

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Maestría en Ciencias
en Ciencias de la Tierra con orientación en Geología**

**Reconstrucción paleoceanográfica y paleoclimática basada en
quistes de dinoflagelados durante 1811 a 1907 en la Cuenca
Magdalena, Baja California Sur, México**

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Laura Cristina López Velázquez

Ensenada, Baja California, México

2018

Tesis defendida por

Laura Cristina López Velázquez

Y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Javier Helenes Escamilla

Director de Tesis

Dr. Loic Marie Jean Claude Jose Ghislain Peiffer

Dra. Ma. Elena Solana Arellano

Dra. Mary Carmen Ruiz de la Torre



Dr. Jonás de Dios de Basabe Delgado

Coordinador del Posgrado en Ciencias de la Tierra

Dra. Rufina Hernández Martínez

Directora de Estudios de Posgrado

Laura Cristina López Velázquez © 2018

Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor y director de la tesis.

Resumen de la tesis que presenta Laura Cristina López Velázquez como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ciencias de la Tierra con orientación en Geología.

Reconstrucción paleoceanográfica y paleoclimática basada en quistes de dinoflagelados durante 1811 a 1907 en la Cuenca Magdalena, Baja California Sur, México

Resumen aprobado por:

Dr. Javier Helenes Escamilla
Director de Tesis

La documentación cada 2 años de las variaciones de las concentraciones de palinomorfos marinos (dinoflagelados y copépodos) de 1811 a 1907, permitió reconstruir las condiciones oceanográficas y climáticas en la Cuenca Magdalena, Baja California Sur. Los datos generados en este trabajo provinieron del análisis de 49 muestras de sedimentos laminados del núcleo MAGD09-01MC3, extraído a 520 m de profundidad. Se establecieron cambios cualitativos y cuantitativos en la composición taxonómica de los grupos de dinoflagelados, así como abundancias de huevos de copépodos, y se compararon con registros del Índice de Temperatura Superficial del Mar (ITSM), reconstrucciones de El Niño Oscilación del Sur (ENOS) y la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP). En general, la riqueza de especies de dinoflagelados (16 especies), así como las concentraciones de dinoflagelados (\bar{x} = 186.64 qst/gr sed) y copépodos (\bar{x} = 2407.32 cop/gr sed) fueron bajas, lo que correspondió a la baja productividad de esta cuenca, y coincidió con anomalías mayormente negativas en el ITSM durante el siglo XIX. La concentración de los palinomorfos marinos se correlacionó directamente con el ITSM ($r= 0.45$, $p= 0.001$), y los valores de ambas series de tiempo aumentaron durante el siglo XIX. Los copépodos fueron los más abundantes y tuvieron una correlación significativa y directa con el ITSM ($r= 0.46$, $p= 0.001$). Entre los dinoflagelados, los heterótrofos mostraron mayor abundancia sin correlación significativa con el ITSM ($r= 0.11$, $p= 0.45$), mientras que los autótrofos fueron menos abundantes, pero sí presentaron una correlación significativa inversa con el ITSM ($r= -0.30$, $p= 0.038$). Los taxa observados con mayor frecuencia fueron copépodos y los dinoflagelados *Selenopemphix nephroides* (ITSM $r= 0.10$, $p= 0.491$) e *Impagidinium* spp. (ITSM $r= -0.33$, $p= 0.022$). Estas relaciones coincidieron con los resultados del Análisis de Correlación Canónica (ACC), los que también indicaron que las abundancias de los copépodos y los autótrofos son modulados por las variaciones del ITSM, aunque las de los autótrofos son inversas. Los palinomorfos marinos no tienen correlación significativa con los índices ENOS y ODP por separado. Sin embargo, en los años 1881-1883 y 1905, se observaron aumentos en las concentraciones, en concordancia con valores negativos de estos índices (La Niña, ODP-). Mientras que, en los años 1817, 1853 y 1867, se observó una disminución en las concentraciones, coordinada con condiciones cálidas (El Niño, ODP+).

Palabras clave: quistes, dinoflagelados, Temperatura Superficial del Mar, ENOS, ODP

Abstract of the thesis presented by Laura Cristina López Velázquez as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Earth Sciences with orientation in Geology.

Paleoceanographic and paleoclimatic reconstruction based on dinoflagellate cysts during 1811 to 1907 in the Magdalena Basin, Baja California Sur, Mexico

Abstract approved by:

Dr. Javier Helenes Escamilla
Thesis Director

The record every two years of the variations in abundance and taxonomic composition of marine palynomorphs (dinoflagellates and copepods) assemblages allow recognition of changes in oceanographic and climatic conditions in Magdalena Basin, Baja California Sur, from 1811 to 1907. Data generated in this work comes from the palynological analyses of 49 samples from laminated sediments taken from core MAGD09-01MC3, extracted at 520 m depth. We established qualitative and quantitative changes in the taxonomic composition of the dinoflagellate cysts assemblages and in the abundance of copepod eggs. These changes were compared to published records of the Sea Surface Temperature (SST) index and reconstructions of the El Niño Southern Oscillation (ENSO) and Pacific Decadal Oscillation (PDO) indexes. In general, dinoflagellate species richness was low (16 species), as well as concentrations of dinoflagellate (\bar{x} = 186.64 cysts/gr sed) and copepods (\bar{x} = 2407.32 cop/gr sed), matching with the actual low productivity in this basin, and coincided with colder SST during the XIX century. Values of marine palynomorph concentrations and SST increase from 1811 to 1907, and correlated significantly (r = 0.45, p = 0.001). Copepods were the most abundant, with a significant and direct correlation with SST (r = 0.46, p = 0.001). Among dinoflagellates, the heterotrophic ones were more abundant and do not correlated significantly with SST (r = 0.11, p = 0.45), whereas the autotrophic ones were less abundant, but have a significant, inverse correlation with SST (r = -0.30, p = 0.038). Taxa observed with more frequency were copepods and the heterotrophic *Selenopemphix nephroides* (SST r = 0.10, p = 0.491) and the autotrophic *Impagidinium* spp. (SST r = -0.33, p = 0.022). Results of a Canonical Correlation Analysis (CCA) also indicate that copepods and autotrophic dinoflagellates were modulated by variations in SST. Marine palynomorphs do not show significant correlation with either ENSO or PDO indexes when compared separately. However, abundances of all taxa increased during 1881-1883 and 1905, matching negative values of the indexes (La Niña and PDO-). Whereas during 1817, 1853 and 1867, there was a decrease in the concentrations, coincided with warmer or positive values of these indexes (El Niño and PDO+).

Keywords: cysts, dinoflagellates, Sea Surface Temperature, ENSO, PDO

Dedicatoria

A mi madre Bertha Alicia.

Agradecimientos

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)**, por la otorgación del apoyo económico mediante la beca no. 613463 para la realización del presente estudio de maestría.

Al **Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada**, Baja California (CICESE). En especial al Programa de Posgrado de la División de Ciencias de la Tierra. A los docentes, personal administrativo y técnicos.

A mi Director de tesis: **Dr. Javier Helenes Escamilla**, por las clases impartidas, por su apoyo, por colaborar activamente en mi formación y en mi trabajo.

A los integrantes del Comité de Tesis: **Dr. Loic Peiffer, Dra. Elena Solana y Dra. Mary Carmen Ruiz**, por sus aportes, por sus comentarios y sugerencias.

Al técnico del Laboratorio de Micropaleontología del Departamento de Geología, Oc. Edna Collins, por su valiosa colaboración en la elaboración de las láminas utilizadas en este trabajo.

Al M.C. José Rigel Castañeda Quezada, por su apoyo en la identificación microscópica, por su contribución con artículos y datos.

Al Dr. Juan Gabriel Flores Trujillo, por su aporte con artículos y datos, además de sus sugerencias.

A mis amigos, compañeros de maestría y del laboratorio.

Tabla de contenido

Resumen en español	iii
Resumen en inglés	iv
Dedicatoria	v
Agradecimientos	vi
Lista de figuras	ix
Lista de tablas.....	xi
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Palinomorfos marinos	2
1.1.1 Dinoflagelados.....	2
1.1.2 Copépodos.....	5
1.2 Características oceanográficas regionales	5
1.3 Antecedentes	7
1.3.1 El Niño Oscilación del Sur (ENOS).....	7
1.3.2 Oscilación Decadal del Pacífico (ODP).....	7
1.3.3 Productividad primaria.....	8
1.4 Justificación	10
1.5 Hipótesis y objetivos	10
1.5.1 Hipótesis.....	10
1.5.2 Objetivos generales.....	11
1.5.3 Objetivos específicos.....	11
Capítulo 2. Metodología.....	12
2.1 Área de estudio	12
2.2 Datación del núcleo.....	13
2.3 Procesamiento palinológico	15
2.3.1 Tratamiento químico.....	16
2.3.2 Tratamiento mecánico	16
2.3.3 Tamizado	17
2.3.4 Montaje de láminas.....	17
2.4 Análisis microscópico	17
2.5 Análisis estadístico	18

2.5.1 Abundancia absoluta.....	18
2.6 Comparación de resultados	19
2.6.1 Índices climáticos regionales.....	19
2.6.2 Análisis multivariado	20
Capítulo 3. Resultados	22
3.1 Análisis palinológico	22
3.2 Comparación de resultados y análisis estadístico.....	23
3.3 Abundancia absoluta.....	25
3.3.1 Palinomorfos marinos	25
3.3.2 Dinoflagelados.....	26
3.3.3 Dinoflagelados heterótrofos	27
3.3.4 Dinoflagelados autótrofos.....	29
3.3.5 Copépodos.....	32
3.3.6 El Niño Oscilación del Sur (ENOS) y la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP)	33
3.4 Análisis Multivariado.....	36
Capítulo 4. Discusiones	41
4.1 Productividad primaria y TSM.....	41
4.2 Productividad primaria, ENOS y ODP	43
4.3 Importancia de los dinoflagelados en la actualidad.....	44
Capítulo 5. Conclusiones	46
Literatura citada	47

Lista de figuras

Figura	Página	
1	Esquema general del ciclo de vida de un dinoflagelado productor de quistes (García-Mendoza <i>et al.</i> , 2016).....	4
2	Localización del núcleo MAGD09-01MC3 y las principales corrientes que influyen en las costas a lo largo de la península de Baja California (Castañeda-Quezada, 2016).....	6
3	Área de estudio que muestra la batimetría y localización del sitio de recolecta del núcleo MAGD09-01MC3 en la Cuenca Magdalena, B.C.S. Tomado de Bathymetric Data Viewer (NOAA) el 24-07-2017. Modo: Global Multi-Resolution Topography (GMRT). Version: 2.9.0.....	12
4	a) Valores de $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ vs profundidad de las muestras analizadas, b) regresión lineal de las dataciones (Castañeda-Quezada, 2016).....	14
5	Comparación de las concentraciones de palinomorfos marinos y el Índice de Temperatura Superficial del Mar (ITSM) durante 1811 a 1907 en la Cuenca Magdalena, B.C.S., expresados en escala logarítmica base 10. La línea sólida representa la distribución de los dinoflagelados, la línea no continua representa el ITSM.....	25
6	Comparación de las concentraciones de dinoflagelados y el Índice de Temperatura Superficial del Mar (ITSM) durante 1811 a 1907 en la Cuenca Magdalena, B.C.S., expresados en escala logarítmica base 10. La línea sólida representa la distribución de los dinoflagelados, la línea no continua representa el ITSM.....	26
7	Comparación de las concentraciones de dinoflagelados heterótrofos y el Índice de Temperatura Superficial del Mar (ITSM) durante 1811 a 1907 en la Cuenca Magdalena, B.C.S., expresados en escala logarítmica base 10. La línea sólida representa la distribución de los dinoflagelados, la línea no continua representa el ITSM.....	27
8	Comparación de las concentraciones de <i>Selenopemphix nephroides</i> y el Índice de Temperatura Superficial del Mar (ITSM) durante 1811 a 1907 en la Cuenca Magdalena, B.C.S., expresados en escala logarítmica base 10. La línea sólida representa la distribución de los dinoflagelados, la línea no continua representa el ITSM.....	28
9	Concentraciones de los dinoflagelados heterotróficos <i>Echinidinium</i> spp., <i>Quinquecuspis concreta</i> y <i>Brigantedinium</i> spp. en el núcleo MAGD09-01MC3, comparados con el Índice de Temperatura Superficial del Mar (ITSM) durante 1811 a 1907 en la Cuenca Magdalena, B.C.S.....	29

10	Comparación de las concentraciones de dinoflagelados autótrofos y el Índice de Temperatura Superficial del Mar (ITSM) durante 1811 a 1907 en la Cuenca Magdalena, B.C.S., expresados en escala logarítmica base 10. La línea sólida representa la distribución de los dinoflagelados, la línea no continua representa el ITSM.....	30
11	Concentraciones de los dinoflagelados autotróficos <i>Operculodinium israelianum</i> y <i>Spiniferites</i> spp. en el núcleo MAGD09-01MC3, comparados con el Índice de Temperatura Superficial del Mar (ITSM) durante 1811 a 1907 en la Cuenca Magdalena, B.C.S.....	31
12	Comparación de las concentraciones de <i>Impagidinium</i> spp., y el Índice de Temperatura Superficial del Mar (ITSM) durante 1811 a 1907 en la Cuenca Magdalena, B.C.S., expresados en escala logarítmica base 10. La línea sólida representa la distribución de los dinoflagelados, la línea no continua representa el ITSM.....	32
13	Comparación de las concentraciones de copépodos y el Índice de Temperatura Superficial del Mar (ITSM) durante 1811 a 1907 en la Cuenca Magdalena, B.C.S., expresados en escala logarítmica base 10. La línea sólida representa la distribución de los dinoflagelados, la línea no continua representa el ITSM.....	33
14	Comparación de las concentraciones de copépodos, <i>Selenopemphix nephroides</i> , <i>Impagidinium</i> spp., con las variaciones de anomalías de temperatura (°C) generadas por El Niño Oscilación del Sur (ENOS) reportado por Li <i>et al.</i> (2011), durante 1811 a 1907 en la Cuenca Magdalena, B.C.S., expresados en escala logarítmica base 10.....	34
15	Comparación de las concentraciones de copépodos, <i>Selenopemphix nephroides</i> , <i>Impagidinium</i> spp., con las variaciones de anomalías de temperatura (°C) generadas por la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP) reportado por Biondi <i>et al.</i> (2001) en línea sólida y MacDonald y Case (2005) en línea no continua, durante 1811 a 1907 en la Cuenca Magdalena, B.C.S., expresados en escala logarítmica base 10.....	35
16	Comparación de las concentraciones de copépodos, <i>Selenopemphix nephroides</i> , <i>Impagidinium</i> spp., con El Niño Oscilación del Sur (ENOS) reportado por Li <i>et al.</i> (2011), y la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP) reportado por Biondi <i>et al.</i> (2001) en línea sólida y MacDonald y Case (2005) en línea no continua, durante 1811 a 1907 en la Cuenca Magdalena, B.C.S., expresados en escala logarítmica base 10. Los intervalos donde coincidieron evento La Niña y ODP-, y El Niño con ODP+ están señalados con azul y rosa, respectivamente.....	36

Lista de tablas

Tabla		Página
1	Cronología en años calendario (1811 a 1907) de las muestras datadas del núcleo MAGD09-01MC3 con la numeración de lámina para la observación en el microscopio.....	15
2	Especies de dinoflagelados heterótrofos y autótrofos observados en el núcleo MAGD09-01MC3 en la Cuenca Magdalena, B.C.S. durante 1811 a 1907.....	22
3	Estadística básica de las concentraciones (pal/gr sed) de palinomorfos marinos encontrados en la Cuenca Magdalena, B.C.S. durante 1811 a 1907.....	23
4	Resultados de las correlaciones entre el Índice de Temperatura Superficial del Mar (ITSM) y las concentraciones de copépodos y especies de dinoflagelados. Las variables que presentan correlaciones estadísticamente significativas ($p < 0.05$) están marcadas en color rojo.....	24
5	Correlación entre las concentraciones de copépodos, dinoflagelados heterótrofos y autótrofos, y el Índice de Temperatura Superficial del Mar (ITSM), con el valor p , respectivamente. Las variables que presentan correlaciones estadísticamente significativas ($p < 0.05$) están marcadas en color rojo.....	25
6	Resultados obtenidos del Análisis de Correlación Canónica (ACC).....	37
7	Coeficientes de correlación canónica obtenidos para el Índice de Temperatura Superficial del Mar (ITSM), El Niño Oscilación del Sur (ENOS), y las variables palinológicas, estadísticamente significativas ($p < 0.05$).....	38
8	Prueba Chi-cuadrada para la comprobación de los coeficientes de correlación canónica.....	38
9	Valores de carga del factor canónico (estructura de factores) para las variables climáticas (ITSM y ENOS). Los valores mayores a ± 0.30 (color rojo) se tomaron para realizar la interpretación, debido a que se consideraron como alta correlación ($r > \pm 0.30$).....	39
10	Valores de carga del factor canónico (estructura de factores) para las variables palinológicas (copépodos y dinoflagelados). Los valores mayores a ± 0.30 (color rojo) se tomaron para realizar la interpretación, debido a que se consideraron como alta correlación ($r > \pm 0.30$).....	39
11	Varianza extraída y redundancia de las variables climáticas (ITSM y ENOS).....	40

12	Varianza extraída y redundancia de las variables palinológicas (copéodos y dinoflagelados).....	40
13	Promedios de las concentraciones de palinomorfos marinos (pal/gr sed) con su desviación estándar (σ) en la Cuenca Magdalena de 1811 a 2009.....	41

Capítulo 1. Introducción

La paleoceanografía es una ciencia que se encarga de la reconstrucción histórica de los océanos, particularmente de los cambios en su dinámica. Para entender la historia y el presente del océano, se debe disponer de un conocimiento de los ecosistemas pelágicos y su distribución en relación con la estructura térmica y dinámica del mismo (Aguirre, 1989). Los fondos oceánicos constituyen una extensa cuenca sedimentaria en condiciones de gran estabilidad y continuidad, lo cual hace posible la obtención de un excelente registro micropaleontológico (Esparza-Álvarez, 1999). Debido a estas características, muchas reconstrucciones paleoceanográficas se basan en la presencia y distribución de los microfósiles en los sedimentos del fondo oceánico, tanto en cuencas profundas como en someras. Dichas reconstrucciones comparan las asociaciones de flora y fauna que se encuentran en las capas superficiales del sedimento con las poblaciones y comunidades que viven en la columna de agua.

Los cambios paleoceanográficos y paleoclimáticos de escala interanual se pueden estudiar en sedimentos pelágicos, debido a que proporcionan información de alta resolución. El componente biogénico en estos sedimentos es importante porque contiene una gran parte del fitoplancton, el cual constituye a los productores primarios en los ecosistemas pelágicos. También se preservan muchos componentes del microzooplancton que son los consumidores primarios y secundarios, además de otros organismos de las comunidades bentónicas. Todas estas comunidades biológicas son una herramienta de trabajo que nos permiten comprender la evolución y las fluctuaciones del ambiente oceánico (Aguirre, 1989).

Los sedimentos laminados representan una excelente oportunidad para estudiar el contenido micropaleontológico, porque contiene muchos microfósiles sin alteraciones diagenéticas, como ocurre generalmente con los sedimentos de la plataforma o los sedimentos continentales (Aguirre, 1989). Estos sedimentos se preservan en cuencas subóxicas a anóxicas, es decir, zonas con oxígeno disuelto <0.2 ml/l, lo cual impide la bioturbación por organismos bentónicos en los sedimentos (Esparza-Álvarez, 1999). La abundancia en el componente biogénico representa un registro de la productividad orgánica predominante casi sin alterar, de las condiciones sedimentológicas y de las condiciones climáticas en la cuenca en donde se depositaron (Emery y Hülsemann, 1962). En la costa del Pacífico de México, se encuentran sedimentos laminados en cuencas oceánicas en Baja California Sur (Olivier-Salomé, 1998).

Entre los microfósiles marinos planctónicos, algunos de los grupos más comunes y numerosos son: coccolitofóridos, diatomeas, dinoflagelados, silicoflagelados, foraminíferos planctónicos, radiolarios,

ostrácodos, pterópodos e ictiolitos. Estos grupos suministran información importante sobre las masas de aguas superficiales, la cual se puede obtener mediante el estudio directo de las asociaciones taxonómicas o a través de análisis químicos de sus caparazones, principalmente aquellos compuestos de CaCO_3 y sílice (Barron *et al.*, 2013).

