 20–30 years and presents a positive phase (PDO+), or warm phase, and a negative phase (PDO–), or cold phase. ENSO influences mainly the tropics, whereas the PDO affects the North Pacific and North America (Maturana et al. 2004). The most important climate variations occur when the PDO and ENSO are in phase.

### Primary productivity

Variability in primary productivity in the northeastern Pacific Ocean is associated with changes in the physicochemical conditions in the water column, which undergo interannual modulations during El Niño and La Niña events (Juárez et al. 2014). Laminated sediments in this basin indicated an increase in the abundance of heterotrophic dinoflagellate species during the cold phases of the PDO and ENSO in the 20th century (Castañeda-Quezada 2016).

When upwelling intensifies, turbulence in the water column increases and so does nutrient availability in the euphotic zone. As a result, diatoms, the main nutrient source for heterotrophic dinoflagellates, and copepods that feed on these heterotrophs proliferate. Conversely, when turbulence decreases and nutrients become less available, a thermocline and/or nutricline can form and prevent the nutrient-rich cold water from upwelling, thus reducing productivity. These low-turbulence conditions are more favorable for the proliferation of autotrophic dinoflagellates because, compared to diatoms, these dinoflagellates are more capable of moving vertically in the water column.

### Objectives

During the 1811–1907 (dates of the Gregorian calendar, or common era, CE) period, the sea surface temperature

Estos huevos son tan resistentes que han sido descritos en sedimentos marinos preholocénicos (Uye et al. 1979). Este orden de crustáceos tiene gran utilidad como indicador indirecto de masas de agua y corrientes marinas (Lavaniegos 2014), e incluso ha sido empleado como bioindicador de efectos de fenómenos climáticos como El Niño (Jiménez-Pérez y Lara-Lara 1988).

### Factores climáticos regionales

En el Pacífico nororiental se han estudiado 2 factores climáticos principales, El Niño/Oscilación del Sur (ENOS) y la Oscilación Decenal del Pacífico (ODP). El fenómeno ENOS exhibe periodos interanuales, está significativamente asociado a las anomalías de temperatura superficial del mar (TSM) y presenta fases que varían desde positivas, o cálidas (El Niño), hasta negativas, o frías (La Niña). En los eventos El Niño ocurre un fuerte calentamiento de las aguas superficiales del Pacífico oriental y un desplazamiento de las masas de agua subtropical y tropical hacia latitudes medias. Por el contrario, la Niña se caracteriza por un enfriamiento de las aguas en las partes central y oriental del Pacífico ecuatorial. En condiciones de La Niña, los vientos alisios se fortalecen y el afloramiento de aguas frías se intensifica a lo largo del Pacífico ecuatorial oriental (NOAA 2018). La ODP tiene una periodicidad de 20 a 30 años, y presenta una fase positiva (ODP+), o cálida, y una fase negativa (ODP–), o fría. ENOS influye primordialmente en los trópicos, mientras que la ODP afecta al Pacífico Norte y Norteamérica (Maturana et al. 2004). Las variaciones climáticas más importantes suceden cuando la ODP y ENOS están en fase.

### Productividad primaria

La variabilidad de la productividad primaria en el Pacífico nororiental se asocia al cambio en las condiciones fisicoquímicas de la columna de agua, que son moduladas interanualmente durante los eventos El Niño y La Niña (Juárez et al. 2014). Los sedimentos laminados de esta cuenca indicaron un aumento en la abundancia de especies de dinoflagelados heterotróficos durante los intervalos de tiempo con fase fría de la ODP y de ENOS en el siglo XX (Castañeda-Quezada 2016).

Cuando se intensifican las surgencias, hay mayor turbulencia en la columna de agua y, consecuentemente, más nutrientes en la zona fótica, por lo que proliferan las diatomeas, el alimento de los dinoflagelados heterótrofos, y, a su vez, los copépodos que se alimentan de estos heterótrofos. En cambio, cuando hay menos nutrientes y poca turbulencia, se puede formar una termoclina y/o nutriclina, lo que dificulta el rompimiento de las surgencias, por lo que existe menor productividad. Estas condiciones de poca turbulencia son más adecuadas para la proliferación de dinoflagelados autótrofos porque estos dinoflagelados tienen mayor capacidad que las diatomeas de desplazarse verticalmente en la columna de agua.

index (SSTI) was dominated by negative anomalies (Jones and Mann 2004), suggesting that primary productivity in the Magdalena Basin increased in that period. Through this study, we aim to elucidate primary productivity and temperature conditions in the southern continental margin of the Baja California Peninsula (Mexico) during the 19th century. The hypothesis, to this end, is that during the 1811–1907 CE period, abundances of autotrophic and heterotrophic dinoflagellates and of copepods were associated with oceanographic conditions and regional forcings such as ENSO and PDO in the Magdalena Basin, Baja California Sur. The aim of the present study was to determine the association of palynological content in laminated sediments with proxies and reconstructions of regional climate indices available for this period. With this, we intend to expand our knowledge on the evolution of oceanographic and climatic conditions in the northeastern Pacific.

## MATERIALS AND METHODS

### Study area

The Magdalena Basin (23.42°N, 111.23°W; Fig. 1) is influenced to the north by the southern portion of the California Current and to the south by the North Equatorial Current. Bioturbation of the basin seafloor is absent because of the low oxygen levels (Hartnett et al. 1998, Esparza-Álvarez 1999, van Geen et al. 2003), allowing for the preservation of marine palynomorphs in laminated sediments.

For most of the western coasts of the Baja California Peninsula and California, SST and primary productivity show 2 very different seasons. During spring and summer, prevailing upwelling events, with cold, nutrient-rich waters and the presence of species associated with high productivity, promote an increase in regional primary productivity. These conditions intensify during the cold phase of the PDO and/or La Niña events (Mantua et al. 1997, Maturana et al. 2004, Barron et al. 2013). During the winter, northerly winds weaken and warmer water from the southeast is transported by the Southern California Countercurrent and the California Undercurrent (Bringué et al. 2014). These warm conditions become intense during the warm phase of the PDO and/or during El Niño events, due to thermocline and nutricline shoaling in the northeastern Pacific, which causes water stratification and a concurrent decrease in primary productivity on the western coast of Baja California (Espinosa-Carreón et al. 2004, Espinosa-Carreón and Valdez-Holguín 2007, Ortiz-Ahumada 2015).

In general, primary productivity in the region surrounding the Magdalena Basin tends to be relatively low (e.g., chlorophyll values of 0.32 mg/m<sup>3</sup> in water samples from 1999; Lara-Lara and Bazán-Guzmán 2005). The variability in marine biological productivity in the Magdalena Basin has been studied using biogenic opal, organic carbon, and CaCO<sub>3</sub> (Sánchez and Carriquiry 2007).

## Objetivos

Durante el periodo de 1811 a 1907 (edades del calendario gregoriano actual, o era común, EC), el índice de la temperatura superficial del mar (ITSM) estuvo dominado por anomalías negativas (Jones y Mann 2004), lo cual sugiere mayor productividad primaria en la cuenca Magdalena en ese tiempo. A través de este estudio, proponemos ilustrar las condiciones de productividad primaria y temperatura en la parte austral del margen continental de la península de Baja California (México) durante el siglo XIX. A este fin, se plantea la hipótesis que durante el periodo de 1811 a 1907 EC, las abundancias de los dinoflagelados autótrofos y heterótrofos, y los copépodos estuvieron relacionadas con las condiciones oceanográficas y los forzamientos regionales como ENOS y la ODP en la cuenca Magdalena, Baja California Sur. El presente estudio tiene como objetivo determinar la relación del contenido palinológico de los sedimentos laminados con los indicadores indirectos (*proxies*) y las reconstrucciones de los índices climáticos regionales disponibles para este periodo. De esta manera, se pretende mejorar el entendimiento sobre la evolución de las condiciones oceanográficas y climáticas en el Pacífico nororiental.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

La cuenca Magdalena (23.42°N, 111.23°W; Fig. 1) está influenciada por la porción sur de la corriente de California en el lado norte y por la corriente Norecuatorial en el lado sur. El fondo de la cuenca no presenta bioturbación debido a los bajos niveles de oxígeno (Hartnett et al. 1998, Esparza-Álvarez 1999, van Geen et al. 2003), lo que permite la preservación de palinomorfos marinos en los sedimentos laminados.

En la mayor parte de la costa occidental de la península de Baja California y de California, la TSM y la productividad primaria presentan 2 estaciones muy diferentes. En primavera y verano prevalecen condiciones de surgencia, con aguas frías ricas en nutrientes y la presencia de especies asociadas a productividad alta, por lo que se produce un aumento en la productividad primaria regional. Estas condiciones se intensifican en la fase fría de la ODP y/o durante La Niña (Mantua et al. 1997, Maturana et al. 2004, Barron et al. 2013). En invierno, los vientos del norte se debilitan, y la contracorriente del Sur de California y la subcorriente de California traen aguas más cálidas del sureste (Bringué et al. 2014). Estas condiciones cálidas se intensifican durante los años de la fase cálida de la ODP y/o durante El Niño, debido a la profundización de la termoclina y la nutriclina en el Pacífico nororiental, lo que provoca la estratificación del agua y la consiguiente reducción de la productividad primaria en la costa occidental de Baja California (Espinosa-Carreón et al. 2004, Espinosa-Carreón y Valdez-Holguín 2007, Ortiz-Ahumada 2015).

