

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA



**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS**

**FLUJOS DEL SÍLICE BIOGÉNICO COMO PROXY DE
PALEOPRODUCTIVIDAD MARINA EN CUENCA SOLEDAD, BAJA
CALIFORNIA, MÉXICO**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFÍA COSTERA**

PRESENTA

CHRISTINA VERÓNICA TREINEN CRESPO

Ensenada, Baja California

Julio 2016

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS
POSGRADO EN OCEANOGRAFÍA COSTERA

**FLUJOS DEL SÍLICE BIOGÉNICO COMO PROXY DE
PALEOPRODUCTIVIDAD MARINA EN CUENCA SOLEDAD, BAJA
CALIFORNIA, MÉXICO**

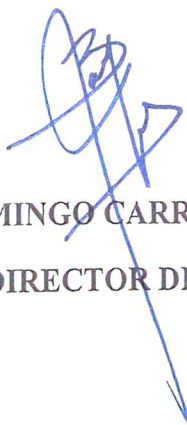
TESIS

QUE PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS NECESARIOS PARA
OBTENER EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS

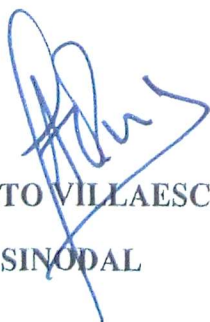
PRESENTA

CHRISTINA VERÓNICA TREINEN CRESPO

APROBADA POR



DR. JOSÉ DOMINGO CARRIQUIRY BERLTRÁN
DIRECTOR DE TESIS



DR. JULIO ALBERTO VILLAESCUSA CELAYA
SINODAL



DR. HÉCTOR GARCÍA NAVA
SINODAL

ÍNDICE

| | |
|---|-----------|
| DEDICATORIA | 4 |
| AGRADECIMIENTOS | 9 |
| RESUMEN | 11 |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 12 |
| 2. OBJETIVO | 14 |
| OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 14 |
| 3. METODOLOGÍA..... | 14 |
| 3.1. ÁREA DE ESTUDIO | 14 |
| <i>Oceanografía de la región del área de estudio</i> | 15 |
| 3.2. RECOLECTA DE NÚCLEOS DE SEDIMENTO | 16 |
| 3.3. MODELO DE EDAD..... | 17 |
| 3.4. SECCIONADO DEL NÚCLEO (MUESTREO) | 17 |
| 3.5. PROXYS PALEOCEANOGRÁFICAS PARA LA RECONSTRUCCIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD PRIMARIA | 17 |
| 3.5.1. <i>Clorinas</i> | 17 |
| 3.5.2. <i>Sílice Biogénico</i> | 18 |
| CAPÍTULO I: RECONSTRUCCIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD PRIMARIA MARINA EN CUENCA SOLEDAD MEDIANTE EL ANÁLISIS DE CLORINAS .. | 20 |
| 1.1. INTRODUCCIÓN | 20 |
| 1.2. OBJETIVO..... | 21 |
| 1.3. RESULTADOS | 21 |
| CAPÍTULO II: RECONSTRUCCIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD PRIMARIA MARINA EN CUENCA SOLEDAD MEDIANTE EL CONTENIDO DE SÍLICE BIOGÉNICO..... | 26 |
| 2.1. INTRODUCCIÓN | 26 |

| | |
|--|-----------|
| 2.2. OBJETIVO | 26 |
| 2.3. RESULTADOS | 26 |
| 5. DISCUSIÓN | 32 |
| DESACOPLAMIENTO ENTRE LAS PROXIES DE PRODUCTIVIDAD PRIMARIA MARINA | 33 |
| SURGENCIAS Y LA PRODUCTIVIDAD PRIMARIA RECONSTRUIDA | 34 |
| AGENTES FORZANTES DE LA VARIABILIDAD EN LA PRODUCTIVIDAD PRIMARIA MARINA EN LOS ÚLTIMOS 2000 AÑOS EN CUENCA SOLEDAD | 36 |
| MOVIMIENTO DE LA ITCZ Y SU INFLUENCIA EN LA PRODUCTIVIDAD PRIMARIA MARINA | 36 |
| LA VARIABILIDAD SOLAR COMO AGENTE DE VARIACIÓN EN LA PRODUCTIVIDAD PRIMARIA MARINA | 39 |
| LA OSCILACIÓN DECADAL DEL PACÍFICO | 40 |
| PRODUCTIVIDAD PRIMARIA MARINA DURANTE EL ANTROPOCENO (1600-PRESENTE) . | 43 |
| 6. CONCLUSIONES | 47 |
| 7. REFERENCIAS | 49 |
| 8. APÉNDICE | 53 |

LISTA DE FIGURAS Y TABLAS

Fig. 1. Distribución espacial del promedio anual de la temperatura superficial del océano (reconstruido con datos de *World Ocean Database*) para la región del área de estudio (Cuenca Soledad; 25°11.99'N, 112°43.99'W, señalada con el punto blanco). Corriente de California (CC; Flecha gris); contracorriente de Davidson (CCD; Flecha punteada blanca).....12

Fig. 1.1. Representación gráfica y simplificada de la molécula de clorina; producto después de que la molécula de clorofila ha perdido el fitol y el anillo de magnesio.....18

Fig. 1.2. Registro de Clorinas ($\mu\text{g/g}$) como indicador de productividad primaria marina en Cuenca Soledad. El sombreado indica los periodos climáticamente más importantes de acuerdo a Mann et al., 2009; Antropoceno definido por Lewis and Maslin (2015). Calibrada en años de la Era Común (CE, common era por sus siglas en inglés).....19

Fig. 1.3. Análisis espectral del registro de clorinas totales como proxy de productividad primaria marina realizado. Línea continua naranja indica la varianza corregida; Línea dorada discontinua 90% chi cuadrada; línea café discontinua es el 95% chi cuadrada; línea discontinua gris es el 99% chi cuadrada.....21

Fig. 1.4. Análisis espectral tipo wavelet realizado a la serie de clorinas totales ($\mu\text{g/g}$) utilizando el método de Morlet. La región sombreada es el cono de influencia, donde se reduce la varianza. *Edad Calibrada en años de la Era Común (CE, common era por sus siglas en inglés)*.....22

Fig. 2.1. Registro de Sílice Biogénico (%) como trazador de paleoproduktividad primaria marina en Cuenca Soledad. El sombreado indica los periodos climáticamente más importantes de acuerdo a Wang et al., 2012 y Mann et al., 2009. Antropoceno definido por Lewis y Maslin 2015. Edad Calibrada en años de la Era Común (CE, common era por sus siglas en inglés).....24

Fig. 2.2. Análisis espectral para el registro de sílice biogénico como proxy de paleoproduktividad primaria marina. Línea continua naranja indica la varianza corregida;

Línea dorada discontinua 90% chi cuadrada; línea café discontinua es el 95% chi cuadrada; línea discontinua gris es el 99% chi cuadrada.....27

Fig.2.3. Análisis espectral tipo wavelet realizado a la serie de sílice biogénico (%), utilizando el método de Morlet, previamente remuestreada con una resolución de 3 años. La región sombreada es el cono de influencia, donde la varianza se reduce. *Edad Calibrada en años de la Era Común (CE, common era por sus siglas en inglés)*.....28

Fig. 5.1. Comparación de proxies de productividad primaria marina (PPM): A) Clorinas totales; B) Índice de surgencias (<http://www.pfeg.noaa.gov>) para las últimas 7 décadas. C) $Sí_{Bio}$; D) Temperatura superficial del océano en el área de estudio a partir de ERSST, *Extended Reconstruction Of Sea Surface Temperature*; C y D se les aplicó una media móvil de 3 años: *Edad Calibrada en años de la Era Común (CE, common era por sus siglas en inglés)*.....32

Fig. 5.2. Desplazamiento de la ITCZ. Comparación de la serie de Titanio (%) de la Cuenca Cariaco (C; Haug et al., 2001) con las proxies de productividad reconstruidas en este estudio (A, B); todos los datos tienen una media móvil de 15 años. En gris se señalan los periodos climáticos, en la parte superior se indica a qué periodo corresponde. *Edad Calibrada a años de la Era Común*..... 35

Fig. 5.3. Efecto de la variabilidad solar sobre la productividad primaria. Reconstrucción de la productividad primaria marina mediante clorinas (A) y sílice biogénico (B) comparado con el número de manchas solares observadas (C; Fuente: WDC-SILSO, Royal Observatory of Belgium). Se indican los mínimos solares (Maunder y Dalton). Las líneas naranjas señalan momentos con mayor número de manchas solares. Antropoceno (1610-Presente; Lewis et al., 2014); PEH Pequeña Era de Hielo (1400-1700); EM Época Moderna (1850-Presente); Años de la Era Común (CE).....38

Fig. 5.4 1. Reconstrucción de la PDO de Macdonald y Case (2005) comparado con la proxy de clorinas totales (datos estandarizados), media móvil de 30 años para ambas series. Antropoceno (línea discontinua, ~1600-Presente); ACM Anomalía climática Medieval (950-1250); PEH Pequeña Era de Hielo (1400-1700); EM Época Moderna (1850-Presente); Años de la Era Común (CE).....39

Fig. 5.4.2. Reconstrucción de la PDO de Macdonald y Case (2005) comparado con la proxy de sílice biogénico (Si_{Bio} , datos estandarizados), media móvil de 30 años para ambas series. Antropoceno (línea discontinua, ~1600-Presente); ACM Anomalía climática Medieval (950-1250); PEH Pequeña Era de Hielo (1400-1700); EM Época Moderna (1850-Presente); Años de la Era Común (CE).....**40**

Fig. 5.5. Proxies climáticas para el Antropoceno. A) Clorinas totales ($\mu g/g$); C) %Sílíce biogénico; C) Reconstrucción de la temperatura superficial del océano (*ERSST Extended Reconstruction Sea Surface Temperature*; [ww.irdl.ldeo.columbia.edu](http://www.irdl.ldeo.columbia.edu)) en el área de estudio; D) Oscilación decadal del Pacífico (Mantua et al., 1997); E) Gradiente zonal de temperatura entre el estrecho de Makassar (Indo Pacífico, 6°S 116°E) y Galápagos (Pacífico tropical Oriental, 2°S 90°O), construido a partir de *ERSST*; F) Índice de vientos entre La Paz y Hawaii construido a partir de la diferencia entre presión atmosférica de estos sitios. PEH Pequeña Era de Hielo (1400-1700); EM Época Moderna (1850-Presente); Años de la Era Común (CE).....**41**

Fig. 5.5.1 Proxies climáticas para Época Moderna. A) Clorinas totales ($\mu g/g$); C) %Sílíce biogénico; C) Reconstrucción de la temperatura superficial del océano (*ERSST Extended Reconstruction Sea Surface Temperature*; [ww.irdl.ldeo.columbia.edu](http://www.irdl.ldeo.columbia.edu)) en el área de estudio; D) Oscilación decadal del Pacífico (Mantua et al., 1997); E) Gradiente zonal de temperatura entre el estrecho de Makassar (Indo Pacífico, 6°S 116°E) y Galápagos (Pacífico tropical Oriental, 2°S 90°O), construido a partir de *ERSST*; F) Índice de vientos entre La Paz y Hawaii construido a partir de la diferencia entre presión atmosférica de estos sitios. EM Época Moderna (1850-Presente); Años de la Era Común (CE).....**42**

TABLAS

Tabla I. Análisis de tendencia para la serie de productividad primaria marina reconstruida a partir de las clorinas ($\mu\text{g/g}$); intervalo de confianza al 95%; t valor del estadístico calculado (cal) y crítico (cri); $\alpha/2=0.975$. En paréntesis se señala si la tendencia es positiva (+) o negativa (-). Clasificación de los periodos basada en Mann et al., 2009. Edad Calibrada en años de la Era Común (CE, common era por sus siglas en inglés).....**20**

Tabla II. Resumen del análisis estadístico no paramétrico Wilcoxon-Wilcoxon para muestras independientes con corrección de Kruskal-Wallis; Intervalo de confianza al 95%; H valor del estadístico calculado (cal) y crítico (cri); $1-\alpha=0.95$**21**

Tabla I. Análisis de tendencia para la serie de productividad primaria marina reconstruida a partir del contenido de sílice biogénico ($\text{Si}_{\text{Bio}} \%$) en los sedimentos. Intervalo de confianza al 95%; t valor del estadístico calculado (cal) y crítico (cri); $\alpha/2=0.975$. En paréntesis se señala si la tendencia es positiva (+) o negativa (-). Clasificación de los períodos basada en Mann et al., 2009. Edad Calibrada en años de la Era Común (CE, common era por sus siglas en inglés).....**25**

Tabla II. Resumen del análisis estadístico no paramétrico Wilcoxon-Wilcoxon para muestras independientes con corrección de Kruskal-Wallis; Intervalo de confianza al 95%; H valor del estadístico calculado (cal) y crítico (cri); $1-\alpha=0.95$; EM Época Moderna; PEH Pequeña Era de Hielo, ACM Anomalía Climática Medieval; PFTEM Periodo frío de la Temprana Edad Media; OCR Óptimo Climático Romano.....**26**

Tabla III. Análisis de tendencia para proxies de productividad primaria en este estudio y el índice de surgencias ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} 100\text{m}$; <http://www.pfeg.noaa.gov>) entre 1946 y 2012.....**32**

DEDICATORIA

A mi familia,

AGRADECIMIENTOS

Mi sincero agradecimiento a mi director de tesis, Dr. José D Carriquiry por el apoyo otorgado durante la maestría y su valiosa labor como formador de recursos humanos de calidad. A mis sinodales, Dr. Julio A. Villaescusa por sus observaciones y apoyo tanto en laboratorio como durante el desarrollo de la tesis y Dr. Héctor García Nava por sus observaciones y consejos durante el desarrollo de la tesis.

Especial agradecimiento a Pedro Castro por su invaluable apoyo durante el trabajo de laboratorio.

Elisabet Repiso por su registro de sílice biogénico y sus datos de presión atmosférica La Paz-Hawaii; así como por el apoyo brindado en laboratorio.

Agradecimientos al laboratorio de Química Analítica, en especial al Dr. Francisco Delgadillo, Mtra. Vanessa E. Torres y a Mauricio Reyes por permitirnos trabajar en su laboratorio durante la medición de las muestras.

Durante el trabajo de laboratorio conté con el apoyo del Laboratorio de Bionano de la UNAM, particularmente al Dr. Rubén Cadena y a la Técnica de laboratorio Katrin Quester.

Especial agradecimiento a la Dra. Jéssica Ramírez Méndez del INAH por su apoyo en la clasificación de los periodos climáticos.

A mis compañeros de la maestría, especialmente a Enah Fonseca Ibarra y Erika Lee Sánchez por su apoyo, comentarios y observaciones.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada.

A mi madre, hermanos y familia por el cariño y sustento durante este tiempo.

A la gente que de alguna u otra forma contribuyó al desarrollo de mi posgrado y de esta tesis,
¡MUCHAS GRACIAS!

RESUMEN

Se midió la productividad primaria marina mediante las clorinas totales (producto de degradación de las clorofilas) y el sílice biogénico en sedimentos extraídos en Cuenca Soledad, Baja California para los últimos 2000 años. Este sitio se ubica justo en la zona de transición entre el Pacífico tropical y subtropical lo que le confiere características oceanográficas y paleoceanográficas particulares. Con el cambio climático se espera que las surgencias se intensifiquen y con ello, la productividad primaria. Nuestros registros indican una productividad constante durante el primer milenio, con variaciones de mayor amplitud a partir de la Anomalía Climática Medieval (ACM 950-1300 años CE). Se observan diferencias entre las proxies de paleoproduktividad utilizadas, posiblemente debido a diferencias composicionales en las comunidades fitoplanctónicas. Proponemos que la productividad primaria marina, particularmente el sílice biogénico, está relacionada cercanamente con la variabilidad solar en escala secular (ciclos de Gleissberg). Las clorinas tienen una relación positiva con la Oscilación Decadal del Pacífico reconstruida, lo cual pareciera ser contraintuitivo. Estos resultados nos indican que a pesar de que ambas proxies miden la productividad primaria, éstas registran diferentes procesos a diferentes escalas: mientras que el sílice biogénico responde a forzamientos de gran escala como la variabilidad solar, las clorinas pudieran responder a condiciones más regionales a escala de cuenca oceánica (relación positiva con la PDO reconstruida). Esto tiene implicaciones para el desarrollo de escenarios de cambio climático y su efecto sobre la productividad primaria marina.

