

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA



Facultad de Ciencias Marinas

Instituto de Investigaciones Oceanológicas

RECONSTRUCCIÓN DE ALTA RESOLUCIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD MARINA DURANTE EL ÚLTIMO MILENIO EN BAJA CALIFORNIA, MÉXICO.

TESIS

QUE PARA OBTENER GRADO DE

MAESTRA EN CIENCIAS EN OCEANOGRAFÍA COSTERA

PRESENTA

Elisabet Repiso Terrones

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS
POSGRADO EN OCEANOGRAFÍA COSTERA

**RECONSTRUCCIÓN DE ALTA RESOLUCIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD
MARINA DURANTE EL ÚLTIMO MILENIO EN BAJA CALIFORNIA, MÉXICO**

TESIS

QUE PARA CUBRIR PARCIALMENTE LOS REQUISITOS NECESARIOS PARA OBTENER EL
GRADO DE

MAESTRA EN CIENCIAS

PRESENTA

ELISABET REPISO TERRONES

Aprobada por:



Dr. José D. Carriquiry Beltrán

Director de Tesis



Dr. Julio Alberto Villaescusa Celaya

Sinodal



Dra. Amaia Ruiz de Alegría Arzaburu

Sinodal

Agradecimientos

Al Posgrado en Oceanografía Costera de la Facultad de Ciencias Marinas e Instituto de Investigaciones Oceanológicas de la UABC.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para la realización de este trabajo.

Mi más sincero agradecimiento al comité de tesis, a mi director Dr. José Domingo Carriquiry Beltrán, por su labor de enseñar a hacer las cosas de la mejor manera posible, y a mis sinodales el Dr. Julio A. Villaescusa y la Dra. Amaia Ruiz de Alegría Arzaburu por su valioso apoyo y observaciones al trabajo. Sin ellos no habría sido posible este trabajo.

A Pedro por su apoyo incondicional diario en el laboratorio y por aguantar todas mis quejas.

Al Laboratorio de Química Analítica, y al maestro José Luis Stephano Hornedo del Laboratorio Dra. Meredith Gould de la facultad de Ciencias, por la prestación de equipo.

A Katrin y al laboratorio de Nanociencias y Nanotecnología de la UNAM por su suministro de agua desionizada.

A Lalo por su buena actitud en el laboratorio.

A Genaro Gutiérrez por su ayuda con el tratamiento y búsqueda de bases de datos.

A Jimena por su disponibilidad, paciencia y cuidados diarios.

A Mini por ser mi compañera más fiel.

A Treinen por todo el apoyo en los trabajos del laboratorio y por ser compañera de clase en seminarios y ensayos.

A toda la gente que me ha acompañado de cerca: Belén, Alma, Tati, Amparo, Yuri, Arturo, Lorena, Raquel, y a todos mis compañeros del posgrado.

Agradecer también a los profesores de la Maestría por compartirnos su experiencia y conocimientos.

Dedicatorias

A mis padres, hermanos, abuelos, tíos y primos que me espera con paciencia y amor.

A mis amigas de la aventura de la licenciatura que están repartidas por el mundo: Alba, Marta, Mariquilla, Maria, Lara, Carmen, Joana, Patri, Marina y Tamara.

Y en especial a mi gran inspiración que desde pequeñita me empujó a las puertas del conocimiento y el aprendizaje, y me sigue cuidando desde otro lugar: Juan Repiso Rico.

ÍNDICE

Resumen.....	1
1. Introducción	2
2. Objetivos	7
2.1. Objetivo general.....	7
2.2. Objetivos particulares	7
3. Metodología	8
3.1. Área de estudio	8
3.2. Colecta de los núcleos	15
3.3. Modelo de edad.....	15
3.4. Muestreo	16
3.5. Medición de sílice biogénico	16
3.6. Análisis de datos	17
4. Resultados	19
4.1. Tasas de sedimentación	19
4.2. Serie de tiempo de paleoproductividad reconstruida.....	19
4.3. Análisis exploratorio mediante filtros	29
4.4. Análisis espectral	31
5. Discusión.....	27
6. Conclusión	49
7. Referencias.....	51

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Área de estudio. La estrella roja representa el lugar de colecta de los registros sedimentarios, las flechas muestran las corrientes de la región de Cuenca Soledad, Baja California Sur, México (La flecha azul oscuro representa la corriente de California, la flecha verde representa la corriente de Davison y la flecha negra con el borde punteado blanco representa la contracorriente de California).9
- Figura 2.** Perfil de la cuenca Soledad. Relieve del fondo, la flecha negra representa el lugar de donde el núcleo fue extraído. El punto rojo del mapa a la izquierda representa el lugar de colecta del registro de sedimento (adaptados de Google Earth®2015)11
- Figura 3.** Perfiles de densidad medidos dentro (círculos negros) y fuera (círculos blancos) de Cuenca Soledad. Se observa cómo el umbral batimétrico mantiene la densidad constante dentro de la cuenca a partir de unos 290 m (Modificado de van Geen *et al.*, 2003).12
- Figura 4.** Aspecto laminado del SD-6-MC13
- Figura 5.** Perfil de oxígeno ($\mu\text{mol l}^{-1}$) y de silicatos ($\mu\text{mol l}^{-1}$) con la profundidad de la región de estudio. Se muestra el comportamiento de estos con la latitud (23 °N a 27 °N) en el que la línea correspondiente a la Latitud 23 °N es la primera a la izquierda, mientras que la línea de la latitud 27 °N es la última línea a la derecha. En la zona situada más al norte se muestra la dominancia de las aguas polares más oxigenadas y en la zona más al sur la presencia de las aguas ecuatoriales más respiradas (WOA 2013).14
- Figura 6.** Núcleo SD-6-MC cortado a la mitad. Se puede apreciar el detalle de las bandas claras y más oscuras que predominan a lo largo de todo el núcleo.16
- Figura 7.** Serie de tiempo de la productividad reconstruida en el área de estudio para el último milenio a partir de sílice biogénico (%SiB). La zona sombreada de rojo representa el Periodo

Cálido Medieval (PCM), la azul la Pequeña Edad del Hielo (PEH) y la verde al Antropoceno21

Figura 8. Serie de tiempo del registro de productividad reconstruida para el Pacífico mexicano (%SiB) filtrada (línea negra) para todo el registro con: a) filtro de 20 años, b) filtro de 40 años, y c) filtro de 60 años. El sombreado rojo representa el PCM, el azul la PEH y el verde el Antropoceno.....24

Figura 9. Análisis espectral de la serie de tiempo de paleoproductividad, en ella queda expresada la significancia de cada una de las frecuencias registradas en la señal.....25

Figura 10. Registro de productividad reconstruida para el Pacífico mexicano (%SiB) (línea verde) y la anomalías de temperatura globales reconstruidas con un filtro de 10 años (Mann *et al.*, 2009). La franja roja representa al PCM y la azul a la PEH establecidas para el presente estudio28

Figura 11. Radiación solar a partir de ^{10}Be (Wm^{-2}) con filtro de 10 años para la región tropical (línea roja) (Mann *et al.*, 2005) y el registro de productividad reconstruida para el Pacífico mexicano (%SiB) (línea verde). Las franjas azules representan los periodos en los que se daban mínimos de radiación. Las flechas del lateral derecho indican el comportamiento resultante de la radiación sobre el desplazamiento de la ZCIT (rojas), y el del ensanchamiento de la ZMO con respecto a las surgencias (verdes).29

Figura 12. Registro de productividad reconstruida para el Pacífico mexicano (%SiB) y la variabilidad de las sequías mediante el NADA (North America Droughth Atlas) construido con el promedio anual de todas las reconstrucciones de la región suroeste de los EEUU contenida en la red de coordenadas 125W-105W, 31N-42N, estandarizados y con un filtro de 20 años ..31

Figura 13. Registro de productividad reconstruida para el Pacífico mexicano (%SiB) y la variabilidad de las precipitaciones por medio de aportes litogénicos al mar (% Titanio) en la Cuenca Cariaco (Venezuela) (Datos digitalizados de Haug *et al.*, 2001).....33

Figura 14. Intensidad de los vientos alisios para el periodo de 1990 a la actualidad en base a: a) Deutsch y colaboradores (2014), y b) al índice construido entre el gradiente de presiones de La Paz y de Hawaii. (Datos digitalizados de Deutsch *et al.*, 2014)37

Figura 15. Evolución de las surgencias durante el último milenio en el Pacífico Norienta Subtropical: a) Registro de productividad reconstruida (%SiB) para el Pacífico Mexicano en Cuenca Soledad, b) registro de productividad reconstruida para el margen de Perú a partir de abundancia de diatomeas (10^6 valvas g^{-1}) (Fleury *et al.*, 2015), y c) registro de desoxigenación de las aguas subsuperficiales de Perú mediante $\delta^{15}N$ (‰) (Fleury *et al.*, 2015). La franja roja representa el PCM, la azul la PEH y la verde el periodo Reciente. Datos digitalizados de Fleury *et al.*, 2015.....39

Figura 16. Series de tiempo de: a) anomalías de la PDO instrumental de los meses de invierno (Noviembre a Marzo) con un filtro de 5 años, nótese que el eje de PDO está invertido (<http://www.atmos.washington.edu/~mantua/abst.PDO.html>), b) índice de Bakun ($m^3/s/100$ m línea de costa) para la región $24^{\circ}N$ $113^{\circ}W$ con un filtro de 5 años (http://www.pfeg.noaa.gov/products/PFEL/modeled/indices/upwelling/NA/upwell_menu_NA.html), c) Temperatura superficial del mar ($^{\circ}C$) para la región $24^{\circ}N$ $112^{\circ}W$ con un filtro de 5 años (<http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCDC/.ERSST/.version4/>), d) Índice de vientos calculado a partir de la diferencia anual de presión (mb) entre Hawaii y La Paz, con un filtro de 5 años (<http://climexp.knmi.nl/start.cgi?id=someone@somewhere>), e) Profundidad de la termoclina (isoterma de $13^{\circ}C$) en la región del Pacífico Norte Tropical (Antonov *et al.*, in NOAA Atlas NESDros. Inf. Serv 66 (U.S. Government Printing Office Washintong, DC, 2010)) Digitalizado de Deutsch *et al.*, 2013, f) Desnitrificación ($\Delta\delta^{15}N$ (‰)) en Cuenca Soledad (Deutsch *et al.*, 2013). Digitalizado de Deutsch *et al.*, 2013, y g) productividad marina reconstruida para el Pacífico Mexicano (%SiB), para el periodo de 1900 a 2012 (año en que se colectó el núcleo sedimentario), excepto el índice de Bakun que comienza en 1945. Las bandas rojas representan los periodos de PDO positiva42

Figura 17. Registro de productividad reconstruida para el Pacífico mexicano (%SiB) para la última etapa del registro que abarca desde 1945. En ella queda representada la tendencia de las surgencias (directamente relacionada con productividad de diatomeas) mediante un análisis de tendencia (línea azul clara), cuya pendiente (-0.00183) no es significativa ($\alpha=0.025$, $n=68$, $p=2$).

.....47

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características de la extracción de cada uno de los núcleos que se usaron para realizar el trabajo.....	15
Tabla 2. Tasas de sedimentación para cada uno de los periodos expresadas en centímetros por cada mil años (cm ka^{-1})	19
Tabla 3. Datos estadísticos (media, desviación estándar (S.D.), máximo y mínimo), para el registro completo y para cada uno de los periodos. PCM: Periodo Cálido Medieval (Iniciado en el registro-950-1250); PEH: Pequeña Edad del Hielo (1400-1850); Antropoceno (1850-2012)	22
Tabla 4. % de años representados por la serie de tiempo de productividad reconstruida (%SiB), % de años en los que la productividad fue superior al promedio de toda la serie (1.88 %), % de años en los que la productividad fue inferior al promedio de toda la serie de tiempo, para cada uno de los tres periodos en los que se divide la serie de tiempo (PCM, PEH y Antropoceno), y para todo el periodo de tiempo registrado.....	23
Tabla 5. Resultados del análisis espectral. Ciclos (expresados en años) que se detectaron durante el último milenio y el nivel de significancia de cada uno de ellos	26
Tabla 6. % de años de sequías para cada periodo (PCM, PEH y Antropoceno) y para el registro completo.....	31
Tabla 7. Datos estadísticos (media, desviación estándar (S.D.), máximo y mínimo) y tasa de acumulación, para el Antropoceno y para los últimos ~60 años del Antropoceno	45

RESUMEN

El interés por el estudio de la variabilidad climática se ha incrementado en las últimas dos décadas, particularmente por los efectos que pudieran resultar del cambio climático global. La costa de Baja California se caracteriza por ser una región de alta productividad primaria marina bajo las condiciones actuales y en la que los cambios en la productividad primaria ocurrida en el pasado han quedado archivados en registros sedimentarios gracias a una marcada zona de mínimo oxígeno que permite la gran preservación de los productos exportados formados durante el ciclo de vida de los organismos. Estudios previos a escala milenial han demostrado condiciones de alta productividad e intensificación de las zonas de mínimo oxígeno durante periodos cálidos, y de baja productividad y un debilitamiento de las zonas de mínimo oxígeno durante periodos fríos.

Con el fin de determinar como la variabilidad climática durante el antropoceno ha afectado la productividad primaria en la costa occidental de la península de Baja California, se estimó a alta resolución el contenido de sílice biogénico en dos núcleos sedimentarios de Cuenca Soledad, Baja California Sur, que abarcan el último milenio. De los resultados obtenidos se identificaron periodos cálidos caracterizados por una alta productividad durante condiciones áridas, interrumpidos por periodos fríos regidos por una baja productividad durante condiciones húmedas. Además, se obtiene que el principal factor que modula la variabilidad de las surgencias es el forzamiento de la radiación solar, responsable de la migración latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical y del cambio de intensidad de los centros de presión atmosférica. Estos factores mantienen el control de las condiciones que favorecen o interrumpen el desarrollo de los vientos provenientes del noroeste que causan las surgencias. Por otro lado, se concluye que la productividad está fuertemente controlada por la Oscilación Decadal del Pacífico. Un análisis de la tendencia de las surgencias durante el último medio siglo indica que las surgencias no presentan ninguna tendencia clara que pudiera deberse al cambio climático. Este estudio concluye que el principal factor que controla la productividad es el forzamiento solar y el efecto que este tiene sobre las condiciones atmosféricas.

1. INTRODUCCIÓN

Las actividades humanas están influenciando cada vez más al sistema climático de La Tierra, tanto que sobrepasa a los forzamientos naturales que regulan el funcionamiento del sistema climático global. Steffen *et al.*, (2011) se refirieron al Antropoceno como una nueva época de la historia, proponiendo que la fecha coherente para su comienzo fue al inicio de la Revolución Industrial. Para motivos prácticos de este estudio, la Revolución Industrial se toma a partir de 1850, que es el periodo en el que la mayor parte de las transformaciones económicas, tecnológicas y sociales en Europa y Norteamérica concluyeron, y los efectos del clima empezaron a ser notorios. Además, este parte aguas tiene la finalidad práctica en este estudio de evitar el traslape con la Pequeña Edad del Hielo (PEH).

Mediante la modelización se ha proyectado que las tendencias climáticas observadas actualmente continuarán, e incluso se acelerarán durante el presente siglo (Doney *et al.*, 2014), por lo que es de especial importancia para el futuro de los ecosistemas analizar el comportamiento de estos cambios. En las últimas décadas se ha incrementado el interés por entender cómo han sido las variaciones producidas en el clima a nivel global durante el antropoceno, como los cambios generados en la circulación atmosférica y su efecto sobre la circulación oceánica (Crowley, 2000, Clement *et al.*, 2004, Marchitto *et al.*, 2010, Carriquiry *et al.*, 2015). A mayor escala temporal, registros obtenidos de todo el Pacífico durante el Holoceno tardío se caracteriza por una moderada productividad primaria y una desnitrificación menos intensa, que es interrumpida en escalas centenales y decadales por periodos relativamente cortos de alta productividad e intensa desnitrificación (Chávez *et al.*, 2003).

Las condiciones oceanográficas en el Noroeste del Pacífico responden con magnitud y frecuencia diferente a los cambios climáticos globales (Barron *et al.*, 2004, 2005, Goñi *et al.*, 2006, Flores-Trujillo *et al.*, 2009, Staines-Urías *et al.*, 2009, Pérez-Cruz, 2013). Diferentes estudios en el margen de Baja California (Hendy *et al.*, 2004, Arellano-Torres *et al.*, 2011, Cartapanis *et al.*, 2011, 2014, Carriquiry y Sánchez, 2014) han demostrado que la productividad marina es muy variable y altamente dependiente de factores atmosféricos, así como oceanográficos en escala milenial. Estos estudios han aportado diferentes hipótesis de cómo estos cambios afectaban a la cantidad de oxígeno disuelto de las masas de agua. Los resultados muestran que periodos más

cálidos (interestadales) coinciden con periodos de máxima productividad primaria y el contenido de oxígeno disuelto en la columna de agua muestra un patrón opuesto al de la productividad primaria marina. Esto indica que la degradación de material orgánico aumenta el consumo de oxígeno disuelto causando que la Zona de Mínimo Oxígeno (ZMO) incremente su tamaño e intensidad durante épocas de alta productividad (van Geen *et al.*, 2003, Hendy *et al.*, 2004, Cartapanis *et al.*, 2011, 2012, 2014).

El Sistema de la Corriente de California (SCC) es uno de los cuatro sistemas de *Eastern Boundary Currents* (Sverdrup *et al.*, 1942), situado en el Noreste del Pacífico. El SCC muestra una alta variabilidad temporal en sus propiedades físicas y se caracteriza por una alta productividad biológica generada por surgencias (Lynn & Simpson, 1987). Las surgencias son el resultado del desplazamiento de agua superficial forzado por los vientos con un consecuente afloramiento de la termoclina debido a un ajuste geostrófico. La surgencia costera es un proceso que responde a los cambios en la dirección del viento, están sujetas a una fuerte variabilidad (Barber y Smith, 1981), además de ser altamente vulnerables a los cambios del clima. Las zonas de surgencias costeras se han convertido en zonas social y económicamente importantes ya que, a pesar de que abarcan un 1% de área total del océano, sustentan el 20% de las pesquerías globales (Pauly y Christensen, 1995, Mann, 2000). Estas zonas son las áreas más productivas del océano moderno y la entrada de nuevos nutrientes influencia la composición y la variabilidad temporal de los productores primarios y de toda la red trófica (Peinert *et al.*, 1989). Debido a esto, los cambios en las áreas de surgencias costeras pueden tener un profundo impacto en la producción biológica y en la economía mundial por medio del control que ejercen sobre las pesquerías (Abrantes *et al.*, 2011). En los últimos 50 años, programas como California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations (CalCOFI) han detectado que la biomasa de ciertos organismos como especies de zooplancton en el SCC están decreciendo (McGowan *et al.*, 2003), mientras que las masas de agua se están calentando (Field *et al.*, 1998).

Debido a que la temperatura global ha incrementado de forma significativa en las últimas décadas, se han buscado también otras explicaciones como por ejemplo la variación en la intensidad de la radiación solar sobre el clima (Lean *et al.*, 1999). El sol es la principal fuente de energía que controla el sistema climático de la Tierra, y las variaciones que se producen en la actividad solar y la distribución de ese calor por la circulación oceánica, son factores que influyen directamente el clima (Hoyt y Schatten, 1997). Una estimación cuantitativa de la

relación que existe entre la variabilidad solar y el clima es debatible debido a que el total de los cambios en la actividad solar en escalas decadales y centenales son demasiado pequeñas (0.1-0.26%) como para causar impactos significativos en el clima de la tierra (Parker, 1999, Rind, 2002). Sin embargo, se ha sugerido que pequeños cambios en la actividad solar en escalas centenales o multidecadales acoplados con mecanismos de retroalimentación (como cambios en la cantidad de vapor de agua, cobertura de hielo, albedo, etc.) podrían tener un efecto acumulativo en las características del ambiente causando cambios importantes en el clima regional (Mehta y Lau, 1997, Beer *et al.*, 2000). Diferentes registros obtenidos en el hemisferio norte muestran evidencia de importantes oscilaciones decadales y centenales inducidas por el forzamiento solar durante el Holoceno (Bond *et al.*, 2001, Agnihotri *et al.*, 2002, Fleitmann *et al.*, 2003, Hu *et al.*, 2003, Mangini *et al.*, 2005, Wang *et al.*, 2005). También se ha visto que la intensidad del monzón de la India y la productividad del noroeste del mar de Arabia están fuertemente relacionados con las variaciones decadales y centenales de la radiación solar durante el último milenio (Agnihotri *et al.*, 2002, Agnihotri y Dutta, 2003). Varios estudios (von Rad *et al.*, 1999, Verschuren *et al.*, 2000, Hong *et al.*, 2001, Neff *et al.*, 2001, Bond *et al.*, 2002, Agnihotri *et al.*, 2002) además demostraron que la variabilidad solar en escala centenal tuvo impactos en el clima que causaron graves sequías e inundaciones en el pasado. Por otra parte, también existen trabajos que sugieren la posibilidad de que la PEH y el PCM (Periodo Cálido Medieval) surgieran como una respuesta directa a los cambios en la radiación solar (Lean *et al.*, 1999, Bond *et al.*, 2001, Abrantes *et al.*, 2011, Gómez-Navarro *et al.*, 2011).