## Sampling and analysis

A core of laminated sediments from the Magdalena Basin (MAGD09-01MC3, 35 cm long) was extracted at 520 m depth in October 2009 aboard the RV *New Horizon*, in an expedition led by Dr. William Berelson from the University of Southern California. The lithology for the sediment core was homogenous and consisted of clays and laminated silts (Fig. 2). The core was sampled onboard at 1-mm intervals to obtain a record of the upper 10 cm with 100 samples. The rest of the segment (25 cm) was transported to the Paleooceanography Laboratory in the Ciencias Marinas Faculty at the Autonomous University of Baja California, where it was sampled at 1-cm intervals and X-rayed to check for changes in density. This study presents the results of the palynological analysis of the upper 5–10 cm interval (1811–1907 CE) at a millimetric scale. The 51 earlier samples (1909–2009 CE) were previously analyzed by Castañeda-Quezada (2016).

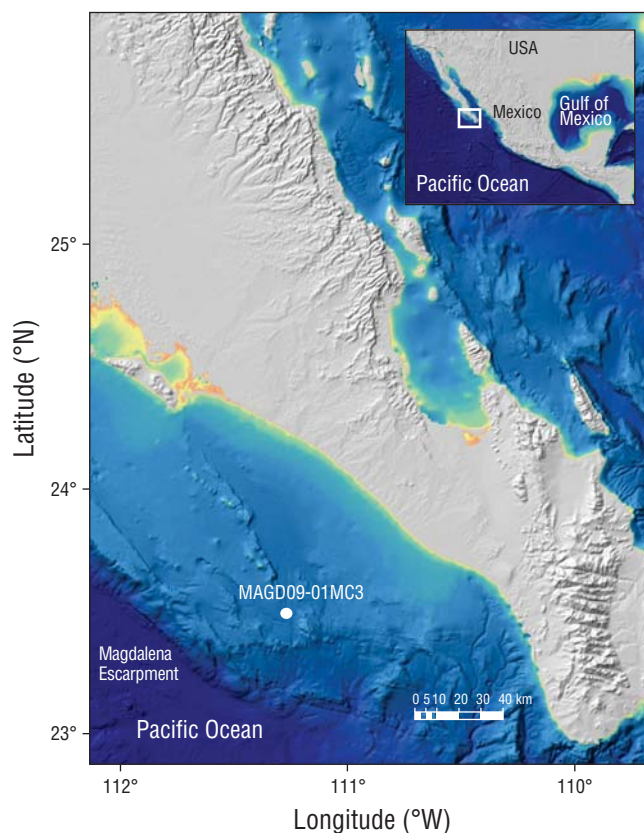
## Radiochronology

For dating of core MAGD09-01MC3, 5 samples were analyzed by the  $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$  method at the Academic Service for Dating of the Marine Sciences and Limnology Institute of the Autonomous University of Mexico (Mazatlán, Sinaloa). Though the number of samples was limiting, the analyzed samples exhibited the typical pattern of higher  $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$  concentrations at the surface (Table 1), so the constant flux/constant sedimentation model (Sanchez-Cabeza and Ruiz-Fernández 2012) was used to calculate ages corresponding to the Gregorian calendar (CE).

A linear regression between the  $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$  age profile and depth was used to calculate sedimentation velocities. We found a very low sedimentation velocity of  $0.62 \pm 0.01$  mm/year with high statistical significance ( $P = 7.04 \times 10^{-06}$ ) (Castañeda-Quezada 2016). Assuming a constant sedimentation rate, the 49 samples analyzed in the present study represent an approximate sedimentary record from 1811 to 1907 CE, with a 2-year resolution per sample.

## Palynological processing

All 49 samples were processed using the method for extracting palynomorphs described by Wood et al. (1996), with no oxidation to preserve all dinoflagellate taxa (Rochon et al. 1999) and with modifications made in the Laboratory of Palynology of the Center for Scientific Research and Higher Education at Ensenada (CICESE, for its Spanish acronym). Samples were lyophilized for 24 h at  $-58$  °C, and, on average, 0.97 g of dry sediment were weighed per sample. Each sample was ground in a mortar and placed in a beaker. A tablet of *Lycopodium clavatum* spores of batch 483216 (1 tablet = 18,583 spores,  $s: \pm 1,708$ ) was then added as an exotic marker to calculate the absolute abundance of palynomorphs.



**Figure 1.** Location of core MAGD09-01MC3 in the study area in the Magdalena Basin, Baja California Sur (Mexico).

**Figura 1.** Localización del núcleo MAGD09-01MC3 en el área de estudio en cuenca Magdalena, Baja California Sur (México).

En general, la productividad primaria en la región alrededor de la cuenca Magdalena tiende a ser relativamente baja (e.g., valores de clorofila de  $0.32 \text{ mg/m}^3$  en muestras de agua de 1999; Lara-Lara y Bazán-Guzmán 2005). En la cuenca Magdalena, se ha estudiado la variabilidad de la productividad biológica marina con datos de ópalo biogénico, carbono orgánico y  $\text{CaCO}_3$  (Sánchez y Carriquiry 2007).

## Muestreo y análisis

El testigo de sedimentos laminados de la cuenca Magdalena (MAGD09-01MC3, longitud de 35 cm) fue extraído a 520 m de profundidad en octubre de 2009 a bordo del BI *New Horizon*, a cargo del Dr. William Berelson de la Universidad del Sur de California. La litología del testigo de sedimentos fue homogénea, consistente en arcillas y limos laminados (Fig. 2). El testigo fue muestreado a intervalos de 1 mm a bordo de la embarcación para obtener un registro de los 10 cm superiores con 100 muestras. El segmento restante de 25 cm fue trasladado al Laboratorio de Paleooceanografía de la Facultad de Ciencias Marinas de la Universidad Autónoma de Baja California, donde fue muestreado a intervalos de 1 cm y radiografiado para evidenciar

We added cold hydrochloric acid (37.4%) to remove carbonates and hydrofluoric acid (48%) to eliminate silicates. Heavy metals were separated using sodium polytungstate (2.0 density) to isolate the palynological fractions. For microscopic observations, 49 thin laminae were prepared and analyzed qualitatively and quantitatively. Dinoflagellate cysts were identified using the descriptions for the holotypes of the species and the online databases of Zonneveld and Pospelova (2015) (Marum, <https://www.marum.de/Karin-Zonneveld/dinocystkey.htm>) and Williams et al. (2017) (Dinoflaj3, [http://dinoflaj3.smu.ca/dinoflaj3/index.php/Main\\_Page](http://dinoflaj3.smu.ca/dinoflaj3/index.php/Main_Page)). These catalogues contain all living dinoflagellate species known to date that produce organic cysts.

cambios de densidad. El presente estudio muestra los resultados del análisis palinológico del intervalo de los 5 a 10 cm superiores (1811–1907 EC) a escala de milímetro. Las 51 muestras más recientes (1909–2009 EC) ya fueron analizadas (Castañeda-Quezada 2016).

### Radiocronología

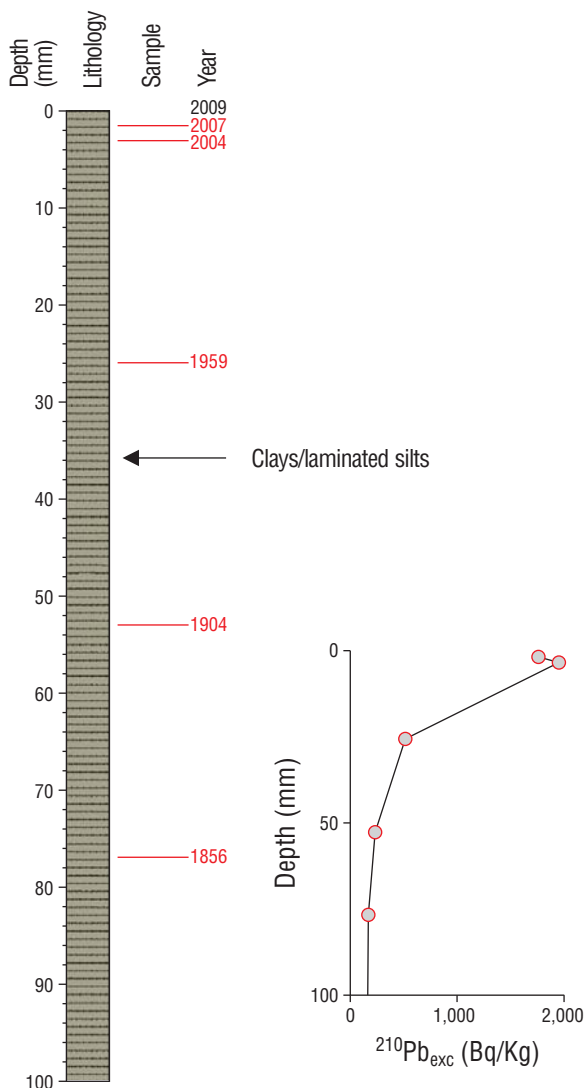
Para la datación del testigo MAGD09-01MC3, se analizaron 5 muestras mediante el método de  $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$  en el Servicio Académico de Fechado del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la Universidad Autónoma de México (Mazatlán, Sinaloa). Si bien el número de muestras analizadas fue limitado, estas mostraron el patrón típico de mayor concentración de  $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$  en la superficie (Tabla 1), por lo cual se utilizó el modelo de flujo constante/sedimentación constante (Sanchez-Cabeza y Ruiz-Fernández 2012) para calcular las edades correspondientes al calendario gregoriano (EC).