Por otra parte, los microfósiles del dominio bentónico como los foraminíferos, ostrácodos y esponjas, están estrechamente vinculados a la dinámica termohalina, es decir, a las masas de agua intermedias y profundas. Lamentablemente, los microfósiles de composición mineral tienden a ser afectados por disolución durante la diagénesis (Molina, 2017). Por otro lado, los palinomorfos producen estructuras de resistencia altamente resistentes a ataques ácidos, por lo que resultan muy útiles para reconstruir las características paleoceanográficas.

1.1 Palinomorfos marinos

Los palinomorfos son partículas de material orgánico, resistentes al ataque bacterial y sirven para esparcir el contenido genético de diversos organismos. Proviene de organismos terrestres y marinos. Los terrestres incluyen el polen de plantas vasculares, y las esporas de helechos, musgos y hongos. Los palinomorfos marinos incluyen los quistes de resistencia de diversas algas como las clorofíceas, dinoflagelados, y otras algas diversas conocidas como acritarcas. También incluyen estructuras de huevos diapáusicos de copépodos, aparatos mandibulares de poliquetos conocidos como escolecodontos y conchas orgánicas de foraminíferos. Este estudio se enfoca en el análisis de dinoflagelados y copépodos debido a que son sensibles a cambios de salinidad, temperatura y disponibilidad de nutrientes, por lo que su distribución geográfica resulta un indicador de condiciones ambientales.

1.1.1 Dinoflagelados

Los dinoflagelados son microorganismos unicelulares asignados a la división Dinoflagellata (Bütschli, 1885; Fensome *et al.*, 1993), se encuentran en aguas marinas y dulces, y su tamaño oscila entre 50 y 2000 μm . Están adaptados a una amplia variedad de ambientes, lo cual se refleja en su enorme diversidad y en un extenso registro fósil que data de varios cientos de millones de años. Sus características morfológicas y

requerimientos nutritivos los hacen exitosos en el ámbito reproductivo y de crecimiento (Gallardo-Rodríguez, 2009). Actualmente existen 1555 especies de dinoflagelados de vida libre en los océanos del mundo (Gómez, 2005), y únicamente 96 especies (6%) producen quistes orgánicos de resistencia (Zonneveld y Pospelova, 2015).

Entre las 147 especies de microalgas contribuyentes de los florecimientos algales nocivos (FAN), se han encontrado 95 especies de dinoflagelados, de las cuales aproximadamente 61 son reportadas como tóxicas (Moestrup *et al.*, 2009), por lo que es importante entender su ciclo vital y las reacciones que han presentado a los cambios en las condiciones oceanográficas que pudieran propiciar los florecimientos de estas algas flageladas.

De acuerdo con estudios recientes, los FAN han ido en aumento en las últimas décadas (Anderson, 1989; Smayda, 1990; Hallegraeff, 1993; Anderson *et al.*, 2002; Glibert *et al.*, 2005). Aunque se desconoce con precisión las causas que afectan a los FAN, se han propuesto la eutrofización (Anderson *et al.*, 2002; Parsons *et al.*, 2002; Zhou, 2005), y el calentamiento global (Moore *et al.*, 2008) como los factores más importantes.

Los FAN se presentan usualmente en condiciones eutróficas, las cuales son comúnmente relacionadas con surgencias (Alonso-Rodríguez y Ochoa, 2004). Los cambios y el aumento en las surgencias en California se han relacionado con cambios climáticos actuales (Snyder *et al.*, 2003), por lo que las reacciones de los dinoflagelados pueden ser importantes para la industria pesquera y la salud de zonas costeras en el futuro cercano. En los sistemas marinos y de agua dulce, se espera que las concentraciones crecientes de gases de efecto invernadero aumenten las temperaturas superficiales, reduzcan el pH y provoquen cambios en los patrones de mezcla vertical, surgencias, precipitación y evaporación (Moore *et al.*, 2008).

El ciclo vital de los dinoflagelados es complejo y presenta dos estadios principales. Se pueden reproducir tanto de forma asexual como sexual, siendo la asexual la más común en la mayoría de los dinoflagelados (Figura 1). En la reproducción sexual, los gametos de los dinoflagelados son células vegetativas fisiológicamente alteradas. En algunas especies, los quistes formados de gametos fusionados (cigotos) presentan una cubierta celular gruesa denominada hipnocigoto (Evitt, 1985).

La mayoría de las especies presentan una fase móvil biflagelada, en la cual la célula está envuelta en una membrana llamada amphiesma, y ocasionalmente por una estructura celulósica llamada teca, que no es fosilizable. En algunas especies, se presenta otro estadio, en el cual la célula es inmóvil y se encuentra

dentro de un quiste compuesto de material orgánico de alta resistencia (dinosporina) similar a la esporopolenina, la cual si es fosilizable. Este tipo de quistes se conocen como quistes de resistencia por ser muy resistentes a los ataques ácidos, protegen al cigoto al ser depositado en los sedimentos y son la herramienta principal de este estudio por lo que se denominan “quistes” en este documento. Estos quistes pueden conservarse viables por décadas (Lundholm *et al.*, 2011; Ribeiro *et al.*, 2011; Miyazono *et al.*, 2012). Además, se conservan como fósiles por largos periodos de tiempo, ya que se conocen desde hace más de 200 millones de años (Evitt, 1985; Fensome *et al.*, 1993).

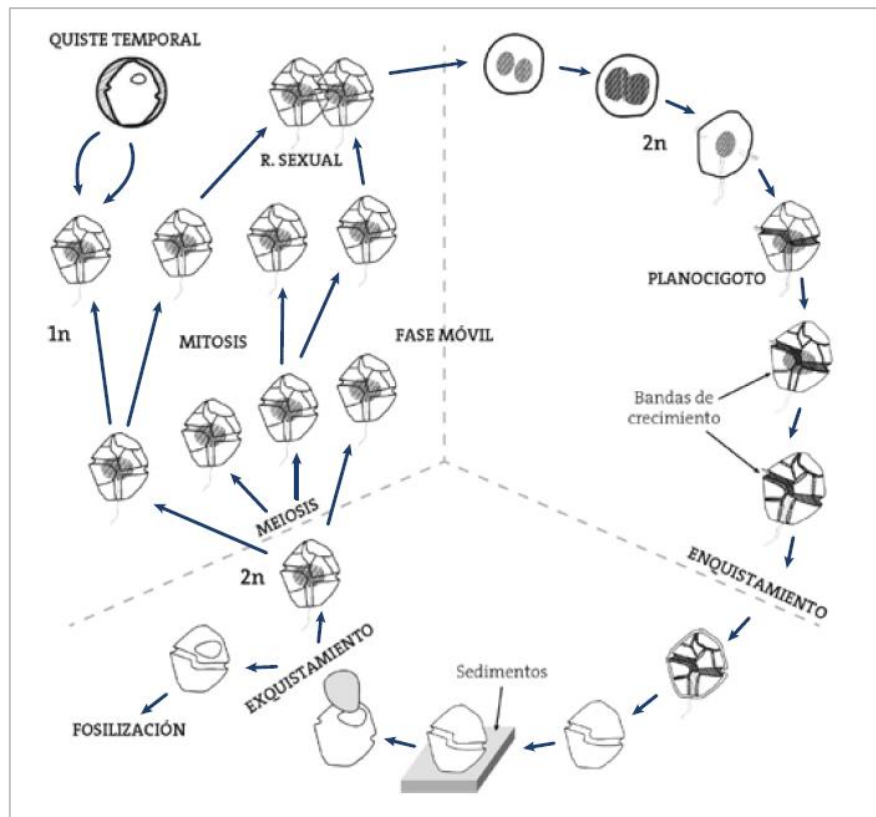


Figura 1. Esquema general del ciclo de vida de un dinoflagelado productor de quistes (García-Mendoza *et al.*, 2016).

Por lo general, los quistes son 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 en su fase planctónica. Se encuentran altas concentraciones de quistes durante y después de las abundancias máximas de células móviles en la columna de agua (Matsuoka y Fukuyo, 1994; Peña-Manjarrez *et al.*, 2001).

1.1.2 Copépodos

Este grupo de pequeños crustáceos (0.2-28 mm) son considerados los artrópodos más abundantes. Incluye ~12000 especies (Vives y Shmeleva, 2007), la mayoría son marinas, aunque viven en todos los ambientes y se encuentran en todas las latitudes. Son generalmente planctónicos, se alimentan de fitoplancton y son la base de la alimentación de muchos peces. Han sido muy estudiados como reguladores de las poblaciones de fitoplancton al representar el principal constituyente del zooplancton marino.

El orden Calanoida de copépodos planctónicos marinos producen huevos diapúsicos de resistencia cuando las condiciones ambientales (temperatura, salinidad, luz, etc.) no son las adecuadas, para pasar ese tiempo en estado latente (Fernández de Puellas, 2015). En estas condiciones, determinadas especies tienen la capacidad de endurecer las cubiertas ováricas, y los huevos permanecen en estado de vida latente hasta que las condiciones cambian y son favorables (huevos perdurables). Normalmente, estos huevos se depositan en el sedimento donde pueden durar de tres a cuatro meses. Este tipo de huevos tienen una gran resistencia que les permite soportar condiciones desfavorables del medio, como la temperatura o la luz. El oxígeno, la salinidad o la profundidad que ocupa el huevo en el sedimento, puede tener una gran influencia en el momento de su eclosión. Estos huevos son tan resistentes que han sido descritos de sedimentos marinos pre-holocénicos (Uye *et al.*, 1979).

Este grupo tiene una gran utilidad como indicador indirecto de masas de agua y de corrientes marinas (Lavaniegos, 2014), e incluso ha sido usado como bioindicador de efectos climáticos tales como El Niño Oscilación del Sur (Jiménez-Pérez y Lara-Lara, 1988). En este estudio sólo se identifican a nivel de orden, y se utilizan como indicadores indirectos de productividad primaria, al estar tan relacionados con el fitoplancton.

1.2 Características oceanográficas regionales

La península de Baja California está bordeada por el océano Pacífico al occidente y por el Golfo de California al oriente. La dinámica oceánica en la costa occidental está dominada por diferentes masas de agua que constituyen el Sistema de la Corriente de California (SCC), las cuales cambian en intensidad a escalas estacionales e interanuales (Durazo *et al.*, 2005). Las principales corrientes que influyen en las

costas occidentales de la península de Baja California son la Corriente de California (CC) y la Corriente Norecuatorial (CNE).

La Corriente de California (Figura 2) es una corriente de frontera oriental fría y de baja salinidad proveniente del Pacífico subártico norte y viaja hacia el ecuador, donde pasa frente a las costas de la península de Baja California, y deja a su paso aguas frías y ricas en nutrientes. Estas aguas son elevadas a la superficie (surgencias) cuando prevalecen vientos fuertes y persistentes desde el norte-noroeste (Reimer *et al.*, 2015). La Corriente Norecuatorial está formada por agua subtropical cálida de alta salinidad, proveniente del sur. El dominio de las masas de agua subártica (CC) o ecuatorial (CNE), está determinado por los cambios climáticos estacionales, anuales y decadales a nivel regional y de mesoescala.

En las costas de California y Baja California entre los 40°N y 25°N de latitud, la dirección del viento mensual promedio se dirige hacia el ecuador. Las masas de agua son afectadas por las surgencias costeras que se intensifican durante primavera-verano (Esparza-Álvarez, 1999), cuando la Temperatura Superficial del Mar (TSM) alcanza sus mínimos, y los frentes de agua subtropicales débiles se encuentran con los frentes subárticos en la entrada sur del Golfo de California (Durazo *et al.*, 2005). Generalmente, desaparecen durante el otoño, cuando los vientos del sur se vuelven más dominantes (Esparza-Álvarez *et al.*, 2007).

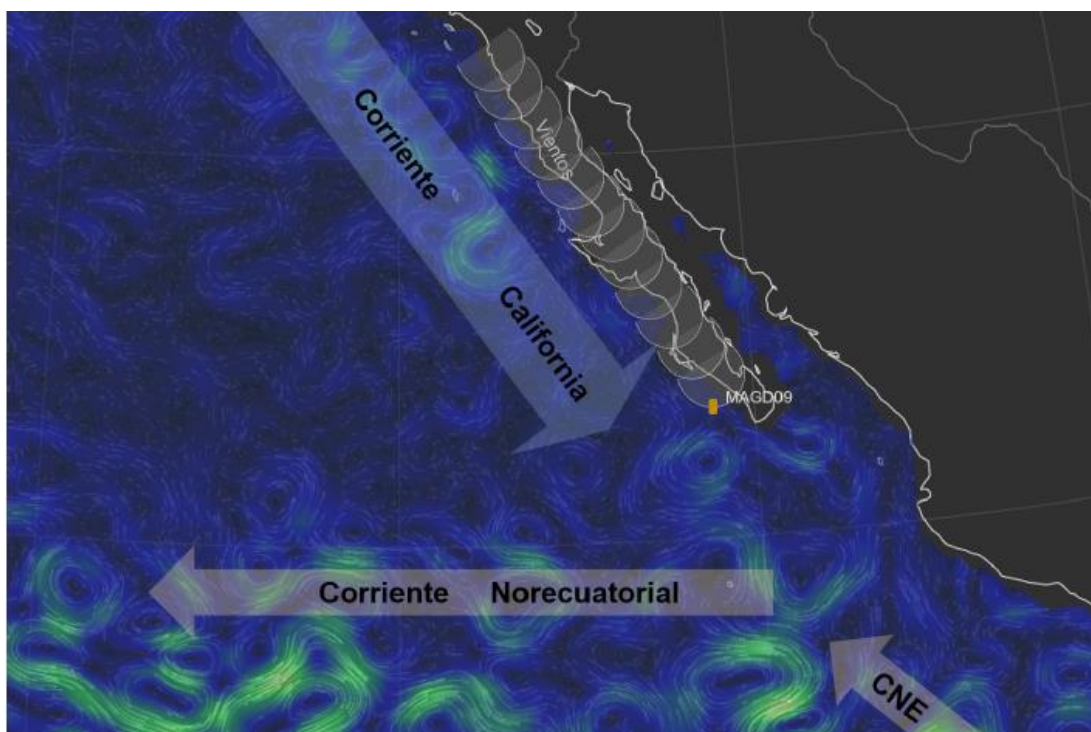


Figura 2. Localización del núcleo MAGD09-01MC3 y las principales corrientes que influyen en las costas a lo largo de la península de Baja California (Castañeda-Quezada, 2016).

1.3 Antecedentes

1.3.1 El Niño Oscilación del Sur (ENOS)

Las variaciones climáticas que se presentan en el océano están asociadas con eventos de escala sinóptica atmosférica. Uno de los eventos relacionados con la oscilación climática es El Niño Oscilación del Sur (ENOS, o ENSO en inglés), de periodos interanuales y está significativamente asociado con las anomalías de TSM positivas o de fase cálida (El Niño), y negativas o de fase fría (La Niña). Dichas fases se manifiestan por anomalías en el campo de vientos alisios en el océano Pacífico ecuatorial central y oriental (Maturana *et al.*, 2004; Flores-Trujillo *et al.*, 2009).

Las condiciones del ENOS provocan importantes cambios en la caracterización físico-química de la columna de agua. En los eventos El Niño, se presenta un fuerte calentamiento de las aguas superficiales con aumentos de hasta 9°C (Durazo *et al.*, 2005). En condiciones El Niño, el cambio en el esfuerzo rotacional del viento genera el desplazamiento de la masa de agua subtropical y tropical hacia latitudes medias. Este desplazamiento ocasiona que la termoclina, la nutriclina y la oxiclina se presenten a mayor profundidad, y disminuye la productividad (De la Lanza-Espino, 2001). En estas condiciones, el agua menos densa se posiciona en la superficie dando lugar a una disminución de nutrientes en la zona fótica, y a su vez, disminuye la productividad biológica en la superficie del océano y la exportación de carbono a mayor profundidad (Hernández de la Torre *et al.*, 2004; Esparza-Álvarez *et al.*, 2007).

La Niña se caracteriza por un enfriamiento de las aguas en el centro y este del Pacífico ecuatorial. En estas condiciones los vientos alisios se fortalecen, y el afloramiento se intensifica a lo largo del este ecuatorial y la costa sudamericana (NOAA, 2018).

1.3.2 Oscilación Decadal del Pacífico (ODP)

Otro factor importante en las fluctuaciones climáticas globales en nuestra región es la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP, o PDO en inglés). Este modulador representa una fluctuación o variabilidad climática de largo periodo, del orden de 20 a 30 años en el océano Pacífico. La ODP presenta una fase positiva (ODP+) o cálida, y una fase negativa (ODP-) o fría. La fase cálida presenta una tendencia al aumento de la termoclina y nutriclina en el oeste de Norteamérica, con la consiguiente reducción de la productividad

primaria marina en la costa occidental de Baja California. Mientras que la fase fría produce un aumento en la productividad primaria regional (Mantua *et al.*, 1997; Maturana *et al.*, 2004; Barron *et al.*, 2013).

El 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 el ENOS están en fase. En el oeste de América del Norte, las fases positivas de la ODP están asociadas a condiciones climáticas similares a las de El Niño, aunque su expresión es más débil. Estas condiciones incluyen la disminución de la precipitación invernal, el manto de nieve, el flujo de corrientes en el noroeste, y una mayor precipitación en el suroeste. Las condiciones se invierten durante las fases de ODP-, cuando coinciden con eventos intensos de La Niña. Se ha demostrado que la ODP modula las teleconexiones climáticas entre el clima de América del Norte y el Pacífico ecuatorial durante los eventos de El Niño y La Niña (Linsley *et al.*, 2000; MacDonald y Case, 2005).

En primavera y verano prevalecen las condiciones de surgencia, y las aguas más frías y ricas en nutrientes, trayendo especies asociadas con una mayor productividad y/o masas de agua más frías. Estas condiciones se intensifican durante años La Niña o años ODP-. En invierno, los vientos del norte se debilitan, el flujo hacia los polos se intensifica 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 aumentan durante los años El Niño o años ODP+.

1.3.3 Productividad primaria

A lo largo de la península de Baja California se han realizado múltiples estudios relacionados con la dinámica del océano, tanto en el ámbito de la productividad primaria como en la hidrodinámica. En la Cuenca San Lázaro (CSL), ubicada a los 25.08°N y 112.95°W, se ha documentado la relación de los eventos climáticos con la productividad primaria marina mediante el análisis de sedimentos laminados. Con base en datos de diatomeas se han reconstruido los cambios paleoceanográficos en la parte sur de la Corriente de California durante los últimos 100 años (Esparza-Álvarez *et al.*, 2007).

En la parte sur de la península de Baja California (24.5°N y 112.1°W), se determinaron los perfiles de salinidad y temperatura en la columna de agua (85 m de profundidad). Estas mediciones se realizaron con perfiladores tipo CTD (Conductividad, Temperatura y Presión) durante agosto de 2008 a diciembre de 2011

(Cervantes-Duarte *et al.*, 2015). Con base en esta información, se estableció la variabilidad interanual de los ciclos de surgencias y su relación con la productividad primaria.

Recientemente, se analizaron los palinomorfos de muestras semianuales correspondientes a los periodos de 1967 a 1988 (Pérez-Rodríguez, 2016) y de 1998 a 2009 (Serrano-Mejía, 2016) en la Cuenca San Lázaro. Los resultados palinológicos se compararon con series de tiempo instrumentales y con registros de índices como el ENOS y la ODP, para determinar los cambios en las concentraciones de palinomorfos en relación a los cambios paleoceanográficos. Los resultados de ambos estudios indicaron una relación directa de taxa heterotróficas con las surgencias, es decir, los palinomorfos se benefician por el aumento en la disponibilidad de nutrientes durante las surgencias (Pérez-Rodríguez, 2016). Además, se documentó un aumento de especies tropicales con relación al aumento regional de la TSM, particularmente en la última década del siglo XX (Serrano-Mejía, 2016).

