

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



---

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

---

**Modelo climático para el sur del Golfo de California a partir del  
registro palinológico marino**

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

Presenta:

**Andrés Felipe Duque Herrera**

Ensenada, Baja California, México  
2020

Tesis defendida por  
**Andrés Felipe Duque Herrera**

y aprobada por el siguiente Comité

---

**Dr. Javier Helenes Escamilla**  
Director de tesis

**Dr. Jonás de Dios De Basade Delgado**

**Dr. Mario González Escobar**

**Dr. Juan Gabriel Flores Trujillo**



---

**Dr. Javier Alejandro González Ortega**  
Coordinador del Posgrado en Ciencias de la  
Tierra

---

**Dra. Rufina Hernández Martínez**  
Directora de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta **Andrés Felipe Duque Herrera** como requisito parcial para la obtención del grado de Doctor en Ciencias en Ciencias de la Tierra con orientación en Geología.

### **Modelo climático para el sur del Golfo de California a partir del registro palinológico marino**

Resumen aprobado por:

---

Dr. Javier Helenes Escamilla  
**Director de tesis**

Este estudio contribuye al conocimiento de los quistes de dinoflagelados (QD) en el sur del Golfo de California (GC) y su relación con eventos climáticos. El principal objetivo fue investigar la influencia de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) y los índices El Niño Oscilación Sur (ENOS) y Oscilación Decadal del Pacífico (ODP) en la distribución temporal de las especies de QD durante los años 1959-2009 AD con una resolución de muestreo de ~7 meses. Para ello, se realizaron análisis cualitativos y cuantitativos de especies de QD en sedimentos laminados de Cuenca Pescadero en el sur del GC. Las relaciones se identificaron a través de análisis estadísticos multivariados y de frecuencias. El Análisis de Componentes Principales (ACP) arrojó tres componentes, indicadores de los conjuntos de QD: A1, A2 y A3. De estos, A1 y A3 son esencialmente conjuntos de especies heterotróficas y A2 de especies autotróficas. El análisis de frecuencias evidenció ciclos similares entre los índices ENOS y ODP y los tres conjuntos de quistes. Con las correlaciones de las series de tiempo se identificó la influencia de los factores climáticos TSM, ENOS y ODP sobre los conjuntos A1, A2 y A3 como indicadores de productividad primaria (PP). Las concentraciones de los tres conjuntos y la PP, disminuyen durante los eventos fuertes de El Niño, cuando la ODP está en fase cálida. Por el contrario, hay un aumento en la PP y producción de las especies pertenecientes a los grupos A2 y A3 durante eventos fuertes de La Niña, cuando la ODP está en fase fría. Estos resultados indican que la ODP modula la PP en el sur del GC, con fases frías que aumentan la productividad, mientras que las fases cálidas la disminuyen. Estas variaciones de aumentos y disminuciones en la PP son más evidentes cuando ambos forzamientos climáticos ENOS-ODP están en fase. Para corroborar estas relaciones para el mismo intervalo, se compararon los conjuntos de QD mencionados, con los reportados en Cuenca San Lázaro, en el Pacífico de Baja California Sur, en donde se identificaron cuatro conjuntos (S1, S2, S3 y S4). La comparación de estos dos grupos de conjuntos de QD con la TSM y los índices ENOS-ODP, revela respuestas similares de los QD. La combinación A2 y S3 señala condiciones climáticas y de baja PP análogas a las del período verano-otoño para el sureste del GC. Por el contrario, la combinación A3 y S2 refleja las condiciones climáticas y de alta PP de invierno-primavera en esta región. Esta comparación también indica que de 1959-2009, la corriente cálida Norecuatorial afectó ambas cuencas, mientras que la corriente fría de California sólo afectó a San Lázaro. Estas altas correlaciones entre las variables físico-climáticas (TSM, ENOS y ODP) y la PP (conjuntos A2-S3 y A3-S2) podrían ayudar a realizar predicciones sobre los eventos climáticos que afectan la región.

**Palabras clave:** *Productividad Primaria, El Niño Oscilación Sur, Oscilación Decadal del Pacífico, Temperatura Superficial del Mar, Quistes de Dinoflagelados.*

Abstract of the thesis presented by **Andrés Felipe Duque Herrera** as a partial requirement to obtain the Doctor of Science degree in Earth Sciences with orientation in Geology.

### **Climate model for the southern Gulf of California from the marine palynological record**

Abstract approved by:

---

Dr. Javier Helenes Escamilla  
**Thesis Director**

This study contributes to the knowledge of dinoflagellate cysts (DC) and their relationship with climatic events in the southern Gulf of California (GoC). The main objective is to investigate the influence of the Sea Surface Temperature (SST) and the El Niño Southern Oscillation (ENSO) and Pacific Decadal Oscillation (PDO) indices on the temporal distribution of DC species during the years 1959-2009 AD. with a sampling resolution of ~7 months. Qualitative and quantitative analyzes of DC species were carried out in the Pescadero Basin's laminated sediments in the southern GoC. The relationships were identified through multivariate statistical and frequency analyzes. The Principal Component Analysis (PCA) yielded three components, indicators of the DC groups: A1, A2, and A3. Of these, A1 and A3 are essentially groups of heterotrophic species and A2 of autotrophic species. The frequency analysis showed similar cycles between the ENSO and PDO indices and the three groups of cysts. With the correlations of the time series, the influence of the climatic factors SST, ENSO, and PDO on the groups A1, A2, and A3 were identified as proxies of primary productivity (PP). The three groups' concentrations and the PP decrease during the strong El Niño events when the PDO is in a warm phase. On the contrary, there is an increase in PP and production of the species belonging to groups A2 and A3 during strong La Niña events, when the PDO is in the cold phase. These results indicate that the PDO modulates the PP in the southern GoC, with cold phases that increase productivity while the warm phases decrease it. These variations of increases and decreases in the PP are most evident when both ENSO-PDO climatic forcings are in phase. To corroborate these relationships for the same interval, the mentioned DC groups were compared with those reported in the San Lázaro Basin in the Pacific of Baja California Sur, four groups (S1, S2, S3, and S4) are identified. A comparison of these two sets of DC groups with SST and ENSO-PDO indices reveals similar DC responses. The combination A2 and S3 indicate climatic conditions and low PP analogous to those of the summer-autumn period for the southeast of the GoC. In contrast, the combination of A3 and S2 reflects the climatic conditions and high PP of winter-spring in this region. This comparison also indicates that from 1959-2009, the Norequatorial warm current affected both basins, while the California cold current only affected San Lázaro. These high correlations between the physical-climatic variables (SST, ENSO, and PDO) and the PP (groups A2-S3 and A3-S2) could help make predictions about the climatic events affect the region.

**Keywords:** *Primary Productivity, El Niño Southern Oscillation, Pacific Decadal Oscillation, Sea Surface Temperature, Dinoflagellate Cysts.*

## Dedicatoria

*“Mira que te mando que te esfuerces y seas valiente, no temas ni desmayes, porque Jehová tu Dios estará contigo en dondequiera que vayas”.*  
*Josué 1:9*

*“Este trabajo lo dedico a mi esposa y a mi madre, a mi hermana y mis hermanos, a mis sobrinas y toda nuestra gran familia... por todo su amor, dedicación, paciencia y compañía. Por sus sabios consejos y por todo el apoyo que siempre me brindan con alegría de la manera más atenta y sin medida. Los amo con todo mi ser”.*

## Agradecimientos

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) por el financiamiento de este proyecto con el cual pude realizar y culminar satisfactoriamente mi tesis de doctorado. Así como, al Posgrado en Ciencias de la Tierra por el apoyo económico brindado en los últimos dos meses del proyecto.

Al CONACYT por apoyarme económicamente con la colegiatura y manutención, mediante la beca que me otorgaron durante los cuatro años del proyecto, con el número de becario 300334.

Al Dr. Javier Helenes Escamilla por compartir sus conocimientos de una manera amable y concisa y por todo su gran apoyo y dedicación en la dirección y desarrollo de este proyecto de investigación.

A todos los miembros de mi comité de tesis Dr. Jonás de Dios De Basabe Delgado, Dr. Mario González Escobar y Dr. Juan Gabriel Flores Trujillo, por toda su buena disposición, paciencia, y valiosos aportes durante el proceso de este proyecto. Además, por compartir sus conocimientos en cada área de su especialidad que fueron de gran ayuda para la buena finalización de este estudio.

A la Oceanóloga Edna Collins por toda la ayuda brindada en la elaboración de las muestras palinológicas y por su amabilidad y buena disposición para atender cualquier situación que se pudiera presentar en el Laboratorio de Micropaleontología y Palinología.

A la Dra. Ana Carolina Ruíz Fernández, Dr. Joan Albert Sanchez Cabeza, M.C. Libia Hascibe Pérez Bernal por su participación en el proyecto en la datación de los núcleos estudiados.

Al Dr. Markus Gross por su apoyo en la obtención de los datos de la Temperatura Superficial del Mar, que se encuentran en las bases de datos del ICOADS.

A la M.C. Lita Castañeda Betancur por su gran ayuda y asistencia en todo el desarrollo del proyecto, principalmente en el manejo de las bases de datos y análisis estadístico.

A mis compañeros y amigos que de una u otra manera aportaron sus conocimientos a este proyecto M.C. Luis Andrés Guerrero, Dr. Alex Freitas, M.C. Francy Carvajal, M.C. Tatiana Valencia, M.C. Rigel Castañeda, M.C. Samuel Jaramillo, M.C. Manuel Contreras.

A los profesores-investigadores que impartieron sus conocimientos y ayudaron en mi formación académica.

Al personal técnico y administrativo del Posgrado de Ciencias de la Tierra y en general del CICESE que de alguna manera contribuyeron en este proceso.

## Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatorias.....	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	viii
Lista de tablas.....	x
<b>Capítulo 1. Introducción</b>	
1.1 Características regionales.....	4
1.2 Hipótesis.....	4
1.3 Objetivos.....	5
1.3.1 Objetivo general .....	5
1.3.2 Objetivos específicos.....	5
<b>Capítulo 2. Metodología</b>	
2.1 Cronología y características del núcleo.....	7
2.2 Análisis y preparación palinológica.....	8
2.3 Datos físico-climáticos ENOS, ODP y TSM.....	11
2.4 Análisis estadístico multivariado.....	11
2.5 Análisis de frecuencias.....	12
2.6 Análisis de serie de tiempo – Transformada <i>Wavelet</i> .....	12
2.7 Comparación con Cuenca San Lázaro – núcleo SOLE09-1.....	12
2.7.1 Análisis estadístico multivariado.....	13
<b>Capítulo 3. Resultados</b>	
3.1 Cronología.....	14
3.2 Descripción cuantitativa y cualitativa.....	14
3.3 Análisis estadístico multivariado.....	19
3.4 Análisis de frecuencias.....	20
3.5 Intervalos climáticos y respuesta de dinoflagelados.....	22
3.5.1 Primer intervalo: 1959 – 1976.....	24

3.5.2 Segundo intervalo: 1977 – 1998.....	24
3.5.3 Tercer intervalo: 1999 – 2009.....	25
3.6 Análisis de serie de tiempo – Transformada <i>Wavelet</i> .....	25
3.6.1 TSM vs. A1, A2 y A3.....	26
3.6.2 MEI vs. A1, A2 y A3.....	28
3.6.3 ODP vs. A1, A2 y A3.....	30
3.7 Cuenca San Lázaro – núcleo SOLE09-1.....	32
3.7.1 Análisis estadístico multivariado.....	33
<b>Capítulo 4 . Discusión</b>	
4.1 Conjuntos de quistes de dinoflagelados y productividad primaria.....	35
4.2 Conjuntos de quistes de dinoflagelados y eventos fuertes ENOS.....	36
4.3 Conjuntos de quistes de dinoflagelados y cambios de fase de la ODP.....	39
4.4 ENOS-ODP y conjuntos de quistes de dinoflagelados.....	39
4.5 Validación cronológica a partir de los forzamientos climáticos y los conjuntos de quistes de dinoflagelados.....	40
4.6 Criterios de clasificación de especies de quistes de dinoflagelados.....	41
4.7 Comparación ecológica entre Cuenca Pescadero & Cuenca San Lázaro.....	43
4.7.1 Combinación A1 & S1.....	44
4.7.2 Combinación A2 & S3.....	45
4.7.3 Combinación A3 & S2.....	45
4.7.4 Conjunto S4.....	46
4.7.5 Diagrama ecológico Cuenca Pescadero & Cuenca San Lázaro.....	47
4.8 Coherencia clima - productividad primaria.....	48
4.8.1 Definición del rango de la TSM.....	49
4.8.1.1 WTC & Perfiles del MEI-TSM vs. A2 y A3.....	49
4.8.1.2 WTC & Perfiles del ODP-TSM vs. A2 y A3.....	51
4.8.2 Frecuencia de condiciones óptimas.....	54
<b>Capítulo 5 . Conclusiones</b> .....	55
<b>Literatura citada</b> .....	57
<b>Anexos</b> .....	68

## Lista de figuras

Figura	Página
1 Localización de los núcleos de estudio PESC09-2 y SOLE09-1 en las cuencas Pescadero y San Lázaro respectivamente.....	6
2 Modelo de edad para las muestras del núcleo PESC09-2 por datación de <sup>210</sup> Pb.....	8
3 a) Quiste de <i>G. catenatum</i> (400X); b) <i>B. spongium</i> (400X); c) Quiste de <i>P. schwartzii</i> (600X); d) <i>S. cf. bentorii</i> (400X); e) Quiste de <i>G. microreticulatum-nolerii</i> (600X).....	17
4 Concentraciones (quistes/g) y abundancias relativas (%) de las principales especies y grupos taxonómicos de quistes de dinoflagelados.....	18
5 a) <i>Q. concreta</i> (400X); b) Quiste de <i>P. kufuyoi</i> (600X); c) Quiste de <i>P. americanum</i> (600X); d) <i>Brigantedinium</i> sp. (400X); e) <i>S. undulata</i> (400X); f) <i>D. caperatum</i> (400X); g) <i>S. nephroides</i> (400X); h) <i>I. pacificum</i> . (600X); i) <i>L. oliva</i> (400X).....	19
6 Ejes del ACP, CP1 vs. CP2, muestra el ordenamiento de los conjuntos de quistes de dinoflagelados A1, A2 y A3.....	20
7 Espectros de frecuencias de los conjuntos de quistes de dinoflagelados (A1, A2 y A3) y los índices climáticos (MEI y ODP).....	21
8 Comparación de las concentraciones de los conjuntos de quistes de dinoflagelados (A1, A2 y A3) y los índices climáticos (MEI y ODP) con valores estandarizados.....	23
9 a) TSM vs. A1. b) TSM vs. A2. c) TSM vs. A3. Análisis WTC para una serie de tiempo entre los años 1959-2009 AD (eje X), el valor mínimo del período (eje Y) equivale a ~1.059 años.....	27
10 a) MEI vs. A1. b) MEI vs. A2. c) MEI vs. A3. Análisis WTC para una serie de tiempo entre los años 1959-2009 AD (eje X), el valor mínimo del período (eje Y) equivale a ~1.059 años.....	29
11 a) ODP vs. A1. b) ODP vs. A2. c) ODP vs. A3. Análisis WTC para una serie de tiempo entre los años 1959-2009 AD (eje X), el valor mínimo del período (eje Y) equivale a ~1.059 años.....	31
12 Ejes del ACP, CP2 vs. CP4 (arriba) y CP1 vs. CP3 (abajo), muestran el ordenamiento de los conjuntos de quistes de dinoflagelados S1, S2, S3 y S4.....	34
13 Comparación de las concentraciones de los conjuntos de quistes de dinoflagelados (A1, A2 y A3) e índices climáticos (MEI y ODP). La relación entre los cambios en las concentraciones de los grupos de quistes de dinoflagelados (es decir, la productividad primaria marina) y los eventos climáticos (ENOS fuerte y cambios de fase de la ODP) indica las edades de los puntos de control.....	38
14 Diagrama romboidal, la parte inferior (triángulo azul) corresponde a Cuenca San Lázaro y la parte superior (triángulo rojo) a Cuenca Pescadero.....	48

15	Comparación entre los perfiles de las series de tiempo del MEI, TSM y el conjunto de quistes de dinoflagelados A2 (concentraciones estandarizadas) y los análisis de coherencia <i>wavelet</i> entre las variables físico-climáticas y la productividad primaria (conjunto A2).....	50
16	Comparación entre los perfiles de las series de tiempo del MEI, TSM y el conjunto de quistes de dinoflagelados A3 (concentraciones estandarizadas) y los análisis de coherencia <i>wavelet</i> entre las variables físico-climáticas y la productividad primaria (conjunto A3).....	51
17	Comparación entre los perfiles de las series de tiempo de la ODP, TSM y el conjunto de quistes de dinoflagelados A2 (concentraciones estandarizadas) y los análisis de coherencia <i>wavelet</i> entre las variables físico-climáticas y la productividad primaria (conjunto A2).....	53
18	Comparación entre los perfiles de las series de tiempo de la ODP, TSM y el conjunto de quistes de dinoflagelados A3 (concentraciones estandarizadas) y los análisis de coherencia <i>wavelet</i> entre las variables físico-climáticas y la productividad primaria (conjunto A3).....	53

## Lista de tablas

Tabla		Página
1	Edad calculada para el núcleo PESCO9-2 por el método $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ y el modelo FCSC.....	7
2	Grupos de quistes de dinoflagelados con afinidades taxonómicas y estrategias tróficas similares.....	9
3	Nomenclatura del quiste y su nombre equivalente en etapa vegetativa o móvil de los taxones de dinoflagelados identificados en el núcleo PESCO9-2.....	15
4	Concentración promedio ( $\bar{X}$ ) de especies y grupos taxonómicos de quistes de dinoflagelados.....	16
5	Periodicidades relevantes y posibles ciclos correspondientes entre los índices climáticos MEI y ODP y los conjuntos de quistes de dinoflagelados A1, A2 y A3.....	22
6	Periodicidades en años y edades AD, revelados por el análisis WTC entre la TSM vs. A1, A2 y A3, con altas correlaciones y estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95%.....	26
7	Periodicidades en años y edades AD, exhibidos por el análisis WTC entre el MEI vs. A1, A2 y A3, con altas correlaciones y estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95%.....	28
8	Periodicidades en años y edades AD, expuestos por el análisis WTC entre la ODP vs. A1, A2 y A3, con altas correlaciones y estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95%.....	30
9	Especies de quistes de dinoflagelados consistentes para Cuenca San Lázaro, de acuerdo a los criterios de selección.....	32
10	Valores promedio ( $\bar{X}$ ) del MEI, ODP y de los conjuntos de quistes de dinoflagelados A1, A2 y A3 relacionados con eventos fuertes El Niño y La Niña.....	37
11	Criterios para la clasificación de especies de quistes de dinoflagelados en comunes, ocasionales y exóticas para Cuenca Pescadero y San Lázaro, y los límites correspondientes para cada nivel de clasificación.....	41
12	Especies comunes, ocasionales y exóticas de acuerdo a los criterios de clasificación y sus respectivos límites, para Cuenca Pescadero.....	42
13	Especies comunes, ocasionales y exóticas de acuerdo a los criterios de clasificación y sus respectivos límites, para San Lázaro.....	42
14	Conjuntos equivalentes entre los taxones comunes de quistes de dinoflagelados de las cuencas Pescadero y San Lázaro, y la interpretación ecológica para cada combinación de conjuntos.....	44

15	Relación numérica entre los factores físico-climáticos (MEI y TSM) y los conjuntos de quistes de dinoflagelados A2 y A3 (productividad primaria), según los eventos fuertes del ENOS de la serie de tiempo estudiada para Cuenca Pescadero.....	50
16	Relación numérica entre los factores físico-climáticos (ODP y TSM) y los conjuntos de quistes de dinoflagelados A2 y A3 (productividad primaria), de acuerdo a los eventos climáticos más relevantes en cuanto a los cambios de fase de la ODP, para la serie de tiempo estudiada en Cuenca Pescadero.....	52
17	Anexo A. Edad para cada muestra estudiada del núcleo PESCO9-2, concentraciones de los tres conjuntos de quistes de dinoflagelados [A1], [A2] y [A3], concentraciones estandarizadas ([A1, A2 y A3] estand.) y los parámetros físico-climáticos TSM (°C), MEI y ODP.....	68
18	Anexo B. Matriz de correlación de Pearson para las especies de quistes de dinoflagelados en Cuenca Pescadero.....	71
19	Anexo C. Matriz de correlación de Pearson para las especies de quistes de dinoflagelados en Cuenca San Lázaro.....	72
20	Anexo D. Valores de carga de las especies de quistes de dinoflagelados (variables) para cada componente principal y el porcentaje respectivo de la varianza explicada en Cuenca Pescadero, según el ACP.....	73
21	Anexo E. Matriz de correlación de Pearson entre los conjuntos de quistes de dinoflagelados de Cuenca Pescadero y los parámetros físico-climáticos TSM, MEI y ODP.....	74
22	Anexo F. Valores de carga de las especies de quistes de dinoflagelados (variables) para cada componente principal y el porcentaje respectivo de la varianza explicada en Cuenca San Lázaro, según el ACP.....	75
23	Anexo G. Datos estadísticos de los criterios de clasificación de las especies comunes, ocasionales y exóticas para las cuencas Pescadero (Pesc) y San Lázaro (SL).....	76

## Capítulo 1. Introducción

---

El estudio de las condiciones ambientales y procesos de sedimentación en cuencas marinas son un tópico importante de investigación en las geociencias debido a su relevancia dentro de la geología, oceanografía y climatología. Una de las formas más eficientes y directas de obtener información sobre las condiciones de deposición marina es realizar estudios sobre la composición de los sedimentos laminados (espesor < 1 cm). Este tipo de depósitos tienden a presentar alternancias de sedimentos de color claro y oscuro, donde las láminas o bandas claras están compuestas predominantemente por material de origen biológico (sedimentos biogénicos) y las láminas oscuras están conformadas principalmente por material terrígeno; es decir, los sedimentos biogénicos reflejan la productividad primaria, mientras que los terrígenos indican el aporte de material detrítico a la cuenca por escorrentía y/o por viento (Thunell et al., 1993).

El Golfo de California (GC) es uno de esos relativamente pocos lugares a nivel global donde se encuentran extensamente formados y bien preservados los sedimentos laminados. Éstos, se localizan en cuencas con alta productividad primaria y escaso recambio de aguas profundas (Álvarez-Borrego, 1983; Álvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991), con condiciones de hipoxia ( $O_2$  disuelto de 2 a 0.2 ml/l) o anoxia ( $O_2$  disuelto < 0.2 ml/l) en la columna de agua (Anderson, 1996).

El GC es un mar alargado semicerrado ubicado entre la Península de Baja California y Norteamérica, que conecta con el Océano Pacífico Oriental (OPO) en el sur. Su clima es subtropical a tropical, mientras que el de las masas continentales adyacentes varía desde árido en el norte hasta tropical húmedo-seco en el sureste. Estas características producen una interacción compleja entre las condiciones oceánicas y atmosféricas, que a su vez modulan la variabilidad climática (Roden, 1958; Baumgartner y Christensen, 1985; Lavín et al., 1997; Ripa, 1997; Lavín y Marinone, 2003).

La parte sur del GC tiene una influencia combinada con la corriente fría de California que se mueve hacia el sur interactuando con la Corriente Norecuatorial (CNE) cálida que fluye hacia el norte (Figura 1, Lavín y Marinone, 2003). Como resultado, la parte más al sur del GC presenta un clima tropical y subtropical mixto con una Temperatura Superficial del Mar (TSM) que oscila entre 21 y 31°C (Castro et al., 2000). Además, durante el invierno, los vientos predominantes soplan del noroeste con velocidades que oscilan entre 8 y 12 m/s, mientras que, en el verano, los vientos soplan del sureste y las velocidades varían de 2 a 5 m/s (Badan-Dangon et al., 1991). Entonces, la circulación invierno-primavera es predominantemente anticiclónica y está asociada con una alta productividad de fitoplancton en el lado oriental del GC, mientras que en verano-otoño, la circulación es generalmente ciclónica y se caracteriza por una menor

productividad de fitoplancton (Bray 1988; Santamaría-Del-Angel et al., 1994a; Beier 1997; Marinone 2003).

La dinámica del clima es en su mayoría estacional, siendo El Niño-Oscilación Sur (ENOS), el forzamiento más importante a escala interanual. Esta variación es particularmente evidente en la parte sur del GC (Lavín y Marinone, 2003), donde la productividad primaria disminuyó entre un 30 y un 40% durante el fuerte episodio de El Niño de 1997-1998 (Kahru et al., 2004). El ENOS se asocia notablemente con anomalías de TSM originadas en la región ecuatorial, y su índice oscila desde fases cálidas positivas (El Niño) a fases frías negativas (La Niña). Durante los eventos de El Niño, el agua superficial es más cálida en el Pacífico oriental y hay un desplazamiento de las masas de agua subtropical y tropical a latitudes medias. Por el contrario, el agua fría en el Pacífico ecuatorial central y oriental son características de los eventos de La Niña, cuando los vientos alisios se fortalecen y la afluencia de agua profunda fría aumenta a lo largo del Pacífico ecuatorial oriental (NOAA, 2018).

A escala interdecadal, el índice de la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP) afecta a la región (Lluch-Cota et al., 2007; Lluch-Cota et al., 2010; Páez-Osuna et al., 2016). El índice ODP tiene una periodicidad de 20 a 30 años, y también presenta una fase positiva o cálida, y una negativa o fría (Mantua et al., 1997). Regionalmente, precipitación (Brito-Castillo et al., 2003; Dean et al., 2004), vientos/surgencia (Lluch-Cota, 2000) y temperatura superficial del mar (Herguera et al., 2003; Lavín et al., 2003; Lluch-Belda et al., 2009) se han relacionado con los índices ENOS y ODP, y los eventos climáticos más significativos ocurren cuando estos están en fase.

Estos parámetros físico-ambientales regulan la productividad primaria en el GC (Álvarez-Borrego y Lara-Lara, 1991; Gaxiola-Castro et al., 1995). Esta productividad primaria ha sido calculada a partir de imágenes satelitales de clorofila-*a* (Santamaría-Del-Ángel et al., 1994a; Hidalgo-González y Álvarez-Borrego, 2004; Kahru et al., 2004; Herrera-Cervantes et al., 2010), observaciones directas de fitoplancton, esencialmente diatomeas y dinoflagelados (Gilbert y Allen, 1943; Osorio-Tafall, 1943), y mediciones de <sup>14</sup>C en superficie (Mercado-Santana et al., 2017).

La respuesta a la interacción entre la dinámica atmósfera-océano y la actividad del fitoplancton se puede preservar e identificar en el registro sedimentario marino, como en los sedimentos laminados encontrados en algunas cuencas del GC (Calvert, 1966; Baumgartner et al., 1991; Thunell et al., 1993; Thunell et al., 1994). Los análisis químicos y micropaleontológicos de este tipo de sedimentos aportan información

valiosa para la interpretación de las condiciones climáticas y su relación con el fitoplancton marino (Thunell, 1998; Barron et al., 2004; Barron y Bukry, 2007; Douglas et al., 2007).

Los dinoflagelados son una parte importante del fitoplancton marino. Este grupo se compone de microorganismos unicelulares acuáticos con un tamaño que varía de 50 a 200  $\mu\text{m}$  (Fensome et al., 1993). Actualmente se han reconocido aproximadamente 1,555 especies de dinoflagelados marinos (Gómez, 2005). El ciclo de vida de los dinoflagelados es complejo, muchos de ellos con etapas móviles planctónicas y sésiles o bentónicas. En las etapas sésiles, algunos pueden producir quistes hipnocigóticos gruesos resistentes y temporales delgados (Bravo y Figueroa, 2014). Recuentos globales han reconocido de 96 (Zonneveld y Pospelova, 2015) a 173 (Head, 1996) especies marinas vivas que producen quistes resistentes de paredes orgánicas, que representan aproximadamente del 6 al 11% de las formas marinas. Estos quistes resistentes son fosilizables, es decir, pueden conservarse durante largos períodos y se han observado en rocas sedimentarias de más de 200 millones de años (Evitt, 1985; Fensome et al., 1993).

Aproximadamente la mitad de las especies que forman quistes resistentes son autótrofas y están directamente vinculadas a la productividad primaria, y aproximadamente la otra mitad corresponde a especies heterótrofas que se alimentan principalmente de diatomeas y otros flagelados (Dale, 1996; Jacobson y Anderson, 1996). Este trabajo presenta el estudio de quistes hipnocigóticos de dinoflagelados de paredes orgánicas resistentes a los ácidos, por lo que se referirá a ellos de aquí en adelante como quistes de dinoflagelados.

Los conjuntos de quistes de dinoflagelados se han utilizado como indicadores de condiciones paleoclimáticas, paleoceanográficas y productividad primaria en diversas partes del mundo (Wall et al., 1977; Dale, 1996; Rochon et al., 1999; Radi y de Vernal, 2004, 2008; Pospelova et al. al., 2008; Bringué et al., 2013; Zonneveld et al., 2013; Mudie et al., 2017). Sin embargo, se han realizado pocos estudios sobre quistes de dinoflagelados en sedimentos recientes del GC (Martínez-Hernández y Hernández-Campos, 1991; Morquecho y Lechuga-Devéze, 2003; Flores-Trujillo et al., 2009; Limoges et al., 2010; Price et al., 2013; Cuellar-Martinez et al., 2018).

Este estudio contribuye al conocimiento de los quistes de dinoflagelados en el GC y su relación con los cambios climáticos. El principal objetivo es investigar la influencia y correlación de los índices ENOS y ODP y la distribución temporal de algunas especies de quistes de dinoflagelados entre los años calendario 1959-2009. Para ello, se realizaron análisis cualitativos y cuantitativos de conjuntos de quistes de dinoflagelados en sedimentos laminados de la Cuenca Pescadero en el sur del GC. Para lo cual se identificaron las

relaciones entre los conjuntos de quistes de dinoflagelados y los índices climáticos regionales a través de análisis estadísticos multivariados y de frecuencias. También se elabora un modelo climático basado en las correlaciones de las series de tiempo entre los factores físico-climáticos TSM, ENOS y ODP y los conjuntos de quistes de dinoflagelados encontrados en Cuenca Pescadero, a través de análisis de coherencia de la transformada *wavelet*.