Las velocidades de acumulación de sedimentos fueron calculadas a través de una regresión lineal entre el perfil de edades  $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$  y la profundidad. Se encontró una velocidad de sedimentación muy baja de  $0.62 \pm 0.01$  mm/año, con alta significación estadística ( $P = 7.04 \times 10^{-06}$ ) (Castañeda-Quezada 2016). Suponiendo una tasa de sedimentación constante, las 49 muestras analizadas en este trabajo representan un registro sedimentario aproximado desde 1811 hasta 1907 EC, con una resolución de 2 años por muestra.

### Procesamiento palinológico

Se procesaron las 49 muestras mediante la metodología de extracción de palinomorfos descrita por Wood et al. (1996), sin oxidación para preservar todos los taxones de dinoflagelados (Rochon et al. 1999), y con modificaciones realizadas en el Laboratorio de Palinología del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE). Las muestras fueron liofilizadas durante 24 h a  $-58$  °C, y se pesaron, en promedio, 0.97 g de sedimento seco por cada muestra. Cada muestra fue triturada en un mortero y colocada en un vaso de precipitado. Posteriormente, se adicionó una tableta de esporas de *Lycopodium clavatum* del lote 483216 (1 tableta = 18,583 esporas,  $s: \pm 1,708$ ) como marcador exótico para calcular la abundancia absoluta de palinomorfos.

Se agregó ácido clorhídrico frío (37.4%) para remover carbonatos y ácido fluorhídrico (48%) para eliminar silicatos. La separación de minerales pesados se realizó con politungstato de sodio (densidad 2.0) para aislar las fracciones palinológicas. Se prepararon 49 láminas delgadas para la observación microscópica, y estas se analizaron cualitativa y cuantitativamente. Se identificaron los quistes de dinoflagelados con ayuda de las descripciones de los holotipos de las especies y con las bases de datos en línea de Zonneveld y Pospelova (2015) (Marum, <https://www.marum.de/Karin-Zonneveld/dinocystkey.htm>) y Williams et



**Figure 2.** Core (MAGD09-01MC3) lithology, samples, and ages ( $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ ). The years in red correspond to samples analyzed for radiocronology.

**Figura 2.** Litología, muestras y edades ( $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ ) del núcleo MAGD09-01MC3. Los años en color rojo corresponden a las muestras analizadas para la radiocronología.

**Table 1.**  $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$  concentrations and age calibrations with calendar years (common era, CE) for the analyzed samples taken from core MAGD09-01MC3.

**Tabla 1.** Concentraciones de  $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$  y calibración de las edades en años calendario (era común, CE) de las muestras analizadas del núcleo MAGD09-01MC3.

Depth (cm)	$^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ concentration (Bq/kg)	Calendar year (CE)
0.15	1,762 ± 132	2007
0.30	1,953 ± 127	2005
2.55	521 ± 35	1969
5.25	254 ± 19	1925
7.65	185 ± 15	1887

Concentrations were calculated using the following equation (Benninghoff 1962):

$$C = \frac{d_c \times L_t \times t}{L_c \times w} \quad (1)$$

where  $C$  is the concentration of palynomorphs per gram of dried sediment,  $d_c$  is the number of counted palynomorphs,  $L_t$  is the number of *Lycopodium* spores per tablet,  $t$  is the number of tablets added to the sample,  $L_c$  is the number of counted *Lycopodium* spores, and  $w$  is the weight of dried sediments in grams. These concentrations are expressed as palynomorphs (pal), dinoflagellate cysts (cys), or copepod eggs (cop) per gram of sediment (pal/g sed, cys/g sed, and cop/g sed, respectively).

#### Climate indices

To identify the paleoceanographic and paleoclimatic changes that occurred in the Magdalena Basin during the 19th century, the regional SST, ENSO, and PDO indices for the 1811–1907 CE time frame were used, and their correlation with palynological data was analyzed. Data for SSTI were obtained from Jones and Mann (2004), who used time series with proxies and various global models. Data for the ENSO index were obtained from the North American Drought Atlas tree ring records for the central part of the eastern tropical Pacific (Li et al. 2011). The PDO index (Biondi et al. 2001) was constructed using dendrochronological reconstructions from 5 sites, from the Transverse Ranges in southern California (USA) to Sierra San Pedro Mártir in northern Baja California (Mexico); in addition, 2 other sites were chosen, one close to San Gorgonio Mountain in California and one in Whirlpool Point in Alberta (Canada) (MacDonald and Case 2005). All indices were averaged biennially to equal the sampling resolution and are expressed in degrees Celsius.

al. (2017) (Dinoflaj3, [http://dinoflaj3.smu.ca/dinoflaj3/index.php/Main\\_Page](http://dinoflaj3.smu.ca/dinoflaj3/index.php/Main_Page)). Estos catálogos contienen todas las especies de dinoflagelados vivientes que producen quistes orgánicos conocidas actualmente.

Las concentraciones se calcularon mediante la siguiente fórmula (Benninghoff 1962):

$$C = \frac{d_c \times L_t \times t}{L_c \times w} \quad (1)$$

donde  $C$  es la concentración de palinomorfos por gramo de sedimento seco,  $d_c$  es el número de palinomorfos contados,  $L_t$  es el número de esporas de *Lycopodium* por tableta,  $t$  es el número de tabletas agregadas a la muestra,  $L_c$  es el número de esporas de *Lycopodium* contadas y  $w$  es el peso del sedimento seco en gramos. Estas concentraciones están expresadas como palinomorfos (pal), quistes de dinoflagelados (qst) o huevos de copépodos (cop) por gramo de sedimento (pal/g sed, qst/g sed y cop/g sed, respectivamente).

#### Índices climáticos

Para identificar los cambios paleoceanográficos y paleoclimáticos que tuvieron lugar en la cuenca Magdalena durante el siglo XIX, se utilizaron los índices regionales de la TSM, ENOS y la ODP para el periodo de 1811 a 1907 EC, y se estudió su correlación con los datos palinológicos. Los datos del ITSM se obtuvieron de Jones y Mann (2004), quienes utilizaron series de tiempo con datos de indicadores indirectos y varios modelos globales. Los datos del índice de ENOS se obtuvieron a partir del registro de anillos de árboles del atlas de sequías de América del Norte (*North American Drought Atlas*) para la parte central del Pacífico tropical oriental (Li et al. 2011). El índice de la ODP (Biondi et al. 2001) se constituyó a partir de reconstrucciones dendrocronológicas realizadas en 5 sitios, desde las cordilleras Transversales en el sur de California (EUA) hasta la sierra de San Pedro Mártir en el norte de Baja California (México); también se incluyó una localidad cerca del monte San Gorgonio en California y una en Whirlpool Point en Alberta (Canadá) (MacDonald y Case 2005). Todos los índices fueron promediados bianualmente para igualar la resolución de muestreo y están expresados en grados Celsius.

#### Análisis multivariado

Se generaron matrices de correlación de Pearson ( $r$ ) para evaluar las relaciones entre las variables. Se formularon las siguientes hipótesis estadísticas para comprobar las correlaciones estadísticamente significativas al 95% de nivel de confianza ( $P < 0.05$ ):

$H_0$ : no existe correlación entre las variables palinológicas y los índices climáticos ( $P = 0$ );

$H_1$ : existe correlación entre las variables palinológicas y los índices climáticos ( $P \neq 0$ ).

Multivariate analysis

Pearson correlation ( $r$ ) matrices were computed to evaluate relationships between variables. The following statistical hypotheses were formulated to prove statistically significant correlations at a confidence level of 95% ( $P < 0.05$ ):

$H_0$ : palynological variables are not correlated with climate indices ( $P = 0$ );

$H_1$ : palynological variables are correlated with climate indices ( $P \neq 0$ ).

According to the results obtained from the correlations, and to determine if correlation values were high or low and significant, a limit for  $r$  higher than  $\pm 0.50$  was established to indicate high correlations and a value of  $P < 0.05$  was established to indicate statistical significance. A canonical correlation analysis was performed considering the low correlations ( $r < 0.50$ ) between SSTI and palynological variables (Table 2).

Canonical correlation analysis can determine the linear relationship between a group of dependent variables and a group of independent variables, which are grouped into a predicted value to produce the maximum correlation coefficient between the 2 sets of variables (Davis 2002, StatSoft 2013). This test was done to determine the canonical correlation between the palynological data (dependent variables) and the SSTI and ENSO (independent variables).

RESULTS

Palynological analysis indicated the presence of 9 dinoflagellate genera, of which 6 belonged to the order Peridiniales, with 12 species, and 3 belonged to the order Gonyaulacales, with 4 species (Fig. 3). Basic statistics of palynological data (Table 2) revealed that in the 19th century the average of total concentrations of heterotrophic dinoflagellates was

De acuerdo con los resultados obtenidos de las correlaciones, y con el propósito de determinar si los valores de correlación fueron altos o bajos y significativos, se estableció un límite de  $r$  mayor que  $\pm 0.50$  como indicador de alta correlación y un valor de  $P < 0.05$  como indicador de significancia estadística. Considerando las bajas correlaciones ( $r < 0.50$ ) entre el ITSM y las variables palinológicas (Tabla 2), se procedió a realizar el análisis de correlación canónica.

El análisis de correlación canónica permite determinar la relación lineal que existe entre un grupo de variables dependientes y un grupo de variables independientes, las cuales se combinan hacia un valor predicho para producir el máximo coeficiente de correlación entre ambos conjuntos de variables (Davis 2002, StatSoft 2013). Esta prueba se realizó para determinar la correlación canónica de los datos palinológicos (variables dependientes) con el ITSM y ENOS (variables independientes).

