



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS



**RECONSTRUCCIÓN DE LA VARIABILIDAD DEL
CLIMA A TRAVÉS DE LOS SILICOFLAGELADOS
CONSERVADOS EN LOS SEDIMENTOS
LAMINADOS DE CUENCA ALFONSO**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
EN
MANEJO DE RECURSOS MARINOS

PRESENTA:

IRELA GUADALUPE ÁLVAREZ GÓMEZ

LA PAZ, B.C.S., JUNIO DE 2010

Esta memoria de tesis de maestría es el esfuerzo de un corto pero substancial tiempo de aprendizaje, nuevas experiencias además del crecimiento profesional y personal junto con agradables momentos que hicieron que todo esto valiera la pena. Sin embargo no puedo concluir sin dejar de agradecer a cada una de las personas e instituciones que contribuyeron a esta meta personal.

- *Al Instituto Politécnico Nacional y al Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, por la formación académica obtenida a través del grupo de investigadores y docentes. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y al Programa de Formación de Investigadores del Instituto Politécnico Nacional, por las becas otorgadas. Así como a los proyectos de los cuales mi tesis forma parte: 1) proyecto CONACyT Variaciones Estacionales e Interanuales en los Flujos y la Composición de Materia Particulada en Hundimiento en la Bahía de La Paz y los Factores Biológicos y Físicos que lo controlan 2) Impacto del cambio climático sobre la región suroeste del Golfo de California. Al Instituto de Geofísica y Paleomagnetismo de la UNAM- por el apoyo a través del proyecto CONACyT Variabilidad Climática en el Holoceno: estudio en registros naturales de alta resolución (sedimentos laminados) del Golfo de California y del proyecto DIPAL II Dinámica Oceánica y Paleoceanográfica del Golfo de California*

A usted Dra. Aída Martínez López por el legado que ha dejado en mí, haber trabajado con usted ha sido una grata satisfacción. Mi reconocimiento y agradecimiento por siempre a su labor y a su persona.

Quiero expresar mi agradecimiento a la Dra. Ligia Pérez Cruz y Dr. Jaime Urrutía Fucugauchi por la hospitalidad brindada en mi estancia en la Cd. de México, por su tiempo y el conocimiento que me brindaron.

A los profesores Dr. Enrique Híparco Nava Sánchez, Dr. Evguení Choumilline y Dr. Víctor Gómez Muñoz, por la disposición de su tiempo y todos los comentarios recibidos para mejora de mi trabajo.

Al equipo del laboratorio de fitoplancton Dr. Gerardo, Diana, Magdalena, Cristian, Germán y Citlali gracias por los ratos agradables que compartimos y por darme la mano en momentos críticos para sobrellevar esta difícil pero emocionante aventura.

Al C.P. Humberto Ceseña gracias por su valerosa labor, por su espíritu de servicio, y su entrega.

A mis amigos y compañeros de generación, Jareny, Fernando, Gaviota, Rubén, Cristina, Juan, Oscar, Ivette, Iran quienes nos dábamos ánimos unos con otros,

sobre todo en esta etapa final de tesis. Mis mejores deseos en esta nueva ruta que emprenderemos chicos. Y muy en especial a ti Elín por la dicha de compartir esta gran aventura, gracias por tu cariño y tu invaluable amistad.

A todos aquellos que aún en la distancia fueron ánimo para sacar a flote este barco a mis grandes amigos de Sinaloa, mi corazón por siempre, **MIZPHA**.

Un enorme y profundo agradecimiento a ti **Dalila** por ser no solo mi hermana sino mi amiga, gracias por tenerme en tu corazón siempre y darme apoyo en todo momento, te quiero. A ti **Saúl** y **Jaime** por su cariño que me anima a seguir en esta batalla.

A mis 7 corazones, **Raúl, Maílo, Alberto, Dianeth, María, Demí** y **Kiden** que convertían siempre mis tristezas en alegrías.

Mi amor por siempre para ti mamá **Rita** por ser mi fuente inagotable de amor, de tu lucha incansable he aprendido; a ti papá **Ramón** que buscas siempre mi bienestar, tu amor me sostiene y me da ánimo siempre.

Gracias por dejarme volar, los amo.

A mi Dios por darme la fortaleza en este caminar.

*Los fósiles síliceos son la letra pequeña de la historia y los
sedimentos la pizarra donde escribir "Margalef"*



ÍNDICE GENERAL

	Página
RELACIÓN DE FIGURAS	VII
RELACIÓN DE TABLAS.....	X
RELACIÓN DE LÁMINAS.....	XI
I INTRODUCCIÓN GENERAL	- 1 -
II HIPÓTESIS	- 6 -
III OBJETIVOS	- 6 -
Objetivos generales	- 6 -
IV ÁREA DE ESTUDIO.....	- 7 -
V CAPÍTULO 1: DINÁMICA TEMPORAL DE LOS SILICOFLAGELADOS (2002-2008)-	10 -
V.1 INTRODUCCIÓN CAPÍTULO 1	- 11 -
V.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	- 14 -
V.3 MATERIALES Y MÉTODOS	- 15 -
V.3.1 Tratamiento de las muestras de la trampa de sedimentos	- 15 -
V.3.2 Procesamiento de muestras de la columna de agua	- 17 -
V.4 RESULTADOS.....	- 19 -
V.4.1 Variabilidad estacional de los flujos de silicoflagelados en hundimiento	- 19 -
V.4.2 Validación de la trampa de sedimentos a través de la columna de agua	- 30 -
VI CAPÍTULO 2: CAMBIOS CLIMÁTICOS DECADALES (1845-2008).....	- 33 -
VI.1 INTRODUCCIÓN CAPÍTULO 2	- 34 -
VI.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	- 39 -
VI.3 MATERIALES Y MÉTODOS	- 40 -
VI.3.1 Recolecta del núcleo de sedimentos	- 40 -

VI.3.2	Procesamiento del registro sedimentario.....	- 40 -
VI.4	RESULTADOS.....	- 44 -
VI.4.1	Estratigrafía del núcleo de sedimentos.....	- 44 -
VI.4.2	Tasa de sedimentación lineal en el núcleo de sedimentos.....	- 45 -
VI.4.3	Variabilidad de la susceptibilidad magnética en el núcleo de sedimentos....	- 47 -
VI.4.4	Flujos de silicoflagelados (2008-1945) reconstruidos del registro sedimentario..	- 48 -
VII	DISCUSIÓN.....	- 52 -
VII.1	Trampa-columna de agua.....	- 52 -
VII.1.1	Variabilidad estacional.....	- 52 -
VII.1.2	Variabilidad interanual.....	- 64 -
VII.1.3	Variabilidad decadal.....	- 72 -
VIII	CONCLUSIONES.....	- 83 -
IX	BIBLIOGRAFÍA.....	- 85 -

RELACIÓN DE FIGURAS

- Figura 1. Batimetría de la Cuenca Alfonso en la Bahía de La Paz (figura modificada de Nava-Sánchez *et al.*, 2001). El punto en rojo señala el sitio de anclaje de la trampa de sedimentos y recolecta del núcleo de sedimentos. - 8 -
- Figura 2. Sistema de anclaje de la trampa de sedimentos instalada en el sitio de la Cuenca Alfonso a 360 m de profundidad. - 16 -
- Figura 3. Representación esquemática de los muestreos de la columna de agua y del periodo de recolecta de muestras por la trampa de sedimentos). Serie de tiempo de la trampa de sedimentos (enero 2002/febrero 2008-línea verde) y el periodo correspondiente de la columna de agua (diciembre 2005/febrero 2008-línea azul). - 18 -
- Figura 4. Serie de tiempo de los silicoflagelados capturados a 360 m de profundidad en Cuenca Alfonso, desde enero de 2002 a febrero de 2008. - 20 -
- Figura 5. Flujos relativos de los 13 taxones silicoflagelados identificados en la trampa de sedimentos de enero de 2002 a febrero de 2008. - 21 -
- Figura 6. Patrón anual promedio (2002-2008) del flujo total de los silicoflagelados recolectados en Cuenca Alfonso por una trampa de sedimentos. - 23 -
- Figura 7. La gráfica de áreas representa a *O. pulchra* el taxón más abundante del flujo total y en barras de colores se simboliza el resto de taxones (12) que contribuyeron a los incrementos observados en diciembre de cada año (2002-2007). - 24 -
- Figura 8. La gráfica de áreas representa a *O. pulchra* el taxón más abundante del flujo total y en barras de colores se simboliza el resto de taxones (12) que contribuyeron a los incrementos observados en septiembre de cada año (2002-2007). - 25 -
- Figura 9. La gráfica de áreas representa a *O. pulchra* el taxón más abundante del flujo total y en barras de colores se simboliza el resto de taxones (10) que contribuyeron a los incrementos observados en mayo de cada año (2002-2007). - 26 -
- Figura 10. Anomalías estandarizadas del flujo total de silicoflagelados desde enero de 2002 a febrero de 2008. - 27 -
- Figura 11. Patrones de variabilidad de los flujos de los silicoflagelados, representados en 3 factores. La línea azul continua es un promedio móvil de 3 puntos que fue aplicado a la serie original de cada factor. La línea discontinua son los datos originales de cada factor. - 29 -
- Figura 12. Valores de los factores de las especies. Factor 1 a) *D. messanensis* forma *messanensis* (2.08), Factor 2 b) *D. pentagona* (1.17) y *D. epiodon* + *D. speculum* (1.03); Factor 3 d) *D. messanensis* forma *spinosa* (1.78). - 30 -
- Figura 13. Análisis de similitud de 59 muestras de la trampa de sedimentos y 25 de la columna de agua. Se realizó un corte a un 97% de similitud. Las etiquetas de color representan las muestras de la columna de agua (CA) y el resto lo conforman las muestras de la trampa de sedimentos. - 31 -

Figura 14. Ciclo anual promedio (diciembre-2005/febrero-2008). El eje izquierdo corresponde a los valores de la trampa de sedimentos (TS) y el eje derecho a la columna de agua (CA).....	- 32 -
Figura 15. Estratigrafía del núcleo de sedimentos colectado en Cuenca Alfonso. La simbología muestra las características distintivas del núcleo.	- 45 -
Figura 16. a) Actividad total del ^{210}Pb , en la cual muestra su actividad radioactiva desde la superficie hasta los ~7 cm. b) Actividad del ^{210}Pb sin soportar, en la cual se señala el valor de R^2	- 47 -
Figura 17. Susceptibilidad magnética en un horizonte de 39.8 cm de profundidad. La línea punteada señala un cambio en el aporte de terrígenos a los ~6.5 cm.....	- 48 -
Figura 18. Flujos de los silicoflagelados reconstruidos desde 2008 a 1945. a) Flujo total y b) Flujo total en 3 fracciones de talla.	- 49 -
Figura 19. Serie de tiempo de los taxones de silicoflagelados depositados en los sedimentos laminados de Cuenca Alfonso en el periodo comprendido de 2008-1945.	- 50 -
Figura 20. Series de tiempo de los flujos de los 10 taxones de silicoflagelados desde 1945 a 2008, identificados en el registro sedimentario. En el eje “y” se muestra el horizonte en años y en el eje “x” los flujos $\text{cm}^{-2} \text{año}^{-1}$	- 51 -
Figura 21. Patrón anual promedio de vientos (enero 2002/febrero 2008). Las barras junto con las flechas (naranjas) indican la dirección del viento en grados de latitud y la línea de puntos negros la velocidad.....	- 57 -
Figura 22. Trayectorias de huracanes que afectaron las costas de la Península de Baja California Sur durante 2003 y 2007.....	- 59 -
Figura 23. Valores integrados de <i>O. pulchra</i> (barras) y valores integrados de nutrientes oxidados (líneas). Correspondientes al periodo de Diciembre de 2005-febrero 2008.	- 61 -
Figura 24. Valores integrados de <i>D.calida</i> (barras) y NO_2+NO_3 y SiO_4 (líneas). La serie corresponde a diciembre de 2005-febrero 2008.....	- 63 -
Figura 25. Variabilidad interanual a través del flujo promedio extraído por año de muestreo (2002-2007).	- 66 -
Figura 26. Factor 1 Subtropical Oceánico (círculos sin relleno) y anomalías del Índice de Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) en círculos oscuros. Ambas series tienen un promedio móvil de 3 puntos y corresponden al periodo de enero de 2002-febrero 2008. .-	- 67 -
Figura 27. Factor Ecuatorial en marcador oscuro y anomalías del Índice de “El Niño Modoki”. Ambas series tienen un promedio móvil de 3 puntos y corresponden al periodo de enero de 2002 a febrero 2008.	- 69 -
Figura 28. Factor Eventos fríos en marcador oscuro y anomalías del Índice de Oscilación del Giro del Pacífico Norte (NPGO). Ambas series tienen un promedio móvil de 3 puntos y corresponden al periodo de enero de 2002-febrero 2008.	- 71 -

Figura 29. Anomalías de precipitación (mm) para la Cd. de La Paz desde 1945 a 2008, se consideró un promedio móvil de 3 puntos. En barras grises se resaltan los eventos “El Niño” que estuvieron presentes en este periodo..... - 74 -

Figura 30. Serie de tiempo de 1945 a 2008 de los flujos de silicoflagelados (barras en grises) y anomalías del índice del PDO (línea), en marcador rojo la fase cálida del índice (1977-2008) y en azul la fase fría (1945-1976)..... - 77 -

Figura 31. Serie de tiempo de los flujos de silicoflagelados indicadores de condiciones frías (1945 a 2008, en barras) contrastadas con anomalías negativas de los eventos “La Niña” desde 1950 a 2008, señalados con líneas punteadas. http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml - 79 -

Figura 32. Serie de tiempo de los flujos de silicoflagelados indicadores de condiciones cálidas (1945 a 2008, en barras) contrastadas con anomalías positivas de los eventos “El Niño” (EN) desde 1950 a 2008, señalados a través de la líneas punteadas. http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml. - 81 -

RELACIÓN DE TABLAS

	Página
.....	
Tabla 1. Contribución al flujo total de los 13 taxones de silicoflagelados. Porcentajes mostrados como intervalos máximos y mínimos.	- 22 -
Tabla 2. Resultados del análisis de factores donde se observan los valores propios de los primeros tres factores y la variabilidad explicada por cada uno.	- 28 -
Tabla 3. Muestra y pares de láminas tomadas desde 0 a 10 cm de profundidad de la loza. El horizonte indica el fechado establecido a partir de 2008.....	- 41 -
Tabla 4. Muestras utilizadas para conocer la actividad total del ^{210}Pb y el ^{210}Pb sin soportar. La actividad del ^{210}Pb llega a su punto de equilibrio a los ~8 cm.	- 46 -
Tabla 5. Flujos máximos de silicoflagelados estimados para diferentes regiones oceánicas.	- 54 -
Tabla 6. Estimaciones de tasas de sedimentación de diferentes núcleos del Golfo de California fechados con ^{210}Pb . A excepción del núcleo BAM80 E-17 que fue fechado a través de ^{14}C y el BAP96J-CP por ambos métodos.	- 73 -

RELACIÓN DE LÁMINAS

	Página
Lámina 1. Taxones de silicoflagelados identificados en la trampa de sedimentos. a) <i>Corbisema</i> sp, b) <i>D. calida</i> , c) <i>D. californica</i> , d) <i>D. crux</i> , e) <i>D. epiodon</i> , f) <i>D. fibula</i> var <i>robusta</i> , g) <i>D. messanensis</i> forma <i>messanensis</i> , h) <i>D. perlaevis</i> , i) <i>D. franshepardii</i> , j) <i>D. messanensis</i> forma <i>spinosa</i> , k) <i>D. pentagona</i> , l) <i>D. speculum</i> , m) <i>O. pulchra</i>	- 19 -
Lámina 2. Núcleo de sedimentos DIPAL-C44. Loza superior (C44-A), intervalo de 0 a 17.7 cm de profundidad, b) Mamografía de C44-A. a) Loza inferior (C44-B), intervalo de 17.8 a 22.1 cm de profundidad. b) Mamografía C44-B.	- 42 -
Lámina 3. Malformaciones de <i>D. fibula</i> var <i>robusta</i> observadas tanto en trampa de sedimentos así como en sedimento. a,b,c, presentan ventanas adicionales en sus esqueletos; d, esqueleto de ventanas amplias; e) anillo plegado.	- 80 -

GLOSARIO

CAMBIO CLIMÁTICO: referido a la variación significativamente estadística en el que el estado promedio del clima o su variabilidad persiste por un periodo extendido (por décadas o un periodo mayor)

CAMBIO DE RÉGIMEN: paso abrupto de una condición climática, a un estado inverso en el cual se mantiene un periodo climático estable

CLIMA: es el promedio de un periodo de por los menos 30 años de variables atmosféricas, oceánicas o terrestres

HOLOCENO: periodo de la tierra que comprende los últimos 10 000 años, tiempo desde el final del último periodo glacial (edad de hielo), periodo de tiempo relativamente cálido

ÍNDICE CLIMÁTICO: en su forma más simple es la media de indicadores de cambio climático, tales como la temperatura superficial del océano o bien como patrones de variación de una zona extraídos a partir de una serie de tiempo de una o varias variables oceánicas, atmosféricas o terrestres

ISÓTOPO RADIOACTIVO: son átomos de un mismo elemento, que tienen un núcleo atómico radioactivo por tener un desbalance entre los protones y neutrones y para compensar esto el núcleo pasa por un periodo de desintegración emitiendo radiación, y esta energía es liberada en forma de partículas alfa (como núcleos de helio), beta como electrones de alta energía o como rayos gamma a través de energía electromagnética

NUCLEADOR DE CAJA: muestreador que es utilizado para recolectar muestras cuantitativas de sedimento no consolidado. Este equipo tiene la capacidad de preservar la estructura del sedimento sin alterar, incluyendo la interface agua-sedimento

PALEOCEANOGRAFÍA: ciencia que estudia las condiciones ambientales pasadas en los océanos, es decir, los cambios físicos, químicos y biológicos

CICLO ANUAL PROMEDIO: es el patrón que define la variabilidad temporal de una variable física, química o biológica a través del tiempo

PROXY: indicador indirecto (extraído de un archivo o registro climático) cuantificable que por su naturaleza física, química o biológica está relacionado con diferentes variables paleoclimáticas y sus oscilaciones reflejan los cambios temporales acontecidos en estas variables a través del tiempo

SEDIMENTOS LAMINADOS: registro natural preservado en cuencas anóxicas o subóxicas, que presenta una estructura en forma de láminas con bandas claras y

oscuras que juntas significan un ciclo de depositación y dependiendo de las condiciones de la cuenca será el tiempo que tarden en formarse

SILICOFLAGELADOS: productores primarios que forman parte del microfitoplancton silíceo, poseen un esqueleto tubular en forma de anillo redondo o cuadrangular del cual se prolongan espinas radiales y secundarias

SISTEMA CLIMÁTICO: conjunto de componentes que interactúan entre sí, la atmósfera, hidrósfera, criósfera, la superficie de la tierra y la biosfera, influenciados por factores externos de los cuales el sol es el principal.

TELECONEXIONES: anomalías climáticas que se propagan de unas latitudes a otras y que tienen diferencia en espacio y tiempo

TRAMPA DE SEDIMENTOS: cilindros o conos automatizados, que son colocados a cierta profundidad en el océano, y funcionan como colectores de las partículas que caen desde la superficie hasta el fondo oceánico

VARIABILIDAD CLIMÁTICA: referido a las variaciones del clima en el estado promedio, sobre las escalas espaciales y temporales. Variabilidad debido a procesos naturales internos dentro del sistema climático o a variaciones de forzamiento externo (cambios antropogénicos)

VARVA: par de láminas clara y oscura que en el registro sedimentario representan un año de depositación

RESUMEN

La serie de tiempo generada para los flujos de los silicoflagelados a través de una trampa de sedimentos ubicada a 360 m de profundidad desde enero de 2002 a febrero de 2008, fue utilizada para estudiar sus cambios en magnitud y composición de especies en relación con la variabilidad climática en Cuenca Alfonso. Los resultados de la trampa de sedimentos mostraron que hay una importante variabilidad estacional, interanual y una tendencia decadal en la exportación de los silicoflagelados desde la zona eufótica (Z_{eu}) que está estrechamente relacionado a la dinámica y PP de la columna de agua, así como a la variabilidad climática decadal a escala de cuenca del Pacífico. Los flujos en la trampa de sedimentos variaron entre 1×10^3 (junio 2002) y 2.4×10^7 (diciembre 2007) esqueletos $m^{-2} \text{ día}^{-1}$. La especie dominante del flujo total fue *Octactis pulchra*. La observación continua de los esqueletos desde la Z_{eu} es esencial para definir un verdadero patrón de variabilidad estacional. Sin embargo, para validar esta variabilidad es necesario documentar de manera simultánea la producción de estos organismos en la Z_{eu} . En este estudio el material recolectado por la trampa de sedimentos y muestras mensuales de la zona eufótica (100, 55, 33, 10, 3, 1 y 0.1% de irradiancia superficial) fueron estudiados para el mismo periodo (diciembre 2005-febrero 2008), observándose tendencias similares en los datos de la Z_{eu} y el patrón anual promedio de los flujos de los silicoflagelados previamente definido. Los incrementos de diciembre, mayo y septiembre fueron las características más conspicuas de ambas series. El análisis multivariado de clasificación definió un valor de similitud de 97.5 % entre las muestras de la trampa y la zona eufótica, lo que nos permite concluir que en Cuenca Alfonso los silicoflagelados capturados por la trampa de sedimentos representa su producción y variabilidad estacional, definiendo un retraso en los eventos de producción en la zona eufótica y su expresión en el material de la trampa de 1 a 3.5 semanas. El mecanismo principal que maneja la variabilidad estacional esta ejercida por los vientos que soplan sobre la región en diciembre, mientras que en septiembre la llegada de huracanes al sitio promueve la entrada de nutrientes y un giro ciclónico durante mayo bombea nutrientes desde el fondo hacia la zona eufótica y activa la producción subsuperficial. Los taxones identificados fueron 13 y 10 en la trampa de sedimentos y zona eufótica respectivamente. En la escala temporal a partir del análisis de Factores fue posible identificar tres patrones de variación en los datos de la serie de la trampa. Los patrones identificados están relacionados con la variabilidad climática de escala decadal que ocurren en latitudes medias a altas del Pacífico Norte, como sugiere la presencia de especies de agua fría *Dictyocha epidon*, *D. speculum* y *D. pentagona* y agua cálida ecuatorial oceánica con la presencia de *D. messanensis* forma *spinosa*, así como agua subtropical oceánica con la presencia de *D. messanensis* forma *messianensis*. La tasa de depositación del sedimento estimada para Cuenca Alfonso fue de 0.60 mm año^{-1} . Por otro lado el análisis de los sedimentos en Cuenca Alfonso recolectados con un nucleador de caja mostraron una marcada variabilidad decadal con un rango de flujos de 59 a 3.8×10^2 esqueletos $m^{-2} \text{ día}^{-1}$. Fueron identificados 10 taxones de los cuales *D. fibula* var *robusta* y *D. messanensis* forma *spinosa* dominaron los flujos. Se identificaron dos periodos de producción asociados a los cambios de régimen de 1998 y 1977. Una baja fidelidad en el registro de *O. pulchra* fue observado en el registro sedimentario lo cual sugiere una disolución selectiva de esta especie en el fondo de Cuenca Alfonso.

Palabras clave: silicoflagelados, zona eufótica, trampa de sedimentos, sedimentos laminados, variabilidad climática, Cuenca Alfonso.

ABSTRACT

Time series of vertical fluxes of silicoflagellates collected by a sediment trap positioned at 360 m water depth was used to study their changes in magnitude and species composition related to climate variability in Alfonso Basin from January 2002 to February 2008. Result from sediment trap collection show several important seasonal, inter-annual and decadal trends in the export of silicoflagellates from the euphotic zone (Z_{eu}) that are closely tied to the dynamics of the water column and PP of the upper water column as well as Pacific basin-scale climate variability. Thirteen and ten taxa were identified in the sediment trap and Z_{eu} samples respectively. Flows into the trap sediments ranged from 1×10^3 (june-2002) to 2.4×10^7 (december-2007) skeletons $m^{-2} \text{ día}^{-1}$. *Octactis pulchra* was the dominant species of the total flow. Continuous monitoring of sinking skeletons of silicoflagellates from the Z_{eu} is essential to define their true seasonal variability pattern. However, to validate this information is necessary to document simultaneous production of these organisms in the euphotic zone. In this study the material collected by a sediment trap and monthly samples of the Z_{eu} (100, 55, 33, 10, 3, 1 and 0.1% of superficial irradiance) was examined for the same period (December 2005-Febrero 2008). Similar tendencies were observed in the Z_{eu} data series and the average annual pattern of silicoflagellates fluxes previously defined. Peaks of December May and September were the most conspicuous feature in both series. Classification multivariate analysis defined a similarity value of 97.5% between trap and Z_{eu} samples, which allows us to conclude that in Alfonso basin the silicoflagellates captured by the sediment trap represent their production and seasonal variability, defining a lagging between production events in the Z_{eu} and their impression on the trap material of approximately 1 to 3.5 weeks. Main mechanism driving seasonal variability is related with mixing exerted by winds blowing over the region in December, while during September, the arrival of hurricanes to the site promotes the entry of nutrients. During May a cyclonic gyre caused upward displacement of nutrient-rich deep waters into Z_{eu} fueling subsurface production. In the temporal scale Factor Analysis identified three patterns of variation in the trap time series data. The patterns identified are related with decadal scale climatic variability occurring in medium to high latitudes of the North Pacific suggested by the presence of cold water species *D. epiodon*, *D. speculum* and *D. pentagona*, and warm equatorial oceanic waters indentified by *D. messanensis* form *spinosa*, as well as subtropical oceanic water with the presence of *D. messanensis* form *messanensis*. The rate of deposition of sediment estimated for Alfonso Basin was 0.60 mm yr^{-1} . The analyses of the Alfonso Basin sediments collected via a Box Core showed a high decadal variability with a range of fluxes from 59 to 3.8×10^2 skeletons $m^{-2} \text{ día}^{-1}$. Ten taxa were identified of which *D. fibula* var *robusta* and *D. messanensis* form *spinosa* dominated flows. We identified two periods of production associated with the 1998 and 1977 regime shifts. A low fidelity record of the dominant silicoflagellates *Octactis pulchra* was observed in the sedimentary record which suggests a selective dissolution of this species in the bottom of Cuenca Alfonso.

Keywords: silicoflagellates, euphotic zone, sediment trap, laminated sediments, climate variability, Alfonso Basin.

I INTRODUCCIÓN GENERAL

Con el propósito de entender las relaciones complejas entre los subsistemas del sistema climático como océano, atmósfera y criosfera, durante los últimos años se han incrementado los estudios tendientes a generar modelos predictivos de la variabilidad climática. Particularmente en relación al océano se ha realizado mucho esfuerzo, investigando la participación de éste en el cambio climático, ya que representa la fuente primaria de la “memoria” temporal de largo plazo del sistema climático. No obstante, ha sido difícil identificar las causas de la variabilidad climática debido a que el clima es el producto final de interacciones complejas y muchos aspectos importantes de la misma permanecen aún sin resolverse (Miller & Schneider, 2000). Por ejemplo, en la escala decadal es desconocido cual es el mecanismo principal que desencadena el cambio de régimen climático. Sin embargo, se han sugerido como probables generadores de este a los gases invernadero (Paeth *et al.*, 1999; Robinson *et al.*, 2007), la actividad solar (Courillot *et al.*, 2007) e interacciones océano-atmósfera (Miller *et al.*, 2004; Lohmann & Latif, 2005; Di Lorenzo *et al.*, 2009b).

La investigación en torno a la interacción océano-atmósfera sugiere que la transferencia de cambios entre estos dos componentes del sistema climático, modifica la circulación atmosférica entre regiones tropicales y extratropicales a través de las teleconexiones, alterando la temperatura del aire cerca de la superficie, la humedad del viento, así como la distribución de las nubes en regiones remotas (Alexander *et al.*, 2002). En el hemisferio sur el fenómeno conocido como “El Niño” Oscilación Austral (ENSO por sus siglas en inglés) es un ejemplo ampliamente estudiado que asocia este tipo de teleconexión entre la región tropical y extratropical (McPhaden, 2008), la cual ha sido tipificada por diversos índices climáticos a través de los cuales se han reconocido patrones anómalos, derivados del forzamiento atmosférico sobre el océano (Glantz, 1997). Estos índices climáticos son herramientas de diagnóstico usadas para detectar el estado del sistema climático y monitorear el clima (Ducklow *et al.*, 2009).

En el Pacífico Norte las fluctuaciones climáticas de baja frecuencia están caracterizadas y representadas por dos modos dominantes de variabilidad oceánica, la Oscilación Decadal del Pacífico (siglas en inglés, PDO) (Mantua *et al.*, 1997) y la Oscilación del Giro del Pacífico Norte (siglas en inglés, NPGO) (Di Lorenzo *et al.*, 2009a, 2009b). El patrón climático PDO, es un modo de variabilidad decadal de la temperatura superficial del mar (TSM) en el Pacífico Norte extratropical y está tipificado con fases positivas y negativas que corresponden con periodos cálidos y fríos respectivamente (Mantua *et al.*, 1997; Chávez *et al.*, 2003), su ciclicidad es en orden de 20 a 30 años (Zhang *et al.*, 1997). Durante un régimen climático cálido existe una correspondencia con un mayor número de eventos “El Niño”, mientras que en la condición fría la predominancia de eventos interanuales dentro de este índice corresponden al fenómeno de “La Niña” (Miller *et al.*, 2007).

En tanto que el NPGO representa el segundo modo de variabilidad decadal de anomalías de la altura superficial del mar en la región del Pacífico Norte (180°W–110°W; 25°N–62°N), captura cambios entre la Corriente del Pacífico Norte y la extensión de Kuroshio-Oyashio y su patrón muestra la relación entre el Giro de Alaska y la Corriente de California. Su fase positiva se relaciona con una intensificación en la advección horizontal o circulación geostrófica, esto es una intensificación de la Corriente del Pacífico Norte, de la Corriente Costera de Alaska y del transporte de la Corriente de California hacia el sur. Así como de los vientos favorables para las surgencias en el Giro de Alaska y Corriente de California. Ambos procesos involucrados en el control de la salinidad y nutrientes superficiales (Di Lorenzo *et al.*, 2009b).

Muchos estudios han sugerido que la variabilidad decadal del Pacífico Norte se deriva del componente de baja frecuencia del ENSO (Alexander *et al.*, 2002 y Di Lorenzo *et al.*, 2009b), no obstante, otros autores como Latif & Barnett (1996) y Pierce *et al.* (2000) sugieren que esta variabilidad es propia de los extratropicos y se presenta en periodos de aproximadamente 20 a 30 años, a la cual se ha reconocido como PDO según Mantua *et al.* (1997). Sin embargo, la teleconexión entre trópicos y subtropicos ha sido demostrada a través de un “puente atmosférico” que influye directamente sobre la temperatura superficial del mar a través de los flujos de calor e

indirectamente (vía momentum) sobre los flujos de agua fría afectando de este modo las corrientes y la mezcla en el océano (Alexander, 2010). Estas modificaciones en el clima del Pacífico Norte han sido detectadas como cambios en escala decadal y se han asociado a las alteraciones en los centros de alta y baja presión atmosférica para esta región. Para el sistema de la Corriente de California se sabe que un debilitamiento en el centro de baja presión de las Aleutianas favorece los vientos costeros del norte, por lo tanto esto deriva en anomalías de TSM más frías debido a una convección más profunda de las surgencias, que a su vez promueve que aguas profundas ricas en nutrientes lleguen a mezclarse verticalmente hasta la superficie. En tanto que la condición contraria sucederá cuando se presente una fase cálida ante la intensificación de este centro de baja presión (Chhak & Di Lorenzo, 2007). Particularmente el litoral mexicano durante esta última década ha registrado las diversas manifestaciones de la variabilidad climática debido a que una nueva condición climática fría observada primero con anomalías de agua Subártica a la Corriente de California así como con su desplazamiento inusual de Agua de la Corriente de California hacia latitudes sureñas (Durazo, 2009), aunado a la presencia anómala de aguas tropicales debido al evento “El Niño” desarrollado en la zona ecuatorial, lo cual ha sido una condición inusual en los últimos 10 años (McPhaden, 2008). Estas modulaciones climáticas actúan sobre los mecanismos, que manejan la dinámica del ecosistema y la respuesta biológica implícita. En este sentido el plancton es un buen indicador de la variabilidad climática por diversas razones: son especies de vida corta, muestra cambios drásticos en su distribución ya que son transportados por las corrientes y por lo tanto sus rangos de distribución se pueden expandir o contraer, esto los vuelve indicadores sensibles ante cualquier cambio del sistema (Hays *et al.*, 2005).