## 1.1 Características regionales

La Cuenca Pescadero se encuentra en el sureste del GC, entre los 23° 30 'y 25° 00' N, y los 108° 00 'y 109° 30' O, y se caracteriza por un sistema de surgencias costero (Santamaria-del-Ángel et al., 1994a; Mercado-Santana et al., 2017). En la región de la Cuenca Pescadero, la surgencia estacional aumenta durante el invierno y la primavera (Lavín y Marinone, 2003). Datos satelitales indican que alrededor de la Cuenca Pescadero, en 2016, los valores de concentración de clorofila-*a* variaron de  $\sim 4 \text{ mg/m}^3$  en enero, a  $\sim 0,1 \text{ mg/m}^3$  en agosto (Mercado-Santana et al., 2017). Esta productividad promueve niveles bajos de oxígeno ( $< 5 \mu\text{mol/kg}$ ) a profundidades intermedias (Rago et al., 2013), lo cual elimina la bioturbación, preservando registros de alta resolución en los sedimentos laminados encontrados en varias de las cuencas de esta región (Calvert, 1966; Herguera, 2006; van Geen et al., 2003). En esta región sur del GC, la TSM oscila entre 21-34°C (Rago et al., 2013; Mercado-Santana et al., 2017), mientras que la salinidad tiene un promedio anual casi continuo de 34,8 PSU (Beron-Vera y Ripa, 2002).

## 1.2 Hipótesis

La distribución temporal de especies y grupos taxonómicos de quistes de dinoflagelados es modulada por los forzamientos climáticos y oceanográficos (ENOS y ODP) en el sur del GC y en el OPO tropical-subtropical. Identificar estas especies y comprender su variación temporal ayudará a elaborar reconstrucciones paleoclimáticas, paleoceanográficas y paleoecológicas para estas regiones, así como posibles predicciones de cambios climáticos en torno a estos forzamientos.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo general**

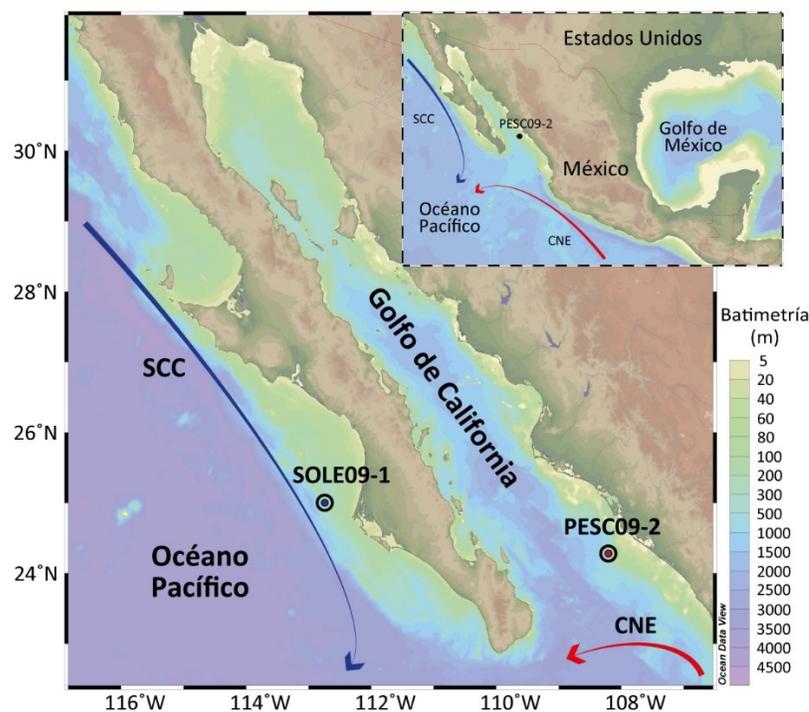
Reconstruir y calibrar la respuesta de los conjuntos de especies de quistes de dinoflagelados a los cambios en las condiciones climáticas, oceanográficas y ecológicas para Cuenca Pescadero, entre los años calendario 1959-2009.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Describir y documentar cuantitativamente las diferentes especies y grupos taxonómicos de quistes de dinoflagelados en muestras del núcleo PESC09-2, en un intervalo fechado de 1959-2009 años calendario.
- Comparar y correlacionar los conjuntos de especies de quistes de dinoflagelados identificados para el núcleo PESC09-2 con los factores físico-climáticos TSM, ENOS y ODP.
- Determinar las especies y/o grupos taxonómicos de quistes de dinoflagelados indicadoras de variaciones climáticas y oceanográficas para el sur del Golfo de California (GC).
- Corroborar los resultados comparando los conjuntos de quistes de dinoflagelados encontrados en Cuenca Pescadero (núcleo PESC09-2), con aquellos documentados en Cuenca San Lázaro (núcleo SOLE09-1) y determinar cuáles son las especies comunes, ocasionales y exóticas para cada cuenca.
- Establecer una relación paleoecológica-ecológica entre ambas cuencas, apoyada en correlaciones y análisis estadísticos multivariados de los conjuntos de quistes de dinoflagelados de ambos núcleos.
- Elaborar un modelo climático para el sur del GC, fundamentado en las correlaciones de las series de tiempo entre los parámetros físico-climáticos TSM, ENOS y ODP con los conjuntos de especies de quistes de dinoflagelados encontrados en Cuenca Pescadero.

## Capítulo 2. Metodología

El núcleo PESC09-2 consiste en sedimentos laminados que fue colectado en octubre del año 2009 en la Cuenca Pescadero al sureste del GC, México ( $24^{\circ} 10' 12''$  N –  $108^{\circ} 07' 12''$  O, Figura 1), durante la expedición oceanográfica LONO09-1 por parte de la Universidad del Sur de California a bordo del buque oceanográfico *RV New Horizon*. Este núcleo fue recuperado a ~580 m de profundidad en una zona anóxica de la cuenca, con un multinucleador con tubos de acrílico con diámetro interno de 10 cm y longitud de 50 cm. La litología de los sedimentos es homogénea y consiste en láminas de arcillas y limos. Los primeros 10 cm del núcleo se cortaron a escala milimétrica con un pistón de pedal a bordo del buque, este submuestreo fue empacado y etiquetado en bolsas plásticas y se mantuvieron en refrigeración a 3°C. Para este estudio, fue analizado el contenido palinológico de las 100 muestras de sedimento de la parte superior del núcleo, correspondientes a los primeros 10 cm.



**Figura 1.** Localización de los núcleos de estudio PESC09-2 y SOLE09-1 en las cuencas Pescadero y San Lázaro respectivamente. La flecha roja indica de manera general la dirección de la Corriente Norecuatorial (CNE) y la flecha azul muestra la dirección del Sistema de la Corriente de California (SCC). Se realizó en el software *Ocean Data View*, Schlitzer (2019).

## 2.1 Cronología y características del núcleo

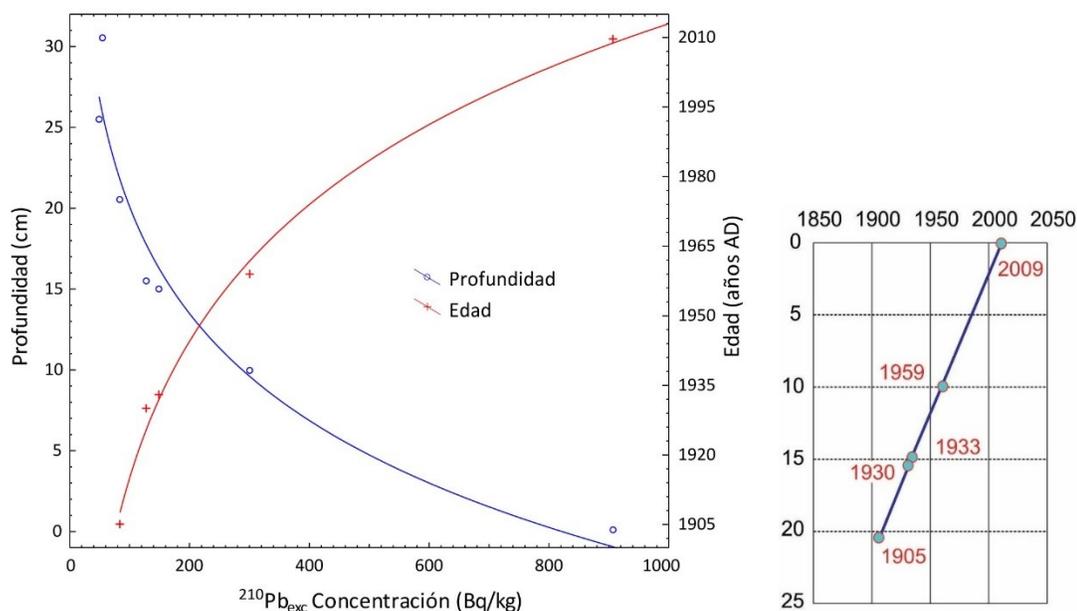
La datación del núcleo PESCO9-2 se llevó a cabo en el Laboratorio de Geoquímica Isotópica y Geocronología del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología – UNAM, mediante el método  $^{210}\text{Pb}$  en exceso ( $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ ). Se analizaron siete muestras de  $^{210}\text{Pb}$  total ( $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$ ) por espectrometría alfa (Ortec-Ametek 576A) con el software *Maestro data acquisition*, asumiendo equilibrio secular con el producto hijo  $^{210}\text{Po}$  (Ruiz-Fernández y Hillaire-Marcel, 2009). Como el perfil de  $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$  alcanzó un valor casi constante en las secciones inferiores, se estimó el  $^{210}\text{Pb}$  base ( $^{210}\text{Pb}_{\text{base}}$ ) como la media de las dos secciones más bajas ( $^{210}\text{Pb}_{\text{base}} = 52 \pm 3 \text{ Bq/Kg}$ ). El  $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$  es la variable utilizada en el método de datación y se calculó como la diferencia entre el  $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$  y  $^{210}\text{Pb}_{\text{base}}$ .

Debido al comportamiento claramente exponencial de las muestras analizadas por el método  $^{210}\text{Pb}$  (Figura 2), se utilizó el modelo Flujo Constante Sedimentación Constante (FCSC, Krishanswamy et al., 1971). La relación de la pendiente entre  $\ln ^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$  y la profundidad se usó para estimar la tasa media de acumulación de sedimentos (TAS, Sanchez-Cabeza y Ruiz-Fernández, 2012) y además se determinó los años desde la deposición de sedimentos para construir el modelo de edad (Figura 2). Para el cálculo de las incertidumbres de las tasas de acumulación de sedimentos, se aplicó el método de Monte Carlo (Sanchez-Cabeza et al., 2014). El promedio TAS fue de  $0.195 \pm 0.009 \text{ cm/año}$  ( $p < 0.05$ ) y la edad estimada de la sección 99 – 100 mm fue de  $1959 \pm 2$  años (Tabla 1).

**Tabla 1.** Edad calculada para el núcleo PESCO9-2 por el método  $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$  y el modelo FCSC.

Código de la muestra	Profundidad (cm)	Concentración de $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ (Bq/kg)	Edad FCSC (años AD)
PESCO9-2 0-1	0.05	$908 \pm 56$	$2009.53 \pm 0.01$
PESCO9-2 99-100	9.95	$302 \pm 19$	$1959 \pm 2$
PESCO9-2 150	14.95	$150 \pm 10$	$1933 \pm 4$
PESCO9-2 150-160	15.5	$129 \pm 9$	$1930 \pm 4$
PESCO9-2 200-210	20.5	$84 \pm 6$	$1905 \pm 5$
PESCO9-2 250-260	25.5	$49 \pm 3$ *	
PESCO9-2 300-310	30.5	$55 \pm 4$ *	

\* Isótopo  $^{210}\text{Pb}_{\text{base}}$



**Figura 2.** Modelo de edad para las muestras del núcleo PESC09-2 por datación de  $^{210}\text{Pb}$ . En el gráfico de la izquierda se observa, el comportamiento exponencial de la concentración del  $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$  vs. Profundidad (curva y círculos azules) y a su vez se observa la relación entre las concentraciones del  $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$  vs. las edades correspondientes a las muestras analizadas por radiocronología (curva y cruces rojas). El gráfico de la derecha muestra la relación de las muestras utilizadas en el modelo de edad vs. la profundidad.

## 2.2 Análisis y preparación palinológica

Las muestras palinológicas fueron procesadas en el Laboratorio de Palinología y Micropaleontología del CICESE, siguiendo las técnicas palinológicas descritas por Wood et al. (1996), sin oxidación. La técnica incluye disolución con HCl 37% y HF 48% a temperatura ambiente con el fin de eliminar los minerales. El residuo fue tratado con politungstato de sodio con gravedad específica de 2 para separar la materia orgánica insoluble. El material palinológico fue tamizado y recolectado entre mallas de 15 y 125  $\mu\text{m}$ , y se hizo el respectivo montaje de cada lámina. Estas láminas fueron analizadas cualitativa y cuantitativamente en un microscopio Olympus CX-31 con aumentos de 200X, 400X y 1000X. Para el análisis cuantitativo, en la preparación de cada muestra fue añadida una tableta de esporas del helecho *Lycopodium clavatum* (serie 483216) para estimar la concentración de palinomorfos (Stockmarr, 1971; Mertens et al., 2009).

Los quistes de dinoflagelados fueron identificados hasta el nivel de especie mediante la comparación con las descripciones originales y enmendadas de los holotipos (Bradford, 1975; Zonneveld, 1997; Rochon et al., 1999; Head et al., 2001; Matsuoka et al., 2009; Verleye et al., 2011; Mertens et al., 2012; 2013; Ribeiro et al., 2012; Radi et al., 2013; Limoges et al., 2018; Gurdebeke et al., 2020) y usando la base de datos en

línea de Zonneveld y Pospelova (2015) (Marum, <https://www.marum.de/Karin-Zonneveld/dinocystkey.htm>). La paleontología sistemática de los quistes de dinoflagelados se ajusta a Williams et al. (2017). Debido a que la identificación a nivel de especie en ocasiones es poco fiable por orientación desfavorable o pliegues del quiste, algunos taxones fueron agrupados (Tabla 2). El agrupamiento fue realizado según afinidades taxonómicas y estrategias tróficas.

**Tabla 2.** Grupos de quistes de dinoflagelados con afinidades taxonómicas y estrategias tróficas similares. Quistes de dinoflagelados autotróficos indicados con una cruz (+) y quistes de dinoflagelados heterotróficos indicados con un asterisco (\*).

Grupo Taxonómico	Quistes de Dinoflagelados
<i>Brigantedinium</i> spp. (*)	<i>Brigantedinium asymmetricum</i>
	<i>Brigantedinium cariaeoense</i>
	<i>Brigantedinium grande</i>
	<i>Brigantedinium irregulare</i>
	<i>Brigantedinium simplex</i>
<i>Spiniferites</i> spp. (+)	<i>Spiniferites bentorii</i>
	<i>Spiniferites mirabilis</i>
	<i>Spiniferites multisphaerus</i>
	<i>Spiniferites ramosus</i>
<i>Impagidinium</i> spp. (+)	<i>Impagidinium aculeatum</i>
	<i>Impagidinium sphaericum</i>
<i>Lejeunecysta</i> gr. (*)	<i>Leipokatium invisitatum</i>
	<i>Lejeunecysta oliva</i>
	<i>Lejeunecysta sabrina</i>
<i>Echinidinium</i> gr. (*)	<i>Archaeperidinium saanichi</i>
	<i>Echinidinium aculeatum</i>
	<i>Echinidinium delicatum</i>
	<i>Echinidinium transparentum</i>
	<i>Islandinium minutum</i>
	<i>Islandinium pacificum</i>

Se contaron todos los quistes de dinoflagelados para cada muestra, representada por una lámina palinológica, incluso si excedía el tamaño mínimo de muestra indicado por el conteo de las esporas de *L. clavatum*. Se contaron un promedio de 427 quistes de dinoflagelados, con un conteo mínimo de 10 y un máximo de 906 quistes por muestra. Las concentraciones de quistes de dinoflagelados para cada muestra fueron calculadas usando la siguiente fórmula:

$$C = (Lt \times S) / (Lc \times P) \quad (1)$$

Donde:

C: concentración de cada especie por gramo de sedimento seco procesado (quistes/g).

Lt: cantidad de esporas de *L. clavatum* en una tableta, serie 483216 (= 18,583 esporas de *L. clavatum* por tableta).

S: conteo de especies por muestra.

Lc: conteo de esporas de *L. clavatum* por muestra.

P: peso del sedimento seco procesado por muestra.

Considerando la población conocida representada por las esporas de *L. clavatum* (18,583), para obtener concentraciones estadísticamente significativas, se calculó el tamaño mínimo de muestra con la siguiente fórmula:

$$n = Lt / (1 + e^2 \times (Lt - 1) / (z^2 \times v)) \quad (2)$$

Donde:

n: conteo mínimo de esporas de *L. clavatum* por muestra (en este caso, 377).

Lt: número total de esporas de *L. clavatum* por tableta de la serie 483216 (tamaño de la población).

e: margen de error aceptado (5%).

z: nivel de confiabilidad (95%).

v: varianza de la población, para este estudio se asumió la varianza máxima (50%).

## 2.3 Datos físico-climáticos ENOS, ODP y TSM

Los resultados del conteo de quistes de dinoflagelados se compararon y correlacionaron con la Temperatura Superficial del Mar (TSM) y con los índices climáticos El Niño Oscilación Sur (ENOS) y la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP), para los mismos años estudiados y para la resolución de muestreo calculada en el núcleo PESC09-2 ( $\sim 0.513$  años). Se consideraron los promedios móviles correspondientes de cada índice para cada  $\sim 7$  meses correspondientes a las fechas precisas de cada muestra, de acuerdo con el modelo de edad (Anexo A).

Las actualizaciones mensuales de datos climáticos están disponibles en la página web de la División de Ciencias Físicas (PSD, por sus siglas en inglés) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés). En el caso de ENOS, se utilizó el índice multivariado (MEI, Wolter y Timlin, 2011), mientras para la ODP se usó la reconstrucción de Mantua et al. (1997). Esta información es proporcionada y actualizada por la PSD/NOAA en el sitio web (<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>), considerando eventos El Niño fuerte, valores MEI  $> 1$  y La Niña fuerte con MEI  $< -1$ . Los eventos ENOS fuerte que se encuentran en la serie de tiempo analizada, se tomaron según MEI.v2 (Zhang et al., 2019). Para la TSM se calculó el promedio haciendo una triangulación en un área de  $2^\circ \times 2^\circ$  entre  $23^\circ$ -  $25^\circ$  N y entre  $107^\circ$ -  $109^\circ$  O. Estos datos fueron obtenidos del ICOADS proporcionados en la página web (<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.coads.2deg.html>) del Laboratorio de Ciencias Físicas (PSL, por sus siglas en inglés) de la NOAA.

## 2.4 Análisis estadístico multivariado

Para encontrar las especies más consistentes que reflejan mejor los cambios en los índices ENOS y ODP, se realizó un análisis estadístico multivariado, con aquellos taxones de quistes de dinoflagelados con una correlación de Pearson significativa ( $r \geq 0.30$ ) y un nivel de confianza del 95% (Anexo B). En estos análisis, se incluyeron aquellas especies cuya abundancia relativa es  $> 1\%$  y que están presentes en  $> 70\%$  de las muestras analizadas. Con esta base de datos se completó un Análisis de Componentes Principales (ACP) (Davis, 1986) con las concentraciones estandarizadas de quistes de dinoflagelados, para asegurar que cada especie o grupo taxonómico contribuya por igual al análisis multivariado. Este tipo de análisis se llevó a cabo en el software Statistica versión 7.0 (2004).

## 2.5 Análisis de frecuencias

Los análisis de frecuencias se elaboraron con las concentraciones estandarizadas de los conjuntos de quistes de dinoflagelados, proporcionados por el ACP y contrastado con los espectros de frecuencias encontrados para los valores del MEI y ODP. Este análisis se llevó a cabo en el software Origin versión 6.0 (1999) utilizando la transformada rápida de Fourier, obteniendo el espectro de frecuencias de cada conjunto de datos, de los cuales se eligieron para la interpretación de cada espectro las mayores amplitudes que concuerdan entre los conjuntos de quistes de dinoflagelados y los índices climáticos MEI y ODP, con las respectivas periodicidades (inverso de las frecuencias) que posiblemente se encuentran representadas en la serie de tiempo estudiada.

## 2.6 Análisis de serie de tiempo – Transformada *Wavelet*

Se realizaron análisis de series de tiempo, aplicando un análisis de Coherencia de la Transformada *Wavelet* (WTC, por sus siglas en inglés) (Torrence y Webster, 1999; Grinsted et al., 2004) con el fin de localizar las periodicidades presentes en el espacio del tiempo-frecuencia, tanto de las variables micropaleontológicas (quistes de dinoflagelados) como físico-climáticas (TSM, MEI, ODP). El análisis WTC revela la relación entre dos series de tiempo continuas y de forma simultánea, exhibiendo las regiones en un espacio de tiempo-frecuencia, con altas correlaciones y estadísticamente significativas con un 95% de confianza, y a su vez el análisis expone la relación de los comportamientos de fase entre las variables analizadas.

Estos análisis se llevaron a cabo en el software MatLab, usando el paquete elaborado por Grinsted et al. (2004) y disponible en la página web (<http://www.pol.ac.uk/home/research/waveletcoherence/>), el cual a su vez contiene códigos originales realizados por Torrence y Compo (1998), que también se encuentran disponibles en la página web (<http://www.atmos.ucla.edu/tcd/ssa>).

## 2.7 Comparación con Cuenca San Lázaro – núcleo SOLE09-1

La base de datos de los conjuntos de quistes de dinoflagelados recuperados del núcleo SOLE09-1 (Cuenca San Lázaro) es cuantitativa y tiene casi la misma resolución y duración que la estudiada en el núcleo

PESC09-2. Por lo cual se compararon los conjuntos de quistes de dinoflagelados recuperados en la Cuenca Pescadero con los de Cuenca San Lázaro, para establecer una relación ecológica-paleoecológica directa. El núcleo SOLE09-1 está ubicado en la Cuenca San Lázaro, al oeste de la Península de Baja California (ver Figura 1). La información palinológica y general del núcleo SOLE09-1 se documentó en las tesis de maestría de Serrano-Mejía (2016) y Pérez-Rodríguez (2016).

### **2.7.1 Análisis estadístico multivariado**

Con el fin de elaborar una relación entre las especies de quistes de dinoflagelados observadas en ambas cuencas, se buscaron los componentes principales en ambos núcleos de forma independiente. Por lo tanto, se usaron criterios similares a los realizados en el núcleo PESC09-2, para encontrar las especies y/o grupos de dinoflagelados más consistentes en el registro del núcleo SOLE09-1, teniendo en cuenta las abundancias relativas y concentraciones promedio, la presencia en la totalidad de las muestras y la correlación entre las especies de quistes de dinoflagelados.

Para determinar una alta correlación entre las especies del núcleo SOLE09-1, se realizó una matriz de correlación de Pearson considerando un coeficiente ( $r \geq 0.30$ ) y un nivel de confianza del 95% (Anexo C). El Análisis de Componentes Principales (ACP) se elaboró con las concentraciones estandarizadas de las especies de quistes de dinoflagelados, igualmente en el software Statistica versión 7.0 (2004).

## Capítulo 3. Resultados

---

### 3.1 Cronología

El perfil elaborado entre las profundidades de las 7 muestras analizadas del núcleo PESCO9-2 y el cálculo de sus respectivas concentraciones de  $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$  indicó un comportamiento claramente exponencial; a su vez, se estimó que la actividad del isótopo  $^{210}\text{Pb}_{\text{base}}$  fue entre las profundidades 25.5 y 30.5 cm del núcleo, con una concentración promedio de las dos últimas muestras de  $\sim 52$  Bq/kg. En consecuencia, se utilizó el modelo FCSC (Sanchez-Cabeza y Ruiz-Fernández, 2012) para estimar las edades de las muestras mencionadas en años calendario.

La tasa de acumulación de sedimentos y su incertidumbre fueron calculadas por el método de Monte Carlo, siguiendo lo descrito por Sanchez-Cabeza et al. (2014), donde se obtuvo un valor de  $1.95 \pm 0.009$  mm/año con una significancia estadística de  $1.11 \times 10^{-08}$ . Se estableció un ajuste más fino al modelo de edad del intervalo estudiado, el cual arrojó un rango entre 1959 y 2009 AD, correspondientes a los 10 primeros centímetros del núcleo y obteniéndose una resolución de muestreo de  $\sim 0.513$  años.

### 3.2 Descripción cuantitativa y cualitativa

En las 100 muestras, se identificaron 41 especies de quistes de dinoflagelados, de las cuales 27 tiene afinidad heterótrofa y 14 autótrofa. La nomenclatura del quiste y su nombre equivalente en estado vegetativo o móvil se ajusta a Head (1996), Zonneveld y Pospelova (2015) y Guderbeke et al. (2020), estos se indican en la Tabla 3. En general, la concentración promedio ( $\bar{X}$ ) fue de 6,409 quistes/g, con una concentración máxima de 27,656 quistes/g y una mínima de 58 quistes/g. Los quistes de dinoflagelados heterotróficos fueron dominantes con una abundancia relativa  $\bar{X} = 65\%$  y una concentración  $\bar{X} = 4,376$  quistes/g con un rango entre 23 y 21,795 quistes/g. En comparación, los quistes de dinoflagelados autotróficos tienen una abundancia relativa  $\bar{X} = 35\%$  y una concentración  $\bar{X} = 2,033$  quistes/g con un rango desde 35 hasta 6,035 quistes/g.

**Tabla 3.** Nomenclatura del quiste y su nombre equivalente en etapa vegetativa o móvil de los taxones de dinoflagelados identificados en el núcleo PESC09-2.

<b>Especies de Quistes</b>	<b>Afinidad Móvil</b>
<b>Taxones heterotróficos</b>	
Quiste de <i>Archaeoperidinium saanichi</i>	<i>Archaeoperidinium saanichi</i>
<i>Brigantedinium asymmetricum</i>	? <i>Protooperidinium</i> spp.
<i>Brigantedinium cariacense</i>	<i>Protooperidinium avellanum</i>
<i>Brigantedinium grande</i>	? <i>Protooperidinium</i> spp.
<i>Brigantedinium irregulare</i>	? <i>Protooperidinium</i> spp.
<i>Brigantedinium simplex</i>	<i>Protooperidinium conicoides</i>
<i>Brigantedinium</i> sp.	? <i>Protooperidinium</i> spp.
<i>Dubridinium caperatum</i>	<i>Preperidinium meunieri</i>
<i>Echinidinium aculeatum</i>	Diplopsalid or Protooperidinoid group
<i>Echinidinium delicatum</i>	Diplopsalid or Protooperidinoid group
<i>Echinidinium transparantum</i>	Diplopsalid or Protooperidinoid group
<i>Echinidinium</i> sp.	Diplopsalid or Protooperidinoid group
<i>Islandinium minutum</i>	<i>Protooperidinium</i> sp. indet.
<i>Islandinium pacificum</i>	<i>Protooperidinium mutsuense</i>
<i>Leipokatium invisitatum</i>	<i>Protooperidinium</i> sp. indet.
<i>Lejeunecysta oliva</i>	? <i>Protooperidinium</i> spp.
<i>Lejeunecysta sabrina</i>	? <i>Protooperidinium leonis</i>
<i>Lejeunecysta</i> sp.	? <i>Protooperidinium</i> spp.
Quiste de <i>Polykrikos schwartzii</i> sensu Matsuoka et al. (2009)	<i>Polykrikos schwartzii</i>
Quiste de <i>Polykrikos kofoidii</i> sensu Matsuoka et al. (2009)	<i>Polykrikos kofoidii</i>
Quiste de <i>Protooperidinium americanum</i>	<i>Protooperidinium americanum</i>
Quiste de <i>Protooperidinium fukuyoi</i>	? <i>Protooperidinium</i> spp.
Quiste de <i>Protooperidinium stellatum</i>	<i>Protooperidinium stellatum</i>
<i>Quinquecuspis concreta</i>	? <i>Protooperidinium leonis</i>
<i>Selenopemphix nephroides</i>	<i>Protooperidinium subinermis</i>
<i>Selenopemphix quanta</i>	<i>Protooperidinium conicum</i>
<i>Selenopemphix undulata</i>	? <i>Protooperidinium</i> spp.
<i>Stelladinium robustum</i>	<i>Protooperidinium</i> sp. indet.
<i>Votadinium calvum</i>	<i>Protooperidinium oblongum</i>
<i>Votadinium spinosum</i>	<i>Protooperidinium claudicans</i>
<b>Taxones autotróficos</b>	
<i>Bitectatodinium spongium</i>	<i>Gonyaulacaceae</i> indif.
Quiste de <i>Gymnodinium catenatum</i>	<i>Gymnodinium catenatum</i>
Quiste de <i>Gymnodinium micro-nolerii</i>	<i>Gymnodinium microreticulatum-nolerii</i>
<i>Impagidinium aculeatum</i>	<i>Gonyaulax</i> sp. indet.
<i>Impagidinium sphaericum</i>	<i>Gonyaulax</i> sp. indet.