RESULTADOS

El análisis palinológico evidenció la presencia de 9 géneros de dinoflagelados, de los cuales 6 pertenecieron al orden Peridiniales, con 12 especies, y 3 al orden Gonyaulacales, con 4 especies (Fig. 3). La estadística básica de los datos palinológicos (Tabla 2) reveló que en el siglo XIX el promedio de las concentraciones totales de dinoflagelados heterótrofos fue de 138 qst/g sed y el promedio de las concentraciones de dinoflagelados autótrofos fue de 49 qst/g sed.

Abundancia absoluta

Las concentraciones de palinomorfos marinos (quistes de dinoflagelados y huevos de copépodos) fluctuaron entre 204

**Table 2.** Statistical values for palynomorph concentrations per gram of sediment (pal/g sed) in the analyzed samples taken from core MAGD09-01MC3. The values for the 1907–2009 interval were taken from Castañeda-Quezada (2016). Concentrations are indicated in 4 different time intervals. The correlations ( $r$ ) between concentrations of copepods and heterotrophic and autotrophic dinoflagellates, and the sea surface temperature index (SSTI) is shown with their respective significance values ( $P$ ). The significant correlation is indicated in bold.

**Tabla 2.** Valores estadísticos para las concentraciones de palinomorfos por gramo de sedimento (pal/g sed) en las muestras analizadas del núcleo MAGD09-01MC3. Los valores para el intervalo 1907–2009 fueron tomados de Castañeda-Quezada (2016). Se indican las concentraciones en 4 intervalos de tiempo diferentes. La correlación ( $r$ ) entre las concentraciones de copépodos y dinoflagelados heterótrofos y autótrofos, y el índice de temperatura superficial del mar (SSTI) se muestra con su significancia respectiva ( $P$ ). La correlación significativa está indicada en negrillas.

Variable	Concentration (pal/g sed)				Average concentration per time interval				SSTI	
	Mean	Min	Max	$\sigma$	1811–1907	1811–1879	1881–1907	1907–2009	$r$	$P$
Copepods	2,407	181	12,788	2,708	2,407	1,228	5,500	868	<b>0.46</b>	0.001
Heterotrophs	138	4	1,053	152	138	108	211	824	0.11	0.450
Autotrophs	49	0	363	66	49	56	31	19	-0.30	0.038
Total dinoflagellates	187	23	1,053	169						
Total palynomorphs	2,635	204	13,200	2,733						



138 cys/g sed and the average of autotrophic dinoflagellates was 49 cys/g sed.

### Absolute abundance

The concentrations of marine palynomorphs (dinoflagellate cysts and copepod eggs) fluctuated between 204 and 3,904 pal/g sed in the 1811–1907 CE time frame. An increase of 5,485 pal/g sed was detected in 1889 CE, and the highest concentrations were observed in 1901 CE (13,200 pal/g sed) and in 1905 CE (10,569 pal/g sed). Palynomorph concentrations significantly correlated ( $r = 0.45$ ,  $P = 0.001$ ) with SSTI values (Table 2), which concurs with the general increase in marine palynomorphs and SSTI in the 19th century. This correlation contrasts the temperature declines in 1837, 1857, and 1881 CE, when marine palynomorph concentrations increased. Conversely, when SSTI increased in 1853 and 1879 CE, marine palynomorph concentrations decreased (Fig. 4).

Dinoflagellate assemblages were divided by trophic strategies into heterotrophs and autotrophs. Heterotrophs were found in all samples and were the most important component in total dinoflagellate concentrations. Heterotroph concentrations varied from 17 to 308 cys/g sed in all samples. Heterotroph concentrations decreased during years with positive SSTI anomalies; however, these decreases were less marked than in 1867 CE. Heterotroph concentrations were generally high in the years with negative anomalies (e.g., 1837 CE) (Fig. 4). The correlation between heterotrophs and SSTI was not significant because it showed a value of  $r = 0.11$  ( $P = 0.45$ ) (Table 2).

In general, the concentrations of autotrophic dinoflagellates oscillated between 12 and 206 cys/g sed. No autotrophs were found for the years 1813, 1823–1827, 1885–1887, 1891, 1895, and 1905–1907 CE. Concentrations did not increase during years with positive SSTI, except in 1901 CE (Fig. 4). The correlation between autotrophic dinoflagellates and SSTI was significant and negative, with a value of  $r = -0.30$  ( $P = 0.038$ ) (Table 2).

Copepod concentrations were observed within a range of 202–5,960 cop/g sed, which coincided with negative SSTI values. Concentrations increased in 1899 CE (10,722 cop/g sed) and 1905 CE (10,521 cop/g sed), and these increases coincided with positive values of SSTI. Maximum concentrations occurred in 1901 CE with 12,787 cop/g sed (Fig. 4). The correlation with SSTI was significant and positive ( $r = 0.46$ ,  $P = 0.001$ ) (Table 2).

### El Niño Southern Oscillation and the Pacific Decadal Oscillation

The intervals in which the polarities of ENSO and PDO values coincided are highlighted in Figure 4, that is, the cold zone of La Niña with the PDO– and the warm zone of El Niño with the PDO+. Taxa concentrations increased during 1881–1883 and in 1905 CE (La Niña, ODP–), whereas taxa

y 3,904 pal/g sed en el periodo de 1811 a 1907 EC. Se detectó un aumento de 5,485 pal/g sed en 1889 EC, y las concentraciones más altas se presentaron en 1901 EC (13,200 pal/g sed) y en 1905 EC (10,569 pal/g sed). Se presentó una correlación significativa ( $r = 0.45$ ,  $P = 0.001$ ) de las concentraciones de palinomorfos con los valores del ITSM (Tabla 2), lo cual concuerda con el aumento general de palinomorfos marinos y el ITSM durante el siglo XIX. Esta correlación contrasta con las disminuciones de temperatura en los años 1837, 1857 y 1881 EC, cuando aumentaron las concentraciones de palinomorfos marinos. Por el contrario, al aumentar el ITSM en 1853 y 1879 EC, disminuyeron las concentraciones de palinomorfos marinos (Fig. 4).

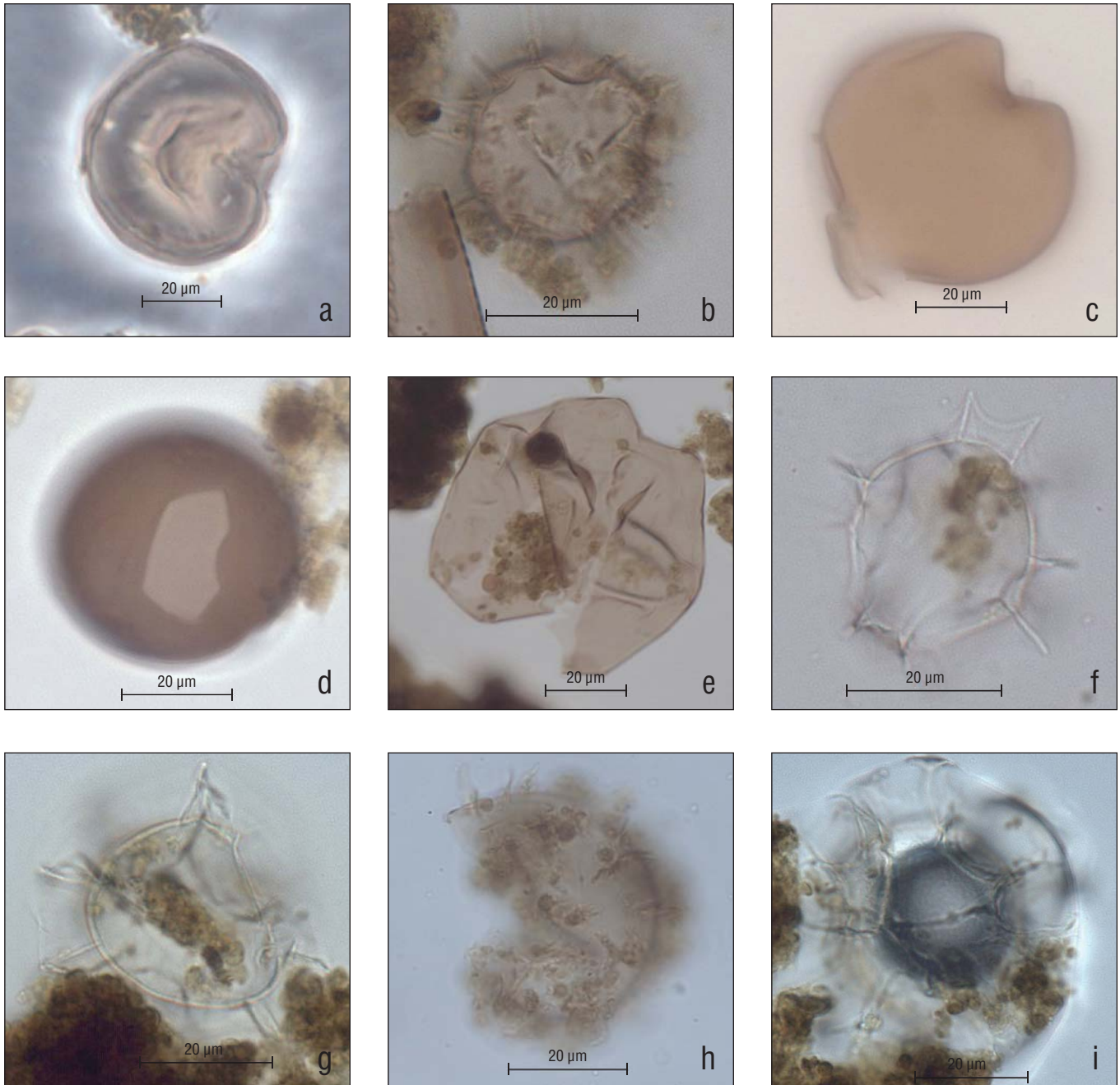
Los conjuntos de dinoflagelados se dividieron por estrategia trófica en heterótrofos y autótrofos. Los heterótrofos se encontraron en todas las muestras y representaron el componente más importante en las concentraciones de dinoflagelados totales. Las concentraciones de heterótrofos variaron de 17 a 308 qst/g sed en todas las muestras. En los años con anomalías positivas del ITSM, disminuyeron las concentraciones de heterótrofos; sin embargo, las disminuciones no fueron tan marcadas como en 1867 EC. Para los años con anomalías negativas (e.g., 1837 EC), normalmente se encontraron altas concentraciones de heterótrofos (Fig. 4). La correlación de heterótrofos con el ITSM no fue significativa, debido a que presentó un valor de  $r = 0.11$  ( $P = 0.45$ ) (Tabla 2).