Durante periodos de baja actividad solar, el hemisferio norte recibe menor cantidad de radiación, lo que provoca que el Atlántico Norte se enfríe y el Atlántico Sur sufra un ligero calentamiento. Este patrón que se crea entre ambos hemisferios provoca que los vientos del norte crucen el ecuador y desplacen la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) hacia el hemisferio sur (Haug *et al.*, 2001, Agnihotri *et al.*, 2002, Agnihotri y Dutta, 2003, Higginson *et al.*, 2004, Douglas *et al.*, 2007, Wang *et al.*, 2007, Okumura *et al.*, 2009). Esta situación ocurre durante el invierno boreal, temporada en la que el centro de alta presión del Pacífico Norte se debilita, mientras que el centro de baja presión de las Aleutianas se fortalece, reduciendo el gradiente zonal este-oeste asociado al viento que favorece las surgencias. Esto provoca que los vientos y las surgencias se debiliten, produciendo una disminución de la productividad primaria marina entre los 40 °N y los 20 °N a lo largo de la costa este del Pacífico Norte. Durante el verano, la ZCIT se desplaza hacia

el norte (Garreaud *et al.*, 2009) y se intensifica el gradiente de presión entre los centros de alta presión del Pacífico Norte y el centro de baja presión situado sobre el suroeste de EEUU. Debido a esta intensificación del gradiente de presión este-oeste, se producen fuertes vientos hacia el ecuador que intensifican las surgencias (Cartapanis *et al.*, 2014), provocando que la productividad sea más alta durante el verano (Thomas *et al.*, 2001).

Los registros instrumentales no permiten extender el análisis del clima más de ~150 años atrás, en el mejor de los casos para sólo unas pocas variables, por eso los registros climáticos naturales (proxies) de alta resolución son excelentes herramientas para entender el comportamiento climático en el pasado y hacer previsiones más fieles de sus tendencias a futuro. Además nos ayudan a distinguir entre la variabilidad climática natural y el efecto antropogénico sobre el clima (Abrantes *et al.*, 2011).

A partir de la cantidad de material orgánico que se acumula en el fondo del océano es posible hacer reconstrucciones mediante múltiples trazadores (proxies) sensibles a los cambios en la productividad primaria. Las diatomeas son organismos fitoplanctónicos que predominan durante los eventos de surgencias, y debido a que el sílice biogénico (SiB) forma parte de sus estructuras resulta un buen indicador de estas condiciones de alta productividad (Sánchez y Carriquiry, 2007a). Además existe una relación positiva entre la productividad en las aguas superficiales y los flujos de SiB hacia el fondo (Takahashi, 1989), por lo que sedimentos ricos en SiB se relacionan con zonas de surgencia y de alta productividad en el pasado (Ragueneau *et al.*, 2000). Las diatomeas son las especies dominantes durante los blooms de fitoplancton, surgencias costeras (Sánchez y Carriquiry, 2007a), divergencias ecuatoriales, ríos, ecosistemas costeros con grandes rangos de marea, eventos donde el viento produce mezcla o entradas de polvo atmosférico (Pichevin *et al.*, 2014). Las diatomeas desempeñan un papel muy importante en la bomba biológica, ya que se encargan del 40% de la productividad primaria marina (Nelson *et al.*, 1995), son las principales exportadoras de carbono orgánico al océano profundo (Buesseler, 1998) y producen la mayor parte del sílice biogénico (SiB) en el océano. Estos organismos incorporan silicatos del medio en forma de ácido ortosilícico para la formación de sus estructuras. La cantidad de SiB que llega al fondo está determinada por el balance entre el reciclamiento y la exportación de la materia orgánica generada por estos organismos silícicos. Aproximadamente un 60% del SiB se disuelve en la columna de agua durante su exportación (Nelson *et al.*, 1995). La concentración de saturación del SiB y la constante de velocidad de

disolución dependen directamente de la temperatura (Kamatani, 1982). Esta disolución continúa en la interfase agua-sedimento una vez que se ha depositado en los sedimentos, por lo que su preservación dependerá tanto de las características de la materia exportada, así como del ambiente de depositación. Sobre la materia depositada siguen influyendo la cinética y la termodinámica de la disolución, y además se suman otros factores como el proceso de enterramiento, la tasa de sedimentación y la bioturbación. Todo esto contribuye a que sólo un 3% del SiB sea sepultado a nivel global (Nelson *et al.*, 1995). En los márgenes costeros, con una menor profundidad y por tanto un menor recorrido en la columna de agua, se produce una menor exposición del material a la química del agua y más cantidad de material exportado, permitiendo que las tasas de enterramiento y su preservación se incrementen (Ragueneau *et al.*, 2000).

Con la finalidad de estudiar los cambios en la productividad marina en el Noroeste del Pacífico e inferir en los procesos dominantes que la controlan, en este estudio se midió el contenido de SiB de un juego de núcleos sedimentarios extraídos de la Cuenca Soledad, situada en una zona de plataforma continental influenciada por el SCC. Esta región se caracteriza por su elevada productividad y por alto consumo de oxígeno debido a la activa degradación de la materia orgánica, dando lugar a la formación de una ZMO a una profundidad entre 200 y 800 m (van Geen *et al.*, 2003). Esta condición de suboxia-anoxia permite la preservación de los productos exportados al fondo marino (Peterson *et al.*, 2000), y permite la realización de estudios paleoclimáticos muy confiables. El registro estudiado abarca el último milenio, cuya parte más profunda incluye la etapa del Periodo Cálido Medieval u Óptimo Climático Medieval (PCM), la más somera se corresponde con la Pequeña Edad del Hielo (PEH), y la más reciente con el Antropoceno (a partir del año 1850), que se le ha atribuido al periodo donde predomina la contribución antropogénica.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Reconstruir las variaciones en la productividad marina durante el último milenio mediante el uso del proxy de sílice biogénico (SiB).

2.2.OBJETIVOS PARTICULARES

- ✓ Determinar si han habido cambios en la intensidad de las surgencias costeras en Baja California durante el Antropoceno, como consecuencia del cambio climático global.
- ✓ Determinar la influencia de la variación de la radiación solar sobre los cambios en la productividad de Baja California durante el último milenio.

3. METODOLOGÍA

3.1. Área estudio

Los núcleos de sedimento utilizados en el presente estudio fueron extraídos de la Cuenca Soledad, situada al Noroeste del Pacífico mexicano (26° 12' N, 112° 44' W), sitio que se encuentra bajo la influencia del SCC.

La dinámica de corrientes de la región está influenciada principalmente por la corriente de California que transporta aguas frías (21 °C) subárticas y poco saladas ($S < 33.5$) que provienen del Pacífico Norte. En la región norte de Baja California la distribución superficial de temperatura tiene un rango promedio de 8 °C y muestra valores mínimos (14 °C) cerca de la costa, con isotermas orientadas paralelas a la costa entre 50-100 km mar adentro, y con una orientación perpendicular a la costa (E-W) en el océano profundo. Los mínimos relativos de temperatura cercanos a la costa se observan a lo largo del año y reflejan afloramientos de agua subsuperficial en abril que coinciden con las surgencias.

El patrón de salinidad presenta un comportamiento similar a la temperatura. Su distribución superficial en la región norte de Baja California muestra aguas de la Corriente de California entre 50 y 100 km de la costa durante la primavera. Hacia el verano se observa que la lengüeta del mínimo de salinidad se desplaza hacia el oeste hasta unos 100-200 km de la costa. Cerca de la costa la salinidad es relativamente mayor, $S = 33.6$, producto de agua subsuperficial que ha sido llevada a la superficie como resultado del bombeo de Ekman en la época de vientos intensos a lo largo de la costa en primavera. Durante otoño e invierno el mínimo de salinidad se extiende en todo el dominio de la región norte.

Las aguas de la corriente de California fluyen desde la zona subártica hacia el ecuador de manera superficial a unos 150-1300 km de la costa y cerca de la latitud de 25 °N gira hacia el oeste para unirse a la corriente Norecuatorial. En la zona más cercana a la costa fluyen desde el ecuador hacia el polo y de manera subsuperficial entre 150 y 600 m la contracorriente de California de manera subsuperficial entre los 150 y 600 m, y de manera superficial la corriente Davidson, que resulta de la recirculación de las aguas subárticas (Fig. 1). A la región localizada entre la corriente y la contracorriente de California se denomina zona de transición costera y está formada por meandros y giros (Brink y Cowles, 1991, Durazo y Baumgartner, 2002). A mayor

profundidad, existe la masa de agua intermedia del Pacífico Norte que forma una capa de mínimo de salinidad entre los 250 y 400 m, y por debajo de los 1000 m está presente la masa de Agua Profunda del Pacífico (Talley, 1993, Durazo y Baumgarther, 2002).

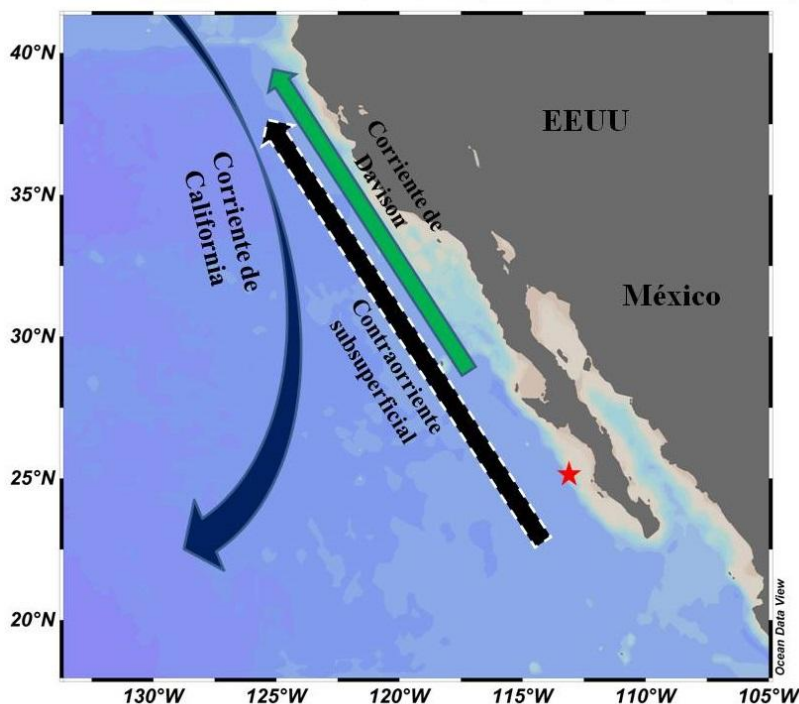


Fig. 1. Área de estudio. La estrella roja representa el lugar de extracción de los registros sedimentarios, las flechas muestran las corrientes de la región de Cuenca Soledad, Baja California Sur, México (La flecha azul oscuro representa la corriente de California, la flecha verde representa la corriente de Davison y la flecha negra con el borde punteado blanco representa la contracorriente de California).

La Cuenca Soledad está situada en la región subtropical, en una zona templada. Al sur de la zona de transición, las condiciones están fuertemente influenciadas por el fenómeno ENSO (El Niño-Oscilación del Sur, por sus siglas en inglés). La temperatura superficial del mar en la zona está mejor correlacionada con ENSO ($r=0.61$) que con las condiciones de los vientos de surgencias (Marchitto *et al.*, 2010). El ENSO tiene una gran influencia sobre la corriente de California debido a que durante los eventos de El Niño se produce un hundimiento de la termoclina que hace que las aguas de surgencia sean más cálidas (20 °C). Por el contrario, durante los eventos de La Niña la termoclina es más superficial y las aguas que emergen son más frías (17 °C). El

calentamiento del agua superficial se favorece por los eventos cálidos de El Niño, ya que las aguas subtropicales de mayor temperatura se desplazan hacia el norte y se mezcla con las aguas polares que provienen desde el norte (Marchitto *et al.*, 2010).

Posterior al 1977 se produjo una disminución de la entrada de agua fría, rica en nutrientes y de mayor salinidad desde zonas profundas hacia la zona eufótica (Roemmich y McGowan, 1995). Esto pudo ser debido principalmente al calentamiento de las aguas, el hundimiento de la termoclina y la mejora de la estratificación (McGowan *et al.*, 2003). Mantua y colaboradores (1997) observaron que durante las fases positivas de la PDO (Oscilación Decadal del Pacífico, por sus siglas en inglés) se favorecen las condiciones de estratificación cerca del margen de California, lo que reduce la productividad primaria y con ello la producción de salmón. La NPGO (Oscilación del Giro del Pacífico Norte, por sus siglas en inglés) es otro fenómeno decadal que sirve como indicador primario de la intensidad de las surgencias, del flujo de nutrientes y por tanto de las fluctuaciones en la biomasa fitoplanctónica. Durante la fase positiva de la NPGO se representa una intensificación de la corriente geostrófica del giro creando condiciones favorables para las surgencias en el sistema de California (Di Lorenzo *et al.*, 2008). Cambios centenales y mileniales también pueden cumplir un papel importante sobre la variabilidad climática por medio de cambios de la radiación solar y de la actividad volcánica (Bard *et al.*, 2000).

La intensidad del viento y las surgencias al sur de los 28 °N están influenciados por la circulación atmosférica (Lynn and Simpson, 1987, Thomas *et al.*, 2001, Zaytsev *et al.*, 2003, Pennington *et al.*, 2006). Concretamente, debido al gradiente de presión generado entre el centro de alta presión subtropical del Pacífico Norte y la celda de baja presión que se forma sobre el continente al suroeste de EEUU. Durante el verano boreal, el centro de alta presión del Pacífico Norte se fortalece y el centro de baja presión del continente se debilita, resultando en un mayor gradiente de presión que induce a los vientos del noroeste, favoreciendo las surgencias en esa temporada. Durante el invierno boreal, el fortalecimiento del centro de baja presión de las Aleutianas provoca un cambio en los vientos y produce la interrupción de las surgencias (Mikolajewicz *et al.*, 1997, Okumura *et al.*, 2009, Cartapanis *et al.*, 2014).

Batimétricamente la cuenca está situada cerca del borde de la plataforma continental a unos 45 km al oeste de la costa de Baja California. Se trata de una depresión tectónica que es de aproximadamente 85 km de largo y 35 km de ancho, con fondo muy plano, una profundidad

máxima de 540 m y un margen irregular hacia el mar con un umbral batimétrico situado a 290 m aproximadamente (Fig. 2).

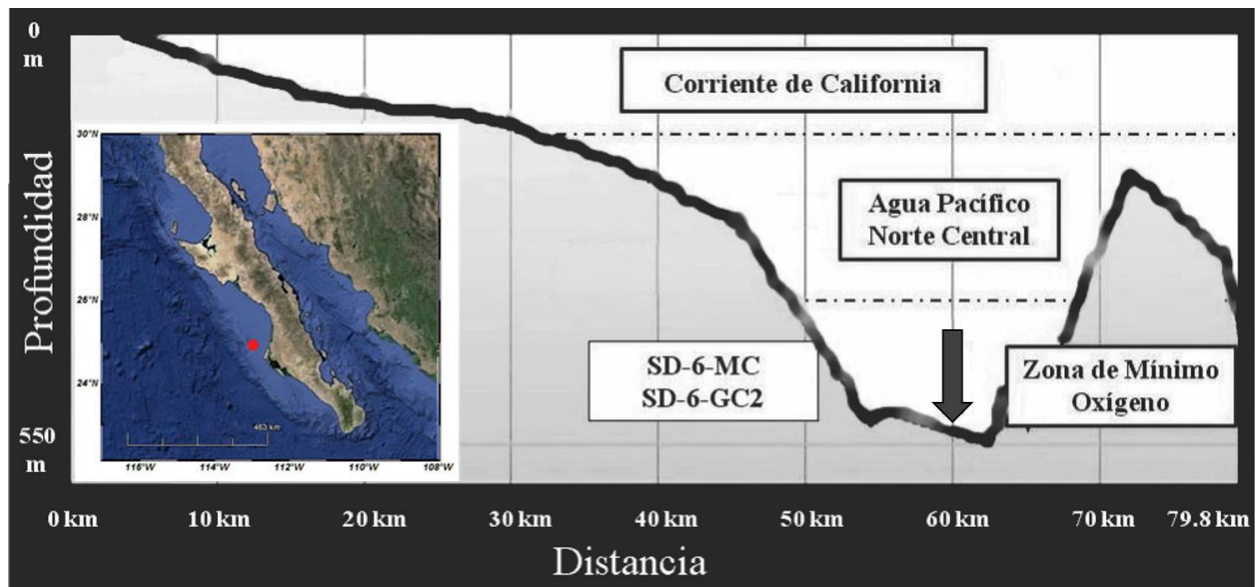


Fig. 2. Perfil de la cuenca Soledad. Relieve del fondo, la flecha negra representa el lugar de donde fue extraído. El punto rojo del mapa de la derecha representa el lugar de extracción del registro de sedimento (adaptados de Google Earth®2015).

Si se comparan perfiles hidrográficos, dentro y fuera de la cuenca se observa que la densidad del agua dentro de la cuenca por debajo de 290 m se mantiene constante (Fig. 3).

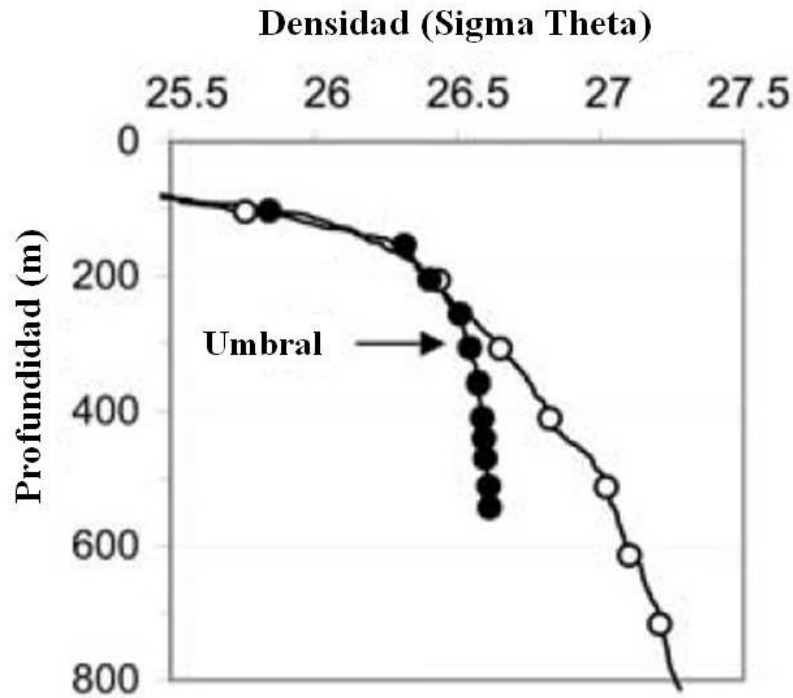


Fig. 3. Perfiles de densidad medidos dentro (círculos negros) y fuera (círculos blancos) de la Cuenca Soledad. Se observa cómo el umbral batimétrico mantiene la densidad constante dentro de la cuenca a partir de unos 290 m (Modificado de van Geen *et al.*, 2003).

La composición química de la cuenca indica un comportamiento cuasi conservativo para el fosfato, silicato y nitrato, con una reducción inicial de 8 a 5 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ en la concentración de oxígeno disuelto. Las laminaciones gruesas están bien conservadas en núcleos colectados dentro de la cuenca bajo concentraciones de oxígeno de entre 3 y 5 $\mu\text{mol kg}^{-1}$ (Fig. 4), mientras que núcleos de los márgenes en la misma latitud y con similares niveles de oxígeno no contienen laminaciones (van Geen *et al.*, 2003).



Fig. 4. Aspecto laminado del SD-6-MC.

El comportamiento de la concentración de oxígeno disuelto en la región del área de estudio a una profundidad de 500 m, presenta una distribución latitudinal no uniforme a lo largo del margen continental. Latitudinalmente, en la región polar del Pacífico Oriental se observan aguas más ventiladas mientras que en la zona más ecuatorial aguas más pobres en oxígeno (Cannariato y Kennett, 1999). En las aguas intermedias del Pacífico Oriental esta condición se debe a la presencia de aguas que provienen del Pacífico Norte Central, y al predominio de aguas Subtropicales Subsuperficiales suplidas por la Contracorriente Ecuatorial que tienen menos contenido de oxígeno disuelto y llegan hasta la región situada más al sur (van Geen *et al.*, 2003). La ZMO en el Pacífico mexicano está situada entre los 300 y 800 m de profundidad, por encima de los 300 m se incrementa la concentración de oxígeno disuelto debido a la mezcla de la superficie del océano con la atmósfera, y por debajo de los 800 m debido al aporte de aguas ventiladas que se forman en latitudes altas y aportan oxígeno al océano profundo (van Geen *et al.*, 2003) (Fig. 5). En esta zona, el perfil de la concentración de silicatos ($\mu\text{mol l}^{-1}$) muestra un comportamiento típico tipo nutriente (Fig. 5).