Flujos del sílice biogénico como proxy de paleoproductividad marina en Cuenca Soledad, Baja California, México

1. INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas el clima mundial ha experimentado un aumento en la temperatura global que no tiene precedente en al menos los últimos 2000 años (Crowley 2000; Mann and Jones 2003; Jones and Mann 2004; Mann et al. 2008). Este poco usual incremento en la temperatura resulta inexplicable por factores meramente naturales (Bradley et al. 2003). La variabilidad natural del clima responde a una serie de factores tanto internos (p. ej. modos de variabilidad en el océano y la atmósfera) como externos (p. ej. forzamientos solares y volcánicos). Se considera que éste calentamiento global es causado principalmente por el aumento antropogénico de gases invernadero debido a la quema de combustibles fósiles (Ruddiman 2001, Jones and Mann 2004; Mann 2007). Es importante considerar que la interacción sinérgica entre los factores naturales y antropogénicos de la actualidad tienen consecuencias en el sistema terrestre y el oceánico.

Los efectos que se presentan en los sistemas oceánicos como respuesta al impacto antropogénico es variado y abarca desde cambios en la composición química del agua (acidificación del océano) hasta la alteración de los ecosistemas; uno de los principales impactos futuros esperados es a los ecosistemas de surgencias (*Eastern Boundary Upwelling Systems, EBUS*). Estos ecosistemas, aunque representan menos del 2% de superficie oceánica, son responsables de aproximadamente el 7% de la productividad primaria marina y 20% de la pesca global, lo que revela su importancia ecológica y económica (Pauly and Christensen 1995). Las surgencias costeras tienen lugar debido a la interacción del viento a lo largo de la costa con la rotación de la tierra, lo que genera el desplazamiento del agua superficial hacia el mar abierto siendo reemplazadas por aguas subsuperficiales, frías y ricas en nutrientes que favorecen la productividad primaria marina.

Bakun (1990) propuso que los sistemas de surgencias se verían afectados por el aumento de los gases invernadero, pues el aumento de las temperaturas generaría un mayor gradiente térmico entre el océano y el continente, lo que fortalecería los vientos generadores de surgencias, provocando que éstas fueran de mayor duración e intensidad con efectos

importantes para la productividad primaria marina. Contribuciones más recientes apoyan esta tendencia de las surgencias a intensificarse por efecto del calentamiento global (Narayan et al. 2010; Sydeman et al. 2014), aunque se ha observado que las respuestas pueden diferir dependiendo del sistema que se trate y que las diferencias pudieran ser reflejo de controles regionales (Sydeman et al., 2014; Wang et al., 2015).

En la costa del Pacífico Noriental donde se encuentra el sistema de surgencias de California, las variaciones en la productividad están asociadas a eventos de variabilidad climática como El Niño (ENSO *El Niño Southern Oscillation*), la Oscilación Decadal de Pacífico (PDO *Pacific Decadal Oscillation* por sus siglas en inglés; Mantua et al. 1997) y la Oscilación del Giro del Pacífico Norte (NPGO *North Pacific Gyre Oscillation* por sus siglas en inglés; Di Lorenzo et al. 2008). A mayor escala, también ha sido observado que forzamientos como la posición de la zona de convergencia intertropical (ITCZ *Inter Tropical Convergence Zone*, por sus siglas en inglés; (Pérez-Cruz 2013; Cartapanis et al. 2014; Staines-Urías et al. 2015) y la actividad solar (Marchitto et al. 2010) tienen influencia en la productividad y el clima de esta región.

Cambios en la productividad primaria tienen un impacto en la llamada “bomba biológica”, y es un factor de gran relevancia para el sistema climático ya que es capaz de regular el intercambio de CO₂ entre el océano y la atmósfera (Broecker 1982). Conocer cómo ha variado la productividad primaria marina en el pasado, así como las posibles causas de su variación, nos puede ayudar a explicar y diseñar modelos más realistas sobre cuáles serían los efectos de la influencia humana en el clima sobre los ecosistemas oceánicos. Una de las limitantes ha sido el corto periodo que abarcan los registros instrumentales (~150 años) por lo que se ha recurrido a otras alternativas como reconstrucciones en bandas de crecimiento de corales, núcleos de hielo y sedimentarios, por mencionar algunos, como una herramienta para reconstruir las condiciones oceanográficas.

Los núcleos de sedimento han sido ampliamente utilizados en la región de estudio y con una variedad de proxies (*p. ej.* (Ganeshram and Pedersen 1998; van Geen et al. 2003; Dean 2006; Marchitto et al. 2010; Barron et al. 2012); Sin embargo, los trabajos que caracterizan la oceanografía de la región, particularmente, la productividad primaria marina para los pasados 2000 años son escasos y, generalmente carecen de suficiente resolución

temporal como para detectar variaciones a escalas subdecadales (Barron and Bukry 2007; Esparza-Alvarez et al. 2007; Black et al. 2014; Deutsch et al. 2014). Con el objetivo de caracterizar la productividad primaria marina de la región del área de estudio para los últimos 2 milenios, se midió el contenido de sílice biogénico y de clorinas totales.

2. OBJETIVO

Mediante el estudio de las variaciones en la concentración de clorinas totales y sílice biogénico en los sedimentos de Cuenca Soledad, caracterizar la productividad primaria marina a ultra alta resolución durante los últimos 2000 años en el contexto de cambio climático global.

Objetivos específicos

Detectar cambios en la productividad primaria marina en escalas decadales a seculares y los forzamientos a los que responden.

Caracterizar la productividad primaria marina durante el Antropoceno.

3. METODOLOGÍA

3.1. Área de estudio

Cuenca Soledad (24°N 112°W), también conocida como cuenca San Lázaro, es una depresión geomorfológica del fondo marino en la plataforma continental, ubicada a aproximadamente 50 km de la costa Oeste de Baja California. Esta depresión tectónica es aproximadamente 85 km de largo, 30 km de ancho y alcanza una profundidad máxima de 540 m. Las propiedades batimétricas de esta cuenca limitan casi por completo el intercambio de las aguas subsuperficiales a profundidades mayores a los 100 m lo que impide la oxigenación de la cuenca y, por tanto, la bioturbación, favoreciendo así la formación de laminaciones en la columna sedimentaria (van Geen et al., 2003; Esparza-Álvarez et al., 2007; Cortina and Herguera 2014).

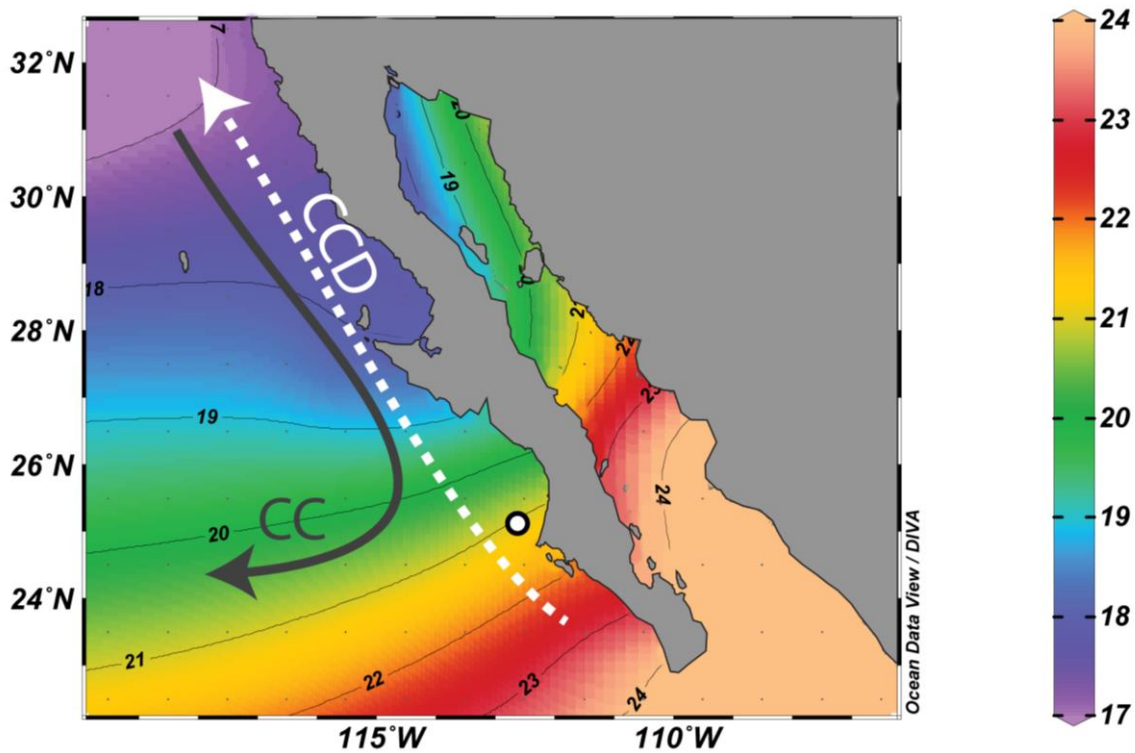


Fig. 1. Distribución espacial del promedio anual de la temperatura superficial del océano (reconstruido con datos de *World Ocean Database*) para la región del área de estudio (Cuenca Soledad; $25^{\circ}11.99'N$, $112^{\circ}43.99'W$, señalada con el punto blanco). Corriente de California (CC; Flecha gris); contracorriente de Davidson (CCD; Flecha punteada blanca).

Oceanografía de la región del área de estudio

La región oceánica sudoccidental de la costa de Baja California representa el límite sur del sistema de la Corriente de California (**fig. 1**). En esta región, a lo largo del año prevalecen vientos provenientes del noroeste y norte, generando transporte de Ekman y, consecuentemente, surgencias a lo largo de la costa (Zaytsev et al., 2003). Los vientos se intensifican durante la primavera, con mayor intensidad de abril a junio, disminuyendo a finales de verano o principios del otoño. Esta disminución está asociada a la predominancia de vientos provenientes del sur, lo que genera una reducción en el área de la influencia de la Corriente de California (Zaytsev et al., 2003, Silverberg et al. 2004). Particularmente para la región suroccidental de la costa de Baja California Sur, Cervantes-Duarte et al. (2015) observan dos periodos claros: un periodo intenso (frío) de alta productividad que abarca de febrero a julio y otro débil (cálido), de agosto a enero, de baja productividad. Adicionalmente,

a lo largo de la costa de Baja California las surgencias pueden estar fuertemente moduladas por condiciones locales del viento y por la batimetría (Zaytsev et al. 2003).

La región oceánica al suroeste de Baja California es considerada como una zona de transición donde las aguas relativamente frías provenientes de la corriente de California se encuentran con masas de agua más saladas y cálidas de origen tropical y subtropical (Durazo and Baumgartner 2002). Durazo (2009) señala que, estacionalmente, las aguas de origen subártico (Corriente de California) predominan durante la temporada más alta de surgencias (primavera y verano), mientras que la influencia de las masas de agua tropicales y subtropicales son evidentes durante el verano y el otoño como consecuencia de la disminución en la intensidad de los vientos formadores de surgencias.

Aunque estacionalmente la productividad primaria marina en esta región está fuertemente influenciada por la intensidad de las surgencias, Durazo y Baumgartner (2002) señalan que en esta área la productividad también es alterada interanualmente por el desarrollo de eventos de El Niño y La Niña.

3.2. Recolecta de Núcleos de sedimento

Los núcleos de sedimento SD-6-MC (25°11.99'N, 112°43.99'W) y SD-6-GC2 (25°11.99'N, 112°43.99'W) fueron colectados durante la campaña oceanográfica DEVOL2012 en Cuenca Soledad, Baja California Sur, México en abril de 2012. SD-6-MC se extrajo de una profundidad de 542 m con la ayuda de un nucleador tipo multicore, cuya longitud total fue de 40.5 cm. Este núcleo se caracterizó por presentar laminaciones, que de acuerdo con van Geen et al. (2003) la presencia de bandas oscuras pudiera indicar la recurrencia de eventos de mayor productividad y/o de una reducción en el oxígeno en aguas de fondo. SD-6-GC2 es un núcleo de mayor longitud (259 cm) que fue extraído de una profundidad de 552 m mediante el uso de un nucleador de gravedad. Durante la colecta en el barco, este núcleo de gravedad fue dividido en dos secciones (top y bottom). Este núcleo también presentó laminaciones.

3.3. Modelo de edad

Para construir el modelo de edad de los núcleos SD-6-MC (Apéndice) y SD-6-GC (Apéndice) se utilizaron 4 y 6 fechados de AMS de radiocarbono, respectivamente. El primer núcleo comprende los primeros 400 años-BP del registro, mientras que el segundo finaliza alrededor de los 3100 años-BP. Los análisis de AMS radiocarbono (^{14}C) se realizaron en el laboratorio *W. M. Keck Carbon Cycle Accelerator Mass Spectrometry* de la Universidad de California, Irvine, CA a partir de mezcla de especies de foraminíferos (planctónicos) para el núcleo SD-6-MC mientras que se utilizó materia orgánica para el fechado del núcleo SD-6-GC. Los resultados de AMS radiocarbono obtenidos fueron calibraron con el programa CALIB 7.1 (Stuiver and Reimer 1993) utilizando una corrección de reservorio (ΔR) de 200 ± 100 para foraminíferos planctónicos (Marchitto et al., 2010) y la curva de calibración MARINE13 (Reimer et al. 2013). Todos los datos se convirtieron a Edad Calendario (*common era*; CE). Posteriormente, las edades calibradas de los registros de clorinas totales y de sílice biogénico se ajustaron más finamente con el registro del número de manchas solares (WDC-SILSO, *Royal Observatory of Belgium, Brussels*) del año 1700 al presente (periodo equivalente a la sección que corresponde sólo al registro del multicore).

3.4. Seccionado del Núcleo (Muestreo)

Con el objetivo de determinar las variaciones de la productividad marina a alta resolución se construyó un sistema de seccionado de núcleos sedimentarios que permitió obtener una resolución temporal promedio de 2.5 años (~ 2.5 mm). La ventaja de esta técnica de muestreo es que nos permite detectar variaciones oceanográficas a escalas subdecadales.

3.5. Proxys paleoceanográficas para la reconstrucción de la productividad primaria

3.5.1. Clorinas

Uno de los trazadores más novedosos para reconstruir variaciones pasadas en la productividad primaria es mediante la medición de *clorinas totales* ($\mu\text{g/g}$) presentes en los sedimentos, lo cual es representativo de la productividad de toda la comunidad fitoplanctónica de la columna de agua. La técnica que se aplicó, denominada de extracción ultrasónica, se basa en extracciones múltiples con solventes orgánicos (Kornilova and Rosell-Melé 2003). El procedimiento comprende de varias etapas, mismas que se describen a continuación.

A partir de 100 a 200 mg de sedimento previamente liofilizado y homogeneizado, se realizó una extracción utilizando 4 ml de una mezcla de diclorometano/metanol (3:1) en ultrasonido. Cada una de las muestras fue sujeta a extracción 3 veces durante 15 minutos. Posteriormente los extractos se centrifugaron a 3 000 rpm durante 5 minutos con el objetivo de separar el sobrenadante del sedimento. Posteriormente se eliminó el solvente de cada muestra utilizando un rotoevaporador. Para el análisis del total de clorinas, los extractos se redisolvieron en 1 ml de acetona y se analizaron mediante espectrofotometría visible utilizando como fase móvil acetona (grado HPLC). El total del contenido de clorinas se estimó mediante la medición de las absorbancias de los extractos, tanto en la banda Soret (408 nm) como en la Banda II (662nm). Las absorbancias obtenidas se convirtieron a clorinas totales ($\mu\text{g/g}$) con ayuda de una curva de calibración construida a partir de estándares. Es pertinente aclarar que el procedimiento de extracción y medición de este proxy de paleoproductividad fueron realizados con anterioridad y de manera independiente a este estudio por el Dr. José Carriquiry, los cuales son incluidos en esta tesis para fortalecer las interpretaciones de este estudio.

3.5.2. Sílice Biogénico

El análisis de los sedimentos para estimar el porcentaje de ópalo biogénico (% ópalo) como una forma de reconstruir la productividad marina, representada por las diatomeas, se realizó mediante la técnica de extracción alcalina propuesta por Mortlock and Froelich (1989). Las muestras se liofilizaron y se homogeneizaron, posteriormente se eliminó materia orgánica y carbonatos con peróxido de hidrógeno y ácido clorhídrico, respectivamente. Para la extracción del sílice opalino se utilizó una solución de carbonato de sodio (Na_2CO_3), ésta es una base débil por lo que el sílice proveniente de otras estructuras silificadas, como radiolarios o espículas de esponjas, no alcanza a disolverse. El sílice disuelto se determinó mediante espectrofotometría de azul de molibdato (Strickland y Parsons, 1968; Fanning y Pilson, 1973). Las absorbancias se midieron en un espectrofotómetro UV-Vis a una longitud de onda de 812 nm y posteriormente se convirtieron a porcentaje de ópalo mediante las siguientes ecuaciones:

$$C_S = F_X(A_S - A_0)$$

Donde:

C_S = Concentración de silicio en la muestra (mM)

F_x = Factor F; $F= 1/S$, donde S es la pendiente de la regresión lineal.