En las costas de la península de Baja California, también se examinaron las conexiones entre los cambios de la TSM en regiones con la surgencia costera y la producción primaria bruta terrestre (PPT) a través de observaciones satelitales. Los resultados indicaron que existe una conexión océano-tierra entre la TSM y la PPT, con el ENOS y PPT. Además, se determinó que los cambios en la TSM y los eventos del ENOS y ODP influyen mayormente en la variabilidad de la PPT (Reimer *et al.*, 2015).

En las costas del sur de California, también han documentado la relación directa de las surgencias con la productividad primaria. Los conjuntos de diatomeas y silicoflagelados representan un registro de la variabilidad multianual durante los pasados 250 años en los sedimentos laminados de la Cuenca de Santa Bárbara (CSB) ubicada en el extremo de la ensenada del sur de California (Barron *et al.*, 2013). Las diatomeas incrementaron durante eventos de surgencias, cuando la producción de carbonatos fue baja, causado por un cambio en la disponibilidad de nutrientes y/o cambios estacionales en las surgencias.

En la CSB, los conjuntos de dinoflagelados indicaron aumentos de taxa autotróficas durante intervalos cálidos desde 1883 hasta 1992 (Prauss, 2002). Además, se ha comprobado que existe una relación directa entre las especies heterotróficas con las surgencias (Bringué *et al.*, 2013). Por otro lado, la abundancia de dinoflagelados autotróficos incrementó cuando hubo una presencia de nutriclina y condiciones de poca turbulencia, ya que tienen la capacidad de desplazarse en la zona eufótica (Burkholder *et al.*, 2006) para alcanzar los nutrientes.

Hacia el sur, en la región de la Cuenca Magdalena, se han realizado estudios sobre la variabilidad de la productividad biológica marina con base en datos de ópalo biogénico, carbono orgánico y CaCO_3 . La variabilidad de la productividad primaria en el Pacífico nororiental se asocia con el cambio en las condiciones fisicoquímicas de la columna de agua que son moduladas estacionalmente por el movimiento de los centros de alta y baja presión del Pacífico Norte, y el movimiento de la Zona de Interconvergencia Tropical, e interanualmente durante los eventos de El Niño y La Niña (Juárez *et al.*, 2014). Muestras de sedimentos laminados de esta misma cuenca, indicaron un aumento en las abundancias de especies heterotróficas de dinoflagelados durante los intervalos de fase fría de la ODP y el ENOS en el siglo XX (Castañeda-Quezada, 2016).

1.4 Justificación

Estudiar los conjuntos de dinoflagelados en el periodo de 1811 a 1907 permitirá compararlos con indicadores indirectos de factores climáticos, para mejorar nuestro entendimiento sobre la evolución de las condiciones oceanográficas y climáticas en la parte austral del margen continental de Baja California y las respuestas de estos organismos.

1.5 Hipótesis y objetivos

1.5.1 Hipótesis

Durante 1811 a 1907, los conjuntos de quistes de dinoflagelados autótrofos y heterótrofos, y los copépodos estuvieron relacionados con las condiciones oceanográficas y con los forzamientos regionales como El Niño Oscilación del Sur y la Oscilación Decadal del Pacífico en la Cuenca Magdalena.

1.5.2 Objetivos generales

Determinar la relación entre el contenido palinológico de los sedimentos laminados en la Cuenca Magdalena, Baja California Sur, con indicadores indirectos (“proxies”) y con reconstrucciones de los índices climáticos regionales disponibles para el periodo de 1811 a 1907.

1.5.3 Objetivos específicos

- a) Analizar los cambios bianuales de las concentraciones de los conjuntos de palinomorfos marinos desde 1811 hasta 1907.
- b) Documentar las características biogeográficas de los conjuntos de dinoflagelados antes del calentamiento actual.
- c) Identificar la relación entre las variaciones de los conjuntos de dinoflagelados con los forzamientos regionales interanuales como el ENOS, y los eventos decadales como la ODP.

Capítulo 2. Metodología

2.1 Área de estudio

La Cuenca Magdalena se localiza a los 23.42°N y 111.23°W (Figura 3). Esta cuenca al igual que en la Cuenca San Lázaro, está influenciada en el lado norte por la porción sur de la Corriente de California, mientras que en el lado sur está influenciada por la Corriente Norecuatorial. El fondo de la cuenca no presenta bioturbación, debido a los bajos niveles de oxígeno (Esparza-Álvarez, 1999), lo que permite la preservación de palinomorfos en los sedimentos laminados.

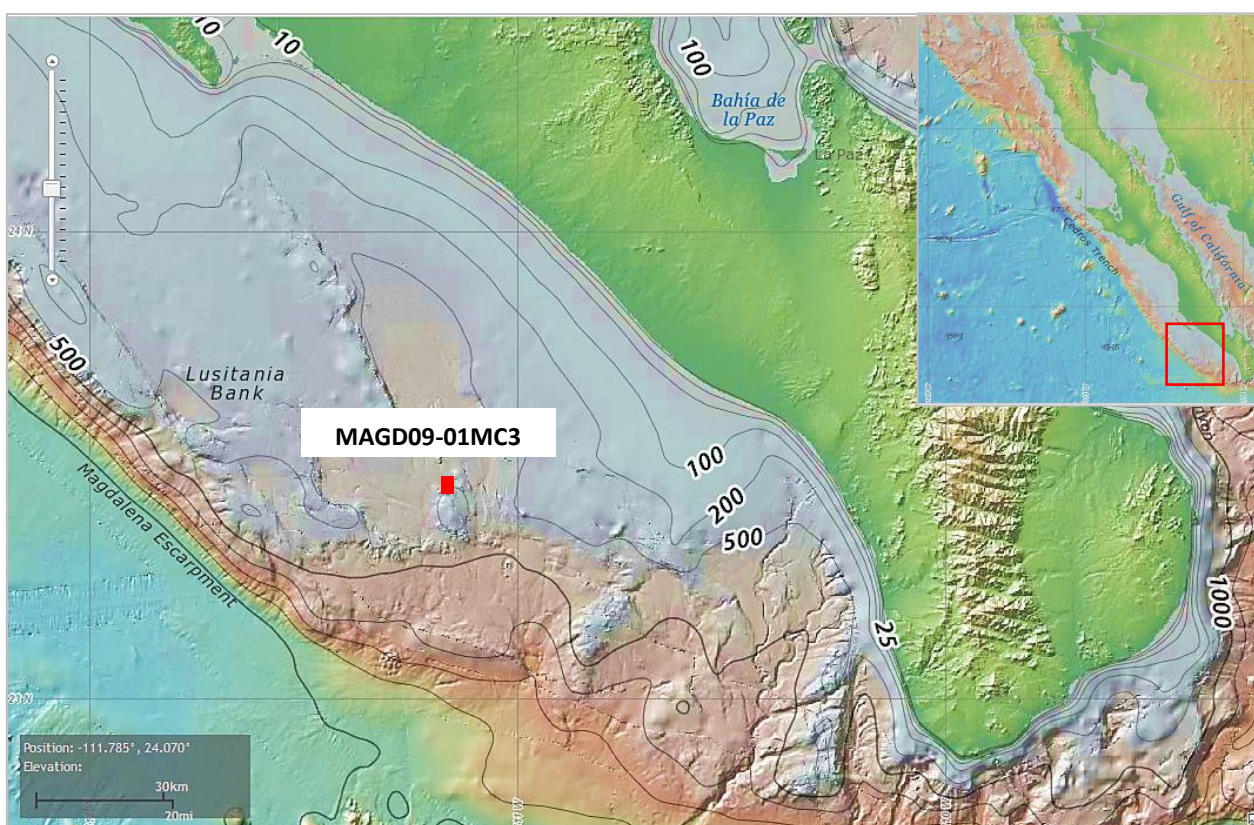


Figura 3. Área de estudio que muestra la batimetría y localización del sitio de recolecta del núcleo MAGD09-01MC3 en la Cuenca Magdalena, B.C.S. Tomado de Bathymetric Data Viewer (NOAA) el 24-07-2017. Modo: Global Multi-Resolution Topography (GMRT). Version: 2.9.0.

2.2 Datación del núcleo

El núcleo de sedimento del margen de Magdalena (MAGD09-01MC3, longitud 35 cm), fue extraído a 520m de profundidad en octubre de 2009 a bordo del *RV New Horizon*, a cargo del Dr. William Berelson de la Universidad del Sur de California. Este núcleo fue muestreado a intervalos de un milímetro con un pistón de pedal para obtener un registro de los 10 cm superiores con 100 muestras de un milímetro de espesor. Las 51 muestras más recientes (1909-2009) ya fueron analizadas por Castañeda-Quezada (2016).

Se dataron 7 muestras de los 5 cm superiores del núcleo MAGD09-01MC3 mediante el método de $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ en el Laboratorio de Dataciones del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM (Mazatlán). El ^{210}Pb es un elemento radiactivo de origen natural que se encuentra en pequeñas cantidades en la mayoría de los suelos y forma parte de la serie de decaimiento radiactivo del ^{238}U . El decaimiento de ^{210}Pb se traduce en una disminución logarítmica de la concentración de ^{210}Pb en exceso y de su relación con la profundidad en el caso más simple, donde la tasa de sedimentación y la tasa de ^{210}Pb son constantes, y los sedimentos de la capa superficial son casi uniformes con sus propiedades físicas e intrínsecas en el contenido de las series-uranio (González-Verdugo *et al.*, 2015).

El número de muestras analizadas fue limitado y mostraron un comportamiento exponencial, donde la mayor concentración de $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ se encontró en los primeros milímetros del núcleo, por lo tanto, se utilizó el modelo de Flujo Constante Sedimentación Constante (CFCS, por sus siglas en inglés) para el cálculo de las tasas de sedimentación y de edades (Figura 4a).

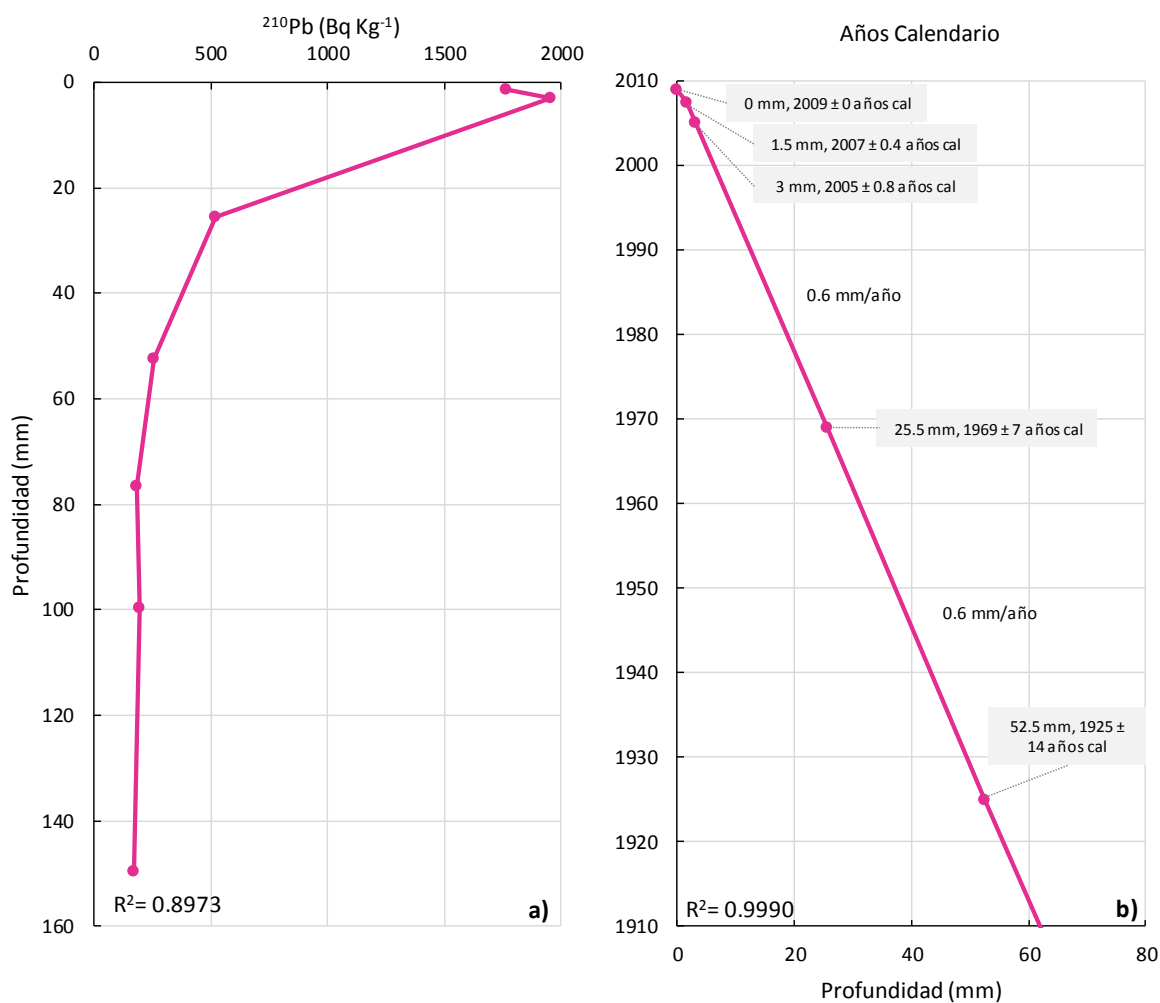


Figura 4. a) Valores de $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ vs profundidad de las muestras analizadas, b) regresión lineal de las dataciones (Castañeda-Quezada, 2016).

Las Velocidades de Acumulación de Sedimentos (VAS) se calcularon a través de una regresión lineal del perfil de edades $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ vs profundidad (Figura 4b). Las incertidumbres de las edades y la VAS se calcularon mediante una simulación de Montecarlo con los isótopos ^{210}Pb y ^{226}Ra . El logaritmo natural de $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ fue aleatorizado para calcular los parámetros de regresión y las edades de la sección con 30,000 iteraciones, y también para estimar estadísticamente las incertidumbres (Castañeda-Quezada, 2016).

Se obtuvo una velocidad de sedimentación muy baja de $0.62 \pm 0.1 \text{ mm año}^{-1}$, con alta significancia estadística ($7.04\text{E-}06$) (Castañeda-Quezada, 2016). Las edades de CFCS se reportan para las secciones analizadas. Con estas dataciones, las 49 muestras analizadas representan el registro sedimentario desde 1811 hasta 1907 años calendario, con resolución de 2 años por muestra (Tabla 1).

Tabla 1. Cronología en años calendario (1811 a 1907) de las muestras datadas del núcleo MAGD09-01MC3 con la numeración de lámina para la observación en el microscopio.

Número de muestra	Años calendario	Número de muestra	Años calendario
51-52	1907	76-77	1857
52-53	1905	77-78	1855
53-54	1903	78-79	1853
54-55	1901	79-80	1851
55-56	1899	80-81	1849
56-57	1897	81-82	1847
57-58	1895	82-83	1845
58-59	1893	83-84	1843
59-60	1891	84-85	1841
60-61	1889	85-86	1839
61-62	1887	86-87	1837
62-63	1885	87-88	1835
63-64	1883	88-89	1833
64-65	1881	89-90	1831
65-66	1879	90-91	1829
66-67	1877	91-92	1827
67-68	1875	92-93	1825
68-69	1873	93-94	1823
69-70	1871	94-95	1821
70-71	1869	95-96	1819
71-72	1867	96-97	1817
72-73	1865	97-98	1815
73-74	1863	98-99	1813
74-75	1861	99-100	1811
75-76	1859		

2.3 Procesamiento palinológico

Las muestras datadas se procesaron mediante la Técnica de Extracción de Palinomorfos descrita en Wood *et al.* (1996), sin oxidación de materia orgánica y con modificaciones realizadas en el Laboratorio de Palinología (CICESE).

Las muestras se liofilizaron durante 24 horas a una temperatura de -58°C. Se pesó 1 gr de sedimento seco por cada muestra. Posteriormente, se lavó la muestra con un detergente fuerte y caliente, y se decantó

utilizando un tamiz con luz de malla de 15 μm . Se trituró la muestra con un martillo o mortero (tamaño de un grano de arroz), y se colocó en un vaso de precipitado 250 ml de plástico (5 gr).

Se adicionó una tableta de esporas de *Lycopodium clavatum* del lote 483216 (1 tableta= 18,583 esporas, $s = \pm 1708$) como marcador exótico para calcular la abundancia absoluta de palinomorfos.

2.3.1 Tratamiento químico

Se añadió HCl frío (37.4%) hasta cubrir la muestra y se dejó reposar mínimo por una hora para remover los carbonatos. Debido al tiempo de sedimentación corto, se utilizó la centrifugación o el tamizado para concentrar la muestra. Se lavó la muestra con agua destilada para neutralizarla. Para la centrifugación, la velocidad de rotación utilizada fue de 3500 revoluciones por minuto (rpm) durante 6 minutos. Se decantó el sobrenadante con un tamiz con malla de 15 μm .

El componente siliciclástico de las muestras se eliminó mediante la adición de HF con una concentración de 48% hasta cubrir la muestra, y se mezcló para integrar la muestra con el ácido. Se dejó reposar de 12-24 horas para su asentamiento. La muestra se lavó 4 veces con agua destilada hasta que el pH alcanzó valores más neutros de 5 a 7. Durante el enjuague, el HF tóxico se decantó y se eliminó. Para evitar la pérdida de residuos durante la decantación, se centrifugó a 3500 rpm durante 6 minutos. Se tamizó el sobrenadante para no perder palinomorfos.

Se vertió la muestra a un tubo nuevo de 50 ml para concentrarla, y se centrifugó a 3500 rpm durante 6 minutos.

2.3.2 Tratamiento mecánico

La separación de líquidos para la eliminación de minerales pesados, se llevó a cabo mediante la adición de una cantidad proporcional de politungstato de sodio (densidad 2.0) para aislar las fracciones palinológicas (454 gr en 230 ml de agua destilada o desionizada) en relación a la muestra de sedimento, y se agitó vigorosamente con "vortex" durante 1 minuto. Después se centrifugó a 3500 rpm durante 20 minutos.

No se oxidó el residuo de materia orgánica para preservar todos los taxa de dinoflagelados (Rochon *et al.*, 1999).

2.3.3 Tamizado

Se transfirió el anillo de materia orgánica con una pipeta Pasteur a un tamiz de 15 μm para eliminar el líquido pesado y arcillas de la muestra, y se concentró en un tubo de 2 ml. Se colocó el tubo en el ultrasonido durante 45 segundos, y nuevamente se tamizó la muestra con un tamiz con malla de 15 μm .

2.3.4 Montaje de láminas

Se extrajeron de 5 a 7 gotas de los residuos extraídos con un gotero, y se colocaron en un portaobjetos de 25x50 mm con gelatina de glicerina (se incorporaron 7 gr de grenetina marca “Knox” disuelta en 50 ml de agua con 14 ml de glicerina purificada) sobre una plancha de metal caliente ($\sim 65^\circ\text{C}$).

Por último, se selló el portaobjetos con resina óptica #61 para proteger el residuo de la degradación por deshidratación, y se puso a secar con rayos ultravioleta (UV) durante 10 minutos.

2.4 Análisis microscópico

Las muestras se analizaron cualitativa y cuantitativamente mediante un microscopio óptico de luz transmitida (Olympus CX31). Se realizaron de 20 a 24 barridos de un extremo a otro con el objetivo de 20X para cubrir por completo la superficie de la lámina. Se identificaron, contabilizaron y describieron los palinomorfos marinos (dinoflagelados y huevos de copépodos), así como las esporas de *Lycopodium clavatum*. Respecto a los dinoflagelados, se observó la forma general, la relación quiste-teca, el tipo de pared, la forma y posición de estructuras externas, la posición y forma del arqueópilo, y la tabulación de las formas autotróficas del orden Gonyaulacales y de las heterotróficas del orden Peridinales.

Los objetivos de 40X y 60X se utilizaron para la identificación de quistes de dinoflagelados a nivel de especie, siguiendo las convenciones taxonómicas de Fensome *et al.* (1993). Además, se consultaron las descripciones de los holotipos (Fensome *et al.*, 1991), y las bases de datos en línea de Zonneveld y Pospelova (2015; [Marum](#)) y Williams *et al.* (2017; [Dinoflaj3](#)). Durante y después de la identificación, se realizó un registro fotográfico a través de la cámara Olympus integrada en el microscopio.