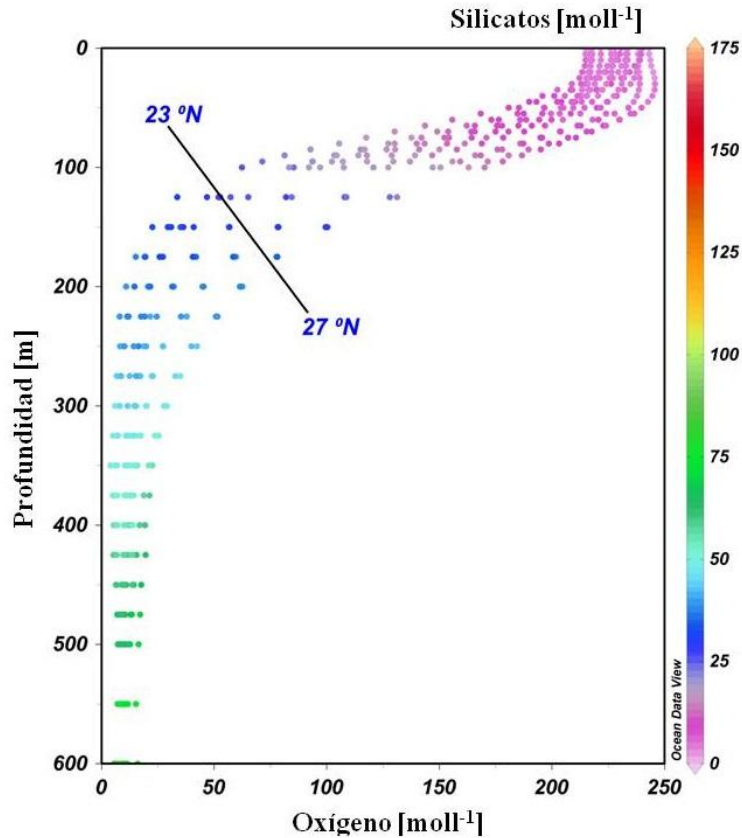


Fig. 5. Perfil de oxígeno (μmol^{-1}) y de silicatos (μmol^{-1}) con la profundidad de la región de estudio. Se muestra el comportamiento de estos con la latitud (23°N a 27°N) en el que la línea correspondiente a la Latitud 23°N es la primera a la izquierda, mientras que la línea de la latitud 27°N es la última línea a la derecha. En la zona situada más al norte se muestra la dominancia de las aguas polares más oxigenadas y en la zona más al sur la presencia de las aguas ecuatoriales más respiradas (WOA 2013).

La distribución temporal de nutrientes y de la productividad primaria están regidas por cambios estacionales e interanuales, ya que durante el verano se encuentran los valores más altos y durante el invierno disminuyen. La cantidad de nutrientes aportada por las surgencias no es el resultado de un aporte de la CC desde el norte, sino que la propia corriente genera un ajuste geostrófico que es el responsable del aumento del flujo de nutrientes. Por otro lado, el flujo de la corriente de California separa la región costera eutrófica de las aguas oceánicas más oligotróficas, y su cercanía a la zona costera está determinada por la amplitud y fuerza de la contracorriente subsuperficial y de la corriente de Davidson. Por tanto, cuando éstas últimas son

débiles, la corriente de California está más cerca la costa y la región costera eutrófica es más pequeña (Collins *et al.*, 2003).

3.2. Colecta de los núcleos

Para el estudio se analizó un núcleo multicore y un núcleo de gravedad que fueron recolectados en la Cuenca Soledad en Abril de 2012. Las características de cada uno de los núcleos se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Características de la extracción de cada uno de los núcleos que se usaron para realizar el trabajo.

Núcleo	Latitud (N)	Longitud (W)	Profundidad (m)	Longitud del núcleo (cm)
<i>SD-6-MC (St#6 Profundo).</i>	25° 11.9992'	112° 43.9971'	542	40.5
<i>SD-6-GC2 (St#6 Soledad 2 Profundo GC).</i>	25° 11.99'	112° 43.99'	552	54.56 (long. total: 259)

3.3. Modelo de edad

Para construir el modelo de edad y establecer la cronología de cada núcleo se utilizaron fechados de ^{14}C medidos a partir de materia orgánica. Los fechados radiométricos de ^{14}C fueron hechos en el W. M. **Keck** Carbon Cycle Accelerator Mass Spectrometry **Laboratory** de la Universidad de California en Irvine, California, E.U.A. La edad radiocarbono obtenida del análisis fueron convertidos a años calendario (E.C.) usando el programa de calibración CALIB 4.3 (Stuvier y Reimer 1993). Para todo el periodo reconstruido previo a 1578, se aplicó el modelo de edad del núcleo *SD-6-GC2*. Desde 1579 a 1934 el modelo de edad del núcleo *SD-6MC* se reajustó con el modelo de edad del *SD-6-GC2*. El empalme entre ambos núcleos (*St#6 Profundo* y *St#6 Soledad 2 Profundo GC*) se realizó en 1578-1579.

3.4. Muestreo

Las muestras se obtuvieron mediante un seccionado de alta resolución que permite seccionar los núcleos de sedimentos con una navaja de 0.5 mm, obteniendo rebanadas de una resolución promedio de 1.5 mm.



Fig. 6. Núcleo SD-6-MC cortado a la mitad. Se puede apreciar el detalle de las bandas claras y más oscuras que predominan a lo largo de todo el núcleo.

3.5. Medición sílice biogénico

Para reconstruir el proxy de productividad se midió el SiB en el sedimento mediante el método de extracción alcalina de Mortlock y Froelich (1989). La metodología usada para la medición de SiB es un proceso que consiste en varios pasos secuenciales en una misma muestra, donde primero se elimina la materia orgánica, se eliminan los carbonatos, se lava el sedimento, se extrae el SiB en una matriz de carbonato de sodio y se mide el contenido de éste mediante el método espectrofotométrico de azul molibdato (Strickland y Parsons, 1972). Posteriormente, los

resultados de las absorbancias medidas con el espectrofotómetro Uv-Vis se convierten a porcentaje de SiB en la muestra.

Las mediciones de las muestras se llevaron a cabo en 11 lotes semanales que incluían 44 muestras, 2 blancos operacionales que permitían hacer el seguimiento desde el principio del procedimiento, 2 blancos de reactivos que ayudaban a confirmar la pureza del agua, detectar algún error en la preparación de los reactivos o en la tinción, y 2 estándares internos de trabajo que permite hacer un seguimiento y observar cómo ha sido la calidad de los resultados con el paso de las semanas.

Con base al seguimiento de calidad realizado por medio de los estándares internos se calcula que el error de precisión de la metodología ($\bar{x} = 1.83$, S.D. = 0.101, $n = 22$) es de 5.58%. De acuerdo con Mortlock y Froelich (1989), el error en muestras pobres en SiB (<15%) pueden presentar un error de precisión de hasta $\pm 6\%$.

3.6. Análisis de datos

Una vez obtenida la serie de tiempo de productividad reconstruida se realizó un análisis exploratorio para observar la variabilidad y se dividió en tres periodos incluidos en el último milenio: el PCM, la PEH y el Antropoceno. La división entre el PCM y la PEH se realizó en base a la propuesta de Mann y colaboradores (2009), y para la división entre la PEH y el Antropoceno se determinó, para efectos prácticos a 1850 como el inicio de la Revolución Industrial. Posteriormente se calcularon parámetros estadísticos (media, desviación estándar (S.D.), máximo y mínimo) para cada uno y se realizó una comparación cuantitativa para el comportamiento del SiB en cada periodo.

Con la finalidad de detectar tendencias de mayor periodo, se calculó la media móvil del %SiB con ventanas de 20, 40 y 60 años. Además se realizaron pruebas de tendencia con Minitab mediante una prueba t para comprobar si la pendiente era real a un nivel de significancia del 95%.

La serie de tiempo de SiB generada se sometió a un análisis espectral mediante el programa REDFIT (Schulz y Mudelsee, 2002) para extraer información referente a los ciclos predominantes a lo largo del periodo de tiempo estudiado.

También se realizó un análisis exploratorio de la serie de tiempo, comparando contra el índice climático instrumental de la PDO, y además contra variables relacionadas con la productividad primaria como el índice de surgencias de Bakun, temperatura superficial del mar de la región y un índice de vientos que se construyó a partir de la diferencia de presiones entre La Paz y Hawaii. Por otro lado también se contrastó nuestro registro con el índice de sequía NADA para establecer la relación que guardan la productividad y las sequías por medio de los vientos. Por último se realizó un análisis de tendencia con Minitab, en el que mediante una prueba t (a un nivel de significancia del 95%) se comprobó la validez de la pendiente de la tendencia de la productividad desde 1945, fecha que se estableció para poder comparar a efectos prácticos, con la propuesta original de la hipótesis de Bakun (1990).

4. RESULTADOS

4.1. Tasa de sedimentación

El submuestreo del núcleo se realizó con una resolución de corte promedio de 1.5 mm, lo que se traduce en una resolución temporal entre 1 y 8 años, con un promedio de 2.62 años. Una vez establecida la cronología del registro se pudo estimar una tasa de sedimentación de 88.659 cm ka⁻¹ para todo el periodo completo. Posteriormente se separó el registro en tres periodos y se obtuvieron distintos valores para estas tasas según el comportamiento de la productividad que predominaba en cada uno de estos periodos (Tabla 2). De acuerdo con van Geen y colaboradores (2003), los valores se encuentran dentro del rango establecido para el margen continental de la región.

Tabla 2. Tasas de sedimentación para cada uno de los periodos expresadas en centímetros por cada mil años (cm ka⁻¹).

Periodo	Tasa sedimentación (cm ka ⁻¹)
<i>Periodo Cálido Medieval</i>	96.333
<i>Pequeña Edad del Hielo</i>	82.116
<i>Antropoceno</i>	85.239

De los resultados obtenidos se observó que el periodo con mayor cantidad de material acumulado en el fondo fue el Periodo Cálido Medieval, el de menor cantidad fue la Pequeña Edad del Hielo, y durante el Antropoceno se produjo de nuevo un incremento de dicha tasa de sedimentación pero sin alcanzar los valores de acumulación que predominaron durante el Periodo Cálido Medieval.

4.2. Serie de tiempo de paleoproduktividad reconstruida

Se reconstruyó la serie de tiempo de paleoproduktividad para el último milenio (1072 a 2012) basado en el contenido de sílice biogénico (%SiB). El estudio abarcó al Periodo Cálido

Medieval (PCM), la Pequeña Edad de Hielo (PEH) y al Antropoceno. El registro presentó diferencias en las tasas de sedimentación, en la cantidad de SiB, en la variabilidad de esa cantidad y en sus tendencias (Fig. 7).

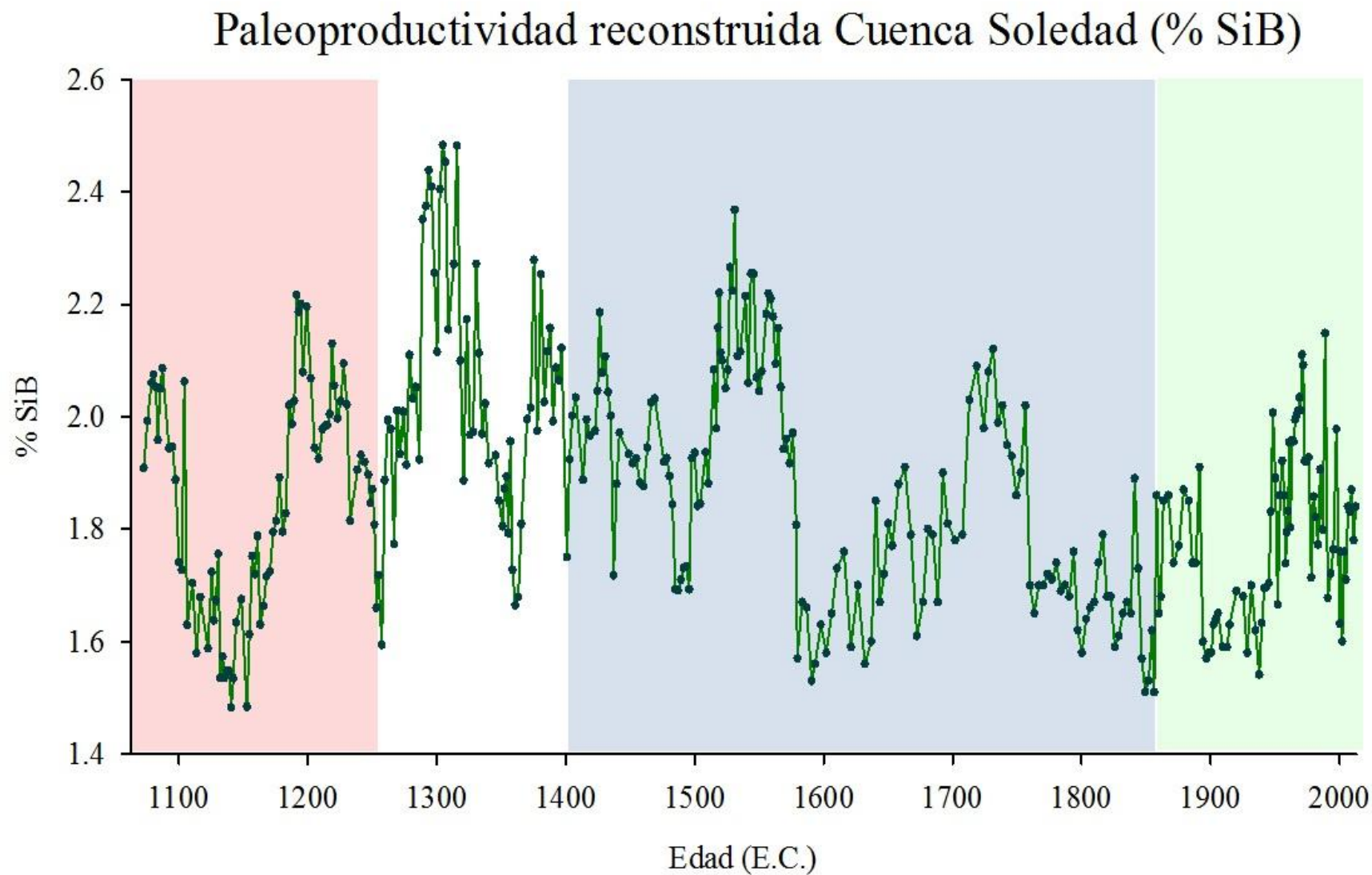


Fig. 7. Serie de tiempo de la productividad reconstruida en el área de estudio para el último milenio a partir de sílice biogénico (%SiB). La zona sombreada de rojo representa el Periodo Cálido Medieval (PCM), la azul la Pequeña Edad del Hielo (PEH) y la verde al Antropoceno.

La información estadística de la serie de tiempo se muestra en la Tabla 3, lo que permite observar de manera directa los cambios que se dieron en la productividad durante cada periodo.

Tabla 3. Datos estadísticos (media, desviación estándar (S.D.), máximo y mínimo), para el registro completo y para cada uno de los periodos. PCM: Periodo Cálido Medieval (Iniciado en el registro-950-1250); PEH: Pequeña Edad del Hielo (1400-1850); Antropoceno (1850-2012).

Parámetros estadísticos	Registro completo	PCM	PEH	Antropoceno
<i>Media (%SiB)</i>	1.876	1.852	1.872	1.783
<i>S.D. (%SiB)</i>	0.207	0.198	0.197	0.150
<i>Máximo (%SiB)</i>	2.483	2.216	2.368	2.148
<i>Mínimo (%SiB)</i>	1.483	1.483	1.510	1.510
<i>n</i>	360	74	145	97

El promedio del contenido de SiB durante el último milenio fue de 1.87 ± 0.20 % con un máximo de 2.48 % y un mínimo de 1.48 %. El registro abarca varios periodos en los que se produjeron cambios en la productividad, observándose que durante el PCM (la primera parte del registro) el promedio de la cantidad de SiB fue de 1.85 ± 0.19 %, y durante la PEH (el periodo intermedio) experimentó un aumento de este porcentaje a 1.87 ± 0.19 %, lo que sugirió que durante ese periodo se aumentó la cantidad y se mantuvo la variabilidad de SiB que se acumulaba en el fondo del océano. Para el Antropoceno se observaron cantidades de 1.78 ± 0.15 %, lo que implicó que tanto el promedio como la variabilidad de la productividad en este periodo fue el más bajo de todos los periodos estudiados. Se realizaron pruebas estadísticas no paramétricas para muestras independientes (Kruskal Wallis) y se demostró que el cambio en %SiB en cada periodo era estadísticamente significativo a un nivel de confianza del 95%.

Se realizó un conteo de los años que presentan una productividad mayor al promedio (1.88%), y de años que presentan una productividad menor al promedio para cada periodo y para el registro completo (Tabla 4).

Tabla 4. Porcentaje de años representados por la serie de tiempo de productividad reconstruida (%SiB), porcentaje de años en los que la productividad fue superior al promedio de toda la serie (1.88 %), porcentaje de años en los que la productividad fue inferior al promedio de toda la serie de tiempo, para cada uno de los tres periodos en los que se divide la serie de tiempo (PCM, PEH y Antropoceno), y para todo el periodo de tiempo registrado.

Periodo	Años representados (%)	Años con altas productividades (%)	Años con bajas productividades (%)
<i>PCM</i>	41.8	48.64	51.35
<i>PEH</i>	32.22	49.65	50.34
<i>Antropoceno</i>	52.28	77.5	22.5
<i>Total</i>	38.33	50.83	49.46

Este análisis mostró que la serie de tiempo representa el 38.33% de todos los años que existen en el periodo de estudio. Además se observó que durante el PCM y la PEH el porcentaje de años con bajas productividades y el porcentaje de años con altas productividades es similar (~50 %), sin embargo, es durante el Antropoceno cuando se observa el aumento en la cantidad de años con altas productividades (77.5 %) (Tabla 4).

Comportamiento de baja frecuencia en la productividad

Se aplicaron ventanas móviles de diferentes intervalos para mostrar el comportamiento suavizado y las tendencias de la serie de tiempo de productividad reconstruida usando diferentes filtros de frecuencia: de 20 años, de 40 años y de 60 años (Fig. 8).

Para el registro completo se observó que %SiB alcanzaba sus valores más altos durante el PCM. A medida que avanzaba el tiempo en el registro y comenzaba la PEH se produjo un descenso gradual en la tendencia de %SiB. Durante este periodo la tendencia decreció hasta que se estabilizó la productividad, y en el Antropoceno la tendencia de la productividad incrementó de nuevo. El filtrado de baja frecuencia muestra una tendencia más limpia de la señal desde valores más altos en el PCM hacia valores más bajos al final de la PEH y nuevamente una tendencia a incrementar durante el Antropoceno.

El filtro de 20 años (Fig. 8a) mostró la presencia de los ciclos irregulares y el filtrado de 40 y de 60 años (Fig. 8b y 8c) resaltaron la tendencia general de los resultados. Durante el PCM, la señal

de 20 años muestra que la productividad se definió mediante dos ciclos de gran amplitud. Por otro lado, el filtrado de 40 y de 60 años, muestra que la tendencia general del %SiB durante el PCM se incrementó, además en el análisis de tendencia se observó una pendiente positiva (pendiente = 0.00111, $\alpha = 0.025$, $n = 178$, $p = 2$). El análisis con el filtrado de 20 años muestra que durante la PEH con la ventana de 20 años también mostró ciclos pero de menor amplitud y menor frecuencia (Fig. 8a), y el filtrado de 40 y de 60 años, mostró una tendencia general de %SiB a decrecer con el paso del tiempo. Además, el análisis de tendencia demostró que la pendiente fue negativa (pendiente = -0.000736, $\alpha = 0.025$, $n = 445$, $p = 2$). El análisis del periodo correspondiente al Antropoceno, con filtrado a 20 años, resaltó una etapa estable de la señal al principio, y un incremento gradual de la señal a partir de 1900 hasta 1970, cuando alcanzó su máximo. A partir de esa fecha la señal comenzó a decrecer hasta casi el final del registro donde se observó un incremento final. El filtrado de 40 y 60 años mostró que la tendencia general durante ese periodo fue hacia el incremento, pendiente positiva (pendiente = 0.00133, $\alpha = 0.025$, $n = 162$, $p = 2$).