A_S = Absorbancia de la muestra

A_0 = Absorbancia del blanco operacional

El porcentaje del Sílice biogénico se calculó a partir de la siguiente ecuación:

$$\%Si_{OPAL} = 112.4 * \left(\frac{C_S}{M}\right)$$

En este trabajo se reportó la fracción o la tasa de acumulación de la masa por lo que se consideró la siguiente ecuación:

$$\%OPAL = 2.4 * \%Si_{OPAL}$$

Donde la constante 2.4 representa el factor de conversión típico de contenido de agua en sílice de origen diatomáceo menor a 30 millones de años, que es de alrededor del 10%.

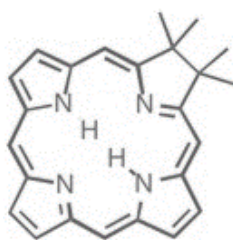
Cada lote de muestras consistía de 38 muestras e incluyó 2 blancos operacionales, 2 blancos de reactivos, y 6 estándares internos, que nos permitieron asegurar la validez de los resultados. De acuerdo con Mortlock y Froelich (1989) el porcentaje de error de la técnica es de 6% para sedimentos con un contenido menor al 15% de ópalo. Sin embargo, en este estudio, el porcentaje de error observado durante todo el periodo del estudio fue de 5%, para un total de 16 lotes.

CAPÍTULO I: Reconstrucción de la productividad primaria marina en Cuenca Soledad mediante el análisis de Clorinas

1.1. INTRODUCCIÓN

La productividad marina acontecida en tiempos pasados puede ser reconstruida del registro sedimentario mediante una diversidad de proxys que incluyen el contenido de CaCO₃, el ópalo biogénico, el carbono orgánico total, los ensamblajes y abundancia de restos silíceos fitoplanctónicos, la abundancia de clorinas y alquenonas, por mencionar algunos. Es importante señalar que éstas proxies constituyen solamente un porcentaje pequeño de lo que se produce en la superficie del océano, ya que en su viaje hacia el fondo marino estas pueden modificarse por varios procesos (p. ej. disolución, pastoreo por parte del zooplancton, etc.). Adicionalmente, algunas de las proxies de paleoproduktividad solamente representan una fracción de los productores primarios (p. ej. Ópalo biogénico a las diatomeas y silicoflagelados; carbonatos a cocolitofóridos, etc.). Por lo anterior, una buena aproximación alterna para conocer la productividad primaria total es mediante la medición de la concentración de clorinas en los sedimentos.

Las clorinas son el producto inmediato de la degradación de la clorofila *a* (**fig. 1**), pigmento que se encuentra universalmente en el fitoplancton y razón por la cual se considera que su estimación representa la productividad de toda la comunidad fitoplanctónica (Harris & Maxwell 1995, Harris et al. 1996). Harris et al. (1996) sugieren el uso de las clorinas como una herramienta confiable para reconstruir la productividad marina. En los últimos años las clorinas han sido utilizadas ampliamente, y en conjunto con otras proxies de productividad, han dado buenos resultados (Schubert et al. 2005; Mohtadi et al. 2007; Zhao et al. 2007)



Chlorin

Fig. 1.1. Representación gráfica y simplificada de la molécula de clorina; producto después de que la molécula de clorofila ha perdido el fitol y el anillo de magnesio.

1.2. OBJETIVO

Reconstruir la productividad primaria marina en los sedimentos de Cuenca Soledad utilizando la concentración total de clorinas.

1.3.RESULTADOS

El registro ambiental de clorinas en Cuenca Soledad (**fig. 1.2**) presenta de manera general patrones consistentes de variabilidad temporal en la productividad primaria marina a diferentes escalas (multidecadal, secular). Este registro inicia aproximadamente en el año 740 (EC) donde se observa que la productividad oscilaba alrededor de la media ($\sim 118 \mu\text{g/g}$), con varios ciclos de 30 a 50 años. Este comportamiento se mantiene constante hasta finales de la Anomalía Climática Medieval (ACM), que finaliza con los niveles de productividad más bajos de todo el registro ($46 \mu\text{g/g}$). Entre este último periodo y la primera mitad de la Pequeña Edad de Hielo (PEH) la productividad presentó una tendencia constante hacia valores mayores. Aunque la productividad primaria durante la primera mitad de la PEH fue muy alta (con máximos de $200 \mu\text{g/g}$), ésta disminuyó de manera constante hacia finales de este periodo, caracterizada por bajos valores de $\sim 70 \mu\text{g/g}$. A partir de este periodo y el Antropoceno se observa un incremento gradual, seguido de una alta variabilidad en la productividad primaria, caracterizándose por las mayores condiciones de productividad registrados mediante las clorinas (media= $154 \mu\text{g/g}$); (**fig. 1.2**).

Con el fin de definir de manera analítica la existencia de alguna tendencia en la productividad a lo largo del registro, se realizó un análisis de tendencia a partir de una regresión, donde la tendencia está dada por el signo de la pendiente que resulta de la ecuación de la regresión y se demuestra si ésta es estadísticamente significativa, con un intervalo de confianza del 95%. De esta forma, el análisis del registro completo de clorinas presenta una tendencia positiva estadísticamente significativa ($t_{\text{cal}} 9.40$, $t_{\text{cri}} 1.96$, IC 95%; Tabla 1) en que se observa un incremento hacia la época actual. Se aplicó esta prueba para cada periodo climático descrito anteriormente y se obtuvo que la ACM no presenta una tendencia estadísticamente significativa ($t_{\text{cal}} -0.95$, $t_{\text{cri}} 1.97$, IC 95%; Tabla 1). Hacia el presente, específicamente el periodo que comprende la PEH, la productividad tiene una tendencia significativa a disminuir ($t_{\text{cal}} -7.98$, $t_{\text{cri}} 1.97$, IC 95%; Tabla 1). Durante la Época Moderna

(EM) la tendencia no es estadísticamente significativa ($t_{cal} -1.10$, $t_{cri} 1.99$, IC 95%; Tabla 1), aunque, como se describe anteriormente, es el periodo con mayor variabilidad de todo el registro y con la más alta productividad.

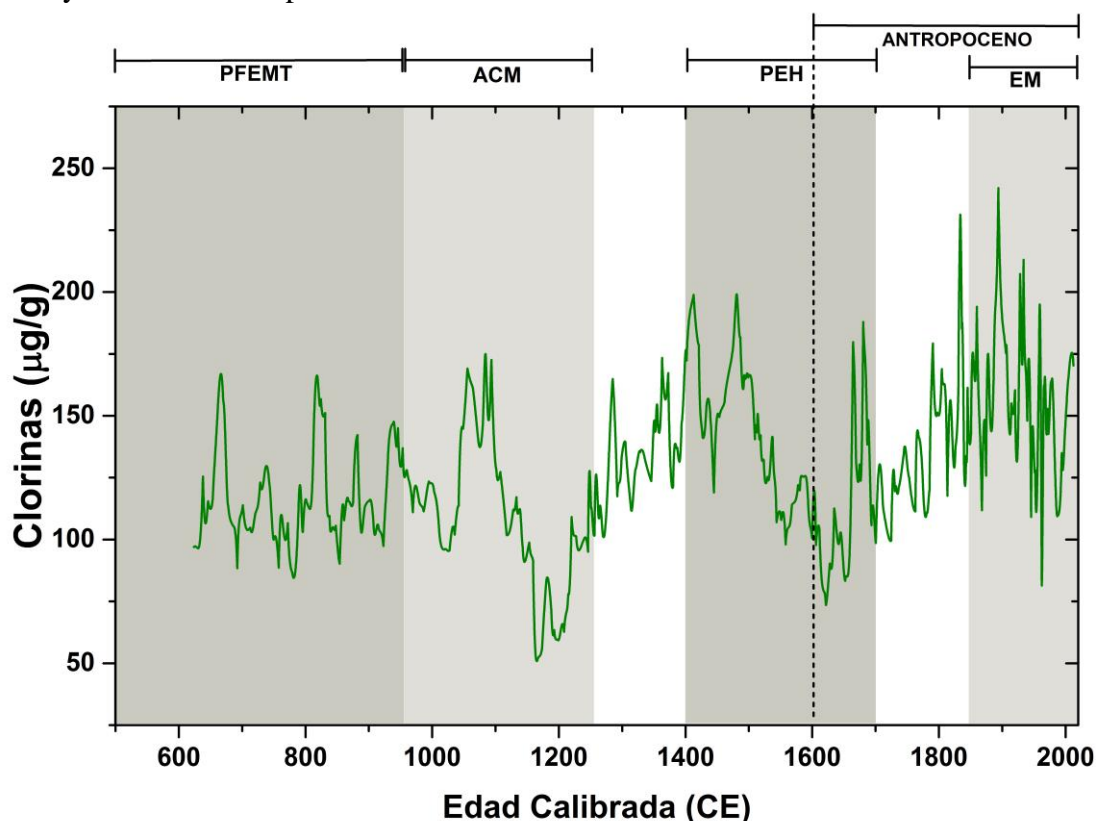


Fig. 1.2. Registro de Clorinas ($\mu\text{g/g}$) como indicador de productividad primaria marina en Cuenca Soledad. El sombreado indica los periodos climáticamente más importantes de acuerdo a Mann et al., 2009; Antropoceno definido por Lewis and Maslin (2015). Calibrada en años de la Era Común (CE, common era por sus siglas en inglés).

Tabla I. Análisis de tendencia para la serie de productividad primaria marina reconstruida a partir de las clorinas ($\mu\text{g/g}$); intervalo de confianza al 95%; t valor del estadístico calculado (cal) y crítico (cri); $\alpha/2=0.975$. En paréntesis se señala si la tendencia es positiva (+) o negativa (-). Clasificación de los periodos basada en Mann et al., 2009. Edad Calibrada en años de la Era Común (CE, common era por sus siglas en inglés).

| PERIODO (Edad Cal. EC) | t_{cal} | t_{cri} | Ecuación de la Regresión | TENDENCIA |
|--|-----------|-----------|-------------------------------|-------------------|
| Época Moderna (1850-Pres.) | -1.10 | 1.99 | Clor= 5.30- 0.00275 CE | No significativa |
| Pequeña Era de Hielo (1400-1700) | -7.98 | 1.97 | Clor= 9.63- 0.00616 CE | Significativa (-) |
| Anomalía Climática Medieval (950-1250) | -0.95 | 1.97 | Clor= 1.02- 0.00092 CE | No significativa) |

| | | | | |
|--|------|------|------------------------|-------------------|
| Registro Total (740-ACTUAL) | 9.40 | 1.96 | Clor= -1.38+0.00098 CE | Significativa (+) |
|--|------|------|------------------------|-------------------|

Aparte de identificar la existencia de las tendencias de la productividad primaria marina a lo largo del registro, también es importante conocer si existen diferencias estadísticamente significativas entre los periodos climáticos más importantes. Para lo cual se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) no paramétrico (Kruskal-Wallis), el cual indica si hay diferencias estadísticas entre un grupo de datos; en este caso, entre los periodos. De ser así, se realiza posteriormente un análisis de contrastes múltiples de Wilcoxon con corrección de Kruskal-Wallis (cuando el número de observaciones es mayor de 10) con el objetivo de identificar de dónde proceden las diferencias. El estadístico de Kruskal-Wallis (H) se realiza a partir de la siguiente ecuación:

$$Kruskal - Wallis = H = \left[\frac{12}{N_{tot}(N_{tot} + 1)} \cdot \sum \frac{(T_j)^2}{N_j} \right] - 3(N_{tot} + 1)$$

Donde:

N_{tot} : Es el número total de observaciones

T_j : Sumatoria de los rangos

N_j : Número de observaciones por periodo o grupo

El análisis de varianza de Kruskal-Wallis aplicado a la serie de clorinas indica que existen diferencias estadísticamente significativas (H_{cal} 149.5; H_{cri} 5.99; IC 95%) en la productividad marina entre los periodos climáticos. El análisis de contrastes múltiples señala con un 95% de confianza que existen diferencias significativas en la productividad primaria marina entre el Antropoceno, la Pequeña Era de Hielo, y la Anomalía Climática Medieval (Tabla II).

Tabla II. Resumen del análisis estadístico no paramétrico Wilcoxon-Wilcoxon para muestras independientes con corrección de Kruskal-Wallis; Intervalo de confianza al 95%; H valor del estadístico calculado (cal) y crítico (cri); $1-\alpha=0.95$.

| | Contrastes Múltiples Clorinas (Wilcoxon con Corrección de Kruskal-Wallis) | | | |
|-------------------|--|-----------|-----|----------------------------|
| | H_{cal} | H_{cri} | IC | |
| EM vs PEH | 20.9 | 3.84 | 95% | Diferencias Significativas |
| EM vs ACM | 56.7 | 3.84 | 95% | Diferencias Significativas |
| PEH vs ACM | 122.5 | 4.84 | 95% | Diferencias Significativas |

La aplicación de los análisis espectrales a las series de tiempo tiene como fin detectar, a partir de la varianza, las frecuencias más comunes del registro de paleoproductividad marina. Con este análisis se observa que el mayor periodo en el registro de clorinas es el multiseccular (~426 años) y el decadal (~20 años), ambos con un 99% de significancia estadística. También se observaron otros periodos multidecadales (57 y 30 años) y decadales (14 años), aunque con una significancia estadística menor (**fig. 1.3**).

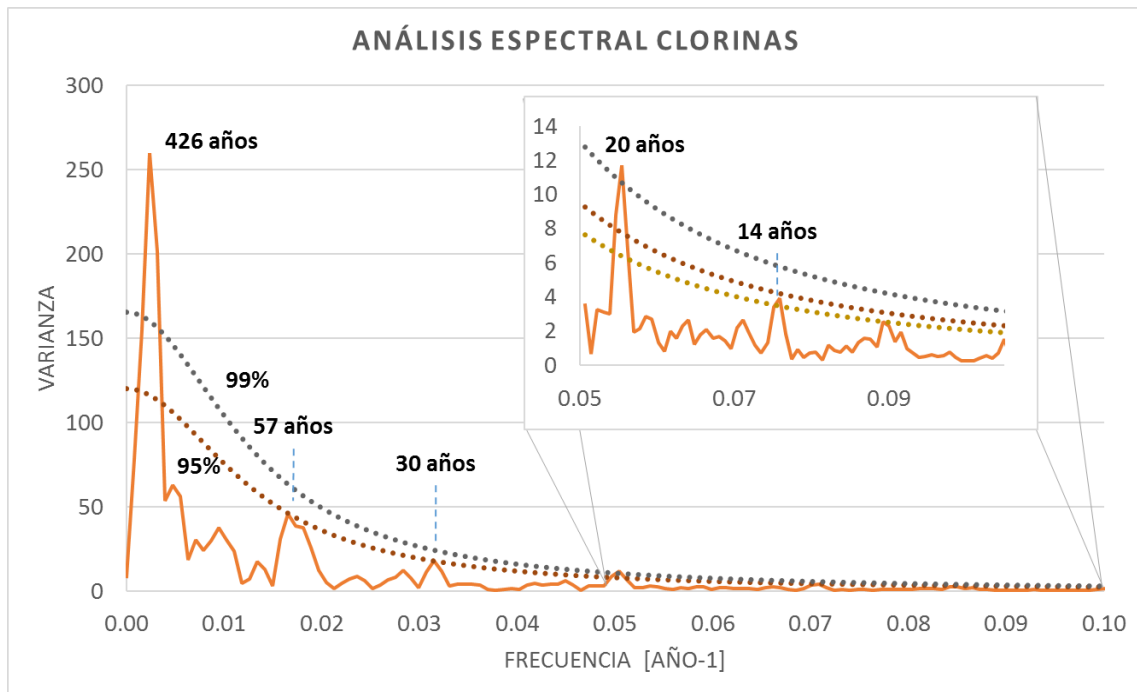


Fig. 1.3. Análisis espectral del registro de clorinas totales como proxy de productividad primaria marina realizado. Línea continua naranja indica la varianza corregida; Línea dorada discontinua 90% chi cuadrada; línea café discontinua es el 95% chi cuadrada; línea discontinua gris es el 99% chi cuadrada.

Adicionalmente, se realizó un análisis espectral tipo wavelet con la finalidad de analizar variaciones de poder dentro de una serie de tiempo. Se considera que la descomposición de una serie de tiempo en una frecuencia espacio-tiempo hace posible determinar los modos de variabilidad de la serie e indica cuáles modos varían en el tiempo (Torrence and Compo 1998). Para realizar esta prueba se remuestreó la serie de clorinas con una resolución de 3 años (resolución promedio de muestreo es de 2.5 años) y se aplicó el método de Morlet. En concordancia con el análisis espectral, el modo dominante del registro es el multiseccular (~400 años), el cual se presenta con mayor poder espectral entre los 1,300

y 1,500 años (CE), que coincide con parte de la PEH. El modo secular es significativo a mediados del registro. También se observan algunos modos multidecadales significativos (~50-30 años) y decadales (~14-10 años) para los últimos 500 años del registro (**fig. 1.4**).