En general, las concentraciones de dinoflagelados autótrofos oscilaron entre 12 y 206 qst/g sed. No se encontraron autótrofos en los años 1813, 1823–1827, 1885–1887, 1891, 1895 y 1905–1907 EC. En los años con ITSM positivos, no se observó un incremento en las concentraciones, a excepción del año 1901 EC (Fig. 4). La correlación de los dinoflagelados autótrofos con el ITSM fue significativa e inversa, con un valor de  $r = -0.30$  ( $P = 0.038$ ) (Tabla 2).

Las concentraciones de copépodos estuvieron dentro de un intervalo de 202 a 5,960 cop/g sed, el cual coincidió con valores del ITSM negativos. Se evidenciaron aumentos en 1899 EC (10,722 cop/g sed) y 1905 EC (10,521 cop/g sed), los cuales coincidieron con valores del ITSM positivos. La concentración máxima ocurrió en 1901 EC con 12,787 cop/g sed (Fig. 4). La correlación con el ITSM fue significativa y directa ( $r = 0.46$ ,  $P = 0.001$ ) (Tabla 2).

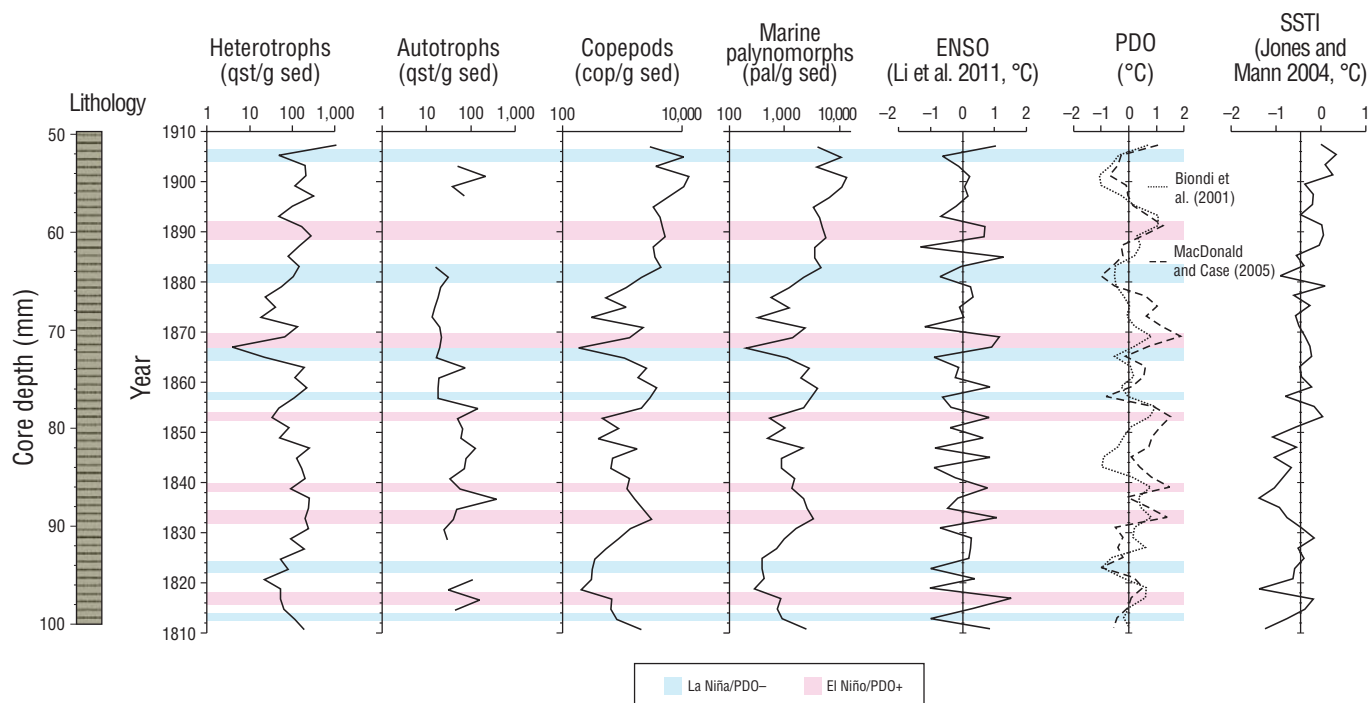
### El Niño Oscilación del Sur y la Oscilación Decenal del Pacífico

En la Figura 4 se resaltan aquellos intervalos donde coincidieron las polaridades de los valores de ENOS y la ODP, es decir, la zona fría de La Niña con la zona de la ODP–, y la zona cálida de El Niño con la zona de la ODP+. En los años 1881–1883 y 1905 EC (La Niña, ODP–) hubo un aumento en las concentraciones de taxones, mientras que en los años 1817, 1853 y 1867 EC (El Niño, ODP+) hubo una disminución en las concentraciones de taxones.



**Figure 3.** Photomicrographs of the most representative dinoflagellate species in the Magdalena Basin, Baja California Sur (Mexico). (a) *Selenopemphix nephroides*, lamina 59-60a, M26, high focus; (b) *Echinidinium granulatum*, lamina 60-61a, X33-1, high focus; (c) *Quinquecuspis concreta*, lamina 67-68a, F5-4, high focus; (d) *Brigantedinium cariacense*, lamina 64-65a, U23-1, high focus; (e) *Votadinium calvum*, lamina 58-59a, X13, high focus; (f) *Impagidinium aculeatum*, lamina 65-66a, Z22-1, medium focus; (g) *Impagidinium striatum*, lamina 88-89a, H58-3, medium focus; (h) *Operculodinium israelianum*, lamina 58-59a, W7-3, high focus; (i) *Spiniferites* sp., lamina 97-98a, C31, medium focus.

**Figura 3.** Fotomicrografías de las especies de dinoflagelados más representativos en la cuenca Magdalena, Baja California Sur (México). (a) *Selenopemphix nephroides*, lámina 59-60a, M26, foco alto; (b) *Echinidinium granulatum*, lámina 60-61a, X33-1, foco alto; (c) *Quinquecuspis concreta*, lámina 67-68a, F5-4, foco alto; (d) *Brigantedinium cariacense*, lámina 64-65a, U23-1, foco alto; (e) *Votadinium calvum*, lámina 58-59a, X13, foco alto; (f) *Impagidinium aculeatum*, lámina 65-66a, Z22-1, foco medio; (g) *Impagidinium striatum*, lámina 88-89a, H58-3, foco medio; (h) *Operculodinium israelianum*, lámina 58-59a, W7-3, foco alto; (i) *Spiniferites* sp., lámina 97-98a, C31, foco medio.



**Figure 4.** Comparison of concentrations of heterotrophic and autotrophic dinoflagellates (cys/g sed), copepods (cop/g sed), and total marine palynomorphs (pal /g sed) with the El Niño Southern Oscillation (ENSO) index reported by Li et al. (2011), the Pacific Decadal Oscillation Index (PDO) reported by Biondi et al. (2001) and MacDonald and Case (2005), and the sea surface temperature index (SSTI) reported by Jones and Mann (2004) in the period from 1811 to 1907 in Magdalena Basin, Baja California Sur (Mexico). The scale of the first 4 graphs is expressed as  $\log_{10}$ . The intervals where La Niña events overlapped the ODP-, and El Niño events overlapped the PDO+ are indicated with blue and pink shadings, respectively.

**Figura 4.** Comparación de las concentraciones de dinoflagelados heterótrofos y autótrofos (qst/g sed), copépodos (cop/g sed) y palinomorfos marinos totales (pal/g sed) con el índice de El Niño Oscilación del Sur (ENSO) reportado por Li et al. (2011), el índice de la Oscilación Decenal del Pacífico (PDO) reportado por Biondi et al. (2001) y MacDonald y Case (2005), y el índice de temperatura superficial del mar (SSTI) reportado por Jones y Mann (2004) en el periodo de 1811 a 1907 en cuenca Magdalena, Baja California Sur (México). La escala de las primeras 4 gráficas está expresada en  $\log_{10}$ . Los intervalos donde coincidieron los eventos de La Niña con la ODP-, y El Niño con la ODP+ están señalados con azul y rosa, respectivamente.

concentrations decreased in 1817, 1853, and 1867 CE (El Niño, OPD+).