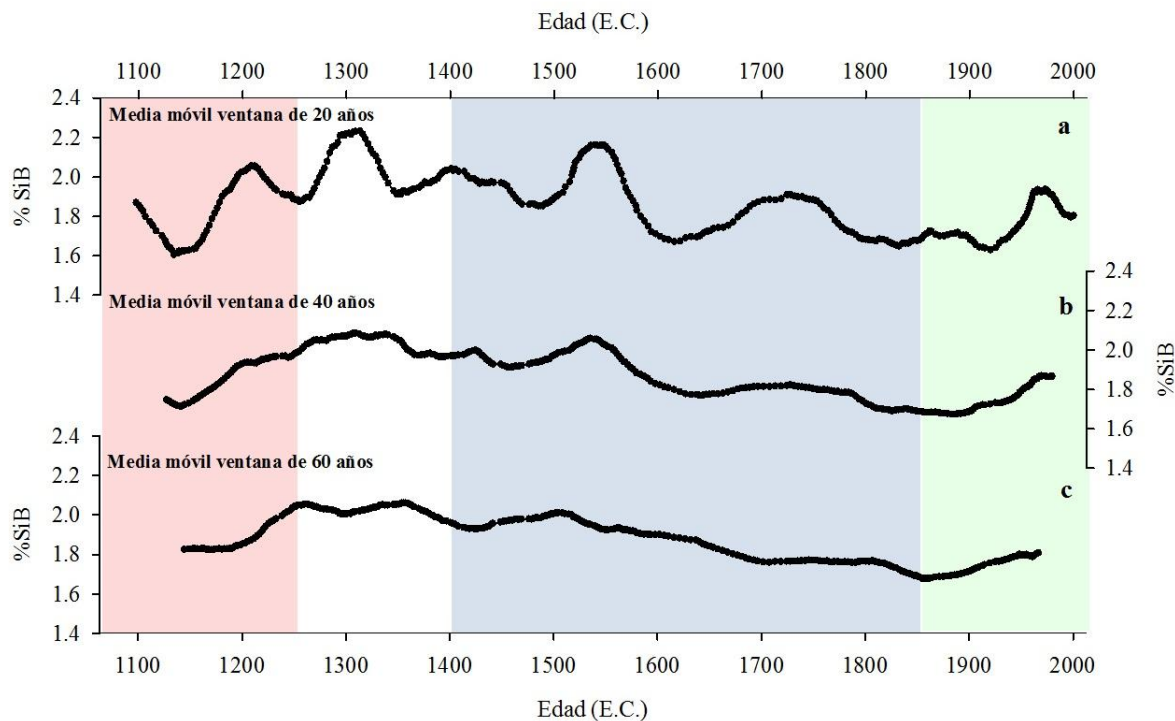


Fig. 8. Serie de tiempo del registro de productividad reconstruida para el Pacífico mexicano (%SiB) filtrada (línea negra) para todo el registro con: a) filtro de 20 años, b) filtro de 40 años, y c) filtro de 60 años. El sombreado rojo representa el PCM, el azul la PEH y el verde el Antropoceno.

Análisis espectral

El análisis espectral de la serie de tiempo para identificar frecuencias predominantes a lo largo de todo el registro mediante el método REDFIT (Schulz y Mudelsee, 2002) se muestra en la Figura 9.

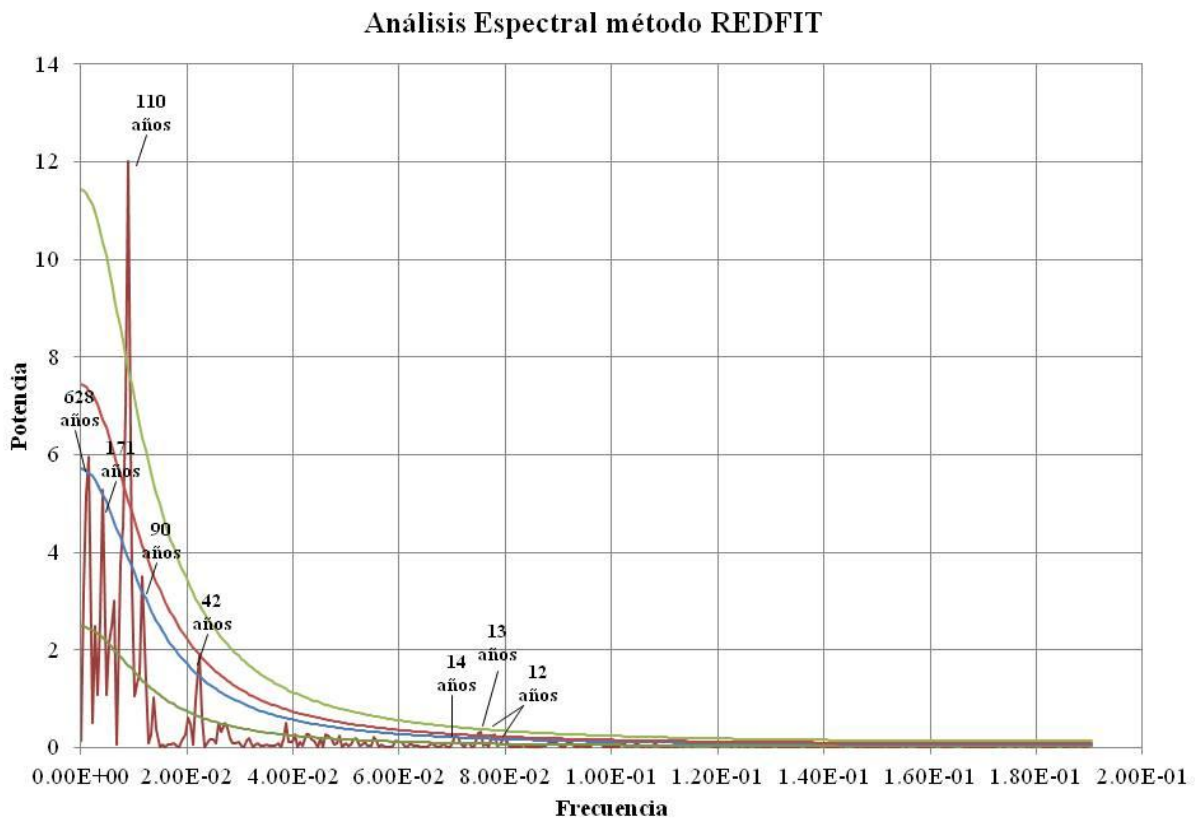


Fig. 9. Análisis espectral de la serie de tiempo de paleoproduktividad, en ella queda expresada la significancia de cada una de las frecuencias registradas en la señal.

Los ciclos dominantes y más significativos de la productividad durante el último milenio obtenidos del análisis espectral fueron principalmente centenales y decadales. Los ciclos más importantes que estuvieron controlando la paleoproduktividad fueron los ciclos centenales (110 años), seguidos de ciclos decadales (42, 14, 13, 12 años), y finalmente con menos importancia, otros ciclos centenales (628, 171, 90 años) (Fig. 9 y Tabla 5).

Tabla 5. Resultados del análisis espectral. Ciclos (expresados en años) que se detectaron durante el último milenio y el nivel de significancia de cada uno de ellos.

Resultados del análisis espectral		
Significancia	% Significancia (Chi²)	Ciclos (años)
<i>Periodos significantes más fuertes</i>	99%	110
<i>Periodos significantes importantes</i>	95%	42, 14, 13, 12
<i>Periodos significantes menos fuertes</i>	90%	628, 171, 90

5. DISCUSIÓN

El SCC es una región que por sus características climatológicas y oceanográficas favorece el fenómeno de las surgencias. A partir de los cambios en la señal de productividad se infiere el comportamiento de las surgencias durante el último milenio y los factores climáticos que la controlaron, así como su relación con las ZMO y de otras regiones del Pacífico Oriental. Se ha resaltado la importancia de la variación de la radiación solar en el clima debido a que la temperatura ha estado incrementando rápidamente en las últimas décadas (Lean *et al.*, 1999). En un estudio de Mann y colaboradores (2009) concluyeron que la temperatura durante el PCM, periodo que establecen desde el 950 al 1250 E.C., es igual e incluso mayor que las temperaturas encontradas en las últimas décadas en muchas regiones del mundo. Sin embargo, estos valores se encuentran muy por debajo de las temperaturas que hemos estado observando en las últimas décadas. En este estudio se obtiene que durante la PEH, establecida desde 1400 y 1700 E.C., se observó un marcado enfriamiento en los continentes de la zona extratropical del Hemisferio Norte (Fig. 10).

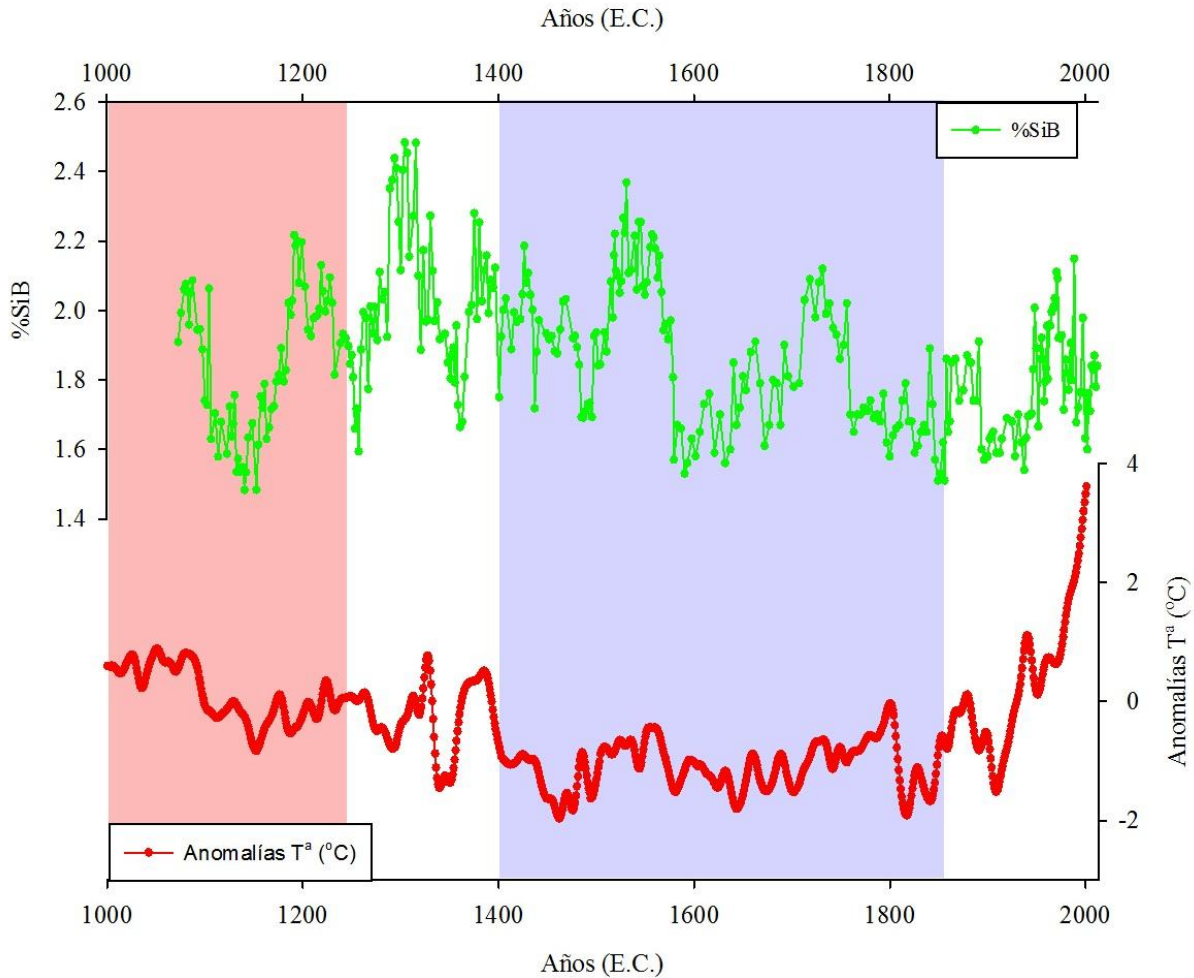


Fig. 10. Registro de productividad reconstruida para el Pacífico mexicano (%SiB) (línea verde) y las anomalías de temperatura globales reconstruidas con un filtro de 10 años (Mann *et al.*, 2009). La franja roja representa al PCM y la azul a la PEH establecidas para el presente estudio en base a Mann *et al.* (2009).

Al comparar el comportamiento de la serie de tiempo de SiB reconstruida frente a la temperatura superficial global de Mann y colaboradores (2009), se observa como la influencia de estos cambios de temperatura modulaban la productividad, de manera que durante el periodo cálido (PCM) la productividad presentaba una tendencia a incrementar, y durante el periodo frío (PEH) una tendencia a disminuir (Fig. 10).

Para relacionar los cambios de temperatura y la productividad, se incluye el forzamiento solar en la comparación a analizar. Se utilizó el registro de productividad frente a la radiación solar

reconstruida (Wm^{-2}) a partir de isótopos ^{10}Be (Mann *et al.*, 2005) (Fig. 11). Respecto a la temperatura, esta comparación muestra periodos de alta productividad asociados a eventos La Niña, condiciones bajo las cuales se incrementan las ZMO. Por otro lado, las bajas productividades se asocian a eventos el Niño que provocan la ventilación en la columna de agua y la debilitación de las ZMO. Además el efecto de la variación de la cantidad de radiación solar y su consecuencia sobre el desplazamiento de la ZCIT, se puede inferir en que al aumentar la insolación, la ZCIT se desplaza hacia el norte, se intensifica el gradiente de presión entre los centros de alta presión del Pacífico Norte y el centro de baja presión situado sobre el suroeste de EEUU, causando una intensificación los vientos que generan surgencias (Cartapanis *et al.*, 2014), produciendo condiciones tipo La Niña y aumentando la productividad (Fig. 11).

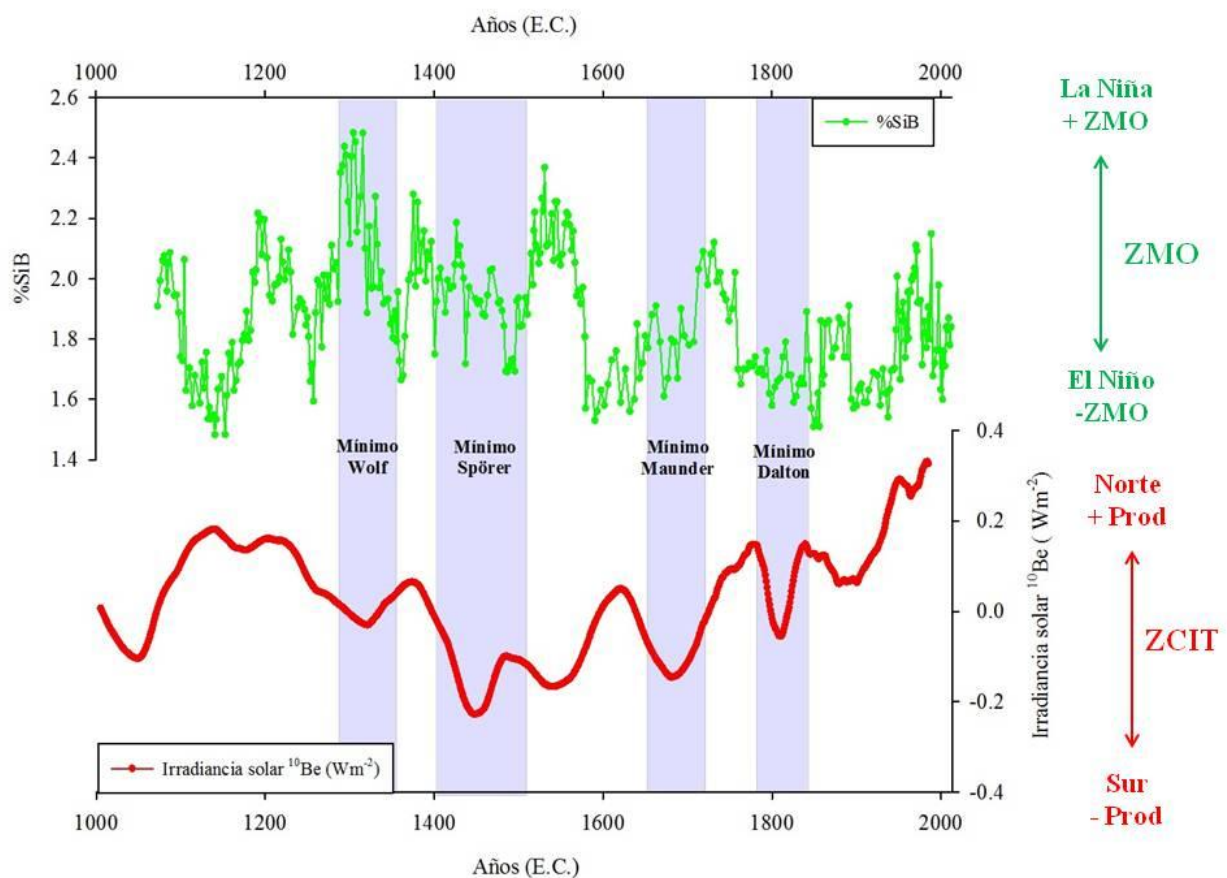


Fig. 11. Radiación solar a partir de ^{10}Be (Wm^{-2}) con filtro de 10 años para la región tropical (línea roja) (Mann *et al.*, 2005) y el registro de productividad reconstruida para el Pacífico mexicano (%SiB) (línea verde). Las franjas azules representan los periodos en los que se daban mínimos de radiación. Las flechas

del lateral derecho indican: el comportamiento resultante de la radiación sobre el desplazamiento de la ZCIT (rojas), y el del ensanchamiento de la ZMO con respecto a las surgencias (verdes).

Esta comparación muestra también que los periodos en los que predominaba una mayor radiación solar, la productividad presentaba una tendencia a incrementar, y en periodos de menor radiación solar la productividad tiende a disminuir (Fig. 11). Por otra parte, se ha sugerido que el principal factor que controla el ciclo anual de productividad en la región está relacionado con la variabilidad de los centros de alta y baja presión que regula los vientos que promueven las surgencias (Murphree *et al.*, 2003, Cartapanis *et al.*, 2011, 2012, 2014, Pérez-Cruz, 2013). Durante los periodos de alta radiación solar, se incrementa la diferencia del gradiente de presión entre los centros de alta presión del Pacífico Norte y el centro de baja presión situado sobre el suroeste de EEUU, lo que hace que se intensifiquen los vientos del noroeste y con ellos las surgencias. Las condiciones de la radiación solar durante el último milenio fueron cambiando con el tiempo, de manera que para cada periodo (PCM, PEH y Antropoceno) se presentaron diferentes escenarios.

Para visualizar estas condiciones, se comparó la serie de tiempo de productividad reconstruida frente a las sequías que se produjeron en la región Suroeste de los EEUU. Una medida muy usada para monitorear las sequías es mediante el Índice de Severidad de Sequía de Palmer (Cook *et al.*, 2007), el cual es un indicador de la disponibilidad de la humedad del suelo basándose en medidas de temperatura y de precipitación. Éste se calcula a partir del equilibrio de humedad, es decir, de la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración. Debido a que el índice se promedia con respecto a las condiciones de la región, puede ser usado para realizar comparaciones de variabilidad y tendencia con respecto a otras regiones. Las condiciones promedio de la humedad quedan establecidas como $PDSI=0$; las condiciones de sequía como $PDSI<0$; y las condiciones de lluvia como $PDSI>0$. Recientemente se ha demostrado que el PDSI es capaz de ser muy preciso en sus mediciones, aunque es posible que durante el siglo XXI se obtengan valores sobreestimados debido a que no se tienen en cuenta los efectos del CO_2 que podrían reducir las pérdidas por evaporación (Hoerling *et al.*, 2012). Para esta comparación se utilizó la base de datos para la región suroeste de EEUU y se reconstruyó la serie de tiempo de sequías para el último milenio (Tabla 7). Esta tabla muestra el porcentaje de años de sequía que se obtienen en cada uno de los periodos que abarca este estudio.

Tabla 6. Porcentaje de años de sequías (%) para cada periodo (PCM, PEH y Antropoceno) y para el registro completo.

Periodo	Años de sequías (%)
PCM	62
PEH	55.55
Antropoceno	81.69
Total	57.03

El PCM fue la época que presentó más años de sequías, durante la PEH el número de años de sequía se redujeron, y posteriormente, durante el Antropoceno volvieron a incrementarse, llegando a superar el número de años de sequías para el PCM (Tabla 6).