En contraparte con los beneficios potenciales de usar el plancton para identificar cambios de régimen climático, existe la carencia de series de tiempo suficientemente largas, como para identificar estos cambios. Hasta el presente la conexión entre los patrones climáticos y el plancton en la región del Pacífico Nororiental se limita a la utilización de las series de tiempo, generadas por el programa CALCOFI y la serie de tiempo de la estación PAPA en E.U.A. (Takahashi,

1989). Estas series aunque tienen una cobertura temporal considerable (~60 años), no son suficientes para documentar ampliamente la respuesta biológica a las fluctuaciones climáticas de baja frecuencia de esta región. Una alternativa para resolver esta carencia de series de tiempo largas es mediante el análisis de los registros naturales de alta resolución, como es el caso de los sedimentos laminados de cuencas oceánicas, puesto que en ellos permanecen registrados los eventos climáticos que ocurren en el océano, a través de las estructuras de los organismos planctónicos que se depositan cronológicamente, formando parte del par de láminas características de un evento de depositación y que en algunas regiones puede representar un ciclo anual (Baumgartner *et al.*, 1991).

Algunos grupos planctónicos han demostrado ser muy útiles en la reconstrucción del clima oceánico, como son los organismos con esqueletos silíceos (diatomeas y silicoflagelados). Estos últimos han sido ampliamente utilizados para mostrar la conexión entre la variación del océano y la respuesta biológica debido a su afinidad marcada por ciertos ambientes como por ejemplo *Distephanus speculum*, una especie afín a aguas frías y ricas en nutrientes del Pacífico subártico (Takahashi, 1989; Takahashi & Blackwelder, 1992). Su presencia en regiones distantes como latitudes subtropicales en la entrada del Golfo de California (Murray & Schrader, 1983; Schrader & Baumgartner, 1983) han permitido inferir una influencia mayor de agua de la Corriente de California (Murray, 1982; Murray & Schrader, 1983; Álvarez-Gómez, 2007) en diversos periodos, mientras que una condición contraria ha indicado el ingreso anómalo de agua ecuatorial en esta región a través de la presencia de especies como *Dictyocha messanensis* forma *spinosa*, *Dictyocha calida*, *Dictyocha californica*, *Dictyocha fibula* var *robusta* (Murray, 1982; Pérez-Cruz & Molina-Cruz, 1988). Sin embargo, a pesar de que no existe duda del valor de la información paleo-ecológica y paleoceanográfica de los silicoflagelados conservados en los registros sedimentarios, existe la posibilidad que éste sea un registro modificado de la señal original debido a los procesos de transporte desde la zona eufótica, ruptura durante la sedimentación, disolución selectiva, transporte lateral y resuspensión, haciéndose necesario un estudio combinado de su producción en la columna de agua, su exportación de la zona eufótica y depositación en el sedimento.

Por lo que en este trabajo se incluye el análisis ecológico de la información proveniente de la zona eufótica (de diciembre de 2005 a febrero de 2008) y una serie de tiempo (de 2002 a 2008) de los silicoflagelados en hundimiento, que fueron recolectados con una trampa. La información así generada representa un paso intermedio en la formación del registro sedimentario y de esta manera permite una correcta interpretación del mismo. Este trabajo pretende por lo tanto probar la validez de utilizar a los silicoflagelados para reconstruir la historia climática y oceanográfica de los últimos 60 años aproximadamente para la región sur del Golfo de California, que ha quedado conservada en el registro sedimentario de Cuenca Alfonso.

II HIPÓTESIS

1. Los silicoflagelados recolectados en la trampa de sedimentos estarán correlacionados con la variabilidad temporal, abundancia y composición de los silicoflagelados de la zona eufótica.

2. Los cambios en la composición y abundancia de los silicoflagelados extraídos de los sedimentos laminados de Cuenca Alfonso, serán coherentes con la variabilidad climática de escala global o de cuenca del Pacífico, presentando valores de flujos altos durante los regímenes fríos y valores bajos durante los regímenes cálidos.

III OBJETIVOS

OBJETIVOS GENERALES

1. Determinar el grado de similitud entre la composición y variabilidad temporal de los silicoflagelados de la columna de agua y los recolectados con la trampa de sedimentos, así como su relación con las condiciones oceanográficas prevalecientes de 2002 a 2008.
2. Interpretar los cambios paleoclimáticos que han afectado la parte sur del Golfo de California en aproximadamente los últimos 60 años, por medio de los cambios en la composición de especies de silicoflagelados preservados en los sedimentos laminados de Cuenca Alfonso.

IV ÁREA DE ESTUDIO

La Bahía de La Paz (Golfo de California), localizada en el margen suroccidental del Golfo de California, ha demostrado ser sensible a las variaciones regionales ya que dentro de la misma se han registrado variaciones climáticas de gran escala debido a su localización geográfica (Douglas *et al.*, 2001); se encuentra comunicada al sur por medio de un canal con la laguna costera de la Ensenada de La Paz y al Golfo de California la comunican dos bocas, una al noreste (Boca grande) y otra al sureste (Boca Chica o Canal San Lorenzo) (Jiménez-Illescas, 1996). Presenta un gradiente de profundidad que va aumentando gradualmente de sur a norte, hasta alcanzar la isobata de los 400 m, donde aproximadamente se encuentra Cuenca Alfonso (Cruz-Orozco *et al.*, 1996). La circulación atmosférica durante invierno-primavera se encuentra bajo la influencia de los vientos predominantes del oeste del anticiclón del Pacífico septentrional provocando los vientos máximos en la región, mientras que la circulación de verano el dominio de este anticiclón es menor ya que su desplazamiento hacia el oeste del Pacífico permite que la bahía quede bajo la influencia de los vientos Alisios lo que provoca una disminución en la intensidad de los vientos, sin embargo este periodo favorece la formación de ciclones tropicales en la región favoreciendo las lluvias (Robles-Gil Mestre, 1998). La precipitación media anual es muy baja (180 mm) y es excedida por la evaporación (300 mm) ocasionando un incremento en la salinidad, aunado a que el aporte de agua dulce fluvial no existe (Jiménez-Illescas, 1996).

Por su localización geográfica en la región sur del Golfo de California, en La Bahía de La Paz convergen diversos tipos de agua; Agua Subsuperficial Subtropical (ASsST, $S < 35$, $T < 35^{\circ}\text{C}$) entre los 150 a 500m, Agua del Golfo de California (AGC, $S > 35$, T de 15 a 20°C) delimitada en los primeros 150m superficiales y Agua Superficial Ecuatorial (ASE, $S < 35$ y delimitada por la isoterma de 18°C), la cual alcanza su mayor penetración al golfo durante el verano. Además de ingreso ocasional de Agua de La Corriente de California (ACC, $S < 35$ y $T 11-18^{\circ}\text{C}$), al sur del golfo (Stevenson, 1970) con máxima penetración hasta Isla Cerralvo (Castro *et al.*, 2003).

Cuenca Alfonso

Se localiza hacia el noroeste de la Bahía de La Paz, es una depresión alongada y cerrada con una profundidad máxima de 420 m, las aguas que bañan su fondo son bajas en contenido de oxígeno con concentraciones de 5.0 ml L entre la superficie y los 25 m de profundidad, posteriormente hasta los 75 m el oxígeno presenta concentraciones de 1.0 ml L⁻¹ y en el fondo los valores son cercanos a 0.1 ml L⁻¹, por lo que la cuenca presenta una condición disóxica (Monreal-Gómez *et al.*, 2001) que inhibe el crecimiento de comunidades bentónicas en el fondo (De Diego & Douglas, 1999).

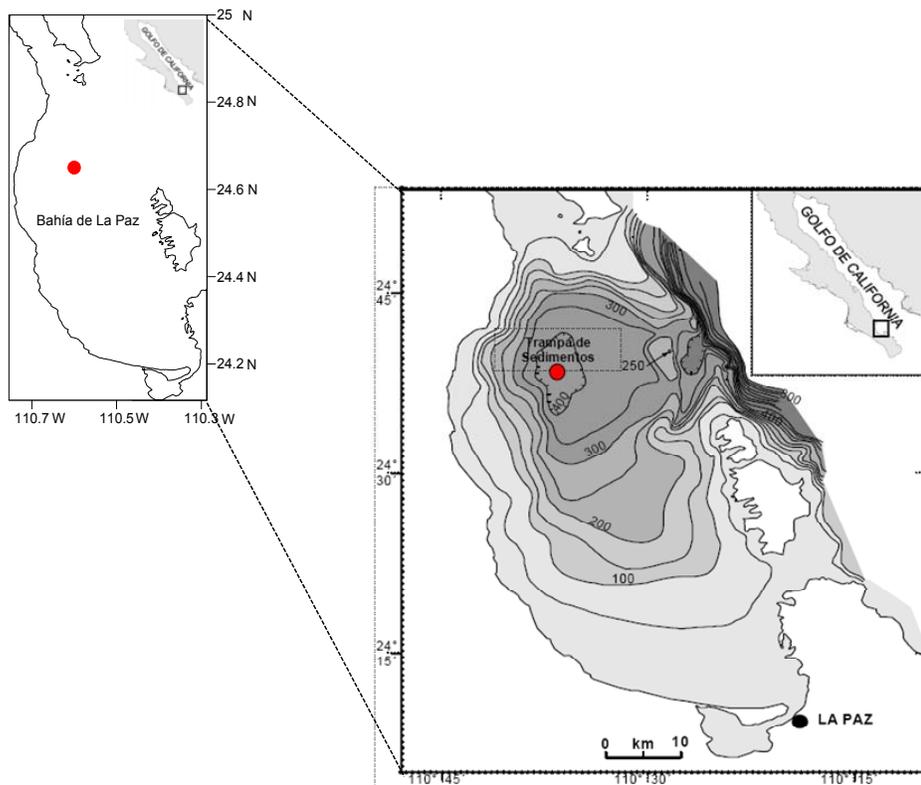


Figura 1. Batimetría de la Cuenca Alfonso en la Bahía de La Paz (figura modificada de Nava-Sánchez *et al.*, 2001). El punto en rojo señala el sitio de anclaje de la trampa de sedimentos y recolecta del núcleo de sedimentos.

Hacia el norte de la bahía se encuentra un abanico aluvial “El Coyote” que está alimentado por un arroyo el cual aporta sedimentos que en conjunto con los esqueletos de microorganismos conforman los sedimentos hemipelágicos que se depositan en su fondo durante la incidencia de fuertes tormentas, principalmente cuando ocurre “El Niño” (Nava-Sánchez *et al.* 1999). Su sedimentación se caracteriza por una depositación natural en forma de láminas, cuyo tiempo de formación de cada par, según Pérez-Cruz, (2000) y Molina-Cruz, *et al.* (2002) representa un periodo de 11.2 años aproximadamente. La depositación de la lámina oscura es rica en material terrígeno (silicoaluminicatos) asociada a las condiciones climáticas del ENSO en tanto que la lámina clara corresponde a eventos de alta productividad y condiciones de sequía (Pérez-Cruz & Urrutia-Fucugauchi, 2010). Los sedimentos son ricos en carbono orgánico, limos, arcillas y algunas arenas finas que representan capas de turbiditas (De Diego & Douglas, 1999).

**V CAPÍTULO 1: DINÁMICA TEMPORAL DE LOS
SILICOFLAGELADOS (2002-2008)**

V.1 INTRODUCCIÓN CAPÍTULO 1

Los productores primarios juegan un papel fundamental en el suministro de carbono hacia el fondo del océano, el bióxido de carbono que es fijado por estos es transferido en la columna de agua a través de diferentes procesos como el hundimiento pasivo de partículas en agregados amorfos como la nieve marina, la cual es un sitio importante para procesos biológicos de producción, descomposición y reciclamiento de nutrientes (Alldredge & Jackson 1995). Adicionalmente otros mecanismos que modulan el flujo vertical son el transporte activo a través de la migración vertical del zooplancton mediante la respiración y excreción, así como la mezcla física de partículas (Buesseler *et al.*, 2007). Boltovskoy (1995), señala que sólo el 10% de carbonato de calcio y sílice biogénico que se produce en la columna de agua llega a formar parte del registro fósil, debido a que muchos de los esqueletos de organismos desaparecen en su hundimiento. Sin embargo, esto no es uniforme en la columna de agua, puesto que las especies más frágiles son más afectadas que aquellas de esqueletos más robustos (Takahashi, 1991; Boltovskoy, 1995). De manera conjunta ocurre la fragmentación debido al pastoreo por el siguiente nivel trófico, permitiendo aun más la disolución del material y evitando que gran parte de este llegue íntegro al piso oceánico (Takahashi, 1991).

Por lo tanto la transferencia de material en hundimiento dependerá en gran medida del suministro de partículas, agregación e inminentemente del acoplamiento que exista entre la producción y el consumo de cada sitio en particular (Buesseler *et al.*, 2007). En sitios como los grandes giros de las cuencas oceánicas, existe un mayor acoplamiento entre productores primarios y sus consumidores, haciendo que el flujo exportado sea relativamente bajo, mientras que sitios costeros como zonas de surgencias, el acoplamiento es menor, ya que la respuesta de consumo del siguiente nivel trófico no rebasa lo producido por los organismos fitoplanctónicos, esto hace que gran parte del material que no fue consumido forme parte de los sedimentos biogénicos y a su vez colabore para que se incremente la tasa de sedimentación de estos sitios en particular (Venrick *et al.*, 2003), mientras que la producción primaria dependerá en gran medida de las condiciones oceanográficas presentes. Para el

Pacífico Norte las estimaciones sobre productividad primaria son escasas y puntuales, se ha reconocido que el noroeste de Baja California durante verano alcanza valores de hasta $4000 \text{ mg C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ (Gaxiola-Castro & Álvarez-Borrego, 1984), lo cual podría sostener un flujo de exportación substancial en el noroeste de Baja California, al menos durante esa temporada; asimismo valores comparables durante primavera ($1350\text{-}4350 \text{ mg C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) han sido estimados para el norte y centro del Golfo de California (Gaxiola-Castro & Álvarez-Borrego, 1986), mientras que para la parte sur los valores reportados por Lara-Lara & Valdez-Holguín (1988) durante el verano fue de $1210 \text{ mg C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, en tanto que los estimados para Cuenca Alfonso por Villegas-Aguilera, (2009) fueron ligeramente más altos ($1366 \text{ mg C m}^{-2} \text{ día}^{-1}$).

Dentro del fitoplancton algunos grupos están más íntimamente ligados a las temporadas productivas del año y por ende con los mayores flujos de material hacia fuera de la zona eufótica. Uno de estos grupos son los silicoflagelados, los cuales no obstante que sólo constituyen el 2% (Lipps, 1993) del fitoplancton silíceo han sido reconocidos como buenos indicadores de productividad (Murray, 1982; Murray & Schrader, 1983; Schrader & Baumgartner, 1983; Schrader *et al.*, 1986) a través de estudios donde se han utilizado trampas de sedimentos (Takahashi, 1989; Osawa *et al.*, 2005), ya que la estructura robusta de sus esqueletos disminuye los efectos de disolución en la columna de agua, conjuntamente con las espinas que poseen (Takahashi, 1987), asumiendo que la presión por pastoreo no será crítico sobre los diversos taxones de silicoflagelados (Takahashi & Blackwelder, 1992). Esto permite que viajen a través de la columna de agua a una velocidad de hundimiento de aproximadamente 60 m día^{-1} conservándose casi intactos en la zona iluminada y bien preservados hasta el fondo oceánico (Osawa *et al.*, 2005), donde han sido recolectados con trampas de sedimentos ancladas en diferentes sitios oceánicos. Las series de tiempo generadas de material recolectado han ilustrado que los patrones de variabilidad de los silicoflagelados difieren de una región a otra (Thunell *et al.*, 1996; Romero *et al.*, 2002; Sancetta, 1990; Onodera & Takahashi, 2005).

Onodera & Takahashi (2005) mostraron que en el borde occidental del Giro Subártico los periodos de crecimiento de los silicoflagelados son recurrentes en

invierno (diciembre), primavera (mayo esencialmente) y verano (julio-agosto), y para la misma latitud pero sobre la costa este del Pacífico (estación "PAPA") Takahashi (1989) también señala que los incrementos de primavera y verano se dan de manera repetida. Esta variabilidad estacional se ha registrado también para la Corriente de California, en la cual el incremento de estos organismos se manifiesta a finales de otoño e inicios de invierno (Sancetta, 1990; Lange *et al.*, 1997; Lange *et al.*, 2000). Este comportamiento coincide con lo observado dentro región subtropical en el Golfo de California por Thunell *et al.* (1996) para la región central y posteriormente por Álvarez-Gómez (2007) en la región suroccidental.

Esta variabilidad en la producción ha permitido extraer a través de las especies de silicoflagelados, señales ambientales que modifican las condiciones oceanográficas de cada sitio en particular (Takahashi & Blackwelder, 1992) ya que las abundancias de estos organismos está estrechamente relacionada con las propiedades de las masas de agua, principalmente con la temperatura que define estos cuerpos de agua (Poelchau, 1976). Por ejemplo, *D. speculum* y *D. epidon* se han asociado con aguas del Pacífico subártico (Onodera & Takahashi, 2005), en tanto que *O. pulchra* se considera como una especie representativa del Golfo de California (Murray, 1982; Murray & Schrader, 1983). Por otro lado *D. messanensis* forma *messanensis* ha sido utilizada como un indicador de influencia de agua oceánica del Pacífico en la región sur del golfo (Schrader & Baumgartner, 1983), mientras que otras especies como *D. fibula var robusta* y *D. californica* tiene afinidad por aguas ecuatoriales (Hernández-Becerril & Bravo-Sierra, 2001) lo cual hace que su presencia dentro del Golfo de California sea interpretada como indicadora de la influencia del fenómeno "El Niño" en este sitio (Pérez-Cruz & Molina-Cruz, 1988).

Estas cualidades de los silicoflagelados han permitido dilucidar aspectos oceanográficos dentro del Golfo de California, desde una perspectiva local en relación a un giro ciclónico que se ha detectado en la Bahía de La Paz y que tiene que ver con un ascenso de nutrientes del fondo hacia la zona iluminada (Monreal-Gómez *et al.*, 2001 y Villegas-Aguilera, 2009). Mientras que en el aspecto regional se ha puntualizado el efecto positivo que tiene el régimen de vientos de esta zona durante invierno-primavera sobre la producción de estos organismos (Martínez-

López *et al.*, 2001; Álvarez-Gómez, 2007), así como el desplazamiento de Agua Ecuatorial Superficial derivado de la ocurrencia del fenómeno “El Niño” que de manera paulatina ejerce su influencia sobre la parte sur del golfo (Murray, 1982; Murray & Schrader, 1983; Schrader & Baumgartner, 1983; Álvarez-Gómez, 2007) o en ocasiones incluso hasta la parte central del mismo (Pérez-Cruz & Molina-Cruz, 1988). En este contexto los silicoflagelados han resultado útiles para entender la dinámica oceanográfica en diversas regiones oceánicas, es por ello que en la presente investigación se ha seleccionado a este grupo del microfitoplancton para definir los modos de variabilidad que afectan la parte sur del Golfo de California, apoyados en el conocimiento sobre la ecología de sus especies y en series de datos de índices climáticos, utilizados aquí como herramientas de diagnóstico para describir la condición climática prevaleciente y para determinar si alguna de las especies podría ser propuesta como indicadora indirecta de algún patrón climático, utilizando para este propósito el material recolectado por una trampa de sedimentos que fue anclada en Cuenca Alfonso, durante enero de 2002 a febrero de 2008. Aunado a esto se analizó material de la zona iluminada correspondiente al periodo de diciembre de 2005 a febrero de 2008 para comparar ambas series y evaluar su similitud, así como establecer las relaciones entre algunos silicoflagelados y las condiciones ambientales.

V.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la variabilidad temporal (estacional-interanual) en el flujo y composición específica de los silicoflagelados entre enero-2002 y febrero-2008 recolectados por una trampa de sedimentos.
- Determinar el grado de similitud entre los silicoflagelados de la zona eufótica y los recolectados por una trampa de sedimentos.
- Evaluar la relación que ejercen las variables físico-químicas sobre los taxones de silicoflagelados en la columna de agua.

V.3 MATERIALES Y MÉTODOS

V.3.1 Tratamiento de las muestras de la trampa de sedimentos

Se utilizó una trampa de sedimentos modelo Technicap PPS3/3 no contaminante (Fig. 2) que estuvo colectando material en hundimiento a 360 m de profundidad en Cuenca Alfonso (24° 35' N y 110° 36' W). El periodo de colecta comprendió de enero de 2002 a febrero de 2008. Se recolectaron 168 muestras con una resolución temporal entre 7 y 17 días. Las muestras colectadas fueron procesadas para hacer preparaciones permanentes, eliminando carbonatos y materia orgánica a través del método de Hasle & Fryxell (1970). Las laminillas permanentes se hicieron con una fracción de la muestra madre, la cual se seco y se impregno de resina Pleurax con alto índice de refracción (IR= 1.65). Posteriormente los silicoflagelados en estas laminillas fueron cuantificados e identificados utilizando un microscopio de contraste de fases marca Zeiss, con los objetivos 20x y 40x ó 100x para detalles poco visibles de los esqueletos de algunos taxones. Los conteos de los esqueletos se realizaron haciendo un barrido en toda la laminilla y se transformaron a flujos (# esqueletos m⁻² día⁻¹) de la siguiente manera:

$y = (\omega \times 10 \times 8) / T$: Donde: y: # esqueletos m⁻² día⁻¹; ω : los esqueletos contados en la fracción de muestra madre, 10: número de veces que fue fraccionada la muestra original, 8: representa la abertura de la trampa (1/8 de m²), t: tiempo de recolecta de cada una de las botellas del carrusel de la trampa.

Análisis de datos

La exploración de los datos generados a partir de la serie de tiempo de los flujos de silicoflagelados de enero de 2002 a febrero de 2008 (Fig. 2), consistió en una evaluación descriptiva de la serie generada de 6 años, en primera instancia observando las variaciones estacionales y a partir de las anomalías estandarizadas de los flujos se establecieron las diferencias interanuales. A través de los promedios por mes de todos los años de observación, se definió un patrón anual de los flujos de estos organismos silíceos, para identificar la variabilidad estacional de los mismos.

Con el propósito de definir patrones de variación en la zona de estudio, se le aplicó un análisis de factores con el método de componentes principales, al flujo total de la serie de tiempo de los silicoflagelados utilizando el software Statistica, para lo cual no se consideró la especie más representativa del Golfo de California que es *O. pulchra*, ya que el propósito fue definir aquellos modos de variación oceanográfica que tienen influencia sobre esta región del Golfo. Asimismo no fueron considerados los taxones menores a 0.5% de flujo total; en tanto que los flujos de *D. epiodon* y *D. speculum* se agruparon por sus afinidades similares por masas de agua fría.

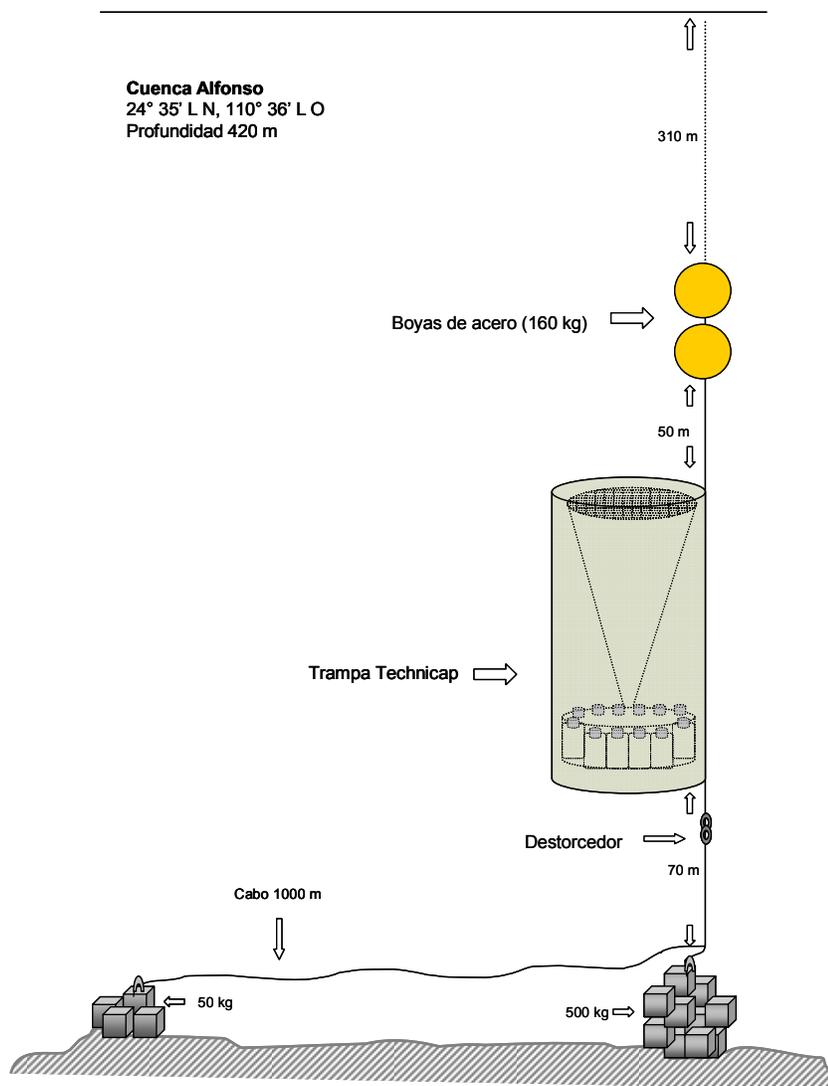


Figura 2. Sistema de anclaje de la trampa de sedimentos instalada en el sitio de la Cuenca Alfonso a 360 m de profundidad.

Se utilizaron índices climáticos de escala interanual y decadal que fueron correlacionados con los patrones de variación derivados de los flujos de los silicoflagelados, los cuales son detallados enseguida: el índice Multivariado de El Niño-La Niña (MEI) el cual es obtenido a partir de 6 variables (presión del nivel mar, componente zonal y meridional del viento, temperatura superficial del mar y del aire y fracción total del cielo cubierta de nubes), los datos se extrajeron de <http://www.esrl.noaa.gov/psd/people/klaus.wolter/MEI/table.html>. El índice de Oscilación del Sur (SOI) corresponde a anomalías de presión del mar entre Tahití y Darwin fueron obtenidas de http://www.cpc.noaa.gov/data/indices/repac_slpa.for. Para el índice de Oscilación del Norte (NOI) (Schwing *et al.*, 2002) los datos fueron recuperados de <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/correlation/noi.data>. Los datos del índice de Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) propuesto por Mantua *et al.* (1997) fueron obtenidos de <http://www.atmos.washington.edu/~mantua/abst.PDO.html>. Se correlacionó también el índice de Oscilación del Giro del Pacífico Norte (NPGO) presentado por Di Lorenzo *et al.* (2009a) y la base de datos disponible es de <http://eros.eas.gatech.edu/npgo/data/NPGO.txt>. La base de datos mensuales de “El Niño Modoki” fue extraída de la siguiente liga de información, http://www.jamstec.go.jp/frcgc/research/d1/iod/modoki_home.html.en. El número de manchas solares fue obtenido de <http://sidc.oma.be/sunspot-data/> y los datos de temperatura superficial del mar (TSM) de 110°W 24.5°N obtenidos de Herrera-Cervantes (2008). Las bases de datos fueron organizadas por mes y se aplicó un análisis de correlación de Spearman, a través del software Statistica versión 7 con el propósito de identificar las probables relaciones entre índices y los patrones de variación de los factores.

V.3.2 Procesamiento de muestras de la columna de agua

Se recolectaron en el sitio de Cuenca Alfonso, muestras mensuales de la zona eufótica a 7 niveles de irradiancia superficial (100, 55, 33, 10, 3, 1 y 0.1%), durante el periodo de diciembre de 2005 a febrero de 2008 (Fig. 2). Las muestras recibieron el mismo tratamiento de limpieza al igual que las de la trampa de sedimentos,

realizándose la identificación y cuantificación de los esqueletos para cada nivel de Eo (irradiancia superficial). Las observaciones se hicieron a través del microscopio de contraste de fases marca Zeiss (20x y 40x) y del microscopio invertido Olympus CK2 (40x).

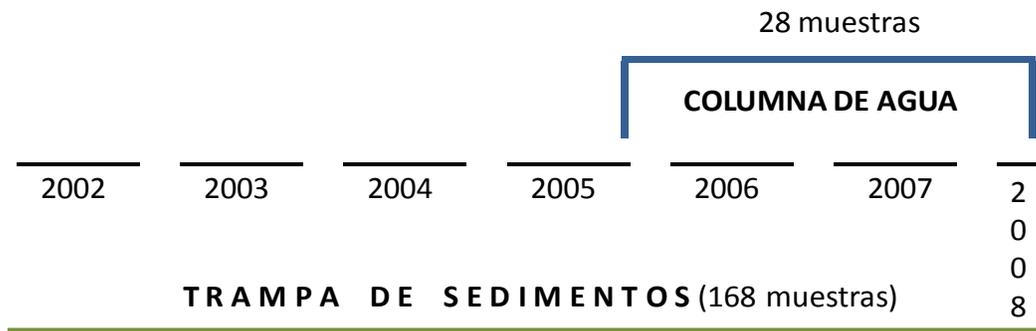


Figura 3. Representación esquemática de los muestreos de la columna de agua y del periodo de recolecta de muestras por la trampa de sedimentos). Serie de tiempo de la trampa de sedimentos (enero 2002/febrero 2008-línea verde) y el periodo correspondiente de la columna de agua (diciembre 2005/febrero 2008-línea azul).

Análisis de datos

Los valores de abundancia fueron estimados como número de células L^{-1} y posteriormente transformados a valores integrados para la zona eufótica (esqueletos m^{-2}), y multiplicado por 24 (correspondiente a las horas de un día) para hacer la estimación por tiempo ($m^{-2} \text{ día}^{-1}$). Esto se realizó con la finalidad de comparar los datos de la columna de agua y de la trampa de sedimentos correspondiente al mismo periodo, mediante un análisis multivariado de clasificación de grupos 1-Pearson r. La matriz de datos de la trampa y de la columna de agua organizada por categorías taxonómicas, fue usada para un análisis de clasificación modo Q después de una transformación de $\text{Log}(x+1)$, apoyados con el software Statistica versión 7.

V.4 RESULTADOS

V.4.1 Variabilidad estacional de los flujos de silicoflagelados en hundimiento

La serie de tiempo de los flujos de los silicoflagelados durante enero de 2002 a febrero de 2008, denotó una gran variabilidad a través del tiempo no sólo en sus magnitudes (Fig. 5), sino en la composición de las especies presentes (Fig.4). El flujo máximo se presentó durante diciembre de 2007 con un valor de 2.4×10^7 esqueletos $m^{-2} \text{ día}^{-1}$ y el flujo mínimo en junio de 2002 con un valor de 1×10^3 esqueletos $m^{-2} \text{ día}^{-1}$. En tanto que el valor promedio a lo largo de toda la serie fue de 1.4×10^5 esqueletos $m^{-2} \text{ día}^{-1}$. No obstante la gran variabilidad observada en la serie de tiempo, algunos incrementos fueron recurrentes entre los años, aunque con diferencias en magnitud y composición de especies. Por ejemplo, durante la primavera fue observado un incremento notable en los flujos de estos organismos para los años 2002, 2004, 2005 y 2007, asimismo para finales de otoño principios de invierno los incrementos en los flujos se observaron repetidamente para los años 2002, 2003, 2004, 2005 y 2007, cabe mencionar que 2006 tiene una menor resolución de muestreo y que el periodo de invierno no exhibió un incremento en comparación del resto de los años. Incrementos recurrentes también se presentaron en septiembre de 2002, 2003 y 2005.

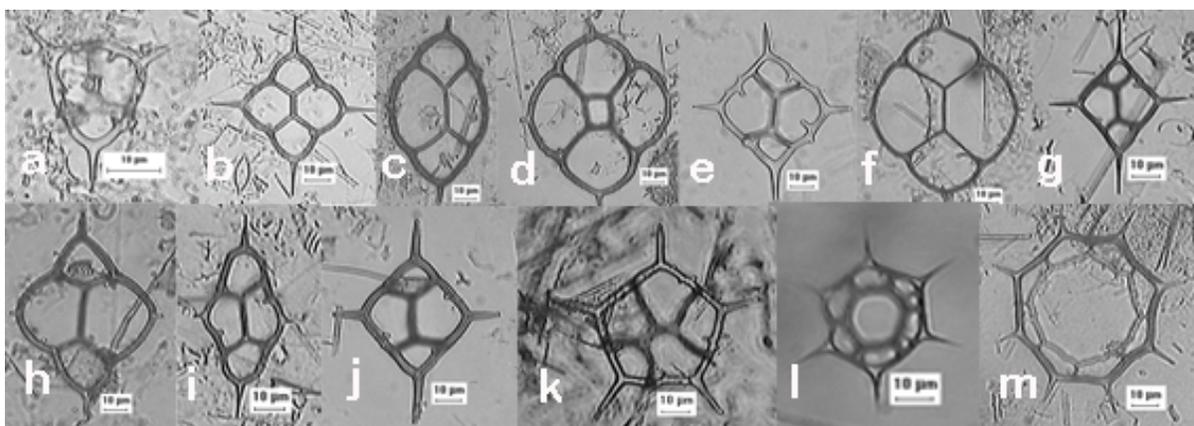


Lámina 1. Taxones de silicoflagelados identificados en la trampa de sedimentos. a) *Corbisema* sp, b) *D. calida*, c) *D. californica*, d) *D. crux*, e) *D. epidon*, f) *D. fibula* var *robusta*, g) *D. messanensis* forma *messanensis*, h) *D. perlaevis*, i) *D. franshepardii*, j) *D. messanensis* forma *spinosa*, k) *D. pentagona*, l) *D. speculum*, m) *O. pulchra*.