<i>Impagidinium</i> sp.	<i>Gonyaulax</i> sp. indet.
<i>Lingulodinium machaerophorum</i>	<i>Lingulodinium polyedrum</i>
<i>Nematosphaeropsis labyrinthus</i>	<i>Gonyaulax spinifera</i>
<i>Operculodinium centrocarpum</i> sensu Wall y Dale (1966)	<i>Protoceratium reticulatum</i>
<i>Polysphaeridium zoharyi</i>	<i>Pyrodinium bahamense</i>
<i>Spiniferites bentorii</i>	<i>Gonyaulax digitale</i>
<i>Spiniferites mirabilis</i>	<i>Gonyaulax spinifera</i>
<i>Spiniferites multisphaerus</i>	<i>Gonyaulax</i> sp. indet.
<i>Spiniferites ramosus</i>	<i>Gonyaulax</i> sp. indet.
<i>Spiniferites</i> sp.	<i>Gonyaulax</i> sp. indet.
<i>Tuberculodinium vancampoeae</i>	<i>Pyrophacus steinii</i>

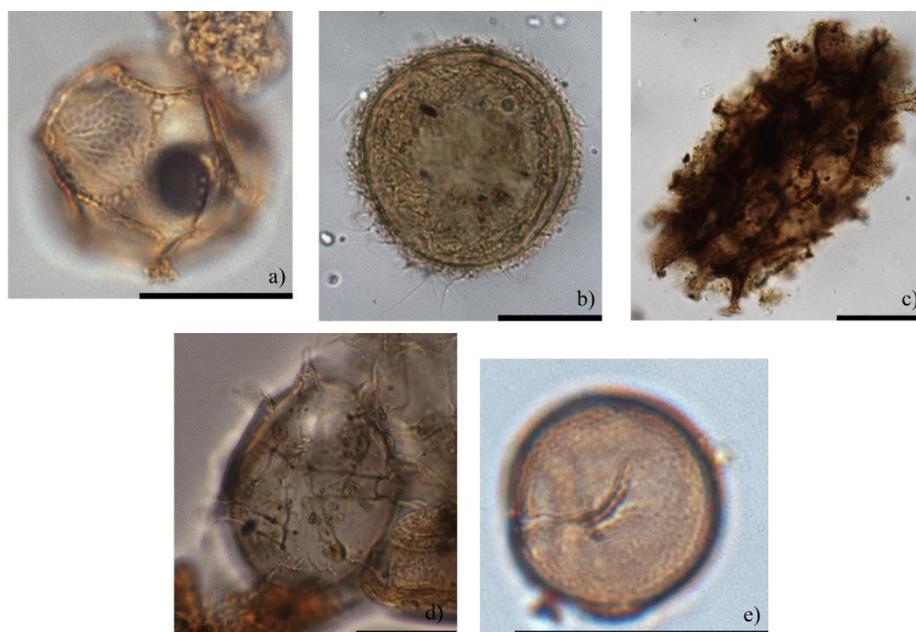
El grupo taxonómico más representativo fue *Brigantedinium* spp. con  $\bar{X} = 2,472$  quistes/g (38.6%). Los quistes de especies heterotróficas más abundantes y consistentes fueron *P. schwartzii* con  $\bar{X} = 380$  quistes/g (3.2%), *Q. concreta* con  $\bar{X} = 348$  quistes/g (5.66%), *D. caperatum* con  $\bar{X} = 209$  quistes/g (3.85%), *S. undulata* con  $\bar{X} = 187$  quistes/g (2.77%) y *S. nephroides* con  $\bar{X} = 145$  quistes/g (2.33%). Los quistes de especies autotróficas más abundantes y consistentes fueron *B. spongium* con  $\bar{X} = 937$  quistes/g (13.73%), *G. catenatum* con  $\bar{X} = 755$  quistes/g (14.39%), y *G. microreticulatum-nolerii* con  $\bar{X} = 174$  quistes/g (3.5%) (Tabla 4).

**Tabla 4.** Concentración promedio ( $\bar{X}$ ) de especies y grupos taxonómicos de quistes de dinoflagelados. La negrita indica las especies/grupo taxonómico, cuya abundancia relativa  $\bar{X} > 1\%$  y su presencia en el total de las muestras analizadas es  $> 70\%$ . Quistes de dinoflagelados autotróficos indicados con una cruz (+) y quistes de dinoflagelados heterotróficos indicados con un asterisco (\*). Quiste de *G. micro-nolerii* es el quiste de *G. microreticulatum-nolerii*.

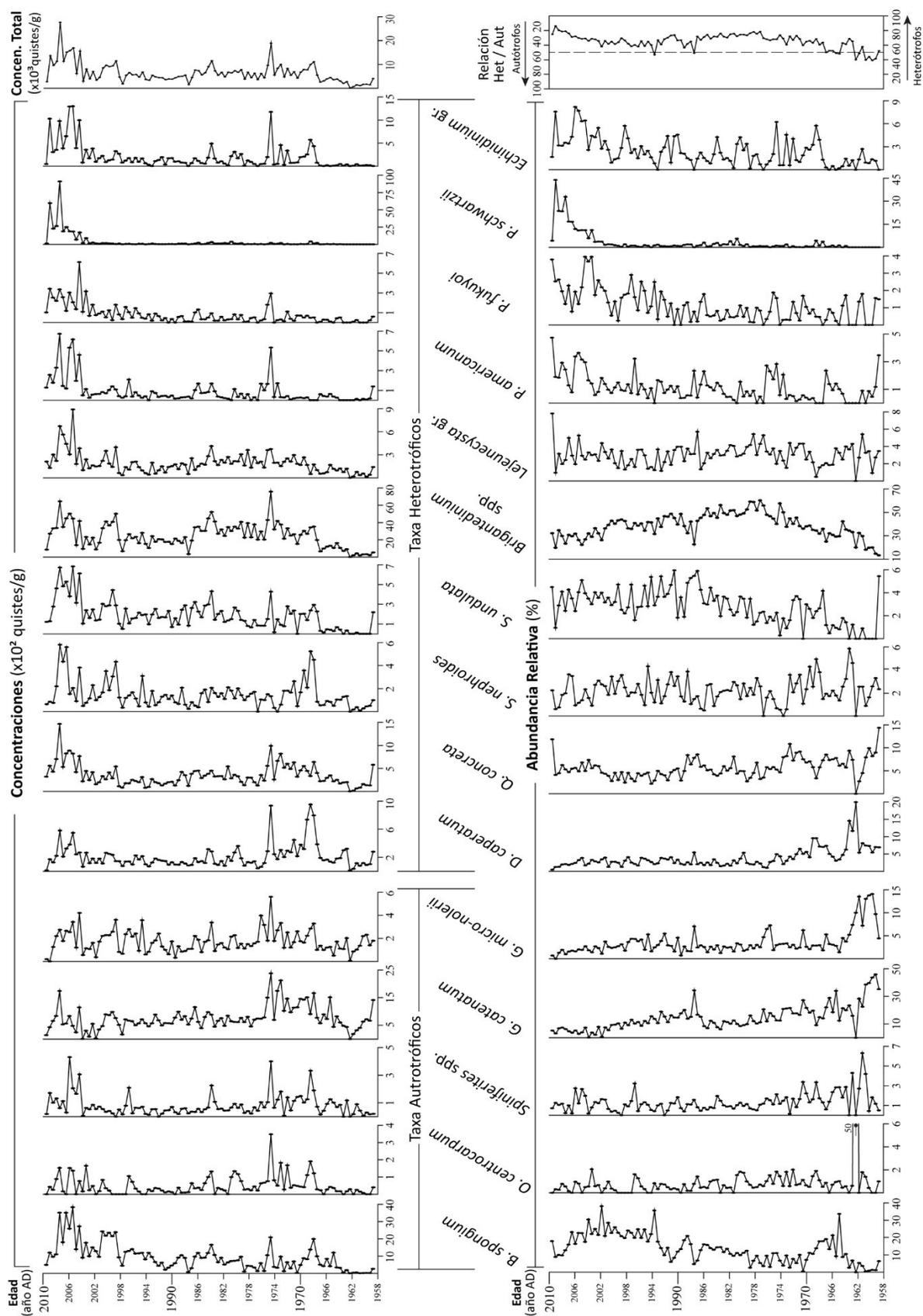
Orden	Quistes de Dinoflagelados Especies/Grupo Taxonómico	Concentración $\bar{X}$ (quistes/g)	Abundancia Relativa $\bar{X}$ (%)	Presencia total en muestras (%)
Gymnodiniales	<b>Quiste de <i>G. catenatum</i> (+)</b>	755	14.39	99
	<b>Quiste de <i>G. micro-nolerii</i> (+)</b>	174	3.5	99
	<b>Quiste de <i>P. schwartzii</i> (*)</b>	380	3.2	84
	Quiste de <i>P. kofoidii</i> (*)	16	0.24	51
Gonyaulacales (+)	<b><i>B. spongium</i></b>	937	13.73	99
	<i>Impagidinium</i> spp.	2	0.04	10
	<i>L. machaerophorum</i>	10	0.16	25
	<i>N. labyrinthus</i>	6	0.09	26
	<b><i>O. centrocarpum</i></b>	47	1.17	81
	<i>P. zoharyi</i>	4	0.07	20
	<b><i>Spiniferites</i> spp.</b>	80	1.32	96
	<i>T. vancampoeae</i>	19	0.3	64
Peridiniales (*)	<b><i>Brigantedinium</i> spp.</b>	2,472	38.61	100

<i>D. caperatum</i>	209	3.85	100
<i>Lejeunecysta</i> gr.	187	3.02	99
Quiste de <i>P. americanum</i>	86	1.12	87
Quiste de <i>P. fukuyoi</i>	78	1.11	88
Quiste de <i>P. stellatum</i>	15	0.21	56
<i>Echinidinium</i> gr.	195	2.36	93
<i>Q. concreta</i>	348	5.66	99
<i>S. nephroides</i>	145	2.33	97
<i>S. quanta</i>	12	0.15	40
<i>S. undulata</i>	187	2.77	92
<i>S. robustum</i>	12	0.15	49
<i>V. calvum</i>	20	0.3	64
<i>V. spinosum</i>	14	0.15	38

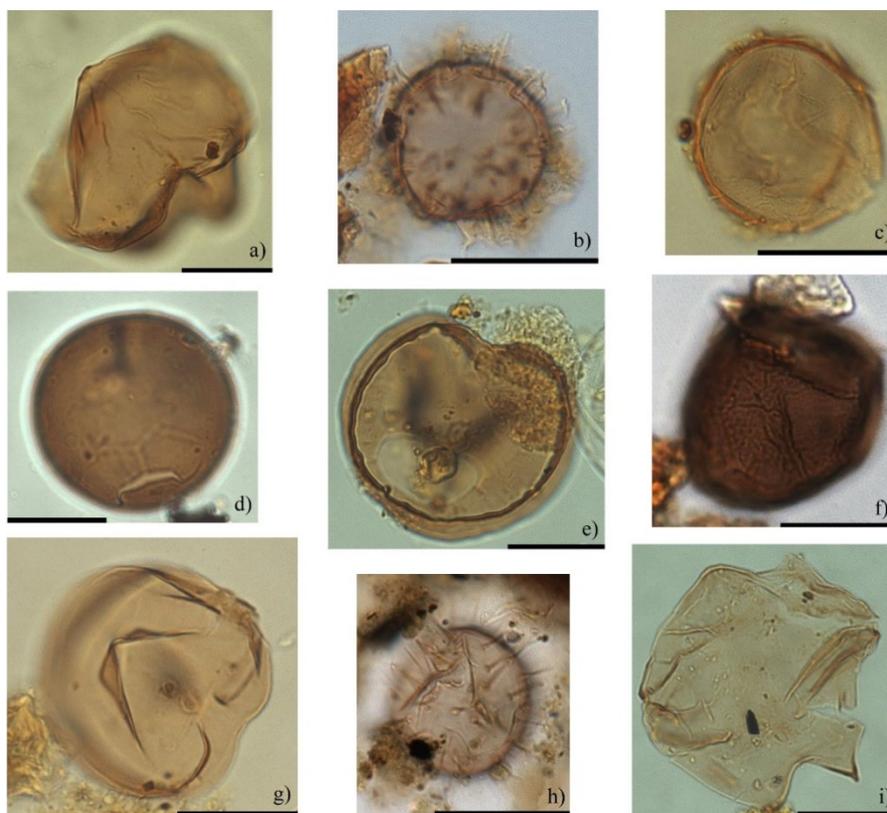
Las especies de quistes de dinoflagelados cuya abundancia relativa  $\bar{X} > 1\%$  y la presencia en el total de las muestras analizadas es  $> 70\%$ , se muestran en las Figuras 3 y 5. Los perfiles de concentraciones y abundancias relativas de estas especies se encuentran en la Figura 4.



**Figura 3.** a) Quiste de *G. catenatum* (400X); b) *B. spongium* (400X); c) Quiste de *P. schwartzii* (600X); d) *S. cf. bentorii* (400X); e) Quiste de *G. microreticulatum-nolerii* (600X). Aumento indicado en paréntesis, la barra negra corresponde a 25 µm.



**Figura 4.** Concentraciones (quistes/g) y abundancias relativas (%) de las principales especies y grupos taxonómicos de quistes de dinoflagelados. Las columnas de especies indicadas corresponden a ambos parámetros.



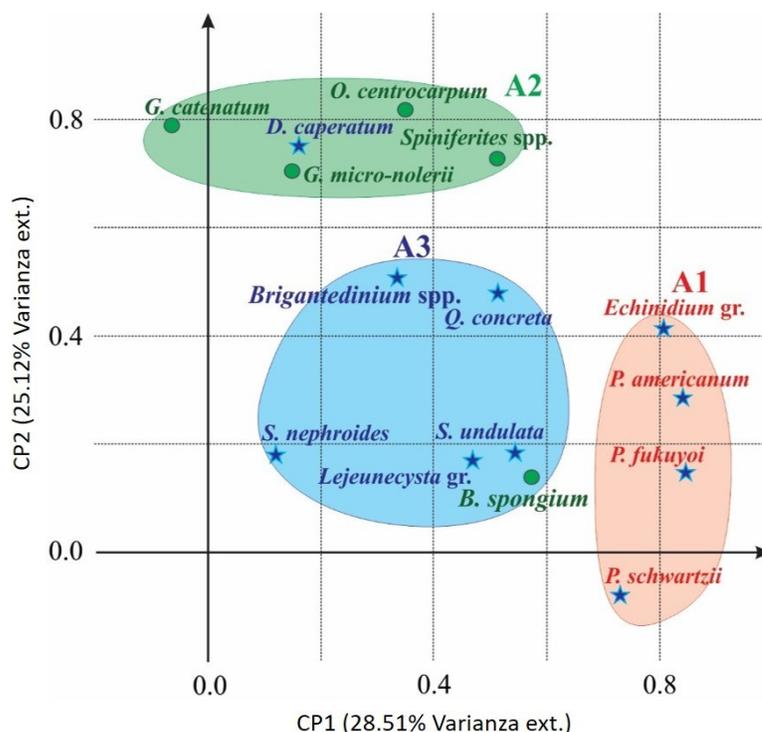
**Figura 5.** a) *Q. concreta* (400X); b) Quiste de *P. kufuyoi* (600X); c) Quiste de *P. americanum* (600X); d) *Brigantedinium* sp. (400X); e) *S. undulata* (400X); f) *D. caperatum* (400X); g) *S. nephroides* (400X); h) *I. pacificum.* (600X); i) *L. oliva* (400X). Aumento indicado en paréntesis, la barra negra corresponde a 25  $\mu$ m.

### 3.3 Análisis estadístico multivariado

Los resultados del ACP muestra tres componentes principales que explican el 76.57% del total de la varianza de los quistes de dinoflagelados, el primer componente (CP1) explica el 28.51% de la varianza, el segundo componente (CP2) explica el 25.12% y el tercer componente (CP3) el 22.94% (Anexo D)

Así mismo, el ACP evidencia tres conjuntos de quistes de dinoflagelados definidos por los tres componentes principales respectivos; donde, el primer conjunto (A1) está determinado por el CP1 y está compuesto por quistes de dinoflagelados heterotróficos *P. americanum*, *P. fukuyoi*, *P. schwartzii* y *Echinidinium* gr. El CP2 define el segundo conjunto (A2) y se encuentra integrado principalmente por quistes de dinoflagelados autotróficos *O. centrocarpum*, *G. catenatum*, *G. microreticulatum-nolerii* y *Spiniferites* spp y el dinoflagelado heterotrófico *D. caperatum*. El CP3 establece el tercer conjunto (A3) y

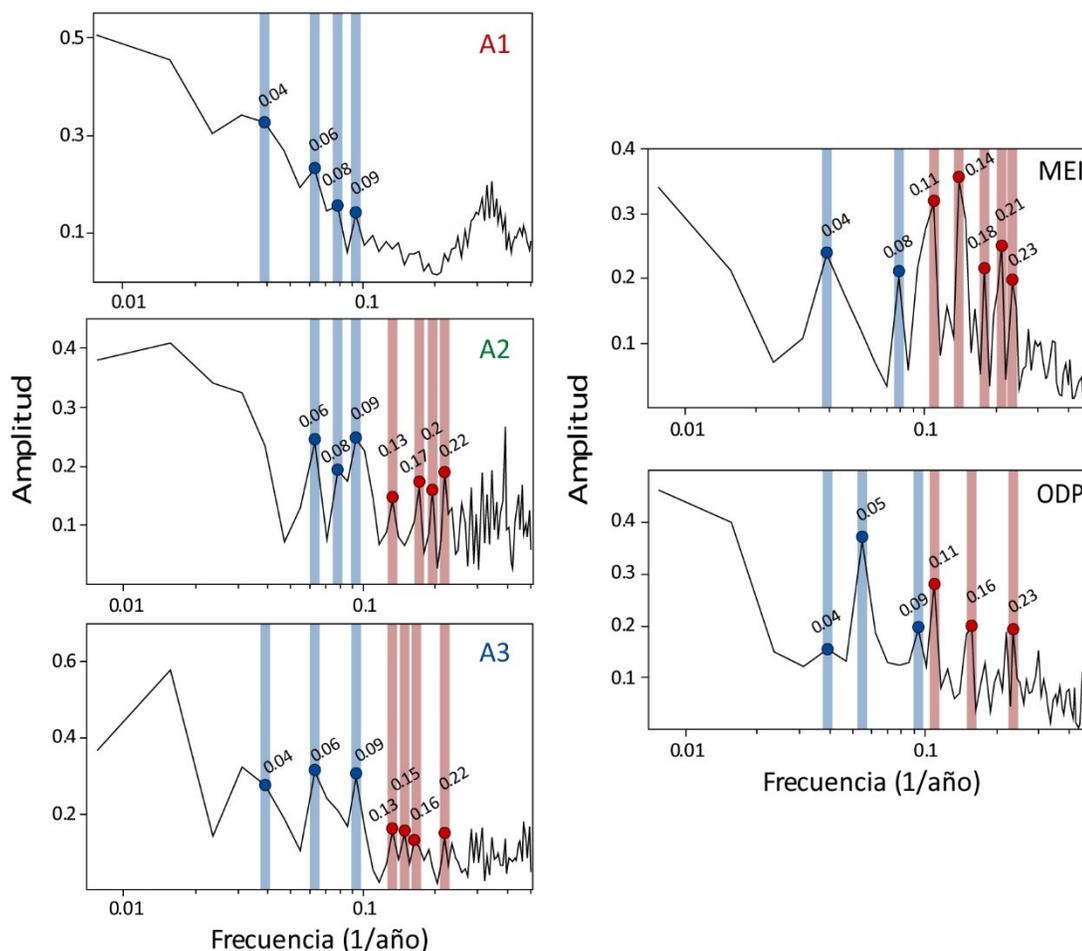
está conformado esencialmente por heterotróficos *S. nephroides*, *S. undulata*, *Q. concreta*, *Brigantedinium* spp. y *Lejeunecysta* gr. y el dinoflagelado autotrófico *B. spongium* (Figura 6). Se puede observar, que los conjuntos A1 y A3 son primordialmente dinoflagelados heterotróficos, mientras que el conjunto A2 está compuesto fundamentalmente por dinoflagelados autotróficos.



**Figura 6.** Ejes del ACP, CP1 vs. CP2, muestra el ordenamiento de los conjuntos de quistes de dinoflagelados A1, A2 y A3. Taxones heterotróficos (estrellas azules) constituyen A1 (elipsoide rojo), mientras A2 (elipsoide verde) está integrado predominantemente por taxones autotróficos (círculos verdes) y *D. caperatum*. Taxones heterotróficos y *B. spongium* forman A3 (elipsoide azul). *G. micro-nolerii* representa el quiste de *G. microreticulatum-nolerii*.

### 3.4 Análisis de frecuencias

La matriz de correlación de Pearson indica una alta correlación y estadísticamente significativa entre los conjuntos de quistes de dinoflagelados A1, A2 y A3; pero cada uno de estos conjuntos no tiene una alta correlación lineal con los índices climáticos MEI y ODP (Anexo E). Sin embargo, el análisis de frecuencias muestra una probable correspondencia cíclica entre los espectros de los conjuntos de quistes de dinoflagelados (A1, A2 y A3) con los índices climáticos MEI y ODP (Figura 7).



**Figura 7.** Espectros de frecuencias de los conjuntos de quistes de dinoflagelados (A1, A2 y A3) y los índices climáticos (MEI y ODP). Las frecuencias indicadas en círculos y bandas azules son compartidas entre los conjuntos y ODP, mientras las frecuencias indicadas con círculos y bandas rojas son compartidas entre los conjuntos y el MEI. Fueron seleccionadas las frecuencias compartidas con las mayores amplitudes entre los conjuntos y los índices climáticos y que posiblemente están representadas en la serie de tiempo. El eje de las frecuencias está en escala logarítmica.

El análisis de frecuencias indica que existe una concordancia periódica entre los conjuntos de quistes de dinoflagelados (A1, A2 y A3) y los forzamientos climáticos MEI y ODP. Las periodicidades con mayores amplitudes entre los conjuntos corresponden a un primer ciclo entre ~16 y 25 años y es compartido por los índices climáticos ODP y MEI. Un segundo ciclo corresponde al periodo entre ~9 y 12.5 años, identificado por el MEI y calculado para la ODP, A1, A2 y A3. El tercer ciclo principal posee una periodicidad entre ~4 y 7 años, designado por el MEI y se encontró para la ODP, junto con A2 y A3 (Tabla 5). Varias investigaciones han reportado estas mismas periodicidades para estos índices climáticos (Trenberth y Hurrell, 1994; Ware y Thomson, 2000; Newman et al., 2003; Lohmann et al., 2004; Dima et al., 2005; Patterson et al., 2013).

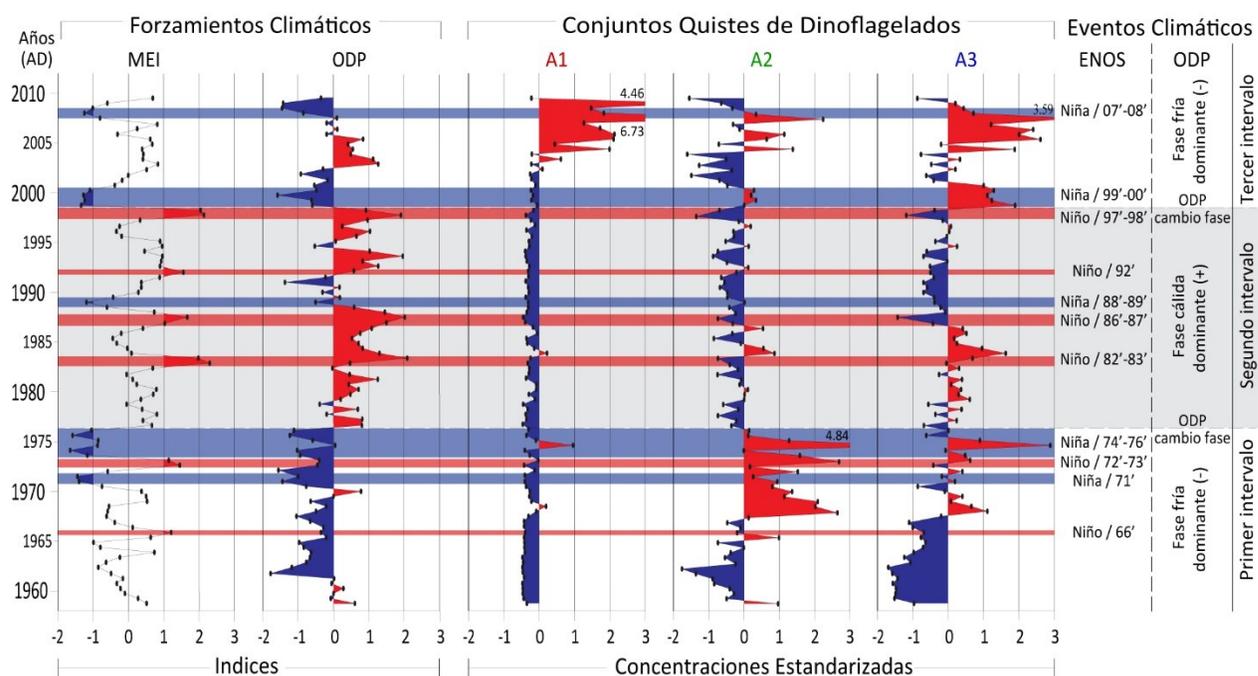
**Tabla 5.** Periodicidades relevantes y posibles ciclos correspondientes entre los índices climáticos MEI y ODP y los conjuntos de quistes de dinoflagelados A1, A2 y A3. Periodicidades (Period) fueron calculadas con el inverso de la frecuencia (Frec).

Ciclos	Índices Forzamientos Climáticos				Grupos de Quistes de Dinoflagelados					
	MEI		ODP		A1		A2		A3	
	Period (años)	Frec (1/año)	Period (años)	Frec (1/año)	Period (años)	Frec (1/año)	Period (años)	Frec (1/año)	Period (años)	Frec (1/año)
Ciclo 1	25	0.04	25	0.04	25	0.04	-	-	25	0.04
	-	-	20	0.05	16.66	0.06	16.66	0.06	16.66	0.06
Ciclo 2	12.5	0.08	11.11	0.09	12.5	0.08	12.5	0.08	-	-
	9.09	0.11	9.09	0.11	11.11	0.09	11.11	0.09	11.11	0.09
Ciclo 3	7.14	0.14	-	-	-	-	7.69	0.13	7.69	0.13
	5.55	0.18	6.25	0.16	-	-	5.88	0.17	6.66	0.15
	4.76	0.21	-	-	-	-	5	0.2	6.25	0.16
	4.35	0.23	4.35	0.23	-	-	4.54	0.22	4.54	0.22

### 3.5 Intervalos climáticos y respuestas de dinoflagelados

Una comparación de los gráficos de los índices climáticos y los conjuntos de quistes de dinoflagelados define tres intervalos (Figura 8). Dado que los conjuntos de quistes de dinoflagelados y los índices climáticos se miden en diferentes unidades, los valores fueron estandarizados alrededor de la media con una desviación estándar de 1, para facilitar su comparación.

También, para ser consistentes se utilizaron las edades con la resolución decimal calculada por el modelo de edad. Con base en los cambios en la fase de la ODP dominante, el período estudiado puede subdividirse en tres intervalos, con predominio alterno de las fases fría y cálida. El MEI indica eventos fuertes El Niño ( $> 1$ ) y eventos fuertes La Niña ( $< -1$ ).



**Figura 8.** Comparación de las concentraciones de los conjuntos de quistes de dinoflagelados (A1, A2 y A3) y los índices climáticos (MEI y ODP) con valores estandarizados. El primer y tercer intervalo, se caracterizan por estar en una fase predominantemente fría de la ODP, mientras el segundo intervalo representa principalmente una fase cálida. Las bandas de color rojo indican eventos fuertes El Niño y las bandas de color azul indican eventos fuertes La Niña.

Los cambios mostrados por los índices climáticos y los conjuntos de quistes de dinoflagelados reflejan las condiciones o eventos climáticos y la respuesta correspondiente de los grupos de quistes de dinoflagelados. El conjunto A1 tiene valores bajos, excepto entre los años 1974-1976 correspondiente al evento fuerte La Niña y particularmente desde el 2005-2009. Los cuatro intervalos 1971, 1974-1976, 1999-2000 y 2007-2008 muestran una combinación de eventos fuertes La Niña y fase fría de la ODP, donde los valores de los conjuntos de quistes de dinoflagelados A2 y A3 son generalmente positivos y altos. Por el contrario, los cuatro intervalos 1982-1983, 1986-1987, 1992 y 1997-1998 muestran una combinación de eventos fuertes El Niño y fase cálida de la ODP, donde los valores de los conjuntos de los quistes de dinoflagelados son bajos, esto es más evidente para los conjuntos A2 y A3.

### 3.5.1 Primer intervalo: 1959 - 1976

En general, este intervalo representa una fase negativa (fría) de la ODP con un promedio ( $\bar{X}$ ) de -0.56 y una fase predominantemente negativa (La Niña) del MEI con  $\bar{X} = -0.32$ . En cuanto a los conjuntos de quistes de dinoflagelados, A1 y A3 tienen valores predominantemente negativos con  $\bar{X} = -0.31$  y  $\bar{X} = -0.42$  respectivamente. Por otro lado, A2 presenta los valores más altos de toda la serie de tiempo y dos periodos alternos con  $\bar{X} = 0.48$  generalmente positivo.

Este primer intervalo presenta valores fuertemente fluctuantes de A2 y A3, con una transición entre los años 1967 y 1968. Los valores de A3 desde 1959 a 1967 son negativos ( $\bar{X} = -1.12$ ), mientras que a partir de 1968 los valores son positivos ( $\bar{X} = 0.32$ ). Igualmente, entre los años 1959-1967, los valores de A2 cambian desde negativos ( $\bar{X} = -0.37$ ) a positivos ( $\bar{X} = 1.38$ ) desde 1968 a 1976. En contraste, el conjunto A1 presenta un comportamiento consistente con valores primordialmente negativos. Un pequeño cambio es observado en este intervalo, desde  $\bar{X} = -0.43$  entre 1959 y 1967 hasta  $\bar{X} = -0.17$  entre 1968 y 1976.

En este intervalo, ocurrieron dos eventos fuertes El Niño, uno en 1966 (El Niño/66') con  $\bar{X} = 1.20$  y otro entre 1972 y 1973 (El Niño/72'-73') con  $\bar{X} = 1.29$ . También ocurrieron dos eventos fuertes La Niña, el primero en el año 1971 (La Niña/71') con  $\bar{X} = -1.42$  y el segundo evento entre 1974 y 1976 (La Niña/74'-76') con  $\bar{X} = -1.20$ .