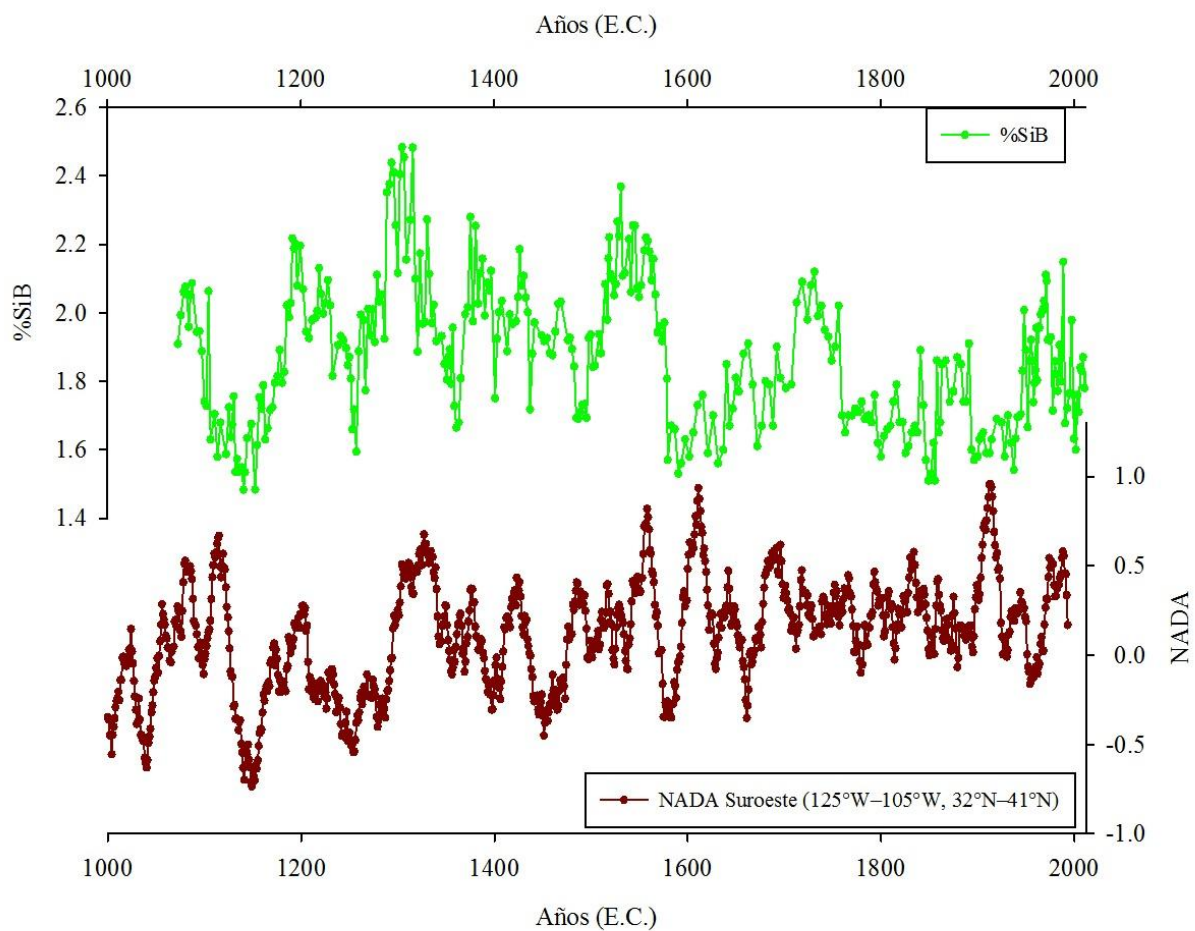


Fig. 12. Registro de productividad reconstruida para el Pacífico mexicano (%SiB) y la variabilidad de las sequías mediante el NADA (North America Drought Atlas) construido con el promedio anual de la región suroeste de los EEUU contenida en la red de coordenadas 125 °W-105 °W, 31 °N-42 °N, estandarizados y con un filtro de 20 años (<http://climexp.knmi.nl/start.cgi?id=someone@somewhere>).

Esta comparación muestra que los ciclos de sequías y de la productividad siguen un patrón muy similar, lo que sugiere que los mecanismos que controlan ambos procesos están muy relacionados. Los vientos fríos y secos impulsados por el gradiente de presión que se forma entre el centro de alta presión del Pacífico Norte Tropical y el centro de baja presión del Suroeste de EEUU, producen sequías en el continente, a la vez que promueven las surgencias. Hendy y colaboradores (2015) realizaron un estudio en el que separan épocas húmedas y épocas secas por medio de la cantidad de aportes litogénicos y biogénicos que llegaban al mar. En este trabajo consiguieron asociar épocas de mayor precipitación con eventos de El Niño o a fases positivas de la PDO, y épocas de sequías con eventos de la Niña o fases negativas de la PDO. Por otro lado, se ha demostrado que épocas cálidas y de mayor humedad provocan un incremento en la profundidad de la termoclina, un descenso en la productividad primaria y un cambio en el ecosistema marino (Miller *et al.*, 2004). Por lo que se sugiere que durante temporadas húmedas predominaron mínimos de productividad, y durante temporadas secas predominaron máximos de productividad.

Otra medida comparable de la influencia de la ZCIT y la intensidad de los vientos es mediante la precipitación que se produce en el norte de Venezuela. El comportamiento en esa región es opuesto a como se desarrollan las condiciones tipo El Niño-tipo La Niña en el área de estudio de este trabajo. De manera que durante épocas de mayor intensidad de vientos y de alta productividad en la Cuenca Soledad, se produce un incremento de las condiciones húmedas y de baja precipitación en la Cuenca Cariaco (Haug *et al.*, 2001).

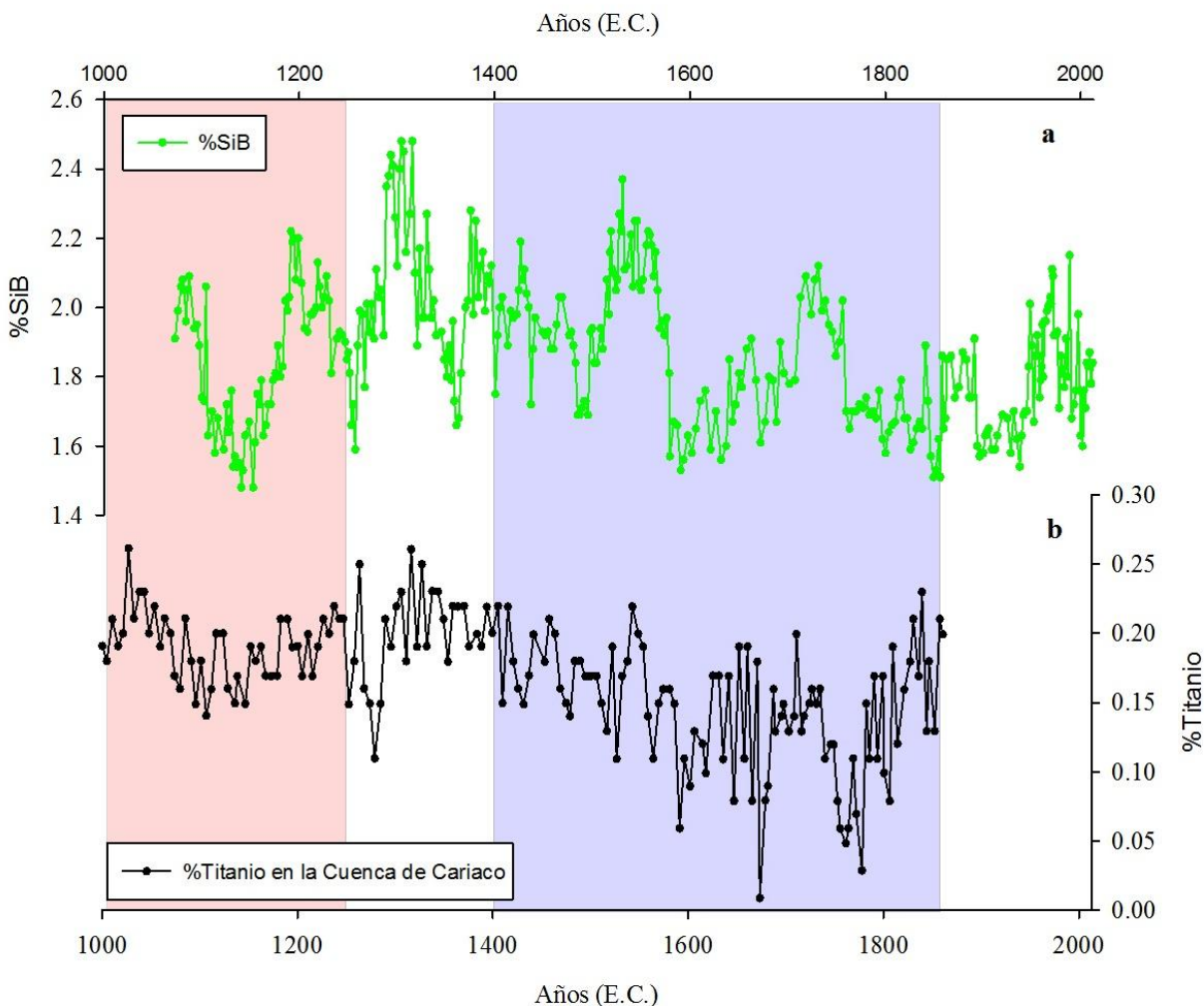


Fig. 13. Registro de productividad reconstruida para el Pacífico mexicano (%SiB) y la variabilidad de las precipitaciones por medio de aportes litogénicos al mar (% Titanio) en la Cuenca Cariaco (Venezuela) (Datos digitalizados de Haug *et al.*, 2001).

PCM (Periodo cálido Medieval, 950 (iniciado en el registro)-1250)

La ocurrencia del PCM está definida entre 950 y 1250 años E.C. El periodo de estudio de esta tesis inicia en el año 1000 E.C., por lo que la etapa inicial del PCM (50 primeros años) no está incluida en esta investigación. Este periodo se caracterizó por una mayor radiación solar (Lean *et al.*, 1995), menos actividad volcánica con respecto a la PEH (Crowley y Kim, 1999, Free y Robock, 1999), condiciones de La Niña (Clement *et al.*, 1996), además de mega-sequías

multidecadales en el oeste de los EEUU (deMenocal, 2001). Estas características de alta irradiación y una actividad volcánica reducida provocaron un calentamiento comparable a los patrones de temperatura planetaria observados hasta hace dos siglos (Crowley, 2000).

De acuerdo con los resultados obtenidos en el trabajo, durante este periodo, la tendencia que presentó la productividad (%SiB) fue hacia el incremento (pendiente = 0.00111, $\alpha = 0.025$, $n = 178$, $p = 2$), lo que indica que la productividad estuvo en constante crecimiento. El aumento en la radiación solar provocó una intensificación del gradiente de presión entre los centros de alta y de presión, fortaleciendo así los vientos que promueven las surgencia (Galloway *et al.*, 2010). El incremento en las surgencias provocó el enfriamiento de la zona costera en la región (Trenberth y Hurrell, 1994), trayendo condiciones climáticas similares a los eventos La Niña (Clement *et al.*, 1996, Cook *et al.*, 2007, Marchitto *et al.*, 2010).

Por otro lado, deMenocal (2001) encontró que previo a 1600 se produjo una gran cantidad de sequías, lo que confirma las condiciones áridas que ocurren durante condiciones tipo La Niña anteriores al 1250. Existieron dos temporadas de mega-sequías dentro del PCM, una mega-sequía alrededor de 1040 en la región de Bolivia-Perú y en 1280 en el suroeste de Norteamérica. Estas condiciones de aridez parecen haber coincidido con grandes incrementos de productividad. Estos antecedentes sugieren una conexión entre el incremento de las condiciones áridas y la intensificación de los vientos de surgencia que promueven incrementos en la productividad marina (Fig. 12). Al mismo tiempo, estas condiciones afectan a los ecosistemas terrestres aledaños a las zonas de surgencias debido a la escasez de agua (Black *et al.*, 2014).

PEH (Pequeña Edad del Hielo, 1400-1850)

La PEH es un periodo que abarcó del 1400 al 1850 E.C., caracterizado por una disminución de la cantidad de irradiancia solar (durante esta etapa se dieron tres grande mínimos solares: Mínimo de Spörer, Mínimo de Maunder y Mínimo de Dalton) y por un aumento en la frecuencia de las erupciones volcánicas. Durante la etapa de 1400 al 1800 la contribución de la actividad volcánica incrementó al 41-49% causando efecto de enfriamiento que en promedio resultaron ser entre el 22 y 23% de la variación total de temperatura, lo que condujo a una disminución en el promedio de la temperatura a nivel planetario para este periodo (Crowley, 2000).

En nuestro registro de %SiB se observó una tendencia a descender (pendiente = -0.000736, α = 0.025, n = 445, p = 2). Esto puede ser causado porque durante la PEH, el cambio de las condiciones produjo la situación opuesta a la del PCM, las bajas temperaturas provocadas por una menor radiación solar y una alta actividad volcánica, produjo que la ZCIT se desplazara hacia el sur. A su vez, y debido al enfriamiento de la región, también se debilitó la intensidad del gradiente de presión entre los centros de alta y de baja presión situado sobre el continente (Galloway *et al.*, 2010), lo que fortaleció el centro de baja presión de las Aleutianas. Estos cambios provocaron un debilitamiento e interrupción de los vientos de surgencias y un hundimiento de la termoclina. La situación causó el aumento de la temperatura en la región creando condiciones similares a El Niño, con mayor humedad y bajas productividades (Trenberth y Hurrell, 1994).

Periodo de Transición entre el PCM y la PEH (1250-1400)

Para establecer el PCM y la PEH dentro del último milenio y definir un límite adecuado para el inicio y el fin de cada periodo, se utilizó la reconstrucción de temperatura realizada en el trabajo de Mann y colaboradores (2009). En este trabajo, el PCM se fijó entre 950 y 1250 E.C. y a la PEH entre 1400 y 1700 E.C. Para efectos prácticos, esta última fecha (final de la PEH) se extendió hasta 1850, que coincide con el inicio del Antropoceno. De acuerdo a este criterio, entre 1250 a 1400 existe una etapa de 150 años en el que se produce la transición de un periodo a otro. Durante esta transición se observa el final de la tendencia del PCM, cuyo %SiB continúa incrementando hasta alcanzar el máximo de productividad de todo el registro completo (2.48 %) en 1305, y posterior a esta fecha, inicia un descenso del %SiB, cuya tendencia decreciente predomina hasta 1850 (inicio del Antropoceno). Este periodo de transición se caracteriza porque durante los primeros 50 años del mismo presenta incrementos de productividad y los 100 años finales un descenso de la misma, marcando así la conexión entre el PCM y la PEH.

Zonas de Mínimo Oxígeno y su relación con la productividad

Las ZMO han sido ampliamente estudiadas en diferentes lugares del mundo como Perú (Agnihotri *et al.*, 2006, 2008, Gutierrez *et al.*, 2009, Mollier-Vogel *et al.*, 2012), Chile (De Pol-

Holz *et al.*, 2007, Robinson *et al.*, 2007), Pacífico Noroeste Tropical (Ganeshram *et al.*, 1995, Altabet *et al.*, 1999, Thunell y Kepple, 2004, Hendy y Pedersen, 2006) y el mar de Arabia (Altabet *et al.*, 2002, Pichevin *et al.*, 2007). La mayoría de estos estudios sugieren que el desarrollo de las ZMO ocurren bajo condiciones de alta productividad, donde se intensifica el consumo de oxígeno disuelto. La ZMO del Pacífico Nortropical ha sido ampliamente estudiada, donde se ha observado como los cambios en escalas mileniales en la productividad estaban asociados a los cambios en la intensificación de esta ZMO (Cartapanis *et al.*, 2011, 2012, 2014). Estudios recientes sobre la ZMO coinciden con el registro obtenido en este trabajo, y han demostrado que esta tendencia se mantiene durante el último milenio, observándose altos valores de $\delta^{15}\text{N}$ durante periodos de alta productividad como el PCM y el Antropoceno, y valores bajos de $\delta^{15}\text{N}$ durante periodos de baja productividad como la PEH (Vargas *et al.*, 2004, 2007, Gutiérrez *et al.*, 2009, Díaz-Ochoa *et al.*, 2011, Fleury *et al.*, 2015). Deutsch y colaboradores (2014) observaron un incremento en la oxigenación de las aguas subsuperficiales del margen de California desde 1850 que se ha extendido hasta antes ~1990 y posteriormente empezó a disminuir la cantidad de oxígeno disuelto. Como mecanismo de oxigenación proponen un debilitamiento en la fuerza de la celda de Walker hasta 1980 que causa la disminución de los vientos alisios y un aumento en la profundidad de la termoclina. Posterior a 1980 estos autores registraron un aumento en la intensidad de los vientos que justifican la desoxigenación de las aguas de la región (Fig. 14a). En el presente trabajo se construyó un índice de vientos entre Hawaii y La Paz para inferir en la intensidad de los vientos en dicha región (Fig. 14b). Para ello se utilizaron datos de presiones del nivel del mar (mb) en Hawaii y en La Paz, y la diferencia del gradiente de presiones, confirmándose así que el comportamiento de los vientos en la región ha sido a incrementar su intensidad hasta la actualidad (Fig. 14b). Este proceso pudiera ser el responsable de un incremento en la productividad con una consecuente desoxigenación de las aguas de las capas intermedias del océano.

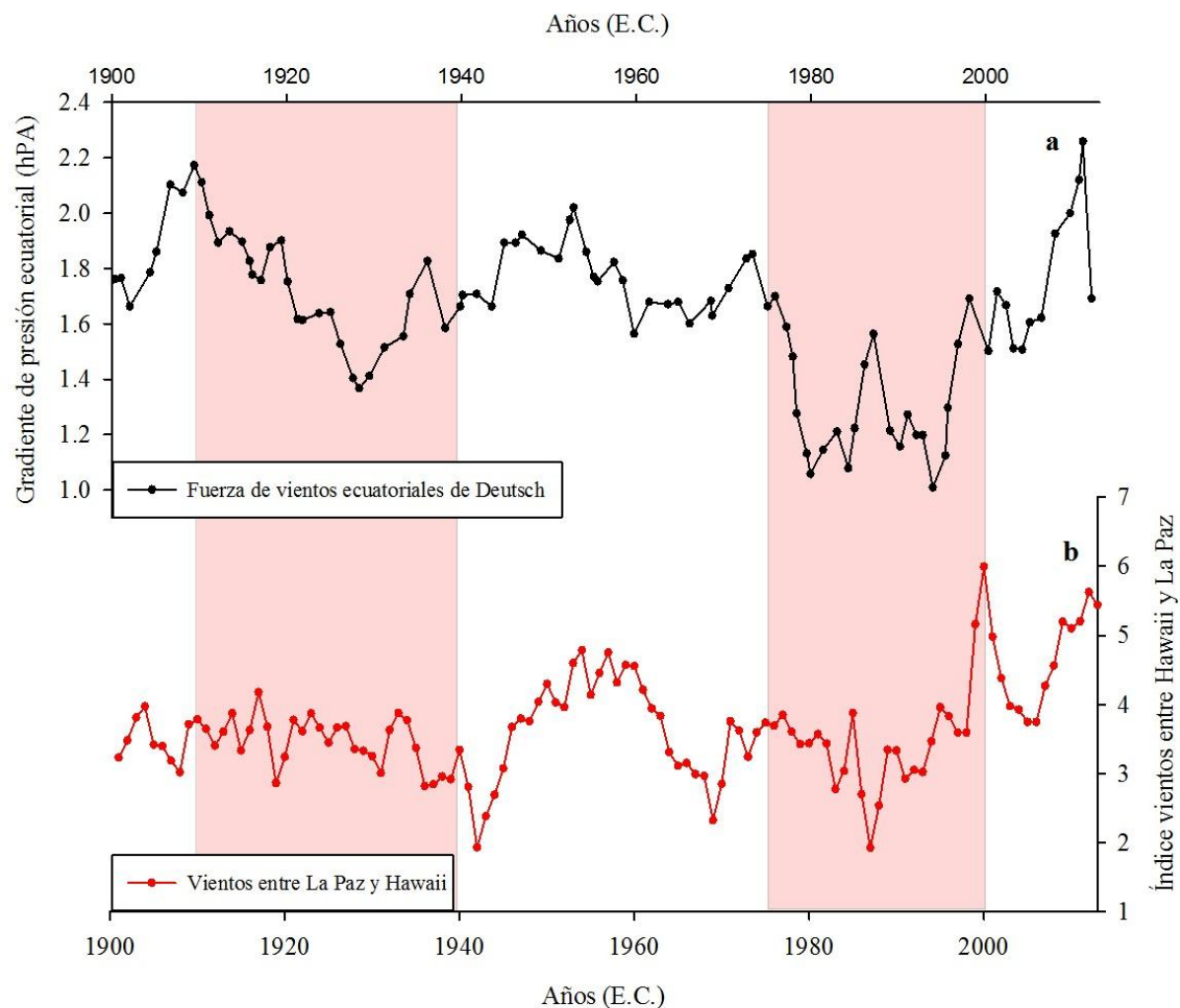


Fig. 14. Intensidad de los vientos para el periodo de 1900 a la actualidad en base a: a) Deutsch y colaboradores (2014), y b) al índice construido entre el gradiente de presiones Hawaii y La Paz (mb) (<http://climexp.knmi.nl/start.cgi?id=someone@somewhere>).
(Datos digitalizados de Deutsch *et al.*, 2014).