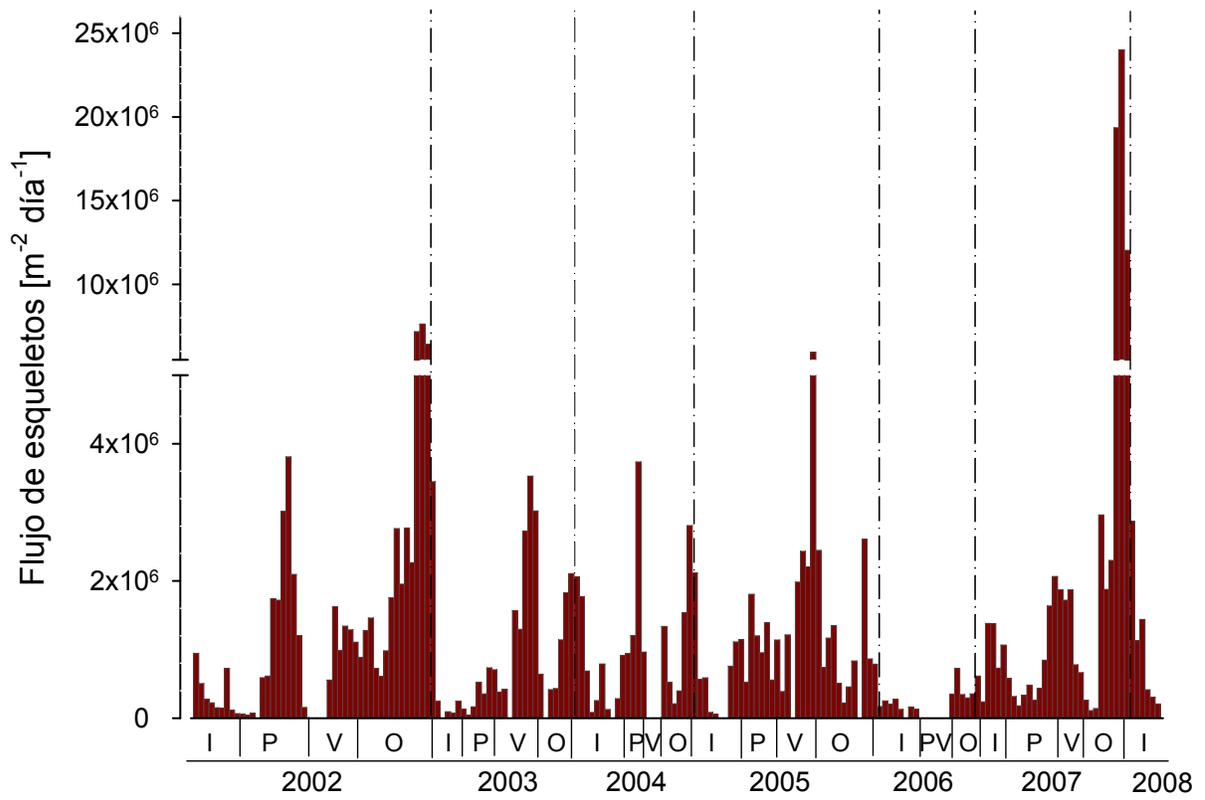


Figura 4. Serie de tiempo de los silicoflagelados capturados a 360 m de profundidad en Cuenca Alfonso, desde enero de 2002 a febrero de 2008.

Un total de 13 especies de silicoflagelados conformaron el flujo vertical de estos organismos en Cuenca Alfonso (Lámina 1) durante el periodo de estudio. La contribución mayor al flujo total fue generada por *Octactis pulchra* fluctuando desde 16% a 100% (Fig. 5) y persistiendo a lo largo de toda la serie, en tanto que *Dictyocha messanensis* forma *spinosa* y *D. messanensis* forma *messanensis* aunque no permanecieron a lo largo de toda la serie de tiempo, sí contribuyeron notablemente al flujo total en alguna parte de la serie, con valores que oscilaron desde 0 % a 82% y 0% a 71% respectivamente (Fig. 5). Otro conjunto de especies, que fluctuaron entre 0 y 50%, fueron *D. calida*, *D. fibula* var *robusta* y *D. epiodon*. En tanto que los silicoflagelados, que contribuyeron con flujos relativamente bajos, es decir, menores al 10%, fueron *Corbisema*, *D. californica*, *D. crux*, *D. perlaevis*, *D. franshepardii*, *D. pentagona* y *D. speculum* (Tabla 1).

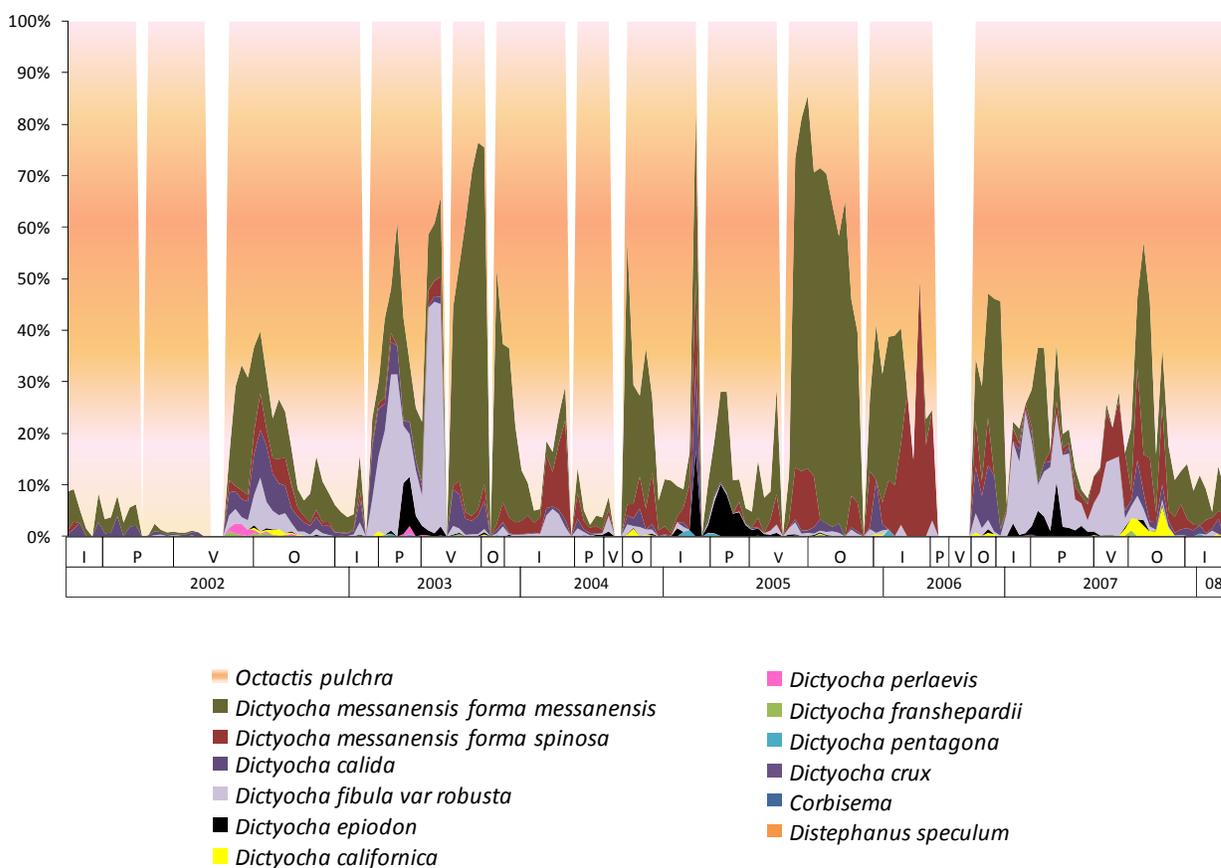


Figura 5. Flujos relativos de los 13 taxones silicoflagelados identificados en la trampa de sedimentos de enero de 2002 a febrero de 2008.

Tabla 1. Contribución al flujo total de los 13 taxones de silicoflagelados. Porcentajes mostrados como intervalos máximos y mínimos.

Silicoflagelados	Intervalo (%)	
	mínimo	máximo
<i>Corbisema</i>	0.0	0.4
<i>Dictyocha calida</i>	0.0	50.0
<i>Dictyocha californica</i>	0.0	6.1
<i>Dictyocha crux</i>	0.0	0.4
<i>Dictyocha epiodon</i>	0.0	10.9
<i>Dictyocha fibula</i> var <i>robusta</i>	0.0	44.9
<i>Dictyocha messanensis</i> forma <i>messanensis</i>	0.0	71.0
<i>Dictyocha perlaevis</i>	0.0	2.1
<i>Dictyocha franshepardii</i>	0.0	1.2
<i>Dictyocha messanensis</i> forma <i>spinosa</i>	0.0	82.0
<i>Dictyocha pentagona</i>	0.0	1.4
<i>Distephanus speculum</i>	0.0	0.3
<i>Octactis pulchra</i>	16.0	100.0

V.4.1.1 Patrón anual

Con la serie de los silicoflagelados desde enero de 2002 a diciembre de 2007 se definió un patrón anual promedio de los flujos con el cual se denotó la variabilidad estacional de estos organismos. Definiéndose tres periodos de incremento, que no variaron en cuanto a la magnitud, sin embargo las diferencias estuvieron en relación a las especies que los conformaron a cada uno de estos: diciembre fue el mayor con un flujo promedio de 5.4×10^6 esqueletos $m^{-2} \text{ día}^{-1}$, seguido por otro durante septiembre de 1.9×10^5 esqueletos $m^{-2} \text{ día}^{-1}$ y un incremento en mayo con valores promedio de 1.5×10^5 esqueletos $m^{-2} \text{ día}^{-1}$ (Fig. 6).

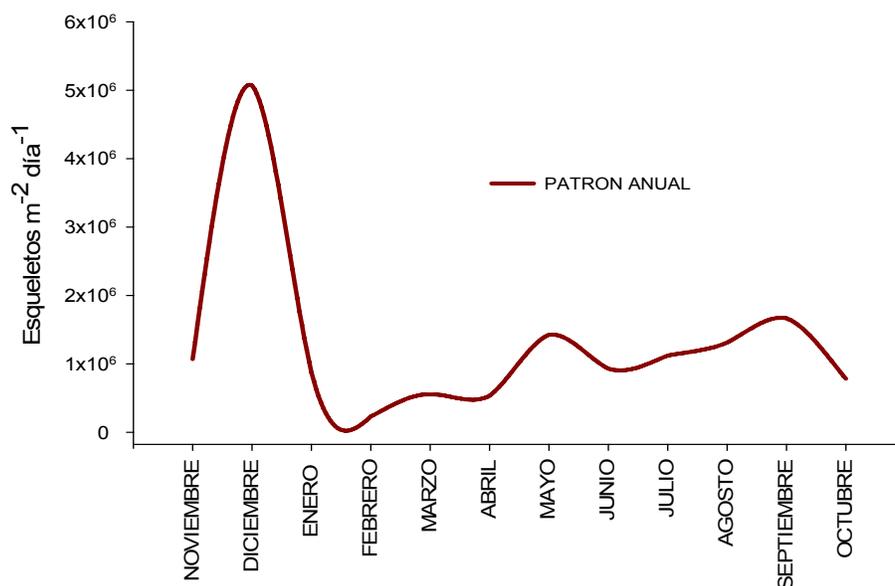


Figura 6. Patrón anual promedio (2002-2008) del flujo total de los silicoflagelados recolectados en Cuenca Alfonso por una trampa de sedimentos.

El incremento de diciembre fue el más prominente con los flujos promedio de (5×10^6 esqueletos $m^{-2} \text{ día}^{-1}$). Un total de 12 taxones de silicoflagelados (*Corbisema* sp, *D. calida*, *D. californica*, *D. epiodon*, *D. fibula* var *robusta*, *D. messanensis* forma *messanensis*, *D. perlaevis*, *D. franshepardii*, *D. messanensis* forma *spinosa*, *D. pentagona*, *D. speculum* y *O. pulchra*) (Fig. 7) formaron parte de este incremento durante los años de muestreo. Sin embargo, la especie que dominó el flujo total fue *O. pulchra* y su mayor aporte lo hizo durante los años 2002 y 2007, mientras que las demás especies presentes sólo contribuyeron con flujos menores a 5×10^6 esqueletos $m^{-2} \text{ día}^{-1}$. De estas especies *D. messanensis* forma *messanensis* resaltó durante 2002, 2003, 2004 y 2006 acompañando a *O. pulchra* (Fig. 7), sin embargo *D. messanensis* forma *spinosa* durante 2007 fue el segundo componente junto con *O. pulchra*. *D. calida* fue un taxón importante para este incremento, durante 2005 y 2007 con los flujos más altos de 60×10^3 esqueletos $m^{-2} \text{ día}^{-1}$. No obstante en 2002 también figuró como el tercer taxón más importante después de *D. messanensis* forma *messanensis* y el resto de los años su contribución fue relativamente baja. Con respecto a *D. fibula* var *robusta* en los primeros periodos de este incremento, sus

flujos fueron relativamente bajos en comparación a los que presentó en 2005, cuando incrementó significativamente, así como en 2007.

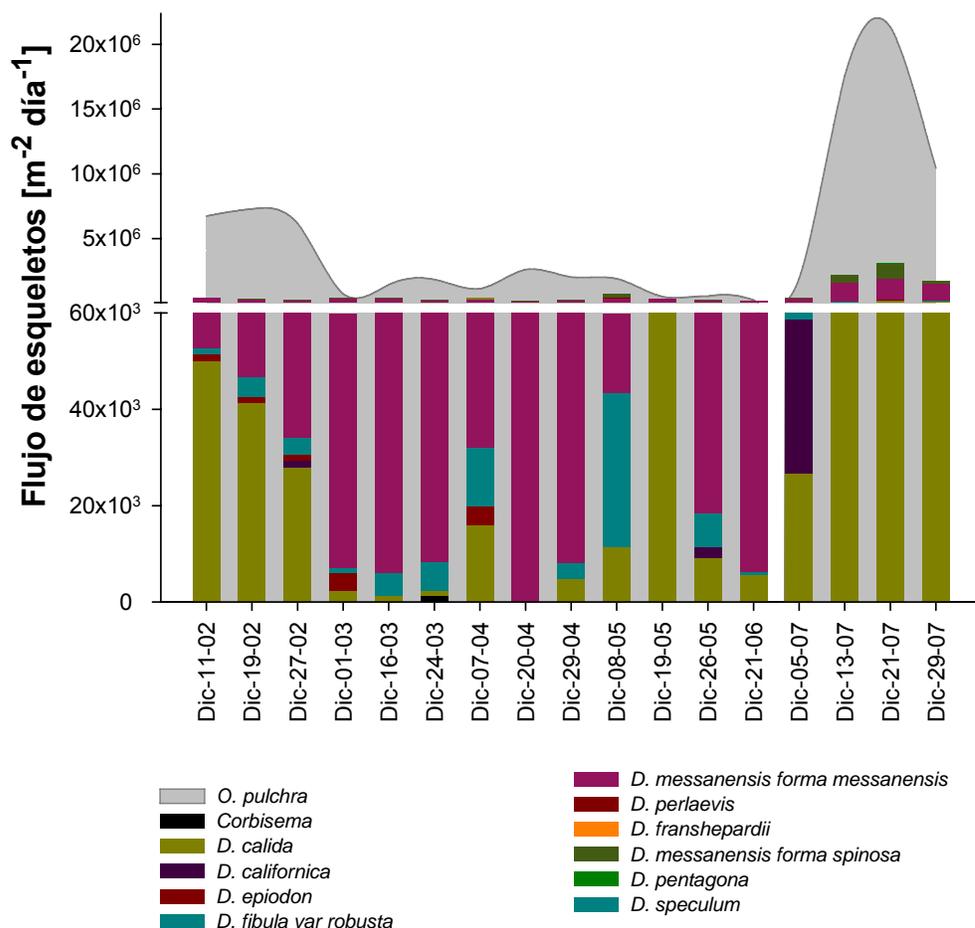


Figura 7. La gráfica de áreas representa a *O. pulchra* el taxón más abundante del flujo total y en barras de colores se simboliza el resto de taxones (12) que contribuyeron a los incrementos observados en diciembre de cada año (2002-2007).

En segundo orden de magnitud se presentó un incremento durante septiembre, el cual estuvo definido por 12 taxones, de los cuales *D. messanensis* forma *spinosa* y *D. messanensis* forma *messanensis* contribuyeron de manera significativa al flujo durante este periodo, mientras que el resto de las especies (*D. pentagona*, *D. calida*, *D. franshepardii*, *D. perlaevis*, *D. fibula var robusta*, *D. epidodon*,

D. crux y *Corbisema* sp), conformaron sólo una pequeña parte del flujo con valores menores a 1×10^6 esqueletos $m^{-2} \text{ día}^{-1}$ (Fig. 8), a excepción de *O. pulchra*. La presencia de estos 8 taxones durante este periodo distinguió este incremento ya que la contribución al flujo de cada una de estas especies fue mayor en comparación a los incrementos observados en diciembre y mayo. *D. messanensis* forma *messanensis* incremento sus flujos durante septiembre de 2003 y 2005 reemplazando a la especie dominante de todo el flujo (*O. pulchra*). Sin embargo, en septiembre 2007 fue *D. messanensis* forma *spinosa* quien incrementó sus flujos, reemplazando a *D. messanensis* forma *messanensis* (Fig. 8).

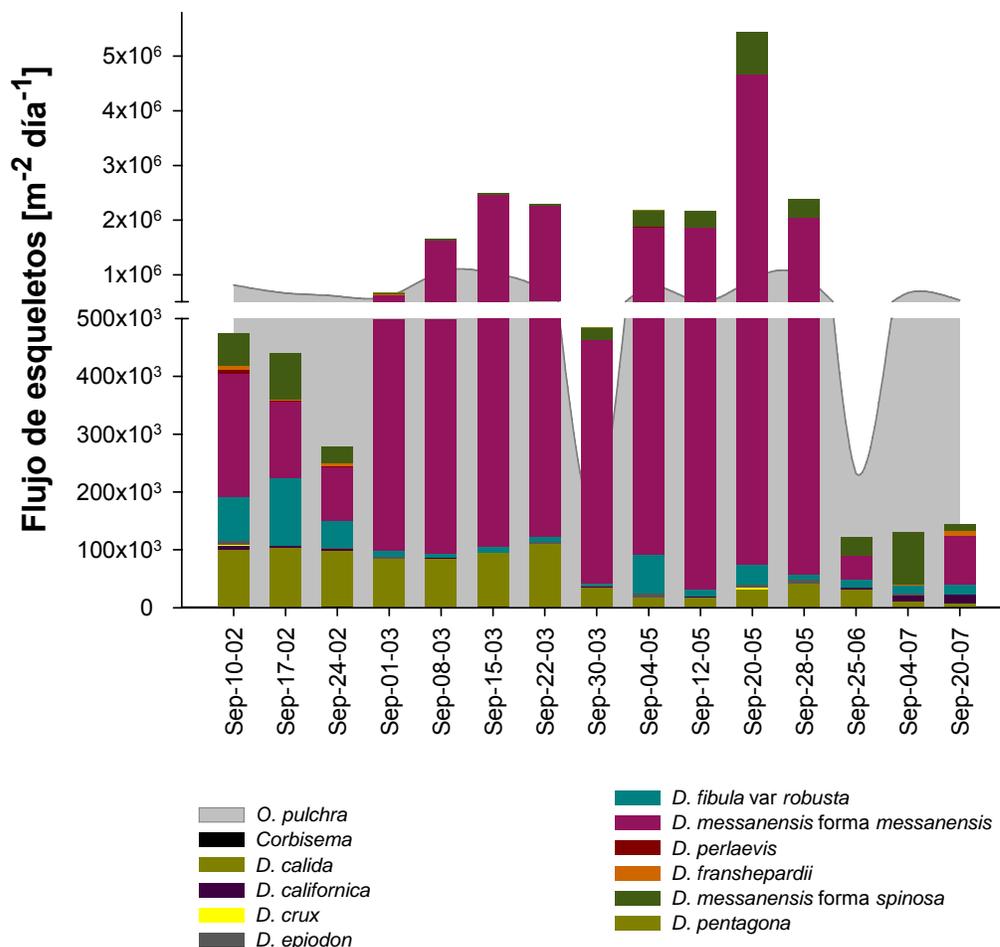


Figura 8. La gráfica de áreas representa a *O. pulchra* el taxón más abundante del flujo total y en barras de colores se simboliza el resto de taxones (12) que contribuyeron a los incrementos observados en septiembre de cada año (2002-2007).

La contribución de *D. calida* y *D. fibula var robusta* también fue significativa en este periodo de verano puesto que los flujos fueron constantes durante la serie de tiempo analizada. En este periodo resaltaron algunos taxones que no habían sido evidenciados de manera constantes en los otros incrementos, tal es el caso de *D. franshepardii* que en este periodo aparece de manera más constante y principalmente en 2002. Asimismo, *D. californica* se mantuvo de manera regular aportando sus flujos a este incremento.

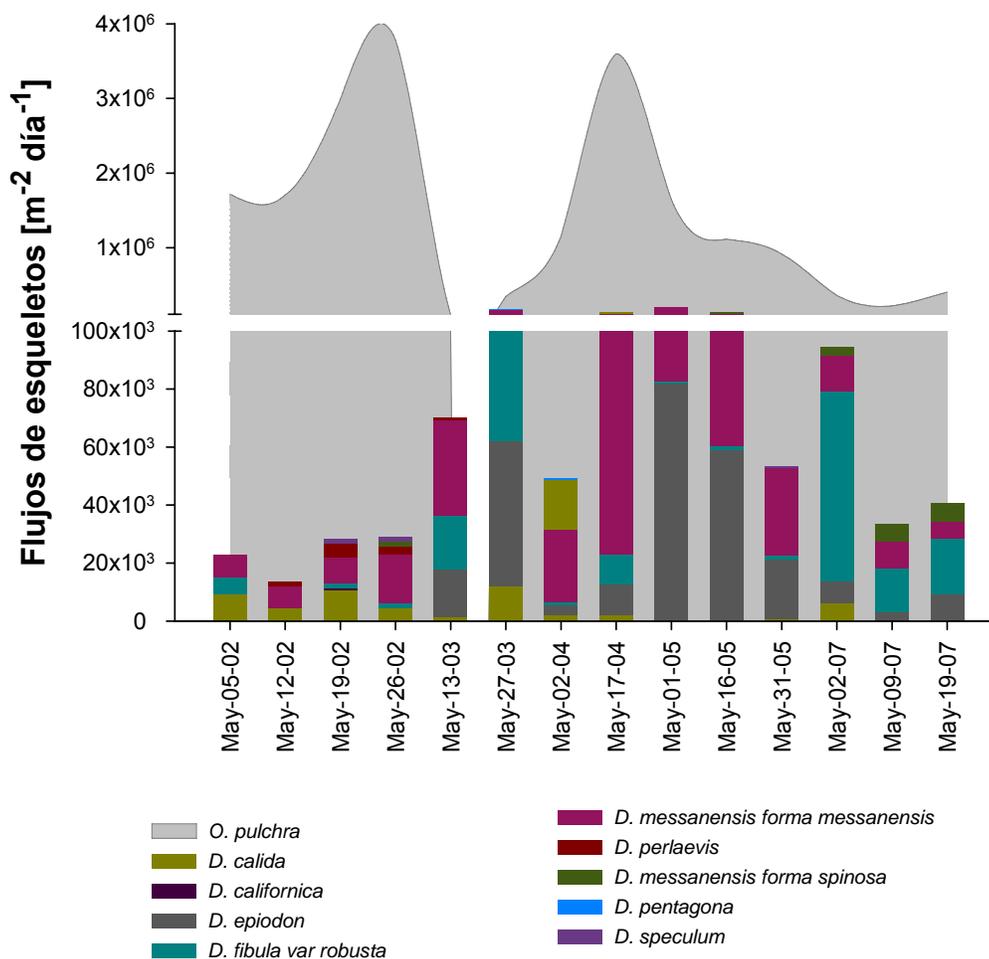


Figura 9. La gráfica de áreas representa a *O. pulchra* el taxón más abundante del flujo total y en barras de colores se simboliza el resto de taxones (10) que contribuyeron a los incrementos observados en mayo de cada año (2002-2007).

Un incremento de menor magnitud que los anteriores se observó en mayo y la presencia de 10 taxones definieron el flujo (Fig. 9). *O. pulchra* conformó de nuevo casi todo el flujo total para este lapso de tiempo. Sin embargo, la presencia de otros taxones también fue fundamental para observar este incremento. Por su parte *D. messanensis* forma *messanensis* fue el segundo componente que acompañó a *O. pulchra*, sin embargo el incremento en los flujos durante mayo de 2007 de *D. fibula* var *robusta* substituyeron a este taxón (Fig. 9). Particularmente *D. epiodon* se distinguió en este mes en 2005 ya que en los anteriores su presencia fue casi nula, el incremento de sus flujos hasta de 1.2×10^5 esqueletos $m^{-2} \text{ día}^{-1}$ fue substancial.

V.4.1.2 Variabilidad interanual

Las anomalías estandarizadas del flujo total mostraron rangos de 2.9 a -2.8, que denota la variabilidad interanual en los flujos de los silicoflagelados durante este lapso (Fig. 10). Todos los años mostraron anomalías positivas y negativas a excepción de 2006, que mostró sólo anomalías negativas, aunque cabe aclarar que para este año únicamente se contó con un periodo de 6 meses de observaciones de la trampa. Resaltan notablemente los años 2002 y 2007 con anomalías positivas por periodos considerables dentro del ciclo anual para cada uno.

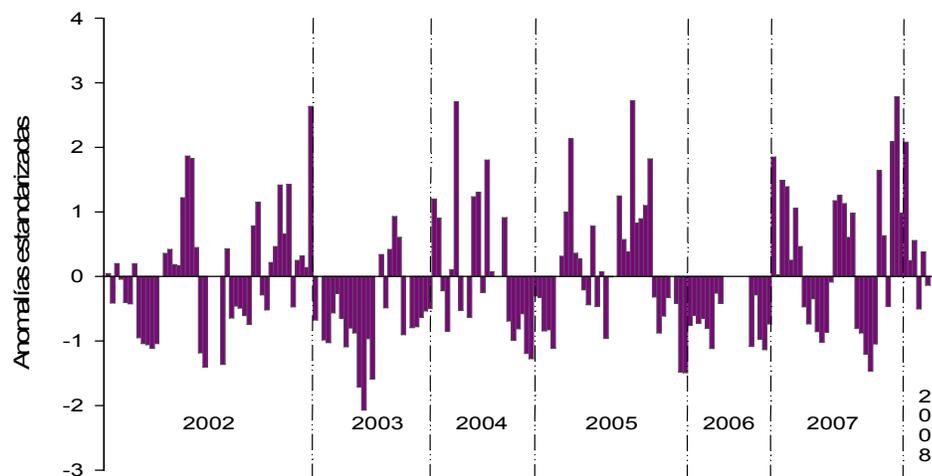


Figura 10. Anomalías estandarizadas del flujo total de silicoflagelados desde enero de 2002 a febrero de 2008.

V.4.1.3 Patrones de variación interanual

A través de un análisis de factores se obtuvieron 3 factores que explican el 56.3% de la varianza total de los datos (Tabla 2). Estos factores definieron tres patrones de variación con base en los datos de los flujos de los silicoflagelados. Con base en la ecología de las especies y en las relaciones con índices climáticos se interpretaron cada uno de los patrones extraídos.

Tabla 2. Resultados del análisis de factores donde se observan los valores propios de los primeros tres factores y la variabilidad explicada por cada uno.

Factores	Valores propios	% Varianza total	Valores propios acumulados	% Varianza total acumulada
1	15.6	21.6	15.6	21.6
2	13.5	18.3	29.5	39.9
3	12.2	16.5	41.8	56.3

1) Factor “Subtropical Oceánico”

Este factor explicó el 21.6 % de la varianza de los datos. Las cargas del factor al inicio de la serie tienden a ser negativas sin embargo comienzan a incrementarse a partir de 2003 y posteriormente en 2005 y ligeramente en 2007 (Fig. 11). La especie que caracterizó este factor fue *D. messanensis* forma *messanensis*, con un valor del factor de 2.08 (Fig. 12a).

2) Factor “Eventos fríos”

La incidencia de aguas frías en el sitio quedó manifestada a través del segundo factor el cual explicó el 18.3 % de la varianza de los datos. Los taxones dominantes de este factor fueron *D. epiodon* más *D. speculum*, y *D. pentagona* con valores del factor de 1.03 y 1.17, respectivamente (Fig. 12 b, c), los cuales tienen afinidades por cuerpos de agua fríos específicamente del Pacífico Norte. Este factor es más conspicuo de 2003 a 2005, decreciendo posteriormente (Fig. 11).

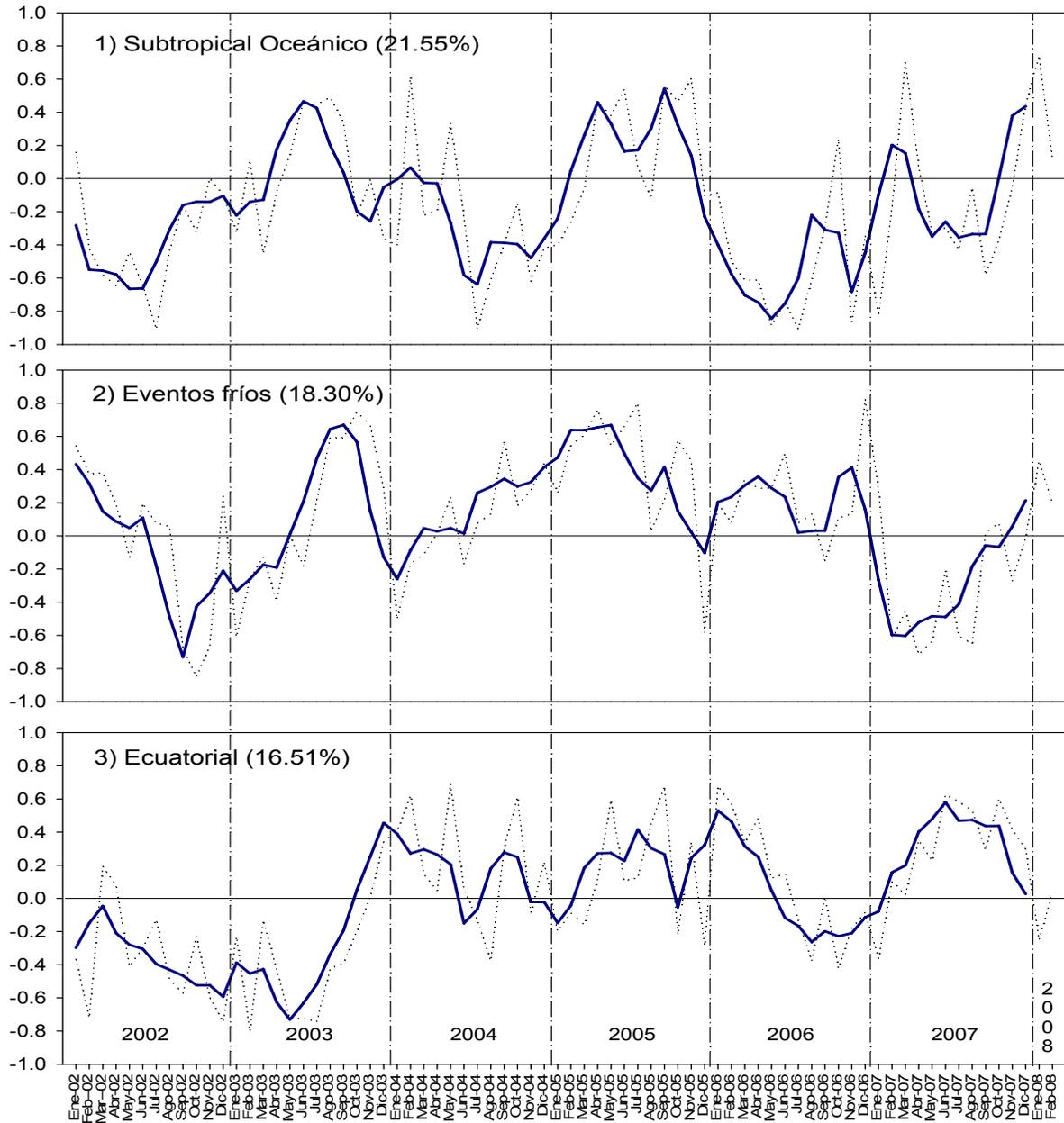


Figura 11. Patrones de variabilidad de los flujos de los silicoflagelados, representados en 3 factores. La línea azul continua es un promedio móvil de 3 puntos que fue aplicado a la serie original de cada factor. La línea discontinua son los datos originales de cada factor.