### 3.5.2 Segundo intervalo: 1977 – 1998

Durante este intervalo ambos índices climáticos estuvieron en fase cálida o positiva con ODP  $\bar{X} = 0.64$  y MEI  $\bar{X} = 0.50$ . A diferencia de los índices climáticos, los conjuntos A1, A2 y A3 muestran  $\bar{X} = -0.28$ ,  $\bar{X} = -0.31$  y  $\bar{X} = -0.1$ , respectivamente. Los valores de A3 fluctúan, con un cambio en 1986, antes de este año son principalmente positivos ( $\bar{X} = 0.27$ ) y después de 1986 son predominantemente negativos ( $\bar{X} = -0.41$ ). Los valores de los conjuntos A1 y A2 muestran un comportamiento más uniforme con valores principalmente negativos. Sin embargo, A2 cambia desde  $\bar{X} = -0.18$  (1977 a 1986), hasta  $\bar{X} = -0.42$  (1987 a 1998), mientras A1 muestra un patrón similar ( $\bar{X} = -0.25$  y  $\bar{X} = -0.32$ ) durante este mismo periodo.

Este intervalo muestra cuatro eventos fuertes El Niño, el primero entre 1982 y 1983 (El Niño/82'-83', MEI  $\bar{X} = 2.12$ ), el segundo evento entre 1986 y 1987 (El Niño/86'-87', MEI  $\bar{X} = 1.36$ ), el tercero en 1992 (El

Niño/92',  $\bar{X} = 1.54$ ) y el cuarto desde 1997 a 1998 (El Niño/97'-98', MEI  $\bar{X} = 2.07$ ). Sólo un evento fuerte La Niña es registrado para este intervalo, entre 1988 y 1989 (La Niña/88'-89', MEI  $\bar{X} = -1.13$ ).

### 3.5.3 Tercer intervalo: 1999 - 2009

Para este intervalo, la ODP y el MEI estuvieron predominantemente en fase negativa ( $\bar{X} = -0.22$  y  $\bar{X} = -0.21$ , respectivamente). Sin embargo entre 2002 y 2005 ambos índices son positivos, MEI con  $\bar{X} = 0.55$  y ODP con  $\bar{X} = 0.78$ . Los valores de A1 y A3 son principalmente positivos,  $\bar{X} = 1.04$  y  $\bar{X} = 0.85$  respectivamente, mientras los valores de A2 fluctúan más, pero son predominantemente negativos ( $\bar{X} = -0.16$ ).

Durante este intervalo, A1 muestra el cambio más drástico de toda la serie de tiempo, ya que tuvo valores ligeramente negativos de 1999 a 2004 ( $\bar{X} = -0.09$ ), y valores positivos altos de 2004 a 2009 ( $\bar{X} = 2.17$ ). A2 también muestra la misma tendencia, con una moderada transición, ya que pasa de  $\bar{X} = -0.51$  entre 1999 y 2004, a  $\bar{X} = 0.18$  entre 2004 y 2009. A3 tiene valores principalmente positivos, primero de 1999 a 2002 ( $\bar{X} = 0.71$ ) y luego de 2004 a 2009 ( $\bar{X} = 1.27$ ). Sin embargo entre 2002 y 2004 los valores son negativos ( $\bar{X} = -0.31$ ), estos años coinciden con valores positivos del MEI ( $\bar{X} = 0.54$ ) y ODP ( $\bar{X} = 0.96$ ). Así mismo, A2 presenta valores negativos ( $\bar{X} = -1.13$ ) para esos años. En este intervalo, ocurrieron dos eventos fuertes La Niña. El primero entre 1999 y 2000 (La Niña/99'-00') con  $\bar{X} = -1.23$  y el segundo evento desde 2007 a 2008 (La Niña/07'-08') con un MEI  $\bar{X} = -1.12$ .

## 3.6 Análisis de serie de tiempo – Transformada *Wavelet*

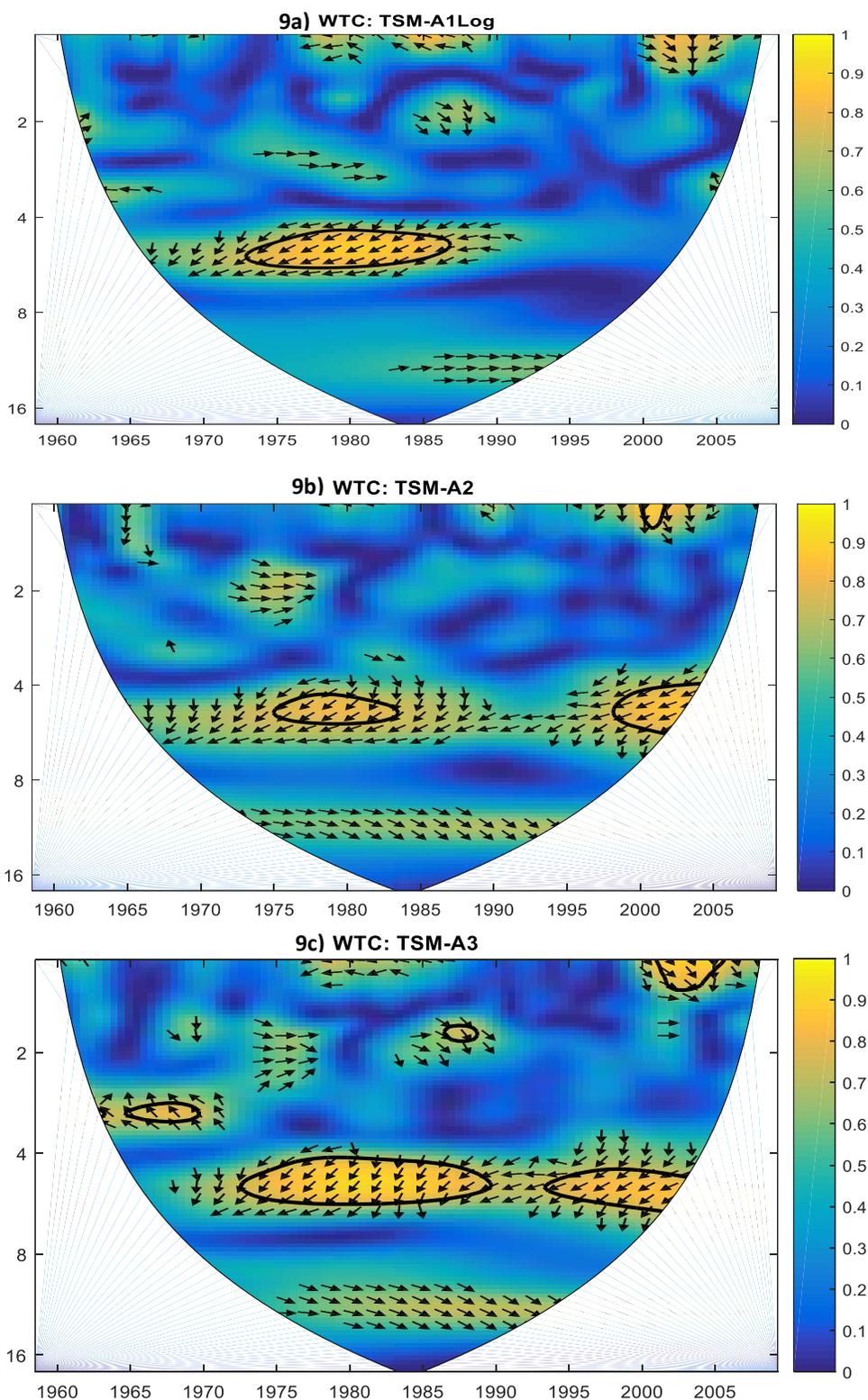
En la serie de tiempo evaluada entre los años 1959 y 2009 AD, el análisis de Coherencia de la Transformada *Wavelet* (WTC) revela las altas correlaciones y estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95%, entre las variables físico-climáticas (TSM, MEI y ODP) y las variables micropaleontológicas (conjuntos de quistes de dinoflagelados A1, A2 y A3).

### 3.6.1 TSM vs. A1, A2 y A3

El análisis WTC demuestra las altas correlaciones entre las series de tiempo de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) y los conjuntos de quistes de dinoflagelados (Tabla 6). En el caso de la TSM vs. A1 se evidencia que entre 1973 y 1986 hay una periodicidad de  $\sim 4.6$  a 6.2 años (Figura 9a). Entre la TSM y A2 se observa que entre 1975 y 1983 existe una periodicidad de  $\sim 4.4$  a 5.6 años; así mismo, entre 1998-2004 es posible apreciar un período de  $\sim 4$  a 6 años y en 2000-01' se nota una periodicidad entre  $\sim 1.06$  y 1.3 años (Figura 9b). En el caso de la TSM vs. A3 se indica que entre 1965-69' hay un período de  $\sim 3$  a 3.4 años; entre 1973-1989 se muestra una periodicidad de  $\sim 4.2$  a 6 años; entre 1986-88' se observa un período de  $\sim 1.7$  a 1.9 años; entre 1993-2003 se expone una periodicidad de  $\sim 4.6$  a 6.2 años y entre 2001-05' se entrevé un período de  $\sim 1.06$  a 1.3 años (Figura 9c).

**Tabla 6.** Periodicidades en años y edades AD, revelados por el análisis WTC entre la TSM vs. A1, A2 y A3, con altas correlaciones y estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95%.

<b>Análisis WTC (TSM vs. A1, A2 y A3)</b>			
<b>Período (años)</b>	<b>Edad (años AD)</b>		
	<b>TSM vs. A1</b>	<b>TSM vs. A2</b>	<b>TSM vs. A3</b>
1.06 - 1.5		2000-01'	2001'-05'
1.5 - 2.0			1986-88'
2.0 - 4.0			1965-69'
4.0 - 7.0	1973-86'	1975-83', 1998-04'	1973-89', 1993-03'



**Figura 9a)** TSM vs. A1. **9b)** TSM vs. A2. **9c)** TSM vs. A3. Análisis WTC para una serie de tiempo entre los años 1959-2009 AD (eje X), el valor mínimo del período (eje Y) equivale a  $\sim 1.059$  años y la barra de colores indica la coherencia entre ambas series de tiempo respectivamente. Las áreas encerradas en los contornos negros indican alta correlación estadística con un nivel de confianza del 95% entre las dos series de tiempo de cada análisis respectivo. Las flechas que apuntan hacia la derecha muestran que ambas series están en fase y hacia la izquierda indica que están fuera de fase.

### 3.6.2 MEI vs. A1, A2 y A3

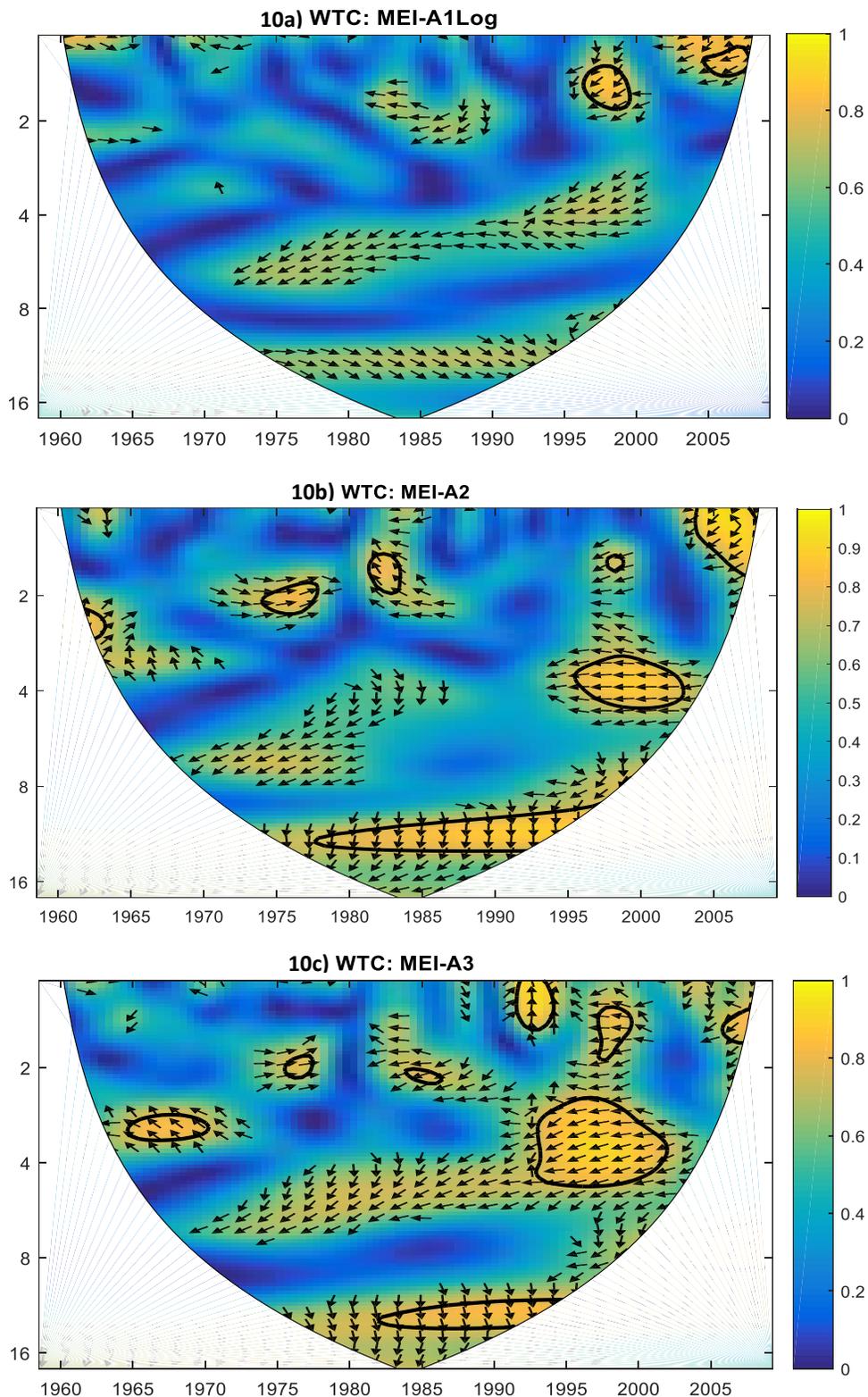
El análisis WTC evidencia las altas correlaciones entre las series de tiempo del índice climático MEI y los conjuntos de quistes de dinoflagelados (Tabla 7). Para el MEI y el conjunto A1, existe una alta correlación durante los años 1996-99' con una periodicidad entre  $\sim 1.4$  y 1.8 años, evidenciando el evento El Niño/97'-98' y para los años 2005-08' se muestra una periodicidad entre  $\sim 1.2$  a 1.5 años revelando el evento La Niña/07'-08' (Figura 10a).

En el caso del MEI vs. A2 hay altas correlaciones entre los años 1961-63' con un período de  $\sim 2.2$  a 2.8 años; entre 1974-77' se muestra un período de  $\sim 1.8$  a 2.4 años, exponiendo el evento La Niña/74'-76'; así mismo entre 1981-83' se observa una periodicidad de  $\sim 1.5$  a 2 años, evidenciando una alta correlación con El Niño/82'-83'; durante 1995-2003 hay periodicidades entre  $\sim 3.3$  y 4.8 años, revelando los eventos El Niño/97'-98', La Niña/99'-00' y El Niño/02'-03'; El Niño/97'-98' también muestra una periodicidad de  $\sim 1.5$  años; en los años 2003-08' las periodicidades están entre  $\sim 1.06$  y 1.8 años, lo cual también muestra el evento La Niña/07'-08' y por último entre 1977-1997 se observa una alta correlación en un período entre  $\sim 10$  y 13 años (Figura 10b).

Las altas correlaciones entre el MEI y A3, se encuentran entre los años 1964 y 1970 con una periodicidad de  $\sim 3$  a 3.5 años; entre los años 1975-77' y 1984-86' se evidencian períodos de  $\sim 2$  años; en 1982-1994 se muestra una periodicidad entre  $\sim 11$  y 14 años; para los años 1991-94' se observa un período de  $\sim 1.06$  a 1.6 años; entre 1993-2002 se evidencian periodicidades de  $\sim 2.7$  a 5 años, en 1997-99' se observa un período de  $\sim 1.3$  a 1.9 años y entre 2005-08' se muestra una periodicidad de  $\sim 1.3$  a 1.7 años (Figura 10c).

**Tabla 7.** Periodicidades en años y edades AD, exhibidos por el análisis WTC entre el MEI vs. A1, A2 y A3, con altas correlaciones y estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95%.

<b>Análisis WTC (MEI vs. A1, A2 y A3)</b>			
<b>Período (años)</b>	<b>Edad (años AD)</b>		
	<b>MEI vs. A1</b>	<b>MEI vs. A2</b>	<b>MEI vs. A3</b>
1.06 - 1.5	2005-08'	2003-08'	1991-94', 1997-99', 2005-08'
1.5 - 2.0	1996-99'	1974-77', 1981-83', 1997-98', 2003-08'	1975-77', 1997-99', 2005-08'
2.0 - 3.0		1961-63', 1974-77'	1975-77', 1984-86', 1993-02'
3.0 - 4.0		1995-03'	1964-70', 1993-02'
4.0 - 5.0		1995-03'	1993-02'
10.0 - 14.0		1977-97'	1982-94'



**Figura 10a)** MEI vs. A1. **10b)** MEI vs. A2. **10c)** MEI vs. A3. Análisis WTC para una serie de tiempo entre los años 1959-2009 AD (eje X), el valor mínimo del período (eje Y) equivale a  $\sim 1.059$  años y la barra de colores indica la coherencia entre ambas series de tiempo respectivamente. Las áreas encerradas en los contornos negros indican alta correlación estadística con un nivel de confianza del 95% entre las dos series de tiempo de cada análisis respectivo. Las flechas que apuntan hacia la derecha muestran que ambas series están en fase y hacia la izquierda indica que están fuera de fase.

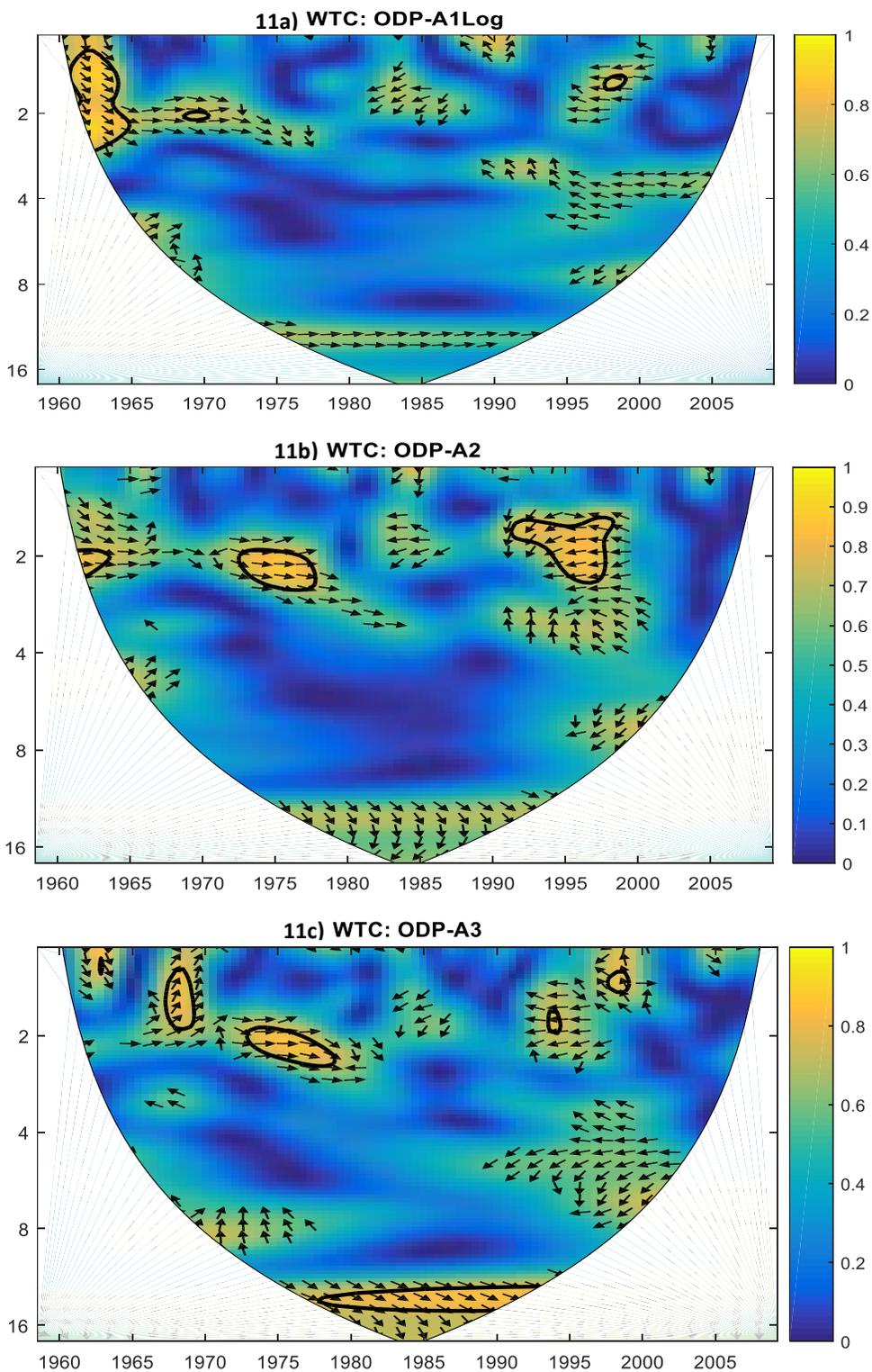
### 3.6.3 ODP vs. A1, A2 y A3

El análisis WTC evidencia las altas correlaciones entre las series de tiempo del índice climático ODP y los conjuntos de quistes de dinoflagelados (Tabla 8). En el caso de la ODP y A1 entre los años 1961-1964 tienen una alta correlación en un período de  $\sim 1.3$  a  $< 3$  años; en 1969 y 1970 la alta correlación se da en un período de  $\sim 2$  años y entre 1997-99' la coherencia se nota en un período de  $\sim 1.5$  años (Figura 11a). Entre la ODP y A2 existe una alta correlación en un período de  $\sim 2$  a 2.7 años entre 1962-64' y 1973-77'; para 1991-98' se observa en un período de  $\sim 1.5$  a  $< 2$  años y entre 1994-98' existe una alta correlación en un período de  $\sim 2.0$  a 2.5 años (Figura 11b).

La alta correlación entre la ODP y A3 se encuentran en los siguientes intervalos de tiempo, entre los años 1967-69' con una periodicidad de  $\sim 1.2$  a  $< 2$  años, en los años 1973-79' se observa una periodicidad de  $\sim 2$  a 2.6 años, entre los años 1978-1992 la coherencia se muestra en un período de  $\sim 13$ -15 años, en los años 1993-94' hay una periodicidad de  $\sim 1.8$  años y entre 1997-99' corresponde a un período de  $\sim 1.3$  a 1.5 años (Figura 11c).

**Tabla 8.** Periodicidades en años y edades AD, expuestos por el análisis WTC entre la ODP vs. A1, A2 y A3, con altas correlaciones y estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95%.

<b>Análisis WTC (ODP vs. A1, A2 y A3)</b>			
<b>Período (años)</b>	<b>Edad (años AD)</b>		
	<b>ODP vs. A1</b>	<b>ODP vs. A2</b>	<b>ODP vs. A3</b>
1.06 - 1.5	1961-64'		1962-63', 1967-69', 1997-99'
1.5 - 2.0	1961-64', 1997-99'	1991-98'	1967-69', 1993-94'
2.0 - 3.0	1961-64', 1969-70'	1962-64', 1973-77', 1994-98'	1973'-79'
13.0 - 15.0			1978-92'



**Figura 11a)** ODP vs. A1. **11b)** ODP vs. A2. **11c)** ODP vs. A3. Análisis WTC para una serie de tiempo entre los años 1959-2009 AD (eje X), el valor mínimo del período (eje Y) equivale a  $\sim 1.059$  años y la barra de colores indica la coherencia entre ambas series de tiempo respectivamente. Las áreas encerradas en los contornos negros indican alta correlación estadística con un nivel de confianza del 95% entre las dos series de tiempo de cada análisis respectivo. Las flechas que apuntan hacia la derecha muestran que ambas series están en fase y hacia la izquierda indica que están fuera de fase.

### 3.7 Cuenca San Lázaro – núcleo SOLE09-1

Para encontrar las especies de quistes de dinoflagelados más consistentes en el registro de las muestras de Cuenca San Lázaro, primero se escudriñaron las bases de datos originales que se encuentran en las tesis de Serrano-Mejía (2016) y Pérez-Rodríguez (2016) y seguidamente se realizó una selección de variables teniendo en cuenta los criterios de clasificación de especies, similar a la realizada para las muestras de Cuenca Pescadero (ver sección 3.2). Las concentraciones promedio, la presencia total en las muestras y las abundancias relativas promedio de las especies seleccionadas se observan en la Tabla 9. Las abundancias relativas promedio fueron recalculadas teniendo en cuenta únicamente las especies seleccionadas.

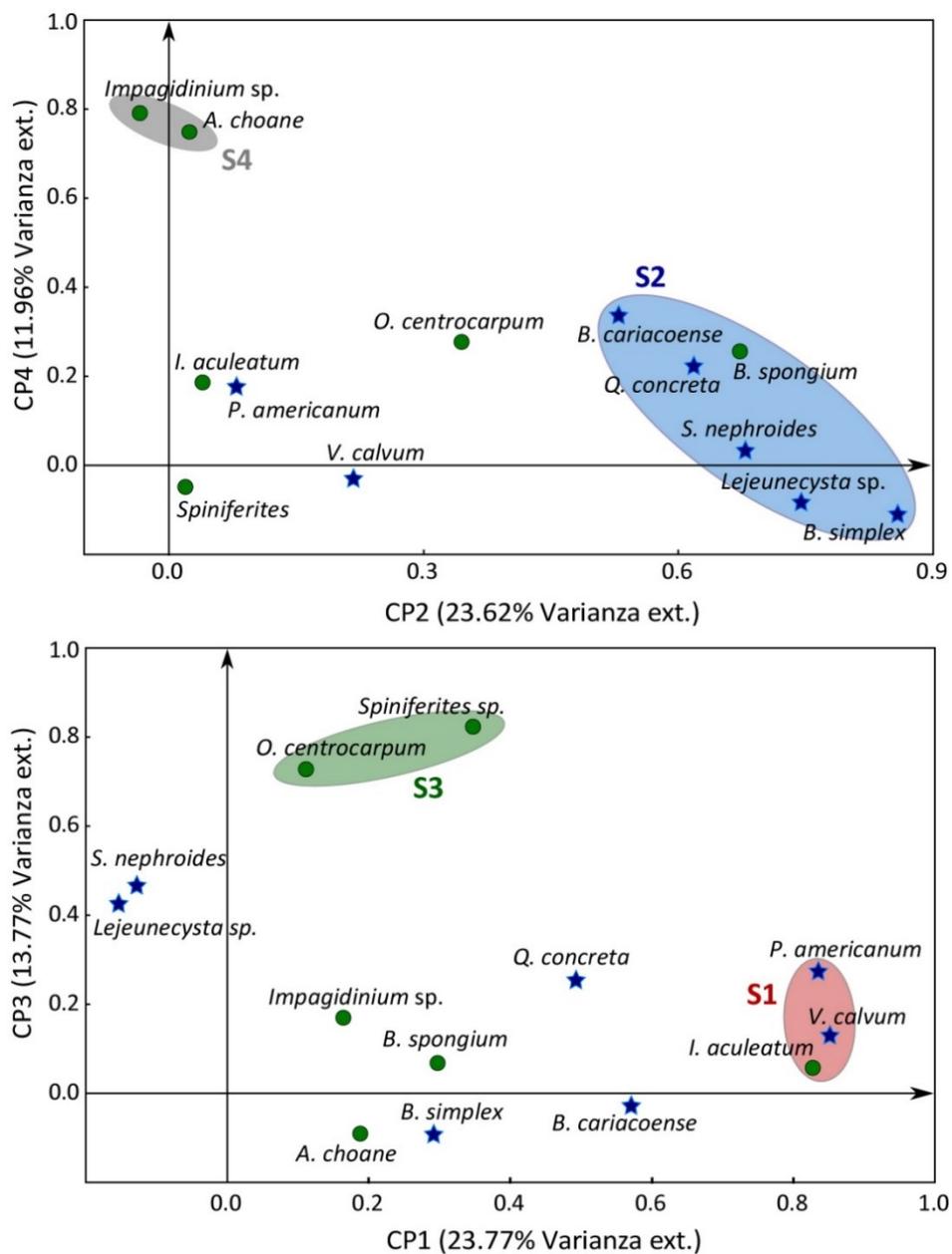
**Tabla 9.** Especies de quistes de dinoflagelados consistentes para Cuenca San Lázaro, de acuerdo a los criterios de selección. Dinoflagelados autotróficos indicados con (+) y heterotróficos con (\*) y las especies resaltadas en negrita, son aquellas especies comunes que tienen una alta correlación estadística ( $r \geq 0.30$ ) y significativa (95% de confianza), según la matriz de correlación de Pearson.