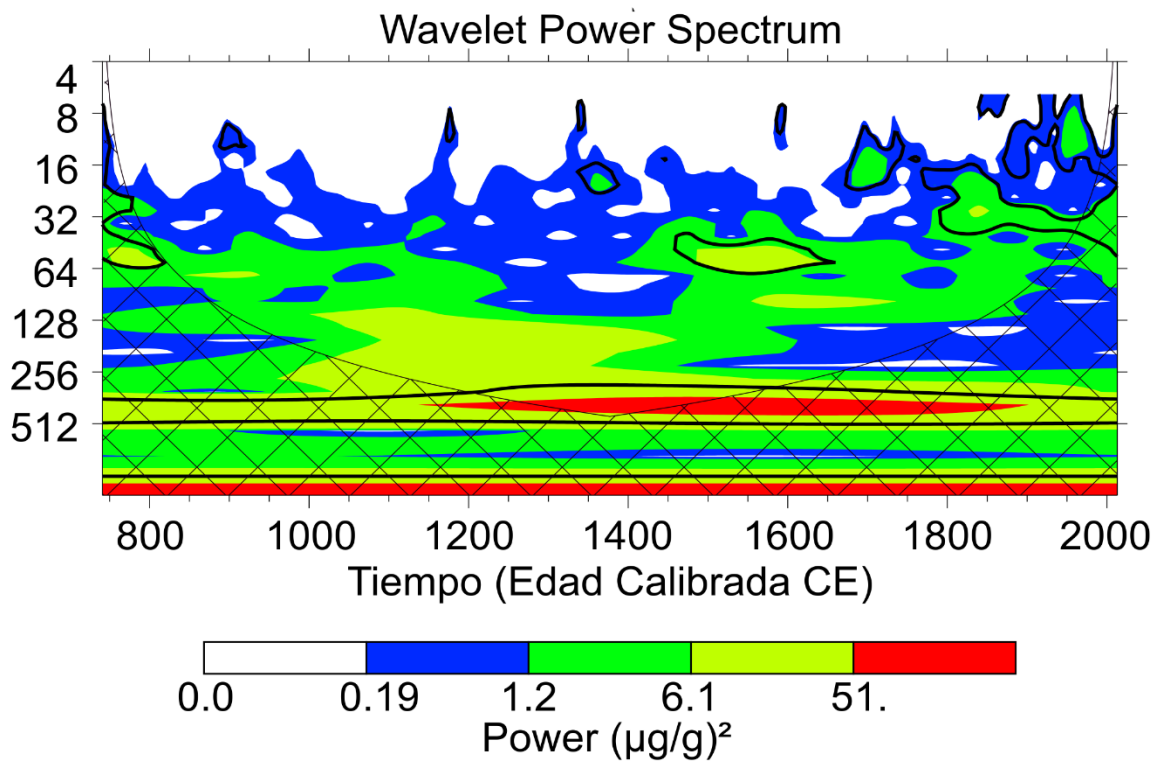


Fig. 1.4. Análisis espectral tipo wavelet realizado a la serie de clorinas totales ($\mu\text{g/g}$) utilizando el método de Morlet. La región sombreada es el cono de influencia, donde se reduce la varianza. *Edad Calibrada en años de la Era Común (CE, common era por sus siglas en inglés).*

CAPÍTULO II: Reconstrucción de la productividad primaria marina en Cuenca Soledad mediante el contenido de Sílice Biogénico

2.1. INTRODUCCIÓN

El sílice biogénico (ópalo biogénico), los carbonatos y la materia orgánica, son los tres componentes biogénicos más comunes en los sedimentos marinos. El ópalo se forma en la superficie del océano por el fitoplancton silificado, mayormente diatomeas, quienes hacen uso del ácido silícico (H_2SiO_4) para la formación de sus estructuras. Después de que la célula fitoplanctónica muere, se hunde a lo largo de la columna de agua y la fracción que no se disuelve es eventualmente sepultada en el fondo marino. Se estima que las diatomeas son responsables de más del 50% de la bomba biológica del CO_2 (Ragueneau et al. 2000). Tanto la importancia de las diatomeas en la eficiencia de la bomba biológica del carbono, como la presencia de sedimentos ricos en sílice en áreas como el Océano del Sur y Pacífico Ecuatorial, hacen que el sílice biogénico sea una buena opción para utilizarse como proxy de la productividad marina (Ragueneau et al., 2000). En efecto, se han realizado varios estudios que se apoyan de este proxy para reconstruir la paleoproductividad en el Noreste del Pacífico (Sánchez and Carriquiry 2007; Arellano-torres 2010; Cartapanis et al. 2014 por mencionar algunos).

2.2. OBJETIVO

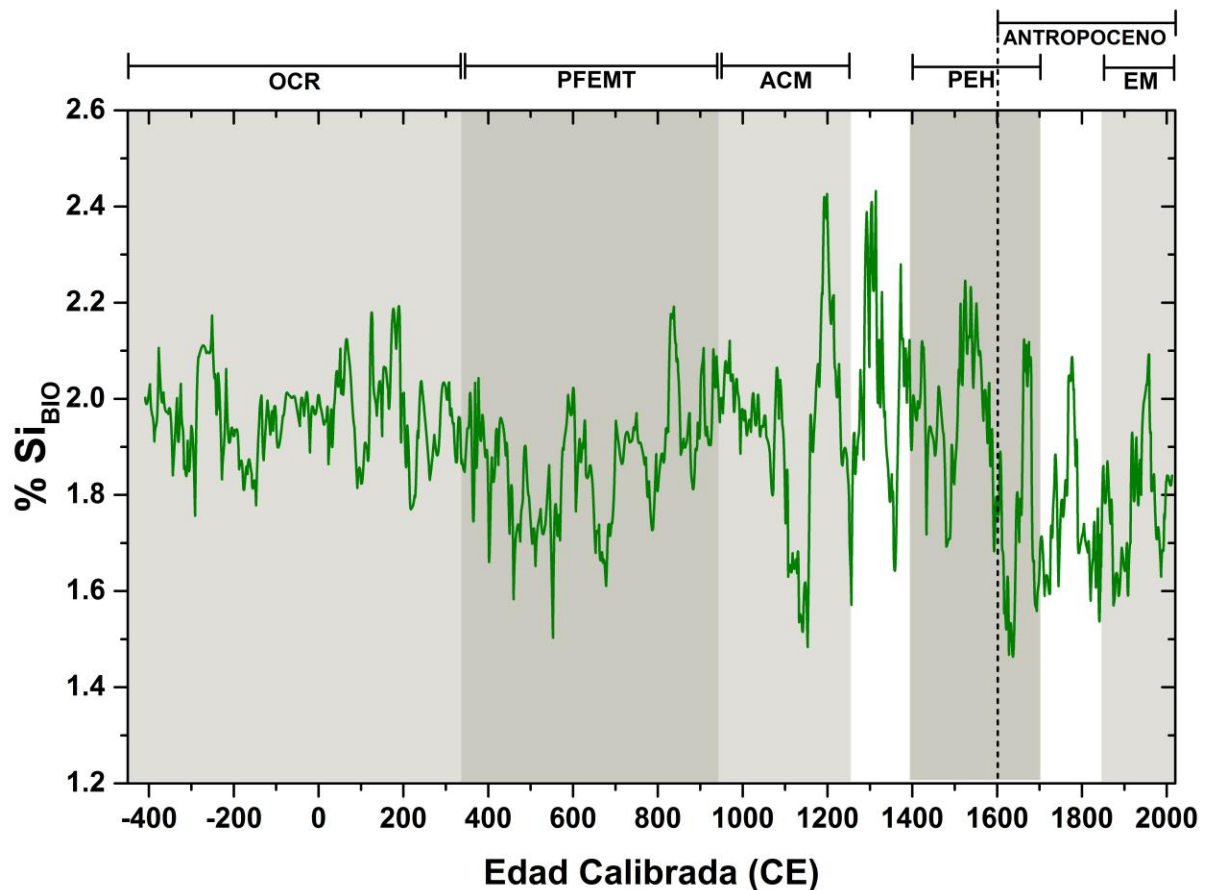
Reconstruir la productividad primaria marina en Cuenca Soledad mediante el contenido de sílice biogénico en los sedimentos.

2.3. RESULTADOS

La reconstrucción de la paleoproductividad marina realizada mediante la determinación del contenido de sílice biogénico (Si_{Bio} %) en los sedimentos de Cuenca Soledad presenta una alta variabilidad a lo largo del registro, particularmente durante el último milenio, en el que se observan cambios drásticos en la productividad (**fig. 2.1**). Durante los pasados 2400 años el contenido promedio de ópalo biogénico fue de 1.90 %. El periodo denominado como el Óptimo Climático Romano (OCR, -550 a 350 años CE) presenta la menor variabilidad del registro y en promedio presenta una mayor productividad

(1.96% Si_{Bio}). Entre este periodo y la Anomalía Climática Medieval (ACM, 950-1250 años CE) se encuentra un periodo de transición, Periodo Frío de la Temprana Edad Media (PFTEM, 350-950 años CE), durante el cual los valores de Si_{Bio} oscilaban alrededor de 1.87%. Durante la ACM la productividad media fue de 1.94%. A partir de la pequeña era de hielo (PEH, 1400-1700 años CE) la productividad promedio por periodo disminuyó gradualmente hacia el presente (1.89%). Como periodo, la época moderna (EM, 1850-Presente) es el periodo más bajo (1.77%) en la productividad primaria marina, medido mediante el proxy de sílice biogénico.

Fig. 2.1. Registro de Sílice Biogénico (%) como trazador de paleoproductividad primaria marina en Cuenca Soledad. El sombreado indica los periodos climáticamente más importantes de acuerdo a



Wang et al., 2012 y Mann et al., 2009. Antropoceno definido por Lewis y Maslin 2015. Edad Calibrada en años de la Era Común (CE, common era por sus siglas en inglés).

Se realizó un análisis de tendencia de paleoproductividad marina aplicando un análisis de regresión entre el Si_{Bio} y la edad calibrada con ^{14}C . La tendencia existente queda

determinada por el signo de la pendiente en la ecuación de la regresión. Enseguida, se prueba su significancia con una prueba-t al 95% de confianza. La tendencia de la productividad primaria marina medida mediante el Si_{Bio} durante los pasados 2,400 años es hacia la disminución ($t_{cal} -8.00$; $t_{cri} 1.96$, IC 95%; Tabla I). Durante el periodo denominado Óptimo Romano la tendencia no fue significativa, al igual que para el periodo de la ACM. La tendencia de la productividad marina durante la PEH tuvo una tendencia a disminuir que es estadísticamente significativa. Por último, el Antropoceno presenta una tendencia a aumentar, aunque sin alcanzar valores de productividad altos que observados durante periodos previos del registro (Tabla I).

Tabla I. Análisis de tendencia para la serie de productividad primaria marina reconstruida a partir del contenido de sílice biogénico (Si_{Bio} %) en los sedimentos. Intervalo de confianza al 95%; t valor del estadístico calculado (cal) y crítico (cri); $\alpha/2=0.975$. En paréntesis se señala si la tendencia es positiva (+) o negativa (-). Clasificación de los periodos basada en Mann et al., 2009. *Edad Calibrada en años de la Era Común (CE, common era por sus siglas en inglés).*

| PERIODO (Edad Cal. CE) | t_{cal} | t_{cri} | Ecuación de la Regresión | TENDENCIA |
|---|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------------|-------------------|
| Época Moderna (1850-Pres.) | 4.01 | 1.98 | SiBi=-16.6+ 0.00859 CE | Significativa (+) |
| Pequeña Era de Hielo (1400-1700) | -4.51 | 1.97 | SiBi=6.78- 0.00435 CE | Significativa (-) |
| Anomalía Climática Medieval (950-1250) | 0.16 | 1.97 | SiBi=0.18+ 0.00016 CE | No significativa |
| Periodo Frío de la Temprana Edad Media (351-949) | 5.57 | 1.97 | SiBi=-1.29+ 0.00195 CE | Significativa (+) |
| Óptimo Climático Romano (-550-350) | -0.14 | 1.968 | SiBi=-0.0005- 0.000638 CE | No Significativa |
| Registro Total (-440-ACTUAL) | -8.00 | 1.96 | SiBi=0.307- 0.000355 CE | Significativa (-) |

Para detectar diferencias entre periodos que no se ajustan a los métodos paramétricos se utilizan pruebas no-paramétricas como el análisis de varianza (ANOVA) no-paramétrico de Kruskal-Wallis. En caso de que existan diferencias se realizan contrastes múltiples de Wilcoxon-Wilcoxon con corrección de Kruskal-Wallis para muestras con más de 10 observaciones.

$$Kruskal - Wallis = H = \left[\frac{12}{N_{tot}(N_{tot} + 1)} \cdot \sum \frac{(T_j)^2}{N_j} \right] - 3(N_{tot} + 1)$$

Donde:

N_{tot} : Es el número total de observaciones

T_j : Sumatoria de los rangos

N_j : Número de observaciones por periodo o grupo

El ANOVA no paramétrico indica que existen diferencias significativas (H_{cal} 189.1; H_{cri} 9.48; IC 95%; Tabla II) entre los periodos climáticos para el registro de sílice biogénico. A partir del método de contrastes múltiples se determinó que los periodos climáticos establecidos en el registro de sílice biogénico son distintos entre sí (Tabla II).

Tabla II. Resumen del análisis estadístico no paramétrico Wilcoxon-Wilcoxon para muestras independientes con corrección de Kruskal-Wallis; Intervalo de confianza al 95%; H valor del estadístico calculado (cal) y crítico (cri); $1-\alpha=0.95$; EM *Época Moderna*; PEH *Pequeña Era de Hielo*, ACM *Anomalía Climática Medieval*; PFTEM *Periodo frío de la Temprana Edad Media*; OCR *Óptimo Climático Romano*

| Contrastes Múltiples Sílice Biogénico (Si Bi %) | | | | |
|--|------------------|------------------|-----|----------------------------|
| (Wilcoxon con Corrección de Kruskal-Wallis) | | | | |
| | H_{cal} | H_{cri} | IC | |
| EM vs PEH | 46.3 | 3.84 | 95% | Diferencias Significativas |
| EMvs ACM | 66.6 | 3.84 | 95% | Diferencias Significativas |
| EM vs PFTEM | 53.7 | 3.84 | 95% | Diferencias Significativas |
| EM vs OCR | 122.6 | 3.84 | 95% | Diferencias Significativas |
| PEH vs ACM | 24.5 | 3.84 | 95% | Diferencias Significativas |
| PEH vs PFTEM | 28.4 | 3.84 | 95% | Diferencias Significativas |
| PEH vs OCR | 29.6 | 3.84 | 95% | Diferencias Significativas |
| ACM vs PFTEM | 47.4 | 3.84 | 95% | Diferencias Significativas |
| ACM vs OCR | 24.4 | 3.84 | 95% | Diferencias Significativas |
| PFTEM vs OCR | 104.1 | 3.84 | 95% | Diferencias Significativas |

Se realizó un análisis espectral para la serie completa de sílice biogénico. Este análisis descompone las varianzas de la serie de tiempo en diferentes contribuciones asociadas a diferentes escalas temporales. Para ello, se utilizó la técnica (mencionar el nombre de la técnica no la del programa). A partir de este análisis se observaron varianzas significativas al 99% en escalas seculares (111 y 97 años; **fig. 2.2**), las cuales son las más significativas del registro. Varianzas en escala decadal a multidecadal (14, 12, 11 años; **fig. 2.2**) se observan por debajo del 95% del nivel de confianza.

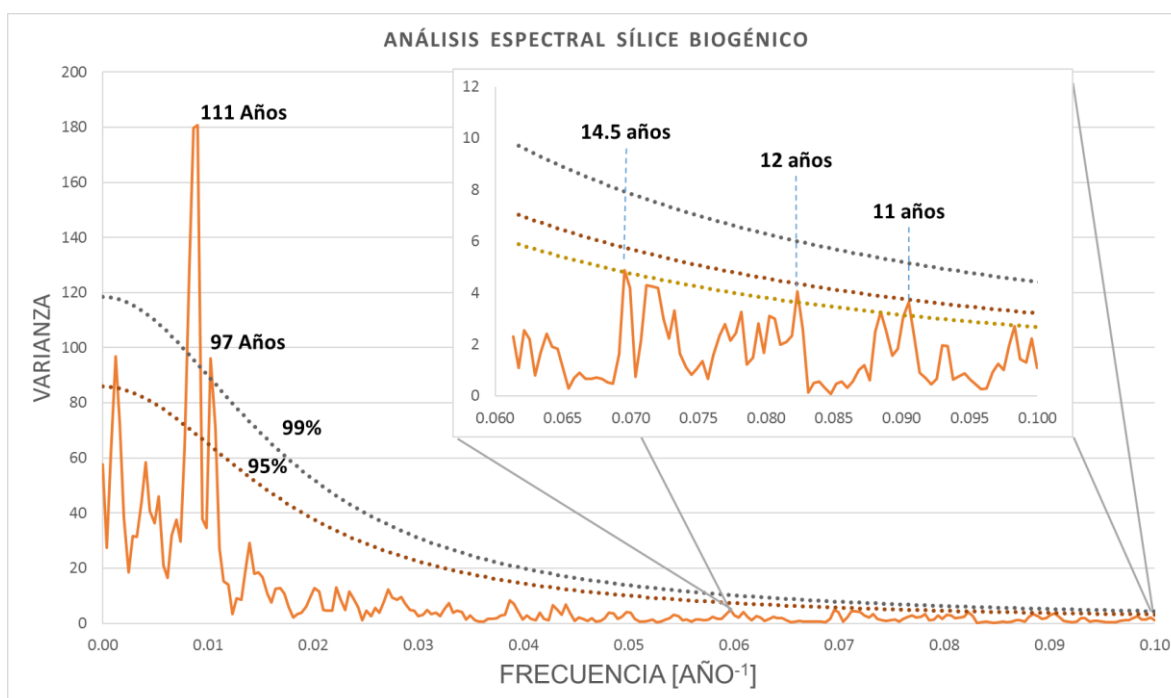


Fig. 2.2. Análisis espectral para el registro de sílice biogénico como proxy de paleoproduktividad primaria marina. Línea continua naranja indica la varianza corregida; Línea dorada discontinua 90% chi cuadrada; línea café discontinua es el 95% chi cuadrada; línea discontinua gris es el 99% chi cuadrada.