Comparación de la productividad en el Pacífico Tropical mexicano con respecto al margen del Pacífico Sudoriental (Perú y Chile) durante el último milenio

A lo largo de toda la costa este del Pacífico sur ocurren condiciones semejantes a las que suceden en la costa del este del Pacífico Norte y por ello existía una estrecha relación entre sus registros. Agnihotri y colaboradores (2008) observaron que la productividad en la región de Perú está fuertemente impactada por ENSO: periodos de alta productividad se correspondían con un

estado normal/La Niña, mientras que periodos de baja productividad se correspondían con un estado El Niño. También encontró que la productividad superficial y la desnitrificación subsuperficial mostraban un acople durante estos periodos. Más tarde, Gutiérrez y colaboradores (2009) demostraron que durante la PEH la columna de agua presentó una productividad reducida junto con un incremento en la oxigenación en el margen del Pacífico Sudoriental. El mecanismo con el que se interpretó este comportamiento fue con el desplazamiento de la ZCIT hacia el sur y un debilitamiento del centro de alta presión del Pacífico Sur subtropical. Alrededor de 1820 se produjo una rápida expansión de aguas ricas en nutrientes junto con una desoxigenación asociado a un cambio de la ZCIT hacia el norte. Este cambio hacia el norte de la ZCIT está acoplado a la intensificación de la celda del Walker (Barber y Chávez, 1983) que promueve un incremento en la capa de mezcla, un incremento de nutrientes en la superficie, con un consecuente incremento de la productividad y mayor consumo de oxígeno (Barber y Chávez, 1983, Pennington *et al.*, 2006). Además, según el autor, la consecuente expansión de este centro de alta presión y la intensificación de los vientos alisios han persistido hasta los tiempos modernos y el impacto que ha producido esta nueva situación fue un incremento de la productividad primaria y en las pesquerías (Gutiérrez *et al.*, 2009). Salvatelli y colaboradores (2013) demostraron que durante el PCM la expansión y contracción de los centros de alta presión tuvieron una importante influencia sobre las surgencias, más que los cambios en la circulación de Walker. Durante el PCM las surgencias de Perú contribuyeron a una mayor intensidad de la ZMO y mayor exportación de material orgánico al fondo marino. La transición hacia periodos fríos mostraba un cambio gradual hacia bajas productividades y menos intensidad de la ZMO asociados a una contracción del centro de alta presión y un debilitamiento gradual de la circulación de Walker (Salvacetti *et al.*, 2013). Recientemente, Fleury y colaboradores (2015) en un estudio en el margen de Perú, subdividieron al último milenio en tres periodos, un PCM dominado por condiciones áridas (condiciones similares a los eventos de La Niña), una PEH dominada por condiciones húmedas (condiciones similares a los eventos de El Niño) y un periodo Reciente cálido dominado nuevamente por condiciones más similares a La Niña (Fig. 14b). Esta diferencia de las condiciones quedó explicada por el mecanismo que controlaba las migraciones latitudinales de la ZCIT, ya que una migración hacia el norte de la ZCIT generó condiciones tipo La Niña en las costas de Perú durante el PCM y el periodo Reciente, mientras que condiciones más similares a los eventos de El Niño fueron causadas por una migración hacia

el sur de la ZCIT durante la PEH. Todas estas tendencias coinciden con los resultados obtenidos en el presente trabajo realizado en el Pacífico Nororiental Subtropical, con lo que se confirma que las condiciones climáticas principales fueron similares a lo largo de toda la costa Oriental del Pacífico (Fig. 15).

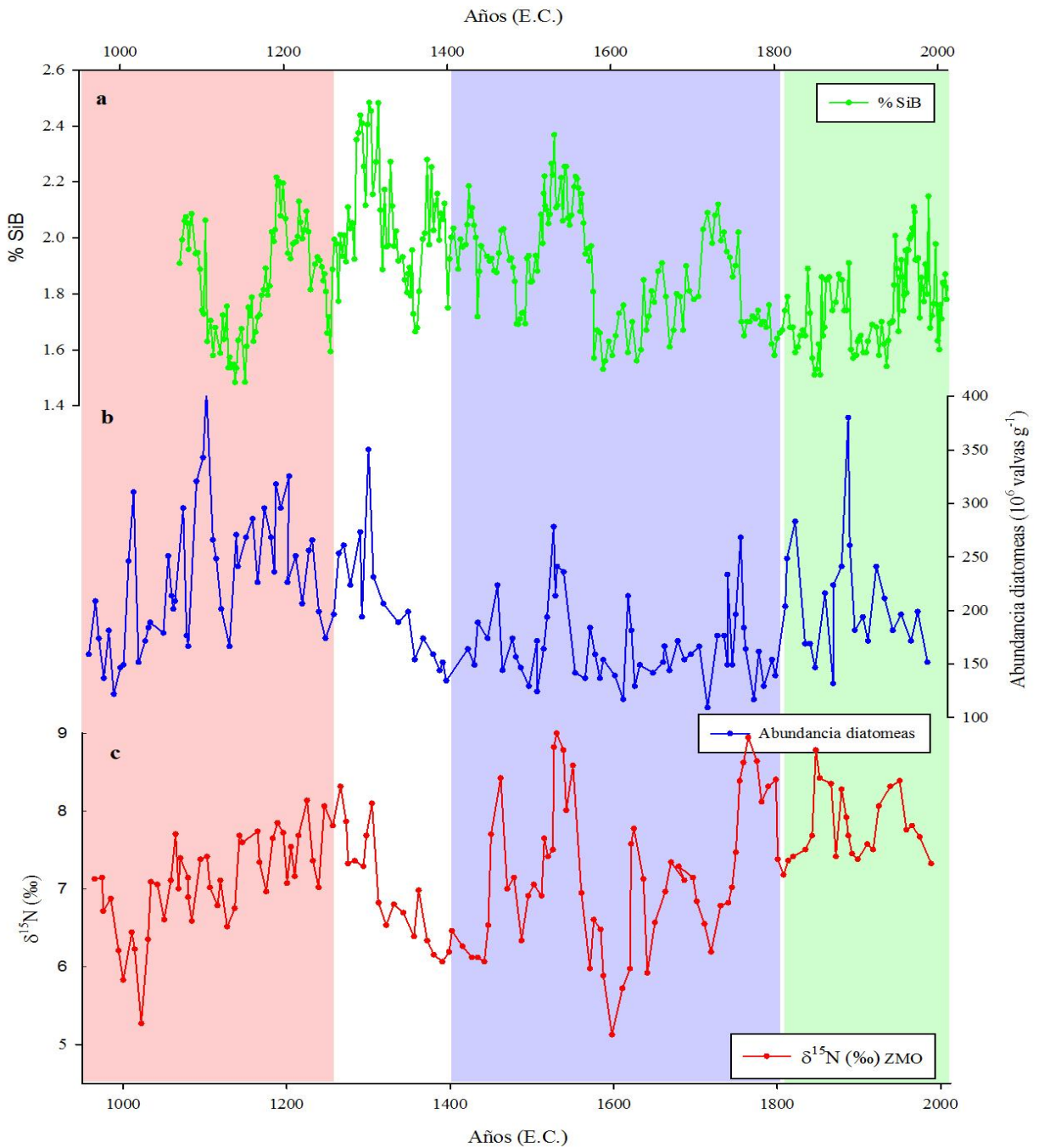


Fig. 15. Evolución de las surgencias y de las zonas de mínimo oxígeno en el Pacífico oriental durante el último milenio. a) Registro de productividad reconstruida (%SiB) para el Pacífico Mexicano en Cuenca Soledad, b) registro de productividad reconstruida para el margen de Perú a partir de abundancia de diatomeas (10^6 valvas g^{-1}) (Fleury *et al.*, 2015), y c) registro de desoxigenación de las aguas subsuperficiales de Perú mediante $\delta^{15}N$ (‰) (Fleury *et al.*, 2015). La franja roja representa el PCM, la azul la PEH y la verde el periodo Reciente. Datos digitalizados de Fleury *et al.*, 2015.

De acuerdo con este estudio, el comportamiento de la ZMO responde a una mayor productividad, de manera que durante el PCM la ZMO incrementó, durante la PEH la ZMO disminuyó, y durante el Antropoceno se volvió a expandir (Fleury *et al.*, 2015; Fig. 15c). Este mismo patrón parece presentarse a escala milenial a lo largo del margen continental del Este del Pacífico Nororiental Subtropical durante los periodos fríos y cálidos (Cartapanis *et al.*, 2011, 2012, 2014) (Fig. 15a).

En la región situada más al sur de la costa este del Pacífico se observó también esta influencia en el patrón climático durante el último milenio. En el norte de Chile, se demostró que durante la PEH, destacaron las condiciones El Niño con baja productividad, alta concentración de oxígeno y descenso en biomasa de anchoveta, seguido de un descenso en la temperatura del océano asociada a un incremento en los eventos de surgencia (Guiñez *et al.*, 2014). En el suroeste de la Patagonia se identificaron cambios significativos en la hidrología durante los últimos 1200 años. De manera que en una escala centenal sucedieron periodos en los que se incrementó la evaporación en 1150, 1350 y 1650, mientras que en 950, y entre 1400 y 1500 predominaron periodos de baja evaporación. Existen evidencias de épocas secas durante el PCM en registros de Guanaco, consistentes con otros registros de Patagonia. También, durante la PEH se identificaron vientos dominantes del oeste, que incrementaron la precipitación y las condiciones de alta evaporación. Con respecto a la productividad, se observaron cuatro periodos de incremento de la productividad en 1050, 1300, 1450 y 1750, relacionados con incremento de las temperaturas (Moy *et al.*, 2008).

Antropoceno (1850-2012)

La variabilidad de la productividad durante el Antropoceno tuvo un comportamiento muy similar al de la PEH, con la diferencia de que la tasa de acumulación aumentó un 3.66 % durante el Antropoceno. La cantidad de SiB en promedio fue más baja durante el Antropoceno, un 4.75 % con respecto al valor promedio que predominó durante la PEH y se observa que el inicio del Antropoceno (1850) fue una continuación de la parte final de la PEH.

Para investigar el comportamiento de la productividad (%SiB) se comparó con el registro instrumental de la PDO, el índice de surgencias de Bakun, el índice de vientos que se reconstruyó entre la diferencia de presiones entre Hawaii y La Paz, la profundidad de la termoclina para la región del Pacífico Oriental Tropical y la desnitrificación para Cuenca Soledad (Fig. 15).

Los cambios registrados de productividad desde 1900, mostraron un comportamiento muy similar a la variación de la PDO. La PDO es una respuesta climática del Pacífico tropical que fue descrita por primera vez por Mantua y colaboradores (1997). Chhak y Di Lorenzo (2007) describieron este mecanismo en la región y establecieron que puede manifestarse mediante una fase positiva, que produce un calentamiento en el Pacífico Nororiental Subtropical y un debilitamiento de los vientos que provienen del norte, debido a un fortalecimiento del centro de baja presión de las Aleutianas. Por el contrario, la fase negativa produce un enfriamiento del Pacífico Nororiental tropical y un fortalecimiento de los vientos del norte debido al debilitamiento del centro de baja presión de las Aleutianas. Además, estos mismos autores sugirieron que existe una conexión entre la PDO y la profundidad de las celdas de surgencia en el SCC, ya que se demostró que durante las fases negativas había más probabilidad de que las aguas profundas ricas en nutrientes se mezclaran verticalmente y, por el contrario, durante la fase positiva ocurre una mayor estratificación (Chhak y Di Lorenzo, 2007).

En este estudio se encontró que durante las fases positivas de la PDO, la productividad disminuye, como se observa en los periodos entre 1910 a 1940 y de 1975 al 2000, mientras que durante periodos de fase negativa la productividad se incrementa, como sucedió en el periodo de los años 1940 al 1975, y del 2000 a la actualidad (Fig. 16a y 16g).

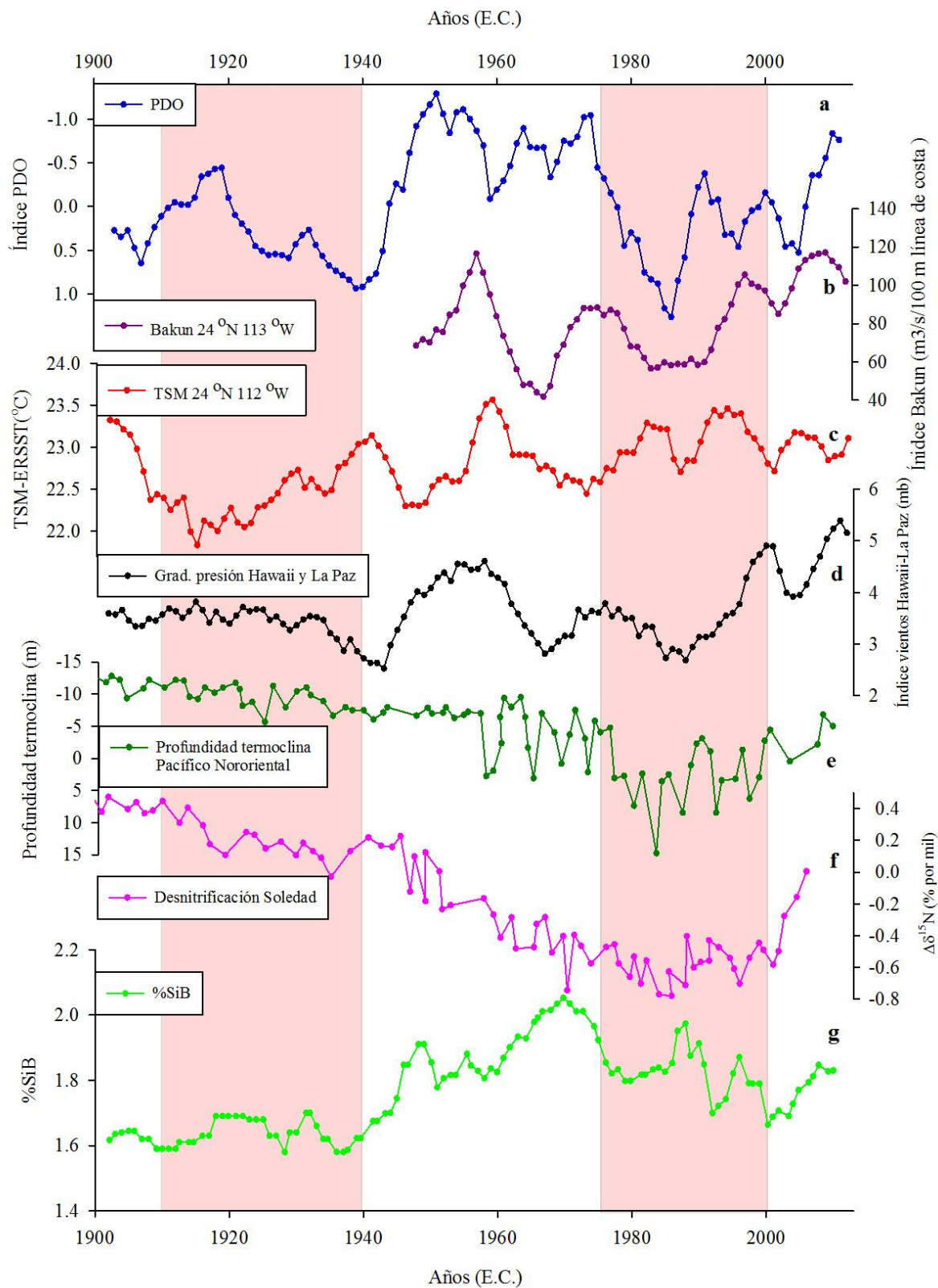


Fig. 16. Series de tiempo de: a) anomalías de la PDO instrumental de los meses de invierno (Noviembre a Marzo) con un filtro de 5 años, nótese que el eje de PDO está invertido

(<http://www.atmos.washington.edu/~mantua/abst.PDO.html>), b) índice de Bakun ($\text{m}^3/\text{s}/100 \text{ m}$ línea de costa) para la región 24°N 113°W con un filtro de 5 años (http://www.pfeg.noaa.gov/products/PFEL/modeled/indices/upwelling/NA/upwell_menu_NA.html), c) Temperatura superficial del mar ($^\circ\text{C}$) para la región 24°N 112°W con un filtro de 5 años (<http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCDC/.ERSST/.version4/>), d) Índice de vientos calculado a partir de la diferencia anual de presión (mb) entre Hawaii y La Paz, con un filtro de 5 años (<http://climexp.knmi.nl/start.cgi?id=someone@somewhere>), e) Profundidad de la termoclina (isoterma de 13°C) en la región del Pacífico Norte Tropical (Antonov *et al.*, in NOAA Atlas NESDros. Inf. Serv 66 (U.S. Government Printing Office Washintong, DC, 2010)) Digitalizado de Deutsch *et al.*, 2013, f) Desnitrificación ($\Delta\delta^{15}\text{N}$ (‰)) en Cuenca Soledad (Deutsch *et al.*, 2013). Digitalizado de Deutsch *et al.*, 2013, y g) productividad marina reconstruida para el Pacífico Mexicano (%SiB), para el periodo de 1900 a 2012 (año en que se colectó el núcleo sedimentario), excepto el índice de Bakun que comienza en 1945.

Las bandas rojas representan los periodos de PDO positiva.

En la figura 16 se observa que el comportamiento de las variables que controlan la productividad marina cambia con las fases positivas y negativas de la PDO. De manera general, durante las fases positivas de la PDO predominan bajo índice de Bakun, mayor temperatura superficial del mar y disminución de la fuerza de los vientos. Y durante las fases negativas de la PDO existen incremento del índice de Bakun, disminución de la temperatura superficial del mar e incremento de la fuerza de los vientos (Fig. 16a, 16b, 16c y 16d). La productividad reconstruida presenta una correlación inversa y estadísticamente significativa con respecto a la PDO ($r=-0.538$), lo que significa que durante la fases negativas de la PDO se incrementa la productividad, y durante las fases positivas de la PDO la productividad disminuye (Fig. 16). A su vez la PDO presentó una correlación negativa y estadísticamente significativa ($r=-0.493$) con respecto al índice construido de la intensidad de los vientos, lo que significa que durante las fases positivas de la PDO se debilitan los vientos y bajo esta condición no se favorece a la productividad en la región, y por el contrario, durante las fases negativas de la PDO se intensifican los vientos lo que favorece la productividad en la región (Macías *et al.*, 2012, Chávez *et al.*, 2003). Lo que implica que el aumento de la productividad está relacionado con la intensificación de los vientos y de los fenómenos propios de la región como la PDO. A su vez el índice de vientos presenta una fuerte correlación ($r=0.807$) con respecto al índice de surgencias.

El comportamiento de la profundidad de la termoclina (Fig. 16e) muestra que durante la última fase positiva de la PDO, que abarca el periodo de 1975 al 2000, se produjo una profundización de la misma y por tanto una estratificación de la columna de agua. Esto sugiere un estancamiento de agua cálida en la parte superficial de la columna de agua y por tanto una reducción de la mezcla de agua de surgencias rica en nutrientes. Basados en el registro de desnitrificación reconstruido en el trabajo de Deutsch y colaboradores (2014) (Fig. 16f), se observa que la columna de agua experimenta una oxigenación durante las fases negativas de la PDO y una ligera desoxigenación durante la misma fases positiva de la PDO, que coincide con una profundización de la termoclina (Fig. 16e). Esto sugiere que durante las fases negativas de la PDO la columna de agua estaba más mezclada y más oxigenada, por el contrario, durante las fases positivas de PDO la columna de agua está menos oxigenada, más estratificada y con temperaturas ligeramente mayores (Fig. 16c).

Nuestro registro de productividad muestra un incremento desde 1940s hasta 1970s, época en la que inicia el descenso de la productividad hasta 1998, y un leve incremento desde esa fecha hasta la actualidad. Se ha demostrado que la productividad en el margen de Baja California aumentó acorde con la fase negativa de la PDO en 1942, el incremento en el índice de surgencias, de la intensidad de los vientos, y aumentos en la oxigenación (Fig. 16a, 16b, 16d, 16g). Posteriormente, al comienzo de la fase positiva de la PDO en 1980, se observó la disminución del índice de surgencias, un ligero incremento en la temperatura superficial del mar, un debilitamiento de los vientos, una profundización de la termoclina (estratificación), y una desoxigenación como escenario para el descenso en productividad marina (Fig. 16a, 16b, 16c, 16d, 16e, 16f, 16g). Finalmente, en los últimos ~15 años del registro (desde 1998), se observó un nuevo incremento de la productividad asociado nuevamente a una fase negativa de la PDO, incremento del índice de surgencias y de los vientos, una termoclina más somera y mayor oxigenación en la columna de agua (Fig. 16a, 16b, 16d, 16e, 16f y 16g). En conjunto, estos trazadores sugieren que la productividad en esta región está fuertemente relacionada con las fases de la PDO (Chávez *et al.*, 2003). Este comportamiento coincide con lo observado en las costas de Chile, donde muestra una relación inversa entre la abundancia de la anchoa y la PDO, expresada como el incremento de estas especies durante la fase negativa de la PDO y un descenso durante la fase positiva de la PDO, con alternancia en los periodos de 25 y 30 años por cada fase (Gutiérrez *et al.*, 2014).