3) Factor “Ecuatorial”

Este factor quedó definido con el 16.5 % de la varianza explicada de los datos. Esta condición no se manifestó positivamente en el sitio, sin embargo para los años posteriores y hasta el final de la serie de tiempo, las cargas del factor tendieron a

incrementarse de manera constante (Fig. 11). *D. messanensis* forma *spinosa* con un valor del factor de 1.78 definió este patrón de variabilidad en el sitio (Fig. 12d). Puesto que este taxón representa un indicador de condiciones ecuatoriales.

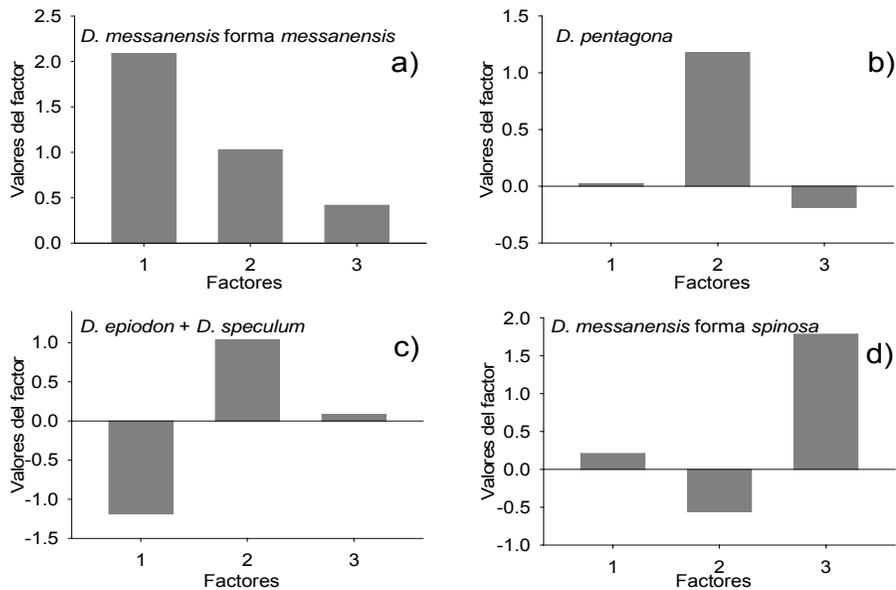


Figura 12. Valores de los factores de las especies. Factor 1 a) *D. messanensis* forma *messanensis* (2.08), Factor 2 b) *D. pentagona* (1.17) y *D. epiodon* + *D. speculum* (1.03); Factor 3 d) *D. messanensis* forma *spinosa* (1.78).

V.4.2 Validación de la trampa de sedimentos a través de la columna de agua

A través de la comparación de muestras mensuales de la columna de agua (CA), correspondientes al periodo de diciembre de 2005 a febrero de 2008 con muestras del mismo periodo de la trampa de sedimentos (TS), se definió un 97.5 % de similitud entre ambas series, variando en promedio 3.5 semanas aproximadamente la señal de producción de silicoflagelados desde la zona eufótica hasta llegar a una profundidad de 360 m. De 4 a 7 semanas fue el mayor retraso entre los eventos de producción de silicoflagelados en la zona eufótica y su registro en la trampa de sedimentos así lo demostraron las semejanzas entre muestras de diciembre de 2005 de la CA y diciembre de ese mismo año y enero de 2006 de la TS.

Sin embargo otros periodos señalan que el tiempo de retraso puede variar entre 1 y 3 semanas, interpretación que se explica por muestras de CA de 06 de julio de 2007 y julio 12-26 de 2007 de la TS, así como lo demuestran también las semejanzas de abril y febrero de 2007 de CA y las muestras de la TS para esos mismos meses. (Fig. 13).

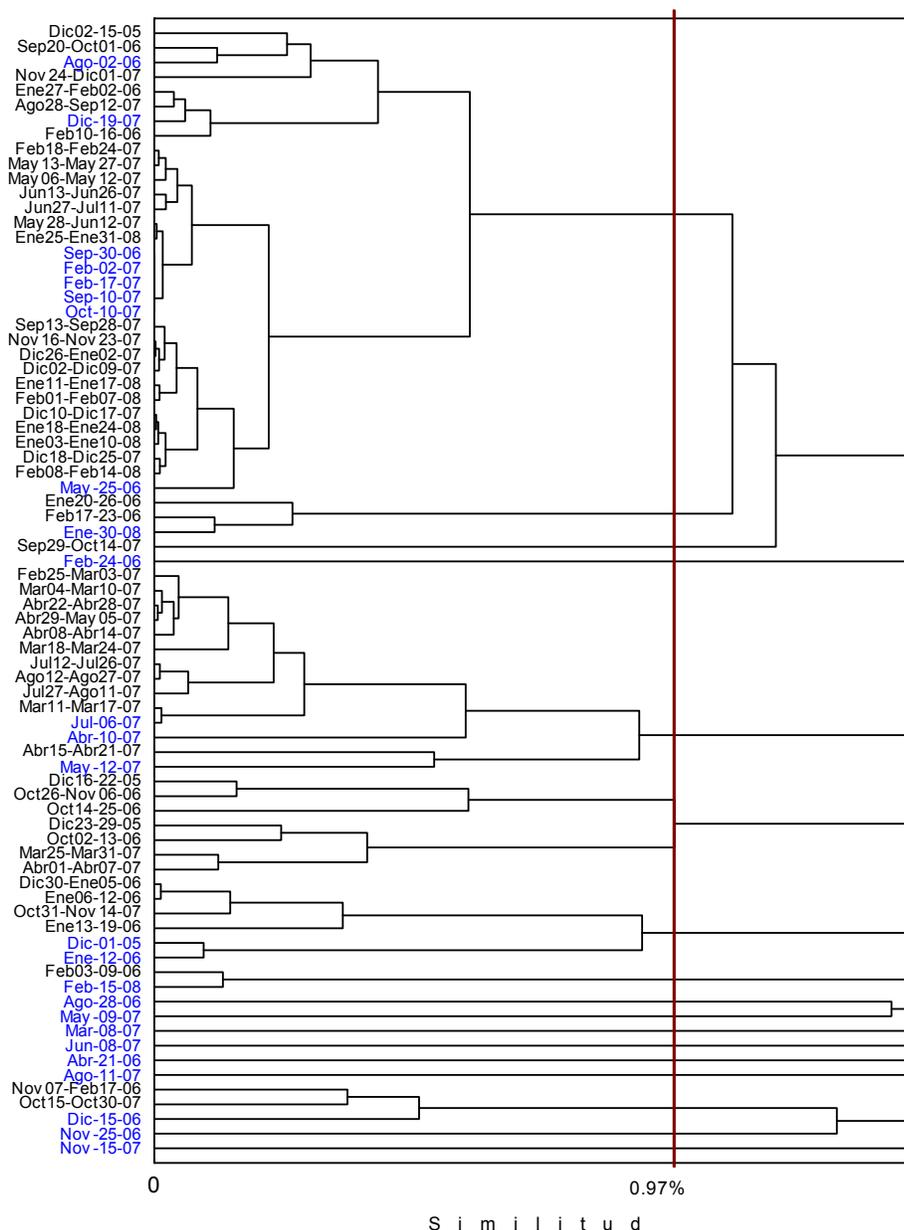


Figura 13. Análisis de similitud de 59 muestras de la trampa de sedimentos y 25 de la columna de agua. Se realizó un corte a un 97% de similitud. Las etiquetas de color representan las muestras de la columna de agua (CA) y el resto lo conforman las muestras de la trampa de sedimentos.

Estas analogías se confirmaron aun más a través del ciclo anual promedio extraído (Fig. 14), en el cual se observó una correspondencia en los periodos de crecimiento. Durante diciembre la producción en la zona iluminada estuvo favorecida por los incrementos de los taxones *O. pulchra* y *D. messanensis* forma *messanensis* y esta señal quedó manifestada en el material colectado por la trampa de sedimentos durante ese mismo periodo. En tanto el periodo de marzo estuvo dominado por incrementos de *O. pulchra* (con anillos robustos mayores de 30 μm) y *D. fibula* var *robusta*, que se vieron reflejados en la trampa de sedimentos también. Finalmente el incremento observado en julio representa principalmente la producción de taxones que poseen un anillo bien silicificado como *D. fibula* var *robusta*, *D. messanensis* forma *spinosa* y *O. pulchra*, los cuales fueron los más abundantes durante este periodo en la columna de agua y en la trampa de sedimentos donde permaneció preservada su señal.

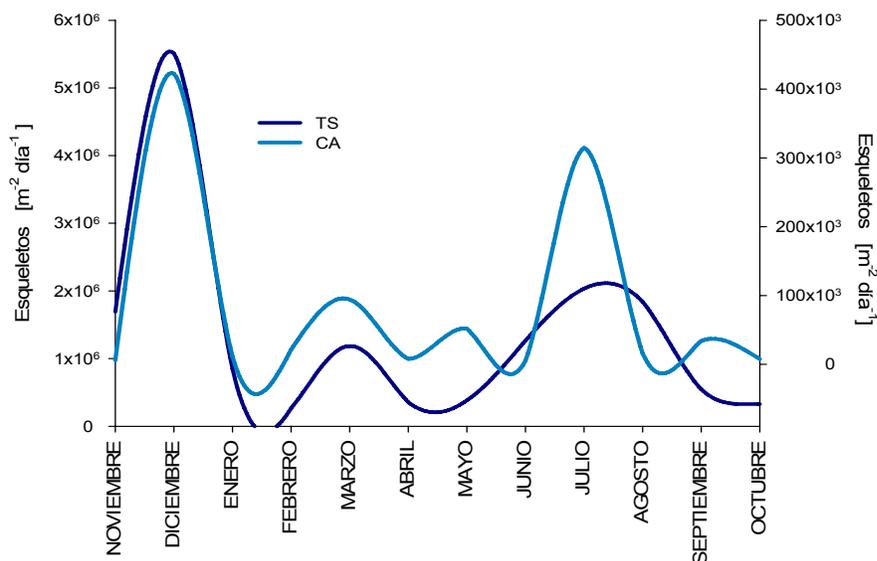


Figura 14. Ciclo anual promedio (diciembre-2005/febrero-2008). El eje izquierdo corresponde a los valores de la trampa de sedimentos (TS) y el eje derecho a la columna de agua (CA).

VI CAPÍTULO 2: CAMBIOS CLIMÁTICOS DECADALES (1845-2008)

VI.1 INTRODUCCIÓN CAPÍTULO 2

Aunque los mecanismos que desencadenan los cambios en la atmósfera aún son desconocidos, se sabe que tienen repercusión dentro del océano tornando a este componente como un detonador de cambio climático, en este sentido la Cuenca del Pacífico Norte ha mostrado tener una buena conexión con el sistema atmosférico (Glen & Rosly, 2005). En el Pacífico Norte estos cambios han sido muy documentados en la escala de tiempo decadal, ya que la información disponible está sustentada sobre registros instrumentales, de donde han derivado diversas series de tiempo del clima (Glantz, 1997).

Sin embargo, la retrospección a través de estas bases de datos instrumentales sólo tiene un alcance de 100 años aproximadamente, por lo que una opción para documentar los cambios en el clima de periodos anteriores, son los registros naturales donde queda preservada la señal climática constituyendo la base para documentar el clima pasado. A partir de estos registros naturales y en especial los sedimentos laminados, se ha venido aportando gran conocimiento sobre los cambios climáticos ocurridos en diferentes escalas de tiempo (Kemp, 1995). El interés generado a partir de estas series ha sido el probar la utilidad de alguno de los elementos conservados en el registro sedimentario como indicadores indirectos o *proxy* del clima corroborando su correlación con datos instrumentales de los últimos 100 años (Mann, 2006).

Los sedimentos laminados son registros geológicos naturales que brindan una resolución temporal de alta resolución, es decir interanual/decadal. Sin embargo, también está implícita la variabilidad climática de largo plazo dentro de estos (Baumgartner *et al.*, 1989; Kemp, 1995), lo que permite documentar los mecanismos y cambios climáticos entre el continente, el océano y la atmósfera (Kemp, 1995). Su distribución incluye algunas regiones con características particulares, como poseer una alta producción biológica y condiciones disóxicas o anóxicas del agua que está en contacto con el sedimento, lo cual inhibe el desarrollo de comunidades bentónicas, evitando la bioturbación (Baumgartner *et al.*, 1989). En la región del Pacífico nororiental algunas de las cuencas reconocidas por presentar este tipo de

sedimentación son la Cuenca de Santa Bárbara en California y Cuenca San Lázaro en Baja California (Soutar & Issacs, 1974), las cuencas de Guaymas y del Carmen (Leclerc & Schrader, 1987), la Cuenca de La Paz (Bernal-Franco, 2001), la Cuenca Alfonso (Pérez-Cruz, 2000) y la Cuenca Pescadero (Barron & Bukry, 2007) en el Golfo de California. Cada sitio tiene un ciclo de depositación diferencial particular en el cual se forman las dos láminas que los conforman (una clara y una oscura). De acuerdo con Baumgartner *et al.* (1991), para la Cuenca de Guaymas, un par de láminas representa un año de depositación, y a este paquete de láminas se le denomina “varva”. La lámina clara representa la producción de ópalo biogénico asociada con el periodo de surgencias de invierno y primavera y la oscura representa el aporte terrígeno asociado con tormentas de polvo entre verano y otoño. Otros sitios tienen un ciclo de sedimentación diferente como es el caso de Cuenca Alfonso, donde aún está en discusión el periodo de tiempo en el cual se construyen dos láminas. La propuesta de Molina-Cruz *et al.* (2002), menciona que el par de láminas se construye en un periodo de 11.2 años, a esta periodicidad le atribuyeron la relación con el ciclo de manchas solares.

Otro aspecto que difiere de una cuenca a otra, es el mecanismo de formación de la lámina oscura, para la Cuenca de Guaymas se ha propuesto que el aporte terrígeno vía eólica es el mecanismo principal (Baumgartner *et al.*, 1991). Mientras que para Cuenca Alfonso, aunque se reconoce que es morfológica y oceanográficamente similar a la cuenca de Guaymas, en que virtualmente no existe oxígeno disuelto en las aguas del fondo (Álvarez-Borrego & Lara-Lara, 1991), no presenta claramente la formación de láminas en el sedimento y los mecanismos que regulan su formación no están clarificados del todo (De Diego & Douglas, 1999). Algunos autores han mencionado que un mecanismo que regula el ciclo sedimentario, podrían ser las escorrentías pluviales durante el verano (Douglas *et al.*, 2001; González-Yajimovich *et al.*, 2005), asociadas con los periodos de El Niño, ya que es cuando se producen fuertes precipitaciones pluviales (Pérez-Cruz, 2006). Recientemente Pérez-Cruz & Urrutia-Fucugauchi (2010) proponen que la secuencia de las laminaciones responden además del evento del ENSO, a la migración latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical y en la escala temporal de largo

plazo a los factores tectónicos. En cualquiera de los casos mencionados, los ciclos de sedimentación conservados en los sedimentos laminados de las cuencas oceánicas, son utilizados para hacer reconstrucciones paleoceanográficas a través de los elementos (*proxies*) conservados en ellos, como es el caso de diferentes especies planctónicas que han sido consideradas buenas indicadoras de cambio climático en el ambiente marino, o en eventos importantes como el fenómeno El Niño. Esto sustentado sobre las evidencias, aportadas por series de tiempo largas de observaciones del plancton (Hays *et al.*, 2005). Uno de los grupos que revela información en este sentido son los silicoflagelados, ya que estos organismos que viven en la zona iluminada del océano, responden de manera rápida a los cambios climáticos, además de otras particularidades que poseen, como es el caso de su esqueleto silicificado (Thronsen, 1997), lo que les confiere una mayor velocidad de hundimiento hacia el fondo marino (Osawa *et al.*, 2005), permitiéndoles evitar en algún grado la disolución y ser conservados en el registro sedimentario. No obstante que su esqueleto les ayuda a hundirse, su tasa de sedimentación de alrededor de 1.4 m día^{-1} no es suficientemente alta como para evitar la disolución en áreas profundas, por lo que los agregados han sido propuestos como el mecanismo más probable para su hundimiento (Takahashi, 1991). De esta forma, la variabilidad en la magnitud de sus flujos y especies son una evidencia de las condiciones climáticas que imperaron en periodos pasados (McCartney, 1993).

Dentro del Golfo de California, la mayoría de los estudios de reconstrucciones climáticas sustentadas sobre los silicoflagelados, se han concentrado en la Cuenca de Guaymas. Estos estudios paleoceanográficos, han abordado diferentes tópicos que han contribuido a reconocer las condiciones paleoclimáticas que han afectado esta región. A finales de la década de los 50's Van Andel (1964), comenzó a estudiar los sedimentos superficiales de la Cuenca de Guaymas, y a partir de ahí se generaron nuevos trabajos sedimentológicos, principalmente sobre el periodo del Holoceno (González-Yajimovich *et al.*, 2005). Los trabajos que existen están restringidos a la región central (Cuenca de Guaymas). Estos estudios involucran diferentes componentes biológicos, como las diatomeas y los silicoflagelados que

han quedado preservados en los sedimentos y evidencian que estos últimos han sido útiles, para entender condiciones oceanográficas pasadas del Golfo de California.

Barron *et al.* (2004) quienes han trabajado con una serie de tiempo extensa (15 000 años) en la Cuenca de Guaymas, identificaron varios periodos a través de los silicoflagelados, señalando que desde mediados del Holoceno al reciente, las condiciones en el sitio fueron frías asociadas con un enfriamiento en la temperatura superficial del mar y cambios en la circulación atmosférica, resultando en una intensificación de los vientos del noroeste, incrementos en el sílice biogénico y la permanencia de especies de silicoflagelados que habitan estas condiciones. Mientras que a partir de $2.8-3.8 \times 10^3$ años aproximadamente, se observó una mayor frecuencia de los ciclos del ENSO (2.8 y 2.4×10^3 años aproximadamente), asociado a un incremento en la extensión de sílice biogénico (manifestado con los incrementos de *O. pulchra*), así como Fe, Al y Ti (*proxy* indicadores de entrada terrígena).

Leclerc & Schrader (1987), a través de la señal isotópica del sílice ($\delta_{18}O$) de los esqueletos de los silicoflagelados, reconstruyeron las temperaturas de los últimos 3000 años, definiendo que el golfo inició un periodo de menor intensidad de surgencias a partir de finales del siglo XIX. En tanto que Barron & Bukry (2007), con un registro sedimentario de los últimos 2000 años, compararon en un transecto de norte a sur, tres núcleos de las cuencas Guaymas, Carmen y Pescadero. En este estudio observaron coincidencias durante el periodo de la Anomalía Climática Medieval entre la cuenca del norte y la del sur (Guaymas y Pescadero) en cuanto a la presencia de dos periodos reducidos de producción, asociándolo fuertemente con la variabilidad solar. Coincidentemente los últimos 200 años también sugieren una reducción en la productividad e incremento en la temperatura superficial del mar, sin embargo para la cuenca central (Carmen) los resultados fueron diferentes notándose un incremento en las diatomeas y silicoflagelados.

Por su parte Schrader & Baumgartner (1983), hicieron interpretaciones decadales de los últimos 500 años, y reconocen que los cambios en las poblaciones de los silicoflagelados, pueden ser utilizados para interpretar las variaciones de productividad causada por las surgencias que se dan en la zona. Una asociación de *O. pulchra* (indicadora de ambientes productivos) con diatomeas sostiene esta

interpretación, en tanto que otra asociación entre dinoflagelados y una alta abundancia de *Dictyocha messanensis* forma *messanensis* sugiere una menor productividad. Asimismo, un incremento en las abundancias de especies de condiciones cálidas (*D. calida*, *Dictyocha californica*, *Dictyocha fibula* var *robusta* y *Dictyocha franshepardii*) suponen una relación con el evento de “El Niño”.

En particular para la Cuenca Alfonso no existen trabajos paleoceanográficos utilizando a los silicoflagelados. Sin embargo, existen algunos estudios en relación a otros componentes que sostienen diversas interpretaciones para este sitio. González-Yajimovich *et al.* (2005), trabajando con carbonatos en todo el periodo del Holoceno, definió tres periodos de productividad para el sitio de Cuenca Alfonso, dos periodos de alta productividad y uno de baja productividad. Este último periodo que es 4200 años atrás hasta el presente, señala una asimetría de productividad, con un decremento del Este hacia el Oeste. Posteriormente en conjunto con este autor, Douglas *et al.* (2007) proponen que la producción primaria que se da en el lado suroccidental del golfo, no es propia de la zona sino que más bien, es derivada de la producción biogénica que se da por efecto de las surgencias del lado continental (es decir, en lado oriental) y que es advectada por los procesos de mesoescala, como los giros que ahí se presentan.

Posteriormente Pérez-Cruz (2006), con base en la asociación de radiolarios depositados en los sedimentos, encontró que esta región ha sufrido dos cambios oceanográficos mayores y otros de corta duración durante los últimos 8,000 años; uno de condiciones más cálidas y secas (desde 7700 a 2500 años aproximadamente antes del presente) con incursión de manera constante de Agua Superficial Ecuatorial (ASE) desde finales del Holoceno y otro periodo de condiciones áridas e intensa evaporación, lo cual propicio la formación del Agua del Golfo de California (AGC).

En cuanto a los silicoflagelados, existe sólo un antecedente de investigación, en donde se utilizó una trampa de sedimentos para coleccionar sus esqueletos. En este estudio, se evidenció la mezcla de condiciones frías (ingreso de agua de la Corriente de California) y cálidas (el fenómeno océano-atmosférico “El Niño”), que ocurrieron

simultáneamente desde agosto de 2002 hasta diciembre de 2003, en la región sur del Golfo de California (Álvarez-Gómez, 2007).

A la fecha no existe duda del valor de la información paleoecológica que ha sido generada a través del estudio de estos organismos, sobre todo para la cuenca de Guaymas. Sin embargo, es necesario reconocer que la composición de las asociaciones de silicoflagelados que entran al registro sedimentario, es un registro modificado por diferentes mecanismos de transporte, así como por la ruptura durante la sedimentación, disolución selectiva, transporte lateral, resuspensión y bioturbación. Algunos detalles importantes sobre los mecanismos de transferencia de los silicoflagelados desde la zona eufótica hacia el sedimento, son poco conocidos en la región sur del Golfo de California lo que justifica que se continúen estudiando en esta región. Para esta investigación se plantea, utilizar el material colectado con una trampa de sedimentos desde enero de 2002 a febrero de 2008 (6 años y dos meses) para evaluar la fidelidad con la cual los silicoflagelados forman parte del registro sedimentario. La información procedente del material capturado por la trampa representa un paso intermedio en la formación del registro de microfósiles, lo que permitirá una correcta interpretación del mismo. Su validación sustentará la utilización de los silicoflagelados como indicadores indirectos o “*proxy*”, de los cambios climáticos de los últimos 60 años aproximadamente.

VI.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir un marco geocronológico de los sedimentos laminados de los núcleos utilizados en este estudio
- Establecer el ciclo de depositación, en la formación del par de láminas
- Definir las asociaciones de silicoflagelados e identificar si pueden ser relacionadas con cambios climáticos a diferentes escalas temporales, utilizando métodos estadísticos y criterios ecológicos basados en la literatura existente

VI.3 MATERIALES Y MÉTODOS

VI.3.1 Recolecta del núcleo de sedimentos

A través de un nucleador de caja Reinek (el cual permite extraer el sedimento superficial sin perturbarlo) se recolectó un núcleo de sedimentos en agosto de 2008 en el sitio de Cuenca Alfonso entre las coordenadas $24^{\circ} 41' 89.75''\text{N}$ y $110^{\circ} 33' 43.21''\text{O}$, a bordo del buque oceanográfico “El Puma”, mismo sitio donde estuvo colectando la trampa de sedimentos. En cubierta, se obtuvo una submuestra utilizando una camisa de acrílico de 3 mm de espesor, el núcleo quedó bajo resguardo en un cuarto de enfriamiento a 4°C perteneciente a la Nucleoteca II del Programa Universitario de Perforaciones en Océanos y Continentes, del Instituto de Geofísica y Paleomagnetismo (UNAM), para su posterior procesamiento.

VI.3.2 Procesamiento del registro sedimentario

Para hacer más fácil el manejo del núcleo recuperado de 39.8 cm de longitud, éste fue dividido en dos piezas, por medio de una cuerda metálica haciendo un corte transversal, una de 17.7 cm y otra de 22.1 cm, etiquetadas con el código C44-A y C44-B respectivamente (Lámina 2). De cada una de las piezas se extrajeron cuatro lozas de 2 cm y una de 0.5 cm asignando a cada una de éstas un propósito particular, de las cuales una se resguardó como acervo de laboratorio. Adicionalmente se tomaron pequeñas muestras y se prepararon frotis de algunas láminas claras y oscuras, con la finalidad de detallar la estratigrafía del núcleo de sedimentos.

Posteriormente y con el propósito de establecer la cronología del núcleo se siguieron las siguientes estrategias en dos de las cuatro lozas:

1) Fechado por conteo de láminas

El fechado por conteo de láminas consistió en tomar una mamografía por medio del equipo Senografo 800T con un tiempo de exposición de 30Kv 45 MA/s, a la loza dispuesta para tal propósito. Adicional se realizó un positivo (fotografía) a la

mamografía. A partir de la mamografía se editaron varias imágenes con el software Image J, con la finalidad de contrastar aún más los detalles entre láminas claras y oscuras de la loza, de estas imágenes se diseñó una imagen final que ayudó a establecer el conteo de las láminas (claras y oscuras). Este conteo de láminas se estableció hasta los ~10 cm de profundidad, los cuales correspondieron a 63 pares de láminas. Junto con la tasa de sedimentación de 0.60 mm año⁻¹ y el conteo de las láminas se estableció el fechado (Tabla 3).

Tabla 3. Muestra y pares de láminas tomadas desde 0 a 10 cm de profundidad de la loza. El horizonte indica el fechado establecido a partir de 2008.

# Muestra	Pares de láminas	Horizonte (años)
1	1	2008
2	2	2003
3	3-5	2000
4	6	1992
5	7	1990
6	8-11	1986
7	12-13	1976
8	14	1970
9	15-18	1968
10	19-21	1957
11	22-23	1950
12	24	1943
13	25	1941
14	26	1938
15	27 a	1935
16	27 b	1935
17	28-30	1933
18	31-33	1925
19	34-37	1917
20	38-41	1904

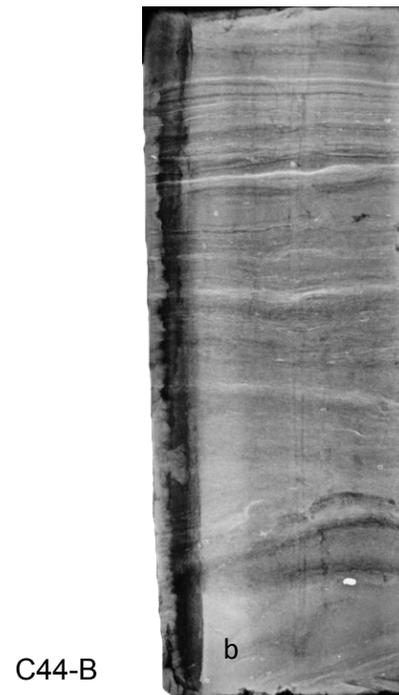
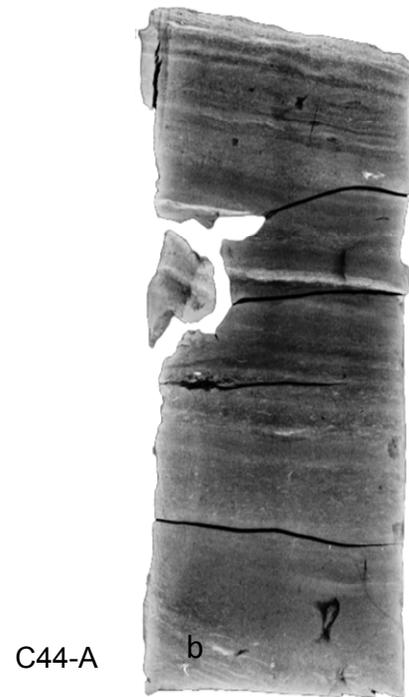


Lámina 2. Núcleo de sedimentos DIPAL-C44. Loza superior (C44-A), intervalo de 0 a 17.7 cm de profundidad, b) Mamografía de C44-A. a) Loza inferior (C44-B), intervalo de 17.8 a 22.1 cm de profundidad. b) Mamografía C44-B.

2) Fechado a través del radioisótopo ^{210}Pb

Se tomaron 34 muestras de 3 mm cada una, las cuales correspondieron a los primeros 102 mm de la loza que fue destinada para este propósito. Las muestras fueron desecadas en una estufa a 50°C en un tiempo aproximado de 24 hr. Posteriormente, se molieron en un mortero de ágata y, 250 mg de cada una fueron colocadas en viales de plástico cada uno con su respectiva etiqueta. Las muestras así procesadas fueron enviadas al laboratorio de investigación Flett en Canadá, en el cual fue suficiente procesar 15 muestras para tener la fechación satisfactoria. Se utilizó un equipo alfa espectrómetro EG&G ORTEC 'Octete PC' para realizar las mediciones de partículas alfa del ^{210}Po que se usan para estimar la radiactividad del ^{210}Pb , ya que se conoce que estos radioisótopos se encuentran en equilibrio secular. El procedimiento consistió en disolver el sedimento seco en ácido nítrico concentrado. Esta solución ácida se evaporó hasta las sales húmedas y se preparó una solución de 1.5 M HCl, de la cual los isótopos del polonio fueron depositados sobre un disco de plata. Por medio de ^{209}Po se calculó la actividad específica del ^{210}Po en el sedimento original; ya que los picos de ambos isótopos de polonio son bien separados. Las dos lozas restantes se procesaron para obtener los datos de susceptibilidad magnética y flujos de esqueletos como se describe en los siguientes párrafos en los apartados 3 y 4:

3) Estimación del aporte terrígeno mediante la susceptibilidad magnética

La susceptibilidad magnética refleja cambios en la composición, porosidad y densidad en materiales terrígenos. Generalmente refleja la concentración de minerales ferri/ferro magnéticos tales como la magnetita, lo que es útil para evaluar el aporte terrígeno. Para tal fin se utilizó un medidor de susceptibilidad magnética (K), que consistió en medir la respuesta dentro a un campo magnético emitido por medio de sensores del equipo en intervalos continuos cada 0.5 cm con un sensor superficial de alta resolución modelo Bartington MS2E el cual opera a 2 kHz.

4) Determinación de silicoflagelados en el sedimento

Con la cronología establecida a través del método de ^{210}Pb y el conteo de láminas se estableció el fechado de la parte superficial del núcleo. Se realizaron 20 cortes a la loza C44-A, en los primeros 10 cm de profundidad aproximadamente. Estos cortes fueron desiguales, es decir, el número de láminas al que corresponde cada corte es variable, entre 1 y 4 pares de láminas. Las muestras fueron fraccionadas en dos partes iguales, de las cuales una fue procesada utilizando peróxido de hidrógeno para disgregar el material conglomerado, posteriormente y con la finalidad de obtener información más detallada, cada muestra fue tamizada a través de 3 mallas quedando las siguientes fracciones separadas: < 20 , entre 20-100, y $> 100 \mu\text{m}$. Cada fracción fue utilizada para las identificaciones y conteos de los esqueletos contenidos en cada una de ellas, bajo el objetivo 20x del microscopio invertido de contraste de fases Olympus CK2 haciendo un barrido de la muestra total hasta hacer mínimo 300 observaciones de los esqueletos, utilizando una alícuota conocida de cada una de las muestras y fracciones. Con los conteos de los esqueletos se estimaron los flujos de los silicoflagelados en esqueletos $\text{cm}^{-2} \text{ día}^{-1}$.

VI.4 RESULTADOS

VI.4.1 Estratigrafía del núcleo de sedimentos

El núcleo de sedimentos de 39.8 cm de longitud, presenta una textura limo-arcillosa a lo largo de todo el núcleo, las láminas claras y oscuras de acuerdo a la "Tabla de Color de Suelos de Munsell (S375)" presentaron colores gris-olivo (5Y 4/2) y olivo-oscuro (5Y 3/1) respectivamente. A 1.1 cm se observó una lámina clara que contenía testas de foraminíferos y diatomeas, una banda más ancha en la cual se registraron de nuevo estos dos componentes fue entre los 16 y 19 cm. A los 22.7 cm se denota un cambio de coloración en el núcleo e inmediatamente se identificó un lente de 1 cm de espesor que contenía espinas de peces. Cabe mencionar que las laminaciones fueron más evidentes en los últimos 15 cm del núcleo en donde a través de los frotis realizados se observan abundantes diatomeas (Fig. 15).