2.5 Análisis estadístico

Se elaboró un contador de teclas en Excel de Microsoft Office® 2016 (proporcionado por Castañeda-Quezada, 2016) para agilizar el conteo total de las láminas. Este contador generó una base de datos de acuerdo con el análisis microscópico, donde se agruparon los dinoflagelados heterótrofos y autótrofos, así como las esporas de *Lycopodium* y los copépodos.

La información obtenida del análisis microscópico se analizó estadísticamente mediante técnicas multivariadas para establecer el comportamiento, y comprender la relación de los conjuntos de dinoflagelados. El análisis multivariado puede revelar la agrupación y clasificación de las interrelaciones entre las variables.

2.5.1 Abundancia absoluta

La abundancia absoluta de palinomorfos marinos se obtuvo con la ayuda de la tableta de *Lycopodium* que se agregó en el procesamiento palinológico. Este marcador exótico es necesario, ya que cada observador tiene un concepto diferente de lo que cuenta como quiste de dinoflagelado, lo que introduciría un sesgo en las abundancias relativas y/o absolutas (Neil *et al.*, 2009).

Las tabletas de esporas utilizadas son producidas y distribuidas por el Subdepartamento de Geología del Cuaternario de la Universidad de Lund, Suecia (<https://www.geologi.lu.se/>). Las concentraciones están expresadas como especímenes por gramo de peso seco de sedimento (pal/gr sed, qst/gr sed y cop/gr sed), y se calcularon mediante la siguiente fórmula (1) propuesta por Benninghoff (1962):

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

Donde

C = Concentración de palinomorfos/gramo de sedimento seco

d_c = Número de quistes de dinoflagelados contados

L_t = Número de esporas/tabletas de *Lycopodium*

t = Número de tabletas agregadas a la muestra

L_c = Número de esporas de *Lycopodium* contadas

w = Peso del sedimento seco en gramos

2.6 Comparación de resultados

Para identificar los cambios paleoceanográficos y paleoclimáticos que tuvieron lugar en la Cuenca Magdalena durante el siglo XIX, se utilizaron los siguientes índices regionales climáticos (sección 2.6.1) para el periodo de 1811 a 1907, y a partir de ellos, se determinó su correlación con los datos palinológicos.

2.6.1 Índices climáticos regionales

Se utilizaron los registros de anomalías de Temperatura Superficial del Mar (ITSM); y las reconstrucciones de eventos El Niño Oscilación del Sur (ENOS) y la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP), para la comparación de resultados.

Los datos del índice de TSM de 1811 a 1907 para las reconstrucciones de temperatura local y regional, se obtuvieron de Jones y Mann (2004), donde se utilizaron cuatro series de tiempo con proxies de anillos de árboles localizados en: sitios boreales en Canadá y Alaska que abarcan más de 90 grados de longitud (Jacoby y D'Arrigo, 1989); en el occidente de Estados Unidos y Canadá localizados entre los 35° y 50°N, 105° y 125°W (Briffa *et al.*, 1992); en Canadian Rockies cerca del glaciar Athabasca en Alberta, Canadá (Luckman *et al.*, 1997); y en el último estudio se utilizó una red multiproxy que consiste en indicadores

climáticos indirectos de resolución anual de alta calidad, recopilados individualmente y analizados anteriormente por muchos investigadores del paleoclima (Mann *et al.*, 1998).

Los datos del índice ENOS de 1811 a 1907 se tomaron de Li *et al.* (2011), en donde se calculó el índice mediante el Atlas de Sequía de América del Norte (NADA: North American Drought Atlas), una base de datos de reconstrucciones de sequía basada en registros de anillos de árboles en el Pacífico tropical oriental-central.

El índice de la ODP de 1811 a 1907, se tomó de las reconstrucciones dendrocronológicas de Biondi *et al.* (2001), realizadas en 5 sitios desde Transverse Mountains en el sur de California hasta San Pedro Mártir al norte de Baja California (34.65°N, 119.37°W; 33.73°N, 117.55°W; 33.35°N, 116.85°W; 34.12°N, 116.80°W; 32.87°N, 116.42°W; 30.97°N, 115.50°W); y en un sitio cerca del Monte San Gorgonio en California (34.04°N, 116.29°W), y en Whirlpool Point (52.00°N, 116.27°W) cerca de Alberta, Canadá (MacDonald y Case, 2005). Todos los índices se promediaron bianualmente para igualar la resolución de muestreo, y están expresados en grados Celsius (°C).

2.6.2 Análisis multivariado

Los resultados obtenidos de las abundancias absolutas (concentraciones) de palinomorfos marinos (copépodos y dinoflagelados), y los índices climáticos (ITSM y ENOS), se procesaron con el software STATISTICA (StatSoft, Inc., versión 7.0), para generar matrices de correlación de Pearson (r). Estas correlaciones evalúan el grado de asociación lineal que tienen entre sí los valores de 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 con los índices climáticos ($p = 0$)

H_1 : Existe correlación entre las variables palinológicas con los índices climáticos ($p \neq 0$)

De acuerdo con los resultados obtenidos de las correlaciones y con el propósito de determinar si los valores de correlación son altos o bajos y significativos, se estableció un límite de correlación $r > \pm 0.50$ como indicador de alta correlación, y valores de $p < 0.05$ como estadísticamente significativos.

Considerando las bajas correlaciones ($r < 0.50$) entre el ITSM y las variables palinológicas (ver más adelante Tabla 4), se procedió a realizar la prueba estadística multivariada conocida como Análisis de Correlación Canónica (ACC), bajo el supuesto de que siguen un comportamiento descrito por el modelo general (2):

$$a_1Y_1 + a_2Y_2 + a_3Y_3 + a_nY_n = b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_nX_n \quad (2)$$

El ACC requiere de ciertos supuestos como baja correlación entre grupos de variables, normalidad, homocedasticidad y ausencia de puntos extremos. Esta técnica multivariada permite determinar la relación lineal que puede existir entre un grupo de variables dependientes (Y) con un grupo de variables independientes (X), las cuales se combinan hacia un valor predicho para producir el máximo coeficiente de correlación entre ambos conjuntos de variables (Davis, 2002; StatSoft, Inc., 2013).

En el ACC se excluyeron a las especies *Votadinium calvum*, *Lejeunecysta oliva* y *Lejeunecysta sabrina*, porque sólo se encontraron menos de tres especímenes en todas las muestras. También se excluyó a *Spiniferites* spp., por presentar una alta correlación ($r > 0.50$).

Capítulo 3. Resultados

3.1 Análisis palinológico

El análisis palinológico realizado en las 49 láminas correspondientes a los 5 cm de la parte inferior del núcleo MAGD09-01MC3 extraído de la Cuenca Magdalena, Baja California Sur, evidenció la presencia de palinomorfos marinos que incluyen dinoflagelados y copépodos. En total se identificaron 9 géneros de quistes de dinoflagelados, de los cuales 6 de ellos pertenecen al orden Peridinales e incluyen 12 especies, y 3 géneros del orden Gonyaulacales con 4 especies (Tabla 2).

Tabla 2. Especies de dinoflagelados heterótrofos y autótrofos observados en el núcleo MAGD09-01MC3 en la Cuenca Magdalena, B.C.S. durante 1811 a 1907.

Género	Especie
Orden Peridinales (heterotróficos)	
<i>Selenopemphix</i>	<i>nephroides</i> (Benedek 1972) Benedek et Sarjeant, 1981
<i>Equinidinium</i>	<i>granulatum</i> Zonneveld 1997
	<i>delicatum</i> (Zonneveld 1997) Head 2003
<i>Brigantedinium</i>	<i>cariacoense</i> Wall, 1967
	<i>grande</i> Reid 1977
	<i>irregulare</i> Matsuoka 1987
	<i>simplex</i> Wall 1965
	<i>majusculum</i> Reid 1977
<i>Quinquecuspis</i>	<i>concreta</i> (Reid 1977) Harland 1977
<i>Votadinium</i>	<i>calvum</i> Reid 1977
<i>Lejeunecysta</i>	<i>oliva</i> (Reid 1977) Turon et Londeix 1988
	<i>sabrina</i> (Reid 1977) Bujak 1984
Orden Gonyaulacales (autotróficos)	
<i>Operculodinium</i>	<i>israelianum</i> (Rossignol 1962) Wall 1967
<i>Impagidinium</i>	<i>aculeatum</i> (Wall 1967) Lentin et Williams 1981
	<i>striatum</i> (Wall 1967) Stover et Evitt 1978
<i>Spiniferites</i>	<i>ramosus</i> (Ehrenberg 1838) Mantell 1854

3.2 Comparación de resultados y análisis estadístico

Se compararon las concentraciones obtenidas de los datos palinológicos con el Índice de Temperatura Superficial del Mar (ITSM) correspondientes a las 49 muestras analizadas. Se realizó la estadística básica de los datos palinológicos (Tabla 3), y se elaboraron gráficas de abundancia vs tiempo para cada una de las variables.

Tabla 3. Estadística básica de las concentraciones (pal/gr sed) de palinomorfos marinos encontrados en la Cuenca Magdalena, B.C.S. durante 1811 a 1907.

Variable	Promedio	Mínimo	Máximo	Desviación estándar (σ)
Copépodos	2407.32	181.18	12,787.55	2708.17
Dinoflagelados heterótrofos	137.77	3.85	1053.03	152.53
Dinoflagelados autótrofos	48.87	0	362.75	65.95
Dinoflagelados totales	186.64	23.13	1053.03	169.53
Total palinomorfos marinos	2634.79	204.32	13,200.06	2733.27

El ITSM presentó correlaciones significativas ($p < 0.05$) con los copépodos ($r = 0.46$, $p = 0.001$), y las especies de dinoflagelados *B. cariacense* ($r = 0.31$, $p = 0.032$), *Q. concreta* ($r = -0.36$, $p = 0.011$), *V. calvum* ($r = -0.28$, $p = 0.05$), *I. aculeatum* ($r = -0.31$, $p = 0.029$) y *Spiniferites* spp. ($r = -0.53$, $p = 0$). Sin embargo, dado el límite preestablecido ($r \geq \pm 0.50$), se consideraron como correlaciones bajas. Además, se observó que ninguna especie tuvo una correlación significativa con el ENOS (Tabla 4).

Tabla 4. Resultados de las correlaciones entre el Índice de Temperatura Superficial del Mar (ITSM) y las concentraciones de copépodos y especies de dinoflagelados. Las variables que presentan correlaciones estadísticamente significativas ($p < 0.05$) están marcadas en color rojo.

Variables	ITSM (r)	p	ENOS (r)	p
Copépodos	0.46	0.001	-0.01	0.942
<i>S. nephroides</i>	0.10	0.491	0.01	0.963
<i>E. granulatum</i>	0.14	0.334	0.25	0.086
<i>E. delicatum</i>	-0.16	0.263	-0.04	0.781
<i>B. grande</i>	0.11	0.460	-0.09	0.539
<i>B. cariacense</i>	0.31	0.032	0.12	0.409
<i>B. irregular</i>	0.12	0.408	0.02	0.916
<i>B. simple</i>	0.10	0.491	0.21	0.156
<i>B. majusculum</i>	0.15	0.312	0.20	0.166
<i>Q. concreta</i>	-0.36	0.011	-0.03	0.824
<i>V. calvum</i>	-0.28	0.050	0.11	0.473
<i>L. oliva</i>	0.09	0.542	0.17	0.252
<i>L. sabrina</i>	0.10	0.516	-0.05	0.738
<i>I. aculeatum</i>	-0.31	0.029	0.11	0.434
<i>I. striatum</i>	-0.06	0.666	0.15	0.312
<i>O. israelianum</i>	0.24	0.094	-0.13	0.374
<i>Spiniferites</i> spp.	-0.53	0.000	0.20	0.161

Se agruparon las concentraciones de palinomorfos por estrategia trófica mediante la suma de sus abundancias. Se observó una baja correlación de dinoflagelados heterótrofos ($r = 0.11$, $p = 0.45$) con el ITSM, la cual no resultó significativa al tener $p > 0.05$. En cambio, los copépodos ($r = 0.46$, $p = 0.001$) y los dinoflagelados autótrofos ($r = -0.30$, $p = 0.038$), sí mostraron correlaciones significativas para $p < 0.05$ (Tabla 5).

Tabla 5. Correlación entre las concentraciones de copépodos, dinoflagelados heterótrofos y autótrofos, y el Índice de Temperatura Superficial del Mar (ITSM), con el valor p , respectivamente. Las variables que presentan correlaciones estadísticamente significativas ($p < 0.05$) están marcadas en color rojo.

Variables	ITSM (r)	p
Copépodos	0.46	0.001
Heterótrofos	0.11	0.45
Autótrofos	-0.30	0.038

3.3 Abundancia absoluta

3.3.1 Palinomorfos marinos

Los palinomorfos marinos incluyen tanto a copépodos como dinoflagelados autótrofos y heterótrofos. La Figura 4 muestra fluctuaciones de las concentraciones entre 204 y 3904 pal/gr sed, desde 1811 hasta 1907. Posteriormente, se observó un aumento de 5485 pal/gr sed en 1889, y las concentraciones más altas se observaron en 1901 con 13,200 pal/gr sed y en 1905 con 10,569 pal/gr sed (Figura 5).

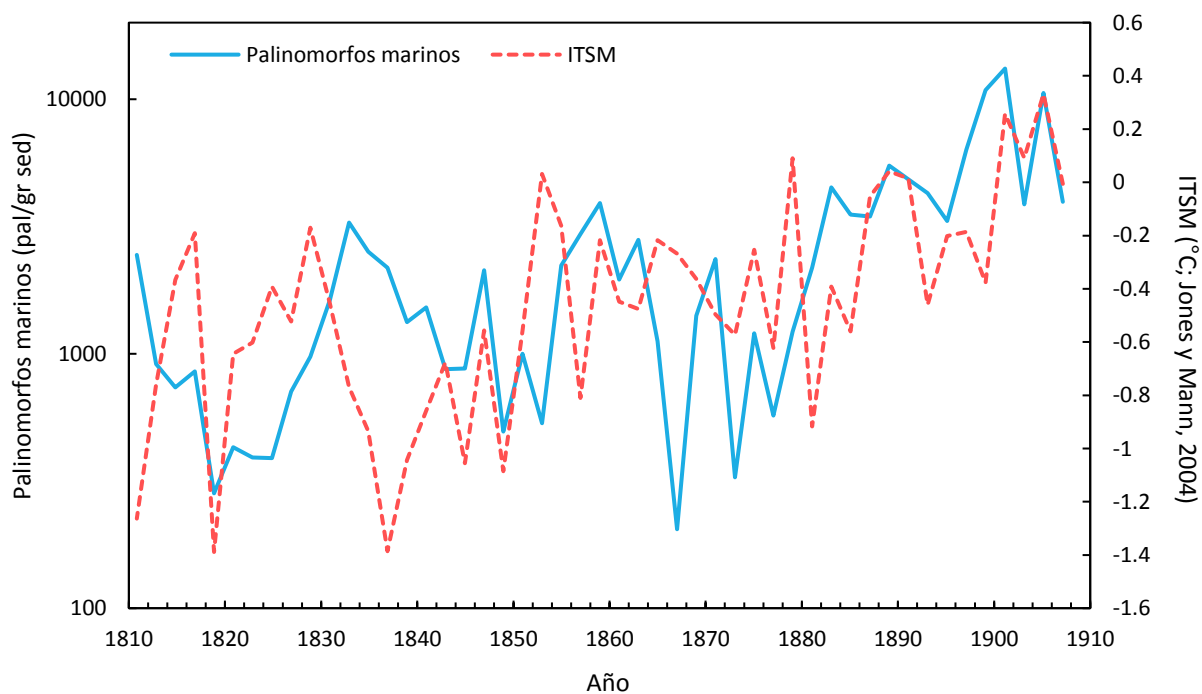


Figura 5. Comparación de las concentraciones de palinomorfos marinos y el Índice de Temperatura Superficial del Mar (ITSM) durante 1811 a 1907 en la Cuenca Magdalena, B.C.S., expresados en escala logarítmica base 10. La línea sólida representa la distribución de los dinoflagelados, la línea no continua representa el ITSM.

Se presentó una correlación significativa ($r= 0.45$, $p= 0.001$) con los valores del ITSM, lo cual se refleja en la concordancia del aumento general de palinomorfos marinos y ITSM durante el siglo XIX. Esta correlación contrasta con que, al disminuir la temperatura en 1837, 1857 y 1881, aumentaron las concentraciones de palinomorfos marinos; mientras que en 1853 y 1879, al aumentar el ITSM, disminuyeron las concentraciones de palinomorfos marinos.

3.3.2 Dinoflagelados

Las concentraciones de dinoflagelados (heterótrofos y autótrofos) fueron bajas, se mantuvieron en un rango entre 30 y 604 qst/gr sed en la mayor parte del núcleo, con la concentración mínima de 23 qst/gr sed en 1867, y la concentración máxima se observó en 1907 con 1053 qst/gr sed. En el año 1837 se observó una variación muy abrupta cuando disminuyó el ITSM, lo cual coincidió con un aumento en la concentración de dinoflagelados. El caso contrario ocurrió en todos los años donde se presentó una anomalía positiva: 1853, 1879, 1889, 1901 y 1905, en los cuales disminuyeron las concentraciones de dinoflagelados, siendo 1905 el año en el que se observó una mayor variación (Figura 6). Los dinoflagelados no presentaron una correlación significativa ($r= -0.02$, $p= 0.912$) con el ITSM, al tener $p > 0.05$.

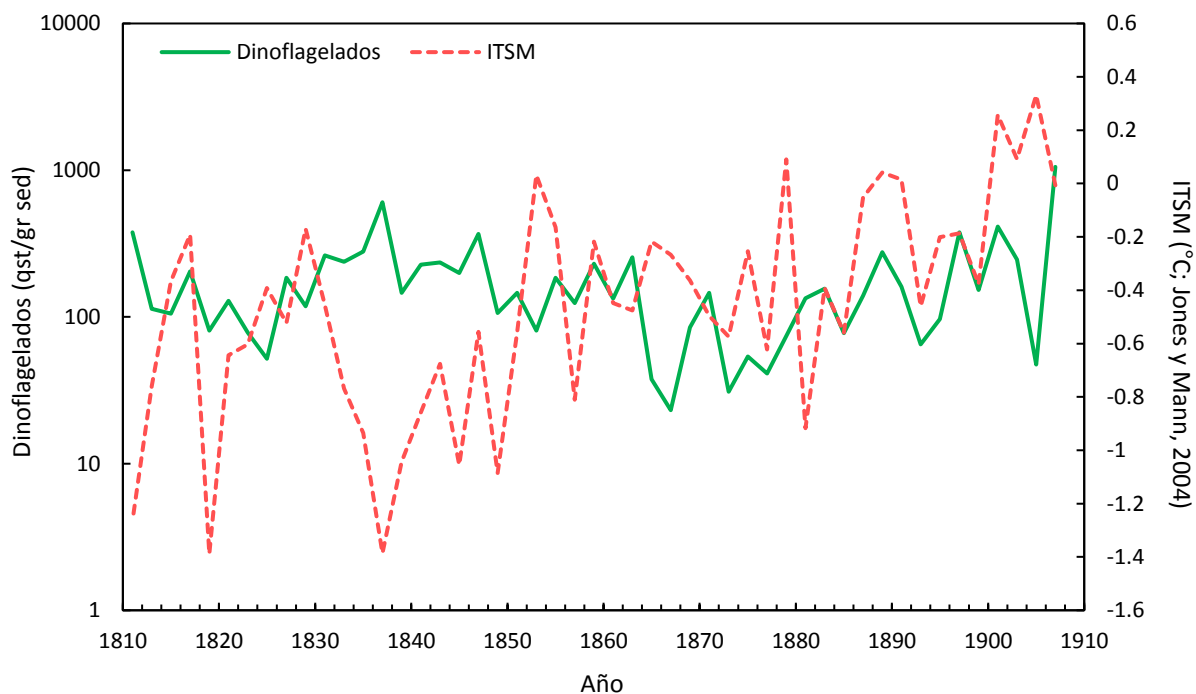


Figura 6. Comparación de las concentraciones de dinoflagelados y el Índice de Temperatura Superficial del Mar (ITSM) durante 1811 a 1907 en la Cuenca Magdalena, B.C.S., expresados en escala logarítmica base 10. La línea sólida representa la distribución de los dinoflagelados, la línea no continua representa el ITSM.