Especies de Quistes de Dinoflagelados	Concentración $\bar{X}$ (quistes/g)	Presencia total en muestras (%)	Abundancia Relativa $\bar{X}$ (%)
<b><i>Ataxiodinium choane</i> (+)</b>	15.5	83	19.87
<i>Bitectatodinium tepikiense</i> (+)	1.6	13	0.62
<b><i>Bitectatodinium spongium</i> (+)</b>	5.5	38	2.77
<i>Gymnodinium</i> sp.	1.5	19	1.56
<b><i>Impagidinium aculeatum</i> (+)</b>	7.2	69	6.02
<i>Impagidinium patulum</i> (+)	1.2	21	1.22
<i>Impagidinium sphaericum</i> (+)	1.6	24	1.27
<b><i>Impagidinium</i> sp. (+)</b>	3.9	48	4.43
<i>Lingulodinium machaerophorum</i> (+)	6	31	2.21
<b><i>Operculodinium centrocarpum</i> (+)</b>	5.2	48	3.25
<i>Pyxidinoopsis reticulata</i> (+)	1.7	26	1.77
<i>Spiniferites ramosus</i> (+)	0.8	17	0.77
<b><i>Spiniferites</i> sp. (+)</b>	8.8	54	4.87
<i>Brigantedinium asymmetricum</i> (*)	1.8	20	1.3
<b><i>Brigantedinium cariaense</i> (*)</b>	6.6	35	3.42
<b><i>Brigantedinium simplex</i> (*)</b>	15.5	69	8.32
<b><i>Lejeunecysta</i> sp. (*)</b>	8.4	45	3.42
<b><i>Protoperidinium americanum</i> (*)</b>	7.7	45	3.42
<i>Protoperidinium</i> sp. (*)	11.1	50	6.59
<b><i>Quinquecuspis concreta</i> (*)</b>	10	64	6.14
<b><i>Selenopemphix nephroides</i> (*)</b>	21.5	77	14
<b><i>Votadinium calvum</i> (*)</b>	7	46	2.75

### 3.7.1 Análisis estadístico multivariado

El ACP arrojó como resultado 4 componentes principales que explican el 73.12% del total de la varianza de quistes de dinoflagelados del núcleo SOLE09-1. El primer componente (CP1) explica el 23.77% de varianza, el segundo componente (CP2) explica el 23.62%, el tercero (CP3) el 13.77% y el cuarto (CP4) explica el 11.96% del total de la varianza (Anexo F).

Consecuentemente, el ACP evidencia cuatro conjuntos de quistes de dinoflagelados definidos por los cuatro componentes principales concernientes. Así, el CP1 define el primer conjunto (S1) y está compuesto por la especie autotrófica *I. aculeatum* y las especies heterotróficas *V. calvum* y *P. americanum*. El CP2 puntualiza el segundo conjunto (S2), conformado por los quistes de dinoflagelados heterotróficos *S. nephroides*, *Q. concreta*, *Lejeunecysta* sp., *B. cariacense* y *B. simplex* y la especie autotrófica *B. spongium*. El tercer conjunto (S3) lo determina el CP3 y está integrado exclusivamente por quistes de dinoflagelados autotróficos *O. centrocarpum* y *Spiniferites* sp. y el cuarto conjunto (S4) lo establece el CP4 y está constituido igualmente por especies autotróficas *A. choane* e *Impagidinium* sp. (Figura 12).



**Figura 12.** Ejes del ACP, CP2 vs. CP4 (arriba) y CP1 vs. CP3 (abajo), muestran el ordenamiento de los conjuntos de quistes de dinoflagelados S1, S2, S3 y S4. Los taxones autotróficos (círculos verdes) constituyen principalmente los conjuntos S4 (elipse gris) y S3 (elipse verde), mientras los taxones heterotróficos (estrellas azules) integran esencialmente los conjuntos S2 (elipse azul) y S1 (elipse roja). La especie autotrófica *B. spongium* hace parte del conjunto de heterotróficos S2.

## Capítulo 4. Discusión

---

Las concentraciones de quistes de dinoflagelados son más altas en áreas próximas a zonas de surgencia costera con alta productividad primaria (Sprangers et al., 2004). También, la abundancia de quistes de dinoflagelados es un reflejo de su cantidad en la fase planctónica y las mayores producciones de quistes se registran durante y después de los florecimientos de fitoplancton, cuando la densidad de células vegetativas es mayor en la columna de agua (Matsuoka y Fukuyo 1994; Peña-Manjarrez et al., 2001; Morquecho et al., 2012). Por tanto, es razonable establecer una relación entre la concentración de quistes en el sedimento y la abundancia de formas planctónicas en la columna de agua.

### 4.1 Conjuntos de quistes de dinoflagelados y productividad primaria

Existe una relación directa de productores marinos primarios y secundarios, con las cantidades de quistes de dinoflagelados estimadas tanto en trampas de sedimentos como en registros sedimentarios marinos (Radi et al., 2007; Pospelova et al., 2008; Radi y de Vernal, 2008; Krepakevich y Pospelova, 2010; Limoges et al., 2010; Bonnet et al., 2012; Bringué et al., 2014). Específicamente, los dinoflagelados heterótrofos están directamente relacionados con la alta producción de sílice biogénica (Pospelova et al., 2010; Price y Pospelova, 2011; Bringué et al., 2013; 2018).

En este estudio, los dinoflagelados heterotróficos contribuyen predominantemente a los conjuntos A1 y A3. Éstos son muy abundantes entre 2005 y 2009 (ver Figura 8). Además, este período contiene las concentraciones totales más altas de toda la serie de tiempo, lo que indica la mayor productividad marina. Esta alta abundancia es consistente con la alta recuperación, también de dinoflagelados heterotróficos, en muestras de núcleo de la Cuenca Santa Bárbara en el Sistema de la Corriente de California (SCC) entre 2000 y 2007 (Bringué et al., 2014) y el marcado aumento de sílice biogénica reportado a principios de la década del 2000 (Barron et al., 2013). Así mismo, hubo un incremento en la productividad primaria marina en el SCC entre 1997 y 2007, como se evidencia en imágenes satelitales de clorofila *a* (Kahru et al., 2009). Igualmente, Bringué et al. (2019) observaron un gran incremento en la productividad primaria marina entre 2006 y 2009, a partir del estudio de quistes de dinoflagelados y sílice biogénica en trampas de sedimentos en Cuenca Cariaco.

El conjunto A3 está conformado por dinoflagelados heterotróficos y *B. spongium*, que según su tabulación gonyaulacoide es autotrófico. Sin embargo, el predominio de taxones heterotróficos, característico del conjunto A3, también ha sido reportado en estudios regionales (Limoges et al., 2010) y globales de zonas tropicales de surgencias activas y ambientes ricos en nutrientes (Zonneveld et al., 2010; 2013; Bringué et al., 2019). En estos estudios, los intervalos con los quistes de dinoflagelados heterotróficos (Protoberidiniaceae) más abundantes (*Brigantedinium* spp., *Q. concreta*, *S. nephroides*) también coinciden con *B. spongium*. Se considera, que cuando hay disponibilidad suficiente de nutrientes, *B. spongium* y las diatomeas florecen, y en estas condiciones también proliferan los dinoflagelados heterótrofos por el exceso de forraje disponible (Bringué et al., 2018; 2019).

## 4.2 Conjuntos de quistes de dinoflagelados y eventos fuertes ENOS

El movimiento hacia el norte de las masas de agua más cálidas durante los eventos de El Niño interrumpe el corredor de surgencia impulsado por el viento a lo largo de la costa sureste del golfo; esta interrupción profundiza la termoclina y disminuye la productividad primaria marina (Herrera-Cervantes et al., 2010).

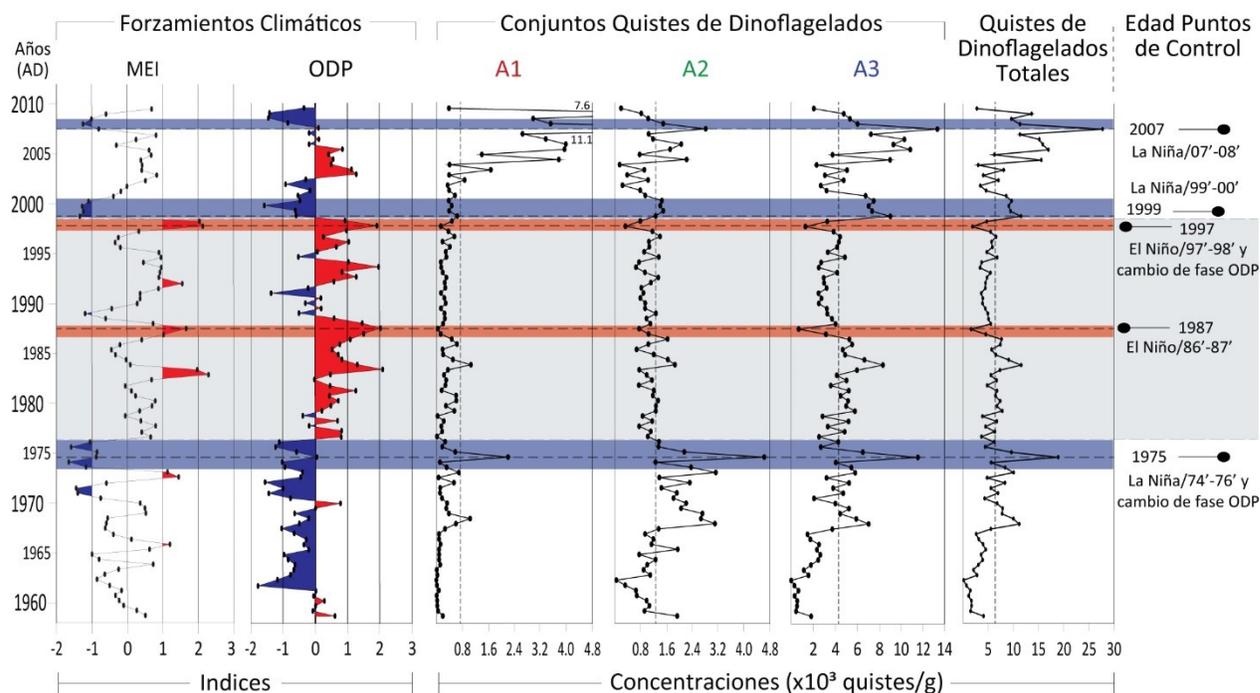
La serie de tiempo desde 1959 – 2009 AD, muestra seis eventos fuertes El Niño con un MEI  $\bar{X} = 1.60$ , donde la respuesta de los conjuntos es negativa, A1 es  $\bar{X} = -0.32$ , A2 es  $\bar{X} = -0.19$  y para A3 es  $\bar{X} = -0.41$ . También fueron registrados para este mismo intervalo, cinco eventos fuertes La Niña con un MEI  $\bar{X} = -1.22$  y durante estos eventos los valores promedio para los conjuntos son positivos A1 ( $\bar{X} = 0.14$ ), A2 ( $\bar{X} = 0.38$ ) y A3 ( $\bar{X} = 0.45$ ) (Tabla 10).

Esencialmente hay una respuesta de los conjuntos de quistes de dinoflagelados a los eventos fuertes del ENOS, tal que durante condiciones El Niño los conjuntos obtienen valores negativos, mientras que durante eventos fuertes La Niña los valores son positivos. No obstante, el conjunto A1 no muestra una clara tendencia en la respuesta a dichos eventos, como si lo evidencian A2 y A3. El comportamiento aparentemente anómalo de A1, pudiera deberse a la baja abundancia de las especies incluidas en este conjunto en casi toda la serie de tiempo.

**Tabla 10.** Valores promedio ( $\bar{X}$ ) del MEI, ODP y de los conjuntos de quistes de dinoflagelados A1, A2 y A3 relacionados con eventos fuertes El Niño y La Niña.

Intervalos de Estudio	Eventos Fuertes de ENOS	Índices Climáticos		Conjuntos de Dinoflagelados		
		MEI	ODP	A1	A2	A3
<b>1° Intervalo (1959 - 1976)</b>	El Niño/66'	1.20	-0.35	-0.40	-0.19	-0.69
	La Niña/71'	-1.42	-1.22	-0.40	0.60	0.01
	El Niño/72'-73'	1.29	-0.42	-0.23	1.42	0.10
	La Niña/74'-76'	-1.20	-0.81	-0.08	1.32	0.60
<b>2° Intervalo (1977 - 1998)</b>	El Niño/82'-83'	2.12	1.28	-0.29	-0.57	0.32
	El Niño/86'-87'	1.36	1.76	-0.42	-0.53	-0.93
	La Niña/88'-89'	-1.13	0.03	-0.31	-0.20	-0.30
	El Niño/92'	1.54	0.54	-0.31	-0.22	-0.50
	El Niño/97'-98'	2.07	1.43	-0.28	-1.02	-0.78
<b>3° Intervalo (1999-2009)</b>	La Niña/99'-00'	-1.23	-0.82	-0.17	0.20	1.38
	La Niña/07'-08'	-1.12	-1.15	1.65	-2x10 <sup>-3</sup>	0.57
<b>Intervalo Total de Estudio</b>	<b>Promedio (<math>\bar{X}</math>)</b>					
	El Niño fuerte	1.60 ± 0.16	0.71 ± 0.38	-0.32 ± 0.03	-0.19 ± 0.34	-0.41 ± 0.21
	La Niña fuerte	-1.22 ± 0.05	-0.79 ± 0.22	0.14 ± 0.38	0.38 ± 0.27	0.45 ± 0.29

Ahora bien, las concentraciones de A1, A2 y A3 son contrastantes entre eventos fuertes El Niño y La Niña, como se muestra en la Figura 13. Para el año 1975, correspondiente al evento La Niña/74'-76', las concentraciones de quistes de dinoflagelados son de 2,216 quistes/g, 4,620 quistes/g y 11,563 quistes/g respectivamente. Asimismo, para el año 2007, correspondiente al evento La Niña/07'-08', las concentraciones de A1, A2 y A3 son 11,081 quistes/g, 2,808 quistes/g y 13,339 quistes/g respectivamente. Por otro lado, en el año 1987, correspondiente al evento El Niño/86'-87', las concentraciones de A1, A2 y A3 fueron de 48 quistes/g, 751 quistes/g y 691 quistes/g respectivamente. De forma similar, para el año 1997 correspondiente al evento El Niño/97'-98', las concentraciones de estos grupos fueron 141 quistes/g, 323 quistes/g y 1,301 quistes/g, respectivamente.



**Figura 13.** Comparación de las concentraciones de los conjuntos de quistes de dinoflagelados (A1, A2 y A3) e índices climáticos (MEI y ODP). La relación entre los cambios en las concentraciones de los grupos de quistes de dinoflagelados (es decir, la productividad primaria marina) y los eventos climáticos (ENOS fuerte y cambios de fase de la ODP) indica las edades de los puntos de control propuestos (ver sección 4.5). Las bandas de color rojo indican eventos El Niño fuerte y las bandas de color azul indican eventos La Niña fuerte.

En Cuenca Pescadero, desde 1907-1994 AD, las concentraciones de *G. catenatum* y otros dinoflagelados autotróficos como *B. spongium*, *O. centrocarpum* y *S. ramosus* han sido reportados como altamente correlacionados y modulados por las anomalías de la temperatura superficial del mar relacionadas con el ENOS (Flores-Trujillo et al., 2009), con concentraciones bajas (altas) durante eventos El Niño (La Niña). Esto es consistente con los resultados de este estudio, puesto que, se interpreta que las variaciones de eventos fuertes ENOS afecta principalmente a los conjuntos A2 (autótrofos *G. catenatum*, *O. centrocarpum* y *Spiniferites* spp.) y A3 (heterótrofos más *B. spongium*). De igual forma, imágenes satelitales de clorofila *a* en el sur del GC indica que durante eventos El Niño fuerte la productividad primaria marina disminuye drásticamente (Santamaría del Angel et al., 1994b; Kahru et al., 2004; Herrera-Cervantes et al., 2010).

Por el contrario, las altas concentraciones del conjunto A2 parecen estar relacionadas con los eventos La Niña y también con la fase fría de la ODP (siguiente sección). Además, en el primer intervalo de la serie temporal (1960-1976), donde dominan estas condiciones, los valores de A2 son los más altos de toda la serie. Este aumento de taxones autótrofos coincide con las mayores abundancias de *O. centrocarpum* y

*Spiniferites* spp. durante el Último Máximo Glacial en la Cuenca Guaymas en la parte central del GC (Price et al., 2013).

### **4.3 Conjuntos de quistes de dinoflagelados y cambios de fase de la ODP**

Hay dos fuertes cambios de fase de la ODP en la serie de tiempo estudiada, el primero en 1976 y el segundo en 1998. Según la resolución de muestreo, el primer cambio de la ODP que ocurrió de 1976 a 1977, se caracterizó por una variación en el valor de la ODP de -1.11 (fase fría) a 0.80 (fase cálida) y en este cambio, las concentraciones de los conjuntos de quistes de dinoflagelados A2 y A3 disminuyeron. Por el contrario, los valores de concentración de los conjuntos de quistes de dinoflagelados A2 y A3 aumentaron cuando el segundo cambio de fase pasó de 0.92 (fase cálida) en 1998 a -0.62 (fase fría) en 1999 (ver Figuras 8 y 13).

Diversos estudios han sugerido la influencia del cambio de fase de la ODP en la productividad primaria marina en el Océano Pacífico (Mantua et al., 1997; Francis et al., 1998; Mantua y Hare, 2002; Chavez et al., 2003). Particularmente en el SCC, la fase cálida de la ODP se caracteriza por una baja productividad marina, mientras que la fase fría presenta una mayor productividad marina (Venrick et al., 1987; Roemmich and McGowan, 1995; McGowan et al., 1998; McGowan et al., 2003; Venrick, 2012). Siguiendo esta tendencia, los quistes de dinoflagelados recuperados de muestras de núcleo de sedimentos laminados en la Cuenca Santa Bárbara del sur de California muestran que las concentraciones de dinoflagelados heterotróficos (principalmente *Brigantedinium* spp.) incrementan en la fase fría de la ODP; por el contrario, en la fase cálida disminuyen (Bringué et al., 2014). Estos cambios son consistentes con los resultados de este estudio, donde el conjunto heterotrófico A3 (*Brigantedinium* spp. taxón más abundante) tiene una respuesta similar.

### **4.4 ENOS-ODP y conjuntos de quistes de dinoflagelados**

Existe una conexión entre las fases ENOS y ODP, por lo que los eventos El Niño son más fuertes durante la fase cálida de la ODP, mientras que los eventos La Niña son más intensos en la fase fría. Por otro lado, cuando estos forzamientos climáticos están fuera de fase (e.g. El Niño con ODP fría y viceversa), las señales

tienden a debilitarse (Trenberth y Hurrell, 1994; Gershunov y Barnett, 1998; Ware y Thomson, 2000; Biondi et al., 2001; Newman et al., 2003).

La serie de tiempo analizada muestra que durante la fase fría de la ODP, los eventos fuertes La Niña son más intensos (La Niña/74'-76', La Niña/99'-00', La Niña/07'-08'), promoviendo así la productividad primaria marina, lo que se refleja en las mayores concentraciones de los conjuntos de quistes de dinoflagelados. Por el contrario, durante la fase cálida de la ODP, los eventos fuertes El Niño son más intensos (El Niño/82'-83', El Niño/86'-87', El Niño/97'-98') y la productividad primaria marina disminuye, evidenciado por las bajas concentraciones de los conjuntos A2 y A3 (ver Figuras 8 y 13).

Sin embargo, los eventos fuertes El Niño (El Niño/66', El Niño/72'-73') y La Niña (La Niña/88'-89') que están fuera de fase con la ODP cálida y fría respectivamente no parecen tener el mismo efecto sobre la productividad primaria marina. Estas combinaciones fuera de fase de eventos fuertes ENOS-ODP no muestran una tendencia clara en las concentraciones de los conjuntos de quistes de dinoflagelados, probablemente porque este acoplamiento de ambos forzamientos atenúa sus efectos sobre la productividad marina en el sur del GC. Este planteamiento debe ser confirmado para otras cuencas del Océano Pacífico Oriental (OPO) subtropical a templado.

#### **4.5 Validación cronológica a partir de los forzamientos climáticos y los conjuntos de quistes de dinoflagelados**

Se proponen cinco puntos de control cronológico, basados en los resultados de los conjuntos de quistes de dinoflagelados como evidencia de la productividad primaria y su relación con los forzamientos climáticos, ENOS y ODP. Estos puntos representan herramientas cronoestratigráficas para ayudar a fechar los sedimentos laminados recientes en el sur del GC y probablemente para el OPO subtropical-tropical. Los puntos de control, particularmente son una clara combinación de condiciones ENOS-ODP en fase y la respuesta correspondiente de los conjuntos de quistes de dinoflagelados, especialmente A2 y A3. Estos puntos cronológicos son (ver Figura 13): 2007 (La Niña/07'-08'), 1999 (La Niña/99'-00'), 1997 (El Niño/97'-98'), 1987 (El Niño/86'-87') y 1975 (La Niña/74'-76'). Respuestas similares de quistes de dinoflagelados en muestras de núcleos del lado del Océano Pacífico de Baja California Sur han sido reportadas para las mismas edades (Castañeda-Quezada, 2016; Serrano-Mejía, 2016; Pérez-Rodríguez, 2016) y en registros del siglo XIX (López-Velázquez et al., 2019).

## 4.6 Criterios de clasificación de especies de quistes de dinoflagelados

Para comparar los conjuntos de quistes de dinoflagelados en diferentes cuencas, es necesario definir las especies que son parte del entorno ecológico de cada cuenca. A este fin, se clasifican estos conjuntos en función de la concentración promedio de los quistes en el sedimento, la abundancia relativa promedio y la presencia de cada especie en la cantidad de muestras analizadas. Cumpliendo con mínimo dos de los tres criterios mencionados, los taxones se separan en comunes, ocasionales o exóticos.

Para este estudio, se consideran especies comunes aquellas con valores promedio mayores al límite inferior de confianza de la media al 90%, las especies exóticas son aquellas que están por debajo del percentil 10 y las especies ocasionales se encuentran entre ambos límites; es decir, valores promedio mayores al percentil 10 pero menores al límite inferior de confianza de la media al 90% (Anexo G). Los límites de cada criterio de clasificación de especies de quistes de dinoflagelados analizados para Cuenca Pescadero y San Lázaro se muestran en la Tabla 11.

**Tabla 11.** Criterios para la clasificación de especies de quistes de dinoflagelados en comunes, ocasionales y exóticas para Cuenca Pescadero y San Lázaro, y los límites correspondientes para cada nivel de clasificación.

Criterios de Clasificación de Especies						
Nivel de clasificación	Abundancia relativa $\bar{X}$ (%)		Presencia total en muestras (%)		Concentración $\bar{X}$ (quistes/g)	
	Pescadero	San Lázaro	Pescadero	San Lázaro	Pescadero	San Lázaro
Común	> 1.16	> 2.86	> 61	> 35	> 76	> 4.8
Ocasional	~0.1 < 1.16	~1.22 < 2.86	25 < 61	19 < 35	~6.0 < 76	~1.5 < 4.8
Exótica	≤ 0.1	≤ 1.22	≤ 25	≤ 19	≤ 6.0	≤ 1.5

Por consiguiente, las especies comunes hacen parte fundamental del nicho ecológico en la zona fótica de cada cuenca en estudio, mientras que las exóticas, como su nombre lo indica son especies raras en el registro sedimentario de la cuenca, por tanto, las condiciones ambientales no son favorables para la proliferación de estas especies y pueden ser consideradas como especies alóctonas. Las ocasionales se toman como especies en transición del área en estudio, es decir no hay certeza local de su condición autóctona, ya que podrían ser o no especies que pertenecen al entorno ecológico. Las especies de quistes de dinoflagelados que pertenecen a cada nivel de clasificación se muestran en la Tabla 12 para Cuenca Pescadero y en la Tabla 13 para Cuenca San Lázaro.

**Tabla 12.** Especies comunes, ocasionales y exóticas de acuerdo a los criterios de clasificación y sus respectivos límites, para Cuenca Pescadero. Las especies de quistes de dinoflagelados autotróficos están indicados con (+) y las especies heterotróficas con (\*).

<b>Clasificación de especies y/o grupo taxonómico de quistes de dinoflagelados (Cuenca Pescadero)</b>		
<b>Comunes</b>	<b>Ocasionales</b>	<b>Exóticas</b>
<i>B. spongium</i> (+)	<i>L. machaerophorum</i> (+)	<i>Impagidinium</i> spp. (+)
<i>G. catenatum</i> (+)	<i>T. vancampoae</i> (+)	<i>N. labyrinthus</i> (+)
<i>G. microreticulatum-nolerii</i> (+)	<i>P. kofoidii</i> (*)	<i>P. zoharyi</i> (+)
<i>O. centrocarpum</i> (+)	<i>P. stellatum</i> (*)	
<i>Spiniferites</i> spp. (+)	<i>S. quanta</i> (*)	
<i>Brigantedinium</i> spp. (*)	<i>S. robustum</i> (*)	
<i>D. caperatum</i> (*)	<i>V. calvum</i> (*)	
<i>Echinidinium</i> gr. (*)	<i>V. spinosum</i> (*)	
<i>Lejeunecysta</i> gr. (*)		
<i>P. americanum</i> (*)		
<i>P. fukuyoi</i> (*)		
<i>P. schwartzii</i> (*)		
<i>Q. concreta</i> (*)		
<i>S. nephroides</i> (*)		
<i>S. undulata</i> (*)		

**Tabla 13.** Especies comunes, ocasionales y exóticas de acuerdo a los criterios de clasificación y sus respectivos límites, para San Lázaro. Las especies de quistes de dinoflagelados autotróficos están indicados con (+) y las especies heterotróficas con (\*).

<b>Clasificación de especies de quistes de dinoflagelados (Cuenca San Lázaro)</b>		
<b>Comunes</b>	<b>Ocasionales</b>	<b>Exóticas</b>
<i>A. choane</i> (+)	<i>I. patulum</i> (+)	<i>B. tepikiense</i> (+)
<i>B. spongium</i> (+)	<i>I. sphaericum</i> (+)	<i>Gymnodinium</i> sp. (+),(*)
<i>I. aculeatum</i> (+)	<i>L. machaerophorum</i> (+)	<i>S. ramosus</i> (+)
<i>Impagidinium</i> sp. (+)	<i>P. reticulata</i> (+)	
<i>O. centrocarpum</i> (+)	<i>B. asymmetricum</i> (*)	
<i>Spiniferites</i> sp. (+)		
<i>B. cariaeoense</i> (*)		
<i>B. simplex</i> (*)		
<i>Lejeunecysta</i> sp. (*)		
<i>P. americanum</i> (*)		
<i>Protoperidinium</i> sp. (*)		
<i>Q. concreta</i> (*)		
<i>S. nephroides</i> (*)		
<i>V. calvum</i> (*)		

Estas clasificaciones son locales y como se puede observar en la Tabla 11 los valores de cada criterio de clasificación van a cambiar de acuerdo con la distribución espacial y temporal de las especies de quistes de dinoflagelados en las diferentes cuencas. Esta clasificación depende principalmente de las variaciones en las condiciones ambientales dominantes en la cuenca y a la preservación de los quistes en el sedimento. No obstante, las definiciones de los límites para cada criterio, son una forma de clasificación estadísticamente válida para diferentes estudios.

Esta propuesta se fundamenta en el hecho, que si se tiene el conocimiento de cuáles son las especies comunes, ocasionales y exóticas de un área específica, se podrían realizar interpretaciones más sólidas desde una escala local, regional y/o global, en cuanto a la distribución espacial y temporal de las especies de quistes de dinoflagelados y su relación con los parámetros físico-climáticos (siguiente sección).

#### **4.7 Comparación ecológica entre Cuenca Pescadero & Cuenca San Lázaro**

De acuerdo con los ACP realizados de forma independiente en las muestras de los núcleos PESC09-2 y SOLE09-1, se estableció una relación directa entre ambas cuencas según el contenido de las especies y grupos taxonómicos de los conjuntos de quistes de dinoflagelados determinados por dicho análisis estadístico. Se encontraron tres conjuntos para Cuenca Pescadero (A1, A2 y A3) y cuatro conjuntos para Cuenca San Lázaro (S1, S2, S3 y S4).

Según el contenido de las especies y/o grupos taxonómicos, se observa que el conjunto S1 corresponde al conjunto A1 (S1 => A1), el conjunto S3 es pertinente al conjunto A2 (S3 => A2) y el conjunto S2 es concerniente al conjunto A3 (S2 => A3). Ahora bien, el conjunto S4 perteneciente a Cuenca San Lázaro no se encuentra en Cuenca Pescadero, ya que los taxones que forman dicho conjunto, no son representativos o ni siquiera están presentes en las muestras de Cuenca Pescadero, estos son *A. choane* e *Impagidinium* sp. (Tabla 14).

La asignación ecológica de las especies presentes en los conjuntos anteriormente mencionados se contrastó con estudios realizados sobre distribuciones espaciales y condiciones ambientales de las diversas especies de quistes de dinoflagelados alrededor del mundo (Rochon et al., 1999; Pospelova et al., 2008; Marret y Zonneveld, 2003; Zonneveld et al., 2013; Bringué et al., 2019; de Vernal et al., 2019; Marret

et al., 2020). Además, la interpretación ecológica específica para cada conjunto y/o combinación de conjuntos de los ACP se da de acuerdo al contenido de las especies de dichos conjuntos, limitándose a las especies con condiciones ambientales más restringidas, como ocurre para el conjunto A2 donde se encuentran *O. centrocarpum* (especie cosmopolita) junto con *G. catenatum* (especie subtropical de zonas costeras), al igual que en el conjunto A3 se tiene *Brigantedinium* spp. (grupo cosmopolita) junto con *B. spongium* (especie tropical de zonas costeras).

**Tabla 14.** Conjuntos equivalentes entre los taxones comunes de quistes de dinoflagelados de las cuencas Pescadero y San Lázaro, y la interpretación ecológica para cada combinación de conjuntos.