El análisis espectral de tipo wavelet anterior se desarrolló de acuerdo a Torrence y Compo (1998). Uno de los requisitos para este análisis es que las muestras sean equidistantes, para lo cual se remuestreó la serie con una resolución de 3 años, teniendo en cuenta que el promedio de la resolución de muestreo es de 2.5 años.

En la **figura 2.3** se presenta el análisis wavelet de la serie de sílice biogénico, donde se observa que los periodos más significativos de la productividad corresponden con escalas

secular y multiseccular. De manera constante, se encuentra que durante los pasados 2000 años el modo dominante es el secular; particularmente para el último milenio, este modo de variabilidad fue más significativo. De manera complementaria al análisis espectral, variaciones a escalas multidecadales y decadales no son tan significativas y constantes en el registro.

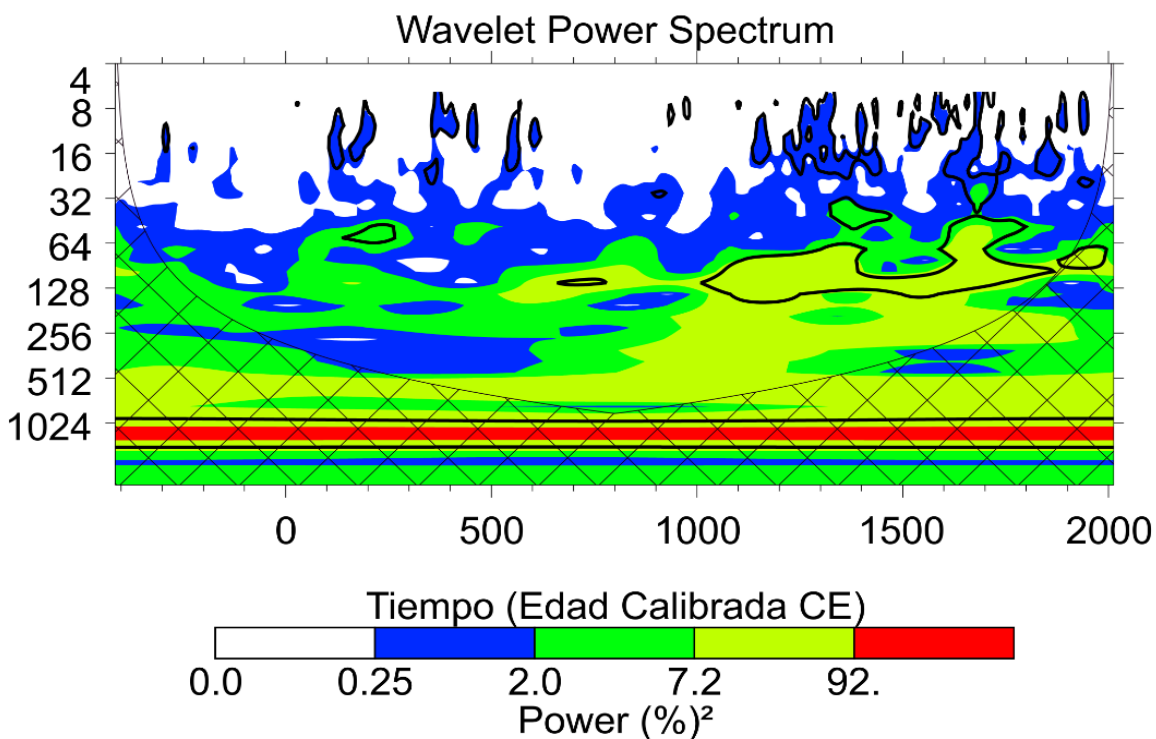


Fig.2.3. Análisis espectral tipo wavelet realizado a la serie de sílice biogénico (%), utilizando el método de Morlet, previamente remuestreada con una resolución de 3 años. La región sombreada es el cono de influencia, donde la varianza se reduce. *Edad Calibrada en años de la Era Común (CE, common era por sus siglas en inglés).*

5. DISCUSIÓN

La reconstrucción de la productividad primaria marina de los pasados 2000 años se realizó con una resolución promedio de ~2 años (entre 1 y 2.5 años). Ambas proxies indican que el primer milenio corresponde a una etapa más estable, mientras que el segundo milenio se observa como un periodo de alta variabilidad en la productividad primaria marina. Mediante los análisis espectrales se detectaron variaciones significativas a escala multidecadal y secular, particularmente en el registro del sílice biogénico. Se han propuesto varios posibles factores que generan esta variabilidad en la productividad como la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO), actividad solar y el desplazamiento de la zona de convergencia intertropical (ITCZ); (Agnihotri et al. 2008; Pérez-Cruz 2013; Fleury et al. 2015; Fleury et al. 2016)

De manera general, se observaron diferencias significativas entre cada uno de los periodos climáticos. Durante periodos considerados globalmente como fríos (PFTEM, PEH), la productividad primaria marina reconstruida a partir del sílice biogénico fue menor en comparación con los periodos cálidos (OCR, ACM). A partir de la ACM aumentó la variabilidad en ambas proxies, con periodos de alta productividad seguidos de caídas en la productividad en un tiempo relativamente corto. Estudios realizados en el sistema de surgencias de Perú observan este mismo patrón de productividad (Salvatteci et al. 2014; Fleury et al. 2015), lo que contrasta con los resultados obtenidos por Barron et al. (2014) en la cuenca de Santa Bárbara utilizando ensamblaje de diatomeas y silicoflagelados, en el que concluye que no existen diferencias significativas entre la ACM y la PEH. Sin embargo, este comportamiento no se exhibe en la reconstrucción de la productividad basada en el total de clorinas para los periodos que abarca el registro. El total de la productividad primaria marina medida mediante las clorinas totales, registra los promedios más altos de productividad durante la PEH y el EM. El desacoplamiento entre las proxies de productividad primaria marina observado en ciertas partes del registro (**fig. 1.2, 2.1**) pudiera a estar respondiendo a varios factores, pero posiblemente mayormente controlado por diferencias en la dinámica de la comunidad fitoplanctónica.

Desacoplamiento entre las proxies de productividad primaria marina

En un estudio desarrollado para caracterizar el flujo de partículas en cuenca Soledad, Silverberg et al. (2004) observaron cambios en lo ensamblajes que componían la nieve marina en la región. Observaron que durante condiciones oceánicas normales, las partículas pasaban de estar integrados por una mezcla de diatomeas, radiolarios y coccolitofóridos a estar dominados principalmente por coccolitofóridos cuando las condiciones de El Niño. Durante condiciones tipo El Niño, las características oceanográficas del sitio se parecen más al océano tropical (aguas más cálidas), las cuales conllevan a cambios en las comunidades del fitoplancton. Cermeño et al. (2008) indica que en ambientes poco estables como los ambientes de surgencias, que se caracterizan por una columna de agua bien mezclada y una correspondiente alta abundancia de diatomeas (Goericke 2011, para la Corriente de California), al cambiar a condiciones hacia una mayor estratificación de la columna de agua, conlleva a un consecuente agotamiento de los nutrientes y un aumento en los coccolitofóridos con respecto a las diatomeas. En el área de estudio, que corresponde al extremo sur del ecosistema de la Corriente de California, las condiciones que generan estratificación de la columna están asociadas al debilitamiento de la corriente de California y la intrusión de aguas tropicales más cálidas, que por lo general responde a eventos de El Niño (Durazo y Baumgartner, 2002).

El desfase observado en algunos periodos del registro entre las proxies de productividad primaria medidas en éste estudio no es inusitado. Gebhardt et al. (2008) concluyen que el aumento en la productividad medida mediante las clorinas se debió al aporte de macronutrientes provenientes de la mezcla vertical de aguas superficiales, mientras que el sílice pudiera estar controlado por la surgencia de masas de agua profundas y/o a aumentos en las tasas de aporte continental de sílice por medio de ríos. Mediante la revisión de la literatura relativa a la dinámica de las comunidades del fitoplancton en la región del área de estudio (Silverberg et al. 2004; Almazán-Becerril et al. 2012), una posible respuesta al desacoplamiento entre las proxies de paleoproduktividad en este estudio pudiera deberse a que la mayor contribución a la productividad primaria marina provenga de otros grupos del fitoplancton más que de las diatomeas, tales como los coccolitofóridos.

Surgencias y la productividad primaria reconstruida

La región del área de estudio es considerada como parte de la zona de influencia de la corriente de California y se sugiere que la productividad marina está controlada principalmente por las surgencias (Durazo y Baumgartner, 2002; Zaytsev et al., 2003). La dinámica del fitoplancton está muy relacionada con la capacidad de los grupos para proliferar bajo diferentes condiciones oceanográficas. Aunque las diatomeas son el mayor contribuyente en la biomasa fitoplanctónica en el sistema de la corriente de California (Goericke et al., 2011), Almazán-Becerril et al. (2003) señalan que esta dominancia se modifica cuando disminuyen las condiciones de surgencias y pasa a estar dominada por las haptófitas. En el presente estudio se observa que la productividad marina medida mediante el contenido de sílice biogénico (reconstruido a partir de núcleos sedimentarios) no responde en su totalidad a los eventos de surgencias ($r_{Spearman} = -0.12$; **fig. 5.1 B y C**). Mientras que las clorinas responden en mayor medida a las surgencias ($r_{Spearman} = 0.28$; **fig. 5.1 A y B**). Recientemente, Renault et al. (2016), sugieren que la productividad primaria marina no solamente está siendo controlada por el efecto de las surgencias. Observan en la Corriente de California, que aun cuando los vientos generadores de surgencias se debilitan, la productividad primaria marina aumenta. Esto pudiera explicarse por el impacto que genera en la productividad el esfuerzo del viento sobre las corrientes costeras y los eddies (giros geostroficados) que éstas generan a mayor profundidad en la columna de agua.

A partir del análisis de tendencia realizado para las proxies de productividad para la misma periodicidad que el registro instrumental del índice de surgencias (1946-2012) se detecta una disminución significativa en la productividad medida con sílice biogénico ($t_{cal} - 5.66$, $t_{cri} 1.99$; 95%). Mientras que en las clorinas, para este mismo periodo, no se observa una tendencia significativa ($t_{cal} 0.53$, $t_{cri} 1.99$; 95%). Particularmente, en los últimos 80 años la tendencia de las surgencias en el registro instrumental se presenta una tendencia clara a aumentar ($t_{cal} 2.83$, $t_{cri} 1.99$; 95%), lo que apoya la hipótesis que propuso Bakun (1990). Sin embargo, la respuesta de los indicadores de productividad primaria es opuesto a lo esperado, lo que nos permite proponer que, cuando menos, para el área de estudio esta hipótesis no se cumple en su totalidad y, en efecto, la productividad pudiera estar respondiendo a los forzamientos que propone Renault et al. (2016).

Tabla III. Análisis de tendencia para proxies de productividad primaria en este estudio y el índice de surgencias ($m^3 s^{-1} 100m$; <http://www.pfeg.noaa.gov>) entre 1946 y 2012.

| PERIODO | t_{cal} | t_{cri} | Ecuación de la Regresión | TENDENCIA |
|-----------------------------|-----------|-----------|----------------------------|-------------------|
| 1946-2012 | | | | |
| Clorinas | 0.53 | 1.99 | Clor= $-6.6+0.00335 CE$ | No significativa |
| Sílice Biogénico | 5.66 | 1.99 | $Si_{Bio}= 58.4-0.0295 CE$ | Significativa (-) |
| Índice de Surgencias | 2.83 | 1.99 | Surg= $-33.6+0.0170 CE$ | Significativa (+) |

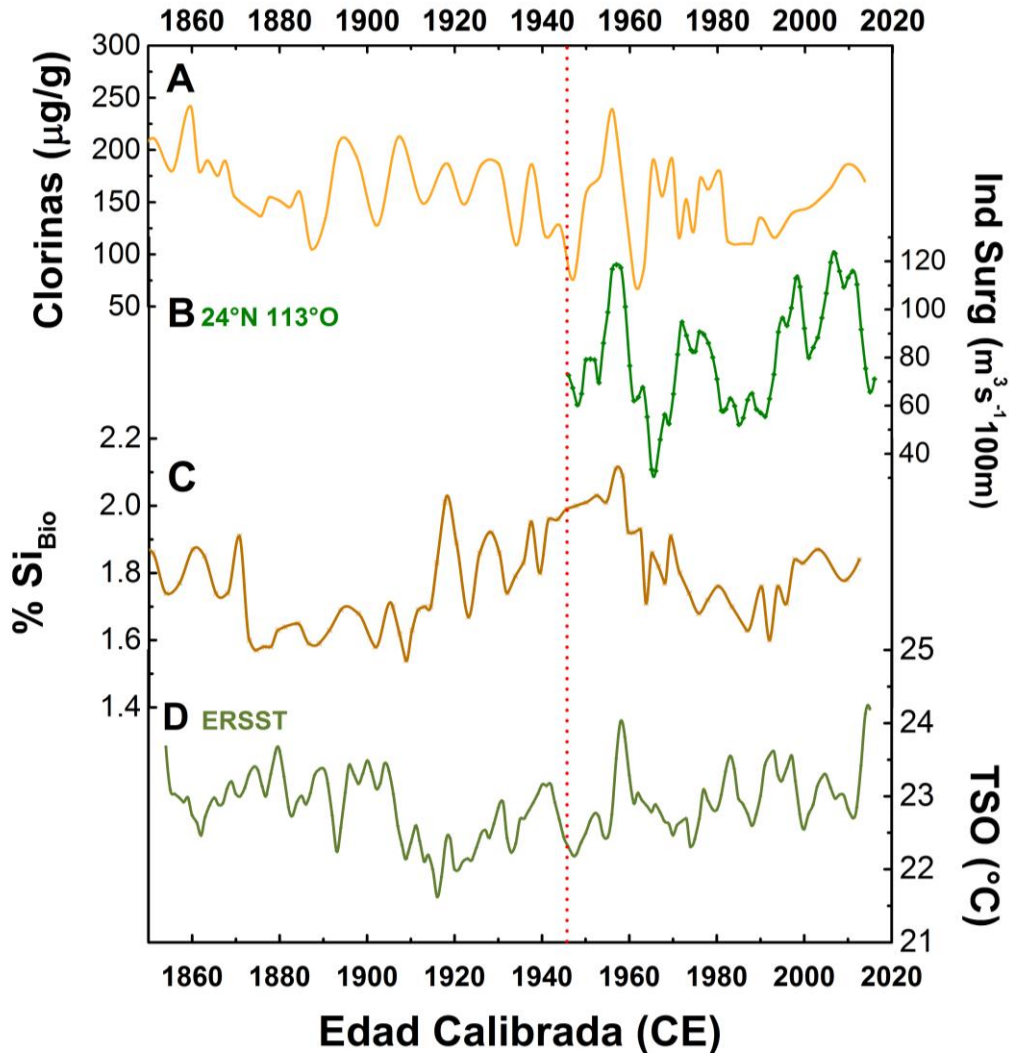


Fig. 5.1. Comparación de proxies de productividad primaria marina (PPM): A) Clorinas totales; B) Índice de surgencias (<http://www.pfeg.noaa.gov>) para las últimas 7 décadas. C) Sílice; D) Temperatura superficial del océano en el área de estudio a partir de ERSST, *Extended Reconstruction Of Sea Surface Temperature*; C y D se les aplicó una media móvil de 3 años: Edad Calibrada en años de la Era Común (CE, *common era por sus siglas en inglés*).

Agentes forzantes de la variabilidad en la productividad primaria marina en los últimos 2000 años en Cuenca Soledad

Durante los pasados 2000 años, la productividad ha pasado de ser casi constante en los primeros 1000 años del registro a presentar una alta variabilidad, a partir de la ACM. Las razones que explican este aumento son varias y se discuten a continuación. Cabe señalar que las señales climáticas generalmente están siendo afectadas por más de un forzamiento y que en ciertos momentos alguno pudiera ser más dominante que otro.