3.3.3 Dinoflagelados heterótrofos

Los dinoflagelados se subdividieron por su estrategia trófica en heterótrofos y autótrofos. Los heterótrofos representaron el componente más importante en las concentraciones de dinoflagelados totales, debido a que se encontraron en todas las muestras. Las concentraciones variaron de 17 a 308 qst/gr sed a lo largo de todo el núcleo. La concentración mínima se observó en 1867 con 3 qst/gr sed, y la máxima ocurrió en 1907 con 1053 qst/gr sed. En los años con anomalías positivas del ITSM, disminuyeron las concentraciones de heterótrofos, sin embargo, no fueron tan marcadas como en 1867. En los años con anomalías negativas, normalmente se encontraron altas concentraciones, por ejemplo, en el año 1837 (Figura 7). La correlación de dinoflagelados heterótrofos con el ITSM resultó menor que la de los autótrofos, tuvo un valor $r = 0.11$ y $p > 0.05$ ($p = 0.45$).

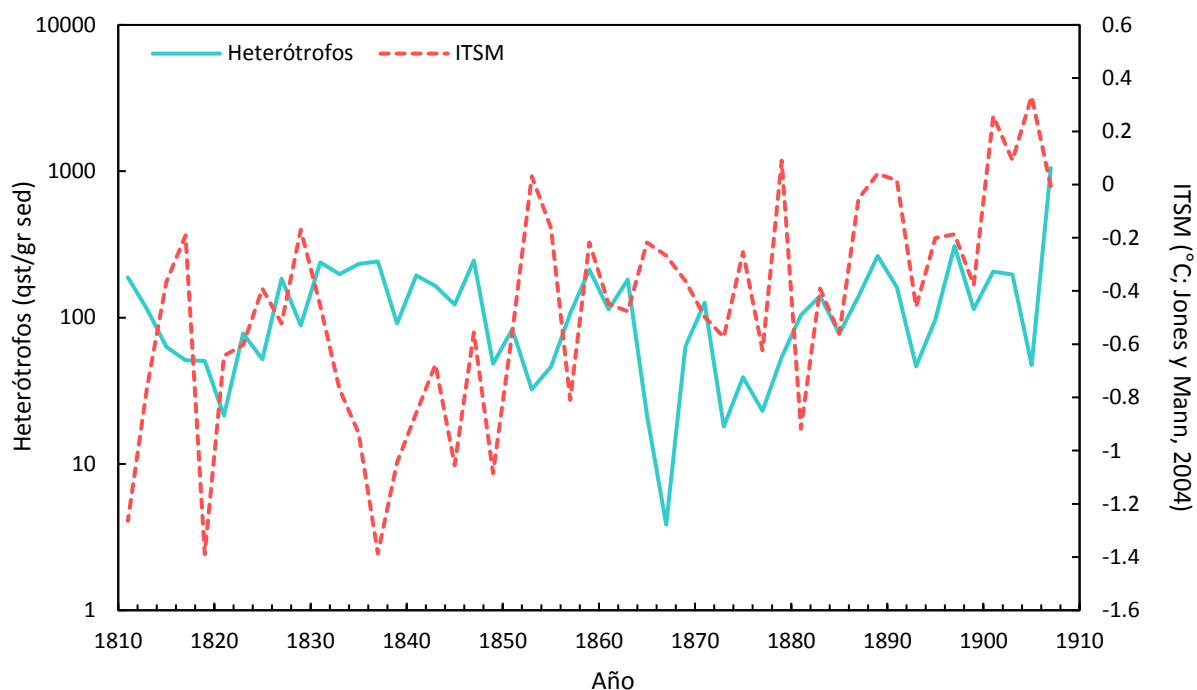


Figura 7. Comparación de las concentraciones de dinoflagelados heterótrofos y el Índice de Temperatura Superficial del Mar (ITSM) durante 1811 a 1907 en la Cuenca Magdalena, B.C.S., expresados en escala logarítmica base 10. La línea sólida representa la distribución de los dinoflagelados, la línea no continua representa el ITSM.

De los seis géneros de heterótrofos que se observaron, únicamente cuatro de ellos mantuvieron una presencia constante en todo el núcleo, estos fueron: *Selenopemphix*, *Quinquecuspis*, *Brigantedinium* y *Echinidinium*. Los otros dos géneros sólo se encontraron en algunas muestras. El género *Votadinium*

solamente se encontró en 3 muestras con un rango de concentraciones de 9 a 62 qst/gr sed, mientras que *Lejeunecysta* se observó en 2 muestras con un rango de 9 a 17 qst/gr sed.

La especie más observada fue *Selenopemphix nephroides*, se presentó en 45 muestras con un rango de 7 a 155 qst/gr sed. Su concentración mínima ocurrió en 1867 con 3.8 qst/gr sed, mientras que presentó varios incrementos en 1843 (164 qst/gr sed), 1847 (245 qst/gr sed) y 1859 (159 qst/gr sed), donde la concentración máxima se presentó en 1907 con 526 qst/gr sed. Las concentraciones fluctuaron sin relación aparente al ITSM. Sin embargo, se observó que de 1883 a 1893, las concentraciones siguieron el mismo patrón que el ITSM (Figura 8). Esta especie no se presentó en los años 1811, 1849, 1897 y 1905. La correlación con el ITSM no resultó significativa con $r= 0.10$ y $p= 0.491$.

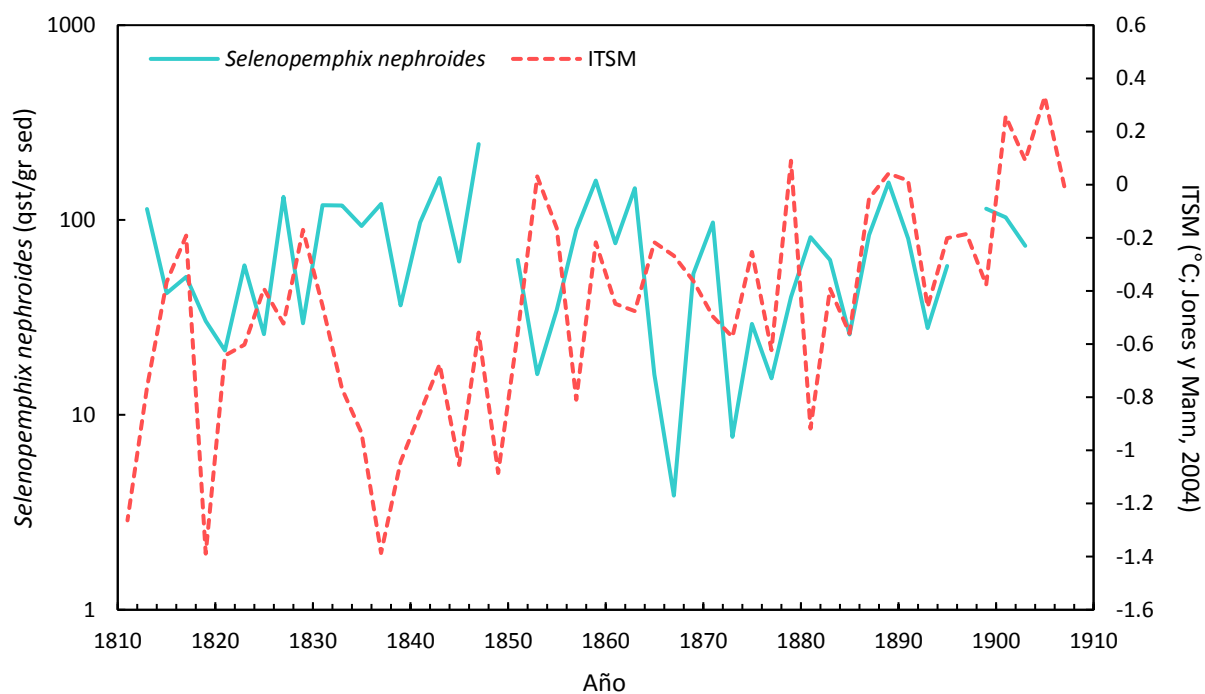


Figura 8. Comparación de las concentraciones de *Selenopemphix nephroides* y el Índice de Temperatura Superficial del Mar (ITSM) durante 1811 a 1907 en la Cuenca Magdalena, B.C.S., expresados en escala logarítmica base 10. La línea sólida representa la distribución de los dinoflagelados, la línea no continua representa el ITSM.

Los géneros *Echinidinium*, *Quinquecuspis* y *Brigantedinium* se encontraron en 21 muestras. *Echinidinium* se presentó a partir del año 1823 con abundancias de 4 a 263 qst/gr sed; *Quinquecuspis* presentó concentraciones de 2.5 a 125 qst/gr sed, después del año 1897 no se observó en las muestras; y

Brigantedinium se observó a partir de 1839 con un rango de concentraciones de 5 a 275 qst/gr sed (Figura 9).

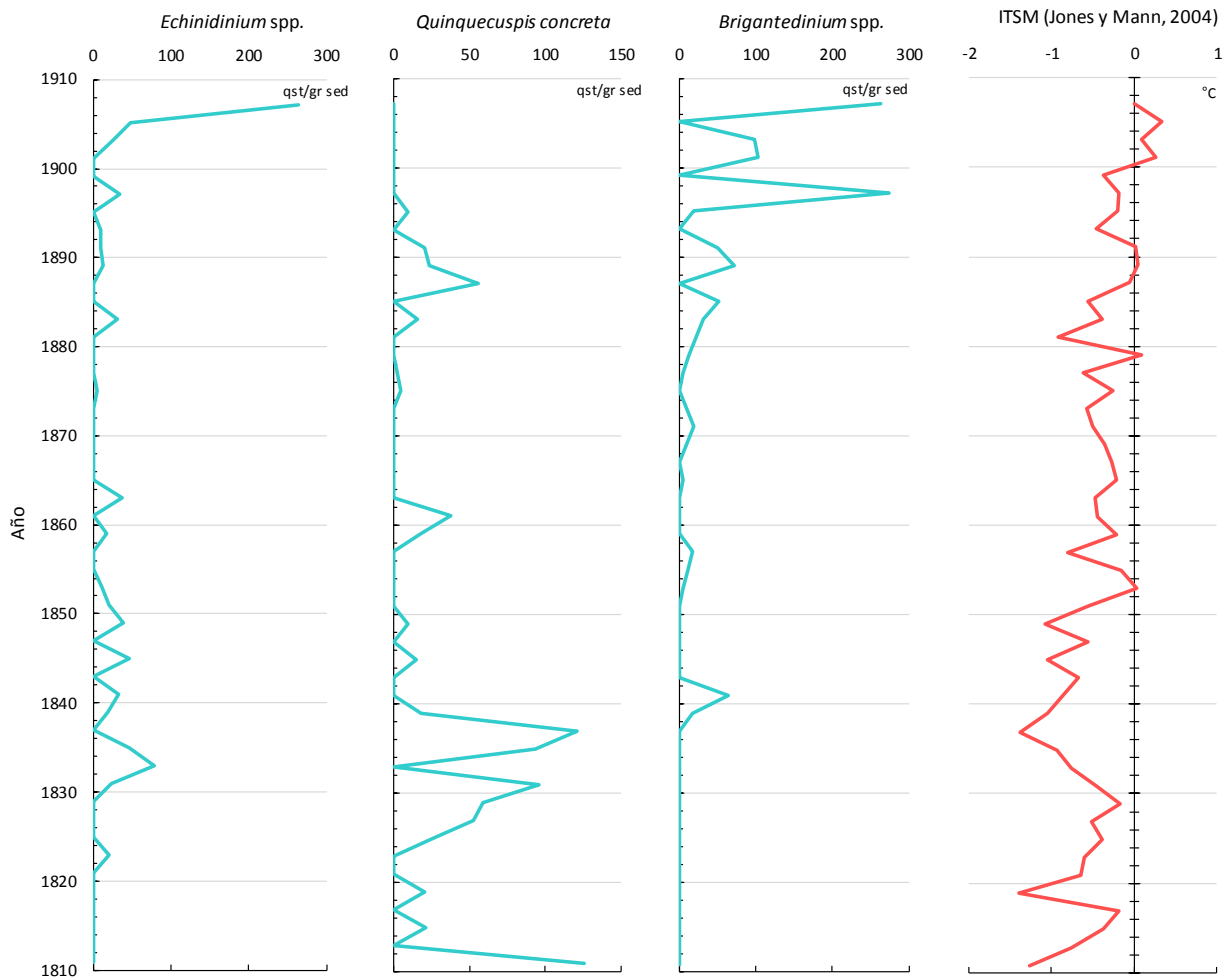


Figura 9. Concentraciones de los dinoflagelados heterotróficos *Echinidinium* spp., *Quinquecuspis concreta* y *Brigantedinium* spp. en el núcleo MAGD09-01MC3, comparados con el Índice de Temperatura Superficial del Mar (ITSM) durante 1811 a 1907 en la Cuenca Magdalena, B.C.S.

3.3.4 Dinoflagelados autótrofos

En general, las concentraciones oscilaron entre 12 y 206 qst/gr sed. La concentración mínima ocurrió en 1889 con 11 qst/gr sed, y la mayor concentración se presentó en 1837 con 362 qst/gr sed, donde se registró el ITSM más bajo (-1.38°C). No se encontraron quistes de autótrofos en los años 1813, 1823-1827, 1885-1887, 1891, 1895 y 1905-1907. En los años que se presentaron ITSM positivos, no se observó un

incremento en las concentraciones, a excepción del año 1901 (Figura 10). La correlación con el ITSM sí fue significativa e inversa, con $r = -0.30$ y $p = 0.038$.

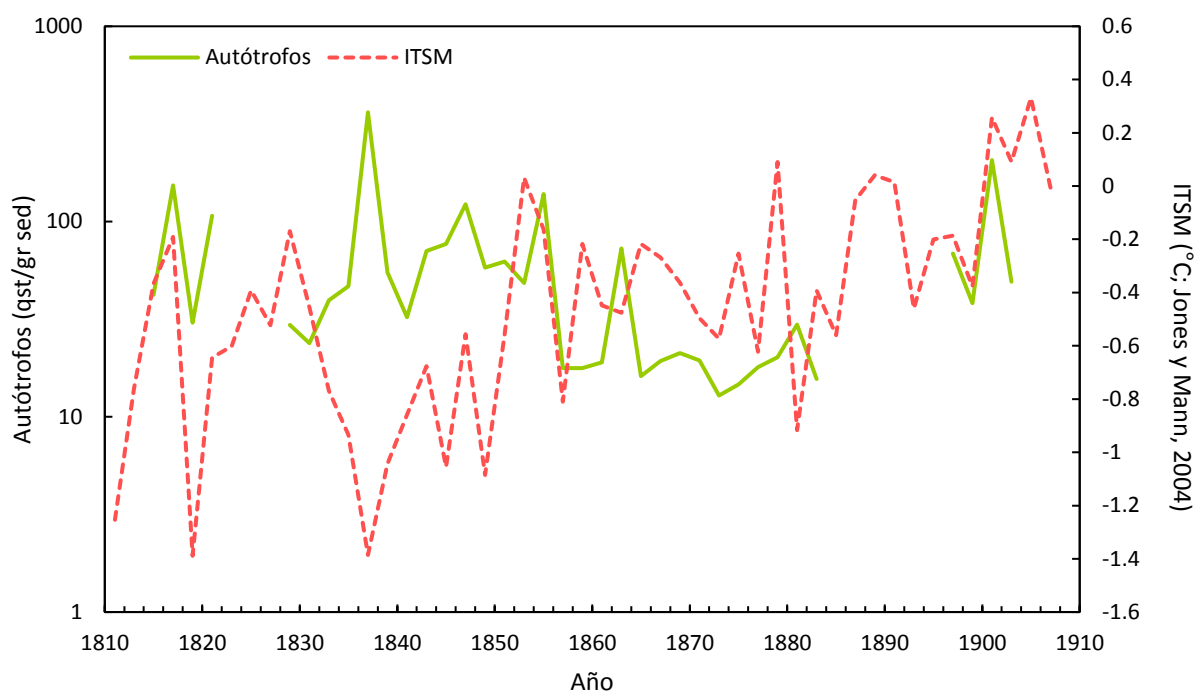


Figura 10. Comparación de las concentraciones de dinoflagelados autótrofos y el Índice de Temperatura Superficial del Mar (ITSM) durante 1811 a 1907 en la Cuenca Magdalena, B.C.S., expresados en escala logarítmica base 10. La línea sólida representa la distribución de los dinoflagelados, la línea no continua representa el ITSM.

Se observaron únicamente tres géneros de dinoflagelados autótrofos: *Impagidinium*, *Operculodinium* y *Spiniferites*, estas son especies características de regiones costeras, con la excepción del género *Impagidinium*, representativo de aguas tropicales a subtropicales, que puede presentar mayores concentraciones en zonas oceánicas (Zonneveld *et al.*, 2013).

De los tres géneros de autótrofos, sólo *Impagidinium* fue frecuente, mientras que *Operculodinium israelianum* y *Spiniferites* spp., se presentaron esporádicamente. *O. israelianum* se encontró a partir de 1831, con abundancias que oscilaron en un rango de 9 y 206 qst/gr sed en 9 muestras. Por su parte, *Spiniferites* spp. se presentó en 16 muestras, oscilando entre 2.5 y 125 qst/gr sed, y después del año 1877 no se encontró en las muestras (Figura 11).

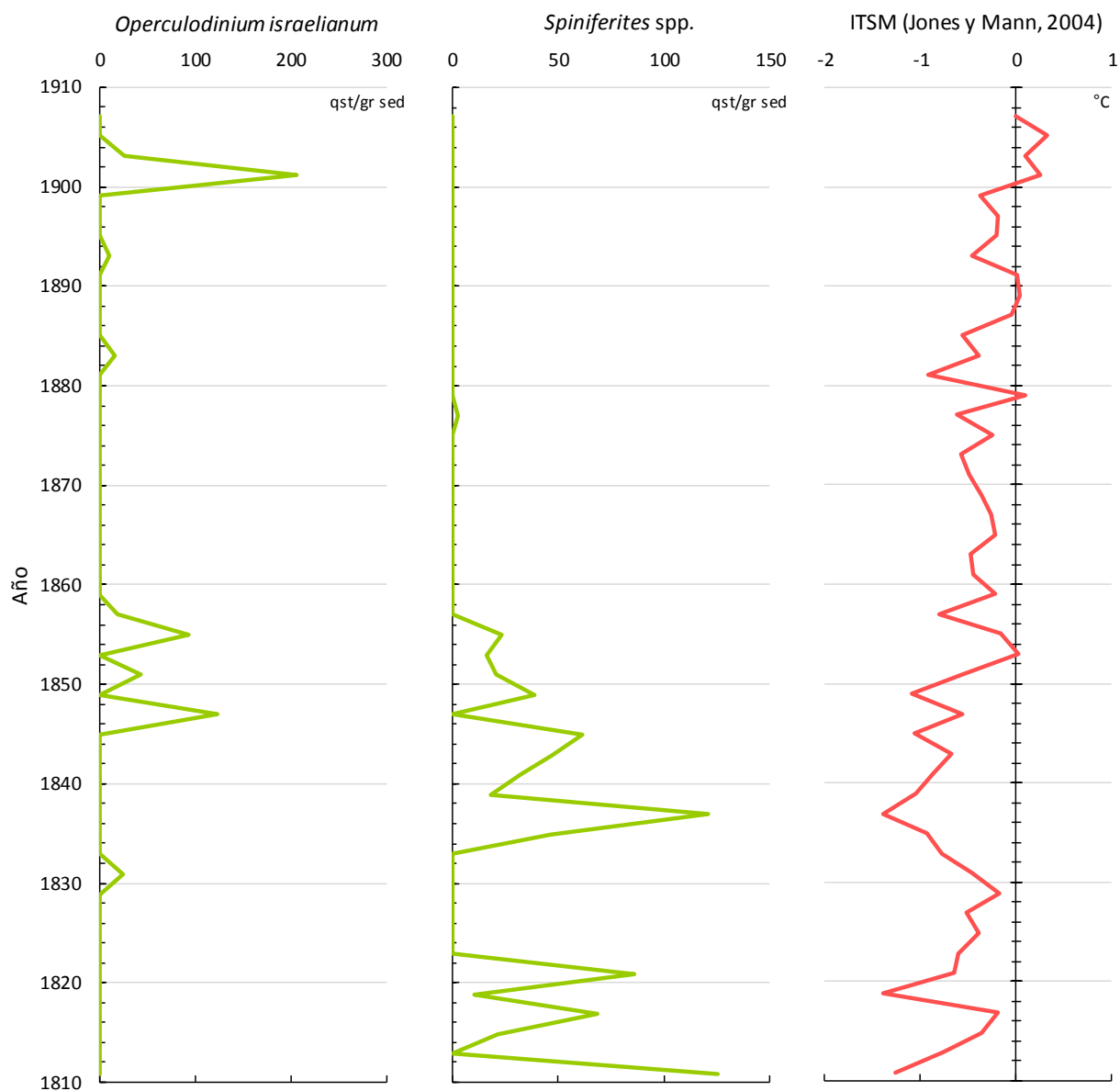


Figura 11. Concentraciones de los dinoflagelados autotróficos *Operculodinium israelianum* y *Spiniferites* spp. en el núcleo MAGD09-01MC3, comparados con el Índice de Temperatura Superficial del Mar (ITSM) durante 1811 a 1907 en la Cuenca Magdalena, B.C.S.