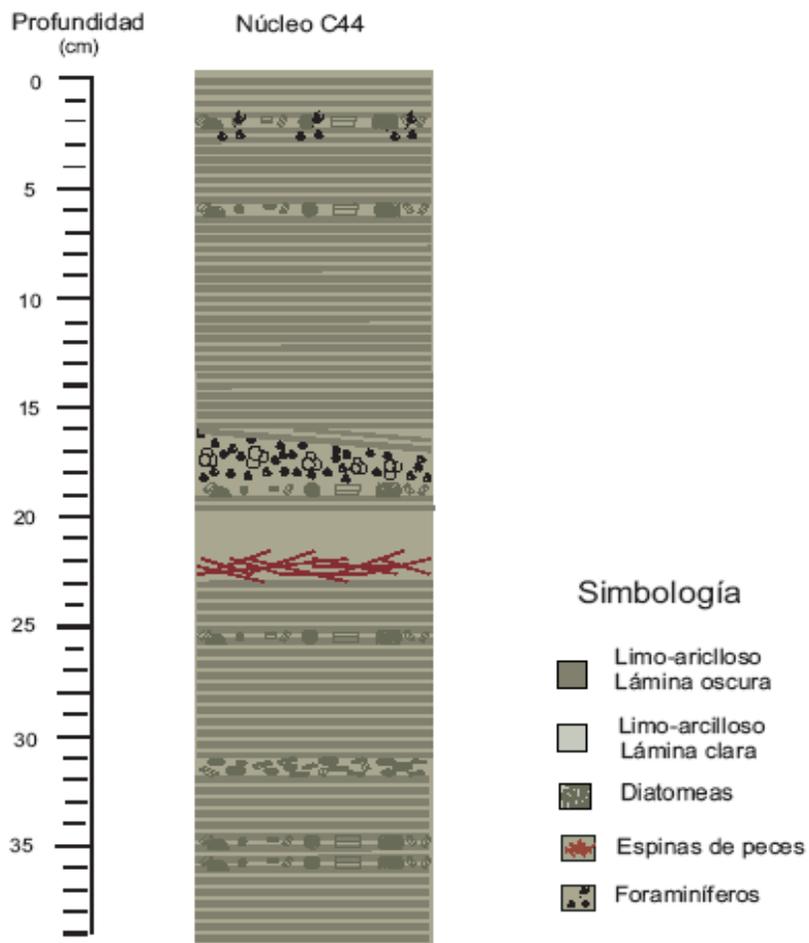


Figura 15. Estratigrafía del núcleo de sedimentos colectado en Cuenca Alfonso. La simbología muestra las características distintivas del núcleo.

VI.4.2 Tasa de sedimentación lineal en el núcleo de sedimentos

Los resultados de determinación del ^{210}Pb en el núcleo se presentan en la tabla 4. El ^{210}Pb presente en los sedimentos del núcleo mostró una curva sin alteraciones, encontrándose el punto de equilibrio a los 8 mm, después de ese horizonte la actividad total del ^{210}Pb comenzó a ser igual hasta la profundidad de la loza, en la figura 16 a se muestra el perfil vertical de la radiactividad del ^{210}Pb en el núcleo. En el cual se observa que después de los 80 mm de profundidad sólo queda

el ^{210}Pb en equilibrio. El logaritmo natural de la radioactividad del ^{210}Pb en exceso (sin soportar) se graficó contra la profundidad y se presenta en la figura 16 b. Los puntos se ajustaron al modelo lineal obteniendo la ecuación: $y = -0.0514x + 3.7231$ con una $r^2 = 0.9925$ (Fig. 16 b), a partir de la cual se estimó la tasa de sedimentación.

Tabla 4. Muestras utilizadas para conocer la actividad total del ^{210}Pb y el ^{210}Pb sin soportar. La actividad del ^{210}Pb llega a su punto de equilibrio a los ~8 cm.

# Muestra	Punto medio	^{210}Pb Actividad total (Bq)	^{210}Pb sin soportar	^{210}Pb (LN) sin soportar
1	1.5	40.23	36.23	3.59
2	4.5	34.90	30.90	3.43
3	7.5	28.58	24.58	3.20
4	10.5	29.15	25.14	3.22
5	13.5	27.89	23.89	3.17
7	19.5	18.87	14.86	2.70
8	22.5	15.62	11.62	2.45
12	34.5	11.95	7.94	2.07
13	37.5	9.74	5.73	1.75
16	46.5	7.93	3.92	1.37
17	49.5	7.09	3.09	1.13
21	61.5	5.61	1.60	0.47
24	70.5	6.37	2.37	0.86
28	82.5	4.14	0.13	
34	100.5	4.19	0.18	

Para tal propósito se estimó la profundidad, a la cual se encuentra la mitad de actividad inicial A_0 : Prof $A_0/2$ donde: A_0 : es la actividad del ^{210}Pb a la profundidad cero, después de realizar la transformación matemática se obtuvo la relación $\ln 2 = 0.0514 X_{1/2}$ de la cual resultó que la profundidad de la mitad de a radioactividad inicial de ^{210}Pb en exceso (^{210}Pb no soportado), $X_{1/2}$ es 13.15 mm. El valor obtenido fue dividido entre la vida media del ^{210}Pb (22.26 años) obteniéndose de esta manera la tasa de sedimentación de 0.60 mm año^{-1} .

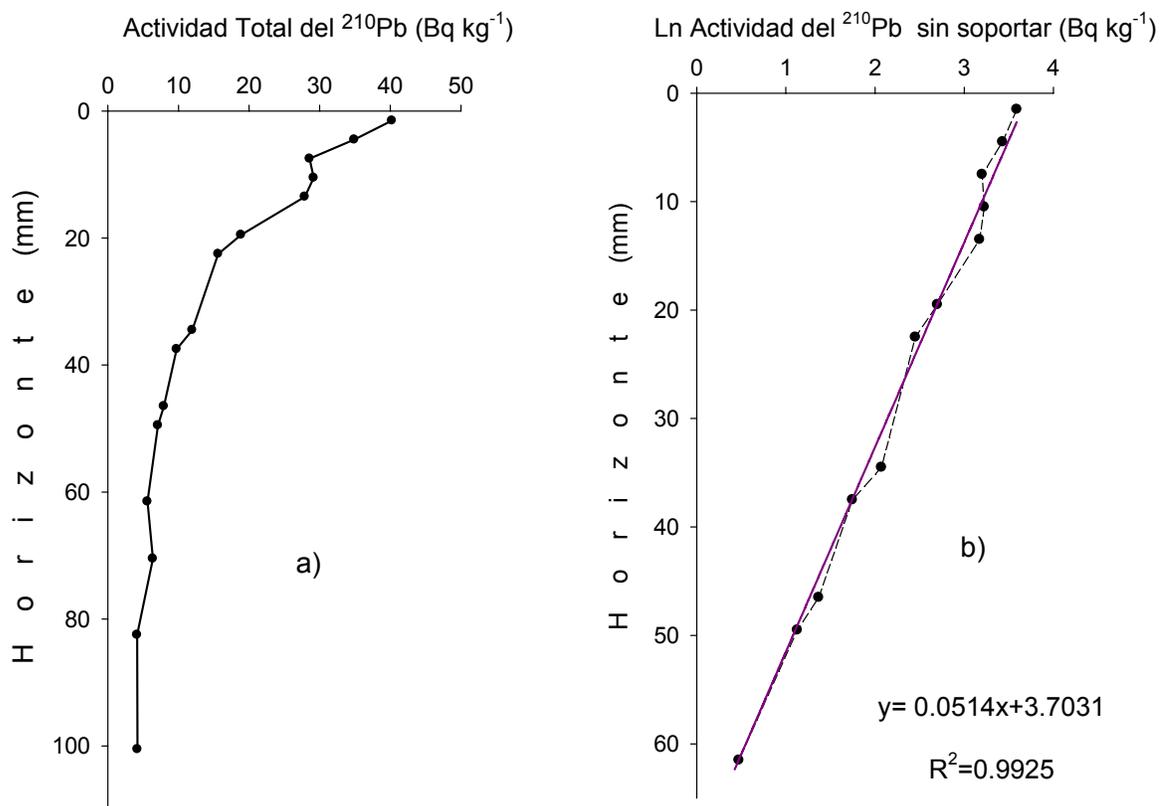


Figura 16. a) Actividad total del ^{210}Pb , en la cual muestra su actividad radioactiva desde la superficie hasta los ~7 cm. b) Actividad del ^{210}Pb sin soportar, en la cual se señala el valor de R^2 .

VI.4.3 Variabilidad de la susceptibilidad magnética en el núcleo de sedimentos

Los datos obtenidos por medio de susceptibilidad magnética, se graficaron en función de la profundidad del núcleo (Fig. 17). En los primeros 6.5 cm de profundidad se distingue un mayor aporte de terrígenos y conforme se cambia hacia la profundidad de este se observa un decremento de susceptibilidad magnética y posiblemente el aporte de terrígenos en el sitio también. A partir de la tasa de sedimentación de 0.60 mm año^{-1} y la cronología por conteo de láminas los primeros 6.5 cm representan los últimos ~110 años, este periodo denota un cambio en la entrada de terrígenos al sitio de estudio.

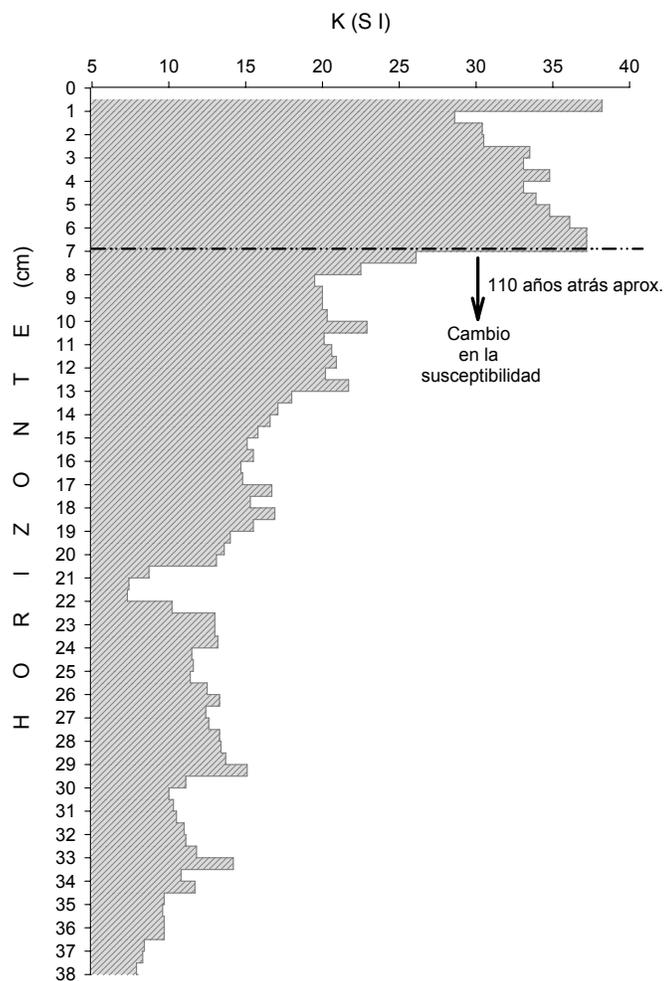


Figura 17. Susceptibilidad magnética en un horizonte de 39.8 cm de profundidad. La línea punteada señala un cambio en el aporte de terrígenos a los ~6.5 cm.

VI.4.4 Flujos de silicoflagelados (2008-1945) reconstruidos del registro sedimentario

Los flujos de silicoflagelados, extraídos de los últimos ~60 años, que fueron recuperados de los sedimentos laminados de Cuenca Alfonso, exhiben una alta variabilidad temporal con un flujo promedio de 1×10^3 esqueletos $\text{cm}^{-2} \text{año}^{-1}$, y máximos de 3.8×10^2 esqueletos $\text{cm}^{-2} \text{año}^{-1}$ en el periodo comprendido entre 1966-1968. Entre 1993 y 2001 se registró el periodo más bajo con flujos de 59 esqueletos $\text{cm}^{-2} \text{año}^{-1}$. El resto de los flujos fluctuó entre 2 y 3 órdenes de magnitud (Fig. 18 a).

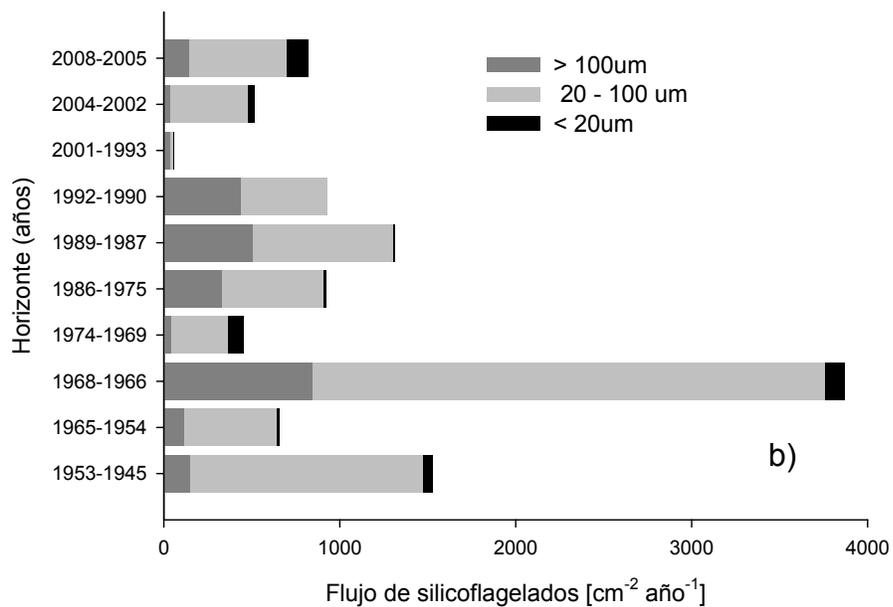
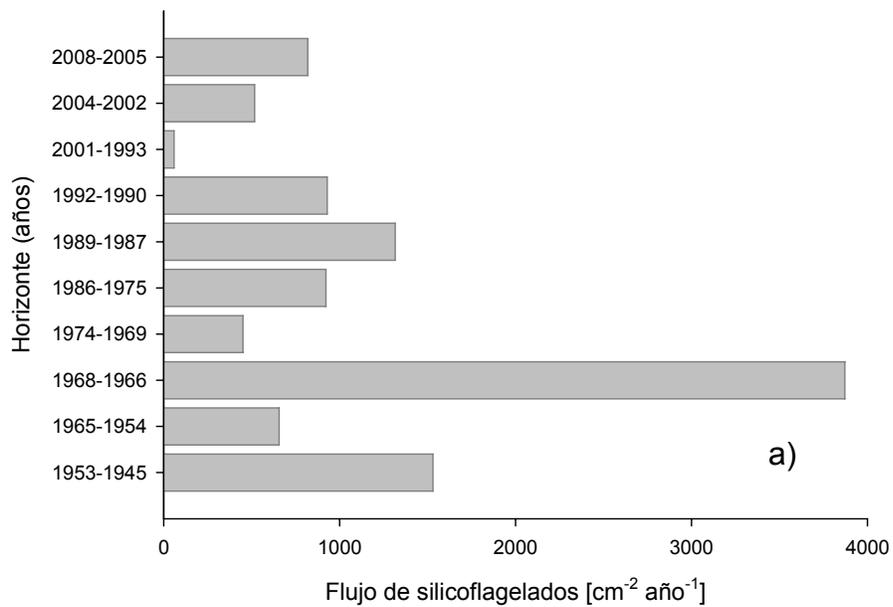


Figura 18. Flujos de los silicoflagelados reconstruidos desde 2008 a 1945. a) Flujo total y b) Flujo total en 3 fracciones de talla.

En tanto que las fracciones por tamaños revelaron que la mayor parte de los flujos de estos organismos están contenidos en las tallas intermedias, es decir,

entre 20 y 100 μm . En el periodo de 1975 a 1992 las tallas $> 100 \mu\text{m}$ son parte importante del flujo, así como lo son también de 1966 a 1968. Sin embargo, en este lapso de tiempo las tallas más predominantes siguen siendo las intermedias. La fracción $<20 \mu\text{m}$ al parecer no es substancial en el flujo de estos organismos (Fig. 18 b). Dentro del registro sedimentario de Cuenca Alfonso, 10 taxones representaron el flujo total de silicoflagelados (Fig. 19), el cual estuvo dominado en gran parte por *D. fibula var robusta*, *D. messanensis* forma *spinosa* y *D. messanensis* forma *messanensis*, en el periodo de mayor incremento en los flujos (1967, punto medio), estas 3 especies mostraron una proporción muy similar en cuanto a sus flujos, a este incremento se sumaron también *D. calida*, *D. epiodon*, *D. californica* y *O. pulchra* que aportaron flujos menores pero no menos significativos ya que en este lapso de tiempo estas 4 especies contribuyeron más al flujo que en otros años.

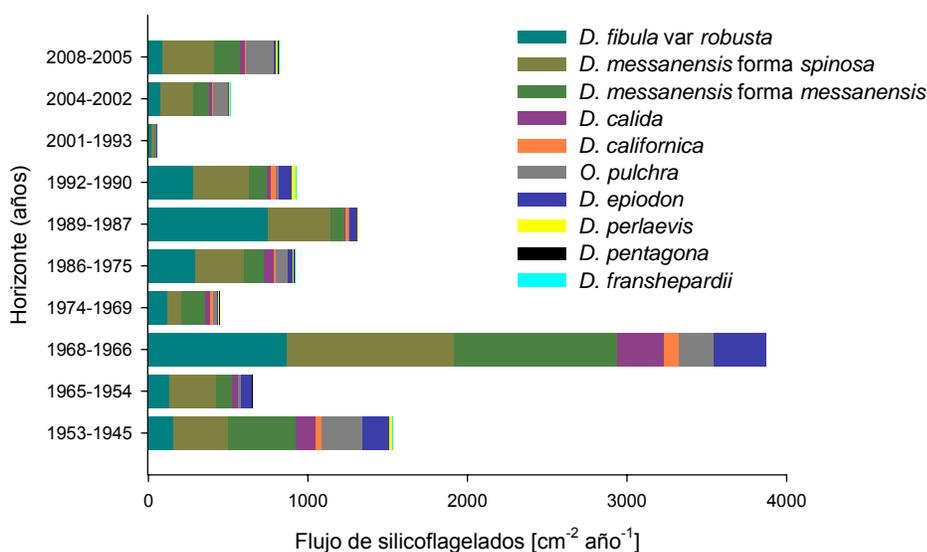


Figura 19. Serie de tiempo de los taxones de silicoflagelados depositados en los sedimentos laminados de Cuenca Alfonso en el periodo comprendido de 2008-1945.

Todos los periodos estuvieron representados por asociaciones de 6 a 10 taxones, y aún cuando algunos mostraron flujos relativamente bajos, comparados con los taxones abundantes, contribuyeron a la variabilidad del registro sedimentario

en el sitio. Los flujos de *O. pulchra* fueron más abundantes al inicio y final de la serie y un periodo casi nulo de este taxón ocurrió entre 1987 y 2001 (1997, 1991, 1988, puntos medios). *D. epiodon* no fue significativa en los primeros años, comenzó a manifestarse en el periodo centrado a mitad de la serie, sin embargo fue hasta 1945-1968 (1967, 1959, 1949, puntos medios), y su valor máximo se registró entre 1968 y 1966. Los taxones que contribuyeron minoritariamente al flujo sedimentario fueron *D. pentagona*, *D. perlaevis*, *D. franshepardii* y *D. californica*, sin embargo esta última tiene una contribución substancial en el periodo de mayor incremento de toda la serie.

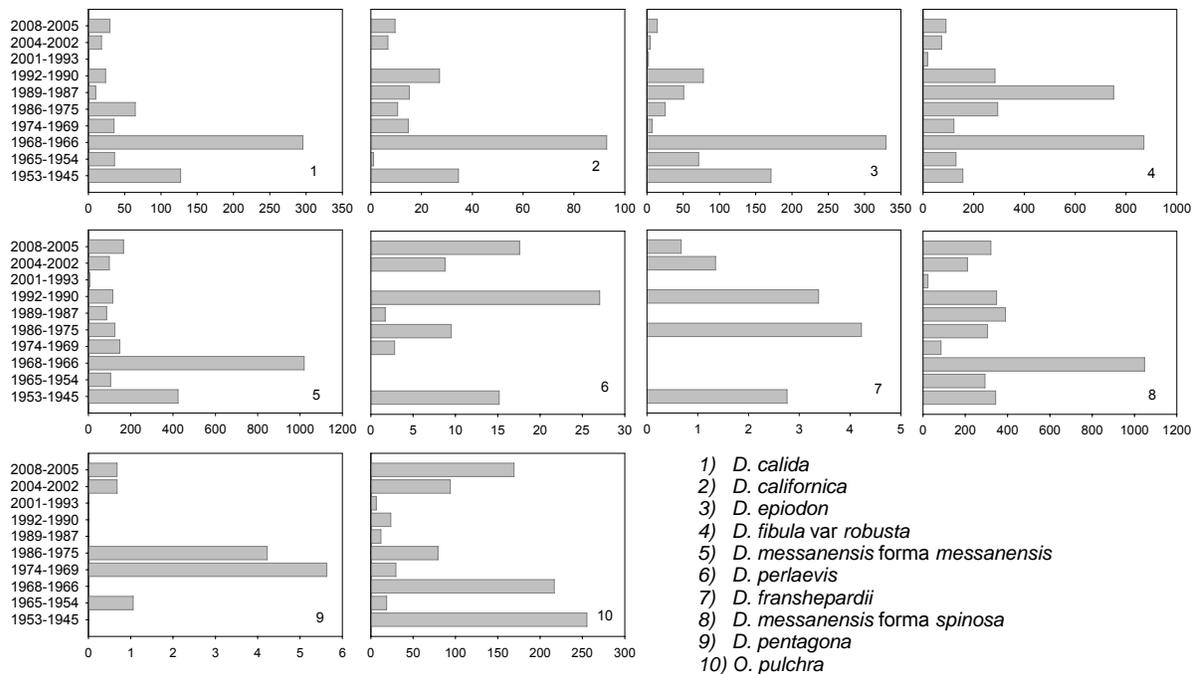


Figura 20. Series de tiempo de los flujos de los 10 taxones de silicoflagelados desde 1945 a 2008, identificados en el registro sedimentario. En el eje “y” se muestra el horizonte en años y en el eje “x” los flujos $\text{cm}^{-2} \text{año}^{-1}$.

VII DISCUSIÓN

VII.1 TRAMPA-COLUMNA DE AGUA

VII.1.1 Variabilidad estacional

Cambios temporales e interanuales en el flujo de silicoflagelados

La resolución de la serie de tiempo, generada desde enero de 2002 a febrero de 2008, permitió detallar la gran variabilidad estacional e interanual, en cuanto a magnitud y composición de taxones de silicoflagelados dentro de Cuenca Alfonso. A través de esta alta resolución fue posible reconocer la variabilidad estacional de los diferentes años analizados en un patrón anual de silicoflagelados para este sitio. La gran variabilidad estacional observada en los flujos de silicoflagelados en Cuenca Alfonso, ya ha sido descrita anteriormente por Thunell *et al.* (1996) en Cuenca de Guaymas, dentro del Golfo de California, con datos de dos ciclos anuales mostró que otoño-invierno es el periodo de incrementos abruptos (7.5×10^6 esqueletos $\text{m}^{-2} \text{día}^{-1}$, específicamente durante diciembre) en los flujos. Esto es coherente en tiempo y magnitud con el periodo máximo obtenido para Cuenca Alfonso durante diciembre de 2002, en el cual se observaron flujos de 7.6×10^6 esqueletos $\text{m}^{-2} \text{día}^{-1}$. Sin embargo, durante diciembre de 2007 estos valores se incrementaron por un orden de magnitud alcanzando 2.4×10^7 esqueletos $\text{m}^{-2} \text{día}^{-1}$, representando así el flujo máximo reportado para el Golfo de California, sin embargo el contenido de nutrientes en la zona iluminada es relativamente más bajo comparado con el 2006 cuando las condiciones de nutrientes aparentemente fueron más favorables para la producción de los silicoflagelados. La estacionalidad descrita en la Cuenca Alfonso es similar a lo observado en diferentes sitios o regiones como La Corriente de California (Lange *et al.*, 2000 y Venrick, 2003), la Cuenca de Santa Bárbara (Lange *et al.*, 1997) y el Pacífico subártico (Takahashi, 1989). Asimismo, esta condición se conserva para latitudes subtropicales del Océano Atlántico (Romero *et al.*, 2001).

En general la variabilidad temporal de este grupo silíceo y el incremento de invierno estuvieron definidos por la presencia de *O. pulchra*, el taxón dominante durante el periodo de estudio, a diferencia de regiones subárticas, donde su

contribución a los flujos es mínima (Sancetta, 1990). Esto alude a caracterizar este taxón como representante de condiciones enriquecidas en Cuenca Alfonso.

Otro rasgo del patrón anual promedio es la disminución de los flujos de estos organismos de enero a marzo lo que podría implicar condiciones desfavorables para su crecimiento o una depredación activa, y una posibilidad de consumo podría ser por medio de los cladóceros los cuales incrementan su biomasa en éstos primeros meses del año (Brinton *et al.*, 1986) y específicamente en la Bahía de La Paz por el eufausido *Nictiphanex simplex* que incrementa su biomasa a partir de febrero (Brinton & Townsend, 1980). Un registro similar para la Cuenca de Guaymas documenta Thunell *et al.* (1996), sin embargo menciona que la tendencia de flujos bajos se observa durante verano.

Un aspecto singular del patrón anual, fue el incremento durante septiembre, que fue observado desde 2003 con el reemplazo del taxón *O. pulchra* por la especie de afinidad oceánica-cálida *D. messanensis* forma *messanensis* y de manera repetida en septiembre de 2005. Este mismo escenario ha sido observado por Onodera & Takahashi (2005) en una estación situada a los 40° N en la costa occidental del Pacífico, donde el taxón dominante *D. speculum* fue substituido por *D. messanensis* forma *messanensis* durante el mismo periodo. Por su parte Romero *et al.* (2001) en una región subtropical al norte de África no percibió cambios en la dominancia de *D. messanensis* forma *messanensis* por otro taxón. Otro periodo de sucesión entre los taxones se suscitó en septiembre de 2007 pero esta vez el reemplazo de la especie dominante del flujo fue por *D. messanensis* forma *spinosa*.

Los incrementos observados en primavera, fueron más notables durante 2002, 2004 y 2005. Éstos picos estuvieron definidos por *O. pulchra*, mientras que en regiones subárticas al este del Pacífico oriental estos mismos incrementos están dominados por *D. speculum* la cual sugiere productividad importante en esa región (Takahashi, 1989 y Sancetta, 1990), lo mismo que para el lado oeste de la misma (Onodera & Takahashi, 2005). Estos incrementos también han sido observados por Lange *et al.* (1994) y Treppke *et al.* (1996) en el Atlántico Ecuatorial, pero no se menciona el taxón abundante. Con respecto a la magnitud de los flujos, para Cuenca Alfonso se observaron valores máximos de 24 000 esqueletos m⁻² día⁻¹, lo que hace

que sea diferente por un orden de magnitud para algunas zonas que han sido consideradas altamente productivas en el Pacífico Norte (Tabla 5).

Zona	Profundidad (m) de colecta	Flujos máximos esqueletos $10^3 \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$	Fuente bibliográfica
Tropical			
Demerara (Atlántico Ecuatorial)	398	92	Takahashi (1991)
Shom (Giro del Atlántico)	976	17	
Hawaii (Giro del Pacífico)	378	1	
Cuenca de Panamá	667	874	
Estación GBN3 (01°N, 11°O)	853	1 000	Treppke <i>et al.</i> (1996)
CB1 (20°N, 19°O)	2195	300	Romero <i>et al.</i> (2002)
Pacífico Norte			
Cuenca Sta. Bárbara	590	100	Lange <i>et al.</i> (2000)
Estación Papa (50°N, 145°O)	3800	700	Takahashi (1987)
Estación 50N (50°N, 165°E)	3260	6 500	Onodera & Takahashi (2004)
Estación KNOT (44°N, 155°E)	2957	6 100	
Estación 40°N (40°N, 165°E)	2986	5 700	
Atlántico Norte			
Mar Negro	2200	16	Osawa <i>et al.</i> (2005)
Golfo de California			
Cuenca de Guaymas	500	7 000	Thunell <i>et al.</i> (1996)
Cuenca Alfonso	360	24 000	En este estudio

Tabla 5. Flujos máximos de silicoflagelados estimados para diferentes regiones oceánicas.

Es necesario resaltar también que los silicoflagelados fluctúan de forma paralela en tiempo más no en magnitud, con las diatomeas en la región de la Cuenca de Guaymas y Cuenca Alfonso (Thunell *et al.*, 1996 y Álvarez-Gómez, 2007; Villegas-Aguilera, 2009). Lo mismo sucede en latitudes altas del Pacífico (Onodera & Takahashi, 2005) y subtropicales del Atlántico (Lange *et al.*, 1994 y Treppke *et al.*, 1996). Mientras que esta relación cambia para el grupo de los coccolitofóridos ya que sus incrementos anteceden al fitoplancton silíceo durante finales de noviembre principios de diciembre (Thunell *et al.*, 1996). La sucesión entre los grupos silíceos y carbonatados es el resultado de las condiciones oceanográficas que regulan la

disponibilidad de nutrientes en la columna de agua, ya que éstos últimos tienen requerimientos menores (Brand, 1994).

Adicionalmente a los contrastes a nivel estacional es notable la variabilidad espacial del grupo de organismos silíceos, con diferencias latitudinales importantes. Onodera & Takahashi (2005) encontraron un gradiente latitudinal de sur a norte en tres estaciones del Pacífico Norte occidental, observando un incremento repetido durante primavera (mayo-junio) a los 50°N, en tanto que para la estación de los 40°N documentaron una mayor variabilidad en los flujos de estos organismos, sin embargo se distinguen cambios importantes en primavera y verano. Finalmente en la estación más sureña (44°N, KNOT) registraron dos periodos de incremento en invierno (enero) y en primavera (mayo junio). Este último patrón coincide con los incrementos observados en Cuenca Alfonso a través de estos 6 años de observaciones, sin embargo el incremento que observamos en verano Onodera & Takahashi (2005) no lo reportan para esta estación. Asimismo en una estación a los 50°N hacia el oriente del Pacífico Norte a través de 4 años de observaciones continuas Takahashi (1989) reporto que estos eventos de producción se repiten entre los años. Con mayor certeza podemos decir que el patrón anual promedio encontrado para Cuenca Alfonso es comparable en tiempo y magnitud con las producciones de silicoflagelados que se dan en latitudes medias (43°N), donde las condiciones de productividad están por encima de otros sitios. Esta conclusión fue adelantada en Álvarez-Gómez (2007) cuando se obtuvieron los primeros dos años de la serie de tiempo que corresponden a este mismo trabajo.

Mecanismos que modulan la producción de silicoflagelados en un ciclo anual

A través del patrón anual promedio de los silicoflagelados se denotó que hay tres periodos de producción en el cual este grupo silíceo se incrementa y cada incremento está relacionado con mecanismos oceanográficos que disponen las condiciones favorables para el crecimiento de estos organismos.

1) Patrón de vientos

Los incrementos que fueron observados durante diciembre a través del patrón anual promedio, corresponden con el ciclo anual de vientos que fue extraído para la serie, por lo que estos pueden ser atribuibles a la mezcla inducida por los vientos que modulan esta región desde finales de otoño hasta primavera haciendo disponibles los nutrientes en la zona iluminada y sobre todo en los niveles ópticos propicios para el crecimiento de los silicoflagelados (Villegas-Aguilera, 2009). La variabilidad semanal de los periodos de producción, se puede asociar a que la velocidad promedio del viento de 2 m s⁻¹ (Fig. 21), no permanece constante sino que existen rachas de vientos que permanecen por días o semanas. Esta fluctuación en la producción de diferentes grupos fitoplanctónicos, como coccolitofóridos y diatomeas también ha sido descrita anteriormente por Thunell *et al.* (1996), en la Cuenca de Guaymas y fue atribuida principalmente al régimen de vientos que prevalece durante el periodo de invierno-primavera, en el cual la capa de mezcla se vuelve más homogénea (Douglas *et al.*, 1993). Este mismo mecanismo opera en La Bahía de La Paz en donde se ha reportado un aumento de clorofila a (C_{la}) con valores máximos de 10.9 mg m⁻³ en subsuperficie (entre 10-25 m) (Martínez-López *et al.*, 2001). El incremento substancial del taxón indicador de productividad *O. pulchra* ratifica este escenario en el sitio, esta atribución ha sido ampliamente reconocida por Murray & Schrader (1983) y Schrader & Baumgartner (1983) y Barron & Bukry (2007) en sedimentos del Golfo de California. Sin embargo, es necesario considerar que el incremento de esta especie durante 2007 se reflejó en la cantidad de esqueletos más no en un incremento en tallas, sino por lo contrario se observaron los anillos de sus esqueletos menos silicificados que en otros periodos similares pero de años anteriores. Lo que significa que si el abastecimiento de nutrientes en la zona iluminada era menor, también la disponibilidad de estos para la elaboración de sus productos fotosintéticos se mantuvo reducida.