Debido a la resolución temporal de nuestro registro, no es posible detectar variaciones interanuales ni estacionales. Sin embargo, es posible inferir acerca del comportamiento del efecto combinado de la variación de una escala interanual (ENSO) y una escala decadal (PDO). Diferentes estudios demostraron que la PDO ejerce un efecto modulador en la consistencia de las teleconexiones del ENSO (Gershunov y Barnett, 1998, Allan *et al.*, 2003, Tsonis *et al.*, 2005, Verdon *et al.*, 2006). Esta conclusión la obtuvieron después de observar que los eventos de El Niño eran más fuertes e intensos durante las fases positivas de la PDO, y de que los eventos de La Niña eran más fuertes e intensos durante las fases negativas de la PDO. Así se observó que, durante los años en los que coincidían las dos fases positivas de ENSO y de PDO como en 1905, 1914, 1924, 1931, 1970, 1977, 1983, 1987 y 1998, predominaban tasas bajas de productividad o con tendencia al decremento. Por el contrario, durante las fases negativas de PDO en conjunto con ENSO negativo en el que se favorecían las surgencias, prevalecían valores altos o tendencia al aumento de la productividad, como sucedía durante los años 1917, 1918, 1956, 1963, 1965, 1999 y 2000. Es importante resaltar el máximo de productividad en ~1971, ya que éste fue precedido por su gradual incremento debido a varios eventos de la Niña en conjunción con una fase negativa de PDO, llegando a su punto culminante con un evento de El Niño dentro de un cambio de régimen a fase positiva de PDO, provocando que la productividad tuviera una posterior tendencia a disminuir (Tabla con los años PDO-ENSO de Mantua, 1998. <http://www.atmos.washington.edu/~mantua/TABLES2.html>).

Por último se realizó un análisis exploratorio para estudiar cómo había sido el comportamiento de la productividad durante los últimos ~60 años (desde 1950), y se observó que tanto la tasa de sedimentación como la productividad habían incrementado para las últimas ~seis décadas (Tabla 7).

Tabla 7. Datos estadísticos (media, desviación estándar (S.D.), máximo y mínimo) y tasa de acumulación, para el Antropoceno y para los últimos ~60 años del Antropoceno.

Parámetros	Antropoceno	Últimos 50 años
Media (%SiB)	1.783	1.861
S.D. (%SiB)	0.150	0.129

Máximo (%SiB)	2.148	2.148
Mínimo (%SiB)	1.510	1.600
Tasa de acumulación ($cm\ ka^{-1}$)	85.239	107.745

Bakun (1990) propuso la existencia de un fenómeno en los sistemas *Eastern Boundary Currents* que provoca que el gradiente de presión atmosférica cambie como consecuencia del calentamiento global y el incremento de los gases invernadero. El mecanismo propone una intensificación y una modificación de los centros de presión tanto en la tierra como en el océano, de manera que se produciría una intensificación de los vientos de surgencia. Sin embargo, incrementos fuertes en la intensidad del viento podrían traer consecuencias adversas debido a la perturbación de las interacciones tróficas (Cury y Roy, 1989). Esto podría causar el transporte de organismos planctónicos hacia fuera de las plataformas continentales, o incrementos de la acidificación o la hipoxia en las aguas de los hábitats costeros (Gruber *et al.*, 2012, Chan *et al.*, 2008). Aunque las tendencias positivas en la concentración de clorofila *a* costera se ajustan a las tendencias del viento descritas (Kahru *et al.*, 2012), no hay razón para suponer que estos cambios se traducen en incrementos de productividad en niveles más altos de la cadena trófica (Weimerskirch *et al.*, 2012). Esto debido a que el calentamiento del océano podría contrarrestar las surgencias mediante un aumento de la estratificación dificultando así las respuestas ecológicas (McGowan *et al.*, 1998). Estudios sobre la prueba de esta hipótesis proponen un mecanismo distinto. El trabajo realizado por Narayan y colaboradores (2010) basado en registros de temperatura sugiere un debilitamiento de las surgencias costeras después de 1870, y una intensificación después de 1960. Adicionalmente la base de datos de CALCOFI mostró fuertes evidencias de la intensificación de las surgencias en la corriente de California. Sydeman y colaboradores (2014), basados en evidencias de incremento o descenso de los vientos afirmó una intensificación de las surgencias en los sistemas de California, de Humboldt, de Benguela y de Canarias, pero para el sistema Ibérico se observó la tendencia al debilitamiento. Recientemente Wang y colaboradores (2015) con ayuda de un conjunto de modelos climáticos demostraron que para el final del siglo XXI la estación de surgencias comenzaría más temprano, terminaría más tarde y serían más intensas en latitudes altas. Estas proyecciones resultaron en una reducción de la variación latitudinal en las surgencias costeras y dichos patrones eran consistentes en los sistemas de Canarias, de Benguela y de Humboldt, pero no en el de California. Esto puede estar

reflejando un control regional en la corriente de California asociado con las respuestas del ENSO, la PDO o la NPGO (Di Lorenzo, 2008, Chenillat *et al.*, 2012, Jacox *et al.*, 2014).

Para probar esto, se analizó el comportamiento de las surgencias para la etapa actual y su pendiente no mostraba ninguna tendencia significativa en la productividad (Fig. 17), sino una tendencia constante de las surgencias durante este periodo. Esto implica que la hipótesis propuesta por Bakun en 1990 parece no cumplirse para esta región en las últimas décadas, ya que durante esta etapa (desde 1950) la tasa de acumulación y el porcentaje de SiB se vieron incrementados en 20.88 % y 4.19%, respectivamente (Tabla 7). Además, dentro de este mismo periodo no se muestra ninguna tendencia hacia el incremento de las surgencias en la actualidad. Esto significa que la productividad se incrementó en la última parte del Antropoceno y se estabilizó en los últimos ~60 años.

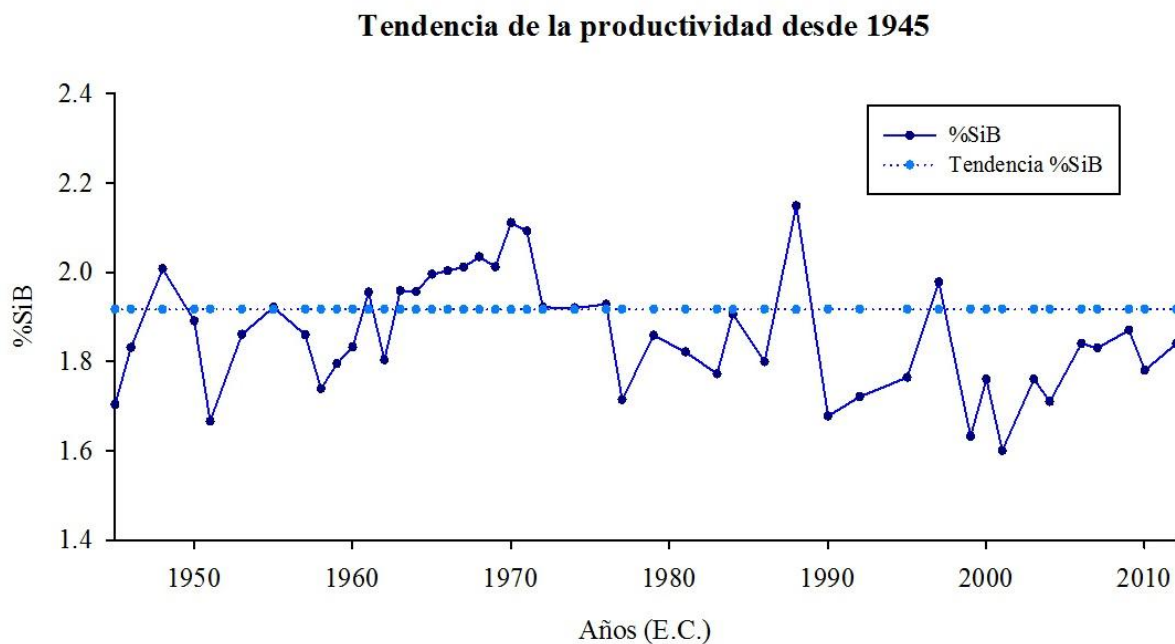


Fig. 17. Registro de productividad reconstruida para el Pacífico mexicano (%SiB) para la última etapa del registro que abarca desde 1945. En ella queda representada la tendencia de las surgencias (directamente relacionada con productividad de diatomeas) mediante un análisis de tendencia (línea azul clara), cuya pendiente (-0.00183) no es significativa ($\alpha=0.025$, $n=68$, $p=2$).

Las conclusiones de Wang y colaboradores parecen estar reforzadas por nuestros resultados para Baja California, de manera que los cambios en la productividad marina desde 1945 parecen estar más fuertemente controlados por otros mecanismos oceanográficos, como la PDO.

6. CONCLUSIÓN

El registro de productividad reconstruida para el Pacífico mexicano a partir de la medición de sílice biogénico (%SiB) permitió analizar el comportamiento de las surgencias durante el último milenio. En la primera parte del registro se observó que, durante el PCM, la productividad presentó una tendencia a incrementarse junto con altas tasas de exportación de material al fondo marino. Estos resultados parecen estar relacionados a condiciones de mayor radiación solar y un incremento de la temperatura, que causa la migración de la ZCIT hacia el norte (Garreaud *et al.*, 2009) y una intensificación del gradiente de presión ente los centros de presión entre el Pacífico Nororiental. Esta condición generó condiciones oceanográficas similares a eventos de La Niña, con una intensificación en las surgencias en el este del Pacífico Norte, y condiciones secas que aumentaban la aridez del margen continental del suroeste de los Estados Unidos y Noroeste de México. Durante la PEH, la disminución de la radiación solar durante este periodo y el incremento de la actividad volcánica produjeron la migración de la ZCIT hacia el sur (Haug *et al.*, 2001, Agnihotri *et al.*, 2002, Agnihotri y Dutta, 2003, Higginson *et al.*, 2004, Douglas *et al.*, 2007, Wang *et al.*, 2007, Okumura *et al.*, 2009). Estas condiciones y la disminución intensidad del gradiente de presión provocaron un debilitamiento de los vientos de surgencia y condiciones oceanográficas similares a los eventos de El Niño, con una tendencia negativa tanto en la productividad como en la tasa de sedimentación con respecto al PCM.

Durante el Antropoceno parece ocurrir una migración de la ZCIT hacia el norte favoreciendo la generación de condiciones similares a los eventos de la Niña. También se demostró con mayor precisión la influencia de los fenómenos oceanográficos a partir de 1900 gracias a la disponibilidad de los registros instrumentales. En primer lugar se detectó la relación con los cambios de fase de la PDO, y se observó que la productividad para este último periodo coincide con los cambios de régimen de PDO entre sus fases negativas y sus fases positivas. Las fases negativas de la PDO coinciden con intensificación de los gradientes de presión entre los centros de presión, intensificación de los vientos en la región y por tanto con incrementos en el índice de Bakun, cambios en la oceanografía y en la productividad. Por el contrario, durante las fases positivas de la PDO se debilita el gradiente de presión entre los centros de alta y de baja presión y la intensidad de los vientos, y con ellos las surgencias y la productividad. Por otra parte se

realizó un análisis para estudiar la tendencia de las surgencias desde 1945 al final de registro y no se observó una tendencia a través del tiempo, como predecía Bakun (1990).

Esta investigación nos permite concluir que las variaciones en la productividad marina durante el último milenio en Baja California son causadas por fenómenos solares y oceanográficos propios de la región como la PDO. Confirmando las observaciones de Marchitto y colaboradores (2010) dónde la radiación solar juega un papel importante en la productividad marina del Pacífico Nororiental Subtropical de México.

7. **REFERENCIAS**

- ✓ Abrantes, F., Rodrigues, T., Montanari, B., Santos, C., Witt, L., Lopes, C., & Voelker, A. H. (2011). Climate of the last millennium at the southern pole of the North Atlantic Oscillation: an inner-shelf sediment record of flooding and upwelling. *Climate Research*, 48(2), 261.
- ✓ Agnihotri, R., Dutta, K., Bhushan, R., & Somayajulu, B. L. K. (2002). Evidence for solar forcing on the Indian monsoon during the last millennium. *Earth and Planetary Science Letters*, 198(3), 521-527.
- ✓ Agnihotri, R., & Dutta, K. (2003). Centennial scale variations in monsoonal rainfall (Indian, east equatorial and Chinese monsoons): Manifestations of solar variability. *CURRENT SCIENCE-BANGALORE-*, 85(4), 459-463.
- ✓ Agnihotri, R., Altabet, M. A., & Herbert, T. D. (2006). Influence of marine denitrification on atmospheric N₂O variability during the Holocene. *Geophysical research letters*, 33(13).
- ✓ Agnihotri, R., Altabet, M. A., Herbert, T. D., & Tierney, J. E. (2008). Subdecadally resolved paleoceanography of the Peru margin during the last two millennia. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9(5).
- ✓ Allan, R. J., Reason, C. J. C., Lindesay, J. A., & Ansell, T. J. (2003). Protracted ENSO episodes and their impacts in the Indian Ocean region. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 50(12), 2331-2347.
- ✓ Altabet, M. A., Pilskaln, C., Thunell, R., Pride, C., Sigman, D., Chavez, F., & Francois, R. (1999). The nitrogen isotope biogeochemistry of sinking particles from the margin of the Eastern North Pacific. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 46(4), 655-679.

- ✓ Altabet, M. A., Higginson, M. J., & Murray, D. W. (2002). The effect of millennial-scale changes in Arabian Sea denitrification on atmospheric CO₂. *Nature*, 415(6868), 159-162.

- ✓ Antonov, J.I., et al., in NOAA Atlas NESDros. Inf. Serv. 66 (U.S. Government Printing Office, Washington, DC, 2010).

- ✓ Arellano-Torres, E., Pichevin, L. E., & Ganeshram, R. S. (2011). High-resolution opal records from the eastern tropical Pacific provide evidence for silicic acid leakage from HNLC regions during glacial periods. *Quaternary Science Reviews*, 30(9), 1112-1121.

- ✓ Bakum, A. (1990). Global climate changes and the intensification of coastal upwelling. *Science*, 241, 148-201.

- ✓ Barber, R., & Smith, R. L. (1981). Coastal upwelling ecosystems. Analysis of marine ecosystems/AR Longhurst.

- ✓ Bard, E., Raisbeck, G., Yiou, F., & Jouzel, J. (2000). Solar irradiance during the last 1200 years based on cosmogenic nuclides. *Tellus B*, 52(3).

- ✓ Barron, J. A., Bukry, D., & Bischoff, J. L. (2004). High resolution paleoceanography of the Guaymas Basin, Gulf of California, during the past 15 000 years. *Marine Micropaleontology*, 50(3), 185-207.

- ✓ Barron, J. A., Bukry, D., & Dean, W. E. (2005). Paleoceanographic history of the Guaymas Basin, Gulf of California, during the past 15,000 years based on diatoms, silicoflagellates, and biogenic sediments. *Marine Micropaleontology*, 56(3), 81-102.

- ✓ Beer, J., Mende, W., & Stellmacher, R. (2000). The role of the sun in climate forcing. *Quaternary Science Reviews*, 19(1), 403-415.

- ✓ Black, B. A., Sydeman, W. J., Frank, D. C., Griffin, D., Stahle, D. W., García-Reyes, M., ... & Peterson, W. T. (2014). Six centuries of variability and extremes in a coupled marine-terrestrial ecosystem. *Science*, 345(6203), 1498-1502.
- ✓ Bond, G., Kromer, B., Beer, J., Muscheler, R., Evans, M. N., Showers, W., ... & Bonani, G. (2001). Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene. *Science*, 294(5549), 2130-2136.
- ✓ Bond, B. J., Jones, J. A., Moore, G., Phillips, N., Post, D., & McDonnell, J. J. (2002). The zone of vegetation influence on baseflow revealed by diel patterns of streamflow and vegetation water use in a headwater basin. *Hydrological Processes*, 16(8), 1671-1677.
- ✓ Brink, K. H., & Cowles, T. J. (1991). The coastal transition zone experiment. *Journal of Geophysical Research*, 96, 14637-14647.
- ✓ Buesseler, K. O. (1998). The decoupling of production and particulate export in the surface ocean. *Global Biogeochemical Cycles*, 12(2), 297-310.
- ✓ Cannariato, K. G., & Kennett, J. P. (1999). Climatically related millennial-scale fluctuations in strength of California margin oxygen-minimum zone during the past 60 ky. *Geology*, 27(11), 975-978.
- ✓ Carriquiry, J.D. y Sánchez A. (2014). Productivity changes in the Magdalena Margin of Mexico, Baja California Peninsula, during the past 50,000 years. *Conservation Science in Mexico's Northwest. Productivity changes in the Magdalena margin*.
- ✓ Carriquiry, J. D., Sanchez, A., & Leduc, G. (2015). Southern Ocean influence on the eastern tropical North Pacific's intermediate-depth circulation during the Last Glacial Maximum. *Paleoceanography*.

- ✓ Cartapanis, O., Tachikawa, K., & Bard, E. (2011). Northeastern Pacific oxygen minimum zone variability over the past 70 kyr: Impact of biological production and oceanic ventilation. *Paleoceanography*, 26(4).
- ✓ Cartapanis, O., Tachikawa, K., & Bard, E. (2012). Latitudinal variations in intermediate depth ventilation and biological production over northeastern Pacific Oxygen Minimum Zones during the last 60 ka. *Quaternary Science Reviews*, 53, 24-38.
- ✓ Cartapanis, O., Tachikawa, K., Romero, O. E., & Bard, E. (2014). Persistent millennial-scale link between Greenland climate and northern Pacific Oxygen Minimum Zone under interglacial conditions. *Climate of the Past*, 10(1), 405-418.
- ✓ Chan, F., Barth, J. A., Lubchenco, J., Kirincich, A., Weeks, H., Peterson, W. T., & Menge, B. A. (2008). Emergence of anoxia in the California Current large marine ecosystem. *Science*, 319(5865), 920-920.
- ✓ Chavez, F. P., Ryan, J., Lluch-Cota, S. E., & Niquen, M. (2003). From anchovies to sardines and back: multidecadal change in the Pacific Ocean. *science*, 299(5604), 217-221.
- ✓ Chenillat, F., Riviere, P., Capet, X., Di Lorenzo, E., & Blanke, B. (2012). North Pacific Gyre Oscillation modulates seasonal timing and ecosystem functioning in the California Current upwelling system. *Geophysical Research Letters*, 39(1).
- ✓ Chhak, K., & Di Lorenzo, E. (2007). Decadal variations in the California Current upwelling cells. *Geophysical Research Letters*, 34(14).
- ✓ Clement, A. C., Seager, R., Cane, M. A., & Zebiak, S. E. (1996). An ocean dynamical thermostat. *Journal of Climate*, 9(9), 2190-2196.

- ✓ Clement, A. C., Hall, A., & Broccoli, A. J. (2004). The importance of precessional signals in the tropical climate. *Climate Dynamics*, 22(4), 327-341.

- ✓ Collins, C. A., Pennington, J. T., Castro, C. G., Rago, T. A., & Chavez, F. P. (2003). The California Current system off Monterey, California: physical and biological coupling. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 50(14), 2389-2404.

- ✓ Cook, E. R., Woodhouse, C. A., Eakin, C. M., Meko, D. M., & Stahle, D. W. (2004). Long-term aridity changes in the western United States. *Science*, 306(5698), 1015-1018.

- ✓ Cook, E. R., Seager, R., Cane, M. A., & Stahle, D. W. (2007). North American drought: reconstructions, causes, and consequences. *Earth-Science Reviews*, 81(1), 93-134.

- ✓ Crowley, T. J., & Kim, K. Y. (1999). Modeling the temperature response to forced climate change over the last six centuries. *Geophysical Research Letters*, 26(13), 1901-1904.

- ✓ Crowley, T. J. (2000). Causes of climate change over the past 1000 years. *Science*, 289(5477), 270-277.

- ✓ Cury, P., & Roy, C. (1989). Optimal environmental window and pelagic fish recruitment success in upwelling areas. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 46(4), 670-680.

- ✓ DeMenocal, P. B. (2001). Cultural responses to climate change during the late Holocene. *Science (New York, NY)*, 292(5517), 667-673.

- ✓ De Pol-Holz, R., Ulloa, O., Lamy, F., Dezileau, L., Sabatier, P., & Hebbeln, D. (2007). Late Quaternary variability of sedimentary nitrogen isotopes in the eastern South Pacific Ocean.