Movimiento de la ITCZ y su influencia en la productividad primaria marina

La zona de convergencia intertropical (*ITCZ por sus siglas en inglés*) es un cinturón de alta convección de nubosidad sobre el ecuador entre los 10°N y 3°N, cuyo desplazamiento estacional está relacionado con el calentamiento de un hemisferio con respecto al otro. Los patrones de precipitación estacional se encuentran muy relacionados con este sistema (Sachs et al. 2009). Este comportamiento en el desplazamiento también se observa en escalas temporales más largas. Haug et al. (2001) propusieron que los cambios hidrológicos registrados mediante la concentración de titanio en los sedimentos de cuenca Cariaco estaban relacionados con la posición de la ITCZ. Posteriormente, se observó que además del impacto en la precipitación, la ITCZ también tiene un efecto sobre la productividad primaria marina. Cuando la ITCZ se encuentra más al sur la productividad disminuye tanto en el sistema de surgencias de Perú como en algunas regiones del Pacífico norte (p. ej. Golfo de California; costa de Baja California); la condición opuesta se presenta cuando la ITCZ se encuentra en su posición más septentrional (Agnihotri et al., 2008; Pérez-Cruz 2013; Fleury et al., 2015; Cartapanis et al., 2014; Salvatecci et al., 2014; Staines-Urias et al., 2015; Fleury et al., 2016).

El mecanismo por el cual la productividad se ve afectada por el desplazamiento de la ITCZ no es del todo claro y se ha propuesto que está relacionado principalmente con cambios en los patrones de vientos. Aire caliente que se genera en los trópicos convergen hacia la ITCZ, posteriormente este aire pierde energía en forma de calor en la atmósfera superior y diverge en forma de masas de aire más frías y secas, que posteriormente se *hunden*, generando el desplazamiento de masas de agua superficiales al soplar sobre estas. Esta circulación de las masas de aire genera vientos zonales y son precisamente éstos los

encargados de generar las surgencias (Schneider et al. 2014). Por lo que el desplazamiento latitudinal de este sistema de convección implica también el desplazamiento de este sistema de vientos generadores de surgencias.

Comparamos nuestras series de productividad contra la serie de porcentaje de titanio presentada por Haug et al. (2001), como una proxy del desplazamiento de la ITCZ con el objetivo de identificar si éste pudiera tener un efecto sobre la productividad primaria marina (**fig. 5.2**). Durante el primer milenio, ambos registros (B y C) presentan valores muy constantes. Alrededor del 950 año CE, que coincide con el inicio de la ACM, se observa una mayor variabilidad (ciclos de mayor amplitud). A escala temporal más larga (por arriba de la multidecadal), se observa que cuando la ITCZ está más al norte se presentan periodos de alta productividad en nuestros registros. Especialmente durante el PFTEM y la PEH, periodos considerados globalmente como fríos (Mann et al. 2009), la ITCZ se ubicaba en su posición más al sur, coincidiendo con menor productividad en el registro de sílice biogénico y en la última parte de la PEH en las clorinas. Sachs et al. (2009) señala que durante la PEH la ITCZ se encontraba más al sur, posiblemente debido a una menor radiación solar. Una confirmación de la influencia de la posición de la ITCZ sobre la productividad se puede observar en momentos específicos del registro (~210, 1250 y 1650 años CE) en que coinciden las bajas productividades en clorinas y sílice biogénico con el desplazamiento de la ITCZ hacia el sur.

El mecanismo anterior pudiera explicar por qué la productividad se ve afectada por las migraciones de la ITCZ. Es importante mencionar que aunque tiene un impacto indiscutible sobre la productividad de nuestra región de estudio, éste no es el único forzamiento influenciando la variabilidad de la productividad primaria marina.

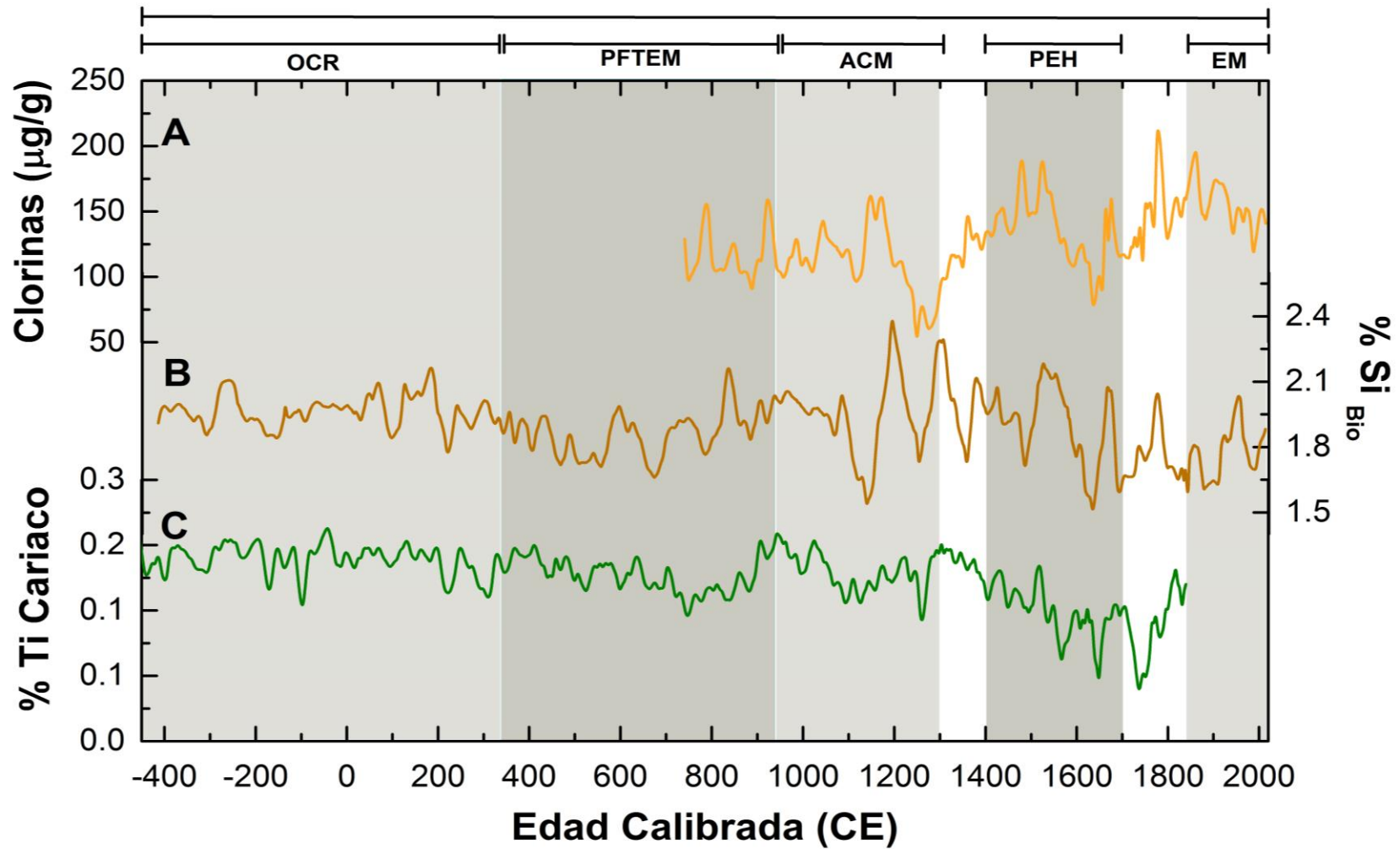


Fig. 5.2. Desplazamiento de la ITCZ. Comparación de la serie de Titanio (%) de la Cuenca Cariaco (C; Haug et al., 2001) con las proxies de productividad reconstruidas en este estudio (A, B); todos los datos tienen una media móvil de 15 años. En gris se señalan los periodos climáticos, en la parte superior se indica a qué periodo corresponde. Edad Calibrada a años de la Era Común.

La variabilidad solar como agente de variación en la productividad primaria marina

Partiendo del hecho que es la principal fuente de energía del planeta, el sol tiene un claro efecto sobre el clima, por lo que su rol es significativo en provocar cambios climáticos (Bard and Frank 2006). El registro de manchas solares presenta tendencias en los fenómenos magnéticos de origen solar, tales como los ciclos de 11 años y los seculares (~60-150 años), también denominados de Gleissberg; éstos últimos tienen la particularidad de presentar amplitudes variables (Gray et al., 2008, Ma 2009). El mecanismo mediante el cual la variabilidad solar actúa, posiblemente sea inducida por un incremento en la radiación solar que genera un incremento en los sistemas de presión oceánicos en latitudes medias, una mayor advección de aire más cálido sobre los continentes y descenso de aire frío desde el interior del continente hacia la costa, generando desplazamiento de masas de agua (Gray et al. 2010). De lo anterior pudiéramos esperar que los periodos de mayores manchas solares estén relacionados con mayor productividad fitoplanctónica mientras que durante los mínimos solares (disminución prolongada de la actividad solar), se observa el enfriamiento en zonas continentales medias a altas (Gray et al. 2010).

En el análisis espectral realizado para el sílice biogénico se observó variabilidad significativa (99% de confianza) a escala secular (~97-110 años; **figs. 1.3, 1.4**) constante durante los últimos 1000 años. Este modo coincide con los ciclos de variabilidad solar de Gleissberg por lo que se compararon las proxies de productividad con el número de manchas solares a partir del año 1700 CE (medido mediante observaciones directas; **fig. 5.3 C; A2**). Se observa que los periodos de mayor (menor) productividad en los pasados 400 años guardan correspondencia con los máximos (mínimos) en el número de manchas solares. Por lo que pudiéramos sugerir que el mecanismo descrito anteriormente está influenciando la dinámica de la productividad, particularmente del sílice biogénico, a escalas seculares. Este fenómeno ha sido detectado también en sitios como el Pacífico norte (Galloway et al., 2013), el Golfo de California (Barron y Bukry, 2007), el sistema de surgencias de Perú (Agnihotri et al., 2008; Fleury et al., 2016) y el Mar Árabe (Kurian et al. 2009), por mencionar algunos. Barron y Bukry (2007) proponen que la productividad (medida mediante ensamblajes de diatomeas y silicoflagelados) está siendo controlada por la variabilidad solar; y que la mayor productividad está asociada a un número menor de manchas solares. Estos autores proponen

que este comportamiento, opuesto a lo observado en nuestro estudio, ocurre debido a un mayor enfriamiento del continente durante el invierno y que genera un mayor gradiente entre los sistemas atmosféricos que rigen su sistema de surgencias. Cabe señalar que en el Golfo de California, las condiciones de surgencias, a diferencia de nuestra región de estudio, ocurren durante el invierno y están favorecidas por el gradiente atmosférico entre el Golfo y el continente. Cortina-Herguera (2014) observan este patrón de variabilidad secular en su registro de carbono orgánico para cuenca Soledad y concluyen que no observan una relación directa con la variabilidad solar, dichos resultados difieren con lo encontrado en este estudio, que en al menos los últimos 400 años la productividad está cercanamente relacionada con la actividad solar. Adicionalmente, Marchitto et al. (2010) observan que las variaciones en la temperatura a escala milenial están asociadas a la variabilidad solar; encontrando que durante los periodos considerados como mínimos solares se corresponden con condiciones tipo El Niño, lo que apoyaría nuestros resultados.

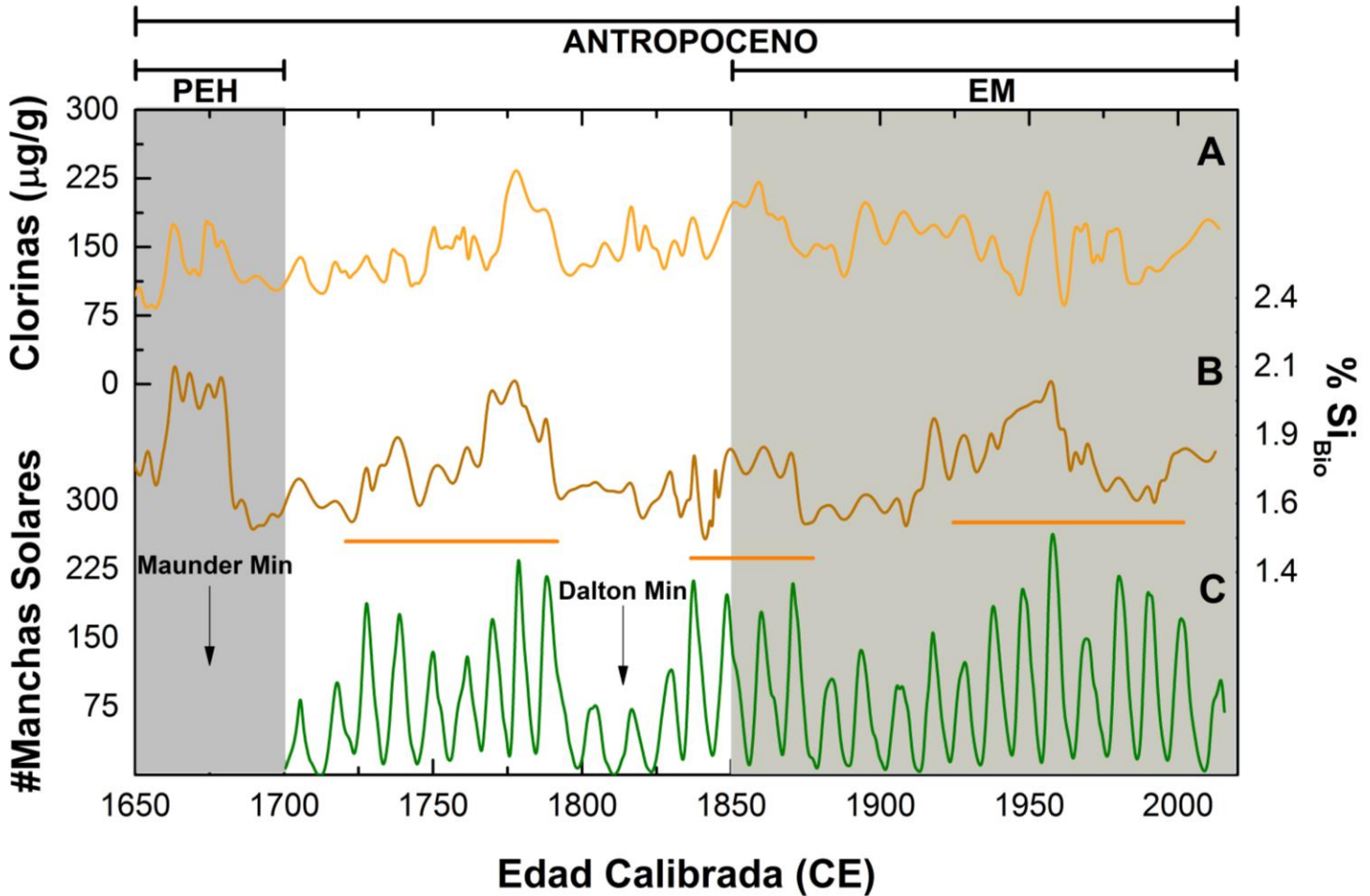
La Oscilación Decadal del Pacífico

Además de los modos seculares, los análisis espectrales realizados indican que la variación a escala multidecadal también es significativa en ambas proxies de productividad (~50, 30, 20 años). En el Pacífico nororiental este modo de variabilidad responde a la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y a la oscilación del giro del Pacífico norte (NPGO). La PDO es un patrón de oscilación multidecadal de variabilidad climática con una expresión espacial muy parecida a la del fenómeno ENSO, centrado sobre el océano pacífico y América del Norte. La PDO actual tiene una variabilidad de 20 a 30 años. Así mismo, sus efectos son más visibles en el Pacífico Norte, mientras que en los trópicos tiene una menor influencia (caso contrario de los eventos de ENSO; Mantua et al. 1997; Mantua et al. 2002).

La fase positiva de la PDO, también considerada como la fase cálida, se presenta cuando el Pacífico Occidental se enfría mientras que la parte Oriental del Pacífico norte se calienta. El patrón opuesto se identifica como la fase negativa o fría de esta oscilación. Mantua et al (1997) consideran que, en su fase positiva, el efecto generado por la PDO se asemeja a aquellos eventos de El Niño durante la cual se debilita el sistema de alta presión del Pacífico, disminuyendo o suprimiendo las surgencias y reduciendo la productividad biológica y en continente aumenta la precipitación. Durante las fases negativas de la PDO,

más similares a condiciones tipo La Niña, el sistema de alta presión se fortalece, generando un aumento en las surgencias costeras y la productividad biológica, generando condiciones áridas en continente.