### Multivariate analysis

The correlation coefficient ( $r_i$ ) obtained with the canonical correlation analysis was statistically significant. A linear combination ( $r$ ) of climate variables and palynological variables was inferred from these results, with a value of  $r_i = 0.67$  and  $P = 0.02$ . The canonical variate with  $r = 67\%$  showed that copepods, the single heterotrophic dinoflagellate species, and the 2 autotrophic dinoflagellate species correlated significantly with the SSTI and ENSO.

## DISCUSSION

### Primary productivity and sea surface temperature

In this study, copepods were identified only at the order level and were used as proxies for primary productivity

### Análisis multivariado

El análisis de correlación canónica arrojó un coeficiente de correlación ( $r_i$ ) estadísticamente significativo. Estos resultados permitieron inferir una combinación lineal ( $r$ ) entre las variables climáticas y las variables palinológicas con un valor de  $r_i = 0.67$  y  $P = 0.02$ . La variante canónica con una  $r = 67\%$  mostró que los copépodos, la especie de dinoflagelado heterótrofa y las 2 especies de dinoflagelados autótrofos presentaron correlaciones significativas con las variables climáticas ITSM y ENOS.

## DISCUSIÓN

### Productividad primaria y temperatura superficial del mar

En este estudio, los copépodos fueron identificados solo a nivel de orden, y fueron utilizados como indicadores indirectos de productividad primaria, al estar relacionados con el fitoplancton. Durante el siglo XIX, las concentraciones

because they are associated with phytoplankton. During the 19th century copepod concentrations were high in the Magdalena Basin, whereas dinoflagellate concentrations were low (Table 2). SSTI tended to be cooler during the 19th century, particularly from 1811 to 1879 CE, although it gradually increased during the period from 1881 to 1907 CE. Palynomorph concentrations mirrored climatic variability, since copepods and heterotrophic dinoflagellates decreased during 1811–1879 CE and increased during 1881–1907 CE. By contrast, the concentrations of autotrophic dinoflagellates increased during 1811–1879 CE and decreased during 1881–1907 CE. Cold conditions during the 19th century explain the absence of subtropical or tropical autotrophic species in the samples analyzed in the present study. Dinoflagellates that are typically tropical, such as *Stelladinium stellatum* (heterotroph), *Bitectatodinium spongium* (autotroph), or *Polysphaeridium zoharyi* (autotroph, *Pyrodinium bahamense* cyst), which were observed in this basin during 1907–2009 CE (Castañeda-Quezada 2016), were not observed during the present study.

Regarding productivity, high dinoflagellate productivity was to be expected because SSTI anomalies were predominantly negative from 1800 to 1900 CE. Nevertheless, productivity showed a strong increasing trend over the century as SST increased. This high productivity was directly correlated with heterotrophic dinoflagellates and copepods, and inversely correlated with autotrophic dinoflagellates.

The low productivity in the region in the 19th century has also been detected as low percentage values of biogenic opal (Juárez et al. 2014). This decline in diatom productivity implies that upwelling weakened and/or nutrient input decreased (Barron et al. 2013, Bringué et al. 2014, Juárez et al. 2014). The dominance of planktonic groups in the north-eastern Pacific has been shown to alternate between calcareous and opaline forms, the latter being dominant during upwelling periods, when carbonate production is low (Juárez et al. 2015). Contrary to the apparent association between cold waters and high productivity, the changes in productivity observed here indicate that copepods and heterotrophic dinoflagellates proliferated during warm periods, when coastal winds intensified and coastal upwelling, as a result, increased (Rivas et al. 2016). Global warming can intensify coastal upwelling as land surface temperatures increase more than sea surface temperatures, strengthening the land–sea thermal contrast that modulates winds along the coast (Bakun 1990).

The higher productivity in the Magdalena Basin during the warm periods could be associated with the strengthening of oceanographic events on the southwestern coast of the Baja California Peninsula and to the concurrent effect on coastal upwelling, due to the influence of the North Equatorial Current, which mitigates seasonal changes in the coastal zone. This increasing strength coincides with the increase in the coastal upwelling index that was detected at 24°N and 113°W during 1900–2009 by the the National Oceanic and

de copépodos en la cuenca Magdalena fueron altas, mientras que las de dinoflagelados fueron bajas (Tabla 2). El ITSM durante el siglo XIX tendió a ser más frío, en particular de 1811 a 1879 EC, aunque se observó un aumento gradual en el periodo de 1881 a 1907 EC. Las concentraciones de los palinomorfos reflejan la variabilidad climática, ya que los copépodos y dinoflagelados heterótrofos disminuyeron de 1811 a 1879 EC y aumentaron de 1881 a 1907 EC. En cambio, las concentraciones de dinoflagelados autótrofos aumentaron de 1811 a 1879 EC y disminuyeron de 1881 a 1907 EC. Las condiciones frías del siglo XIX justifican la ausencia de especies autótrofas subtropicales o tropicales en las muestras estudiadas en el presente trabajo. No se observaron dinoflagelados típicamente tropicales como *Stelladinium stellatum* (heterótrofo), *Bitectatodinium spongium* (autótrofo) o *Polysphaeridium zoharyi* (autótrofo, quiste de *Pyrodinium bahamense*), los cuales fueron observados en esta cuenca de 1907 a 2009 EC (Castañeda-Quezada 2016).

Con respecto a la productividad, considerando que de 1800 a 1900 EC las anomalías en el ITSM fueron predominantemente negativas, era de esperarse una mayor productividad de dinoflagelados. No obstante, se observó una fuerte tendencia centenaria hacia el aumento de la productividad con el aumento de la TSM. Esta mayor productividad estuvo relacionada directamente con los dinoflagelados heterótrofos y los copépodos, e inversamente con los dinoflagelados autótrofos.

La baja productividad del siglo XIX en la región también ha sido detectada como valores bajos en el porcentaje de ópalo biogénico (Juárez et al. 2014). Esta disminución en la productividad de diatomeas implica un debilitamiento de las surgencias y/o una disminución en el suministro de nutrientes (Barron et al. 2013, Bringué et al. 2014, Juárez et al. 2014). Se ha demostrado que en el Pacífico nororiental ocurre una alternancia en la dominancia del plancton, del calcáreo al opalino, y este último es dominante en periodos de surgencia, cuando la producción de carbonatos es baja (Juárez et al. 2015). Opuestamente a la aparente relación entre las aguas frías y la alta productividad, estos cambios en la productividad indican que los copépodos y los dinoflagelados heterótrofos proliferaban durante intervalos cálidos, cuando se intensificaban los vientos costeros y, con ello, las surgencias costeras (Rivas et al. 2016). El calentamiento global puede intensificar las surgencias costeras al calentar la superficie continental más que la oceánica, lo cual incrementa el contraste térmico tierra-mar que modula los vientos a lo largo de la costa (Bakun 1990).

La mayor productividad en la cuenca Magdalena en los periodos cálidos puede estar relacionada a un incremento en la fuerza de los eventos oceanográficos en la costa suroccidental de la península de Baja California, y a sus efectos en las surgencias costeras, debido a la influencia de la corriente Norecuatorial, que atenúa los cambios estacionales en la zona costera. Este incremento coincide con el incremento en el índice de surgencias costeras que fue detectado a 24°N y 113°W

Atmospheric Administration Pacific Fisheries Environmental Laboratories (NOAA 2016). It also coincides with current global warming and with the higher productivity in the 2002–2014 CE period recorded for the region (Ortiz-Ahumada 2015).

Heterotrophic species such as those in the genus *Brigantedinium* are indicative of the continuous influence of coastal upwelling, and the presence of *Echinidinium* spp. is a strong sign of warmer winter SSTs and increasing primary productivity (Pospelova et al. 2015). Autotrophs, by contrast, proliferated during periods with less intense upwelling events, when stratification increased and competition with diatoms was more favorable.

The comparison of dinoflagellate concentrations in the Magdalena Basin between the 19th and 20th centuries (Table 2) shows changes in primary productivity, with a significant increase in productivity toward the 20th century. The average of total heterotrophic dinoflagellate concentrations was 824 cys/g sed in the 20th century, whereas the average of autotrophic dinoflagellates was 19 cys/g sed (Castañeda-Quezada 2016). This indicates that dinoflagellates behaved similarly for the past 2 centuries in relation to climate indices and current warming.

The correlation between dinoflagellate abundance and SSTI was low, probably because temperature effects are not linear given the influence of stratification (Bringué et al. 2014). Other influencing factors could have been the lack of correlation of the subsampling, the uncertainties of the chronological extrapolation, and the lack of a SST time series from a region closer to the study area.

### Primary productivity, El Niño Southern Oscillation, and the Pacific Decadal Oscillation

No significant correlation was observed when palynomorph concentrations during 1811–1907 CE in the Magdalena Basin were compared with the ENSO and PDO indices. However, changes in some taxa concentrations are associated with interactions between these climatic forcings. In 1881–1883 and 1905 CE, variations in concentrations of copepods and heterotrophic dinoflagellates highlighted the signal of cold cycles (La Niña and PDO–). By contrast, changes in concentrations of the autotrophic genus *Impagidinium* coincided with the signal of warm cycles (El Niño and PDO+) in 1817, 1853, and 1867 CE. This discrepancy could have been caused by (i) uncertainties in the chronological extrapolation, (ii) geographic location of dendrochronology sampling sites, and (iii) a weaker signal of both reconstructions throughout the 19th century and the beginning of the 20th century (Bringué et al. 2014). In other words, no intense events were observed and the Magdalena Basin is, too, a transition zone of subarctic and subtropical waters.