Cuenca Pescadero		Cuenca San Lázaro		Ecología de Dinoflagelados	
Especies Comunes	Conjuntos		Especies Comunes	Distribución Espacial	Condiciones Ambientales
<i>P. schwartzii</i> <i>P. americanum</i> <i>P. fukuyoi</i> <i>Echinidinium</i> gr.	A1 & S1		<i>P. americanum</i> <i>V. calvum</i>	Ambientes costeros desde regiones tropicales - templadas	Inestabilidad en el sistema trófico. Desde condiciones eutróficas (surgencias activas) a oligotróficas (relajamiento de surgencias)
<i>D. caperatum</i> <i>G. catenatum</i> <i>G. micro-nolerii</i> <i>O. centrocarpum</i> <i>Spiniferites</i> spp.	A2 & S3		<i>O. centrocarpum</i> <i>Spiniferites</i> sp.	Ambientes costeros desde regiones subtropicales - templadas	Aguas cálidas mesotróficas - oligotróficas, dominan los períodos con relajamiento de las surgencias.
<i>B. spongium</i> <i>Brigantedinium</i> spp. <i>Lejeunecysta</i> gr. <i>Q. concreta</i> <i>S. nephroides</i> <i>S. undulata</i>	A3 & S2		<i>B. spongium</i> <i>B. cariacense</i> <i>B. simplex</i> <i>Lejeunecysta</i> sp. <i>Q. concreta</i> <i>S. nephroides</i>	Ambientes costeros desde regiones subtropicales - tropicales	Zonas con surgencias intensas y activas. Condiciones eutróficas con alta productividad primaria.
—	∅	S4	<i>A. choane</i> <i>Impagidinium</i> sp.	Ambientes costeros - oceánicos en latitudes templadas - subpolares	Aguas frías - templadas, alto contenido en oxígeno, condiciones eutróficas - oligotróficas

#### 4.7.1 Combinación A1 & S1

Estos conjuntos se caracterizan por contener únicamente especies heterótrofas, en A1 están *P. schwartzii*, *P. americanum* y *P. fukuyoi*, y en S1 se encuentra *P. americanum* y *V. calvum*. Particularmente, estas

especies han sido definidas en diferentes cuencas del mundo como indicadoras de ambientes costeros desde regiones tropicales a templadas con una gran inestabilidad interanual en el sistema trófico desde condiciones eutróficas a oligotróficas; es decir, pueden proliferar en períodos con gran aporte de nutrientes por surgencias, como en períodos de bajo aporte por relajamiento de estas (Marret y Zonneveld, 2003; Zonneveld et al., 2013; de Vernal et al., 2019).

Específicamente, las especies de esta combinación son poco abundantes en el registro temporal analizado en comparación con los otros conjuntos principales. Sin embargo, están presentes de manera consistente, lo que podría indicar que regionalmente para el sur del GC y para el OPO subtropical, estos conjuntos representarían condiciones de inestabilidad en el sistema trófico.

#### 4.7.2 Combinación A2 & S3

Estos conjuntos están compuestos esencialmente por especies autótrofas, A2 contiene a *G. catenatum*, *G. microreticulatum-nolerii*, *O. centrocarpum*, *Spiniferites* spp. y la especie heterótrofa *D. caperatum* y en S3 están *O. centrocarpum* y *Spiniferites* sp. Se ha reportado que en diversas cuencas del mundo, la combinación de estas especies indican condiciones en ambientes costeros con aguas mesotróficas a oligotróficas, en regiones subtropicales a templadas y un predominio de períodos con relajamiento de las surgencias (Marret y Zonneveld, 2003; Zonneveld et al., 2013; de Vernal et al., 2019). En el caso de las cuencas Pescadero y San Lázaro, encontramos que esta combinación podría indicar períodos con TSM relativamente cálida, una disminución en la actividad de las surgencias costeras y una probable baja productividad primaria.

#### 4.7.3 Combinación A3 & S2

Esta combinación se encuentra conformada primordialmente por especies heterótrofas, A3 está compuesto por *S. nephroides*, *S. undulata*, *Q. concreta*, *Brigantedinium* spp., *Lejeunecysta* gr., y el autotrófico *B. spongium* y S2 está formado por *S. nephroides*, *Q. concreta*, *B. cariacense*, *B. simplex*, *Lejeunecysta* sp. al igual que el autotrófico *B. spongium*. Las especies de estos conjuntos se caracterizan por encontrarse preferentemente en ambientes costeros bajo condiciones eutróficas, en zonas de

surgencias activas e intensas con alta productividad primaria y con una distribución desde tropical a subpolar (Marret y Zonneveld, 2003; Zonneveld et al., 2013; de Vernal et al., 2019; Marret et al., 2020).

Sin embargo, la presencia significativa de *B. spongium* en ambos conjuntos restringe esta distribución a un ambiente tropical-subtropical, indicando TSM cálida > 20 °C (Zonneveld y Jurkschat, 1999; Marret y Zonneveld, 2003; Zonneveld et al., 2013). Lo anterior representa para la zona de estudio aguas relativamente cálidas, pero rica en nutrientes debido a intensas y activas surgencias costeras en un área con alta productividad primaria.

#### 4.7.4 Conjunto S4

Este conjunto conformado por los taxones autótrofos *Impagidinium* sp. y *A. choane*, está presente en Cuenca San Lázaro, pero no en Cuenca Pescadero. El género *Impagidinium* es un grupo taxonómico que ha sido ampliamente reconocido, como un taxón característico de ambientes oceánicos (Wall et al., 1977; Dale, 1996; Rochon et al., 1999; Marret y Zonneveld, 2003; Zonneveld et al., 2013) y *A. choane* es una especie que se encuentra principalmente en regiones costeras a oceánicas de ambientes templados a subpolares (Rochon et al., 1999; Marret y Zonneveld, 2003; Zonneveld et al., 2013).

De acuerdo con los estudios de distribución global de las especies de quistes de dinoflagelados (Marret y Zonneveld, 2003; Zonneveld et al., 2013; de Vernal et al., 2019), las especies del conjunto S4 son relativamente abundantes en condiciones ambientales preponderantes de aguas bien ventiladas (alto contenido en oxígeno) desde eutróficas a oligotróficas y TSM baja.

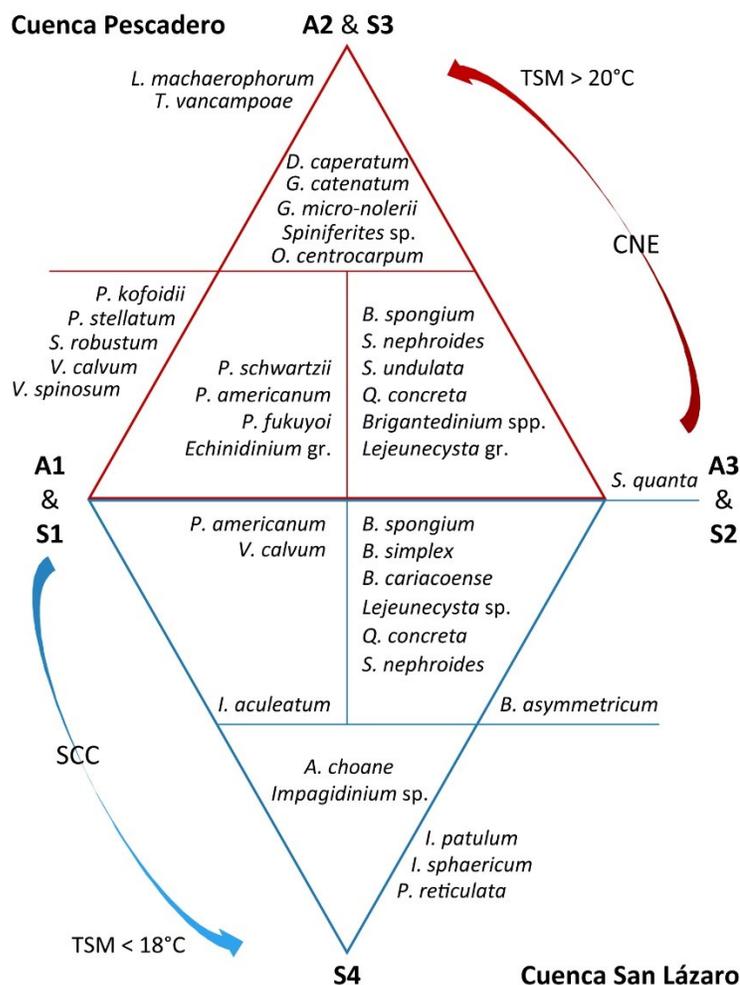
Para la zona de estudio, se interpreta que el conjunto S4 podría considerarse la firma micropaleontológica que indica la influencia del Sistema de la Corriente de California (SCC) en el OPO subtropical-tropical, puesto que este conjunto se observa de manera recurrente en Cuenca San Lázaro. No obstante, para la serie de tiempo analizada, no hay evidencia a partir del estudio de quistes de dinoflagelados, que el SCC afecte directamente el sur del GC, por lo menos para Cuenca Pescadero.

#### 4.7.5 Diagrama ecológico Cuenca Pescadero & Cuenca San Lázaro

Se presenta un diagrama romboidal donde cada vértice está definido por la combinación de los conjuntos de especies y/o grupos taxonómicos comunes, determinados por los ACP's que se realizaron de manera independiente para cada cuenca; las especies que se observan por fuera del diagrama y que están próximas a cada subdivisión, son aquellas especies ocasionales que tienen afinidad taxonómica y/o ecológica con la combinación respectiva (Figura 14). Así, el vértice superior (A2 & S3) está integrado principalmente por especies de quistes de dinoflagelados autotróficos de ambientes costeros subtropicales a templados de aguas cálidas (TSM > 20°C) mesotróficas a oligotróficas; el vértice inferior (S4) también está compuesto por especies autotróficas, pero de ambientes oceánicos a costeros de aguas frías (TSM < 18°C) templadas a subpolares en condiciones eutróficas a oligotróficas.

El vértice lateral derecho (A3 & S2) y las subdivisiones correspondientes están conformadas por especies predominantemente heterotróficas más *B. spongium*, indicadoras de ambientes costeros tropicales-subtropicales en zonas de surgencias intensas y activas, bajo condiciones eutróficas y de alta productividad primaria. El vértice lateral izquierdo (A1 & S1) contiene también especies heterotróficas, aunque de ambientes costeros tropicales a templados con inestabilidad en el sistema trófico, debido probablemente a períodos estacionales con surgencias intensas y de relajamiento desde condiciones eutróficas a oligotróficas respectivamente.

Las condiciones ambientales que simula la combinación A2 & S3 son análogas a las condiciones climáticas para el sureste del GC durante el período verano-otoño, mientras que la combinación A3 & S2 modela las condiciones climáticas de invierno-primavera del sureste del GC. Las especies comunes y ocasionales del conjunto S4 podrían modular las características físico-ambientales del SCC y su influencia en el OPO subtropical, donde evidenciaría TSM < 18°C y aguas con alto contenido en oxígeno y nutrientes provenientes del OPO templado.



**Figura 14.** Diagrama romboidal, la parte inferior (triángulo azul) corresponde a Cuenca San Lázaro y la parte superior (triángulo rojo) a Cuenca Pescadero. Las especies que se encuentran dentro de las subdivisiones del rombo son las especies comunes correspondientes para cada cuenca y las especies que están por fuera del rombo son las especies ocasionales y están ubicadas próximas a la subdivisión correspondiente de acuerdo con su afinidad ecológica y/o taxonómica. La flecha roja indica la influencia de la Corriente Norecuatorial (CNE) cálida (TSM > 20°C) y la flecha azul indica la incursión del Sistema de la Corriente de California (SCC) fría (TSM < 18°C).

#### 4.8 Coherencia clima - productividad primaria

Los resultados arrojados por el análisis de coherencia de la transformada *wavelet* (WTC) entre los parámetros físico-climáticos TSM, ENOS y ODP, y los conjuntos de quistes de dinoflagelados A2 y A3 relacionados con la productividad primaria, son altamente robustos. Estos resultados muestran como estos parámetros climáticos modulan las condiciones de alta y baja productividad, y comprueban que los conjuntos de quistes de dinoflagelados pueden ser indicadores de las condiciones paleoclimáticas y

paleoceanográficas de una región. Esta alta correlación entre las series de tiempo estudiadas con un 95% de confianza, podrían ayudar a entender el vínculo entre eventos climáticos relacionados con los índices ENOS y ODP y su repercusión en la productividad primaria. Ésta se puede identificar en dos dimensiones, cambio en la TSM y tiempo o frecuencia de condiciones óptimas.

#### **4.8.1 Definición del rango de la TSM**

Este parámetro se detecta con la comparación de las WTC y los perfiles de MEI-TSM, ODP-TSM con los conjuntos A2 y A3.

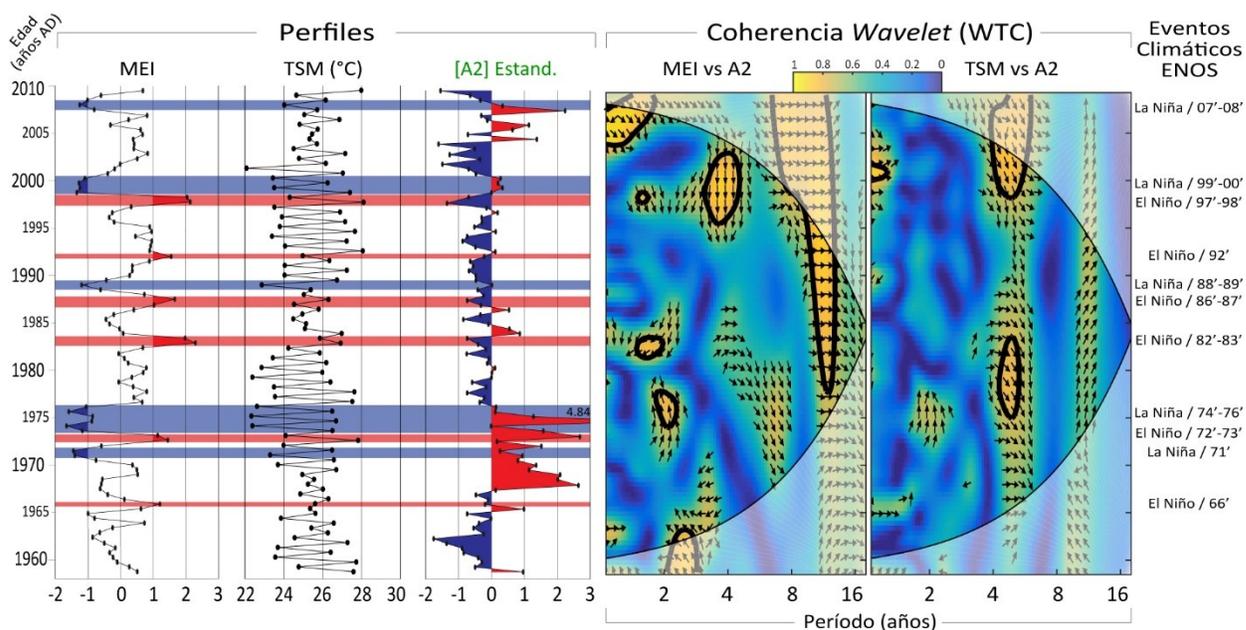
##### **4.8.1.1 WTC & Perfiles del MEI-TSM vs. A2 y A3**

Para el sureste del GC, la serie de tiempo analizada tiene una TSM  $\bar{X} = 25.37^{\circ}\text{C}$ , con un mínimo de  $22.08^{\circ}\text{C}$  y un máximo de  $28.11^{\circ}\text{C}$ . Durante los eventos fuertes de El Niño, la TSM  $\bar{X} = 25.95^{\circ}\text{C}$ , mientras que en eventos fuertes de La Niña, la TSM  $\bar{X} = 24.75^{\circ}\text{C}$ . Esta relación de valores indica que la TSM tiene un cambio de  $\sim 0.6^{\circ}\text{C}$ , aumentando durante los eventos fuertes positivos (El Niño) del ENOS y disminuyendo durante los eventos fuertes negativos (La Niña). Además, la productividad primaria es baja ( $A2 \bar{X} = -0.21$  y  $A3 \bar{X} = -0.4$ ) cuando la TSM  $\sim 26^{\circ}\text{C}$ , mientras que es alta ( $A2 \bar{X} = 0.38$  y  $A3 \bar{X} = 0.45$ ) cuando la TSM  $\sim 25^{\circ}\text{C}$  (Tabla 15), indicando una “ventana de proliferación” de  $\sim 1^{\circ}\text{C}$ .

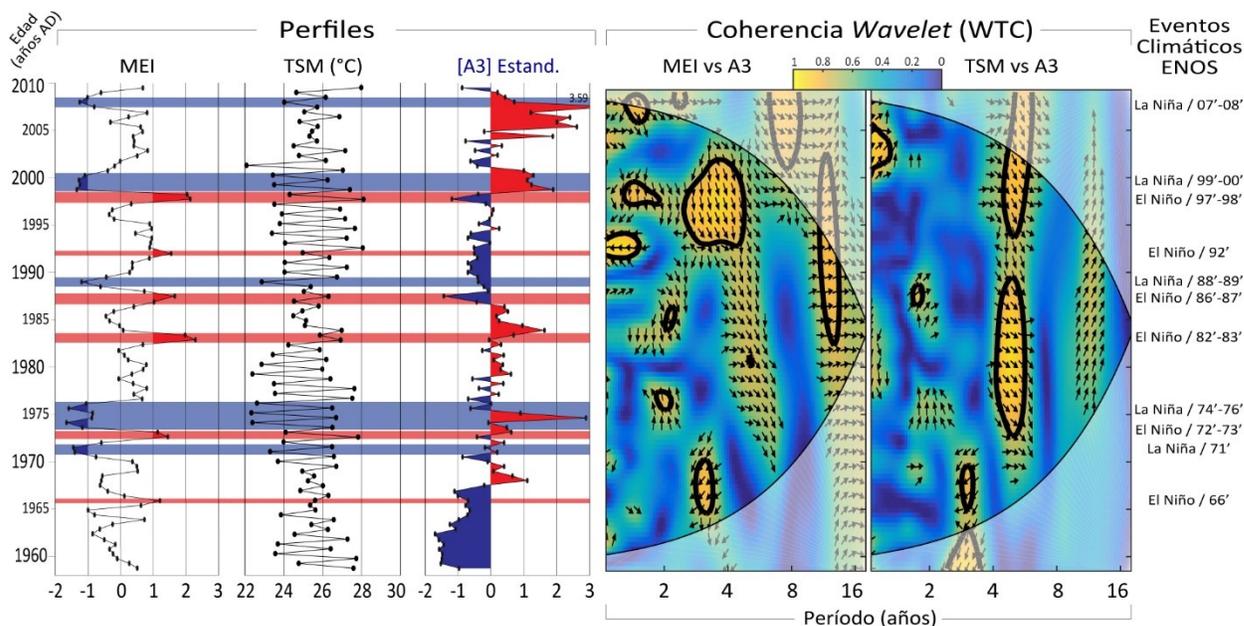
La comparación entre los perfiles del MEI, la TSM y los conjuntos A2 y A3, junto con los análisis WTC entre MEI-TSM vs. A2 y A3, muestra la alta correlación entre las series de tiempo de los parámetros físico-climáticos (MEI-TSM) y la productividad primaria. También se constata que durante los eventos fuertes de El Niño la productividad primaria es baja, mientras que durante los eventos fuertes de La Niña la productividad primaria es alta. Estas condiciones se manifiestan por el comportamiento fuera de fase entre las variables MEI-TSM y la productividad primaria (Figura 15 y 16). Además, se observa que los rangos más probables de la TSM, para la proliferación de los conjuntos A2 y A3 en Cuenca Pescadero son entre  $\sim 24.4$  y  $25.1^{\circ}\text{C}$  para A2 (Figura 15) y entre  $\sim 24.5$  y  $25.5^{\circ}\text{C}$  para A3 (Figura 16). Por lo tanto, el “rango óptimo” de la TSM para una alta productividad primaria en la parte sureste del GC es entre  $\sim 24.4$  y  $25.5^{\circ}\text{C}$ .

**Tabla 15.** Relación numérica entre los factores físico-climáticos (MEI y TSM) y los conjuntos de quistes de dinoflagelados A2 y A3 (productividad primaria), según los eventos fuertes del ENOS de la serie de tiempo estudiada para Cuenca Pescadero. Los eventos fuertes en negrita son los puntos de control propuestos en la sección 4.5.

Intervalos de Estudio	Eventos Fuertes de ENOS	Factores Físico-Climáticos		Conjuntos de Dinoflagelados	
		MEI	TSM (°C)	A2	A3
<b>1° Intervalo (1959 - 1976)</b>	El Niño/66'	1.20	25.62	-0.19	-0.69
	La Niña/71'	-1.42	24.89	0.60	0.01
	El Niño/72'-73'	1.29	25.96	1.42	0.10
	<b>La Niña/74'-76'</b>	<b>-1.20</b>	<b>24.5</b>	<b>1.32</b>	<b>0.6</b>
<b>2° Intervalo (1977 - 1998)</b>	El Niño/82'-83'	2.12	26.39	-0.57	0.32
	<b>El Niño/86'-87'</b>	<b>1.36</b>	<b>25.41</b>	<b>-0.53</b>	<b>-0.93</b>
	La Niña/88'-89'	-1.13	24.13	-0.20	-0.30
	<b>El Niño/97'-98'</b>	<b>2.07</b>	<b>26.21</b>	<b>-1.02</b>	<b>-0.78</b>
<b>3° Intervalo (1999-2009)</b>	<b>La Niña/99'-00'</b>	<b>-1.23</b>	<b>25.15</b>	<b>0.20</b>	<b>1.38</b>
	<b>La Niña/07'-08'</b>	<b>-1.12</b>	<b>25.09</b>	<b>-2x10<sup>-3</sup></b>	<b>0.57</b>
<b>Intervalo Total de Estudio</b>	<b>Promedio (<math>\bar{X}</math>)</b>				
	El Niño fuerte	1.52 ± 0.19	25.95 ± 0.15	-0.21 ± 0.34	-0.40 ± 0.21
	La Niña fuerte	-1.22 ± 0.05	24.75 ± 0.19	0.38 ± 0.27	0.45 ± 0.29



**Figura 15.** Comparación entre los perfiles de las series de tiempo del MEI, TSM y el conjunto de quistes de dinoflagelados A2 (concentraciones estandarizadas) y los análisis de coherencia *wavelet* entre las variables físico-climáticas y la productividad primaria (conjunto A2). En los perfiles las bandas azules (La Niña) y rojas (El Niño) indican los eventos fuertes. En los gráficos del análisis WTC, las áreas amarillas encerradas en el contorno negro, indican alta correlación con un 95% de confianza entre las variables evaluadas para cada gráfico respectivo. Las flechas negras que apuntan hacia abajo, indican que las variables están fuera de fase y las que apuntan hacia arriba están en fase.



**Figura 16.** Comparación entre los perfiles de las series de tiempo del MEI, TSM y el conjunto de quistes de dinoflagelados A3 (concentraciones estandarizadas) y los análisis de coherencia *wavelet* entre las variables físico-climáticas y la productividad primaria (conjunto A3). En los perfiles las bandas azules (La Niña) y rojas (El Niño) indican los eventos fuertes. En los gráficos del análisis WTC, las áreas amarillas encerradas en el contorno negro, indican alta correlación con un 95% de confianza entre las variables evaluadas para cada gráfico respectivo. Las flechas negras que apuntan hacia abajo, indican que las variables están fuera de fase y las que apuntan hacia arriba están en fase.

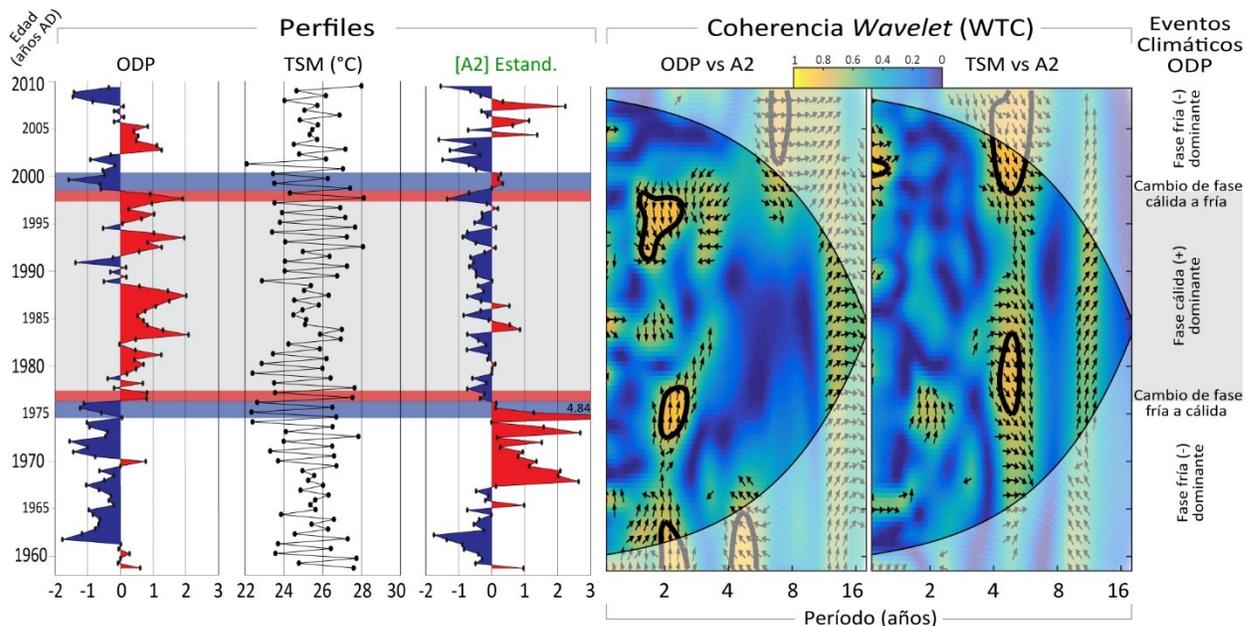
#### 4.8.1.2 WTC & Perfiles de la ODP-TSM vs. A2 y A3

El primer evento climático relevante relacionado al cambio de fase de la ODP, se da entre los años 1975-1977 con una transición de ODP fría  $\bar{X} = -1.17$  con TSM  $\bar{X} = 24.56^{\circ}\text{C}$ , a ODP cálida  $\bar{X} = 0.81$  con  $\bar{X} = 25.54^{\circ}\text{C}$ . El segundo evento ocurre entre 1997-1999, esta vez con una transición de ODP cálida  $\bar{X} = 1.43$  con TSM  $\bar{X} = 26.21^{\circ}\text{C}$ , a ODP fría  $\bar{X} = -0.61$  con  $\bar{X} = 25.46^{\circ}\text{C}$ . En estas transiciones se observa una diferencia promedio de  $\sim 0.8^{\circ}\text{C}$ , además de mayores niveles de productividad primaria (A2  $\bar{X} = 0.15$  y A3  $\bar{X} = 0.63$ ) en la fase fría ( $\bar{X} = -0.89$ ). Mientras que la fase cálida ( $\bar{X} = 1.12$ ) presenta menor productividad (A2  $\bar{X} = -0.66$  y A3  $\bar{X} = -0.5$ ) (Tabla 16).

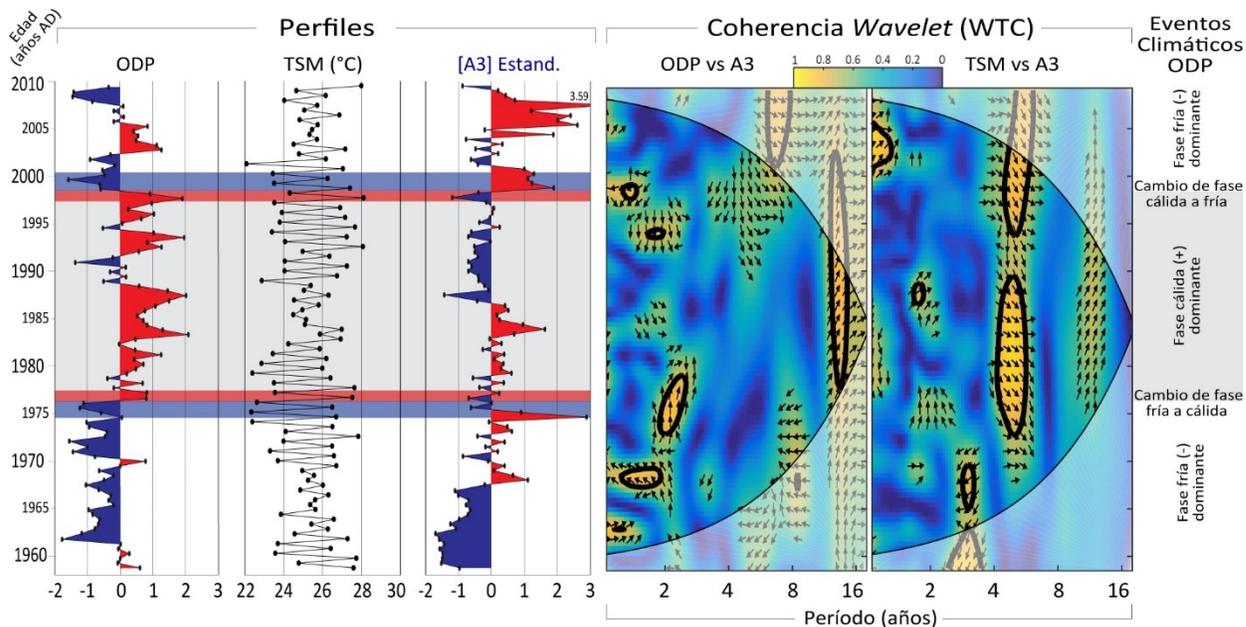
**Tabla 16.** Relación numérica entre los factores físico-climáticos (ODP y TSM) y los conjuntos de quistes de dinoflagelados A2 y A3 (productividad primaria), de acuerdo a los eventos climáticos más relevantes en cuanto a los cambios de fase de la ODP, para la serie de tiempo estudiada en Cuenca Pescadero.

Evento Climático ODP	Edad (año AD)	Factores Físico-Climáticos		Conjuntos de Dinoflagelados	
		ODP	TSM (°C)	A2	A3
Cambio de fase fría a cálida	1975-76'	-1.17	24.56	0.13	-0.31
	1976-77'	0.81	25.54	-0.29	-0.22
Cambio de fase cálida a fría	1997-98'	1.43	26.21	-1.02	-0.78
	1998-99'	-0.61	25.46	0.17	1.57
Fase	Años	Promedio ( $\bar{X}$ )			
Fría (-)	75'-76' & 98'-99'	-0.89 ± 0.28	25.01 ± 0.45	0.15 ± 0.02	0.63 ± 0.94
Cálida (+)	76'-77' & 97'-98'	1.12 ± 0.31	25.88 ± 0.33	-0.66 ± 0.36	-0.50 ± 0.28

Los perfiles de la ODP, la TSM y los conjuntos A2 y A3, junto con los análisis WTC entre la ODP-TSM vs. A2 y A3, modela la alta correlación entre las series de tiempo de los parámetros físico-climáticos (ODP-TSM) y la productividad primaria. Donde se prueba que los eventos climáticos de los cambios de fase de la ODP afectan la productividad primaria, ésta disminuye cuando hay un cambio de la ODP de fría a cálida (en fase) y la productividad primaria aumenta cuando la ODP pasa de una fase cálida a una fría (fuera de fase) (Figura 17 y 18). Esto también podría ayudar a identificar que una TSM óptima para la proliferación de los conjuntos A2 (Figura 17) y A3 (Figura 18) está cercana a los 25°C, mientras que una TSM cercana a los 26°C inhibe dicha proliferación en el sureste del GC.