- ✓ Deutsch, C., Berelson, W., Thunell, R., Weber, T., Tems, C., McManus, J., ... & van Geen, A. (2014). Centennial changes in North Pacific anoxia linked to tropical trade winds. *Science*, 345(6197), 665-668.

- ✓ Di Lorenzo, E. (2003). Seasonal dynamics of the surface circulation in the Southern California Current System. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 50(14), 2371-2388.

- ✓ Di Lorenzo, E., Schneider, N., Cobb, K. M., Franks, P. J. S., Chhak, K., Miller, A. J., ... & Rivière, P. (2008). North Pacific Gyre Oscillation links ocean climate and ecosystem change. *Geophysical Research Letters*, 35(8).

- ✓ Díaz-Ochoa, J. A., Pantoja, S., De Lange, G. J., Lange, C. B., Sánchez, G. E., Acuña, V. R., ... & Vargas, G. (2011). Oxygenation variability in Mejillones Bay, off northern Chile, during the last two centuries. *Biogeosciences*, 8(1), 137-146.

- ✓ Doney, S. C., Bopp, L., & Long, M. C. (2014). Historical and future trends in ocean climate and biogeochemistry.

- ✓ Douglas, R., Gonzalez-Yajimovich, O., Ledesma-Vazquez, J., & Staines-Urias, F. (2007). Climate forcing, primary production and the distribution of Holocene biogenic sediments in the Gulf of California. *Quaternary Science Reviews*, 26(1), 115-129.

- ✓ Durazo, R., & Baumgartner, T. R. (2002). Evolution of oceanographic conditions off Baja California: 1997–1999. *Progress in Oceanography*, 54(1), 7-31.

- ✓ Field, C. B., Behrenfeld, M. J., Randerson, J. T., & Falkowski, P. (1998). Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Science*, 281(5374), 237-240.

- ✓ Fleitmann, D., Burns, S. J., Mudelsee, M., Neff, U., Kramers, J., Mangini, A., & Matter, A. (2003). Holocene forcing of the Indian monsoon recorded in a stalagmite from southern Oman. *Science*, 300(5626), 1737-1739.

- ✓ Fleury, S., Martinez, P., Crosta, X., Charlier, K., Billy, I., Hanquiez, V., ... & Schneider, R. R. (2015). Pervasive multidecadal variations in productivity within the Peruvian Upwelling System over the last millennium. *Quaternary Science Reviews*, 125, 78-90.

- ✓ Flores-Trujillo, J. G., Helenes, J., Herguera, J. C., & Orellana-Cepeda, E. (2009). Palynological record (1483–1994) of *Gymnodinium catenatum* in Pescadero Basin, southern Gulf of California, Mexico. *Marine Micropaleontology*, 73(1), 80-89.

- ✓ Free, M., & Robock, A. (1999). Global warming in the context of the Little Ice Age. *Journal of Geophysical Research*, 104(D16), 19057-19070.

- ✓ Galloway, J. M., Babalola, L. O., Patterson, R. T., & Roe, H. M. (2010). A high-resolution marine palynological record from the central mainland coast of British Columbia, Canada: Evidence for a mid-late Holocene dry climate interval. *Marine Micropaleontology*, 75(1), 62-78.

- ✓ Ganeshram, R. S., Pedersen, T. F., Calvert, S. E., & Murray, J. W. (1995). Large changes in oceanic nutrient inventories from glacial to interglacial periods. *Nature*, 376(6543), 755-758.

- ✓ Garreaud, R. D., Vuille, M., Compagnucci, R., & Marengo, J. (2009). Present-day south american climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 281(3), 180-195.

- ✓ Gershunov, A., & Barnett, T. P. (1998). Interdecadal modulation of ENSO teleconnections. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(12), 2715-2725.

- ✓ Gómez-Navarro, J. J., Montávez, J. P., Jerez, S., Jimenez-Guerrero, P., Lorente-Plazas, R., González-Rouco, J. F., & Zorita, E. (2011). A regional climate simulation over the Iberian Peninsula for the last millennium. *Climate of the Past*, 7, 451-472.

- ✓ Goñi, M. A., Thunell, R. C., Woodworth, M. P., & Müller-Karger, F. E. (2006). Changes in wind-driven upwelling during the last three centuries: Interocean teleconnections. *Geophysical research letters*, 33(15).

- ✓ Gruber, N., Hauri, C., Lachkar, Z., Loher, D., Frölicher, T. L., & Plattner, G. K. (2012). Rapid progression of ocean acidification in the California Current System. *Science*, 337(6091), 220-223.

- ✓ Guíñez, M., Valdés, J., Sifeddine, A., Boussafir, M., & Dávila, P. M. (2014). Anchovy population and ocean-climatic fluctuations in the Humboldt Current System during the last 700 years and their implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 415, 210-224.

- ✓ Gutiérrez, D., Sifeddine, A., Field, D., Ortlieb, L., Vargas, G., Chávez, F. P., ... & Baumgartner, T. (2009). Rapid reorganization in ocean biogeochemistry off Peru towards the end of the Little Ice Age. *Biogeosciences*, 6, 835-848.

- ✓ Haug, G. H., Hughen, K. A., Sigman, D. M., Peterson, L. C., & Röhl, U. (2001). Southward migration of the intertropical convergence zone through the Holocene. *Science*, 293(5533), 1304-1308.

- ✓ Hendy, I. L., Pedersen, T. F., Kennett, J. P., & Tada, R. (2004). Intermittent existence of a southern Californian upwelling cell during submillennial climate change of the last 60 kyr. *Paleoceanography*, 19(3).

- ✓ Hendy, I. L., & Pedersen, T. F. (2006). Oxygen minimum zone expansion in the eastern tropical North Pacific during deglaciation. *Geophysical Research Letters*, 33(20).

- ✓ Hendy, I. L., Napier, T. J., & Schimmelmann, A. (2015). From extreme rainfall to drought: 250 years of annually resolved sediment deposition in Santa Barbara Basin, California. *Quaternary International*.

- ✓ Higginson, M. J., Altabet, M. A., Wincze, L., Herbert, T. D., & Murray, D. W. (2004). A solar (irradiance) trigger for millennial-scale abrupt changes in the southwest monsoon?. *Paleoceanography*, 19(3).

- ✓ Hong, Y. T., Wang, Z. G., Jiang, H. B., Lin, Q. H., Hong, B., Zhu, Y. X., ... & Li, H. D. (2001). A 6000-year record of changes in drought and precipitation in northeastern China based on a $\delta^{13}\text{C}$ time series from peat cellulose. *Earth and Planetary Science Letters*, 185(1), 111-119.

- ✓ Hoyt, D. V. (1997). *The role of the sun in climate change*. Oxford University Press.

- ✓ Hu, F. S., Kaufman, D., Yoneji, S., Nelson, D., Shemesh, A., Huang, Y., ... & Brown, T. (2003). Cyclic variation and solar forcing of Holocene climate in the Alaskan subarctic. *Science*, 301(5641), 1890-1893.

- ✓ Kahru, M., Kudela, R. M., Manzano-Sarabia, M., & Mitchell, B. G. (2012). Trends in the surface chlorophyll of the California Current: Merging data from multiple ocean color satellites. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 77, 89-98.

- ✓ Kamatani, A. (1982). Dissolution rates of silica from diatoms decomposing at various temperatures. *Marine Biology*, 68(1), 91-96.

- ✓ Lavaniegos, B. E., & Ohman, M. D. (2003). Long-term changes in pelagic tunicates of the California Current. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 50(14), 2473-2498.

- ✓ Lean, J., Beer, J., & Bradley, R. (1995). Reconstruction of solar irradiance since 1610: Implications for climate change. *Geophysical Research Letters*, 22(23), 3195-3198.

- ✓ Lynn, R. J., & Simpson, J. J. (1987). The California Current System: The seasonal variability of its physical characteristics. *J. Geophys. Res.*, 92(12), 947-12.

- ✓ Macias, D., Landry, M. R., Gershunov, A., Miller, A. J., & Franks, P. J. (2012). Climatic control of upwelling variability along the western North-American coast. *PloS one*, 7(1), e30436.

- ✓ Mangini, A., Spötl, C., & Verdes, P. (2005). Reconstruction of temperature in the Central Alps during the past 2000 yr from a $\delta^{18}\text{O}$ stalagmite record. *Earth and Planetary Science Letters*, 235(3), 741-751.

- ✓ Mann, K. H. (2000). *Ecology of Coastal Waters With Implications for Management* Blackwell Science. *Marine Biology and Ecology*, 96, 199-212.

- ✓ Mann, M. E., Cane, M. A., Zebiak, S. E., & Clement, A. (2005). Volcanic and solar forcing of the tropical Pacific over the past 1000 years. *Journal of Climate*, 18(3), 447-456.

- ✓ Mann, M. E., Zhang, Z., Rutherford, S., Bradley, R. S., Hughes, M. K., Shindell, D., ... & Ni, F. (2009). Global signatures and dynamical origins of the Little Ice Age and Medieval Climate Anomaly. *Science*, 326(5957), 1256-1260.

- ✓ Mantua, N. J., Hare, S. R., Zhang, Y., Wallace, J. M., & Francis, R. C. (1997). A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(6), 1069-1079.

- ✓ Marchitto, T. M., Muscheler, R., Ortiz, J. D., Carriquiry, J. D., & van Geen, A. (2010). Dynamical response of the tropical Pacific Ocean to solar forcing during the early Holocene. *Science*, 330(6009), 1378-1381.

- ✓ MacDonald, G. M., & Case, R. A. (2005). Variations in the Pacific Decadal Oscillation over the past millennium. *Geophysical Research Letters*, 32(8).

- ✓ McGowan, J. A., Cayan, D. R., & Dorman, L. M. (1998). Climate-ocean variability and ecosystem response in the Northeast Pacific. *Science*, 281(5374), 210-217.

- ✓ McGowan, J. A., Bograd, S. J., Lynn, R. J., & Miller, A. J. (2003). The biological response to the 1977 regime shift in the California Current. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 50(14), 2567-2582.

- ✓ Mehta, V. M., & Lau, K. M. (1997). Influence of solar irradiance on the Indian Monsoon-ENSO relationship at decadal-multidecadal time scales. *Geophysical Research Letters*, 24(2), 159-162.

- ✓ Mikolajewicz, U., Crowley, T. J., Schiller, A., & Voss, R. (1997). Modelling teleconnections between the North Atlantic and North Pacific during the Younger Dryas. *Nature*, 387(6631), 384-387.

- ✓ Miller, A. J., Chai, F., Chiba, S., Moisan, J. R., & Neilson, D. J. (2004). Decadal-scale climate and ecosystem interactions in the North Pacific Ocean. *Journal of Oceanography*, 60(1), 163-188.

- ✓ Mollier-Vogel, E., Ryabenko, E., Martinez, P., Wallace, D., Altabet, M. A., & Schneider, R. (2012). Nitrogen isotope gradients off Peru and Ecuador related to upwelling, productivity, nutrient uptake and oxygen deficiency. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 70, 14-25.

- ✓ Mortlock RA, Froelich PN. 1989. A simple method for the rapid determination of biogenic opal in pelagic marine sediments. *Deep-Sea Res. (A)* 36: 1415–1426.

- ✓ Moy, C. M., Dunbar, R. B., Moreno, P. I., Francois, J. P., Villa-Martínez, R., Mucciarone, D. M., ... & Garreaud, R. D. (2008). Isotopic evidence for hydrologic change related to the westerlies in SW Patagonia, Chile, during the last millennium. *Quaternary Science Reviews*, 27(13), 1335-1349.

- ✓ Murphree, T., Bograd, S. J., Schwing, F. B., & Ford, B. (2003). Large scale atmosphere-ocean anomalies in the northeast Pacific during 2002. *Geophysical Research Letters*, 30(15).

- ✓ Narayan, N., Paul, A., Mulitza, S., & Schulz, M. (2010). Trends in coastal upwelling intensity during the late 20th century. *Ocean Science*, 6(3), 815-823.

- ✓ Neff, U., Burns, S. J., Mangini, A., Mudelsee, M., Fleitmann, D., & Matter, A. (2001). Strong coherence between solar variability and the monsoon in Oman between 9 and 6 kyr ago. *Nature*, 411(6835), 290-293.

- ✓ Nelson, D. M., Tréguer, P., Brzezinski, M. A., Leynaert, A., & Quéguiner, B. (1995). Production and dissolution of biogenic silica in the ocean: revised global estimates, comparison with regional data and relationship to biogenic sedimentation. *Global Biogeochemical Cycles*, 9(3), 359-372.

- ✓ Okumura, Y. M., Deser, C., Hu, A., Timmermann, A., & Xie, S. P. (2009). North Pacific climate response to freshwater forcing in the subarctic North Atlantic: Oceanic and atmospheric pathways. *Journal of Climate*, 22(6), 1424-1445.

- ✓ Parker, E. N. (1999). Solar physics: Sunny side of global warming. *Nature*, 399(6735), 416-417.

- ✓ Pauly, D., & Christensen, V. (1995). Primary production required to sustain global fisheries. *Nature*, 374(6519), 255-257.

- ✓ Peinert, R., Von Bodungen, B., & Smetacek, V. (1989). Food web structure and loss rate. *Productivity of the ocean present and past*, (WH Berger, VS Smetacek, G Wefer, eds) Wiley & Sons, Chichester, 35-48.

- ✓ Pennington, J. T., Mahoney, K. L., Kuwahara, V. S., Kolber, D. D., Calienes, R., & Chavez, F. P. (2006). Primary production in the eastern tropical Pacific: a review. *Progress in Oceanography*, 69(2), 285-317.

- ✓ 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. *Quaternary Research*, 79(2), 138-151.

- ✓ Peterson, L. C., Haug, G. H., Hughen, K. A., & Röhl, U. (2000). Rapid changes in the hydrologic cycle of the tropical Atlantic during the last glacial. *Science*, 290(5498), 1947-1951.

- ✓ Pichevin, L., Bard, E., Martinez, P., & Billy, I. (2007). Evidence of ventilation changes in the Arabian Sea during the late Quaternary: Implication for denitrification and nitrous oxide emission. *Global Biogeochemical Cycles*, 21(4).

- ✓ Pichevin, L. E., Ganeshram, R. S., Geibert, W., Thunell, R., & Hinton, R. (2014). Silica burial enhanced by iron limitation in oceanic upwelling margins. *Nature Geoscience*.

- ✓ Ragueneau, O., Tréguer, P., Leynaert, A., Anderson, R. F., Brzezinski, M. A., DeMaster, D. J., ... & Quéguiner, B. (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. *Global and Planetary Change*, 26(4), 317-365.

- ✓ Robinson, R. S., Mix, A., & Martinez, P. (2007). Southern Ocean control on the extent of denitrification in the southeast Pacific over the last 70ka. *Quaternary Science Reviews*, 26(1), 201-212.

- ✓ Roemmich, D., & McGowan, J. (1995). Climatic warming and the decline of zooplankton in the California Current. *Science*, 267(5202), 1324.

- ✓ Salvattecí, R., Gutiérrez, D., Field, D., Sifeddine, A., Ortlieb, L., Bouloubassi, I., ... & Cetin, F. (2013). The response of the Peruvian Upwelling Ecosystem to centennial-scale global change during the last two millennia. *Climate of the Past Discussions*, 9, 5479-5519.

- ✓ Sánchez, A., and J. Carriquiry. (2007a). Acumulación de Corg, Norg, Porg y BSi en la Margen de Magdalena, B.C.S., México durante los últimos 26 ka. *Ciencias Marinas* 33: 23–35.

- ✓ Schulz, M., & Mudelsee, M. (2002). REDFIT: estimating red-noise spectra directly from unevenly spaced paleoclimatic time series. *Computers & Geosciences*, 28(3), 421-426.

- ✓ Shindell, D., Rind, D., Balachandran, N., Lean, J., & Lonergan, P. (1999). Solar cycle variability, ozone, and climate. *Science*, 284(5412), 305-308.

- ✓ Staines-Urías, F., Douglas, R. G., & Gorsline, D. S. (2009). Oceanographic variability in the southern Gulf of California over the past 400years: Evidence from faunal and isotopic records from planktic foraminifera. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 284(3), 337-354.

- ✓ Steffen, W., Grinevald, J., Crutzen, P., & McNeill, J. (2011). The Anthropocene: conceptual and historical perspectives. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369(1938), 842-867.

- ✓ Strickland, J.D.H., and T.R. Parson. 1972. A Practical Handbook of Seawater Analysis
Journal Fisheries Research Canada Bulletin 167: 263–266.

- ✓ ST UI, M. I. N. Z. E., & Reimer, J. (1993). Extended ¹⁴C data base and revised CALIB
3.014 C age calibration program. Radiocarbon, 35, 215-230.

- ✓ Sverdrup, H. U., Johnson, M. W., & Fleming, R. H. (1942). The Oceans: Their physics,
chemistry, and general biology (Vol. 7). New York: Prentice-Hall.

- ✓ Sydeman, W. J., García-Reyes, M., Schoeman, D. S., Rykaczewski, R. R., Thompson, S.
A., Black, B. A., & Bograd, S. J. (2014). Climate change and wind intensification in
coastal upwelling ecosystems. Science, 345(6192), 77-80.

- ✓ Talley, L. D. (1993). Distribution and formation of North Pacific intermediate
water. Journal of Physical Oceanography, 23(3), 517-537.

- ✓ Thomas, A. C., Carr, M. E., & Strub, P. T. (2001). Chlorophyll variability in eastern
boundary currents. Geophysical Research Letters, 28(18), 3421-3424.

- ✓ Thunell, R. C., & Kepple, A. B. (2004). Glacial-Holocene $\delta^{15}\text{N}$ record from the Gulf of
Tehuantepec, Mexico: Implications for denitrification in the eastern equatorial Pacific
and changes in atmospheric N_2O . Global Biogeochemical Cycles, 18(1).

- ✓ Trenberth, K. E., & Hurrell, J. W. (1994). Decadal atmosphere-ocean variations in the
Pacific. Climate Dynamics, 9(6), 303-319.

- ✓ Tsonis, A. A., Elsner, J. B., Hunt, A. G., & Jagger, T. H. (2005). Unfolding the relation
between global temperature and ENSO. Geophysical research letters, 32(9).

- ✓ van Geen, A., Zheng, Y., Bernhard, J. M., Cannariato, K. G., Carriquiry, J., Dean, W. E., ... & Pike, J. (2003). On the preservation of laminated sediments along the western margin of North America. *Paleoceanography*, 18(4).

- ✓ Vargas, G., Ortlieb, L., Pichon, J. J., Bertaux, J., & Pujos, M. (2004). Sedimentary facies and high resolution primary production inferences from laminated diatomaceous sediments off northern Chile (23 S). *Marine Geology*, 211(1), 79-99.

- ✓ Vargas, G., Pantoja, S., Rutllant, J. A., Lange, C. B., & Ortlieb, L. (2007). Enhancement of coastal upwelling and interdecadal ENSO-like variability in the Peru-Chile Current since late 19th century. *Geophysical Research Letters*, 34(13).

- ✓ Vecchi, G. A., Clement, A., & Soden, B. J. (2008). Examining the tropical Pacific's response to global warming. *Eos*, 89(9), 81-83.

- ✓ Verdon, D. C., & Franks, S. W. (2006). Long-term behaviour of ENSO: Interactions with the PDO over the past 400 years inferred from paleoclimate records. *Geophysical Research Letters*, 33(6).

- ✓ Verschuren, D., Laird, K. R., & Cumming, B. F. (2000). Rainfall and drought in equatorial east Africa during the past 1,100 years. *Nature*, 403(6768), 410-414.

- ✓ von Rad, U., Schaaf, M., Michels, K. H., Schulz, H., Berger, W. H., & Sirocko, F. (1999). A 5000-yr record of climate change in varved sediments from the oxygen minimum zone off Pakistan, Northeastern Arabian Sea. *Quaternary Research*, 51(1), 39-53.

- ✓ Wang, Y., Cheng, H., Edwards, R. L., He, Y., Kong, X., An, Z., ... & Li, X. (2005). The Holocene Asian monsoon: links to solar changes and North Atlantic climate. *Science*, 308(5723), 854-857.

- ✓ Wang, X., Auler, A. S., Edwards, R. L., Cheng, H., Ito, E., Wang, Y., ... & Solheid, M. (2007). Millennial-scale precipitation changes in southern Brazil over the past 90,000 years. *Geophysical Research Letters*, 34(23).
- ✓ Wang, D., Gouhier, T. C., Menge, B. A., & Ganguly, A. R. (2015). Intensification and spatial homogenization of coastal upwelling under climate change. *Nature*, 518(7539), 390-394.
- ✓ Weimerskirch, H., Louzao, M., De Grissac, S., & Delord, K. (2012). Changes in wind pattern alter albatross distribution and life-history traits. *Science*, 335(6065), 211-214.
- ✓ Zaytsev, O., Cervantes-Duarte, R., Montante, O., & Gallegos-Garcia, A. (2003). Coastal upwelling activity on the Pacific shelf of the Baja California Peninsula. *Journal of oceanography*, 59(4), 489-502.