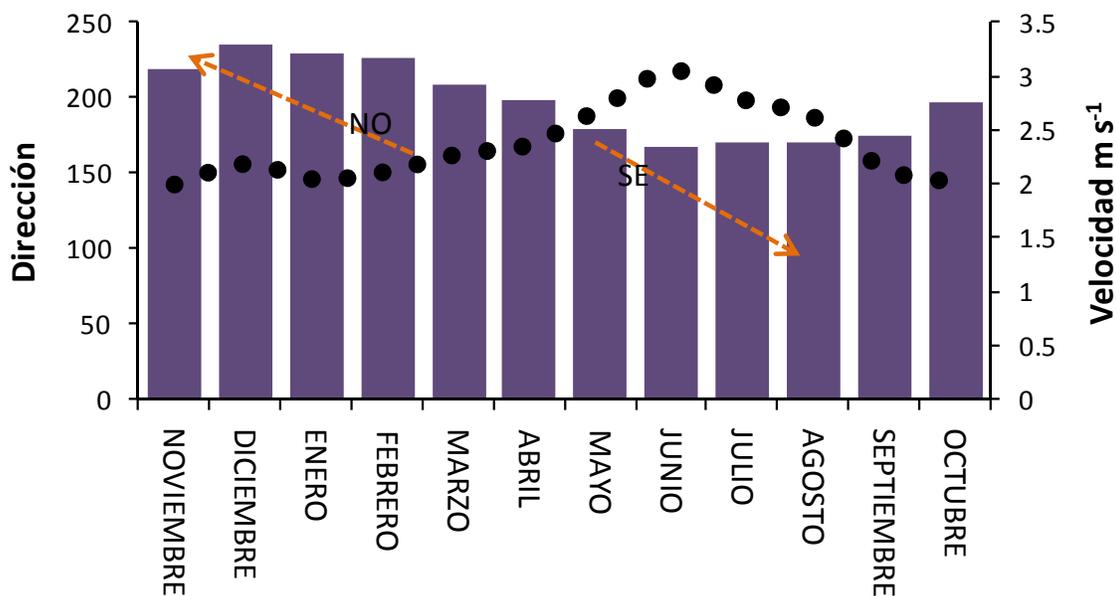


Figura 21. Patrón anual promedio de vientos (enero 2002/febrero 2008). Las barras junto con las flechas (naranjas) indican la dirección del viento en grados de latitud y la línea de puntos negros la velocidad.

2) Fenómenos meteorológicos

Otro mecanismo que puede dar explicación al incremento en los flujos de algunas especies de silicoflagelados durante septiembre es la ocurrencia episódica de fenómenos meteorológicos como huracanes y tormentas tropicales que se presentaron en el sitio (Fig. 22). Fue notable un aumento de *D. messanensis* forma *messanensis* a finales de agosto y durante septiembre de 2003 después del paso de los huracanes “Ignacio” (<http://www.nhc.noaa.gov/2003ignacio.shtml>) y “Marty” (<http://www.nhc.noaa.gov/2003marty.shtml>), los cuales incidieron directamente sobre las costas de la Península de Baja California y aunque no existen trabajos que documenten la respuesta del fitoplancton ante este tipo de eventos dentro del Golfo de California si es posible hacer esta inferencia ya que a través de datos derivados de satélites se ha demostrado que este tipo de fenómenos causan turbulencia además de promover el transporte de sedimentos desde la parte continental hacia el océano (Zamudio *et al.*, 2002) lo que puede abastecer de nutrientes la zona eufótica y elevar los niveles de clorofila (Fuentes-Yaco *et al.*, 2006). Particularmente para La

Bahía de la Paz se reportó el ingreso de sedimentos después del paso de los dos huracanes que vulneraron las condiciones oceánicas durante agosto-septiembre de 2003 en Cuenca Alfonso, determinando que los flujos de masa total se incrementarán por arriba de $2.5 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ así como de Fe ($1.5 \text{ mmol m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) que supero las concentraciones registradas en 2002 y 2003 (Silverberg *et al.*, 2007).

En cuanto a la respuesta biológica a estos eventos meteorológicos ha sido poco estudiada en el Golfo de California. Sin embargo, Miller *et al.* (2006) demostraron que las diatomeas responden de forma inmediata consumiendo los nutrientes puestos a disposición por efecto de los huracanes. No obstante una vez ocurridos este tipo de eventos meteorológicos, cuando la columna de agua se encuentra más estable, las condiciones llegan a favorecer a otras especies con menores requerimientos nutricionales, como fue el caso para Cuenca Alfonso, cuando *O. pulchra* declinó sus flujos y fue reemplazada por *D. messanensis* forma *messanensis* taxón adaptado a condiciones oligotróficas oceánicas (Polcheau, 1976). Esta característica de habitar estos cuerpos de agua le confiere la posibilidad de incrementar su abundancia después de ocurridos estos eventos una vez que disminuye la concentración de nutrientes. Una situación similar sucedió en septiembre de 2005 para esta misma especie, sin embargo, no hay registro de huracanes para ese periodo por lo que los incrementos de este taxón pudieran ser debido a otro mecanismo.

Para el 2007 se presentó en el sitio otro huracán “Henriette” (http://www.nhc.noaa.gov/pdf/TCR-EP112007_Henriette.pdf) que impacto de manera directa sobre la Bahía de La Paz, pero el reemplazo de *O. pulchra* como la especie más abundante, en esta ocasión fue por *D. messanensis* forma *spinosa*, que tiene una distribución en ambientes ecuatoriales oceánicos y de condiciones pobres en nutrientes, su presencia manifestó lo ocurrido durante ese lapso de tiempo.

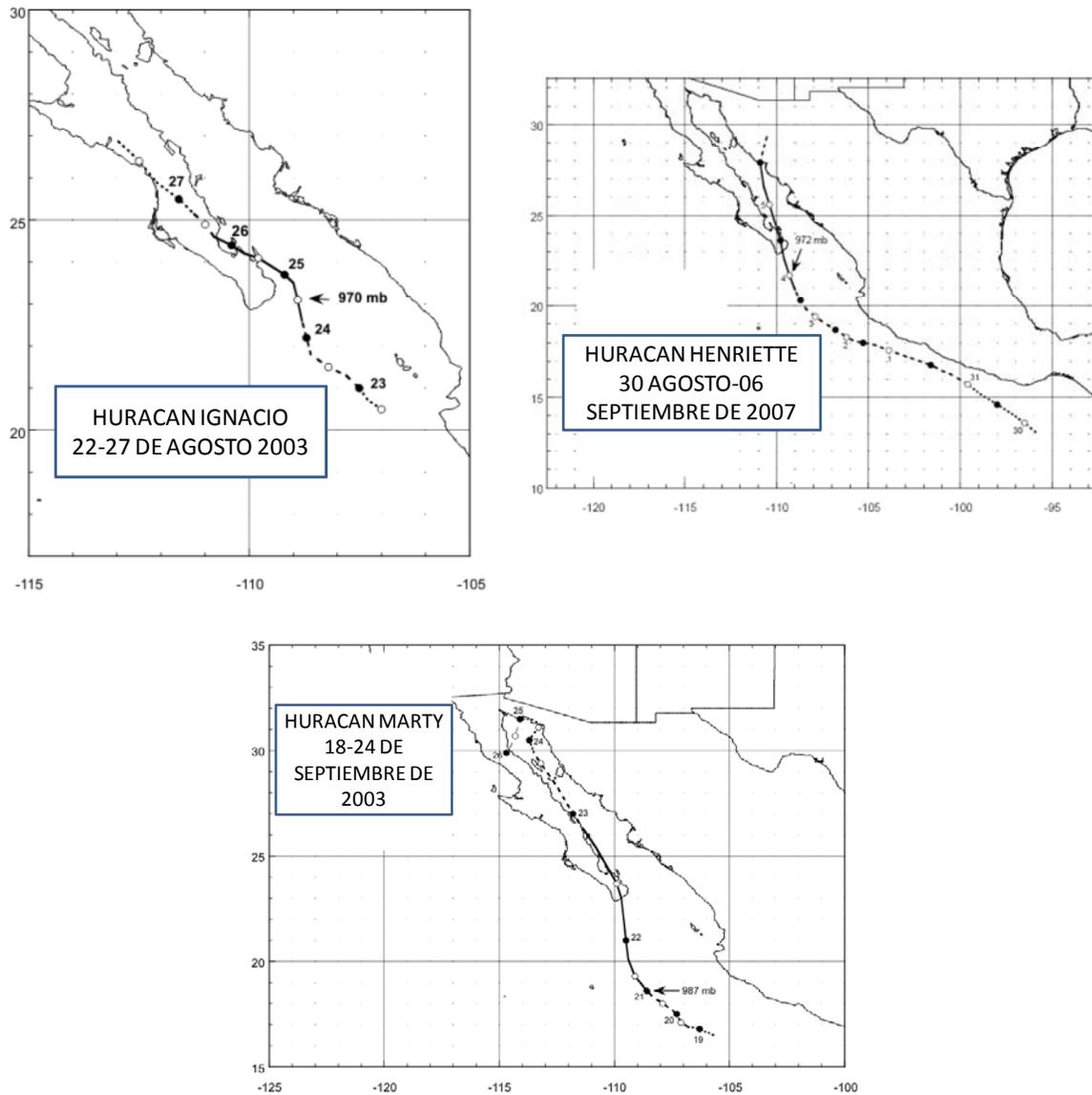


Figura 22. Trayectorias de huracanes que afectaron las costas de la Península de Baja California Sur durante 2003 y 2007.

Giro ciclónico

La Bahía de La Paz, durante primavera se ve afectada por un giro ciclónico que fue documentado por primera vez por Monreal-Gómez *et al.* (2001), y posteriormente en junio de 2004 a través de un derivador de corrientes, se comprobó su existencia (García-Reyes, 2005). Sánchez-Velasco *et al.* (2006) también evidenciaron una circulación ciclónica durante julio de 2004, que conecta la parte

norte de la bahía con el Golfo adyacente. Aparentemente este mecanismo es recurrente en el área de Cuenca Alfonso. Durante el periodo de primavera e inicio de verano de 2007 promovió la elevación de las isopícnas y el ascenso de agua rica en nutrientes hacia la zona iluminada de la columna de agua (Villegas-Aguilera, 2009), lo que explica de manera congruente el aumento de silicoflagelados observado durante mayo, lo cual se reflejó en el incremento de los flujos de *O. pulchra*, y además se manifestó en las mayores tallas de sus esqueletos (34.7 μm de diámetro). Este mecanismo favoreció también a *D. epiodon* y *D. fibula* var *robusta* y aunque su distribución geográfica es distinta, ambas provienen de ambientes con buena disponibilidad de nutrientes, por lo que esta condición generó que ambos taxones encontraran las condiciones idóneas para su crecimiento. Sin embargo, para *D. epiodon* fue notable ya que la intensificación de la Corriente de California facilitó su ingreso en el Golfo de California en niveles subsuperficiales y en combinación con la inyección de nutrientes a través de la circulación ciclónica, este taxón incrementó su presencia en Cuenca Alfonso. Esta inyección de nutrientes asimismo favoreció los incrementos de diatomeas dentro de la Bahía de La Paz (Villegas-Aguilera, 2009). Takahashi (1989), observó en un núcleo cálido desprendido de la Corriente del Golfo, en el que los patrones de distribución de los silicoflagelados está en relación al suministro convectivo de nutrientes, ya que las células de *D. speculum* (el taxón más abundante) fueron observadas hacia la periferia del núcleo, mientras que los taxones menos abundantes y de afinidades cálidas presentaron sus mayores abundancias en el centro de este.

Silicoflagelados como indicadores ambientales

La amplia distribución que tienen los silicoflagelados alrededor de los océanos permite que se tomen en cuenta para distinguir distintos escenarios oceanográficos. Desde la década de lo 1970 se reconocieron los diferentes ambientes que pueden habitar estos taxones, por lo que cada taxón tiene sus afinidades geográficas que corresponden con masas de agua de temperatura y salinidad específica (Poelchau, 1976). De aquí que los trabajos que se han abordado en relación a este tema son escasos, sin embargo en nuestro trabajo consideramos ampliar este conocimiento

para esta región sur del Golfo de California. La correlación negativa entre *O. pulchra* y nitritos, nitratos, fosfatos y silicatos sugiere que su crecimiento está sustentado en el incremento de los nutrientes que preceden a este taxón indicador de condiciones productivas (Fig. 23).

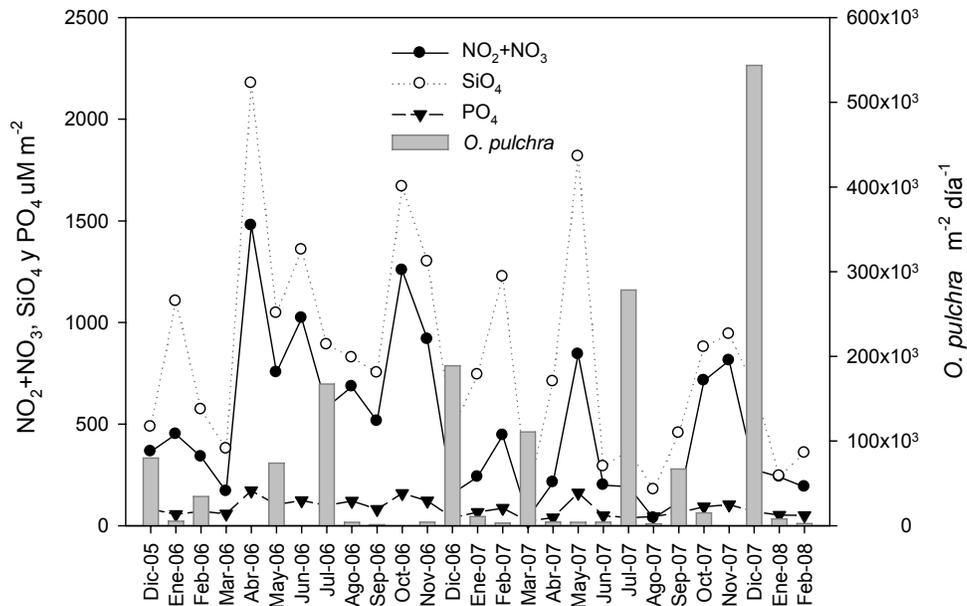


Figura 23. Valores integrados de *O. pulchra* (barras) y valores integrados de nutrientes oxidados (líneas). Correspondientes al periodo de Diciembre de 2005-febrero 2008.

Estas asociaciones se observaron principalmente en diciembre cuando se dan las condiciones de mezcla en la columna de agua, por el efecto de vientos intensos que soplan del noroeste induciendo la entrada de nutrientes desde fuera de la zona iluminada, este escenario permitió a *O. pulchra* encontrar los nutrientes necesarios para crecer en diferentes niveles de profundidad. Además coincidió con la activación de un giro ciclónico en el periodo de primavera-inicio de verano, el cual provocó la elevación de las isopícnas de los 25 y 26 $kg m^{-3}$, por debajo de la capa de mezcla, introduciendo de esta manera nutrientes en subsuperficie dentro de la zona eufótica (Villegas-Aguilera, 2009), lo que favoreció el incremento de *O. pulchra*. Villegas-Aguilera (2009), observó a éste taxón asociado a proliferaciones de diatomeas

proliferadoras con altos requerimientos de nutrientes como *Pseudo-nitzschia* sp 1, *Chaetoceros compressus*, *Pseudoguinarthia recta* y *Dactylosolem fragilissimus*.

La afinidad de *O. pulchra* para proliferar cuando los nutrientes oxidados son abundantes, sugiere la capacidad fisiológica que estas células pudieran tener para captarlos. Esta relación no se había hecho directamente sobre estas variables químicas dentro del Golfo de California, sin embargo, algunas inferencias hechas a través del registro sedimentario con este grupo, han relacionado las mayores abundancias de este taxón con periodos de mayor intensidad de surgencias en la Cuenca de Guaymas (Schrader & Baumgartner, 1983), asociadas a los periodos de vientos del noroeste (Murray & Schrader, 1983). Basados en los antecedentes anteriores y nuestros resultados se revalida la importancia que tiene *O. pulchra* durante periodos productivos dentro del Golfo de California. Por otro lado una condición contraria ha sido demostrada con las bajas abundancias de *D. messanensis* forma *messanensis* al correlacionar altos valores isotópicos del $\delta^{18}\text{O}$ asociados con bajas temperaturas y un incremento en la productividad (Leclerc & Schrader, 1987).

El silicoflagelado *D. calida* mostró una correlación de -0.39 con NO_3 y de -0.44 con SiO_4 (Fig. 21), esta afinidad por las formas reducidas de nutrientes les confiere a estos organismos la posibilidad de acceder a nutrientes derivados de la producción regenerada que pudiera ofrecer el sitio. Sin embargo, esta correlación negativa podría explicarse en términos de la baja disponibilidad de nutrientes por incursión de agua que llega desde la región ecuatorial-tropical con el paso del evento el ENSO en verano de 2006, o bien al flujo estacional de aguas más cálidas y pobres en nutrientes que durante los periodos de verano incursionan hacia el golfo (Álvarez-Sánchez *et al.*, 1978) causando una termoclina más profunda y una disminución en la concentración de estos nutrientes. Aún cuando condiciones cálidas permanecieron durante este año, la disminución en la concentración de nutrientes dentro de la Bahía de La Paz, no se vio atenuada sino todo lo contrario presentó un incremento con respecto al 2007 (Fig. 24). Sin embargo las condiciones fueron adversas para la costa que comprende el sistema de la Corriente de California (Gaxiola-Castro *et al.*, 2008). Por lo tanto y presumiblemente el giro ciclónico que localmente se ha

observado dentro de la Bahía de La Paz, podría estar contrarrestando los déficits de nutrientes en la columna de agua, y abastecer de nutrientes a los niveles más superficiales de la zona eufótica.

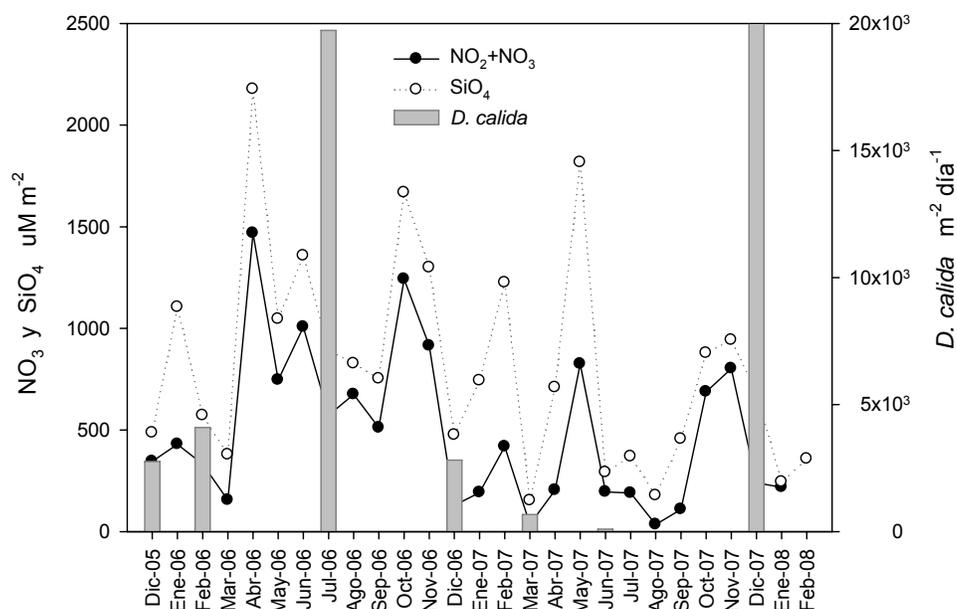


Figura 24. Valores integrados de *D. calida* (barras) y $\text{NO}_2 + \text{NO}_3$ y SiO_4 (líneas). La serie corresponde a diciembre de 2005-febrero 2008.

De los pocos trabajos que existen a la relación que guardan las variables fisicoquímicas con la abundancia de los silicoflagelados Takahashi (1989), argumentó que *D. speculum*, que ante una disminución de las variables de temperatura, salinidad y nitratos, se observó un incremento en las abundancias del taxón.

Validación de los silicoflagelados en sedimentación

La señal capturada por la trampa de sedimentos comprendida entre el periodo de diciembre de 2005 a febrero de 2008 corresponde a la producción y variabilidad estacional que fue observada en toda la zona iluminada. Ya que la similitud entre las

muestras de la columna de agua y la trampa de sedimentos fue de 97.5%. Esto sostiene que la señal de producción tiene un retraso en promedio entre 3.5 semanas. Esta interpretación coincide con el tiempo de retraso encontrado por Venrick *et al.* (2003) para diatomeas y silicoflagelados, en la Cuenca de Santa Bárbara en la región central de la Corriente de California. Por otro lado la composición de especies entre 10 y 13 taxones para columna de agua y trampa de sedimentos, refleja también la buena conexión que existe entre los silicoflagelados en sedimentación y la dinámica oceanográfica que tiene el sitio. Por ejemplo, las muestras de abril 10 de 2007 tienen una similitud con todas las muestras de la trampa de ese mismo mes, con un retraso en la señal de 1 a 4 semanas sin embargo el flujo y los taxa de silicoflagelados son bajos en ese periodo, tal vez la razón de ese rápido hundimiento pudiera ser señal de otras vías de transporte hacia el fondo como agregados marinos o a través de pelotillas fecales, como ha sido documentado por Buesseler *et al.* (2007). Una señal más fidedigna fue observada en diciembre 19 de 2007, la cual es análoga con diciembre de 2007 con un retraso corto, es decir, de 1 a 3 semanas esto es el reflejo del rápido hundimiento de la especie dominante *O. pulchra* y *D. messanensis* forma *messanensis* ambas de tallas relativamente pequeñas en este periodo, pero que fueron las que más contribuyeron al flujo de ese mes y año. Sin embargo, y a pesar de que no se trabajó con la velocidad de hundimiento, esto sugiere que ésta pudiera ser parte de la rápida depositación durante este periodo, así como lo han mencionado Osawa *et al.* (2005) para otros sitios.

VII.1.2 Variabilidad interanual

Patrones de variación que modificaron las condiciones oceanográficas en la parte suroccidental del Golfo de California

El Golfo de California se distingue por un marcado patrón estacional, caracterizado por la alternancia de vientos de noreste a sureste. Este cambio estacional afecta las propiedades físicas y químicas en la columna de agua manifestándose de manera directa en las fluctuaciones de la producción primaria (Álvarez-Borrego & Lara-Lara, 1991), y de la comunidad fitoplanctónica, lo que fue coherente con lo observado en la serie de tiempo de los flujos de los silicoflagelados

de Cuenca Alfonso. Sin embargo, la variabilidad estacional incluida en este estudio, estuvo acompañada por una serie de modificaciones en las condiciones ambientales derivadas de eventos oceanográficos de escala interanual y decadal que ocurrieron simultáneamente en la cuenca del Pacífico Norte, (McPhaden, 2004, 2008; Di Lorenzo *et al.*, 2009a; Durazo, 2009).

La variabilidad interanual registrada en este estudio entre 2002 y principios de 2008, puede observarse claramente en el promedio anual de los flujos de los silicoflagelados (Fig. 25). De esta serie destaca el 2006 ya que fue cuando se cuantificaron los flujos promedio más bajos de toda la serie (Fig. 25). Asimismo en este año fue notable la disminución de la riqueza de especies, ya que solamente 7 del total de 13 taxones identificados conformaron el flujo, por lo tanto estas condiciones oligotróficas que permanecieron en la columna de agua durante este año, probablemente tuvieron efecto sobre la diversidad de los taxones dominantes, afectando negativamente su crecimiento (Takahashi, 1991).

Una explicación a la gran variabilidad interanual observada en la Cuenca Alfonso podría estar relacionada con los eventos “El Niño-Oscilación Sureña” (ENSO). Esta variabilidad interanual en el Pacífico Norte ha sido atribuida ampliamente a este fenómeno del Ecuador (Lavín *et al.*, 2003). Sin embargo, investigaciones recientes amplían aún más el panorama en torno a las variaciones que afectan esta región oceánica, debido a la ocurrencia de oscilaciones climáticas de orden decadal (Di Lorenzo *et al.*, 2009a). Con el propósito de entender la alta variabilidad observada en la serie de silicoflagelados estudiada se extrajeron los patrones de variación contenidos en los datos a través de un análisis de factores. Este análisis explicó un 56.37% la varianza de los datos, en 3 patrones de variación que revelaron variabilidad asociada con eventos de ambas escalas tanto interanual como decadal en la región sur del Golfo de California. La asociación de estos patrones con algunos taxones de aguas tropicales costeras y ecuatoriales oceánicas así como subtropicales oceánicas y de la Corriente de California reveló la complejidad y dinámica de esta región entre 2002 y 2008.

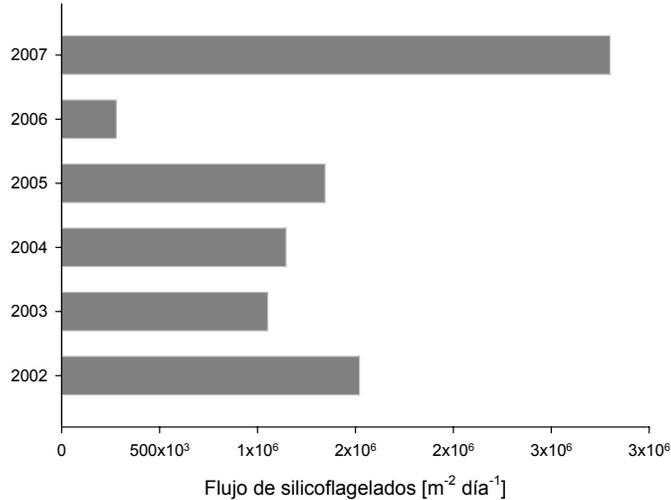


Figura 25. Variabilidad interanual a través del flujo promedio extraído por año de muestreo (2002-2007).

La asociación del primer factor denominado “Subtropical Oceánico” (21.55% de la varianza), con *D. messanensis* forma *messanensis* a pesar de no mostrar estadísticamente una correlación directa con ningún índice climático, exhibió una correspondencia gráfica con la Oscilación Decadal del Pacífico (Fig. 26). La fase positiva del PDO está relacionada con condiciones oligotróficas debido a la estratificación del agua, manteniendo condiciones más cálidas de lo normal hacia las costas de Norteamérica (Mantua *et al.*, 1997), lo cual es idóneo para la producción de este taxón, del que se sabe que tiene preferencias por cuerpos de agua con estas características (Poelchau, 1976, Takahashi (1991); Takahashi & Blackwelder, 1992). Ambas series mostraron una sincronía, aún cuando el índice representa un patrón de variación de orden decadal. Esta analogía puede considerarse coherente desde el hecho que este índice climático se encontraba en una fase positiva primordialmente desde 2002 hasta 2005 y posteriormente comienza un descenso en los valores de ambas series, lo cual estaría asociado a condiciones contrarias. Estos resultados mostraron que la serie de los flujos de los silicoflagelados tiene inmersa una señal de variabilidad decadal. Esta expresión decadal también fue observada por Gaxíola-Castro *et al.* (2008) en la región sur de la Corriente de California, aún cuando sus

observaciones son espaciadas en tiempo, la fase cálida que atravesaba del PDO en los años 2002 hasta 2006, repercutió en una disminución de la abundancia celular principalmente del componente nano-microfitoplanctónico esencialmente diatomeas y un incremento en la producción de dinoflagelados que crecen en condiciones más oligotróficas, a la vez que fueron observadas anomalías negativas de Clorofila a. A partir de 2003 hasta 2005 se observó una disminución de la producción primaria en la Corriente de California, la cual estuvo asociada a una disminución del ácido silícico con concentraciones menores a 2.5 μM , por debajo de los requeridos para el crecimiento de las diatomeas (Goericke *et al.*, 2005).

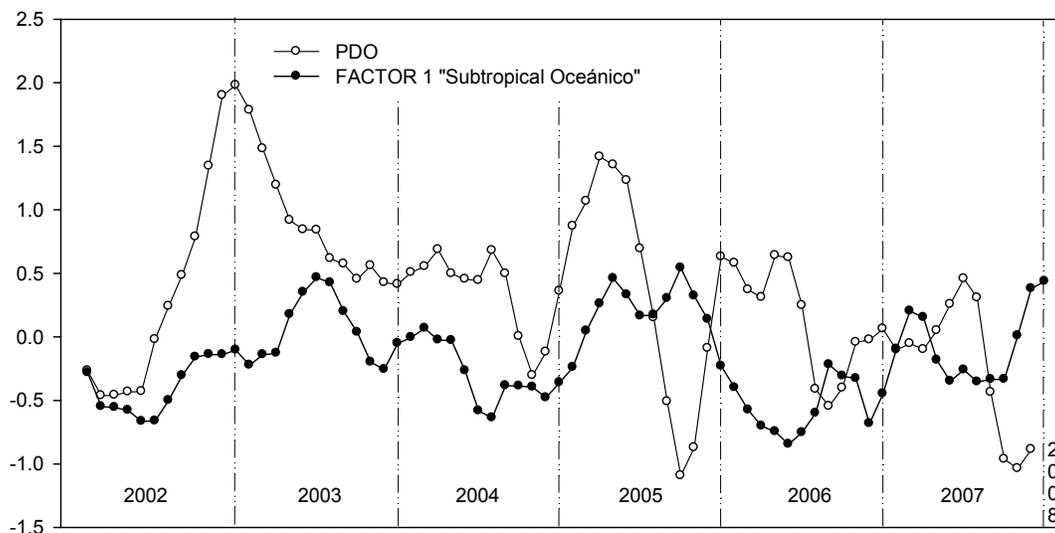


Figura 26. Factor 1 Subtropical Oceánico (círculos sin relleno) y anomalías del Índice de Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) en círculos oscuros. Ambas series tienen un promedio móvil de 3 puntos y corresponden al periodo de enero de 2002-febrero 2008.

Adicionalmente a la variabilidad de escala decadal, se ha documentado la ocurrencia de tres eventos ENSO en la región ecuatorial durante los seis años de muestreo. Estos tres eventos fueron inusuales ya que su permanencia sobre el océano fue relativamente corta y moderada (McPhaden, 2008). Sin embargo, los efectos alcanzaron latitudes subtropicales del Pacífico Norte (Durazo *et al.*, 2006). Prueba de ello fue la presencia y el incremento de taxones relacionados con ambientes cálidos y de latitudes bajas que manifestaron esta condición dentro de la Bahía de La Paz. Anomalías positivas en la temperatura superficial del mar a partir

de mayo de 2002, en la región ecuatorial que culminaron en un ENSO (McPhaden, 2004) se manifestaron sobre la costa occidental de la Península de Baja California (Durazo *et al.*, 2006). Esto coincidió con la presencia dentro de la Bahía de La Paz, de los taxones de condiciones ecuatoriales costeras *D. calida*, *D. californica* y *D. fibula* var *robusta*; y *D. messanensis* forma *spinosa* quien presenta las mayores abundancias en ambientes oceánicos de la región ecuatorial (Poelchau, 1976), estos incrementos fueron observados a partir del segundo semestre de 2002 y se extendieron hasta el 2003. Una situación similar fue observada por Romero *et al.* (2001) quienes documentaron una asociación entre el desplazamiento de agua más cálida desde la región ecuatorial oceánica hacia la zona costera de América del Sur y el incremento de las abundancias de *D. messanensis* tamaño intermedio (= *D. m.* forma *spinosa*) en las costas chilenas.

Adicionalmente a éstas condiciones anómalas que han sido observadas sobre Cuenca Alfonso, se ha identificado recientemente un nuevo modo de variación para el Pacífico Ecuatorial que ha sido descrito por Ashok *et al.* (2007) como “El Niño Modoki” (EMI, siglas en inglés) descrito como similar pero diferente a “El Niño 3.4” argumentando que este comportamiento dentro del océano se observa como un calentamiento en el Pacífico Central Ecuatorial formando una herradura de caballo o tripolo, con anomalías frías en ambos lados a lo largo del Ecuador, no obstante no ha sido documentado el impacto de estas condiciones oceanográficas sobre el componente biológico. Sin embargo, el patrón de variación extraído con los datos de los silicoflagelados, sugiere que hay una relación con las especies de regiones ecuatoriales a partir de 2003 y hasta 2005, lo que alude a pensar que estas condiciones ecuatoriales influyen el sitio de estudio. Este patrón difiere en tiempo del evento típico “El Niño” ya que su permanencia sobre el océano es alrededor de 4 años, dentro de una escala decadal aproximada cada 12 años, mientras que el ENSO se manifiesta en escala interanual (Ashok *et al.*, 2007; Weng *et al.*, 2007). Sin embargo, a pesar de ser un índice de escala decadal valores positivos del mismo coincidieron con los primeros años de este periodo de estudio. Aparentemente su efecto se manifestó a través del Factor 3 denominado patrón “Ecuatorial” (Fig. 27). *D. messanensis* forma *spinosa* fue la especie que se asoció a este factor y la cual ha

sido considerada por Poelchau (1976) como propia de ambientes oceánicos ecuatoriales, lo cual sugiere que esta región del golfo es sensible a este tipo de eventos de la región ecuatorial central, no obstante la relación no es perfecta ya que al comparar las series denotan una relación inversa en algunos segmentos de las series, que podrían explicarse por la alta variabilidad climática ocurrida en esta década y por el desfazamiento entre el inicio del evento y sus efectos en la zona de estudio. Este comportamiento del océano que ha sido documentado por Ashok *et al.* (2007) abre nuevas posibilidades para esclarecer el panorama de la reciente década. El cual ha sido manifestado también por otros organismos en la Corriente de California, como los copépodos que en verano desde 2002 a 2004 alcanzaron valores promedio en biomasa hasta de 20 mg C m^{-3} y un incremento similar durante 2006 (Goericke *et al.*, 2007). La mezcla de dos condiciones similares pero contrastantes a la misma vez (ENSO-EMI), incrementa la dificultad de entender el impacto del clima sobre esta región (Weng *et al.*, 2007).