These observations support the paradigm that most heterotrophic planktonic organisms considerably depend on diatom

en el periodo de 1990 a 2009 por el Laboratorio Ambiental de Pesca del Pacífico de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los EUA (NOAA 2016). Este incremento, a su vez, concuerda con el calentamiento global actual y coincide con la mayor productividad registrada para la región en el periodo de 2002 a 2014 EC (Ortiz-Ahumada 2015).

Las especies heterotróficas como las del género *Brigantedinium* son indicativas de la influencia continua de surgencias costeras, y la presencia de *Echinidinium* spp. es un fuerte indicio de TSM más cálidas de invierno y del aumento en la productividad primaria (Pospelova et al. 2015). Por el contrario, los autótrofos proliferaban en periodos de surgencias menos intensas, cuando aumentaba la estratificación y podían competir favorablemente con las diatomeas.

La comparación de las concentraciones de dinoflagelados en la cuenca Magdalena en los siglos XIX y XX (Tabla 2) muestra los cambios en la productividad primaria, con un aumento significativo en la productividad hacia el siglo XX. En el siglo XX, el promedio de las concentraciones totales de dinoflagelados heterótrofos fue de 824 qst/g sed; en cambio, el promedio de dinoflagelados autótrofos fue de 19 qst/g sed (Castañeda-Quezada 2016). Lo anterior indica que los dinoflagelados tuvieron un comportamiento similar en los últimos 2 siglos en relación con los índices climáticos y el calentamiento actual.

La correlación de las abundancias de dinoflagelados con el ITSM fue baja, probablemente porque los efectos de la temperatura no son lineales dada la influencia de la estratificación (Bringué et al. 2014). También pudieron haber influido la falta de correlación del submuestreo, las incertidumbres de la extrapolación cronológica y la falta de una serie de datos de TSM de una región más cercana al área de estudio.

### Productividad primaria, El Niño Oscilación del Sur y la Oscilación Decadal del Pacífico

No se observó una correlación significativa cuando se compararon las concentraciones de palinóforos marinos durante el intervalo de 1811 a 1907 EC en la cuenca Magdalena con los índices del ENOS y la ODP. Sin embargo, los cambios en las concentraciones de algunos taxones están asociados a la interacción de estos forzamientos climáticos. En los años 1881–1883 y 1905 EC, las variaciones de copépodos y dinoflagelados heterótrofos resaltaron la señal de los ciclos fríos (La Niña y ODP–). Por el contrario, los cambios en las concentraciones del género autotrófico *Impagidinium* coincidieron con la señal de los ciclos cálidos (El Niño y ODP+) en los años 1817, 1853 y 1867 EC. Esta discrepancia pudo ser causada por (i) la incertidumbre de la extrapolación cronológica, (ii) la ubicación geográfica de los sitios donde se realizó la dendrocronología y (iii) una señal más débil de ambas reconstrucciones a lo largo del siglo XIX y principios del siglo XX (Bringué et al. 2014). Es decir, no se presentaron eventos tan intensos y, además, la cuenca

populations and respond to diatom blooms under turbulence conditions (ODP-) (Bringué et al. 2014). On the other hand, autotrophs tend to be more abundant during periods of moderate stratification (ODP+), but their concentrations decrease when the thermocline deeply shoals during strong El Niño events (Flores-Trujillo 2009).

In general, the richness and concentrations of dinoflagellates ( $\bar{x} = 187$  cys/g sed) and copepods ( $\bar{x} = 2,407$  cop/g sed) were low, a finding that was in agreement with the low productivity observed in this basin and the predominant negative SSTI anomalies during the 19th century. Autotrophs were less abundant but showed statistically significant inverse correlations ( $r = -0.30$ ,  $P = 0.038$ ) with SSTI. The consistent presence and abundance of heterotrophs indicate these individuals can be used as indicators of high productivity conditions when making paleoenvironmental reconstructions.

#### ACKNOWLEDGMENTS

This study was supported by the National Council for Science and Technology (grant no. 613463, Mexico) and the Earth Science Division graduate program at CICESE. We thank Edna Collins (Geology Department, CICESE) for her participation in the processing of palynological samples, and Libia Hascibe Pérez-Bernal (Institute of Marine Sciences and Limnology, UNAM) for her assistance in core dating. We also thank 2 anonymous reviewers for their suggestions and comments, which helped improve this work.

English translation by Claudia Michel-Villalobos.

#### REFERENCES

- Aguirre E. 1989. Nuevas tendencias: Paleontología. Madrid (Spain): Editorial CSIC-CSIC Press; 446 pp.
- Bakun A. 1990. Global climate change and intensification of coastal ocean upwelling. *Science* 247(4939): 198–201. <https://doi.org/10.1126/science.247.4939.198>
- Barron JA, Bukry D, Field DB, Finney B. 2013. Response of diatoms and silicoflagellates to climate change and warming in the California Current during the past 250 years and the recent rise of the toxic diatom *Pseudo-nitzschia australis*. *Quaternary International* 310: 140–154. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.07.002>
- Benninghoff WS. 1962. Calculation of pollen and spore density in sediments by addition of exotic pollen in known quantities. *Pollen Spores* 4: 332.
- Biondi F, Gershunov A, Cayan DR. 2001. North Pacific decadal climate variability since 1661. *Journal of Climate* 14(1): 5–10. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<0005:NPDCVS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<0005:NPDCVS>2.0.CO;2)
- Bringué M, Pospelova V, Field DB. 2014. High resolution sedimentary record of dinoflagellate cysts reflects decadal variability and 20th century warming in the Santa Barbara Basin. *Quat. Sci. Rev.* 105: 86–101. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.09.022>
- Magdalena es una zona de transición de aguas subárticas y subtropicales.
- Estas observaciones apoyan el paradigma de que la mayoría de los organismos planctónicos heterotróficos dependen considerablemente de las poblaciones de diatomeas y responden siguiendo los florecimientos de estas algas en condiciones de turbulencia (ODP-) (Bringué et al. 2014). En cambio, los autótrofos tienden a ser más abundantes durante periodos de estratificación moderada (ODP+), pero disminuyen su concentración cuando la termoclina se profundiza demasiado durante eventos fuertes de El Niño (Flores-Trujillo 2009).
- En general, la riqueza y las concentraciones de dinoflagelados ( $\bar{x} = 187$  qst/g sed) y de copépodos ( $\bar{x} = 2,407$  cop/g sed) fueron bajas, lo cual se correspondió con la baja productividad en esta cuenca y coincidió con las anomalías mayormente negativas del ITSM durante el siglo XIX. Los autótrofos fueron menos abundantes, pero mostraron correlaciones estadísticamente significativas e inversas ( $r = -0.30$ ,  $P = 0.038$ ) con el ITSM. La constancia y la abundancia de los heterótrofos los señala como indicadores de condiciones de alta productividad que pueden ser empleados en reconstrucciones paleoambientales.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue apoyado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (beca no. 613463, México) y por el Posgrado de la División de Ciencias de la Tierra del CICESE. Agradecemos a Edna Collins (Departamento de Geología, CICESE) su participación en el procesamiento palinológico de las muestras, y a Libia Hascibe Pérez-Bernal (Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM) la datación del testigo. También agradecemos las sugerencias y comentarios de 2 árbitros anónimos, quienes ayudaron a mejorar este trabajo.

- Bütschli O. 1885. Erster Band. Protozoa. In: Bronn HG (ed.), Die Klassen und Ordnungen des Thier-Reichs, wissenschaftlich dargestellt in Wort und Bild. Leipzig und Heidelberg: CF Winter'sche Verlagshandlung; pp. 865–1088.
- Castañeda-Quezada JR. 2016. 100 años de dinoflagelados y cambios paleoceanográficos en Cuenca Magdalena, Baja California Sur [MSc thesis]. [Ensenada (Baja California, México)]: Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada; 77 pp.
- Davis JC. 2002. Statistics and data analysis in geology. New York: John Willey & Sons; 656 pp.
- Emery KO, Hülsemann J. 1961. The relationships of sediments, life and water in a marine basin. *Deep-Sea Res.* 8(3–4): 165–180. [https://doi.org/10.1016/0146-6313\(61\)90019-3](https://doi.org/10.1016/0146-6313(61)90019-3)
- Esparza-Álvarez MA. 1999. Variabilidad de la comunidad de diatomeas en los sedimentos de la Cuenca de San Lázaro, Baja California Sur, México [MSc thesis]. [Ensenada, (Baja California, Mexico)]: Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada; 163 pp.