El género *Impagidinium* representó un componente importante de los autótrofos, debido a que se encontró en 31 muestras con abundancias entre 9 y 85 qst/gr sed. Su mayor concentración se presentó en 1837 con 241 qst/gr sed, la cual corresponde con un ITSM negativo, el mismo que se observó en la Figura 10. Cabe resaltar que este género no se encontró en los años donde se presentaron anomalías positivas del ITSM. Su correlación con el ITSM también fue significativa e inversa ($r = -0.33$, $p = 0.022$), al presentar $p < 0.05$ (Figura 12).

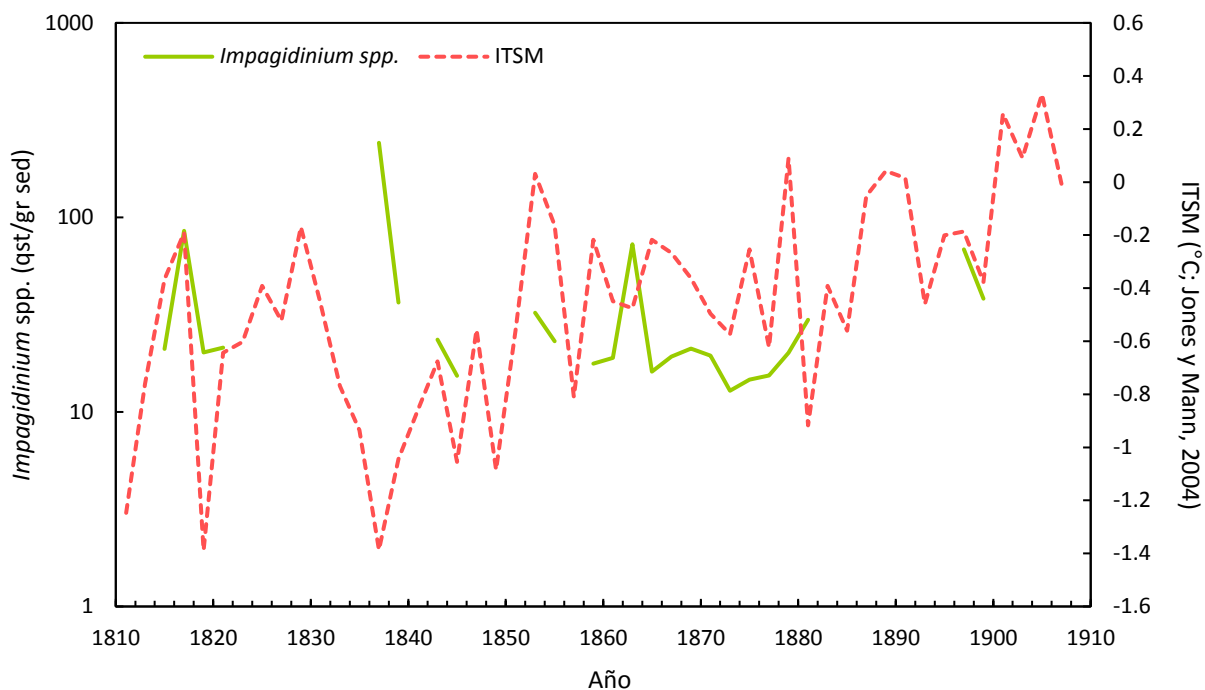


Figura 12. Comparación de las concentraciones de *Impagidinium spp.*, y el Índice de Temperatura Superficial del Mar (ITSM) durante 1811 a 1907 en la Cuenca Magdalena, B.C.S., expresados en escala logarítmica base 10. La línea sólida representa la distribución de los dinoflagelados, la línea no continua representa el ITSM.

3.3.5 Copépodos

Los copépodos se presentaron de manera constante en todas las muestras, por lo que representaron un factor importante dentro del grupo de palinomorfos marinos. La mayoría de sus concentraciones estuvieron dentro de un rango de 202 a 5960 cop/gr sed, coincidiendo con ITSM negativos. La concentración mínima se observó en 1867 con 181 cop/gr sed. Se evidenciaron aumentos en 1899 (10,722 cop/gr sed) y 1905 (10,521 cop/gr sed), los cuales coincidieron con los ITSM positivos (Figura 13). La concentración máxima ocurrió en 1901 con 12,787 cop/gr sed. La correlación con el ITSM sí fue significativa y directa, al presentar $r= 0.46$ y $p < 0.05$ ($p= 0.001$).

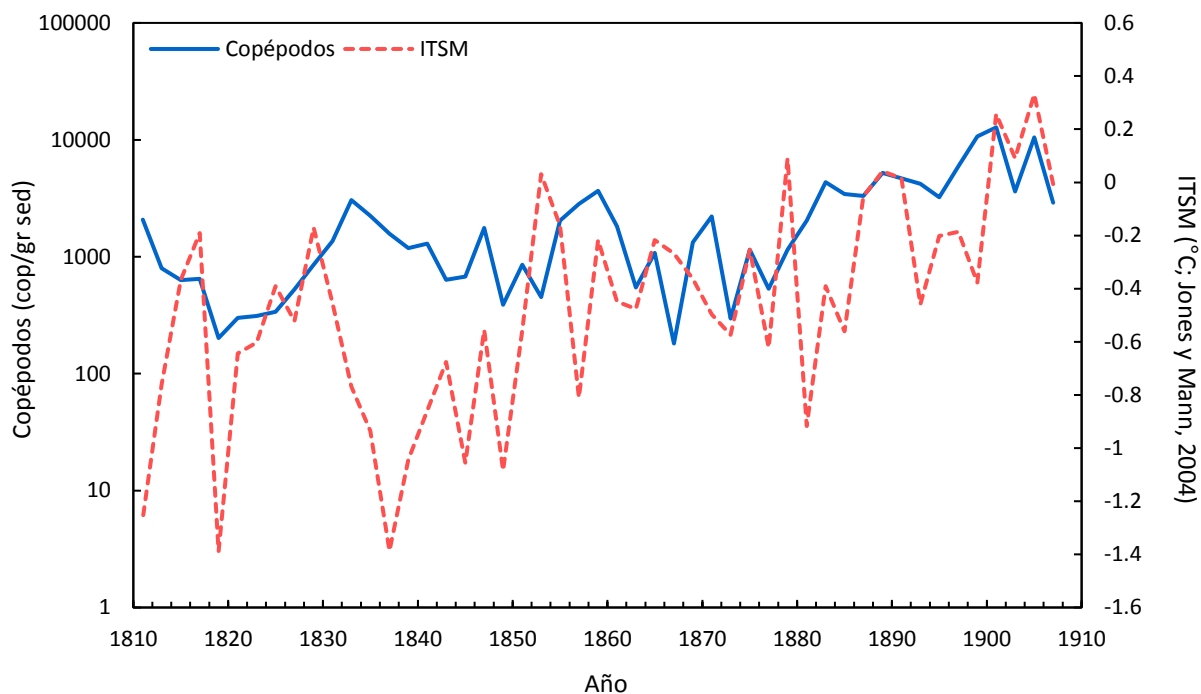


Figura 13. Comparación de las concentraciones de copépodos y el Índice de Temperatura Superficial del Mar (ITSM) durante 1811 a 1907 en la Cuenca Magdalena, B.C.S., expresados en escala logarítmica base 10. La línea sólida representa la distribución de los dinoflagelados, la línea no continua representa el ITSM.

3.3.6 El Niño Oscilación del Sur (ENOS) y la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP)

Las concentraciones de copépodos, *S. nephroides* e *Impagidinium* spp., no mostraron una relación clara con el ENOS. Sólo en los años 1837, 1843, 1847, 1871 y 1905, al presentarse un evento ENOS negativo (Niña= frío, color azul en Figura 14), aumentaron las concentraciones de tales palinomorfos. Los periodos ENOS cálidos (Niño= cálido, color rosa en Figura 14) en los años 1821, 1845, 1853, 1867 y 1877, concordaron con una disminución en las concentraciones de quistes y copépodos (Figura 14).

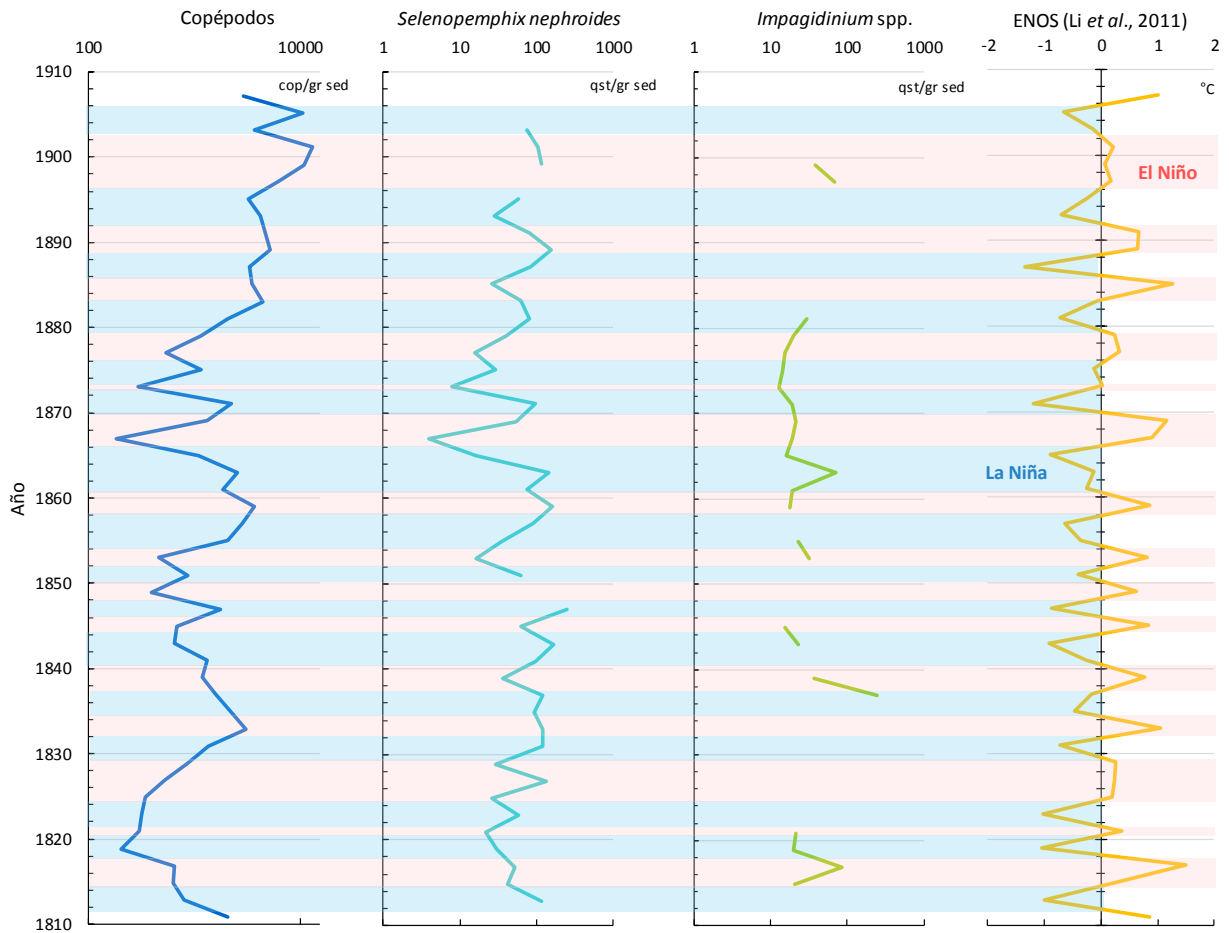


Figura 14. Comparación de las concentraciones de copépodos, *Selenopemphix nephroides*, *Impagidinium* spp., con las variaciones de anomalías de temperatura (°C) generadas por El Niño Oscilación del Sur (ENOS) reportado por Li *et al.* (2011), durante 1811 a 1907 en la Cuenca Magdalena, B.C.S., expresados en escala logarítmica base 10.

Las abundancias de copépodos se relacionaron con la ODP en ciertas condiciones, dado que al presentarse una ODP negativa (frío), aumentaron sus concentraciones en los años 1879-1887 y 1897-1905, y al presentarse una ODP positiva (cálida), las concentraciones disminuyeron en los años 1819 y 1853. Sin embargo, las especies heterotróficas y autotróficas no mostraron este mismo comportamiento, debido a que fluctuaron de manera irregular en todo el núcleo (Figura 15).

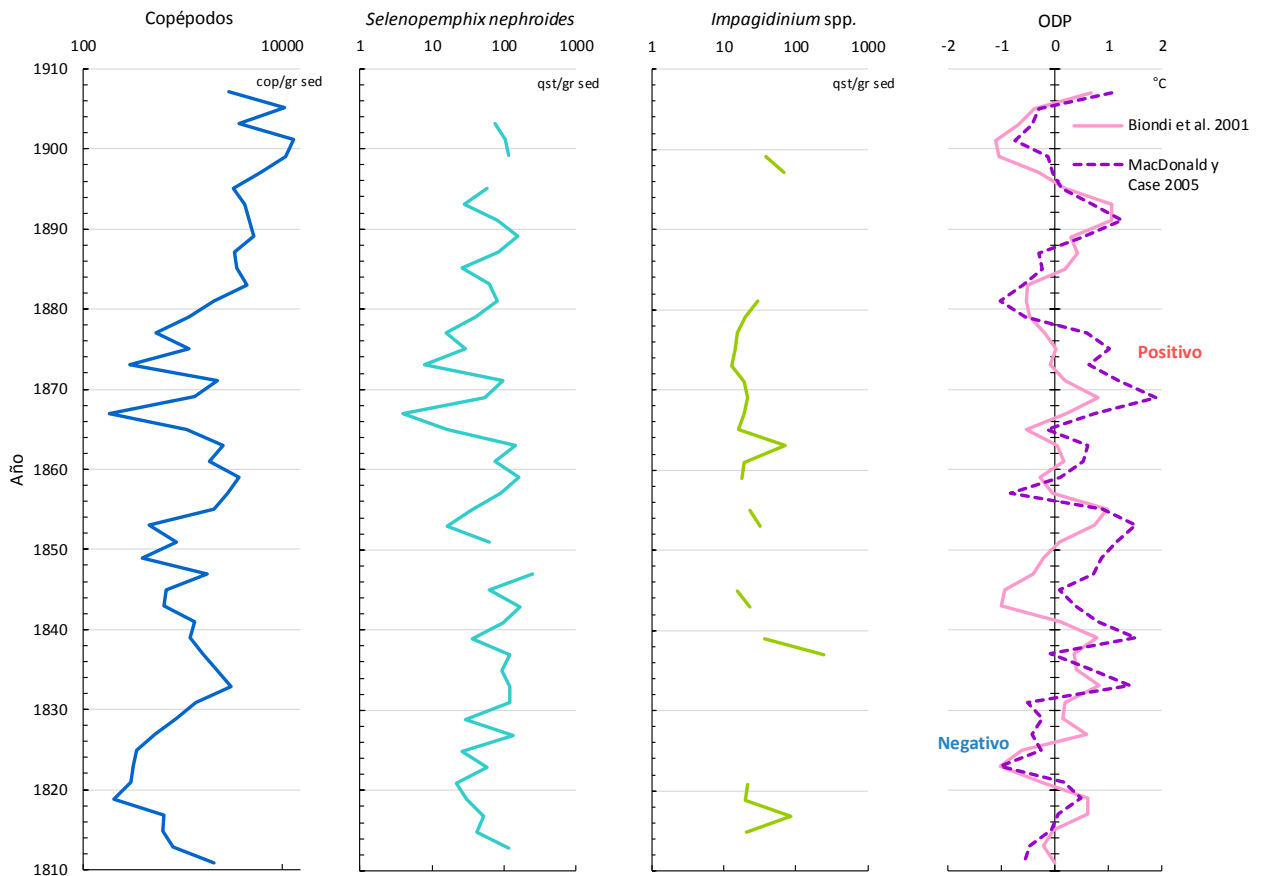


Figura 15. Comparación de las concentraciones de copépodos, *Selenopemphix nephroides*, *Impagidinium* spp., con las variaciones de anomalías de temperatura (°C) generadas por la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP) reportadas por Biondi *et al.* (2001) en línea sólida y MacDonald y Case (2005) en línea no continua, durante 1811 a 1907 en la Cuenca Magdalena, B.C.S., expresados en escala logarítmica base 10.

Para determinar la relación entre las concentraciones y la combinación de los factores ENOS y ODP, se compararon los valores de estos índices, lo cual destaca las zonas de coincidencia climática tanto fría, es decir, La Niña con ODP- (color azul), como cálida, es decir, El Niño con ODP+ (color rosa). En la Figura 16 se muestran sólo aquellos intervalos donde coincidieron las polaridades de los valores ENOS y ODP. Se observó que en los años 1881-1883 y 1905 (La Niña, ODP-), hubo un aumento en las concentraciones de taxa, mientras que en los periodos cálidos (El Niño, ODP+), en los años 1817, 1853 y 1867, se mostró una disminución en las concentraciones de taxa (Figura 16).

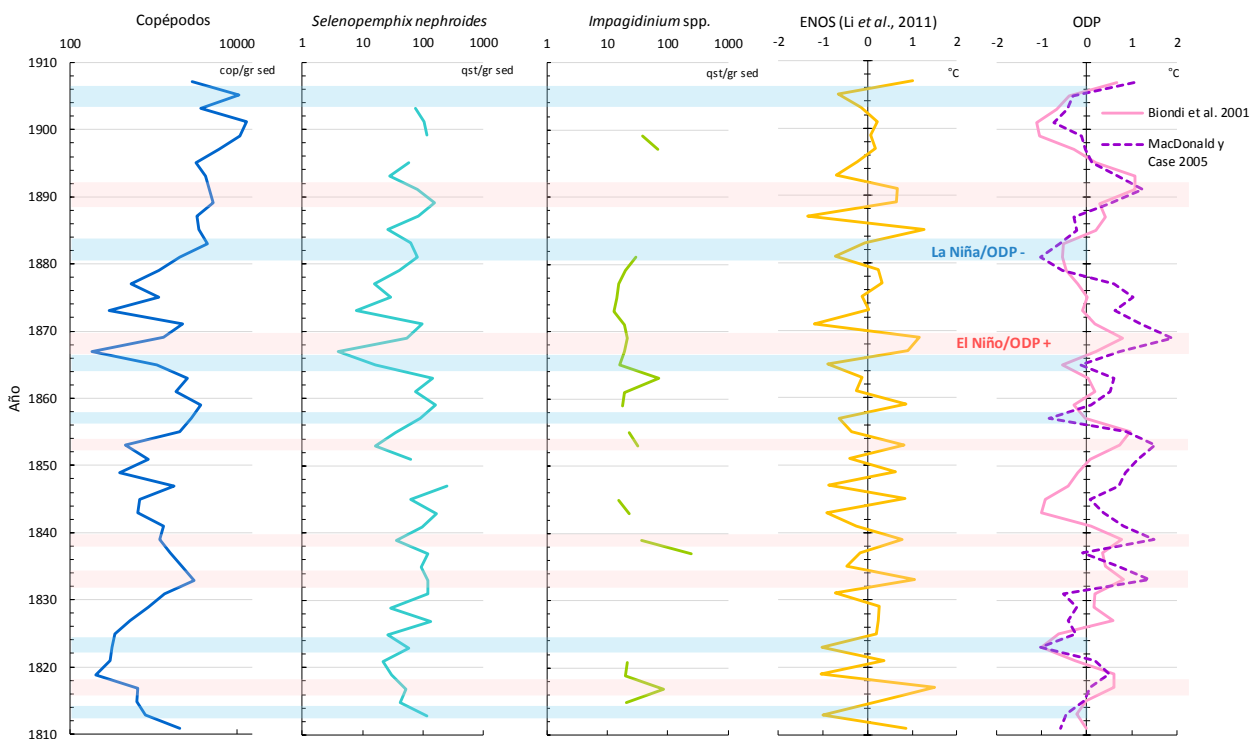


Figura 16. Comparación de las concentraciones de copépodos, *Selenopemphix nephroides*, *Impagidinium* spp., con El Niño Oscilación del Sur (ENOS) reportado por Li *et al.* (2011), y la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP) reportados por Biondi *et al.* (2001) en línea sólida y MacDonal y Case (2005) en línea no continua, durante 1811 a 1907 en la Cuenca Magdalena, B.C.S., expresados en escala logarítmica base 10. Los intervalos donde coincidieron evento La Niña y ODP-, y El Niño con ODP+ están señalados con azul y rosa, respectivamente.