**Figura 17.** Comparación entre los perfiles de las series de tiempo de la ODP, TSM y el conjunto de quistes de dinoflagelados A2 (concentraciones estandarizadas) y los análisis de coherencia *wavelet* entre las variables físico-climáticas y la productividad primaria (conjunto A2). En los perfiles la banda azul-roja (fase fría a cálida) y la banda roja-azul (fase cálida a fría) indican los cambios de fase de la ODP. En los gráficos del análisis WTC, las áreas amarillas encerradas en el contorno negro, indican alta correlación con un 95% de confianza entre las variables evaluadas para cada gráfico respectivo. Las flechas negras que apuntan hacia abajo, indican que las variables están fuera de fase y las que apuntan hacia arriba están en fase.



**Figura 18.** Comparación entre los perfiles de las series de tiempo de la ODP, TSM y el conjunto de quistes de dinoflagelados A3 (concentraciones estandarizadas) y los análisis de coherencia *wavelet* entre las variables físico-climáticas y la productividad primaria (conjunto A3). En los perfiles la banda azul-roja (fase fría a cálida) y la banda roja-azul (fase cálida a fría) indican los cambios de fase de la ODP. En los gráficos del análisis WTC, las áreas amarillas encerradas en el contorno negro, indican alta correlación con un 95% de confianza entre las variables evaluadas para cada gráfico respectivo. Las flechas negras que apuntan hacia abajo, indican que las variables están fuera de fase y las que apuntan hacia arriba están en fase.

#### 4.8.2 Frecuencia de condiciones óptimas

Este parámetro se halla en la tabla 15 con las edades de los eventos fuertes del ENOS, los intervalos relacionados con las fases de la ODP y las respuestas de los conjuntos A2 y A3 de dinoflagelados. Como ya se explicó, los valores bajos de A2 y A3 se presentan durante condiciones El Niño y ODP cálida, mientras que los valores altos concuerdan con condiciones La Niña y ODP fría. La duración de la serie de tiempo solo permite la detección de pocos casos, que corresponden con los puntos de control cronológico propuestos.

Se observan dos intervalos de valores muy bajos de A2 y A3 en los años 1987 y 1997. En el caso opuesto, hay tres intervalos de valores muy altos en los años 1975, 1999 y 2007. Como se puede ver los valores bajos se presentan durante las fases cálidas de la ODP, mientras que los valores altos se observan durante las fases frías de la ODP. Durante el primer intervalo el episodio más pronunciado de valores altos se detecta en el año 1975 y después de 24 años se dieron las condiciones óptimas para otro evento de alta productividad (1999). Sin embargo, solo pasaron 8 años para un tercer evento altamente productivo (2007).

El calentamiento global de la última década parece estar acelerando los cambios en las condiciones y aumentando la productividad en la región. Esto podría explicar también el gran aumento del conjunto A1, que es único en la serie de tiempo de Pescadero (ver Figura 8 y 13). Este grupo A1 incluye al grupo *Echinidinium* gr., el cual ha sido reportado en áreas tropicales y templadas (Zonneveld y Pospelova, 2015). Estos valores altos de los conjuntos de dinoflagelados coinciden con el aumento en el índice de surgencias costeras que fue detectado de 1999 a 2009 en la región 24° N y 113° O, (NOAA, 2016). El aumento en la productividad es coherente con vientos costeros más intensos que incrementan las surgencias costeras (Rivas et al., 2016). El calentamiento global intensificaría las surgencias costeras al calentar e incrementar el contraste térmico tierra-mar que modula los vientos a lo largo de la costa (Bakun, 1990).

## Capítulo 5. Conclusiones

---

En el intervalo de 1959 a 2009, en la parte sur del GC, las concentraciones de quistes de dinoflagelados autótrofos y heterótrofos disminuyen durante los eventos fuertes de El Niño, cuando la ODP está en fase cálida. Por el contrario, hay un aumento en la producción de las especies pertenecientes a los grupos A2 y A3 durante eventos fuerte de La Niña, cuando la ODP está en fase fría. Estas relaciones indican que durante eventos fuertes de ENOS, la productividad primaria marina para el OPO tropical-subtropical tiende a aumentar (La Niña fuerte) o disminuir (El Niño fuerte).

De la misma manera, la ODP modula la producción de fitoplancton marino en el sur del GC, con fases frías aumentando la productividad, mientras que las etapas cálidas la disminuyen. Estas variaciones de aumentos y disminuciones en la productividad primaria marina son más evidentes cuando ambos forzamientos climáticos ENOS-ODP están en fase.

Debido a su consistencia en el registro y probable sensibilidad a los cambios ambientales, las especies de quistes de dinoflagelados pertenecientes a los grupos A2 (*D. caepatum*, *O. centrocarpum* y *G. catenatum*) y A3 (*S. nephroides*, *S. undulata*, *Q. concreta* y *B. spongium*), tienen un gran potencial para ser calibrados y usados como proxies de la variabilidad climática en la zona tropical-subtropical del OPO. En contraste, las especies de quistes de dinoflagelados del grupo A1 (*P. americanum*, *P. fukuyoi* y *P. schwartzii*) no muestran una relación clara con las variaciones en el cambio de fase de los forzamientos climáticos ENOS-ODP.

La alta correlación entre las series de tiempo en el espacio tiempo-frecuencia de las variables físico-climáticas (TSM, ENOS y ODP) y la productividad primaria (conjuntos A2 y A3 esencialmente) podrían ayudar a realizar predicciones sobre los eventos climáticos que afectan la región. Es necesario obtener más datos sobre la distribución espacio-temporal de quistes de dinoflagelados en el OPO subtropical-tropical para afinar este modelo, que relaciona estos conjuntos de variables físico-climáticas y biológicas.

La combinación A2 & S3 señala condiciones ambientales análogas a las condiciones climáticas del período verano-otoño para el sureste del GC, mientras que la combinación A3 & S2 modela las condiciones climáticas de invierno-primavera en esta región.

Los rangos más probables de la TSM para la proliferación de los conjuntos A2 y A3 en Cuenca Pescadero son entre ~24.4 y 25.1°C y entre ~24.5 y 25.5°C respectivamente. El rango óptimo de la TSM para una alta

productividad primaria en el sureste del GC es entre  $\sim 24.4$  y  $25.5^{\circ}\text{C}$ . Los valores de los grupos, en particular A1, indican que la productividad en la región ha aumentado desde 1999, coincidiendo con el calentamiento global detectado por la NOAA.

El análisis de las concentraciones de quistes de dinoflagelados en sedimentos laminados y su relación con eventos climáticos específicos, como eventos ENOS fuertes y el cambio de fase de la ODP, indican cinco puntos de control de edad en 1975 (La Niña), 1987 (El Niño), 1997 (El Niño), 1999 (La Niña) y 2007 (La Niña). Estas edades se pueden utilizar como herramientas cronoestratigráficas en los últimos 50 años para el sur del GC y probablemente para el OPO subtropical-tropical.

El registro de 1959 a 2009 muestra similitudes y diferencias entre las especies comunes, ocasionales y exóticas observadas en Cuenca Pescadero y Cuenca San Lázaro, lo que revela que, en este intervalo, la corriente cálida Norecuatorial afectó ambas cuencas, mientras que la corriente fría de California sólo afectó a San Lázaro. De 1959 a 2009, la TSM mínima para Cuenca Pescadero fue de  $22^{\circ}\text{C}$ , además en este intervalo no se observan quistes de dinoflagelados del conjunto S4 de San Lázaro. Estas características indican que el SCC no afecta el sureste del GC.

## Literatura citada

---

- Álvarez-Borrego, S. 1983. Gulf of California. En: Ketchum, B. H. (Ed), Ecosystems of the world Estuaries and enclosed seas. Elsevier Scientific Publisher Co, Amsterdam. pp. 427-449.
- Álvarez-Borrego, S. y Lara-Lara, J.R. 1991. The Physical Environment and Primary Productivity of the Gulf of California: Chapter 26: Part V. Physical Oceanography, Primary Productivity, Sedimentology.
- Anderson, R.Y. 1996. Seasonal sedimentation: a framework for reconstructing climatic and environmental change. En: Kemp, A.E.S (Ed), Paleoclimatology and palaeoceanography from Laminated Sediments. Geological Society Special Publication. pp. 1-15.
- Badan-Dangon, A., Dorman, C.E., Merrifield, M.A., y Winant, C.D. 1991. The lower atmosphere over the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 96(C9), 16877-16896.
- Bakun, A. 1990. Global climate change and intensification of coastal ocean upwelling. *Science*, 247(4939), 198–201. <https://doi.org/10.1126/science.247.4939.198>.
- Barron, J.A., Bukry, D., y Bischoff J.L. 2004. High resolution paeoceanography of the Guaymas Basin, Gulf of California, during the last 15000 years. *Marine Micropaleontology*, 50, 185-207.
- Barron, J.A. y Bukry, D. 2007. Solar forcing of Gulf of California climate during the past 2000 yr suggested by diatoms and silicoflagellates. *Marine Micropaleontology*, 62(2), 115-139.
- 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.
- Baumgartner, T.R., y Christensen, N. 1985. Coupling of the Gulf of California to large-scale interannual climatic variability. *Journal of Marine Research*, 43(4), 825-848.
- Baumgartner, T.R., Ferreira-Bartrina, V., y Moreno-Hentz, P. 1991. Varve Formation in the Central Gulf of California: A Reconsideration of the Origin of the Dark Laminae from the 20th Century Varve Record: Chapter 30: Part V. Physical Oceanography, Primary Productivity, Sedimentology.
- Beier, E. 1997. A numerical investigation of the annual variability in the Gulf of California. *Journal of physical oceanography*, 27(5), 615-632.
- Beron-Vera, F.J., y Ripa, P. 2002. Seasonal salinity balance in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 107(C8), 15-1.
- Biondi, F., Gershunov, A., y Cayan, D.R. 2001. North Pacific decadal climate variability since 1661. *Journal of climate*, 14(1), 5-10.
- Bonnet, S., de Vernal, A., Gersonde, R., y Lembke-Jene, L. 2012. Modern distribution of dinocysts from the North Pacific Ocean (37–64° N, 144° E–148° W) in relation to hydrographic conditions, sea-ice and productivity. *Marine Micropaleontology*, 84, 87-113.

- Bradford, M.R. 1975. New dinoflagellate cyst genera from the recent sediments of the Persian Gulf. *Canadian Journal of Botany*, 53(24), 3064-3074.
- Bravo, I. y Figueroa, R.I. 2014. Towards an ecological understanding of dinoflagellate cyst functions. *Microorganisms*, 2(1), 11-32.
- Bray, N.A. 1988. Water mass formation in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 93(C8), 9223-9240.
- 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, 34-51.
- Bringué, M., Pospelova, V., 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.
- Bringué, M., Thunell, R.C., Pospelova, V., Pinckney, J.L., Romero, O.E., y Tappa, E.J. 2018. Physico-chemical and biological factors influencing dinoflagellate cyst production in the Cariaco Basin. *Biogeosciences*, 15(8).
- Bringué, M., Pospelova, V., Tappa, E.J., y Thunell, R.C. 2019. Dinoflagellate cyst production in the Cariaco Basin: A 12.5 year-long sediment trap study. *Progress in oceanography*, 171, 175-211.
- Brito-Castillo, L., Douglas, A.V., Leyva-Contreras, A., y Lluch-Belda, D. 2003. The effect of large-scale circulation on precipitation and streamflow in the Gulf of California continental watershed. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 23(7), 751-768.
- Calvert, S.E. 1966. Origin of diatom-rich, varved sediments from the Gulf of California. *The Journal of Geology*, 74(5, Part 1), 546-565.
- 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. 77 pp.
- Castro, R., Mascarenhas, A.S., Durazo, R., y Collins, C.A. 2000. Seasonal variation of the temperature and salinity at the entrance to the Gulf of California, Mexico. *Ciencias Marinas*, 26(4), 561-583.
- Chavez, F.P., Ryan, J., Lluch-Cota, S.E., y Ñiquen, M. 2003. From anchovies to sardines and back: multidecadal change in the Pacific Ocean. *Science*, 299(5604), 217-221.
- Cuellar-Martinez, T., Alonso-Rodríguez, R., Ruiz-Fernández, A.C., de Vernal, A., Morquecho, L., Limoges, A., ... y Sanchez-Cabeza, J.A. 2018. Environmental forcing on the flux of organic-walled dinoflagellate cysts in recent sediments from a subtropical lagoon in the Gulf of California. *Science of the Total Environment*, 621, 548-557.
- Dale, B. 1996. Dinoflagellate cyst ecology: modeling and geological applications. En: Jansonius, J., McGregor, D.C. (Eds.), *Palynology: Principles and Applications*. AASP Foundation, pp. 1249-1275.

- Davis, J.C. 1986. *Statistics and Data Analysis in Geology*. Second Edition, John Wiley and Sons. New York, pp. 527-546.
- de Vernal, A., Radi, T., Zaragosi, S., Van Nieuwenhove, N., Rochon, A., Allan, E., ... y Londeix, L. 2019. Distribution of common modern dinoflagellate cyst taxa in surface sediments of the Northern Hemisphere in relation to environmental parameters: The new n= 1968 database. *Marine Micropaleontology*, 101796.
- Dean, W., Pride, C., y Thunell, R. 2004. Geochemical cycles in sediments deposited on the slopes of the Guaymas and Carmen Basins of the Gulf of California over the last 180 years. *Quaternary Science Reviews*, 23(16-17), 1817-1833.
- Dima, M., Lohmann, G., y Dima, I. 2005. Solar-induced and internal climate variability at decadal time scales. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 25(6), 713-733.
- Douglas, R., Gonzalez-Yajimovich, O., Ledesma-Vazquez, J. y Staines-Urias, F. 2007. Climate forcing, primary production and the distribution of Holocene biogenic sediments in the Gulf of California. *Quaternary Science Review*, 26, 115-129.
- Evitt, W.R., 1985: Sporopollenin dinoflagellate cysts: their morphology and interpretation. *American Association of Stratigraphic Palynologists, Monograph Series*, 1, 333
- Fensome, R.A., Taylor, F.J.R., Norris, G., Sarjeant, W.A.S., Wharton, D.I. y Williams, G.L. 1993. A classification of fossil and living dinoflagellates. *Micropaleontology Press Special Paper*, 7, 351.
- 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(1-2), 80-89.
- Francis, R.C., Hare, S.R., Hollowed, A.B., Wooster, W.S. 1998. Effects of interdecadal climate variability on the oceanic ecosystems of the NE Pacific. *Fisheries Oceanography*, 7(1), 1-21.
- Gaxiola-Castro, G., Garcia-Cordova, J., Valdez-Holguin, J.E., Botello-Ruvalcaba, M. 1995. Spatial distribution of chlorophyll  $\alpha$  and primary productivity in relation to winter physical structure in the Gulf of California. *Continental Shelf Research*, 15(9), 1043-1059.
- Gershunov, A., y Barnett, T.P. 1998. Interdecadal modulation of ENSO teleconnections. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(12), 2715-2726.
- Gilbert, J.Y. y W.E. Allen. 1943. The phytoplankton of the Gulf of California obtained by the "E.W. Scripps" in 1939 and 1940. *J. Mar. Res.* 5, 89-110.
- Gómez, F. 2005. A list of free-living dinoflagellate species in the world's oceans. *Acta Botanica Croatica*, 64(1), 129-212.
- Grinsted, A., Moore, J.C., y Jevrejeva, S. 2004. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 11, 561-566.

- Gurdebeke, P.R., Mertens, K.N., Pospelova, V., Van Nieuwenhove, N., y Louwye, S. 2020. *Islandinium pacificum* sp. nov., a new dinoflagellate cyst from the upper Quaternary of the northeast Pacific. *Palynology*, 44(1), 80-93.
- Head, M.J. 1996. Modern dinoflagellate cysts and their biological affinities. En: Jansonius, J., McGregor, D.C. (Eds), *Palynology: principles and applications*. AASP foundation, pp. 1197-1248.
- Head, M.J., Harland, R., Matthiessen, J. 2001. Cold marine indicators of the late Quaternary: the new dinoflagellate cyst genus *Islandinium* and related morphotypes. *Journal of Quaternary Science: Published for the Quaternary Research Association*, 16(7), 621-636.
- Herguera, J.C., Franco, G.B., y Cruz, A.M. 2003. Decadal surface ocean variability in the lower Gulf of California: records for the past 300 years. *Geofísica Internacional*, 42(3), 397-406.
- Herguera, J.C. 2006. Coastal biogeochemical and ecological processes from the eastern tropical Pacific to the Gulf of California. *The Global Coastal Ocean: Multi-Scale Interdisciplinary Processes*, 391-439.
- Herrera-Cervantes, H., Lluch-Cota, S.E., Lluch-Cota, D.B., Gutiérrez de Velasco Sanromán, G., y Lluch-Belda, D. 2010. ENSO influence on satellite-derived chlorophyll trends in the Gulf of California. *Atmósfera*, 23(3), 253-262.
- Hidalgo-González, R. M., y Alvarez-Borrego, S. 2004. Total and new production in the Gulf of California estimated from ocean color data from the satellite sensor SeaWiFS. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 51(6-9), 739-752.
- Jacobson, D.M., y Anderson, D.M. 1996. Widespread phagocytosis of ciliates and other protists by marine mixotrophic and heterotrophic thecate dinoflagellates 1. *Journal of phycology*, 32(2), 279-285.
- Kahru, M., Marinone, S.G., Lluch-Cota, S.E., Parés-Sierra, A., y Mitchell, B.G. 2004. Ocean-color variability in the Gulf of California: scales from days to ENSO. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 51(1-3), 139-146.
- Kahru, M., Kudela, R., Manzano-Sarabia, M., y Mitchell, B.G. 2009. Trends in primary production in the California Current detected with satellite data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 114.
- Krepakevich, A. y Pospelova, V. 2010. Tracing the influence of sewage discharge on coastal bays of Southern Vancouver Island (BC, Canada) using sedimentary records of phytoplankton. *Continental Shelf Research*, 30(18), 1924-1940.
- Krishnaswamy, S., Lal, D., Martin, J.M., y Meybeck, M. 1971. Geochronology of lake sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 11(1-5), 407-414.
- Lavín, M.F., Beier, E., y Badan, A. 1997. Estructura hidrográfica y circulación del Golfo de California: Escalas estacional e interanual. *Contribuciones a la oceanografía física en México. Monografía*, 3, 141-171.
- Lavín, M.F., Hernández, E.P., y Cabrera, C. 2003. Sea surface temperature anomalies in the Gulf of California. *Geofísica Internacional*, 42(3), 363-375.
- Lavín, M.F., y Marinone, S.G. 2003. An overview of the physical oceanography of the Gulf of California. In *Nonlinear processes in geophysical fluid dynamics*. Springer, Dordrecht, 173-204.

- Limoges, A., Kieft, J.F., Radi, T., Ruíz-Fernandez, A.C., y de Vernal, A. 2010. Dinoflagellate cyst distribution in surface sediments along the south-western Mexican coast (14.76 N to 24.75 N). *Marine Micropaleontology*, 76(3-4), 104-123.
- Limoges, A., Londeix, L., Mertens, K.N., Rochon, A., Pospelova, V., Cuéllar, T., y de Vernal, A. 2018. Identification key for Pliocene and Quaternary *Spiniferites* taxa bearing intergonal processes based on observations from estuarine and coastal environments. *Palynology*, 42, 72-88.
- Lluch-Belda, D., Del Monte-Luna, P., y Lluch-Cota, S.E. 2009. 20th century variability in the Gulf of California SST. *The California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations*, 50, 147-154.
- Lluch-Cota, S.E. 2000. Coastal upwelling in the eastern Gulf of California. *Oceanologica Acta*, 23, 731-740.
- Lluch-Cota, S.E., Aragón-Noriega, E.A., Arreguín-Sánchez, F., Aurióles-Gamboa, D., Bautista-Romero, J.J., Brusca, R.C., Cervantes-Duarte, R., Cortés-Altamirano, R., Del Monte-Luna, P., Esquivel-Herrera, A., Fernández, G., Hendrickx, M.E., Hernández-Vázquez, S., Herrera-Cervantes, H., Kahru, M., Lavín, M., Lluch-Belda, D., Lluch-Cota, D.B., López-Martínez, J., Marinone, S.G., Nevárez-Martínez, M.O., Ortega-García, S., Palacios-Castro, E., Parés-Sierra, A., Ponce-Díaz, G., Ramírez-Rodríguez, M., Salinas-Zavala, C.A., Schwartloze, R.A., Sierra-Beltrán, A.P., 2007. The Gulf of California: review of ecosystem status and sustainability challenges. *Progress in Oceanography*, 73, 1–26.
- Lluch-Cota, S.E., Parés-Sierra, A., Magaña-Rueda, V.O., Arreguín-Sánchez, F., Bazzino, G., Herrera-Cervantes, H., y Lluch-Belda, D. 2010. Changing climate in the Gulf of California. *Progress in Oceanography*, 87(1-4), 114-126.
- Lohmann, G., Rimbu, N., y Dima, M. 2004. Climate signature of solar irradiance variations: analysis of long-term instrumental, historical, and proxy data. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 24(8), 1045-1056.
- López-Velázquez, L.C., Helenes, J., Flores-Trujillo, J.G., Ruiz-Fernández, A.C., y Sanchez-Cabeza, J.A. 2019. Reconstrucción paleoceanográfica y paleoclimática basada en palinomorfos marinos durante el periodo 1811–1907 EC en cuenca Magdalena, Baja California Sur, México. *Ciencias Marinas* 45(3), 121-136.
- Mantua, N.J., Hare, S.R., Zhang, Y., Wallace, J.M., y Francis, R.C. 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(6), 1069-1080.
- Mantua, N.J., y Hare, S.R. 2002. The Pacific decadal oscillation. *Journal of oceanography*, 58(1), 35-44.
- Marinone, S.G. 2003. A three-dimensional model of the mean and seasonal circulation of the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108.
- Marret, F. y Zonneveld, K.A. 2003. Atlas of modern organic-walled dinoflagellate cyst distribution. Review of Palaeobotany and Palynology, 125(1-2), 1-200.
- Marret, F., Bradley, L., de Vernal, A., Hardy, W., Kim, S.Y., Mudie, P., ... y Rochon, A. 2020. From bi-polar to regional distribution of modern dinoflagellate cysts, an overview of their biogeography. *Marine Micropaleontology*, 159, 101753.

- Martínez-Hernández, E., Hernández-Campos, H.E. 1991. Distribución de quistes de dinoflagelados y acritarcas en sedimentos holocénicos del Golfo de California. *Paleontología Mexicana*, 57, 132.
- Matsuoka, K. y Fukuyo, Y. 1994. Geographical distribution of the toxic dinoflagellate *Gymnodinium catenatum* Graham in Japanese coastal waters. *Botanica Marina*, 37(6), 495-504.
- Matsuoka, K., Kawami, H., Nagai, S., Iwataki, M., y Takayama, H. 2009. Re-examination of cyst–motile relationships of *Polykrikos kofoidii* Chatton and *Polykrikos schwartzii* Bütschli (Gymnodinales, Dinophyceae). *Review of Palaeobotany and Palynology*, 154(1-4), 79-90.
- McGowan, J.A., Cayan, D.R., y Dorman, L.M. 1998. Climate-ocean variability and ecosystem response in the Northeast Pacific. *Science*, 281(5374), 210-217.
- McGowan, J.A., Bograd, S.J., Lynn, R.J., y Miller, A.J. 2003. The biological response to the 1977 regime shift in the California Current. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 50(14-16), 2567-2582.
- Mercado-Santana, J.A., Santamaría-del-Ángel, E., González-Silvera, A., Sánchez-Velasco, L., Gracia-Escobar, M.F., Millán-Núñez, R., y Torres-Navarrete, C. 2017. Productivity in the Gulf of California large marine ecosystem. *Environmental development*, 22, 18-29.
- Mertens, K. N., Verhoeven, K., Verleye, T., Louwye, S., Amorim, A., Ribeiro, S., ... y Kodrans-Nsiah, 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.
- Mertens, K.N., Yamaguchi, A., Kawami, H., Ribeiro, S., Leander, B.S., Price, A.M., Pospelova, V., Ellegaard, M., y Matsuoka, K. 2012. *Archaeperidinium saanichi* sp. nov.: A new species based on morphological variation of cyst and theca within the *Archaeperidinium minutum* Jörgensen 1912 species complex. *Marine Micropaleontology*, 96-97, 48-62.
- Mertens, K. N., Yamaguchi, A., Takano, Y., Pospelova, V., Head, M. J., Radi, T., ... y Matsuoka, K. 2013. A new heterotrophic dinoflagellate from the North-eastern Pacific, *Proto-peridinium fukuyoi*: cyst–theca relationship, phylogeny, distribution and ecology. *Journal of Eukaryotic Microbiology*, 60(6), 545-563.
- Microcal Software, Inc. 1999. Origin (data analysis software). Version 6.0. [www.microcal.com](http://www.microcal.com)
- Morquecho, L. y Lechuga-Devéze, C.H. 2003. Dinoflagellate cysts in recent sediments from Bahía Concepción, Gulf of California. *Botanica Marina*, 46(2), 132-141.
- Morquecho, L., Alonso, R., Arreola, J., y Reyes, A. 2012. Factors associated with moderate blooms of *Pyrodinium bahamense* in shallow and restricted subtropical lagoons in the Gulf of California. *Botanica Marina*, 55, 611-623.
- Mudie, P.J., Marret, F., Mertens, K.N., Shumilovskikh, L., y Leroy, S.A. 2017. Atlas of modern dinoflagellate cyst distributions in the Black Sea Corridor: from Aegean to Aral Seas, including Marmara, Black, Azov and Caspian Seas. *Marine Micropaleontology*, 134, 1-152.
- Newman, M., Compo, G.P., y Alexander, M.A. 2003. ENSO-forced variability of the Pacific decadal oscillation. *Journal of Climate*, 16(23), 3853-3857.

- NOAA. 2016. National Oceanic and Atmospheric Administration. Pacific Fisheries Environmental Laboratory, Coastal Upwelling Indices. Consultado el 10 de febrero de 2016, de: [http://www.pfeg.noaa.gov/products/PFEL/modeled/indices/upwelling/NA/upwell\\_menu\\_NA.html](http://www.pfeg.noaa.gov/products/PFEL/modeled/indices/upwelling/NA/upwell_menu_NA.html).
- Osorio-Tafall, B.F. 1943. El Mar de Cortés y la productividad fitoplanctónica de sus aguas. *Anales de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas*, 3, 73-118.
- Páez-Osuna, F., Sanchez-Cabeza, J.A., Ruiz-Fernández, A.C., Alonso-Rodríguez, R., Piñón-Gimate, A., Cardoso-Mohedano, F.J., Carballo, J.L., Cisneros-Mata, M.A., Álvarez-Borrego, S. 2016. Environmental status of the Gulf of California: A review of responses to climate change and climate variability. *Earth-Science Reviews*, 162, 253-268.
- Patterson, R.T., Chang, A.S., Prokoph, A., Roe, H.M., y Swindles, G.T. 2013. Influence of the Pacific Decadal Oscillation, El Niño-Southern Oscillation and solar forcing on climate and primary productivity changes in the northeast Pacific. *Quaternary International*, 310, 124-139.
- Peña-Manjarrez, J.L., Castro, G.G., Escamilla, J.H., y Cepeda, E.O. 2001. Quistes de *Lingulodinium polyedrum*, productor de mareas rojas en la Bahía de Todos Santos (invierno-primavera, 2000). *Ciencias Marinas*, 27(4), 543-558.
- Pérez-Rodríguez, J.C. 2016. Registro palinológico en sedimentos laminados de la Cuenca San Lázaro, Baja California Sur y su relación con cambios paleocenográficos y paleoclimáticos de 1967 a 1988. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. 50 pp.
- Pospelova, V., de Vernal, A., y Pedersen, T.F. 2008. Distribution of dinoflagellate cysts in surface sediments from the northeastern Pacific Ocean (43–25 N) in relation to sea-surface temperature, salinity, productivity and coastal upwelling. *Marine Micropaleontology*, 68(1-2), 21-48.
- Pospelova, V., Esenkulova, S., Johannessen, S.C., O'Brien, M.C., y Macdonald, R.W. 2010. Organic-walled dinoflagellate cyst production, composition and flux from 1996 to 1998 in the central Strait of Georgia (BC, Canada): a sediment trap study. *Marine Micropaleontology*, 75(1-4), 17-37.
- Price, A. M. y Pospelova, V. 2011. High-resolution sediment trap study of organic-walled dinoflagellate cyst production and biogenic silica flux in Saanich Inlet (BC, Canada). *Marine Micropaleontology*, 80(1-2), 18-43.
- Price, A.M., Mertens, K.N., Pospelova, V., Pedersen, T.F., Ganeshram, R.S. 2013. Late Quaternary climatic and oceanographic changes in the Northeast Pacific as recorded by dinoflagellate cysts from Guaymas Basin, Gulf of California (Mexico). *Palaeogeography*, 28, 200–212. <https://doi.org/10.1002/palo.20019>.
- Radi, T. y de Vernal, A. 2004. Dinocyst distribution in surface sediments from the northeastern Pacific margin (40–60 N) in relation to hydrographic conditions, productivity and upwelling. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 128(1-2), 169-193.
- Radi, T., Pospelova, V., de Vernal, A., y Barrie, J. V. 2007. Dinoflagellate cysts as indicators of water quality and productivity in British Columbia estuarine environments. *Marine Micropaleontology*, 62(4), 269-297.