Fig. 5.3. Efecto de la variabilidad solar sobre la productividad primaria. Reconstrucción de la productividad primaria marina mediante clorinas (A) y sílice biogénico (B) comparado con el número de



manchas solares observadas (C; Fuente: WDC-SILSO, Royal Observatory of Belgium). Se indican los mínimos solares (Maunder y Dalton). Las líneas naranjas señalan momentos con mayor número de manchas solares. Antropoceno (1610-Presente; Lewis et al., 2014); PEH Pequeña Era de Hielo (1400-1700); EM Época Moderna (1850-Presente); Años de la Era Común (CE).

Se compararon las proxies de clorinas y de sílice biogénico con la PDO reconstruida (fig. 5.4.1 y 5.4.2, respectivamente) a partir de anillos de árboles del sur de California (MacDonald y Case, 2005). Estos datos revelan una fase negativa de la PDO pronunciada y de largo periodo entre los años 1000 y 1300 CE (ACM), caracterizado por extensas sequías en Norte América (Cook 2004), seguido de una fase positiva que culmina a finales de la PEH.

Este patrón de variabilidad se refleja en la productividad primaria medida a partir de las clorinas (**fig. 5.4.1**). Contrario a lo que se esperaría, la productividad aumenta cuando la PDO se encuentra en fase positiva ($r_{\text{Spearman}}=0.47$). Abella-Gutiérrez y Herguera (2016) también observan esta relación positiva entre la PDO reconstruida por MacDonald y Case (2005) y su proxy de carbono orgánico, lo que los hace concluir que parte de la variabilidad en la productividad en cuenca Soledad está controlada por el clima de Norte América.

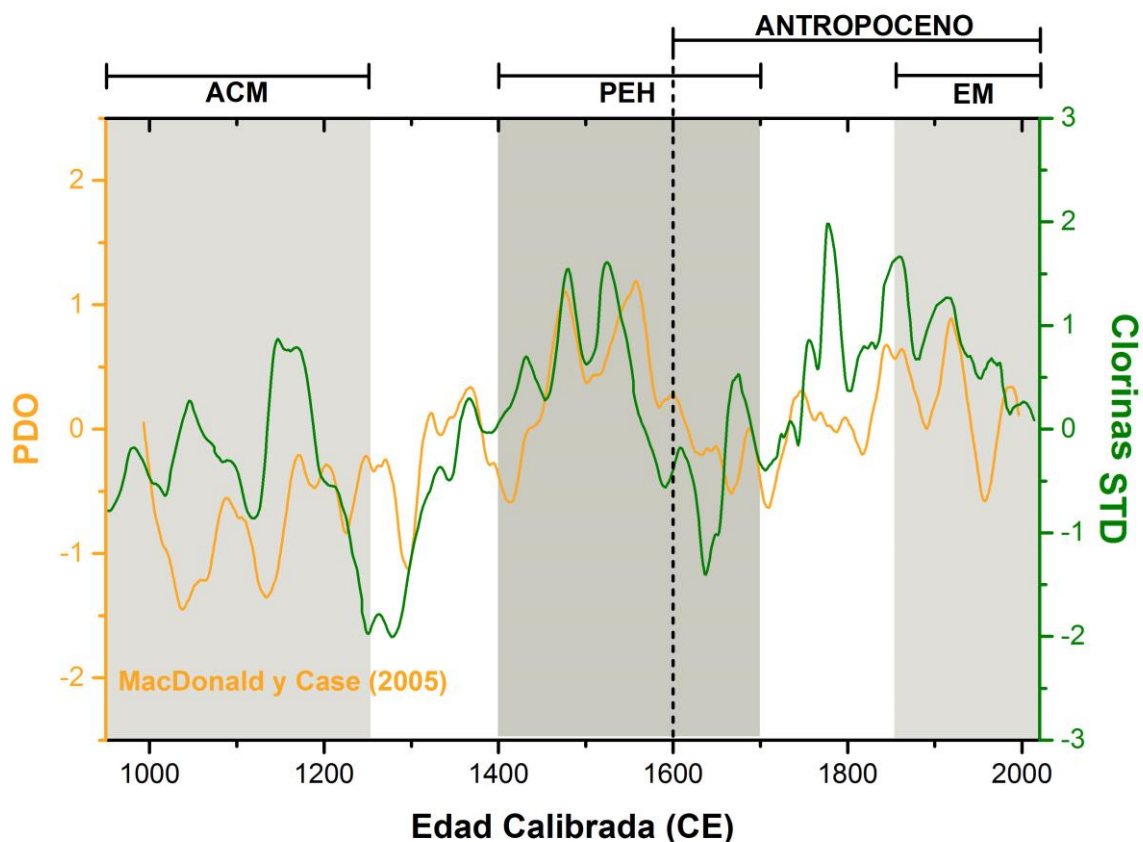


Fig. 5.4 1. Reconstrucción de la PDO de Macdonald y Case (2005) comparado con la proxy de clorinas totales (datos estandarizados), media móvil de 30 años para ambas series. Antropoceno (línea discontinua, ~1600-Presente); ACM Anomalía climática Medieval (950-1250); PEH Pequeña Era de Hielo (1400-1700); EM Época Moderna (1850-Presente); Años de la Era Común (CE).

Cuando se compara con la reconstrucción del contenido de sílice biogénico (**fig.5.4.2**), la relación con la PDO es opuesta en la mayor parte del registro ($r_{\text{Spearman}}=-0.11$), especialmente en el periodo que corresponde a la EM. Esto indica que en fase positiva (negativa) de la PDO la productividad disminuye (aumenta), lo que concuerda con lo propuesto por Mantua et al., 1997 y con reconstrucciones paleoceanográficas en el área de estudio (Cortina y Herguera, 2014).

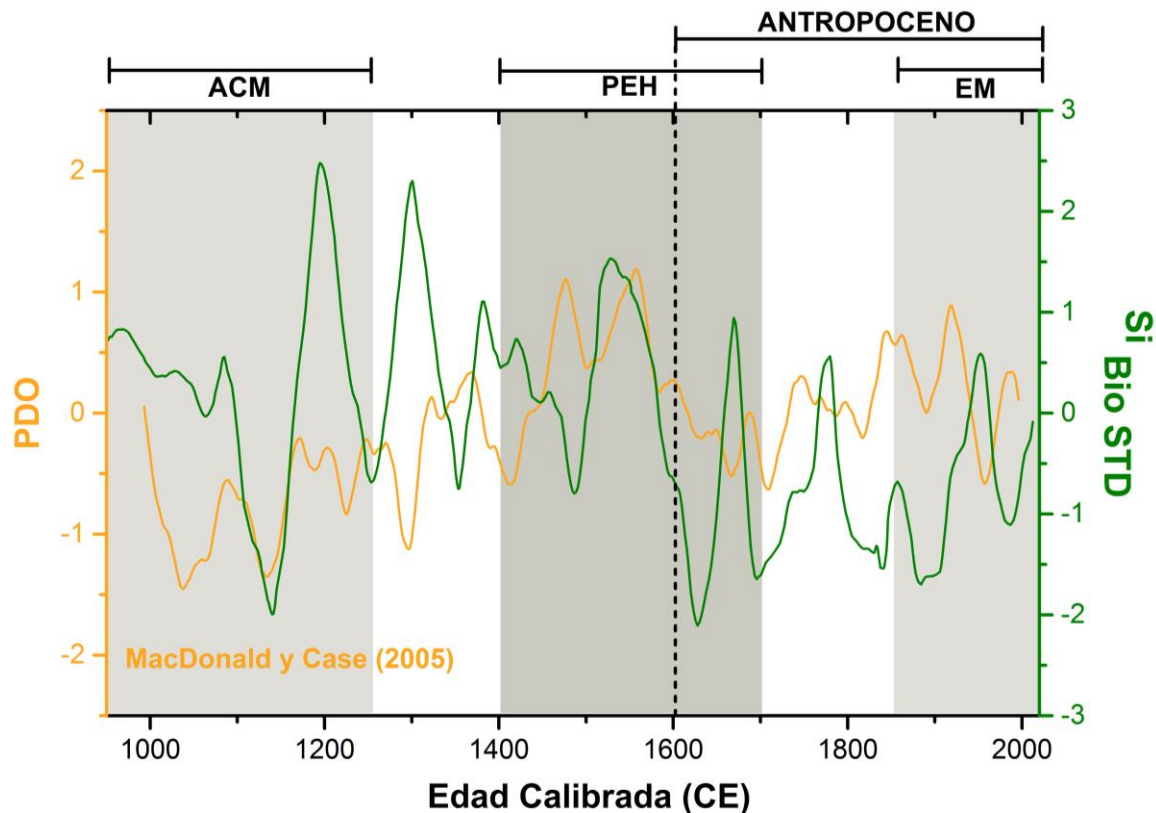


Fig. 5.4.2. Reconstrucción de la PDO de Macdonald y Case (2005) comparado con la proxy de sílice biogénico (Si_{Bio} , datos estandarizados), media móvil de 30 años para ambas series. Antropoceno (línea discontinua, ~1600-Presente); ACM Anomalía climática Medieval (950-1250); PEH Pequeña Era de Hielo (1400-1700); EM *Época Moderna* (1850-Presente); Años de la Era Común (CE).

Productividad primaria marina durante el Antropoceno (1600-Presente)

En este estudio definimos el Antropoceno a partir de Lewis y Maslin (2015), quienes proponen dos posibles fechas para clasificar más apropiadamente este periodo (1610 y 1964). En apego a las consideraciones de Lewis y Maslin (2015) consideramos al Antropoceno a partir del año 1600 CE. Uno de los principales objetivos de este estudio es determinar cómo la productividad ha evolucionado en condiciones de cambio climático, aquí definida a partir de 1850, a la que denominamos como la *Época Moderna*, por lo que nuestras proxies se compararon contra otras series climáticas del registro instrumental (fig. 5.5 y 5.5.1). El registro de la PDO-instrumental, desarrollado por Mantua et al. (1997), indica que durante el último siglo han ocurrido tres cambios de fase y que éstos tienen consecuencias sobre la productividad marina (Chavez, et al., 2003). Durante este periodo podemos observar que el

sílice biogénico tiene una relación opuesta con la PDO (como propone Mantua et al. 1997). Este patrón diferente con el registro de clorinas, lo que se aprecia con mayor detalle en la figura **5.5.1.C**. Un indicador de las condiciones Tipo-El Niño en la región es mediante el gradiente zonal de temperatura (**fig. 5.5E y 5.5.1E**). Aquí se observa la tendencia del gradiente zonal a disminuir, lo que sugiere condiciones más parecidas a El Niño; en estas condiciones se espera que la productividad disminuya debido a una mayor estratificación de la columna de agua, menor aporte de nutrientes que limitan la productividad. El efecto no se aprecia directamente con nuestras proxies, aunque para los pasados 70 años la tendencia de la productividad fue a disminuir. El índice de vientos entre La Paz y Hawaii, presentado en este trabajo indica que en las últimas décadas ha incrementado, lo que indica diferencias en los gradientes de presión que provocan una intensificación de los vientos Alisios, lo que coincide con lo encontrado por Bakun (1990), aunque las proxies de productividad no parecen responder de manera directa o lineal a las surgencias, como se esperaría si la productividad marina estuviese controlada sola y exclusivamente por las surgencias costeras de esta región.

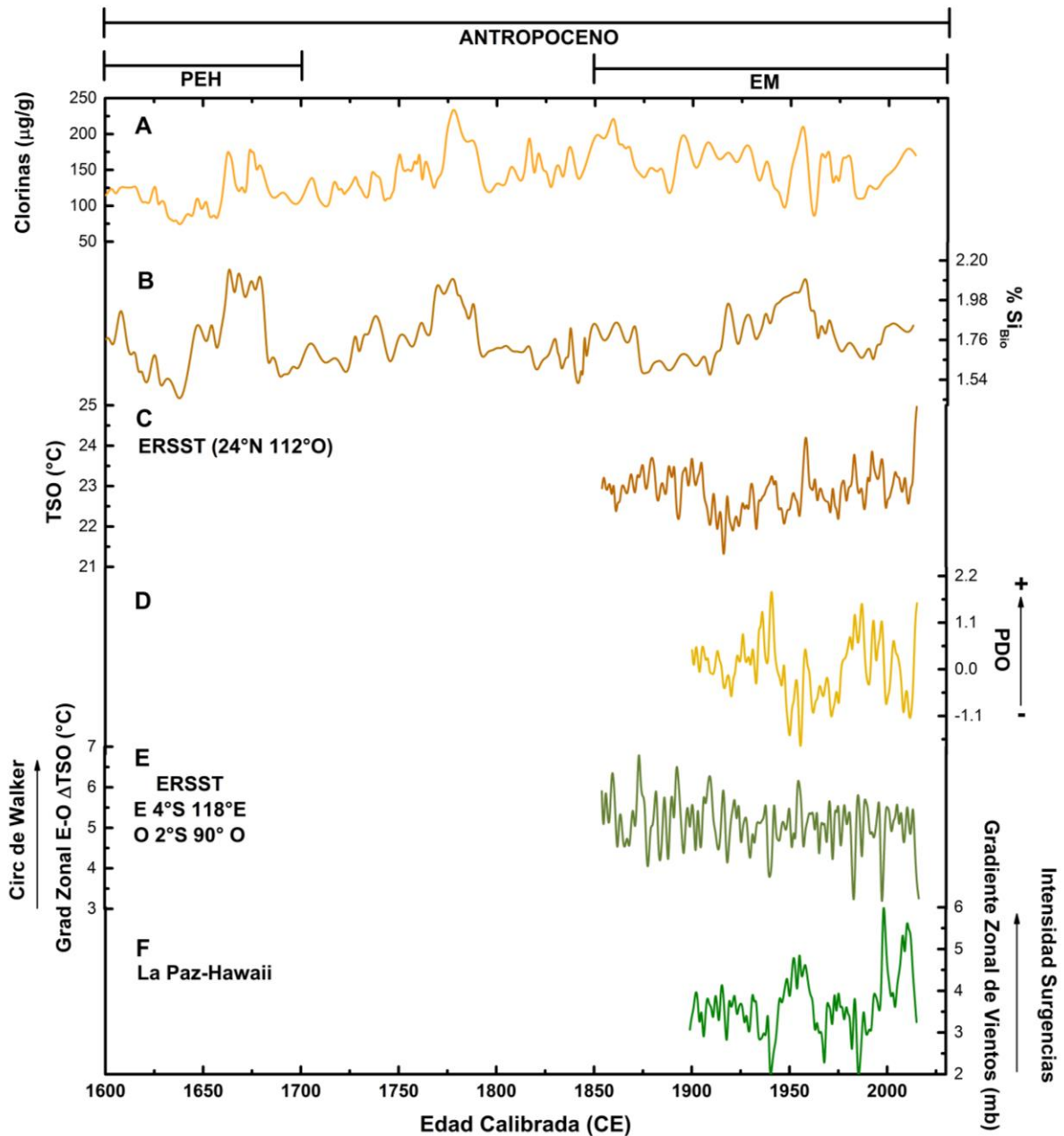


Fig. 5.5. Proxies climáticas para el Antropoceno. A) Clorinas totales ($\mu\text{g/g}$); C) %Sílice biogénico; C) Reconstrucción de la temperatura superficial del océano (ERSST *Extended Reconstruction Sea Surface Temperature*; www.iri.columbia.edu) en el área de estudio; D) Oscilación decadal del Pacífico (Mantua et al., 1997); E) Gradiente zonal de temperatura entre el estrecho de Makassar (Indo Pacífico, 6°S 116°E) y Galápagos (Pacífico tropical Oriental, 2°S 90°O), construido a partir de ERSST; F) Índice de vientos entre La Paz y Hawaii construido a partir de la diferencia entre presión atmosférica de estos sitios. PEH Pequeña Era de Hielo (1400-1700); EM Época Moderna (1850-Presente); Años de la Era Común (CE).