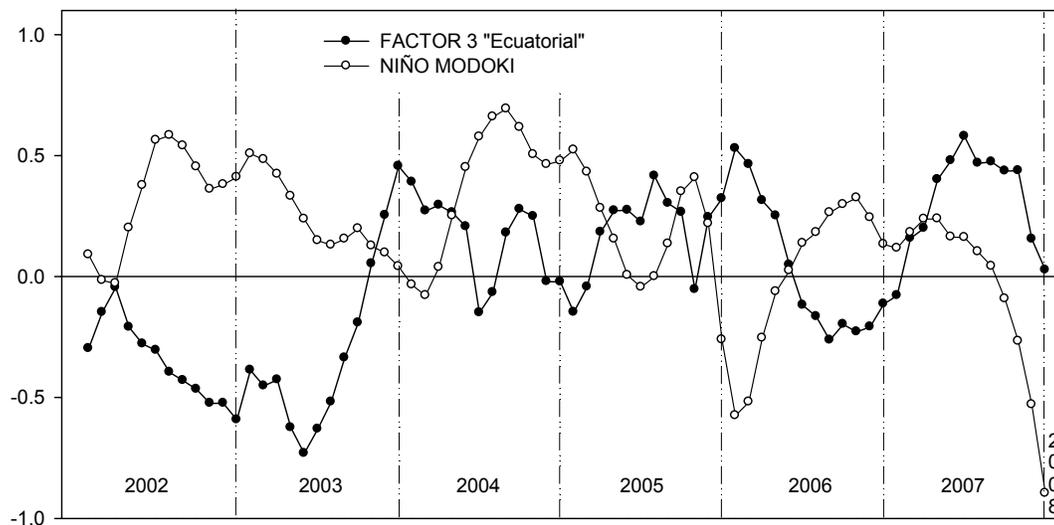


Figura 27. Factor Ecuatorial en marcador oscuro y anomalías del Índice de “El Niño Modoki”. Ambas series tienen un promedio móvil de 3 puntos y corresponden al periodo de enero de 2002 a febrero 2008.

Anomalías positivas en el índice multivariado del ENSO fueron observadas para los años posteriores a 2003 definiéndose dos eventos más de este fenómeno

que correspondieron a 2004 y 2006, los cuales dejaron ver sus efectos de nuevo dentro del Golfo de California con la presencia y el aumento en los flujos de los taxones antes mencionados. Estos eventos al igual que el de 2002 fueron considerados moderados y cortos (McPhaden, 2008). Bajo sus efectos se vio favorecida la producción de los organismos silíceos que no habitan de manera permanente dentro del golfo; esta situación difiere de otros ENSO como el de 1997-1998, que estableció condiciones oligotróficas en la columna de agua con temperaturas cálidas y el hundimiento de la termoclina, reduciendo las concentraciones de clorofila y sílice biogénico en la Cuenca de Santa Bárbara (Shipe *et al.*, 2002), así como el reemplazo en las comunidades planctónicas de diatomeas y radiolarios por coccolitofóridos en Cuenca San Lázaro (Silverberg *et al.*, 2004), lo mismo que dentro de la Cuenca de Guaymas durante “El Niño” 1990-91 donde los coccolitofóridos aprovecharon las condiciones que fueron desfavorables para la proliferación de diatomeas. Así como la ausencia de silicoflagelados hacia la parte sur del Golfo de California durante el ENSO 1982-1983 (Pérez-Cruz & Molina-Cruz, 1988). Sin embargo, es necesario resaltar que las anomalías propagadas con la frecuencia de estos eventos no modificaron negativamente las abundancias de este componente como se ha evidenciado comúnmente, sino por el contrario la presencia de estos ENSO dentro del Golfo de California junto a la dinámica oceanográfica del sitio tuvieron un impacto positivo.

Aunado a estos efectos relacionados con la región ecuatorial, a partir de 2002 y hasta el 2006 se ha registrado una entrada substancial de agua Subártica a la Corriente de California, lo que ocasionó el transporte de esta masa de agua hacia el sur del borde occidental de la Península de Baja California (Durazo *et al.*, 2006). Simultáneamente se observó un fortalecimiento sobre la Corriente del Pacífico Norte que se manifestó en un aumento de las surgencias, sin embargo el continuo enfriamiento fue provocado por una intensificación en el centro de baja presión de las Aleutianas, manifestado en valores altos del índice (Durazo, 2009), que marcó un incremento sostenido sobre la producción primaria neta durante 1997-2007 sobre las costas del Pacífico nororiental en coincidencia con los máximos anuales de clorofila en el ámbito de la Corriente de California (Kahru *et al.*, 2009). Aparentemente este

hecho extraordinario se reflejó también en la parte sur del Golfo de California como lo sugieren los datos de la producción de organismos síliceos, así como por la presencia de los taxones *D. speculum* desde mayo del 2002, de *D. epiodon* y *D. pentagona* a partir de septiembre del mismo año y la permanencia simultánea de estas a lo largo de toda la serie de tiempo. Las mayores abundancias de *D. epiodon* y *D. speculum* son referidos en la literatura como, asociados con aguas frías y ricas en nutrientes de la región Subártica y de la Corriente de California respectivamente (Poelchau, 1976). El segundo factor de variación extraído y referido como “Eventos fríos” presentó la asociación con estos taxones, manifestando de esta manera que las condiciones oceánicas observadas en las latitudes medias del Pacífico Norte, influyeron cuando menos la región sur del Golfo de California (Fig. 28).

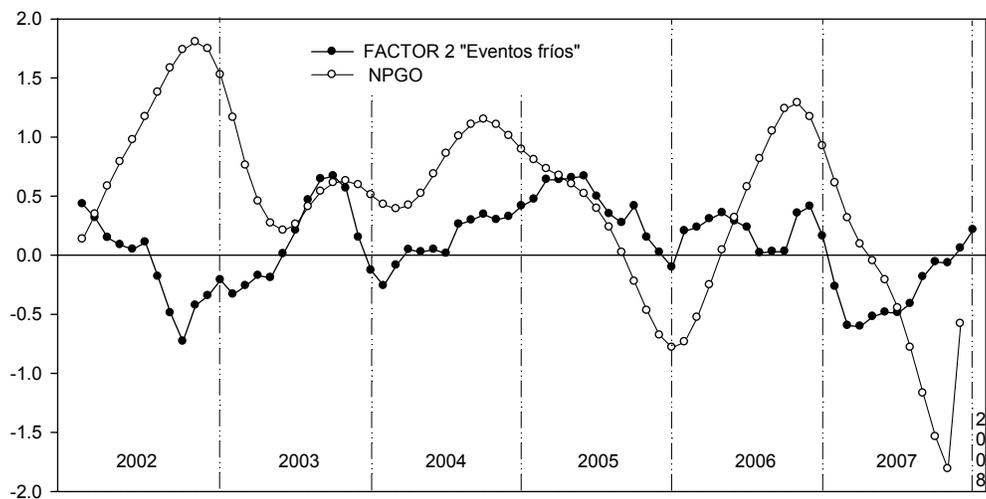


Figura 28. Factor Eventos fríos en marcador obscuro y anomalías del Índice de Oscilación del Giro del Pacífico Norte (NPGO). Ambas series tienen un promedio móvil de 3 puntos y corresponden al periodo de enero de 2002-febrero 2008.

Estos cambios en la circulación oceánica probablemente estén relacionados a la variabilidad en escala de cambio de régimen (Goericke *et al.*, 2005) y comenzaron a percibirse después del ENSO 1997-1998 (Durazo, 2009), aún cuando no está del todo esclarecido esto apunta a que una condición climática nueva podría estar modificando los patrones oceánicos en esta región del Pacífico. Sin embargo, en

cuanto a la respuesta biológica a este tipo de forzamiento climático, Overland *et al.* (2005) consideran que el cambio de régimen biológico está en función de las reglas que lo gobiernan e incluso puede tomar muchos años para que se manifieste dependiendo del organismo. En este sentido los organismos planctónicos estudiados muestran con este análisis, que el periodo de desfase entre los cambios en el clima oceánico y su respuesta es relativamente corto.

Este hecho se basa en la conexión existente entre el Pacífico Ecuatorial y latitudes subtropicales ya que a través del PDO se manifiesta la variabilidad atmosférica a través del centro de baja presión de las Aleutianas, en tanto que la segunda expresión del Pacífico Norte demostrada con el NPGO capta la variabilidad oceánica del Pacífico Norte. De esta manera las señales interanuales del ENSO sincronizan estos modos de variabilidad oceánica en estas latitudes (Di Lorenzo *et al.*, 2009a). Por tal razón la señal biológica ha sido puesta de manifiesto como las variaciones del clima han modificado los patrones de producción a través los 6 años de las observaciones de los flujos de los silicoflagelados los cuales revelaron que existió una señal mezclada de condiciones oceánicas de latitudes altas y ecuatoriales. Sin embargo no es posible hablar de una condición oceánica dominante por lo menos a través de los silicoflagelados, pero si podríamos considerar un periodo positivo en el incremento de este componente silíceo en esta zona del golfo en los extremos de la serie de tiempo (2002 y 2007).

VII.1.3 Variabilidad decadal

El núcleo extraído para este trabajo morfológicamente no mostró alteraciones, por lo que la superficie de este representó el fechado de colecta a partir de 2008 y consecutivamente la cronología se estableció a partir de las equivalencias de los pares de láminas con la tasa de sedimentación que fue recuperada con el ^{210}Pb a partir de una estimación de 0.60 mm año^{-1} lo cual es aproximadamente el doble de la tasa promedio estimada por Pérez-Cruz (2000) de $0.3 \pm 0.4 \text{ mm año}^{-1}$, para los últimos 8000 años (Tabla 6). De acuerdo con estos resultados la formación del par

de láminas, se forman en un periodo aproximado de 3 años, mientras que Pérez-Cruz (2000) y Molina-Cruz *et al.* (2002) estimaron un tiempo de formación aproximado de 11.2 años. Esto hace una diferencia substancial entre ambas estimaciones y pone de manifiesto la necesidad de realizar fechados adicionales para esta cuenca con el fin de corroborar la tasa de sedimentación. Así mismo, es necesario considerar que puede presentarse una alta variabilidad espacial en las tasas de sedimentación. Algunos ejemplos para el Golfo de California se muestran en la Tabla 5, donde puede notarse que la tasa de sedimentación promedio es de 1 mm año⁻¹, y las tasas más altas han sido estimadas para la región central, en la Cuenca de Guaymas (Tabla 6). Las diferencias entre las tasas de sedimentación esta en relación a la posición de colecta del núcleo ya sea en el umbral o en el fondo de la Cuenca y puede estar en función también de la lejanía o cercanía hacia la costa (Pérez-Cruz & Urrutia-Fucuguachi, 2009). Sin embargo los métodos de datación utilizados (²¹⁰Pb o ¹⁴C) también pueden hacer esta diferencia.

Tabla 6. Estimaciones de tasas de sedimentación de diferentes núcleos del Golfo de California fechados con ²¹⁰Pb. A excepción del núcleo BAM80 E-17 que fue fechado a través de ¹⁴C y el BAP96J-CP por ambos métodos.

AUTOR	NÚCLEO	POSICIÓN GEOGRÁFICA	PROFUNDIDAD DE COLECTA (m)	TASA DE SEDIMENTACIÓN (mm año ⁻¹)
Murray, (1982)	BAM80 E-17	27.9° N, 111.60 W	620	1.35
Pérez-Cruz, (2000)	BAP96J-CP	24° 38.12 ' N, 110° 33.24 W	390	0.34
Bernal & Herguera (2001)	BAP96-CM	Umbral de la Bahía de La Paz		0.7-1.5
	BAP94-9C	Cuenca La Paz		0.5-0.8
Barron & Bukry (2001)	NH01-21	26° 17.39' N, 109° 55.24' W	575	0.63
	NH01-26	24° 16.78' N, 108° 11.65' W	600	0.42
En este estudio	DIPAL C44	24°41' 89.75" N, 110°33'43.21" W	380	0.60

Se ha determinado que el aporte de terrígenos dentro de Cuenca Alfonso proviene principalmente del abanico aluvial que se encuentra en la parte norte de la Bahía de La Paz, producto de las escorrentías que son acarreadas vía precipitación

pluvial después del paso de huracanes y tormentas tropicales en el sitio (Nava-Sánchez *et al.*, 1999). Esto ha generado que la hipótesis de la formación de la lámina obscura en los sedimentos laminados sea asociada con este mecanismo (Molina-Cruz *et al.*, 2001; Pérez-Cruz & Urrutia-Fucugauchi (2010). Sin embargo, los datos generados con la precipitación pluvial de los últimos 63 años no mostraron una relación directa con los eventos el ENSO (Fig. 29) de los cuales se sabe hay una correspondencia con años más lluviosos lo que podría estar generando la entrada de sedimento a la cuenca.

Por otro lado los datos inferidos del aporte terrígeno obtenido a través de la susceptibilidad magnética aunque fueron generados cada 5 mm muestran cambios importantes al parecer en una escala mayor, que podría ser secular. Sin embargo un incremento considerable en esta variable en los primeros 5 mm de la loza correspondiente a la última década, no mostró una clara correspondencia con un incremento en la precipitación, sino por el contrario hay un decremento en ésta. Esto sugiere que aún falta por conocer otros mecanismos tal vez más importantes, que participan en la formación del registro sedimentario en Cuenca Alfonso.

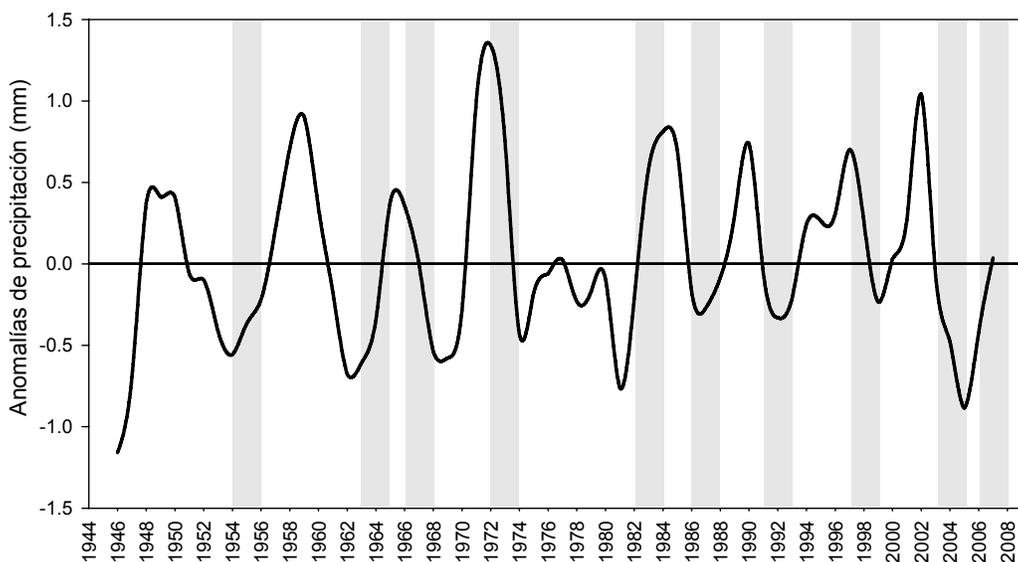


Figura 29. Anomalías de precipitación (mm) para la Cd. de La Paz desde 1945 a 2008, se consideró un promedio móvil de 3 puntos. En barras grises se resaltan los eventos “El Niño” que estuvieron presentes en este periodo.

Silicoflagelados conservados en el registro sedimentario de Cuenca Alfonso

Los flujos de silicoflagelados preservados en el registro sedimentario de Cuenca Alfonso alcanzaron un máximo de 3.8×10^2 esqueletos $\text{cm}^{-2} \text{año}^{-1}$, esto hace una diferencia notable de 7 órdenes de magnitud con respecto a los flujos observados en la trampa de sedimentos cuando se transforman a flujos anuales. Estas magnitudes corresponden a los estimados por Pias *et al.* (1986) para la una región ecuatorial del Pacífico y la región ecuatorial del Atlántico (Treppeke *et al.*, 1996). Sin embargo, en un sitio sobre el Ecuador (1°N - 139°W) hay una diferencia de un orden de magnitud mayor que los reportados en nuestro estudio Pias *et al.* (1986). La diferencia encontrada en nuestras observaciones de la trampa-sedimento pone de manifiesto el efecto de disolución que sufren estos organismos en la interface agua-sedimento, a diferencia de lo observado en su hundimiento en la columna de agua hasta la profundidad de la trampa de sedimentos donde se observó una similitud alta entre ambos componentes. Los escasos trabajos donde se estiman los flujos de silicoflagelados en registros sedimentarios similares al estudiado en Cuenca Alfonso, la mayoría de los datos publicados están referidos a flujos relativos. No obstante algunos estudios como el de Treppeke *et al.* (1996) reportan también un efecto de disolución de silicoflagelados en el sedimento superficial del Atlántico ecuatorial-oriental de hasta de un 98%, coincidiendo en magnitud con los estimados para Cuenca Alfonso. Otros estudios han documentado que la pérdida de material biogénico llega a ser tan considerable, que se presenta una disolución total de silicoflagelados en la interface agua-sedimento, como la observada en la región de Hawaii (Takahashi, 1991).

Por otro lado la composición de los 10 taxones de silicoflagelados encontrados en el registro sedimentario de Cuenca Alfonso, representa el mayor número documentado a la fecha para el Golfo de California. Ya que Murray & Schrader (1983) sólo encontraron 8 taxones, aunque cabe aclarar que *D. messanensis* forma *spinosa* la reportaron como *D. messanensis* forma *messanensis*; por su parte Schrader *et al.* (1986) identificaron solamente 7, mientras que Schrader & Baumgartner (1983) encontraron 6 taxones, conservados en los sedimentos de la parte central del golfo. Escencialmente en el periodo de 1968-1966 incrementaron la

mayoría de los taxones, sin embargo el taxones más abundante fue *D. messanensis* forma *spinosa*, este incremento se asocia con un periodo de mayor producción para el Pacífico Norte (Mantua *et al.*, 1997), lo cual favoreció el incremento de los silicoflagelados. *D. fibula* var *robusta* fue el segundo taxón en importancia con respecto a los flujos, ambos taxones dominaron el flujo total. Sin embargo, estos silicoflagelados no figuran como los más importantes en los trabajos realizados dentro del Golfo de California, por lo que este dominio podría estar en relación a la talla de sus esqueletos, *D. fibula* var *robusta* (promedio 57.19 μm \emptyset) es el silicoflagelado más grande dentro de este componente, en tanto que los esqueletos *D. messanensis* forma *spinosa* se encuentran dentro de las tallas intermedias (31.07 μm \emptyset) de estos organismos, por lo tanto estas peculiaridades de estos taxones podría ser la razón de un mejor hundimiento y preservación en el sedimento. Esto contrasta con todos los trabajos de silicoflagelados preservados en sedimentos del Golfo de California ya que mencionan a *O. pulchra* como la especie más abundante (Schrader & Baumgartner, 1983; Barron *et al.*, 2004). Sin embargo, en los sedimentos de Cuenca Alfonso este taxón aparentemente no tiene una buena preservación en el sedimento, por lo que cabe la posibilidad que exista un efecto de disolución selectiva, mediado por la degradación microbiana de la materia orgánica y la subsaturación de sílice de las aguas del fondo que están en contacto con el sedimento, como ha sido documentado para diatomeas por Kamatani (1982) y Holstein & Heinsen (2009). Otras consideraciones importantes están relacionadas con las características fisicoquímicas y la materia orgánica e inorgánica que recubre las frústulas de diatomeas (Kamatani, 1982), pero que podrían ser aplicadas también a silicoflagelados por el hecho de que sus esqueletos están constituidos de sílice.

Particularmente para *O. pulchra* su disolución podría estar en función de las particularidades de su esqueleto ya que generalmente constan de un anillo apical muy fino y espinas radiales muy delicadas, principalmente en los periodos de mayor abundancia de estos organismos según lo observado a través de la trampa de sedimentos, por lo que podríamos considerar que la señal de mayor productividad no permanece conservada en el sedimento y por tal razón tendría que tomarse con precaución su interpretación en el mismo. Estas desventajas podrían causar que su

tasa de disolución se haya incrementado por encima de otros taxones. Por lo tanto la designación de esta especie como indicadora de productividad, que se hiciera en este estudio tanto para columna de agua como para la trampa de sedimentos, debe ser usada con precaución al estudiar el registro sedimentario de Cuenca Alfonso. Observaciones similares para este taxón han sido sugeridas por Pias *et al.* (1996) para la región ecuatorial. Los efectos de disolución diferencial también han sido observados en una de las especies más abundantes de cocolitofóridos en los sedimentos superficiales de la Cuenca de Guaymas, Ziveri & Thunell (2000). Lo que soporta la idea de que exista un mecanismo similar de disolución selectiva sobre las especies o grupos más abundantes del fitoplancton.

Producción de silicoflagelados en función de la variabilidad decadal (1945-2008)

El registro sedimentario de 1945 a 2008 de silicoflagelados en Cuenca Alfonso presentó una gran variabilidad interdecadal. En esta escala de tiempo las variaciones de baja frecuencia en el Pacífico Norte han sido determinantes sobre la producción primaria de la región subtropical (Miller *et al.*, 2007).

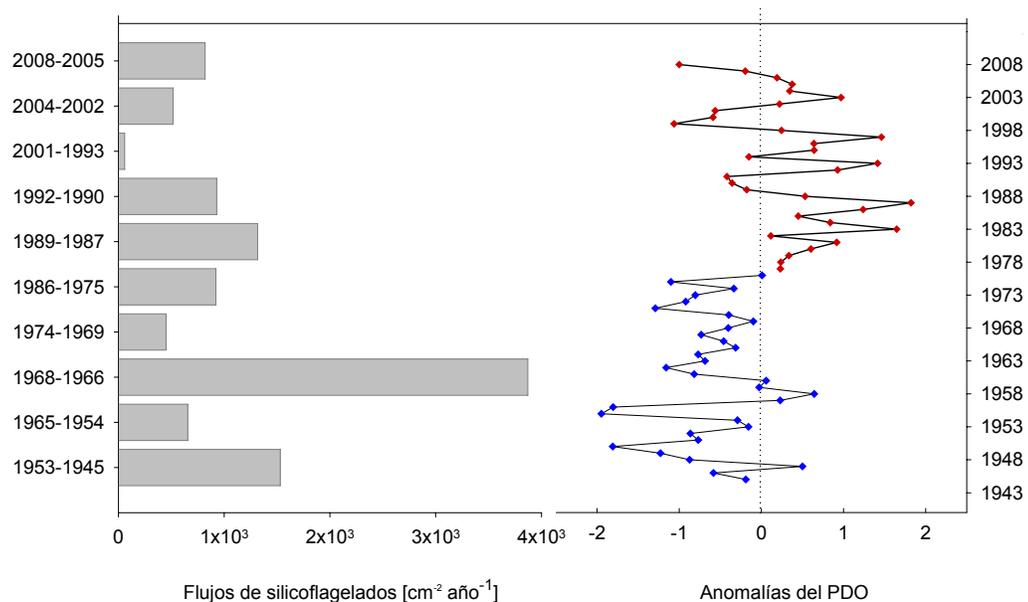


Figura 30. Serie de tiempo de 1945 a 2008 de los flujos de silicoflagelados (barras en grises) y anomalías del índice del PDO (línea), en marcador rojo la fase cálida del índice (1977-2008) y en azul la fase fría (1945-1976).

Uno de los principales patrones de variación en esta escala de tiempo ha sido referido como la Oscilación Decadal del Pacífico (Miller *et al.*, 2004), y en este sentido los sedimentos laminados de Cuenca Alfonso han permitido documentar la respuesta biológica asociada a este patrón, a través de los silicoflagelados, los cuales han sido útiles para distinguir cambios de régimen climático, como se observa en los flujos de silicoflagelados en este estudio (Fig. 30).

Condición fría (1945-1976)

La escala de tiempo del índice del PDO comprende un régimen frío desde 1945 a 1976 (Mantua *et al.*, 1997) que coincide con la tendencia al incremento en los flujos de los silicoflagelados y el flujo máximo de estos organismos observado entre 1968-1966. Estos datos sugieren que en este periodo prevalecieron condiciones propicias para el crecimiento de los organismos silíceos, además de coincidir con el incremento del taxón *D. epiodon*, el cual fue documentado principalmente en sedimentos superficiales del Pacífico occidental en asociación con la Corriente de California (Poelchau, 1976), por lo tanto su presencia dentro del Golfo de California estaría indicando un ingreso importante de este tipo de agua dentro del golfo durante éste régimen climático. Su presencia en sedimentos superficiales en la boca del golfo ha sido reportada por Murray & Schrader (1983) en asociación además con *D. calida* indicando una mezcla de condiciones frías y cálidas, lo que coincide también con los resultados presentados en este estudio en el capítulo I. La presencia de *D. epiodon* también ha sido usada para sugerir periodos de mayor intensidad de surgencias y alta productividad (Schrader & Baumgartner, 1983). No obstante, en Cuenca Alfonso se descarta la relación de esta especie con las surgencias, ya que no se observó ninguna evidencia de la ocurrencia de este proceso físico.

Como parte de la variabilidad climática observada en el periodo decadal frío (1945 a 1976), se encuentran los eventos “La Niña” (LN) (Fig. 31), algunos de ellos sobresalientes, como el evento LN (1954-1956), el cual coincide perfectamente con el segundo incremento de los taxones *D. epiodon* y *O. pulchra*, de tal manera que

ambos taxones pueden ser considerados como indicadores de productividad. A partir del registro sedimentario se ha sugerido que durante estos eventos existe una intensificación de la Corriente de California hacia el sur y que penetra la porción sureña del Golfo de California (Schrader & Baumgartner, 1983), esto ha sido basado en la presencia dentro del golfo, de especímenes de *D. epiodon* y *D. speculum* quienes son propios de las regiones subárticas y de la Corriente de California respectivamente. Esta situación no sólo ha sido observada en series de tiempo decadales sino también en eventos climáticos de escala mayor, como La Pequeña Edad de Hielo (PEH) (Barron *et al.*, 2003). De este modo la presencia de *D. epiodon* y el incremento de la especie indicadora de condiciones eutróficas (*O. pulchra*) sustentan estas interpretaciones en el sitio de Cuenca Alfonso.

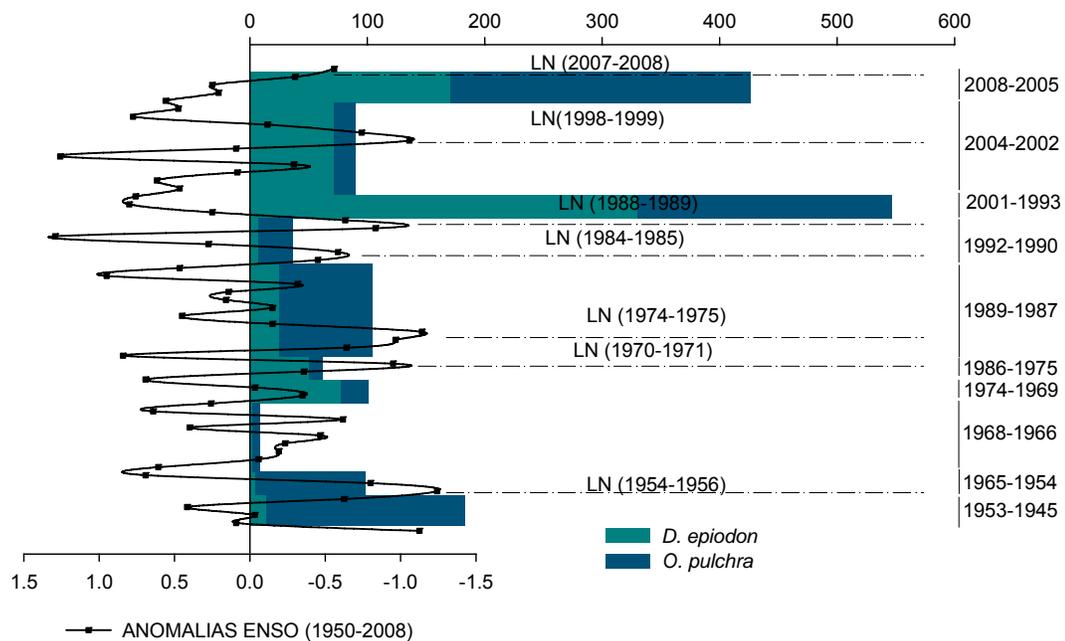


Figura 31. Serie de tiempo de los flujos de silicoflagelados indicadores de condiciones frías (1945 a 2008, en barras) contrastadas con anomalías negativas de los eventos “La Niña” desde 1950 a 2008, señalados con líneas punteadas. http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml

Condición cálida (1977-2008)

Una condición cálida a partir de 1977 hasta la fecha coincide con la tendencia al decremento en los flujos de estos organismos (Fig. 32). Sin embargo, al mismo tiempo se observó un incremento en los taxones *D. fibula* var *robusta*, *D. calida*, *D. messanensis* forma *spinosa*, *D. californica*, los cuales han sido útiles para interpretar eventos “El Niño” (EN) como el de 1982-1983 en el cual se ha documentado con los trabajos de Pisias *et al.* (1986) y Pérez-Cruz & Molina-Cruz (1988) un dominio de silicoflagelados de condiciones cálidas en la región ecuatorial y sur del Golfo de California respectivamente. En tanto que el evento EN (1997-1998) que fue considerado uno de los más fuertes registrados hasta el presente (McPhaden, 1999), coincidió no sólo con un decremento en el flujo total, sino también en el incremento de los taxones de condiciones ecuatoriales. Durante estas condiciones un 46 % del flujo de *D. fibula* var *robusta* correspondió a esqueletos malformados (Lámina 3).

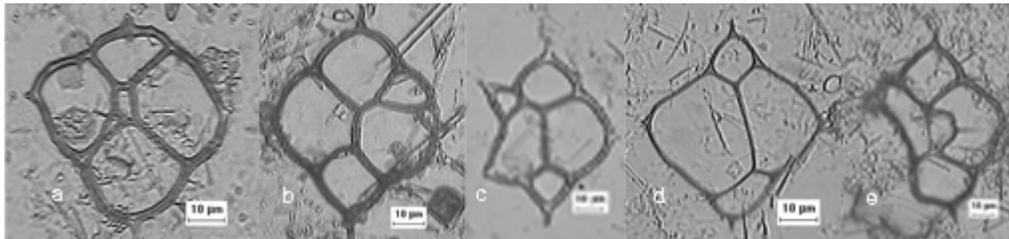


Lámina 3. Malformaciones de *D. fibula* var *robusta* observadas tanto en trampa de sedimentos así como en sedimento. a,b,c, presentan ventanas adicionales en sus esqueletos; d, esqueleto de ventanas amplias; e) anillo plegado.

En la trampa de sedimentos fueron observadas estas mismas variaciones fenotípicas del taxón, en los periodos de mayor incursión de agua ecuatorial durante los ENSO que se manifestaron en la serie de tiempo analizada, por lo tanto esto sustenta la interpretación trasladada al registro de silicoflagelados conservado en el sedimento durante este periodo de tiempo, por lo que esto sugiere que ante condiciones adversas en el ambiente habrá una respuesta desfavorable en los esqueletos de estos organismos, así como lo señala también Takahashi (1991), no obstante este mismo autor (com. pers.) ha observado una respuesta similar en ambientes eutrofizados.

Los cambios multidecadales mostrados con el registro sedimentario de ~63 años coincidieron con los cambios documentados en la escala decadal. De manera particular los cambios en esta escala corresponden a las variaciones decadales del PDO y tiene una correspondencia con los cambios de régimen que han modificado el océano.