3.4 Análisis Multivariado

El Análisis de Correlación Canónica (ACC) se realizó para determinar la correlación canónica entre el Índice de Temperatura Superficial del Mar (ITSM) y el ENOS (variables independientes), y los datos palinológicos (variables dependientes). El resumen de los resultados se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Resultados obtenidos del Análisis de Correlación Canónica (ACC).

N=49	R canónica: 0.67352 Chi ² (26)= 41.292 p= 0.02908	
	Conjunto de la izquierda	Conjunto de la derecha
No. de variables	2	13
Varianza extraída	100%	17.93%
Redundancia total	39.54%	7.18%
Variables: 1	ITSM	Copépodos
2	ENOS	<i>S. nephroides</i>
3		<i>E. granulatum</i>
4		<i>E. delicatum</i>
5		<i>B. grande</i>
6		<i>B. cariacense</i>
7		<i>B. irregular</i>
8		<i>B. simple</i>
9		<i>B. majusculum</i>
10		<i>Q. concreta</i>
11		<i>I. aculeatum</i>
12		<i>I. striatum</i>
13		<i>O. israelianum</i>

Se comprobó que se cumplieran con los supuestos de normalidad y homocedasticidad. La homocedasticidad de varianza se comprobó para cada grupo de variables mediante la prueba de Levene, considerando como prueba de hipótesis:

H₀: Las variables palinológicas y los índices climáticos son homogéneos ($p > 0.05$)

H₁: Las variables palinológicas y los índices climáticos no son homogéneos ($p < 0.05$)

Se obtuvo al 95% de nivel de confianza ($p > 0.05$) que los datos son homogéneos, por lo que se acepta la hipótesis nula.

El ACC arrojó un coeficiente de correlación canónica (r_i) o variable canónica estadísticamente significativo, considerando las hipótesis:

$$H_0: r_i = 0$$

$$H_1: r_i \neq 0$$

El número máximo de raíces que se extrajo fue igual al número más pequeño de variables en cualquier conjunto. En este caso, dado que sólo hubo dos variables (ITSM y ENOS) en el primer conjunto (izquierda), únicamente se extrajeron dos raíces canónicas (Tabla 7).

Tabla 7. Coeficientes de correlación canónica obtenidos para el Índice de Temperatura Superficial del Mar (ITSM), El Niño Oscilación del Sur (ENOS), y las variables palinológicas, estadísticamente significativas ($p < 0.05$).

Coeficiente de correlación canónica (r_i)	p
0.67	0.02908
0.58	0.14545

Se comprobó la existencia de los coeficientes de correlación canónica por medio de la prueba Chi-cuadrada χ^2 , donde se observó que sólo existe el primer coeficiente, debido al valor $p < 0.05$ (Tabla 8). Se aceptó la hipótesis alterna (H_1), ya que los coeficientes de correlación canónica son heterogéneos al presentar $p \neq 0$ en el primer coeficiente canónico.

Tabla 8. Prueba Chi-cuadrada para la comprobación de los coeficientes de correlación canónica.

Raíz eliminada	R Canónica	R-sqr. canónica	Chi-sqr.	df	p	Lambda prima
0	0.673521	0.453630	41.29165	26	0.02908	0.356190
1	0.589982	0.348079	17.11328	12	0.14545	0.651921

De acuerdo con lo anterior, el ACC permitió inferir una variante canónica o combinación lineal entre las variables climáticas y las variables palinológicas.

Las cargas del factor canónico se refieren a la correlación general de las variables respectivas con la variable canónica. La variante canónica con un $r_1 = 67\%$ mostró que los copépodos, la especie heterótrofa *Q. concreta*, y las especies autotróficas *I. aculeatum* y *O. israelianum* (0.57 Copépodos + 0.42 *O. israelianum* - 0.49 *I. aculeatum* - 0.41 *Q. concreta* ≈ 0.75 ITSM - 0.56 ENOS), presentaron cargas sustanciales con las variables climáticas, es decir, tienen una alta correlación con esos factores (Tabla 9 y 10).

Tabla 9. Valores de carga del factor canónico (estructura de factores) para las variables climáticas (ITSM y ENOS). Los valores mayores a ± 0.30 (color rojo) se tomaron para realizar la interpretación, debido a que se consideraron como alta correlación ($r > \pm 0.30$).

Variable	Raíz 1	Raíz 2
ITSM	-0.759680	-0.650297
ENOS	0.566889	-0.823794

Tabla 10. Valores de carga del factor canónico (estructura de factores) para las variables palinológicas (copépodos y dinoflagelados). Los valores mayores a ± 0.30 (color rojo) se tomaron para realizar la interpretación, debido a que se consideraron como alta correlación ($r > \pm 0.30$).

Variable	Raíz 1	Raíz 2
Copépodos	-0.577960	-0.432220
<i>S. nephroides</i>	-0.117348	-0.106025
<i>E. granulatum</i>	0.067467	-0.457301
<i>E. delicatum</i>	0.161128	0.210414
<i>B. grande</i>	-0.220355	0.012017
<i>B. cariacense</i>	-0.260592	-0.452691
<i>B. irregular</i>	-0.133520	-0.136733
<i>B. simple</i>	0.076083	-0.364041
<i>B. majusculum</i>	0.013925	-0.402966
<i>Q. concreta</i>	0.413417	0.391905
<i>I. aculeatum</i>	0.495596	0.153837
<i>I. striatum</i>	0.220846	-0.129769
<i>O. israelianum</i>	-0.423279	-0.065243

Se infiere que los copépodos y *O. israelianum* están altamente definidos por el ITSM, mientras que *I. aculeatum* y *Q. concreta* están medianamente definidos por el ENOS.

Los valores obtenidos de la fracción de la varianza total explicada por el coeficiente canónico entre el subconjunto de variables y la redundancia se muestran en las Tablas 11 y 12. La varianza extraída indica el promedio de varianza extraída de las variables en el respectivo conjunto por todas las raíces canónicas. Por lo tanto, la única raíz extrajo el 100% de la varianza del conjunto de la izquierda (ITSM y ENOS), y el 17.93% de la varianza del conjunto de la derecha (copépodos y dinoflagelados).

La redundancia se refiere a la cantidad de la variabilidad real que en un conjunto de variables se explican por el otro conjunto de variables. Las variables palinológicas explicaron el 7.18% de la varianza del ITSM y ENOS, y de forma recíproca, el ITSM y ENOS explicaron el 39.54% de la varianza de las variables palinológicas (Tabla 11 y 12).

Tabla 11. Varianza extraída y redundancia de las variables climáticas (ITSM y ENOS).

Raíz variable	Varianza extraída	Redundancia
Raíz 1	0.449238	0.203788
Raíz 2	0.550762	0.191709

Tabla 12. Varianza extraída y redundancia de las variables palinológicas (copépodos y dinoflagelados).

Raíz variable	Varianza extraída	Redundancia
Raíz 1	0.089466	0.040585
Raíz 2	0.089883	0.031286

Capítulo 4. Discusiones

Los datos obtenidos se relacionaron y compararon con estudios previos cercanos a la zona de estudio. Se identificaron las variaciones paleoceanográficas y paleoclimáticas con los índices climáticos regionales: el Índice de Temperatura Superficial del Mar, evento El Niño Oscilación del Sur y la Oscilación Decadal del Pacífico.

4.1 Productividad primaria y TSM

En general, durante el siglo XIX en la región, las concentraciones de copépodos fueron altas, mientras que las de dinoflagelados fueron bajas (Tabla 13). Considerando que de 1800 a 1900 las anomalías en el ITSM fueron mayormente negativas, se esperaría lo contrario. El ITSM durante el siglo XIX tendió a ser más frío. Sólo se presentaron siete años con anomalías positivas: en 1853 (0.03°C), 1879 (0.09°C), 1889 (0.04°C), 1891 (0.01°C), 1901 (0.25°C), 1903 (0.09°C) y 1905 (0.33°C). A partir de 1900, el ITSM tendió a ser más cálido. Las condiciones frías explican porque no se observaron dinoflagelados típicamente tropicales como *Stelladinium stellatum*, *Bitectatodinium spongium* o *Polysphaeridium zoharyi*, los cuales se han observado en esta cuenca en el intervalo de 1907 a 2009 (Castañeda-Quezada, 2016).

Tabla 13. Promedios de las concentraciones de palinomorfos marinos (pal/gr sed) con su desviación estándar (σ) en la Cuenca Magdalena de 1811 a 2009.

	1811-1907	σ	1811-1879	σ	1881-1907	σ	1907-2009	σ
Autótrofos	48.87	65.95	55.91	69.30	31.29	52.79	64.20	327.36
Heterótrofos	137.77	152.53	108.43	74.68	211.12	244.87	1308.37	2894.95
Copépodos	2407.32	2694.84	1227.47	883.97	5499.83	3228.98	931.94	987.45

De 1811 a 1907 el ITSM fue variable, pero presentó una tendencia fría de 1811 a 1879, y un aumento gradual particularmente obvio de 1881 a 1907. Las concentraciones de los palinomorfos reflejaron esta variabilidad, ya que los copépodos y quistes de heterótrofos disminuyeron de 1811 a 1879, y aumentaron de 1881 a 1907. En oposición, las concentraciones de autótrofos aumentaron de 1811 a 1879, y disminuyeron de 1881 a 1907. Opuestamente a la aparente relación entre aguas frías y alta productividad, estos cambios indicaron que los copépodos y heterótrofos proliferaban durante intervalos cálidos, cuando

aparentemente había más energía para intensificar las surgencias. Por el contrario, los dinoflagelados autótrofos proliferaban en periodos de surgencias menos intensas, cuando podían competir favorablemente contra las diatomeas.

A pesar de la falta de especies netamente tropicales, de 1811 a 1907 hubo una fuerte influencia de la Corriente Norecuatorial en la región, por lo que predominaron especies de dinoflagelados característicos de regiones costeras, además de heterótrofos de aguas ecuatoriales a templadas como *S. nephroides*, *Q. concreta*, *E. granulatum*, además de *Brigantedinium* spp. y copépodos. Con la excepción del género autótrofo *Impagidinium*, el cual es común en aguas tropicales a subtropicales, y se presenta en mayores concentraciones en zonas oceánicas (Zonneveld *et al.*, 2013).

Las especies heterótrofas *Brigantedinium* y *Echinidinium* han sido relacionadas con la productividad primaria durante la mayor parte del Holoceno en la Cuenca de Santa Bárbara, y se observaron en este estudio, indicando una influencia continua de surgencias costeras en la cuenca, características de la hidrodinámica de la región (Zaitsev *et al.*, 2014). Sin embargo, además de los promedios de las concentraciones totales de dinoflagelados, los promedios en las concentraciones de *Brigantedinium* (\bar{x}), que es uno de los taxa más comunes actualmente, indicaron que la productividad en la Cuenca Magdalena fue mucho menor de 1811 a 1907 (\bar{x} = 23.83 qst/gr sed) que de 1906 a 2008 (\bar{x} = 882.28 qst/gr sed; Castañeda-Quezada, 2016), y que en la Cuenca San Lázaro de 1965 a 2009 (\bar{x} = 980.43 qst/gr sed; Pérez-Rodríguez, 2016; Serrano-Mejía, 2016).

Se observó una fuerte tendencia centenaria hacia el aumento de productividad paralelo al calentamiento de la TSM. La comparación de las concentraciones de dinoflagelados en la Cuenca Magdalena en el siglo XIX y XX (Tabla 13), muestra los cambios en la productividad primaria en esta región. En el siglo XIX, las concentraciones totales de heterótrofos fueron de 6751 qst/gr sed, mientras que en el siglo XX fueron de 68,615 qst/gr sed (Castañeda-Quezada, 2016). De la misma manera, las concentraciones de autótrofos en el siglo XIX fueron de 2322 qst/gr sed, y en el siglo XX fue de 3270 qst/gr sed, indicando un aumento significativo en la productividad hacia el siglo XX.

La baja productividad del siglo XIX en la región también está asociada con una disminución en el porcentaje de ópalo biogénico (Juárez *et al.*, 2014). Hacia el norte, en la Cuenca de Santa Bárbara, durante el intervalo de 1863-1899 también se presentaron disminuciones en las concentraciones totales de quistes y simultáneamente del porcentaje de sílice biogénico (Bringué *et al.*, 2014). La disminución en la productividad de diatomeas está asociada con un menor porcentaje de ópalo, relacionado al

debilitamiento de las surgencias y/o decrecimiento en el suministro de nutrientes (Barron *et al.*, 2013; Bringué *et al.*, 2014; Juárez *et al.*, 2014). La disminución en la productividad también se vio reflejado en los valores bajos de la abundancia relativa del silicoflagelado *Distephanus speculum* (taxón de surgencias) de 1810 a 1850 (Barron *et al.*, 2013).

Los resultados del Análisis de Correlación Canónica (ACC) reflejaron que los copépodos y *O. israelianum* estuvieron altamente definidos por el ITSM, en cambio, *I. aculeatum* y *Q. concreta* se encontraron modulados medianamente por el ENOS. El ITSM indicó que el siglo XIX fue mayormente frío, y el agrupamiento de las especies en el ACC son características de aguas ecuatoriales a templadas, por lo que se infiere que no son restringidas por la temperatura, sino por la productividad primaria.

La correlación de las abundancias con el ITSM fue baja, debido a que los efectos de la temperatura no son lineales por la presencia de estratificación (Bringué *et al.*, 2014). También pudo influir el submuestreo, las restricciones cronológicas y el no contar con una serie de datos de TSM de una región más cercana al área de estudio.

4.2 Productividad primaria, ENOS y ODP

Aunque la tendencia constante y gradual del calentamiento en la TSM es una fuente importante de cambios a largo plazo, otros eventos interanuales a decadales producen cambios en los conjuntos palinológicos observados en la Cuenca Magdalena. Los eventos de variabilidad climática más conocidos en el Pacífico NE son el ENOS y la ODP, y aquí se emplearon los índices reconstruidos ENOS (Li *et al.*, 2011) y ODP (Biondi *et al.*, 2001; MacDonald y Case, 2005) para comparar y correlacionar con los datos obtenidos.

No se encontró una correlación significativa cuando se compararon las concentraciones de palinomorfo marinos del intervalo 1811-1907 con estos índices. Sin embargo, cambios en las concentraciones de algunos taxa están asociados con la interacción de estos forzamientos climáticos. En los años 1881-1883 y 1905, cambios en los copépodos y en las especies heterotróficas: *S. nephroides*, *Brigantedinium* y *Echinidinium*, resaltaron la señal de los ciclos fríos La Niña/ODP-. Mientras que cambios en el género autótrofo *Impagidinium*, coincidieron con la señal de los ciclos cálidos El Niño/ODP+ en los años 1817, 1853 y 1867.

Estas observaciones confirmaron el paradigma de que la mayoría de los organismos planctónicos heterotróficos (copépodos y dinoflagelados heterótrofos), dependen considerablemente de las poblaciones de diatomeas, y responden siguiendo los florecimientos de estas algas en condiciones de turbulencia (ODP-) (Flores-Trujillo, 2009; Bringué *et al.*, 2014). En comparación, 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.

En la región sur de la Corriente de California, las anomalías de TSM positivas/cálidas (El Niño) tienden a inhibir la productividad de los palinomorfos marinos, mientras que las anomalías negativas/frías (La Niña) tienden a promoverlas (Ortiz Ahumada, 2015). Además, los registros del contenido de ópalo biogénico y carbono orgánico en los sedimentos del margen de Magdalena, sugieren que la productividad primaria ha incrementado desde AD 1400 hasta el presente, y es concurrente con la disminución de eventos El Niño (Juárez *et al.*, 2014).

Las correlaciones de las concentraciones de palinomorfos marinos con el ENOS y la ODP fueron bajas, esta discrepancia pudo ser causada por la ubicación geográfica de los sitios donde se realizó la dendrocronología (Alberta, Canadá; y Sur de California a San Pedro Mártir). Además, podrían deberse a una señal más débil de ambas reconstrucciones a lo largo del siglo XIX y principios del siglo XX (Bringué *et al.* 2014), es decir, que no se presentaron eventos tan intensos, y a que la Cuenca Magdalena es una zona de transición de aguas subárticas y subtropicales sobre la plataforma continental.

4.3 Importancia de los dinoflagelados en la actualidad

Los estudios de las poblaciones antiguas de dinoflagelados permiten conocer el impacto que generan los cambios climáticos y antropogénicos en sus variaciones, por lo tanto, son importantes para realizar reconstrucciones ambientales en eventos de florecimientos de dinoflagelados (FAN) del pasado, ya que los quistes de resistencia son más abundantes durante y al final de los FAN. Estas variaciones se deben a cambios en la productividad primaria, vinculados a las condiciones superficiales del mar como el suministro de nutrientes, la estratificación y las surgencias (Peña-Manjarrez *et al.*, 2016).

La respuesta de los dinoflagelados es diferente, dependiendo de su estrategia trófica. Los dinoflagelados nocivos responden a la temperatura y la salinidad. Igualmente, exhiben un movimiento dirigido en

respuesta a los estímulos químicos, la gravedad y la luz. La mayoría de los dinoflagelados que causan los FAN son especies fotosintéticas, pueden causar enfermedades o la muerte de organismos por depredación o parasitismo, y/o causar cambios indeseables en los hábitats (García-Mendoza *et al.*, 2016).

Las actividades humanas como la sobrepesca y la degradación de la calidad del agua, pueden afectar potencialmente las poblaciones de dinoflagelados. Por ejemplo, el aumento de la turbidez en el desarrollo de cuencas hidrográficas ha disminuido las poblaciones de dinoflagelados bentónicos nocivos como ciertos productores de ciguatoxinas. Mientras que, en algunos sistemas planctónicos, los flagelados se han favorecido en comparación con las diatomeas. Este desarrollo también ha aumentado el suministro de macronutrientes como el nitrógeno y el fósforo en aguas receptoras, incluidas las sustancias orgánicas tóxicas como la urea; y ha alterado los aportes de metales traza y las propiedades de los agentes quelantes del ácido húmico o materia orgánica del suelo (Burkholder *et al.*, 2006).

Estos cambios han favorecido a algunas especies de dinoflagelados fototróficos nocivos. Incluso, ciertos dinoflagelados heterotróficos nocivos de vida libre pueden ser estimulados indirectamente por la contaminación de nutrientes, a través del incremento en la abundancia de presas de algas u otros mecanismos (Burkholder *et al.*, 2006).