- Espinosa-Carreón TL, Strub PT, Beier E, Ocampo-Torres F, Gaxiola-Castro G. 2004. Seasonal and interannual variability of satellite-derived chlorophyll pigment, surface height, and temperature off Baja California. *J. Geophys. Res.*: Oceans 109(C3).  
<https://doi.org/10.1029/2003JC002105>
- Espinosa-Carreón TL, Valdez-Holguín E. 2007. Variabilidad interanual de clorofila en el Golfo de California. *Ecología Aplicada*. 6(1–2): 83–92.  
<https://doi.org/10.21704/rea.v6i1-2.344>
- Evitt WR. 1985. Sporopollenin Dinoflagellate Cysts: Their Morphology and Interpretation. Dallas (TX): American Association of Stratigraphic Palynologists Foundation; 333 pp.
- Fensome RA, Taylor F, Norris G, Sarjeant W, Wharton D, Williams G. 1993. A Classification of Living and Fossil Dinoflagellates. *Micropaleontology Special Publication*, 7. Baden-Württemberg (Germany): American Museum of Natural History 351 pp.
- Fernández-de-Puelles ML. 2015. Clase Maxillipoda, subclase Copepoda, orden Calanoida. *Revista IDE@-SEA* 89: 1–27.
- Flores-Trujillo JG. 2009. Registro palinológico en sedimentos laminados de la parte sur del Golfo de California y su relación con cambios paleoceanográficos y paleoclimáticos [dissertation]. [Ensenada (Baja California, Mexico)]: Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada; pp. 120.
- Gómez F. 2005. A list of free-living dinoflagellate species in the world's oceans. *Acta Bot. Croat.* 64(1): 129–212.
- Hartnett HE, Keil RG, Hedges JI, Devol AH. 1998. Influence of oxygen exposure time on organic carbon preservation in continental margin sediments. *Nature* 391(6667): 572–575.  
<https://doi.org/10.1038/35351>
- Jiménez-Pérez L, Lara-Lara J. 1988. Zooplankton biomass and copepod community structure in the Gulf of California during the 1982–1983 El Niño event. *CalCOFI Rep.* 29: 122–128.
- Jones PD, Mann ME. 2004. Climate over past millennia. *Rev. Geophys.* 42(2).  
<https://doi.org/10.1029/2003RG000143>
- Juárez M, Sánchez A, González-Yajimovich O. 2014. Variability of marine biological productivity in the northeastern Pacific over the past millennium = Variabilidad de la productividad biológica marina en el Pacífico nororiental durante el último milenio. *Cienc. Mar.* 40(4): 211–220.  
<http://dx.doi.org/10.7773/cm.v40i4.2477>
- Juárez M, Sánchez A, González-Yajimovich O, Cota-Meza MS, Ricaurte-Villota C. 2015. Diatom dominated marine primary productivity in the Mexican Northeastern Pacific during the last millennium = Productividad primaria marina dominada por diatomeas en el Pacífico nororiental mexicano durante el último milenio. *Hidrobiológica* 25(3): 375–381.
- Lara-Lara JR, Bazán-Guzmán C. 2005. Distribution of chlorophyll and primary production by size classes along the Mexican Pacific coast = Distribución de clorofila y producción primaria por clases de tamaño en la costa del Pacífico mexicano. *Cienc. Mar.* 31(1A): 11–21.  
<https://doi.org/10.7773/cm.v31i1.82>
- Lavaniegos BE. 2014. Crustáceos planctónicos como indicadores de variabilidad climática y corrientes marinas. In: González Zuarth CA, Vallarino A, Pérez-Jiménez JC, Low-Pfeng AM (eds.), *Bioindicadores: Guardianes de nuestro futuro ambiental*. Mexico: El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC); p. 147–170.
- Li J, Xie SP, Cook ER, Huang G, D'Arrigo R, Liu F, Ma J, Zheng XT. 2011. Interdecadal modulation of El Niño amplitude during the past millennium. *Nat. Clim. Change* 1(2): 114–118.  
<https://doi.org/10.1038/nclimate1086>
- MacDonald GM, Case RA. 2005. Variations in the Pacific Decadal Oscillation over the past millennium. *Geophys. Res. Lett.* 32(8).  
<https://doi.org/10.1029/2005GL022478>
- Mantua NJ, Hare SR, Zhang Y, Wallace JM, Francis RC. 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 78(6): 1069–1080. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<1069:APICOW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<1069:APICOW>2.0.CO;2)
- Maturana J, Bello M, Manley M. 2004. Antecedentes históricos y descripción del fenómeno El Niño, Oscilación del Sur = History and description of “El Niño, Southern Oscillation” phenomenon. In: Avaria SP, Carrasco JC, Rutllant JA, Yáñez ER (eds.), *El Niño-La Niña 1997-2000: Sus Efectos en Chile*. Valparaíso (Chile): Comité Oceanográfico Nacional; p. 13–27.
- Molina E. 2017. *Micropaleontología*, 93. Zaragoza (España): Prensas de la Universidad de Zaragoza; 686 pp.
- [NOAA] National Oceanic and Atmospheric Administration. 2016. Pacific Fisheries Environmental Laboratory, Coastal Upwelling Indices; [accessed 2016 February 10]. [http://www.pfel.noaa.gov/products/PFEL/modeled/indices/upwelling/NA/upwell\\_menu\\_NA.html](http://www.pfel.noaa.gov/products/PFEL/modeled/indices/upwelling/NA/upwell_menu_NA.html)
- [NOAA] National Oceanic and Atmospheric Administration. 2018. El Niño/Southern Oscillation (ENSO) Technical Discussion; [accessed 2018 April 23]. <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/enso-tech.php>
- Ortiz-Ahumada JC. 2015. Variación espacial y temporal de la biomasa y producción fitoplanctónicas frente a Cabo San Lázaro y Cabo San Lucas, BCS [MSc thesis]. [Ensenada (Baja California, Mexico)]: Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada; 40 pp.
- Peña-Manjarrez JL, Gaxiola-Castro G, Helenes-Escamilla J. 2009. Environmental factors influencing the variability of *Lingulodinium polyedrum* and *Scrippsiella trochoidea* (Dinophyceae) cyst production = Factores ambientales que influyen en la variabilidad de la producción de quistes de *Lingulodinium polyedrum* y *Scrippsiella trochoidea* (Dinophyceae). *Cienc. Mar.* 35(1): 1–14.  
<https://doi.org/10.7773/cm.v35i1.1406>
- Pospelova V, Price AM, Pedersen TF. 2015. Palynological evidence for late Quaternary climate and marine primary productivity changes along the California margin. *Paleoceanogr. Paleoclimatol.* 30(7): 877–894.  
<https://doi.org/10.1002/2014pa002728>
- Rivas D, Cruz-Rico J, Vivas-Télez I, Arellano B, Bermúdez A. 2016. Modelación numérica de interacción físico-biológica aplicada a florecimientos del fitoplancton en el Pacífico Mexicano frente a Baja California. In: García-Mendoza E, Quijano-Scheggia S, Olivos-Ortiz A, Núñez-Vázquez EJ (eds.), *Florecimientos Algales Nocivos en México*. Ensenada (Mexico): Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada; p. 93–107.
- Rochon A, Vernal AD, Turon JL, Matthießen J, Head M. 1999. Distribution of recent dinoflagellate cysts in surface sediments from the North Atlantic Ocean and adjacent seas in relation to sea-surface parameters. *Am. Assoc. Stratigraphic Palynologists Contrib. Ser.* 35: 1–146.
- Sanchez-Cabeza JA, Ruiz-Fernández AC. 2012. <sup>210</sup>Pb sediment radiochronology: an integrated formulation and classification of dating models. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 82: 183–200.  
<https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.12.024>
- Sánchez A, Carriquiry JD. 2007. Acumulación de C<sub>org</sub>, N<sub>org</sub>, P<sub>org</sub> y BSi en la margen de Magdalena, BCS (México), durante los últimos 26 ka = Accumulation of C<sub>org</sub>, N<sub>org</sub>, P<sub>org</sub> and BSi off the

- Magdalena margin, BCS (Mexico), during the past 26 kyr. *Cienc. Mar.* 33(1): 23–35.  
<https://doi.org/10.7773/cm.v33i1.1036>
- StatSoft Inc. 2013. *Electronic Statistics Textbook*. Tulsa (OK): Statsoft; [accessed 2018 June 18]. <http://www.statsoft.com/textbook/>.
- Stover LE, Brinkhuis H, Damassa SP, De Verteuil L, Helby RJ, Monteil E, Partridge AD, Powell AJ, Riding JB, Smelror M, et al. 1996. Mesozoic-Tertiary dinoflagellates, acritarchs and prasinophytes. In: Jansonius J, McGregor DC (eds.), *Palynology: Principles and Applications*. Dallas (TX): American Association of Stratigraphic Palynologists Foundation; p. 641–750.
- Uye S, Kasahara S, Onbé T. 1979. Calanoid copepod eggs in seabottom muds. IV. Effects of some environmental factors on the hatching of resting eggs. *Mar. Biol.* 51(2): 151–156.  
<https://doi.org/10.1007/BF00555194>
- Van Geen A, Zheng Y, Bernhard JM, Cannariato KG, Carriquiry J, Dean WE, Eakins BW, Ortiz JD, Pike J. 2003. On the preservation of laminated sediments along the western margin of North America. *Paleoceanograp. Paleoclimatol.* 18(4).  
<https://doi.org/10.1029/2003pa000911>
- Vives F, Shmeleva AA. 2007. *Crustacea, Copépodos marinos I: Calanoida*. Museo Nacional de Ciencias Naturales. Madrid (Spain): Editorial CSIC; 1152 pp.
- Williams GL, Fensome RA, MacRae RA. 2017. DINOFLAJ3. American Association of Stratigraphic Palynologists, Data Series No. 2; [Canada]: [publisher unknown]; [accessed 2017 July 28]. <http://dinoflaj.smu.ca/dinoflaj3>
- Wood G, Gabriel A, Lawson J. 1996. Palynological techniques: processing and microscopy. In: Jansonius J, McGregor DC (eds.), *Palynology: principles and applications*. Dallas (TX): American Association of Stratigraphic Palynologists Foundation; pp. 29–50.
- Zonneveld KAF, Pospelova V. 2015. A determination key for modern dinoflagellate cysts. *Palynology* 39(3): 387–409.  
<http://dx.doi.org/10.1080/01916122.2014.990115>

*Received April 2019,  
accepted August 2019.*