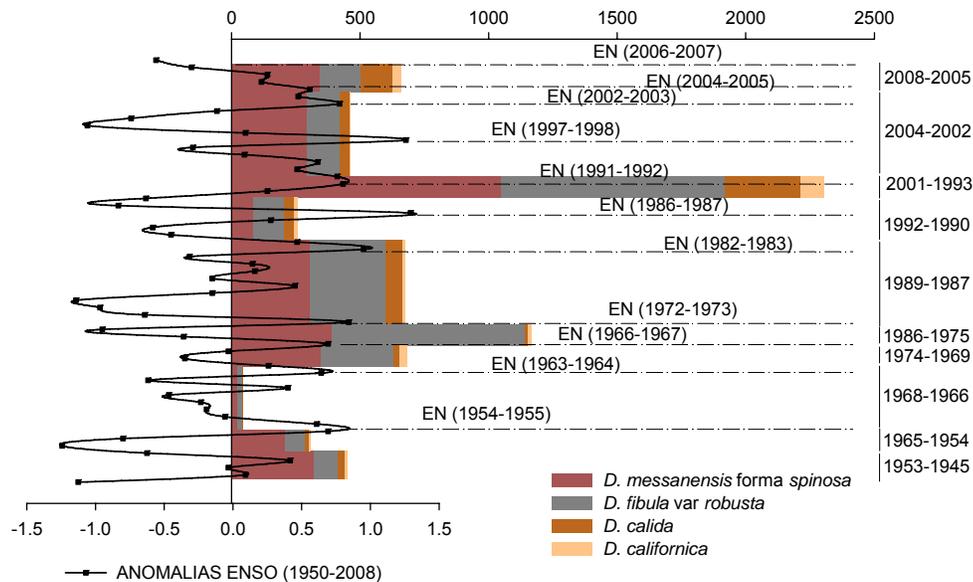


Figura 32. Serie de tiempo de los flujos de silicoflagelados indicadores de condiciones cálidas (1945 a 2008, en barras) contrastadas con anomalías positivas de los eventos “El Niño” (EN) desde 1950 a 2008, señalados a través de la líneas punteadas. http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml.

Nuestra serie incluye solo dos cambios de régimen de 1947 y 1977, sin embargo con la resolución que se cuenta, estos no se aprecian muy bien, pero el cambio de régimen que está siendo documentado en esta última década al parecer coincidió con el EN 1997-1998 del cual se sabe ha repercutido negativamente en muchos ecosistemas (Bakun, 2004) y coincide con una disminución en los flujos de los silicoflagelados, en el registro sedimentario de Cuenca Alfonso. En torno al cambio de régimen de 1976-1977 Miller *et al.* (2004) han documentado una tendencia al calentamiento sobre el Sistema de la Corriente de California señalando que las causas de esta disminución estuvieron en función de la deficiencia en el suministro de nutrientes y una reducción de CO₂ en la interface aire-mar desde el

Pacífico Ecuatorial. Lo que suscitó efectos negativos sobre la producción primaria a partir de estos años. En este sentido las evidencias han sido demostradas en diferentes grupos de organismos (Mantua *et al.*, 1997; Bakun, 2004). Reconstrucciones paleoclimáticas con esta misma interpretación se han realizado no solamente en escala decadal sino también en la escala secular, como en el caso de los estudios de Barron *et al.* (2004) y Barron & Bukry (2007) quienes discuten que en los periodos más cálidos durante el Holoceno, fue patente el incremento de silicoflagelados con preferencias por cuerpos de agua cálidos.

Los resultados de esta investigación llevan a reconocer el acoplamiento físico-biológico ante la variabilidad climática sobre la región suroccidental del Golfo de California, manifestando la sensibilidad del sitio para documentar los cambios en el clima que ocurren directa e indirectamente en la región y que modifican las condiciones oceánicas desde un contexto interanual e interdecadal. Por lo tanto este sitio tiene una posición geográfica privilegiada que permite documentar una gama de acontecimientos climáticos, no sólo regionales sino globales.

VIII CONCLUSIONES

1. Los resultados de la trampa de sedimentos mostraron que hay una importante variabilidad estacional, interanual y una tendencia decadal en la exportación de los silicoflagelados desde la zona eufótica (Z_{eu}) estrechamente relacionada a la dinámica y productividad primaria de la columna de agua, así como a la variabilidad climática decadal a escala de la Cuenca del Pacífico.
2. La variabilidad estacional de los silicoflagelados está determinada por tres incrementos: el más substancial aparece desde finales de otoño-inicios de invierno, y está influenciado de manera regional a través de los vientos del noroeste que prevalecen en este periodo. Durante primavera la activación local de un giro ciclónico suministra nutrientes hacia la Z_{eu} , mientras que en verano la ocurrencia de fenómenos meteorológicos favorece el ingreso de nutrientes desde la costa peninsular a la Bahía.
3. La alta similitud entre el flujo vertical de los silicoflagelados y su producción en la Z_{eu} sugieren mecanismos eficientes de hundimiento de estos organismos en Cuenca Alfonso, existiendo un desfase promedio entre ambos estratos de 3.5 semanas que se reduce a aproximadamente 1 semana en los periodos de mayor producción.
4. La correlación que existe entre *O. pulchra*, con los nutrientes oxidados sugiere su capacidad fisiológica para captar estos nutrientes antes que otros taxones, lo que probablemente determinó que fuera la especie dominante en el flujo total de silicoflagelados, en todos los periodos de crecimiento de estos organismos.
5. Los patrones de variabilidad interanual extraídos con los flujos de los silicoflagelados, mostraron que la región de Cuenca Alfonso es sensible a la variabilidad climática que ocurren en la zona ecuatorial oceánica y costera relacionada con tres eventos ENSO en verano de 2002, 2004 y 2006, y la ocurrencia del evento decadal “El Niño Modoki”. Ambos determinaron el ingreso

de silicoflagelados de afinidad cálida. Así como un evento de intensificación de la Corriente de California entre 2002-2006. Todo esto sustenta que la región sur del Golfo de California es afectada por las teleconexiones extratropicales.

6. La buena preservación de la columna sedimentaria y un ajuste casi perfecto en la curva de decaimiento del ^{210}Pb , definió el ciclo de depositación del par de láminas de ~3 años, lo que permitió establecer un marco geocronológico del año 1945 al 2008.
7. Los resultados del registro sedimentario mostraron una alta variabilidad decadal asociada al cambio de régimen de 1977, marcado por la presencia de silicoflagelados de afinidades distintas. Además de una disolución selectiva sobre *O. pulchra* la especie indicadora de condiciones productivas.

IX BIBLIOGRAFÍA

- Alexander, A.M., I. Blade, M. Newman, J.R. Lanzante, N.C. Lau & J.D. Scott. 2002. The Atmospheric Bridge: The Influence of ENSO Teleconnections on Air Sea Interaction over the Global Oceans. *Journal of Climate* 15: 2205-2231.
- Alexander, M.A. 2010. Extratropical Air-Sea Interaction, SST Variability and the Pacific Decadal Oscillation (PDO). *En: Sun, D. & F. Bryan. Climate Dynamics: Why Does Climate Vary.* Unión Geofísica Americana (en prensa).
- Allredge, A.L. & G.A. Jackson. 1995. Aggregation in Marine Systems. *Deep Sea Research II* 42:1-7.
- Álvarez-Borrogo, S. & J.R., Lara-Lara. 1991. The Physical Environment and Primary Productivity of the Gulf of California. *En: Simonett, B.R.T. & J.P. Dauphin, The Gulf and Peninsular Province of the Californias. American Association of Petroleum Geologists Memoir* 47: 555-567.
- Álvarez-Gómez, I.G. 2007. Flujos de Silicoflagelados en la Cuenca Alfonso, Bahía de La Paz, Golfo de California. Tesis de Licenciatura. Instituto Tecnológico de los Mochis. Ahome, Los Mochis, Sin. 89 p.
- Alvarez-Sánchez, L.G., M.R. Stevenson & B. Wyatt. 1978. Circulación y masas de agua en la region de la boca del Golfo de California en la primavera de 1970. *Ciencias Marinas* 5(1): 57-69.
- Ashok, K., S.K. Behera, S.A. Rao, H. Weng & T. Yamagata. 2007. El Niño Modoki and this possible teleconnection. *Journal of Geophysical Research* 112 (C11007): 1-27.
- Bakun, A. 2004. Regimen shifts. *En: Robinson, R.A., J. McCarthy, B.J. Rothschild (Eds.), The Sea.* Harvard University Press, Cambridge, M.A. 13: 971-1018.

- Barron, A.J., D. Bukry & J.L. Bischoff. 2003. A 2000-yr-long record of climate from the Gulf of California. *En: West, G.J. Blomquist, N.L. (Eds.), Proceedings of the Nineteenth Pacific Climate Workshop, ASsilomar, Pacific Grove, CA. March 3-6, 2002. Technical Report 71, Interagency Ecological Program for the San Francisco Estuary, Sacramento, CA, pp 11-21.*
- Barron, A.J., D. Bukry & J.L. Bischoff. 2004. High resolution paleoceanography of the Guaymas Basin, Gulf of California, during the past 15 000 years. *Marine Micropaleontology* 50: 185-207.
- Barron, A.J. & D. Bukry. 2007. Solar forcing of Gulf of California climate during the past 2000 yr suggested by diatoms and silicoflagellates. *Marine Micropaleontology* 62: 115-139.
- Baumgartner, R.T., J. Michaelson, L.G. Thomposon, G.T. Shen, A. Soutar & R.E. Casey. 1989. The recording of interannual climatic change by high-resolution natural systems: tree-rings, coral bands. Glacial ice layers, and marine varves, 1-14. *En: Peterson, H.D. (Ed). Aspects of Climate Variability in the Pacific and the Western Americas. Geophysical Monograph* 55.
- Baumgartner, R.T., Ferreira, B.V. & P.M. Hentz. 1991. Varve formation in the Central Gulf of California: a reconsideration of the origin of the dark laminae from the 20th century varve record. *En: Dauphin, J. & Simoneit (Eds). The Gulf and Peninsular Province of the Californias. American Association of Petroleum Geology Memoir* 47: 617-635.
- Bernal-Franco, G.R. 2001. Registro paleoceanográfico en los sedimentos laminados de la Cuenca de La Paz, margen occidental del bajo Golfo de California. Tesis de Doctorado, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenad. Ensenada, B.C. 110pp.
- Boltovskoy, D. 1995. Formation and deformation of the microfossil record: plankton, sediment traps and surface sediments. 1 seminario Latinoamericano de Geoquímica Orgánica no Meio Ambiente y 1 Workshop sobre

Paleoceanografía com enfase em Micropaleontología e Estratigrafía. Gramado, Brasil. Disertación invitada.

- Brand, L.E. 1994. Physiological ecology of marine coccolithophores 39-49. En: Winter, A. & Siesser, W.G. (Eds). "Coccolithophores". Cambridge University Press, Cambridge, UK .
- Brinton, E., A. Fleminger & D. Siegel-Causey. 1986. The temperature and tropical planktonic biotas of the Gulf of California. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Report* 26: 228-266.
- Brinton, E. & A.W. Townsend. 1980. Euphausids in the Gulf of California the 1957 Cruises. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Report* 21: 211-236.
- Buesseler, K.O., A.N. Antia, M. Chen, S.W. Fowler, W.D. Gardner, O. Gustafsson, K. Harada, A.F. Michaels, M. Rutgers van der Loeff, M. Sarin, D.K. Steinberg & T. Trull. 2007. An assessment of the use of sediment traps for estimating upper ocean particles fluxes. *Journal of Marine Research* 65:345-416.
- Castro, R.A. Mascarenhas, R. Durazo & L.M. Soto. 2003. Características termohalinas de la Corriente de California en la región de la entrada al Golfo de California. X Congreso Latinoamericano de Ciencias del Mar. San José Costa Rica 22-16 de septiembre.
- Chhak, K. & E. Di Lorenzo. 2007. Decadal variations in the California Current upwelling cells. *Geophysical Research Letters* 34(L14604): 1-6.
- Chávez, P.F., J. Ryan, S.E.C. Lluch & M. C. Niquen. 2003. From Anchovies to Sardines and Back: Multidecadal Change in the Pacific Ocean. *Science* 299: 217-221.
- Courtillot, V., Y. Gallet, J.L. Le Mouél, F. Fluteau & A. Genevey. 2007. Are there connections between the Earth's magnetic field and climate?. *Earth and Planetary Science Letters* 253: 328-339.

- Cruz-Orozco, R., C. Martínez-Noriega & A. Mendoza-Maravillas. 1996. Batimetría y sedimentos de Bahía de la Paz, B.C.S. México. *Oceánides* 11: 21-27.
- De Diego, T. & R.G. Douglas. 1999. Oxygen-related sediment microfabrics in modern "Black shales", Gulf of California, Mexico. *Journal of Foraminiferal Research* 29(4): 453-464.
- Di Lorenzo, E., N. Schneider, K.M. Cobb, J.C. Furtado & M.A. Alexander. 2009a. ENSO and the North Pacific Gyre Oscillation: an integrated view of Pacific decadal dynamics. (en prensa) *Geophysical Research Letters* 35: L12607, doi:10.1029/2008GL034185.
- Di Lorenzo, E., J. Fietcher, N. Schneider, A. Bracco, A.J. Miller, P.J.S. Franks, S.J. Bograd, A.M. Moore, A.C. Thomas, W. Crawford, A. Peña & A.J. Hermann. 2009b. Nutrient and salinity decadal variations in the central and eastern North Pacific. *Geophysical Research Letters* 36 (L14601) 1-6.
- Douglas, M.W., R.A. Maddox, K. Howard & S. Reyes. 1993. The Mexican monsoon. *American Meteorological Society* 6: 1665-1677.
- Douglas, G.R., S.D. Gorsline, A. Grippio I. Granados & O. González-Yajimovich. 2001. Holocene Ocean-Climate Variations in Alfonso Basin, Gulf of California, México. *PACLIM Conferences Proceedings* 7-20.
- Douglas, R., O. Gonzalez-Yajimovich, J. Ledesma-Vazquez & F. Staines-Urias. 2007. Climate forcing, primary production and the distribution Holocene biogenic sediments in the Gulf of California. *Quaternary Science Reviews* 26: 115-129.
- Ducklow, W.H., C.D. Scott & Steinberg D.K. 2009. Contributions of Long-Term Research and Time-Series Observations to Marine Ecology and Biogeochemistry. *Annual Review of Marine Science* 1: 279-302.
- Durazo, R. 2009. Climate and upper ocean variability off Baja California, Mexico: 1997-2007. *Progress in Oceanography* (en prensa) doi:10.1016/j.pocean.2009.07.043.

- Durazo, R., G.C. Gaxíola, B. Lavaniegos, R.V. Castro, J.V. Gómez & A. Da S. Mascareñas Jr. 2006. Oceanographic conditions west of the Baja California coast, 2002-2003: A weak El Niño and subarctic water enhancement. *Ciencias Marinas* 31 (3): 537-552.
- Fuentes-Yaco, C., J.E. Valdez-Holguín, T. Platt, S. Sathyendranath, J. Halfar, L. Godínez-Orta, J.M. Borges & E. Devred. 2006. Biological impact of Hurricane Ignacio (2003) in the eastern Pacific Ocean as observed through MODIS data. *Remote Sensing of the Marine Environment* 6406: 60612.
- García-Reyes, M. 2005. Procesos físicos que controlan la variabilidad estacional de la temperatura superficial del mar y de la concentración de clorofila a la entrada al Golfo de California. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 51 p.
- Gaxíola-Castro, G. & S. Alvarez-Borrego. 1984. Relación fotosíntesis-irradiación en el fitoplancton de aguas costeras del noroeste de Baja California. *Ciencias Marinas* 10(3): 53-66.
- Gaxíola-Castro, G. & S. Alvarez-Borrego. 1986. Productividad primaria del Pacífico Mexicano. *Ciencias Marinas* 12: 3.
- Gaxíola-Castro, G., R. Durazo, B. Lavaniegos, M.E. De La Cruz-Orozco, R. Millán-Núñez, L. Soto-Mardones & J. Cepeda-Morales. 2008. Respuesta del ecosistema pelágico a la variabilidad interanual del océano frente a Baja California. *Ciencias Marinas* 34: 263-270.
- Glantz, H.M. 1997. Currents of Change "El Niño's Impact on Climate and Society". Cambridge University. EUA. 189 p.
- Glen, M.M. & A.C. Rosly. 2005. Variations in the Pacific Decadal Oscillation over the past millennium. *Geophysical Research Letters* 32 (L08703): 1-4.
- Goericke, R., E. Venrick, S.J. Bograd, A. Huyer, R. L. Smith, A. Mantyla, F.B. Schwing, P.A. Wheeler, R. Hooff, W. T. Peterson, F. Chavez, C. Collins, B.

- Marinovic, N. Lo, G. Gaxiola-Castro, R. Durazo, D. Hyrenbach & W. J. Sydeman. 2005. The state of the California Current: 2004-2005 still cool?. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Report* 46: 32-71.
- Goericke, R., E. Venrick, T. Koslow, W.J. Sydeman, F.B. Schwing, S.J. Bograd, W.T. Peterson, R.T. Emmett, J.R. Lara-Lara, G. Gaxiola-Castro, J. Gómez-Valdéz, K.D. Hyrenbach, R.W. Bradley, M.J. Weise, J.T. Harvey, C. Collins, & N.C.H. Lo. 2007. The state of the California Current, 2006-2007: regional and local processes dominate. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Report* 48: 33-66.
- González-Yajimovich, O., G.R. Douglas & S.D. Gorsline. 2005. The preserved carbonate record in Holocene sediments of the Alfonso and Pescadero basins, Gulf of California, Mexico. *Geologist Association* 116: 315-330.
- Hasle, G.R. & G.A. Fryxell. 1970. Diatoms: cleaning and mounting for light and electron microscopy. *Transaction of the American Microscopical Society* 89(4): 469-474.
- Hays, C.G., A.J. Richardson & C. Robinson. 2005. Climate change and marine plankton. *Trends in Ecology and Evolution* 20(6): 337-344.
- Herrera-Cervantes, H. 2008. Firma del ENSO en el Golfo de California: temperatura superficial del mar y biomasa fitoplanctonica. Tesis de Doctorado, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. La Paz, B.C.S. 78p.
- Hernández-Becerril, D.U. & E. Bravo-Sierra. 2001. Planktonic silicoflagellates (Dictyochophyceae) from the Mexican Pacific Ocean. *Botánica Marina* 44:417-423.
- Holstein, J.M. & C. Hensen. 2009. Microbial mediation of benthic of silica biogenic dissolution. *Geo-Marine Letters* DOI 10.1007/s00367-009-0181-3.

- Jiménez-Illescas, A.R. 1996. Análisis de los Procesos Barotrópicos y Baroclínicos en La Bahía de La Paz, B.C.S. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 193 p.
- Kamatani, A. 1982. Dissolution Rates of Silica from Diatom Decomposing at Various Temperatures. *Marine Biology* 68: 91-96.
- Kahru, M., R. Kudela, M. Manzano-Sarabia & G. B. Mitchell. 2009. Trends in primary production in the California Current detected with satellite data. *Journal of Geophysical Research* 114 (C02004): 1-7.
- Kemp, A.E.S. 1995. Laminated Sediments from Coastal and Open Ocean Upwelling Zones: What variability do they record?. *En*: Summerhayes, C.P., K.C. Emeis, M.V. Angel, R.L. Smith & B. Zeitzschel (Eds). *Upwelling in the Ocean Modern Processes and Ancient Records*. Berlin, Germany pp 239-258.
- Lange B.C., U.T. Treppke & G. Fischer. 1994. Seasonal diatom fluxes in the Guinea Basin and their relationships to trade winds, hydrography and upwelling events. *Deep-Sea Research I* 41(5/6): 859-878.
- Lange, B.C. I.A. Weiheimer, M.H.F. Reid & C.R. Thunell. 1997. Sedimentation patterns of diatoms, radiolarians, and silicoflagellates in Santa Barbara Basin, California. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Report* 38: 161-170.
- Lange, B.C. I.A. Weiheimer, M.H.F. Reid, E. Tappa & C.R. Thunell. 2000. Response of Siliceous microplankton from the Santa Barbara Basin to the 1997-98 El Niño Event. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Report* 41: 186-193.
- Lara-Lara, J.R & J.E., Valdez-Holguín. 1988. Biomasa y productividad primaria del Golfo de California por fracción de tamaños durante primavera de 1984. *Ciencias Marinas* 14:1-14.

- Latiff, M. & T.P. Barnett. 1996. Decadal Climate Variability over the North Pacific and North America: Dynamics and Predictability. *American Meteorological Society* 9: 2407-2423.
- Lavín, M.F., E. Palacios-Hernández, C. Cabrera. 2003. Sea Surface Temperature Anomalies in the Gulf of California. *Geofísica Internacional* 24: 363-375.
- Leclerc, J.A. & H. Schrader. 1987. Variations of upwelling intensity record in varved sediment from the Gulf of California during the past 3,000 years. *Nature* 329: 146-149.
- Lipps, J.H. 1993. Silicoflagellates, 141-154. *En: McCartney, K. (Ed.) Fossil Prokaryotes and Protist. Blackwell Scientific Publications, New York. 342 p.*
- Lohmann K. & M. Latiff. 2005. Tropical Pacific Decadal Variability and the Subtropical-Tropical Cells. *Journal of climate* 18: 5163-5178.
- Mann, E.M. 2006. Climate over the past two millennia. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 35:111–36.
- Mantua, N.J., Steven R. Hare, Yuan Zhang, John M.Wallace & Robert C. Francis. 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bulletin of the American Meteorological Society* 78: 1069-1079.
- Martínez-López, A., R. Cervantes-Duarte, A. Reyes-Salinas & J.E. Valdez-Holguín. 2001. Cambio estacional de clorofila a en la Bahía de La Paz, B.C.S. México. *Hidrobiológica* 11(1): 45-42.
- McCartney, K. 1993. Chrysophytes, *En: Lipps (Ed.) Fossil Prokaryotes and Protists. Blackwell Scientific Publications, California. pp 141-154.*
- McPhaden, M.J. 1999. Genesis and evolution of the 1997-98 El Niño. *Science* 283 950:954.

- McPhaden, M.J. 2004. Evolution of the 2002-2003 El Niño. *Bulletin American Meteorological Society* 85: 677-695.
- McPhaden, M.J. 2008. Evolution of the 2006-2007 El Niño: the role intraseasonal to interannual time scale dynamics. *Advances in Geosciences* 14: 219-230.
- Miller, A.J. & N. Schneider. 2000. Interdecadal climate regime dynamics in the North Pacific Ocean: Theories, observations and ecosystem impacts. *Progress in Oceanography* 47: 355-379.
- Miller, A.J., F. Chai, S. Chiba, J.R. Moisan & D.J. Neilson. 2004. Decadal-scale climate and ecosystem interactions in the North Pacific Ocean. *Journal of Oceanography* 60: 163-188.
- Miller, W.D., H.Jr.W. Lawrence & A.E. Jason. 2006. Hurricane Isabel generated an unusual fall bloom in Chesapeake Bay. *Geophysical Research Letters* 33 (L06612): 1-4.
- Miller, J. A., M.A. Alexander, G.J. Boer, F. Chai, K. Denman, D. J. Erickson III, R. Frouin, A.J. Gabric, E.A. Laws, M.R. Lewis, Z. Liu, R. Murtugudde, S. Nakamoto, D.J. Neilson, J. R. Norris, J.C. Ohlmann, R.I. Perry, N. Schneider, K. M. Shell & A. Timmermann. 2007. Potential feedbacks between Pacific Ocean ecosystems and interdecadal. *American Meteorological Society* DOI: 10.1175/BAMS-84-5-617.
- Molina-Cruz, A., L. Pérez-Cruz & M.A. Monreal-Gómez. 2002. Laminated sediments in the Bay of La Paz, Gulf of California: a depositional cycle regulated by pluvial flux. *Sedimentology* 49: 1401-1410.
- Monreal-Gómez, M.A., A. Molina-Cruz & D.A. Salas de León. 2001. Water masses and cyclonic circulation in Bay of La Paz, Gulf of California, during June 1998. *Journal of Marine Systems* 30: 305-315.

- Murray, D. W. 1982. Paleo-Oceanography of the Gulf of California Based on Silicoflagellates from Marine Varved Sediments. Thesis Master Science. Oregon State University. Oregon. 126 p.
- Murray, D. & Schrader, H. 1983. Distribution of silicoflagellates in plankton and core top samples from the Gulf of California. *Marine Micropaleontology* 7: 517-539.
- Nava-Sánchez, E.H., D.S. Gorsline, R. Cruz-Orozco & L.G. Orta. 1999. The El Coyote fan delta: A wave-dominated example from the Gulf of California, Mexico. *Quaternary International* 56: 129-140.
- Nava-Sánchez, E.H., D.S. Gorsline & A. Molina-Cruz. 2001. The Baja California peninsula borderland: structural and sedimentological characteristics. *Sedimentary Geology* 144: 63-82.
- Onodera, J. & K. Takahashi. 2005. Silicoflagellates fluxes and environmental variations in the northwestern North Pacific during December 1997-may 2000. *Deep-Sea Research I* 52 (1): 371-388.
- Osawa, M., K. Takahashi & J.B. Hay. 2005. Shell-bearing plankton fluxes in the central Black Sea, 1989-1991. *Deep-Sea Research I* (52): 1677-1689.
- Overland, J., S. Rodionov, S. Minobe & N. Bond. 2005. North Pacific regime shifts: Definitions, issues and recent transitions. *Progress in Oceanography* 77: 92-102.
- Paeth, H., A. Hense, R. Glowienka-Hense, R. Voss & U. Cubasch. 1999. The North Atlantic Oscillation as an indicator for greenhouse-gas induced regional climate change. *Climate Dynamics* 15: 953-960.
- Pérez-Cruz, L. 2000. Estudio Paleoc oceanográfico y Sedimentológico Holocénico de la Bahía de La Paz, Golfo de California. Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 167 p.

- Pérez-Cruz, L. & A. Molina-Cruz. 1988. El Niño 1983: Efecto sobre la distribución de los silicoflagelados del Golfo de California. *Ciencias Marinas* 14(3): 9-38.
- Pérez-Cruz, L. 2006. Climate and ocean variability during the middle and late Holocene recorded in laminated sediments from Alfonso Basin, Gulf of California, Mexico. *Quaternary Research* 65: 401-410.
- Pérez-Cruz, L. & Urrutia-Fucugauchi, J. 2010. Magnetic mineral study of Holocene marine sediments from the Alfonso Basin, Gulf of California – implications for depositional environment and sediments sources. *Geofísica Internacional* 48(3): 305-318.
- Pérez-Cruz, L. & Urrutia-Fucugauchi, J. 2010. Holocene laminated sediments from the southern Gulf of California: geochemical, mineral magnetic and microfossil study. *Journal Quaternary Science* (en prensa) ISSN 0267-8179. DOI: 10.1002/jqs.1386.
- Pierce, D.W., T.P. Barnett & M. Latif. 2000. Conections between the Pacific Ocean tropics and midlatitudes on decadal timescales. *Journal of Climate* 13: 1173-1194.
- Pisias, G.N., W.G. Murray & A.K. Roelofs. 1986. Radiolarian and silicoflagellates response to oceanographic changes associated with the 1983 El Niño. *Nature* 320: 259-262.
- Poelchau, H.S. 1976. Distribution of Holocene silicoflagellates in North Pacific Sediments. *Micropaleontology* 22 (2): 164-193.
- Robinson, B.A., N.E. Robinson & W. Soon. 2007. Enviromental effects of increased atmospheric carbon dioxide. *Journal of American Physicians and Surgeons* 12: 79-90.
- Robles-Gil Mestre, S.M. 1998. El clima en la ciudad de La Paz, Baja California Sur. Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 228 p.

- Romero, O.E., D. Hebbeln, G. Wefer. 2001. Temporal and spatial variability in export production in the SE Pacific Ocean: evidence from siliceous plankton fluxes and surface sediments assemblages. *Deep-Sea Research I* 48: 2673-2697.
- Romero, O.E., C.B. Lange & G. Wefer. 2002. Interannual Variability (1988-1991) of siliceous phytoplankton fluxes off Northwest Africa. *Journal of Plankton Research* 24 (10): 1035-1046.
- Sancetta, C. 1990. Seasonal occurrence of silicoflagellates morphologies in different environments of the eastern Pacific Ocean. *Marine Micropaleontology* 16: 285-291.
- Sánchez-Velasco, L., E. Beier, C. Avalos-García & M.F. Lavín. 2006. Larval fish assemblages and geostrophic circulation in Bahía de La Paz and the surrounding southwestern region of the Gulf of California. *Journal of Plankton Research* 28(11): 1-18.
- Schrader, H. & T. Baumgartner. 1983. Decadal variation of upwelling in the central Gulf of California, 247-276. *En: Thiede & E. Suess (Eds.) Coastal Upwelling, this Sedimentary Record of Ancient Coastal Upwelling.* Plenum Press, New York, London.
- Schrader, H., N. Piasias & G. Cheng. 1986. Seasonal variation of silicoflagellates in phytoplankton and varved sediments in the Gulf of California. *Marine Micropaleontology* 10:207-233.
- Schwing, B.F., T. Murphree & P.M. Green. 2002. The Northern Oscillation Index (NOI): A new climate Index for the Northeast Pacific. *Progress in Oceanography*.
- Shipe, R.F., U. Passow, M.A. Brzezinski, W.M. Graham, D.K. Pak, D.A. Siegel & A.L. Alldredge. 2002. Effects of the 1997-98 El Niño on seasonal variations in suspended and sinking particles in the Santa Barbara Basin. *Progress in Oceanography* 54:105-107.

- Silverberg, N., A. Martínez-López, S. Aguiñiga, J.D. Carraquiri, N. Romero, E. Shumilin & Soledad-Cota. 2004. Contrast in sedimentation flux below the southern California Current in late 1996 and during the El Niño event of 1997-1998. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 59:575-587.
- Silverberg, N., E. Shumilin, F. Aguirre-Bahena, A.P. Rodríguez-Castañeda & D. Sapozhnikov. 2007. The impact of hurricanes on sedimenting particulate matter in the semid-arid Bahía de La Paz, Gulf of California. *Continental Shelf Research* 27: 2513-2522.
- Soutar, A. & J. D. Issacs. 1974. Abundance of pelagic fish during the 19th and 20th centuries as recorded in anaerobic sediment off the Californias. *Fisheries Bulletin* 72(2): 257-273.
- Stevenson, M.R. 1970. On the physical and biological oceanography near the entrance to the Gulf of California, October 1966-August 1967. *Inter-American Tropical Tuna Commission Bulletin* 4(3): 389-504.
- Takahashi, K. 1987. Seasonal fluxes of silicoflagellates and *Actiniscus* in the subarctic Pacific during 1982-1984. *Journal of Marine Research* 45: 397-425.
- Takahashi, K. 1989. Silicoflagellates as productivity indicators: Evidence from long temporal and spatial. Flux variability responding to hydrography in the Northeastern Pacific. *Global Biogeochemical Cycles* 3: 43-61.
- Takahashi, K. 1991. Silicoflagellates and *Actiniscus*: Vertical Fluxes at Pacific and Atlantic sediment trap stations. *Ocean Biocoenosis* 2 31p.
- Takahashi, K. & L.P. Blackwelder. 1992. The spatial distribution of silicoflagellates in the region of the Gulf Stream warm-core ring 82b: application to water mass tracer studies. *Deep-Sea Research* 39: 327-346.
- Thronsen, J. 1997. The Planktonic Marine Flagellates, 591-715. *En: Carmelo R. T. (Ed). Identifying marine phytoplankton. Elsevier, San Diego California.*

- Thunell, R., C. Pride, P. Ziveri, F.K. Muller, C. Sancetta & D. Murray. 1996. Plankton response to physical forcing in the Gulf California. *Journal of Plankton Research* 18(11): 2017-2026.
- Treppke, U.F., C.B. Lange & G. Wefer. 1996. Vertical fluxes of diatoms and silicoflagellates in the Eastern Equatorial Atlantic, and their contribution to the sedimentary record. *Marine Micropaleontology* 28: 73-96.
- Van Andel, T.H. 1964. Recent marine sediments of Gulf of California Marine Geology of the Gulf of California. *En: Van Andel, T.H. & G.G. Shor (Eds). Geological Society of America Bulletin* 101: 21-72.
- Venrick, E.L., F.M.H. Reid & C.B. Lange. 2003. Siliceous phytoplankton in the Santa Barbara Channel: A seven-year comparison of species in a near-bottom sediment trap and in water samples from the euphotic layer. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Report* 44:107-122.
- Villegas-Aguilera, M.M. 2009. Fitoplancton silíceo de la zona eufótica como señal de la productividad primaria en Cuenca Alfonso, Golfo de California. 2009. Tesis de Maestría. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. La Paz, B.C.S. 80p.
- Weng, H., K. Ashok, S.K. Behera, S.A. Rao & T. Yamagata. 2007. Impacts of recent El Niño Modoki on dry/wet conditions in the Pacific rim during boreal summer. *Climate Dynamics* 29: 113-129.
- Zhang, Y., J.M. Wallace & D.S. Battisti, 1997. ENSO-like interdecadal variability: 1900-93. *Journal of Climate* 10(5):1004-1020.
- Zamudio, L., E.H. Hurlburt, J.E. Metzger & O.M. Smedstad. 2002. On the evolution of coastally trapped waves generated by Hurricane Julliette the Mexican west coast. *Geophysical Research Letters* 29 (23): 2141-2144.
- Ziveri, P. & R.C. Thunell. 2000. Coccolitophore export production in Guaymas Basin Gulf of California: response to climate forcing. *Deep-Sea Research II* 47: 2073-2100.