- Radi, T. y de Vernal, A. 2008. Dinocysts as proxy of primary productivity in mid–high latitudes of the Northern Hemisphere. *Marine Micropaleontology*, 68(1-2), 84-114.
- Radi, T., Bonnet, S., Cormier, M. A., de Vernal, A., Durantou, L., Faubert, É., ... y Van Nieuwenhove, N. 2013. Operational taxonomy and (paleo-) autecology of round, brown, spiny dinoflagellate cysts from the Quaternary of high northern latitudes. *Marine Micropaleontology*, 98, 41-57.
- Rago, T.A., Castro-Valdez, R., Margolina, T., Blum, M., Wheeler, A., y Collins, C.A. 2013. Physical Measurements of Water Properties Across the Mouth of the Gulf of California during April 2013 (PESCAR24 Cruise) (Mediciones Físicas de las Propiedades del Agua a Través de la Boca del Golfo de California Durante Abril de 2013 (Crucero PESCAR24) (No. NPS-OC-13-002). Naval Postgraduate School Monterey CA.
- Ribeiro, S., Amorim, A., Andersen, T.J., Abrantes, F., y Ellegaard, M. 2012. Reconstructing the history of an invasion: the toxic phytoplankton species *Gymnodinium catenatum* in the Northeast Atlantic. *Biological Invasions*, 14, 969-985.
- Ripa, P. 1997. Toward a Physical Explanation of the Seasonal Dynamics and Thermodynamics of the Gulf of California. *Journal of physical oceanography*, 27(5), 597-614.
- Rivas D., Cruz-Rico J., Vivas-Téllez I., Arellano B., Bermúdez A. 2016. Modelación numérica de interacción físico-biológica aplicada a florecimientos del fitoplancton en el Pacífico Mexicano frente a Baja California. En: García-Mendoza E., Quijano-Scheggia S., Olivos-Ortiz A., Núñez-Vázquez E.J. (eds.), Florecimientos Algales Nocivos en México. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Ensenada México. pp. 93–107.
- Rochon, A., Vernal, A.D., 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 Contribution Series*, 35, 1-146.
- Roden, G.I. 1958. Oceanographic and meteorological aspects of the Gulf of California. *Pacific Science*, XII, 21-45.
- Roemmich, D., y McGowan, J. 1995. Climatic warming and the decline of zooplankton in the California Current. *Science*, 267, 1324-1326.
- Ruiz-Fernández, A.C., y Hillaire-Marcel, C. 2009. <sup>210</sup>Pb-derived ages for the reconstruction of terrestrial contaminant history into the Mexican Pacific coast: Potential and limitations. *Marine Pollution Bulletin*, 59(4-7), 134–145.
- Sanchez-Cabeza, J.A. y Ruiz-Fernández, A.C. 2012. <sup>210</sup>Pb sediment radiochronology: An integrated formulation and classification of dating models. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 82, 183-200.
- Sanchez-Cabeza, J.A., Ruiz-Fernández, A.C., Ontiveros-Cuadras, J.F., Perez, L.H., y Olid, C. 2014. Monte Carlo uncertainty calculation of <sup>210</sup>Pb chronologies and accumulation rates of sediments and peat bogs. *Quaternary Geochronology*, 23, 80–93.

- Santamaría-del-Angel, E., Alvarez-Borrego, S., y Müller-Karger, F.E. 1994a. Gulf of California biogeographic regions based on coastal zone color scanner imagery. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 99, 7411-7421.
- Santamaría-del-Angel, E., Alvarez-Borrego, S., y Müller-Karger, F.E. 1994b. The 1982–1984 El Niño in the Gulf of California as seen in coastal zone color scanner imagery. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 99, 7423-7431.
- Schlitzer, R. 2019. Ocean Data View [Computer Software]. Version 5.2.0. <https://odv.awi.de>.
- Serrano-Mejía, C.G. 2016. Registro palinológico en sedimentos laminados de la Cuenca San Lázaro, Baja California Sur y su relación con cambios paleocenográficos y paleoclimáticos de 1988 a 2009. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. 56 pp.
- Sprangers, M., Dammers, N., Brinkhuis, H., van Weering, T.C., Lotter, A.F. 2004. Modern organic-walled dinoflagellate cyst distribution offshore NW Iberia; tracing the upwelling system. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 128, 97-106.
- StatSoft, Inc. 2004. Statistica (data analysis software system). Version 7.0. [www.statsoft.com](http://www.statsoft.com).
- Stockmarr, J. 1971. Tablets with spores used in absolute pollen analysis. *Pollen et Spores*, 13, 615–621.
- Thunell, R., Pride, C., Tappa, E., y Muller-Karger, F. 1993. Varve formation in the Gulf of California: Insights from time series sediment trap sampling and remote sensing. *Quaternary Science Reviews*, 12, 451-464.
- Thunell, R.C., Pride, C.J., Tappa, E., y Muller-Karger, F.E. 1994. Biogenic silica fluxes and accumulation rates in the Gulf of California. *Geology*, 22, 303-306.
- Thunell, R.C. 1998. Seasonal and annual variability in particle fluxes in the Gulf of California: A response to climate forcing. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 45, 2059-2083.
- Torrence, C., y Compo, G.P. 1998. A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological society*, 79(1), 61-78.
- Torrence, C., y Webster, P.J. 1999. Interdecadal changes in the ENSO–monsoon system. *Journal of climate*, 12(8), 2679-2690.
- Trenberth, K.E., y Hurrell, J.W. 1994. Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific. *Climate Dynamics*, 9(6), 303-319.
- van Geen, A., Zheng, Y., Bernhard, J. M., Cannariato, K. G., Carriquiry, J., Dean, W. E., ... y Pike, J. 2003. On the preservation of laminated sediments along the western margin of North America. *Paleoceanography*, 18.
- Venrick, E.L., McGowan, J.A., Cayan, D.R., y Hayward, T.L. 1987. Climate and chlorophyll a: long-term trends in the central North Pacific Ocean. *Science*, 238, 70-72.

- Venrick, E.L. 2012. Phytoplankton in the California Current system off southern California: Changes in a changing environment. *Progress in Oceanography*, 104, 46-58.
- Verleye, T.J., Pospelova, V., Mertens, K.N., y Louwye, S. 2011. The geographical distribution and (palaeo) ecology of *Selenopemphix undulata* sp. nov., a new late Quaternary dinoflagellate cyst from the Pacific Ocean. *Marine Micropaleontology*, 78, 65-83.
- Wall, D., Dale, B., Lohmann, G.P., y Smith, W.K. 1977. The environmental and climatic distribution of dinoflagellate cysts in modern marine sediments from regions in the North and South Atlantic Oceans and adjacent seas. *Marine Micropaleontology*, 2, 121-200.
- Ware, D.M. y Thomson, R.E. 2000. Interannual to multidecadal timescale climate variations in the Northeast Pacific. *Journal of Climate*, 13(18), 3209-3220.
- Williams, G.L., Fensome, R.A., y MacRae, R.A. 2017. The Lentin and Williams index of fossil dinoflagellates, 2017 edition. *Contribution Series-American Association Stratigraphic Palynologists*, 48.
- Wolter, K., y Timlin, M.S. 2011. El Niño/Southern Oscillation behaviour since 1871 as diagnosed in an extended multivariate ENSO index (MEI. ext). *International Journal of Climatology*, 31, 1074-1087.
- Wood, G.D., Gabriel, A.M., Lawson, J.C. 1996. Palynological techniques-processing and microscopy. En: Jansonius, J., McGregor, D.C. (Eds.), *Palynology: Principles and Applications*. American Association of Stratigraphic Palynologists Foundation, Dallas. pp. 29–50.
- Zhang, T.A., Hoell, J., Perlwitz, J., Eischeid, D. Murray, M. Hoerling y Hamill, T.M. 2019. Towards Probabilistic Multivariate ENSO Monitoring, *Geophysical Research Letters*, 46, DOI: 10.1029/2019GL083946.
- Zonneveld, K.A. 1997. New species of organic walled dinoflagellate cysts from modern sediments of the Arabian Sea (Indian Ocean). *Review of Palaeobotany and Palynology*, 97, 319-337.
- Zonneveld, K.A. y Jurkschat, T. 1999. *Bitectatodinium spongium* (Zonneveld, 1997) Zonneveld et Jurkschat, comb. nov. from modern sediments and sediment trap samples of the Arabian Sea (northwestern Indian Ocean): taxonomy and ecological affinity. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 106(3-4), 153-169.
- Zonneveld, K.A., Susek, E., y Fischer, G. 2010. Seasonal variability of the organic-walled dinoflagellate cyst production in the coastal upwelling region off cape blanc (Mauritania): a five-year survey 1. *Journal of Phycology*, 46, 202-215.
- 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., Liang, C., Limoges, A., Londeix, L., Lu, S.-H., Mahmoud, M.S., Marino, G., Matsuoka, K., Matthiessen, J., Mildenhall, D.C., Mudie, P., Neil, L.H., Pospelova, V., Qi, Y., Radi, T., Richerol, T., Rochon, A., Sangiorgi, F., Solignac, S., Turon, J.L., Verleye, T., Wang, Y., Wang, Z., Young, M. 2013. Atlas of modern dinoflagellate cyst distribution based on 2405 datapoints. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 191, 1-197.

Zonneveld, K.A. y Pospelova, V. 2015. A determination key for modern dinoflagellate cysts. *Palynology*, 39, 387-409.

## Anexos

**Tabla 17.** Anexo A. Edad para cada muestra estudiada del núcleo PESC09-2, concentraciones de los tres conjuntos de quistes de dinoflagelados [A1], [A2] y [A3], concentraciones estandarizadas ([A1, A2 y A3] estand.) y los parámetros físico-climáticos TSM (°C), MEI y ODP.

Edad (Año AD)	Conjuntos de Quistes de Dinoflagelados [Concentraciones]						Parámetros Físico-Climáticos		
	[A1] (quistes/g)	[A1] estand.	[A2] (quistes/g)	[A2] estand.	[A3] (quistes/g)	[A3] estand.	TSM (°C)	MEI	ODP
1958.74	199.04	-0.35	1930.67	0.96	1831.15	-0.97	27.59	0.51	0.61
1959.26	55.89	-0.44	916.60	-0.50	447.12	-1.52	24.77	0.27	-0.08
1959.77	29.83	-0.46	1066.36	-0.29	544.37	-1.48	27.73	-0.10	0.00
1960.28	27.47	-0.46	982.01	-0.41	569.98	-1.47	23.56	-0.23	0.28
1960.80	9.77	-0.47	678.91	-0.84	322.36	-1.57	26.41	-0.33	-0.05
1961.31	76.53	-0.43	650.47	-0.89	663.22	-1.43	23.69	-0.16	0.02
1961.82	17.29	-0.47	319.95	-1.36	294.01	-1.58	27.28	-0.50	-1.78
1962.33	0.00	-0.48	46.08	-1.76	11.52	-1.69	24.56	-0.86	-1.18
1962.85	33.66	-0.46	1094.11	-0.25	1582.25	-1.07	26.27	-0.64	-0.78
1963.36	10.67	-0.47	885.41	-0.55	1152.10	-1.24	25.42	-0.27	-0.67
1963.87	119.61	-0.40	999.64	-0.38	1811.31	-0.98	26.58	0.73	-0.64
1964.39	86.23	-0.43	1258.99	-0.01	2474.86	-0.72	23.86	-0.80	-0.84
1964.90	86.74	-0.42	751.70	-0.74	2667.11	-0.64	25.63	-1.02	-0.97
1965.41	84.04	-0.43	1943.39	0.98	2353.08	-0.76	25.36	0.63	-0.21
1965.93	128.73	-0.40	1130.98	-0.19	2547.00	-0.69	25.62	1.20	-0.35
1966.44	85.05	-0.43	1190.67	-0.11	1757.66	-1.00	26.30	0.11	-0.29
1966.95	83.47	-0.43	933.32	-0.48	1494.84	-1.10	24.85	-0.40	-0.65
1967.46	270.35	-0.31	1351.75	0.13	3756.44	-0.21	26.02	-0.62	-1.05
1967.98	605.23	-0.09	3095.32	2.64	7072.55	1.11	25.25	-0.59	-0.50
1968.49	1045.59	0.20	2661.50	2.02	5940.86	0.66	25.56	-0.55	-0.21
1969.00	388.88	-0.23	2708.28	2.08	4472.14	0.08	24.95	0.52	-0.64
1969.52	305.64	-0.28	2047.80	1.13	5277.41	0.40	26.70	0.50	0.00
1970.03	333.56	-0.26	2203.27	1.36	4037.87	-0.09	23.69	0.37	0.78
1970.54	174.34	-0.37	1814.72	0.79	2092.07	-0.87	26.58	-0.75	-0.77
1971.06	113.84	-0.41	1917.84	0.94	4755.19	0.19	23.30	-1.40	-1.44
1971.57	119.94	-0.40	1439.26	0.25	3830.54	-0.18	26.49	-1.45	-1.01
1972.08	544.02	-0.13	2315.57	1.52	5286.75	0.40	23.99	-0.59	-1.56
1972.59	69.43	-0.44	1374.72	0.16	3228.51	-0.42	27.83	1.44	-0.45
1973.11	697.05	-0.03	3121.56	2.68	5849.14	0.62	24.10	1.14	-0.40
1973.62	319.13	-0.27	2356.63	1.58	5498.80	0.48	26.50	-1.17	-0.95
1974.13	112.82	-0.41	1257.13	-0.01	4077.62	-0.08	22.38	-1.65	-1.02
1974.65	2216.43	0.96	4619.78	4.84	11562.80	2.89	26.69	-0.87	0.05
1975.16	585.41	-0.10	2146.50	1.27	6544.58	0.90	22.33	-0.86	-0.58
1975.67	183.00	-0.36	1347.56	0.12	2711.75	-0.62	26.49	-1.58	-1.23
1976.19	272.66	-0.30	1363.31	0.14	4299.68	0.01	22.62	-1.05	-1.11

1976.70	21.22	-0.47	1018.63	-0.35	2546.58	-0.69	27.53	0.66	0.80
1977.21	178.68	-0.36	1109.32	-0.22	4883.99	0.24	23.55	0.40	0.82
1977.72	154.70	-0.38	751.42	-0.74	3348.23	-0.37	27.64	0.80	-0.19
1978.24	230.62	-0.33	1153.10	-0.16	5234.08	0.38	23.49	0.38	0.68
1978.75	39.59	-0.46	857.88	-0.59	2870.60	-0.56	26.40	-0.06	-0.38
1979.26	556.83	-0.12	1266.53	0.00	5819.47	0.61	22.39	0.35	0.20
1979.78	296.31	-0.29	1269.91	0.01	5016.14	0.29	25.98	0.70	0.48
1980.29	618.63	-0.08	1340.36	0.11	5196.48	0.36	22.86	0.78	0.71
1980.80	611.17	-0.08	1172.79	-0.13	4509.47	0.09	26.19	0.24	0.44
1981.32	165.79	-0.37	1205.71	-0.08	5259.91	0.39	23.43	0.12	1.25
1981.83	283.21	-0.30	740.71	-0.76	3616.39	-0.26	25.85	-0.05	0.45
1982.34	304.64	-0.28	1146.02	-0.17	5048.31	0.31	24.23	0.68	-0.03
1982.85	237.25	-0.33	985.51	-0.40	4161.03	-0.05	26.93	2.30	0.47
1983.37	358.75	-0.25	753.36	-0.74	6008.98	0.69	25.86	2.35	2.09
1983.88	1069.93	0.22	1858.30	0.86	8371.74	1.62	26.98	0.08	1.31
1984.39	512.98	-0.15	1638.22	0.54	6685.25	0.96	25.09	-0.03	0.82
1984.91	212.58	-0.34	1201.09	-0.09	4921.28	0.26	25.15	-0.34	0.71
1985.42	191.99	-0.36	671.96	-0.85	4703.75	0.17	24.49	-0.46	0.53
1985.93	639.83	-0.06	1035.02	-0.33	5570.31	0.51	24.96	-0.21	0.75
1986.45	475.62	-0.17	1630.68	0.53	5316.71	0.41	25.79	0.40	1.09
1986.96	135.91	-0.39	1041.95	-0.32	3180.22	-0.44	24.53	1.19	1.50
1987.47	47.69	-0.45	751.07	-0.74	691.46	-1.42	26.30	1.92	2.02
1987.98	209.81	-0.34	1098.99	-0.24	4066.28	-0.08	25.03	1.20	1.45
1988.50	263.11	-0.31	977.27	-0.41	3730.54	-0.22	25.39	-0.61	0.58
1989.01	252.13	-0.32	1269.99	0.01	3296.38	-0.39	22.87	-1.19	-0.52
1989.52	142.46	-0.39	933.90	-0.48	3260.73	-0.40	26.74	-0.44	0.19
1990.04	289.64	-0.29	938.42	-0.47	2525.62	-0.69	24.04	0.28	-0.30
1990.55	247.36	-0.32	788.46	-0.69	2767.35	-0.60	27.25	0.36	0.17
1991.06	145.27	-0.39	882.78	-0.55	2503.06	-0.70	24.05	0.36	-1.37
1991.58	278.96	-0.30	815.42	-0.65	3240.22	-0.41	26.35	0.88	-0.23
1992.09	257.87	-0.31	1112.08	-0.22	3013.90	-0.50	24.97	1.69	0.54
1992.60	308.27	-0.28	1341.86	0.11	2973.86	-0.52	28.07	1.03	1.26
1993.11	196.55	-0.35	929.15	-0.48	4199.04	-0.03	24.07	1.04	0.83
1993.63	152.52	-0.38	651.66	-0.88	2523.45	-0.70	27.24	1.24	1.96
1994.14	138.09	-0.39	749.63	-0.74	2742.08	-0.61	23.39	0.45	1.03
1994.65	309.43	-0.28	1356.72	0.13	4903.23	0.25	27.66	0.95	-0.53
1995.17	291.80	-0.29	906.13	-0.52	3348.07	-0.37	23.79	0.89	0.07
1995.68	419.26	-0.21	1064.27	-0.29	4192.59	-0.03	27.16	-0.19	0.67
1996.19	191.33	-0.36	1052.32	-0.31	4352.77	0.03	23.90	-0.35	1.04
1996.71	558.36	-0.12	1395.91	0.19	4466.90	0.08	26.90	-0.25	0.24
1997.22	374.42	-0.24	1162.67	-0.15	3882.13	-0.16	23.52	0.33	0.97
1997.73	140.91	-0.39	323.25	-1.36	1301.31	-1.18	28.11	2.64	1.93
1998.24	479.89	-0.17	786.20	-0.69	3297.97	-0.39	24.31	2.10	0.93

1998.76	649.50	-0.06	1262.92	0.00	9056.96	1.90	27.41	-0.63	-0.59
1999.27	397.44	-0.22	1496.23	0.34	7387.66	1.23	23.51	-0.80	-0.62
1999.78	474.54	-0.17	1402.99	0.20	7076.84	1.11	26.25	-0.93	-1.58
2000.30	385.50	-0.23	1454.40	0.27	7534.83	1.29	23.44	-0.56	-0.48
2000.81	579.86	-0.10	938.81	-0.47	6792.60	1.00	27.04	-0.39	-0.54
2001.32	396.53	-0.22	784.05	-0.69	3235.35	-0.41	22.08	-0.18	-0.15
2001.84	350.62	-0.25	233.75	-1.49	2706.56	-0.62	26.16	-0.02	-0.92
2002.35	875.39	0.09	1027.63	-0.34	4795.61	0.21	24.78	0.51	-0.30
2002.86	396.19	-0.22	380.96	-1.27	3078.12	-0.48	27.16	1.04	1.27
2003.37	1683.80	0.62	911.53	-0.51	5102.05	0.33	24.51	0.41	1.12
2003.89	409.68	-0.21	147.48	-1.61	2326.97	-0.77	25.71	0.42	0.50
2004.40	3787.30	1.99	2218.82	1.38	9028.30	1.89	25.33	0.38	0.55
2004.91	1408.71	0.44	764.30	-0.72	3776.55	-0.20	25.46	0.67	0.41
2005.43	3963.72	2.10	1708.50	0.64	10866.05	2.61	25.75	0.61	0.84
2005.94	4005.61	2.13	2053.51	1.14	9329.53	2.00	24.81	-0.31	-0.19
2006.45	3385.63	1.72	1177.61	-0.12	10333.54	2.40	26.86	0.24	0.10
2006.97	2667.45	1.26	1044.49	-0.32	7279.26	1.19	25.05	0.81	-0.20
2007.48	11080.57	6.74	2808.30	2.23	13339.42	3.60	25.72	-0.25	0.10
2007.99	3535.52	1.82	1493.26	0.33	6060.89	0.71	24.02	-1.25	-0.85
2008.50	2995.23	1.47	1031.97	-0.34	5361.21	0.43	26.16	-0.52	-1.45
2009.02	7583.50	4.46	814.05	-0.65	4798.60	0.21	24.65	-0.60	-1.44
2009.53	389.54	-0.23	191.58	-1.55	2069.04	-0.88	27.99	0.69	-0.36

**Tabla 18.** Anexo B. Matriz de correlación de Pearson para las especies de quistes de dinoflagelados en Cuenca Pescadero. En rojo las especies con una correlación estadísticamente significativa ( $p < 0.05$ ).

	<i>G. catenatum</i>	<i>G. micro-nolerii</i>	<i>D. caperatum</i>	<i>Spiniferites</i> spp.	<i>O. centrocarpum</i>	<i>B. spongium</i>	<i>P. schwartzii</i>	<i>P. fukuyoi</i>	<i>Echinidinium</i> gr.	<i>P. americanum</i>	<i>S. nephroides</i>	<i>S. undulata</i>	<i>Lejeunecysta</i> gr.	<i>Q. concreta</i>	<i>Brigantedinium</i> spp.
<i>G. catenatum</i>	1.00														
<i>G. micro-nolerii</i>	0.58	1.00													
<i>D. caperatum</i>	0.58	0.53	1.00												
<i>Spiniferites</i> spp.	0.43	0.55	0.64	1.00											
<i>O. centrocarpum</i>	0.56	0.59	0.70	0.70	1.00										
<i>B. spongium</i>	0.16	0.46	0.44	0.40	0.37	1.00									
<i>P. schwartzii</i>	0.12	0.10	0.24	0.22	0.23	0.51	1.00								
<i>P. fukuyoi</i>	0.16	0.37	0.29	0.52	0.39	0.64	0.61	1.00							
<i>Echinidinium</i> gr.	0.29	0.50	0.58	0.73	0.63	0.73	0.63	0.76	1.00						
<i>P. americanum</i>	0.29	0.48	0.39	0.58	0.51	0.67	0.67	0.75	0.83	1.00					
<i>S. nephroides</i>	0.28	0.43	0.54	0.27	0.23	0.65	0.42	0.36	0.45	0.31	1.00				
<i>S. undulata</i>	0.28	0.46	0.45	0.40	0.40	0.82	0.52	0.64	0.70	0.70	0.63	1.00			
<i>Lejeunecysta</i> gr.	0.28	0.42	0.37	0.33	0.39	0.68	0.49	0.51	0.62	0.67	0.55	0.74	1.00		
<i>Q. concreta</i>	0.63	0.52	0.60	0.52	0.58	0.64	0.63	0.60	0.73	0.73	0.56	0.71	0.70	1.00	
<i>Brigantedinium</i> spp.	0.54	0.62	0.52	0.51	0.61	0.66	0.38	0.48	0.64	0.60	0.57	0.70	0.72	0.72	1.00

**Tabla 19.** Anexo C. Matriz de correlación de Pearson para las especies de quistes de dinoflagelados en Cuenca San Lázaro. En rojo las especies con una correlación estadísticamente significativa ( $p < 0.05$ ).

	<i>A. choane</i>	<i>I. aculeatum</i>	<i>B. spongium</i>	<i>O. centrocarpum</i>	<i>Spiniferites sp.</i>	<i>P. americanum</i>	<i>S. nephroides</i>	<i>Q. concreta</i>	<i>Lejeunecysta sp.</i>	<i>V. calvum</i>	<i>Impagidinium sp.</i>	<i>B. simplex</i>	<i>B. cariaense</i>
<i>A. choane</i>	1.00												
<i>I. aculeatum</i>	0.33	1.00											
<i>B. spongium</i>	0.14	0.19	1.00										
<i>O. centrocarpum</i>	0.22	0.21	0.37	1.00									
<i>Spiniferites sp.</i>	0.07	0.31	0.23	0.55	1.00								
<i>P. americanum</i>	0.16	0.70	0.39	0.29	0.45	1.00							
<i>S. nephroides</i>	-0.03	0.04	0.33	0.54	0.23	0.12	1.00						
<i>Q. concreta</i>	0.24	0.43	0.64	0.39	0.39	0.61	0.47	1.00					
<i>Lejeunecysta sp.</i>	-0.08	-0.05	0.43	0.40	0.34	0.08	0.57	0.47	1.00				
<i>V. calvum</i>	0.20	0.58	0.44	0.32	0.38	0.69	0.10	0.53	0.06	1.00			
<i>Impagidinium sp.</i>	0.27	0.27	0.29	0.26	0.11	0.43	0.06	0.26	0.04	0.13	1.00		
<i>B. simplex</i>	0.04	0.32	0.58	0.32	0.07	0.20	0.44	0.56	0.55	0.41	-0.09	1.00	
<i>B. cariaense</i>	0.35	0.56	0.56	0.40	0.20	0.55	0.31	0.60	0.24	0.55	0.29	0.53	1.00

**Tabla 20.** Anexo D. Valores de carga de las especies de quistes de dinoflagelados (variables) para cada componente principal y el porcentaje respectivo de la varianza explicada en Cuenca Pescadero, según el ACP.

	CP1	CP2	CP3
<i>Brigantedinium</i> spp.	0.34	0.51	0.63
<i>D. caperatum</i>	0.16	0.75	0.34
<i>S. nephroides</i>	0.12	0.18	0.85
<i>Q. concreta</i>	0.51	0.48	0.54
<i>Lejeunecysta</i> gr.	0.47	0.17	0.69
<i>S. undulata</i>	0.54	0.19	0.70
<i>P. americanum</i>	0.84	0.29	0.26
<i>P. fukuyoi</i>	0.85	0.15	0.21
<i>Echinidinium</i> gr.	0.81	0.41	0.28
<i>B. spongium</i>	0.57	0.14	0.66
<i>Spiniferites</i> spp.	0.51	0.73	-0.04
<i>O. centrocarpum</i>	0.35	0.82	0.07
<i>G. catenatum</i>	-0.06	0.79	0.26
<i>G. micro-nolerii</i>	0.15	0.70	0.36
<i>P. schwartzii</i>	0.73	-0.08	0.34
<b>Varianza exp. (%)</b>	<b>28.51</b>	<b>25.12</b>	<b>22.94</b>

**Tabla 21.** Anexo E. Matriz de correlación de Pearson entre los conjuntos de quistes de dinoflagelados de Cuenca Pescadero y los parámetros físico-climáticos TSM, MEI y ODP. En rojo las variables con una correlación estadísticamente significativa ( $p < 0.05$ ).

	A1	A2	A3	MEI	ODP	TSM
A1	1.00					
A2	0.29	1.00				
A3	0.62	0.60	1.00			
MEI	-0.10	-0.24	-0.14	1.00		
ODP	-0.07	-0.14	0.04	0.65	1.00	
TSM	-0.01	-0.08	-0.09	0.24	0.08	1.00

**Tabla 22.** Anexo F. Valores de carga de las especies de quistes de dinoflagelados (variables) para cada componente principal y el porcentaje respectivo de la varianza explicada en Cuenca San Lázaro, según el ACP.

	<b>CP1</b>	<b>CP2</b>	<b>CP3</b>	<b>CP4</b>
<b><i>A. choane</i></b>	0.21	0.03	-0.11	0.72
<b><i>I. aculeatum</i></b>	0.83	0.04	0.05	0.19
<b><i>B. spongium</i></b>	0.30	0.70	0.07	0.24
<b><i>O. centrocarpum</i></b>	0.11	0.37	0.69	0.30
<b><i>Spiniferites sp.</i></b>	0.36	0.01	0.84	-0.04
<b><i>P. americanum</i></b>	0.83	0.07	0.28	0.19
<b><i>S. nephroides</i></b>	-0.13	0.67	0.44	0.05
<b><i>Q. concreta</i></b>	0.50	0.62	0.25	0.20
<b><i>Lejeunecysta sp.</i></b>	-0.15	0.73	0.42	-0.07
<b><i>V. calvum</i></b>	0.84	0.22	0.13	-0.02
<b><i>Impagidinium sp.</i></b>	0.16	-0.03	0.19	0.79
<b><i>B. simplex</i></b>	0.29	0.86	-0.10	-0.14
<b><i>B. cariacense</i></b>	0.58	0.53	-0.02	0.35
<b>Varianza exp. (%)</b>	23.77	23.62	13.77	11.96

**Tabla 23.** Anexo G. Datos estadísticos de los criterios de clasificación de las especies comunes, ocasionales y exóticas para las cuencas Pescadero (Pesc) y San Lázaro (SL).

Variables criterio de clasificación especies	Media	Límite de Confianza de la media (90%)		Rango		Percentil		Desv. Estand.	Error estand.
		Inf.	Sup.	Mín.	Máy.	P10	P90		
Abundancia Relativa $\bar{X}$ (%) (SL)	4.55	2.86	6.23	0.62	19.87	1.22	8.32	4.60	0.98
Abundancia Relativa $\bar{X}$ (%) (Pesc)	3.85	1.16	6.53	0.04	38.61	0.09	13.73	8.01	1.57
Presencia total en muestras (%) (SL)	42.82	35.29	50.34	13.00	83.00	19.00	69.00	20.51	4.37
Presencia total en muestras (%) (Pesc)	71.38	61.37	81.40	10.00	100.00	25.00	99.00	29.91	5.86
Concentración $\bar{X}$ (quistes/g) (SL)	6.82	4.83	8.81	0.80	21.50	1.50	15.50	5.42	1.16
Concentración $\bar{X}$ (quistes/g) (Pesc)	246.54	76.11	416.97	2.00	2,472.00	6.00	755.00	508.76	99.78