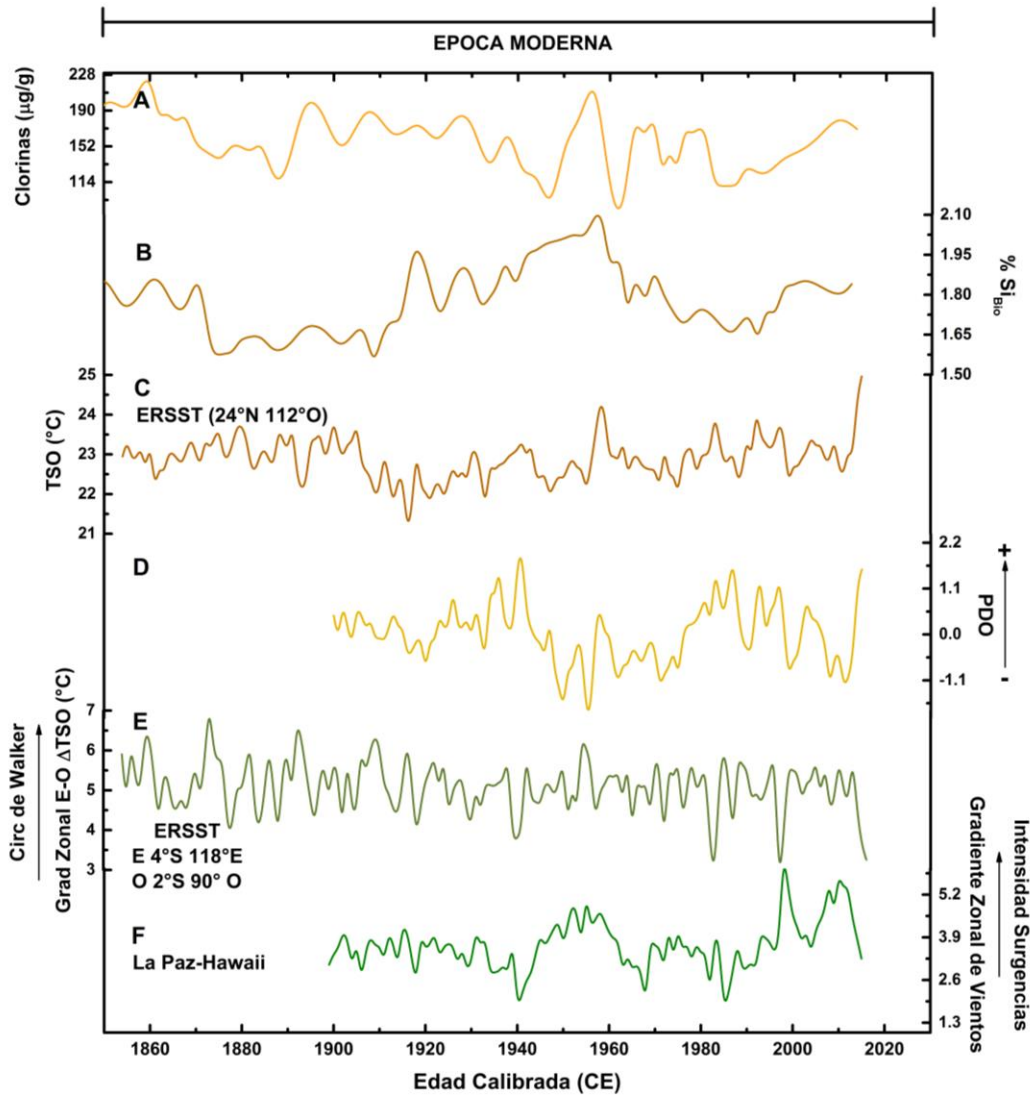


Fig. 5.5.1 Proxies climáticas para Época Moderna. A) Clorinas totales ($\mu\text{g/g}$); C) %Sílice biogénico; C) Reconstrucción de la temperatura superficial del océano (ERSST *Extended Reconstruction Sea Surface Temperature*) en el área de estudio; D) Oscilación decadal del Pacífico (Mantua et al., 1997); E) Gradiente zonal de temperatura entre el estrecho de Makassar (Indo Pacífico, $6^{\circ}\text{S } 116^{\circ}\text{E}$) y Galápagos (Pacífico tropical Oriental, $2^{\circ}\text{S } 90^{\circ}\text{O}$), construido a partir de ERSST; F) Índice de vientos entre La Paz y Hawaii construido a partir de la diferencia entre presión atmosférica de estos sitios. EM Época Moderna (1850-Presente); Años de la Era Común (CE).

6. CONCLUSIONES

Se reconstruyó la productividad primaria marina de los últimos 2000 años a muy alta resolución (~2 años) a partir del contenido de sílice biogénico y de clorinas totales en sedimentos extraídos en Cuenca Soledad. Se observó que la productividad pasó de ser constante a más variable a partir de los últimos 1000 años, coincidiendo con el inicio de la ACM.

Mediante un análisis de tendencia, tal como lo propuso Bakun (1990), se detectó el incremento del índice de surgencias durante los pasados 70 años aproximadamente; sin embargo, las respuestas biológicas no son las esperadas. Esto pudiera estar relacionado con que la productividad no solamente depende del impacto de las surgencias si no a otras condiciones como la presencia de giros geostróficos (Renault et al., 2016). Adicionalmente se observa un desfase o desacoplamiento entre las proxies de productividad que pudiera estar relacionado con la propia naturaleza de los grupos taxonómicos que conforman el fitoplancton y de cómo éstos responden a diferentes condiciones oceanográficas.

Las variaciones de la productividad a escala secular y multidecadal responden a varios forzamientos. La posición de la ITCZ tiene un efecto sobre la productividad, pues cuanto más al norte se encuentra, la productividad aumenta, y viceversa; aunque esto no logra explicar toda la variabilidad que observada. El registro de sílice biogénico presenta ciclos seculares claros que varían entre los 97 y 110 años, lo que coincide con los ciclos solares denominados Gleissberg. Al comparar estos ciclos contra el número de manchas solares se obtuvo una relación positiva en ambos: ciclos de menor actividad solar coinciden con mínimos de productividad, mientras que los máximos se asocian a alta productividad. Los mecanismos propuestos que pudieran estar afectando a la productividad primaria están relacionados directamente con las variaciones en los sistemas de presión atmosférica, que son los principales agentes de intensificación de los vientos y la consecuente mezcla vertical de la columna de agua, que provoca la entrada de nutrientes a la superficie del océano. En la escala decadal a multidecadal se observó que la PDO tiene un efecto importante sobre la productividad primaria; con una relación positiva con las clorinas e inversa con el sílice biogénico. Estos resultados pudieran estar indicando que aunque ambas son proxies de productividad, están registrando diferentes procesos climáticos; la productividad medida

mediante las diatomeas estaría respondiendo a forzamientos a nivel más global (ITCZ, Actividad solar). Mientras que las clorinas están siendo controladas por condiciones más a escala de cuenca (Pacífico).

7. REFERENCIAS

- Agnihotri R, Altabet MA, Herbert TD, Tierney JE (2008) Subdecadally resolved paleoceanography of the Peru margin during the last two millennia. *Geochemistry, Geophys Geosystems* 9.
- Almazán-Becerril A, Rivas D, García-Mendoza E (2012) The influence of mesoscale physical structures in the phytoplankton taxonomic composition of the subsurface chlorophyll maximum off western Baja California. *Deep Sea Res Part I Oceanogr Res Pap* 70:91–102.
- Arellano-Torres E (2010) Paleocceanography of the Eastern Tropical North Pacific on Millennial Timescales.
- Bakun A (1990) Global Climate Change and Intensification of Coastal Ocean Upwelling. *Sci New Ser* 247:198–201.
- Bard E, Frank M (2006) Climate change and solar variability: What's new under the sun? *Earth Planet Sci Lett* 248:480–493.
- Barron J a., Bukry D (2007) Solar forcing of Gulf of California climate during the past 2000??yr suggested by diatoms and silicoflagellates. *Mar Micropaleontol* 62:115–139.
- Barron J a., Metcalfe SE, Addison J a. (2012) Response of the North American monsoon to regional changes in ocean surface temperature. *Paleoceanography*.
- Black BA, Sydeman WJ, Frank DC, et al (2014) Six centuries of variability and extremes in a coupled marine-terrestrial ecosystem. *Science* (80-) 345:1498–1502.
- Bradley R, Briffa KR, Cole J, Osborn TJ (2003) The climate of the last millenium. *Paleoclimate, Glob Chang Futur* 105–141.
- Cartapanis O, Tachikawa K, Romero OE, Bard E (2014) Persistent millennial-scale link between Greenland climate and northern Pacific oxygen minimum zone under interglacial conditions. *Clim. Past* 10:405–418.
- Cervantes-Duarte R, Prego R, Gaxiola-Castro G, et al (2015) Intra-annual upwelling patterns and its linkage with primary production in the euphotic zone (24.5N) of Southern Baja California coast. *Estuar Coast Shelf Sci* 157:51–58.
- Chavez FP, Ryan J, Lluch-Cota SE, Niquen MC (2003) From Anchovies to Sardines and back: Multidecal Change in the Pacific Ocean. *Science* (80-) 299:217–221.
- Cook ER (2004) Long-Term Aridity Changes in the Western United States. *Science* (80-) 306:1015–1018.
- Cortina A, Herguera JC (2014) Mid-to-Late Holocene organic carbon export variability at the southern boundary of the California Current: An approach based on diffuse spectral reflectance of marine sediment cores. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 408:1–10.
- Crowley TJ (2000) Causes of Climate Change Over the Past 1000 Years. *Science* (80-) 289:270–277.

- Dean WE (2006) The geochemical record of the last 17,000 years in the Guaymas Basin, Gulf of California. *Chem Geol* 232:87–98.
- Deutsch C, Berelson W, Thunell R, et al (2014) Centennial changes in North Pacific anoxia linked to tropical trade winds. *Science* (80-) 345:665–668.
- Di Lorenzo E, Schneider N, Cobb KM, et al (2008) North Pacific Gyre Oscillation links ocean climate and ecosystem change. *Geophys Res Lett* 35:L08607.
- Durazo R (2009) Climate and upper ocean variability off Baja California, Mexico: 1997–2008. *Prog Oceanogr* 361–368.
- Durazo R, Baumgartner T (2002) Evolution of oceanographic conditions off Baja California: 1997–1999. *Prog Oceanogr* 54:7–31.
- Esparza-Alvarez MA, Herguera JC, Lange C (2007) Last century patterns of sea surface temperatures and diatom (>38 μm) variability in the Southern California current. *Mar Micropaleontol* 64:18–35.
- Fleury S, Crosta X, Schneider R, et al (2016) Centennial-scale variations in diatom productivity off Peru over the last 3000 years. *The Holocene* 1–12.
- Fleury S, Martinez P, Crosta X, et al (2015) Pervasive multidecadal variations in productivity within the Peruvian Upwelling System over the last millennium. *Quat Sci Rev* 125:78–90.
- Ganeshram RS, Pedersen TF (1998) Glacial-interglacial variability in upwelling and bioproductivity off NW Mexico: Implications for Quaternary paleoclimate. *Paleoceanography* 13:634–645.
- Gebhardt H, Sarnthein M, Grootes PM, et al (2008) Paleonutrient and productivity records from the subarctic North Pacific for Pleistocene glacial terminations I to V. *Paleoceanography* 23:1–21.
- Goericke R (2011) the Structure of Marine Phytoplankton Communities—Patterns, Rules and Mechanisms.
- Gray LJ, Beer J, Geller M, et al (2010) Solar influence on climate. *Rev Geophys* 48:RG4001. doi:
- Harris, Philip G. Zhao, M. Rossel-Mellé, A Tiedemann, R. Sarnthein, M. Maxwell JR (1996)
- Harris PG, Maxwell JR (1995) A novel method for the rapid determination of chlorin concentrations at high stratigraphic resolution in marine sediments. *Org Geochem* 23:853–856.
- Haug GH, Hughen KA, Sigman DM, et al (2001) Southward Migration of the Intertropical Convergence Zone Through the Holocene. *Science* (80-) 293:1304–1308.
- Jones PD, Mann ME (2004) Climate over past millennia. *Rev Geophys* 42:1–42.
- Kornilova O, Rosell-Melé A (2003) Application of microwave-assisted extraction to the analysis of biomarker climate proxies in marine sediments. *Org Geochem* 34:1517–

1523.

- Kurian S, Agnihotri R, Borole D V, et al (2009) Possible solar control on primary production along the Indian west coast on decadal to centennial timescale. *J Quat Sci* 24:109–116.
- Lewis SL, Maslin MA (2015) Defining the Anthropocene. *Nature* 519:171–180. doi: 10.1038/nature14258
- Ma LH (2009) Gleissberg cycle of solar activity over the last 7000 years. *New Astron* 14:1–3.
- MacDonald GM, Case RA (2005) Variations in the Pacific Decadal Oscillation over the past millennium. *Geophys Res Lett* 32:1–4.
- Mann ME (2007) Climate Over the Past Two Millennia. *Annu Rev Earth Planet Sci* 35:111–136.
- Mann ME, Jones PD (2003) Global surface temperatures over the past two millennia. *Geophys Res Lett*.
- Mann ME, Zhang Z, Hughes MK, et al (2008) Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia. *Proc Natl Acad Sci U S A* 105:13252–13257.
- Mann ME, Zhang Z, Rutherford S, et al (2009) Global signatures and dynamical origins of the Little Ice Age and Medieval Climate Anomaly. *Science* 326:1256–60.
- Mantua NJ, Hare SR, Zhang Y, et al (1997) A Pacific Interdecadal Climate Oscillation with Impacts on Salmon Production. *Bull Am Meteorol Soc* 78:1069–1079.
- Mantua NJ, Maccracken MC, Perry JS, et al (2002) Pacific – Decadal Oscillation (PDO) Edited by Pacific – Decadal Oscillation (PDO). *America* (NY) 1:592–594.
- Marchitto TM, Muscheler R, Ortiz JD, et al (2010) Dynamical response of the tropical Pacific Ocean to solar forcing during the early Holocene. *Science* 330:1378–1381.
- Mohtadi M, Romero OE, Kaiser J, Hebbeln D (2007) Cooling of the southern high latitudes during the Medieval Period and its effect on ENSO. *Quat Sci Rev* 26:1055–1066.
- Mortlock RA, Froelich PN (1989) A simple method for the rapid determination of biogenic opal in pelagic marine sediments. *Deep Sea Res. Part A, Oceanogr. Res. Pap.* 36:1415–1426.
- Narayan N, Paul A, Mulitza S, Schulz M (2010) Trends in coastal upwelling intensity during the late 20th century. *Ocean Sci* 6:815–823.
- Pauly D, Christensen V (1995) Primary production required to sustain global fisheries. *Nature* 374:255–257.
- Pérez-Cruz L (2013) Hydrological changes and paleoproductivity in the Gulf of California during middle and late Holocene and their relationship with ITCZ and North American Monsoon variability. *Quat Res (United States)* 79:138–151.
- Ragueneau O, Tr??guer P, Leynaert A, et al (2000) A review of the Si cycle in the modern

- ocean: Recent progress and missing gaps in the application of biogenic opal as a paleoproductivity proxy. *Glob. Planet. Change* 26:317–365.
- Reimer P, Bard E, Bayliss A, et al (2013) IntCal13 and Marine13 Radiocarbon Age Calibration Curves 0–50,000 Years cal BP. *Radiocarbon* 55:1869–1887.
- Renault L, Deutsch C, McWilliams JC, et al (2016) Partial decoupling of primary productivity from upwelling in the California Current system. *Nat Geosci*.
- Sachs JP, Sachse D, Smittenberg RH, et al (2009) Southward movement of the Pacific intertropical convergence zone AD 1400–1850. *Nat Geosci* 2:519–525.
- Salvatteci R, Gutiérrez D, Field D, et al (2014) The response of the Peruvian Upwelling Ecosystem to centennial-scale global change during the last two millennia. *Clim Past* 10:715–731.
- Sánchez a, Carriquiry JD (2007) Acumulación de C org , N org , P org y BSi en la margen de Magdalena , BCS (México), durante los últimos 26 ka Accumulation of C org , N org , P org and BSi off the Magdalena margin , BCS (Mexico), during the past 26 kyr. 33:23–35.
- Schneider T, Bischoff T, Haug GH (2014) Migrations and dynamics of the intertropical convergence zone. *Nature* 513:45–53.
- Schubert CJ, Niggemann J, Klockgether G, Ferdelman TG (2005) Chlorin Index: A new parameter for organic matter freshness in sediments. *Geochemistry, Geophys Geosystems* 6:n/a–n/a.
- Silverberg N, Martínez A, Aguíñiga S, et al (2004) Contrasts in sedimentation flux below the southern California Current in late 1996 and during the El Niño event of 1997–1998. *Estuar Coast Shelf Sci* 59:575–587.
- Staines-Urías F, González-Yajimovich O, Beaufort L (2015) Reconstruction of past climate variability and ENSO-like fluctuations in the southern Gulf of California (Alfonso Basin) since the last glacial maximum. *Quat Res (United States)* 83:488–501.
- Stuiver M, Reimer PJ (1993) Extended 14C data base and revised CALIB 3.0 14C age calibration program. *Radiocarbon* 35:215–230.
- Sydeman WJ, García-Reyes M, Schoeman DS, et al (2014) Climate change and wind intensification in coastal upwelling ecosystems. *Science (80-)* 345:77–80.
- Torrence C, Compo GP (1998) *A Practical Guide to Wavelet Analysis*.
- van Geen A, Zheng Y, Bernhard JM, et al (2003) On the preservation of laminated sediments along the western margin of North America. *Paleoceanography* 18:n/a–n/a.
- Zaytsev O, Cervantes-Duarte R, Montante O, Gallegos-Garcia A (2003) Coastal Upwelling Activity on the Pacific Shelf of the Baja California Peninsula. *J Oceanogr* 59:489–502.
- Zhao M, Mercer JL, Eglinton G, et al (2007) Chlorin Index: A new parameter for organic matter freshness in sediments. *Deep Res Part II Top Stud Oceanogr* 10:n/a–n/a.