Capítulo 5. Conclusiones

La riqueza y las concentraciones de las 16 especies de dinoflagelados (\bar{x} = 186.64 qst/gr sed) y de copépodos (\bar{x} = 2407.32 cop/gr sed) fueron bajas, lo cual correspondió con la baja productividad en esta cuenca, y coincidió con anomalías mayormente negativas en el ITSM durante el siglo XIX.

La concentración de los palinomorfos marinos se correlacionó directamente con el ITSM (r = 0.45, p = 0.001).

Los dinoflagelados autótrofos fueron menos abundantes, pero mostraron correlaciones estadísticamente significativas e inversas (r = -0.30, p = 0.038) con el ITSM.

La correlación de los palinomorfos marinos con las reconstrucciones del ENOS y la ODP no resultaron significativas.

Se encontró un predominio de especies de regiones costeras, características de aguas ecuatoriales a templadas, excepto *Impagidinium* de aguas tropicales a subtropicales.

La constancia y abundancia de los taxa heterotróficos *S. nephroides*, *Q. concreta*, *Brigantedinium* y *Echinidinium*, así como el autótrofo *Impagidinium*, los señala como indicadores de condiciones de alta productividad que pueden ser empleados en reconstrucciones paleoambientales de tiempos más remotos.

Se sugiere que se realicen más estudios en esta región, para corroborar si normalmente predomina una baja productividad, y así poder comprender los factores que la afectan.

Literatura citada

- Aguirre, E. 1989. Nuevas tendencias: Paleontología. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid.
- Alonso-Rodríguez, R. y Ochoa, J.L. 2004. Hydrology of winter-spring "red tides" in Bahía de Mazatlán, Sinaloa, México. *Harmful Algae*. 3: 163-171
- Anderson, D.M. 1989. Toxic algal bloom and red tides: a global perspective. En: Okaichi, T., Anderson, D.M. y Nemoto, T. (Eds.). *Red Tides: Biology, Environmental Science and Technology*. Elsevier. (pp. 11-16).
- Anderson, D.M., Glibert, P.M. y Burkholder, J.M. 2002. Harmful algal blooms and eutrophication: Nutrient sources, composition and consequences. *Estuaries*. 25: 562-584
- Barron, J.A., Bukry, D., Field, D.B. y 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
- Benninghoff, W.S. 1962. Calculations of pollen and spore density in sediments by addition of exotic pollen in known quantities. *Pollen Spores*. 4: 332
- Briffa, K.R., Jones, P.D. y Schweingruber, F.H. 1992. Tree ring density reconstructions of summer temperature patterns across western North America since 1600. *Journal of Climate*. 5: 735-752
- Biondi, F., Gershunov, A. y Cayan, D.R. 2001. North Pacific decadal climate variability since 1661. *Journal of Climate*. 14(1): 5-10
- Bringué, M., Pospelova, V. y Pak, D. 2013. Seasonal production of organic-walled dinoflagellate cysts in an upwelling system: A sediment trap study from the Santa Barbara Basin, California. *Marine Micropaleontology*. 100: 34-5
- Bringué, M., Pospelova, V. y Field, D.B. 2014. High resolution sedimentary record of dinoflagellate cysts reflects decadal variability and 20th century warming in the Santa Barbara Basin. *Quaternary Science Reviews*. 105: 86-101
- Burkholder, J.M., Azanza, R.V. y Sako, Y. 2006. The Ecology of Harmful Dinoflagellates. En: Granéli, E., Turner, J.T. (Eds.). *Ecology of Harmful Algae, Ecological Studies 189*. Springer Science & Business Media. Alemania. (pp. 53-64).
- Bütschli, O. 1885. II. Abtheilung: Mastigophora. En: Dr. H.G. Bronn's Klassen und Ordnungen des Thier-Reichs, wissenschaftlich dargestellt in Wort und Bild (Eds). Erster Band Protozoa. Leipzig y Heidelberg: C.F. Winter'sche Verlagsbuchhandlung. (pp. 865-1088)
- Castañeda-Quezada, J.R. 2016. 100 años de Dinoflagelados y cambios Paleoceanográficos en Cuenca Magdalena, Baja California Sur. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, México. 77 pp.
- Cervantes-Duarte, R., Prego, R., Gaxiola-Castro, G., López-López, S., Aguirre-Bahena, F. y Murillo-Murillo, I. 2015. Intra-annual upwelling patterns and its linkage with primary production in the euphotic zone (24.5°N) of Southern Baja California coast. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 157: 51-58

- Davis, J.C. 2002. *Statistics and data analysis in Geology*. (3ª ed.). John Wiley & Sons, New York.
- De la Lanza-Espino, G. 2001. *Características fisicoquímicas de los mares de México*. Plaza y Valdez, México.
- Durazo, R., Gaxiola-Castro, G., Lavaniegos, B., Castro-Valdez, R., Gómez-Valdés, J. y Mascarenhas, Jr.A. 2005. Condiciones oceanográficas frente a la costa occidental de Baja California, 2002-2003: Influencia de un Niño débil y del incremento de agua subártica. *Ciencias Marinas*. 31(3): 537-552
- Emery, K.O. y Hülsemann, J. 1962. The relationship of sediments, life and waters in a marine basin. *Deep Sea Research*. 8(3-4):165-180
- Esparza-Álvarez, M.A. 1999. Variabilidad de la comunidad de diatomeas en los sedimentos de la cuenca de San Lázaro, Baja California Sur, México. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, México. 163 pp.
- Esparza-Álvarez, M.A., Herguera, J.C. y Lange, C. 2007. Last century patterns of sea surface temperatures and diatom (>38 μm) variability in the Southern California current. *Marine Micropaleontology*. 64: 18-35
- Evitt, W.R. 1985. Sporopollenin Dinoflagellate Cysts. Their Morphology and interpretation. American Association of Stratigraphic Palynologists Foundation.
- Fensome, R.A., Gocht, H., Stover, L.E. y Williams, G.L. 1991. The Eisenack Catalog of Fossil Dinoflagellates. New Series. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, Germany. Volumen 1.
- Fensome, R.A., Taylor, F.J.R., Norris, G., Sarjeant, W.A., Wharton, D.I., y Williams, G.L. 1993. *Micropaleontology, Special Publication, 7: A Classification of Modern and Fossil Dinoflagellates*. Sheridan Press, Hanover, NH.
- Fernández de Puellas, M.L. 2015. Clase Maxillipoda, subclase Copepoda, orden Calanoida. *Revista IDE@SEA*. 89: 1-27
- Flores-Trujillo, J.G. 2009. Registro palinológico en sedimentos laminados de la parte sur del Golfo de California y su relación con cambios paleoceanográficos y paleoclimáticos. Unpublished Ph.D. Dissertation. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. 120 pp.
- Flores-Trujillo, J.G., Helenes, J., Herguera, J.C. y Orellana-Cepeda, E. 2009. Palynological record (1483–1994) of *Gymnodinium catenatum* in Pescadero Basin, southern Gulf of California, Mexico. *Marine Micropaleontology*. 73: 80-89
- Gallardo-Rodríguez, J.J. 2009. Ingeniería de bioprocesos en el cultivo de dinoflagelados. Tesis de Doctorado en Ciencias. Universidad de Almería. 211 pp.
- García-Mendoza, E., Quijano-Scheggia, S.I., Olivos-Ortiz, A. y Núñez-Vázquez, E.J. (Eds.). 2016. *Florecimientos Algas Nocivos en México*. CICESE. Ensenada, México. 438 p.
- Glibert, P.M., Anderson, D.A., Gentien, P., Granéli, E. y Sellner, K.G. 2005. The global, complex phenomena of harmful algal blooms. *Oceanography*. 18(2): 136-147
- Gómez, F. 2005. A list of free-living dinoflagellate species in the world's oceans. *Acta Botanica Croatia*. 64(1): 129-212

- González-Verdugo, J.A., Salcedo-Sánchez, E.R., Espinoza-Ayala, M.J. y Martínez-Morales, M. 2015. Datación de sedimentos recientes utilizando isótopos radioactivos en el río Verde, en el estado de Oaxaca, México. *Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY*. 19(3): 138-145, ISSN 1665-529-X.
- Hallegraeff, G.M. 1993. A review of harmful algal blooms and their apparent global increase. *Phycologia*. 32: 79-99
- Hernández de la Torre, B., Gaxiola-Castro, G. y Nájera-Martínez, S. 2004. Efectos del ENSO en la producción primaria frente a Baja California. *Ciencias Marinas*. 30(3): 427-441
- Jacoby, G.C. y D'Arrigo, R.D. 1989. Reconstructed Northern Hemisphere annual temperature since 1671 based on high latitude tree-ring data from North America. *Climatic Change*. 14: 39-59
- Jiménez-Pérez, L.C. y Lara-Lara, J.R. 1988. Zooplankton biomass and copepod community structure in the Gulf of California during the 1982-1983 El Niño event. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports*. 29: 122-128
- Jones, P.D. y Mann, M.E. 2004. Climate over past millennia. *Reviews of Geophysics*. 42, RG2002, doi:10.1029/2003RG000143.
- Juárez, M., Sánchez, A. y González-Yajimovich, O. 2014. Variabilidad de la productividad biológica marina en el Pacífico nororiental durante el último milenio. *Ciencias Marinas*. 40(4): 211-220
- Lavaniegos, B.E. 2014. Crustáceos planctónicos como indicadores de variabilidad climática y corrientes marinas. En: González Zuarth, C.A., Vallarino, A., Pérez-Jiménez, J.C. y Low Pfeng, A.M. (Eds.). *Bioindicadores: Guardianes de nuestro futuro ambiental*. El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). México. (pp. 147-170).
- Li, J., Xie, S.-P., Cook, E.R., Huang, G., D'Arrigo, R., Liu, F., Ma, J. y Zheng, X.-T. 2011. Interdecadal modulation of El Niño amplitude during the past millennium. *Nature Climate Change*. 1(2): 114-118
- Linsley, B.K., Wellington, G.M. y Schrag, D.P. 2000. Decadal Sea Surface Temperature Variability in the Subtropical South Pacific from 1726 to 1997 A.D. *Science*. 290: 1145-1148
- Luckman, B.H., Briffa, K.R., Jones, P.D. y Schweingruber, F.H. 1997. Tree-ring based reconstruction of summer temperatures at the Columbia Icefield, Alberta, Canada, A.D. 1073-1983. *Holocene*. 7: 375-389
- Lundholm, N., Ribeiro, S., Andersen, T.J., Koch, T., Godhe, A., Ekelund, F. y Ellegaard, M. 2011. Buried alive-germination of up to 100 years-old marine dinoflagellate resting stage. *Phycologia*. 50: 629-640
- MacDonald, G.M. y Case, R.A. 2005. Variations in the Pacific Decadal Oscillation over the past millennium. *Geophysical Research Letters*. 32: L08703
- Mann, M.E., Bradley, R.S. y Hughes, M.K. 1998. Global scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries. *Nature*. 392: 779-787
- Mantua, N.J., Hare, S.R., Zhang, Y., Wallace, J.M. y Francis, R.C. 1997. A Pacific decadal climate oscillation with impacts on salmon. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 78: 1069-1079

- Maturana, J., Bello, M., y Manley, M. 2004. Antecedentes históricos y descripción del fenómeno El Niño, Oscilación del Sur. Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile, Departamento de Oceanografía.
- Matsuoka, K. y Fukuyo, Y. 1994. Geographical Distribution of the Toxin Dinoflagellate *Gymnodinium catenatum* Graham in Japanese Coastal Waters. *Botanica Marina*. 37: 495-503
- Miyazono, A., Nagai, S., Kudo, I. y Tanizawa, K. 2012. Viability of *Alexandrium tamarense* cysts in the sediment of Funka Bay, Hokkaido, Japan: Over a hundred-year survival times for cysts. *Harmful Algae*. 16: 81-88
- Moestrup, Ø., Lindberg, K. y Daugbjerg, N. 2009. Studies on woloszynskioid dinoflagellates IV: the genus *Biecheleria* gen. nov. *Phycological Research*. 57: 203-220
- Molina, E. (Ed.). 2017. Micropaleontología. 3a edición. Prensas de la Universidad de Zaragoza. España. 686 p.
- Moore, S.K., Trainer, V.L., Mantua, N.J., Parker, M.S., Laws, E.A., Backer, L.C., y Fleming, L.E. 2008. Impacts of climate variability and future climate change on harmful algal blooms and human health. *Environmental Health*. 7(Suppl 2): S4, doi:10.1186/1476-069X-7-S2-S4
- Neil Mertens, K., Verhoeven, K., Verleye, T., Louwye, S., Amorim, A., Ribeiro, S., Deaf, A.S., Harding, I.C., De Schepper, S., González, C., Kodrans-Nsiah, M., De Vernal, A., Henry, M., Radi, T., Dybkjaer, K., Poulsen, N.E., Feist-Burkhardt, S., Chitolie, J., Heilmann-Clausen, C., Londeix, L., Turon, J.-L., Marret, F., Matthiessen, J., McCarthy, F.M.G., Prasad, V., Pospelova, V., Kyffin Hughes, J.E., Riding, J.B., Rochon, A., Sangiorgi, F., Welters, N., Sinclair, N., Thun, C., Soliman, A., Van Nieuwenhove, N., Vink, A. y Young, M. 2009. Determining the absolute abundance of dinoflagellate cysts in recent marine sediments: The *Lycopodium* marker-grain method put to the test. *Review of Palaeobotany and Palynology*. 157(3-4): 238-252 (doi: 10.1016/j.revpalbo.2009.05.004).
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). 2018. El Niño/Southern Oscillation (ENSO) Technical Discussion. Consultado el 23 de abril de 2018, de <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/enso-tech.php>
- Olivier-Salomé, B. 1998. Fertilidad de la corriente de California para los últimos 130 años: preservación, calibración y reconstrucción. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, México. 122 pp.
- Ortiz Ahumada, J.C. 2015. Variación espacial y temporal de la biomasa y producción fitoplanctónicas frente a Cabo San Lázaro y Cabo San Lucas, B.C.S. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, México. 40 pp.
- Parsons, M.L., Dortch, Q. y Turner, R.E. 2002. Sedimentological evidence of an increase in *Pseudo-nitzschia* (Bacillariophyceae) abundance in response to coastal eutrophication. *Limnology and Oceanography*. 47: 551-558
- Peña-Manjarrez, J.L., Gaxiola-Castro, G., Helenes-Escamilla, J. y Orellana-Cepeda, E. 2001. Cysts of *Lingulodinium polyedrum*, red tide producing organism in the Todos Santos Bay (winter-spring, 2000). *Ciencias Marinas*. 27(4): 543-558

- Peña-Manjarrez, J.L., Flores-Trujillo, J.G. y Helenes-Escamilla, J. 2016. Quistes de dinoflagelados de pared orgánica en las costas de México. En: García-Mendoza, E., Quijano-Scheggia, S.I., Olivos-Ortiz, A. y Núñez-Vázquez, E.J. (Eds.). Florecimientos Algales Nocivos en México. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. (pp. 108-123).
- Pérez-Rodríguez, J.C. 2016. Registro palinológico en sedimentos laminados de la cuenca San Lázaro, Baja California Sur y su relación con cambios paleoceanográficos y paleoclimáticos de 1967 a 1988. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, México. 50 pp.
- Prauss, M.L. 2002. Recent global warming and its influence on marine palynology within the central Santa Barbara Basin, offshore Southern California, U.S.A. *Palynology*. 26(1): 217-238
- Reimer, J.J., Vargas, R., Rivas, D., Gaxiola-Castro, G., Hernández-Ayon, J.M. y Lara-Lara, R. 2015. Sea Surface Temperature Influence on Terrestrial Gross Primary Production along the Southern California Current: *PLoS ONE*. 10(4): 1-15
- Ribeiro, S., Terje, B., Lundholm, N., Andersen, T.J., Abrantes, F. y Ellegaard, E. 2011. Phytoplankton growth after a century of dormancy illuminates past resilience to catastrophic darkness. *Nature Communications*. 2: 311
- Rochon, A., de Vernal, A., Turon, J.-L., Matthiessen, J. y Head, M.J. 1999. Distribution of Recent dinoflagellate cysts in surface sediments from the North Atlantic Ocean and adjacent seas in relation to sea-surface parameters. *American Association of Stratigraphic Palynologists, Contributions Series*. 35: 1-146
- Serrano-Mejía, C.G. 2016. Registro palinológico en sedimentos laminados de la cuenca San Lázaro, Baja California Sur y su relación con cambios paleoceanográficos y paleoclimáticos de 1988 a 2009. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, México. 47 pp.
- Smayda, T.J. 1990. Novel and nuisance phytoplankton blooms in the sea: Evidence for a global epidemic. En: Granéli, E., Sundstrom, B., Edler, L. y Anderson, D.M. (Eds.). *Toxic Marine Phytoplankton*. Elsevier, New York. (pp. 29-40).
- Snyder, M.A., Sloan, L.C., Diffenbaugh, N.S. y Bell, J.L. 2003. Future climate change and upwelling in the California Current. *Geophysical Research Letters*. 30(15), 1823, doi:10.1029/2003GL017647
- StatSoft, Inc. Electronic Statistics Textbook. 2013. Consultado el 18 de junio de 2018, de <http://www.statsoft.com/textbook/>
- Stover, L.E., Brinkhuis, H., Damassa, S.P., De Verteuil, L., Helby, R.J., Monteil, E., Partridge, A.D., Powell, A.J., Riding, J.B., Smelror, M. y Williams, G.L. 1996. Mesozoic-Tertiary dinoflagellates, acritarchs and prasinophytes. En: Jansonius, J. y McGregor, D.C. (Eds.). *Palynology: principles and applications*. American Association of Stratigraphic Palynologists Foundation, Dallas. (pp. 641-750).
- Uye, S., Kasahara, A. y Onbé, T. 1979. Calanoid copepod eggs in sea-bottom muds. IV. Effects of some environmental factors on the hatching resting eggs. *Marine Biology*. 51(2): 151-156

- Vives, F. y Shmeleva, A. 2007. Crustacea, Copépodos marinos I. Calanoida. En: Fauna Ibérica 29. en Ramos, M.A. *et al.* (Eds.). Museo Nacional de Ciencias Naturales, CSIC. Madrid. 1152 pp.
- Williams, G.L., Fensome, R.A. y MacRae, R.A. 2017. DINOFLAJ3. American Association of Stratigraphic Palynologists, Data Series No. 2. Consultado el 28 de julio de 2017, de <http://dinoflaj.smu.ca/dinoflaj3>
- Wood, G.D., Gabriel, A.M. y Lawson J.C. 1996. Palynological techniques processing and microscopy. Palynology: Principles and applications. *American Association of Stratigraphic Palynologists Foundation*. 1: 29-50
- Zaitsev, O., Trasviña-Castro, A., Linero-Cueto, J., Gaxiola-Castro, G. y Cepeda-Morales, J. 2014. Condiciones oceanográficas en la plataforma continental frente a bahía Magdalena (México) en 2011–2012. *Ciencias Marinas*. 40(2): 89-112
- Zhou, M. 2005. Which is the trigger factor to the outbreak of large scale *Prorocentrum* blooms in the East China Sea? HABs and Eutrophication Open Science Meeting; Baltimore MD. Abstract only.
- Zonneveld, K.A.F., Marret, F., Versteegh, G.J.M., Bogus, K., Bonnet, S., Bouimetarhan, I., Crouch, E., de Vernal, A., Elshanawany, R., Edwards, L., Esper, O., Forke, S., Grøsfjeld, K., Henry, M., Holzwarth, U., Kieft, J.-F., Kim, S.Y., Ladouceur, S., Ledu, D., Chen, L., Limoges, A., Londeix, L., Lu, S.-H., Mahmoud, M.S., Marino, G., Matsouka, K., Matthessen, J., Mildenhall, D.C., Mudie, P., Neil, H.L., Pospelova, V., Qi, Y., Radi, T., Richerol, T., Rochon, A., Sangiorgi, F., Solignac, S., Turon, J.L., Verleye, T., Wang, Y., Wang, Z.H., Young, M. 2013. Atlas of modern dinoflagellate cyst distribution based on 2405 data points. *Review of Palaeobotany and Palynology*. 191: 1-197
- Zonneveld, K.A.F. y Pospelova, V. 2015. A determination key for modern dinoflagellate cysts. *Palynology*. 39(3): 387-409