

Variabilidad estacional de la clorofila *a* y su respuesta a condiciones El Niño y La Niña en el Norte del Golfo de California

Seasonal variability of chlorophyll *a* and their response to El Niño and La Niña conditions in the Northern Gulf of California

Esteban M. Pérez-Arvizu¹, E. Alberto Aragón-Noriega¹ y T. Leticia Espinosa-Carreón²

¹Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, km 2.35 Camino al Tular, Estero de Bacochibampo, C.P. 85454 Guaymas, Sonora, México. aaragon04@cibnor.mx

²Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Bulevar Juan de Dios Bátiz Paredes #250, Guasave, Sinaloa, México

Abstract.- In order to determinate the seasonal variability concentrations of chlorophyll-*a* (Clo-*a*) derived from satellite observations, and their responses to El Niño and La Niña conditions in the northern Gulf of California (NGC), we used monthly sea color composites from January 1997 to December 2011 from the OCTS and SeaWiFS sensor. The Clo-*a* seasonality indicate in winter-spring maxima and summer-autumn minimum, with a predominance of the annual signal. During El Niño 1997-1998 Clo-*a* showed low concentrations. During El Niño 2002-2003 the Clo-*a* show low influence. In La Niña 2007 Clo-*a* response was positive with high values. In 2011 where registered the highest Clo-*a* concentration of the entire study period, as result of La Niña phase. From 2003 to 2007 conditions were considered 'normal' in the system. The average pattern of time series suggests that NGC is eutrophic and the interannual variability of Chl-*a* is influenced by adjacent Pacific Ocean forcing, suggested by a significant inverse relationship of Chl-*a* and the Multivariate ENOA index (MEI; ENOA: El Niño Austral Oscillation). We propose that shifts from a strong El Niño (1997-1998) to La Niña conditions (1999), the phytoplankton biomass response was low because a great oceanography conditions changes (wind, stability, etc.), however with the shifts from El Niño weak (2009-2010) to La Niña (2011), these conditions represent less stress with a suitable phytoplankton response and the biomass increases.

Key words: Remote sensing, El Niño, La Niña, photosynthetic pigments

Resumen.- Con el propósito de examinar la variabilidad estacional de las concentraciones de clorofila *a* (Clo-*a*) de observaciones satelitales y su respuesta a diferentes condiciones El Niño y La Niña en el área norte del Golfo de California (NGC), se emplearon compuestos mensuales del color del océano de enero de 1997 a diciembre de 2011, obtenidas de los sensores OCTS y SeaWiFS. La estacionalidad de Clo-*a* presentó máximos durante invierno-primavera y mínimos en verano-otoño, con predominancia de la señal anual. Durante El Niño 1997-1998 la Clo-*a* fue baja, El Niño 2002-2003 presentó poca influencia, en condiciones La Niña 2007 se registraron altas concentraciones, en La Niña 2011 se registró el valor más alto de toda la serie. De 2003-2007 prevalecieron en el sistema condiciones 'normales'. El patrón promedio de la serie sugiere que el NGC es eutrófico y la variabilidad interanual de la Clo-*a* está influida por forzamientos del Océano Pacífico adyacente, sugeridos por la relación inversa y significativa entre la Clo-*a* y el Índice Multivariado ENOA (MEI; ENOA: El Niño Oscilación Austral). Se sugiere que del paso de un evento fuerte como El Niño (1997-1998) a La Niña (1999), la respuesta de la biomasa fitoplanctónica fue muy lenta debido al gran cambio de condiciones oceanográficas (vientos, estabilidad, etc.), sin embargo, cuando un evento El Niño débil (2009-2010) pasa a La Niña (2011), estas condiciones representan menos estrés y así el fitoplancton responde positivamente, aumentando su biomasa.

Palabras clave: Sensores remotos, El Niño, La Niña, pigmentos fotosintéticos

INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas marinos son complejos y presentan clasificaciones en su estructura de acuerdo a la presión que el medio físico ejerce en ellos, como la disponibilidad de luz, de acuerdo a la fuente metabólica que emplean los organismos (Mann & Lazier 1996). El fitoplancton

representa una entrada de energía a los sistemas marinos y es parte del ciclo biogeoquímico del carbono. Este constituye el alimento potencial para los siguientes eslabones de la trama trófica. Cuando se promueve la fertilización de las aguas superficiales, se presentan altas

biomasas fitoplanctónicas, que permiten identificar áreas o momentos de mayor fertilidad en el ambiente marino (Gaxiola-Castro *et al.* 2008).

La oceanografía biológica puede estudiarse mediante registros *in situ* y desde la década de los 80's el uso de percepción remota ha sido de gran ayuda para conocer las escalas de variación estacional, interanual e incluso decadal de la biomasa fitoplanctónica (Doney 2006). Con la aplicación de esta herramienta se pueden desarrollar reconstrucciones de series en diferentes escalas espaciales y temporales. Por lo que las estimaciones de clorofila-a (Clo-a) derivadas de sensores remotos son de gran importancia en el entendimiento de las fluctuaciones del océano, su respuesta y efecto en los ecosistemas. Las imágenes de Clo-a son consideradas como un estimador de los pigmentos fotosintéticos de aproximadamente 22% de la zona eufótica (Kirk 1994).

Existen numerosos factores que pueden limitar el crecimiento de la biomasa fitoplanctónica, como la disponibilidad de luz, temperatura del agua y nutrientes (principalmente nitratos, fósforo y sílice), estos últimos están normalmente a mayor profundidad, pero existen mecanismos que los ponen en mayor disponibilidad en la columna de agua, como los procesos de mezcla vertical, surgencias (Doney 2006) y remolinos ciclónicos (Espinosa-Carreón *et al.* 2012).

Kahru *et al.* (2004) mencionan que la estacionalidad es uno de los modos básicos de variabilidad en muchos ecosistemas marinos, los cuales pueden ser estudiados a partir de imágenes de satélite. Además, es factible conocer su respuesta a eventos como El Niño Oscilación Austral (ENOA), que es un fenómeno de acoplamiento océano-atmósfera que causa variabilidad climática global de escalas interanuales (Wolter & Timlin 2011). El fenómeno consta de 2 fases oceánicas principales: el calentamiento atípico de las aguas tropicales del Océano Pacífico, conocido como El Niño y por otro lado el enfriamiento atípico de las mismas aguas, conocido como La Niña.

En el Océano Pacífico Nororiental y en especial en el Sistema de la Corriente de California se han documentado la presencia de eventos El Niño y La Niña y sus efectos en la biomasa fitoplanctónica y pesquerías, entre otros (Chávez *et al.* 2002, Espinosa-Carreón *et al.* 2004, Kahru *et al.* 2007, Bjorkstedt *et al.* 2010). En el Golfo de California, Espinosa-Carreón & Valdez-Holguín (2007) documentaron también dicha respuesta considerando a todo el golfo como una unidad: por otra parte, Herrera-Cervantes *et al.* (2010) concluyeron que la variabilidad de los patrones

espaciales de Clo-a y temperatura superficial del mar con respecto al impacto del ENOA dentro del Golfo de California es aparentemente contradictoria. Por lo tanto, es necesario conocer si en el Norte del Golfo de California dicha variabilidad también se presenta o bien bajo cuales circunstancias el fitoplancton responde a la influencia de los eventos cálidos o fríos.

El Golfo de California ha sido dividido en varias zonas, de acuerdo a condiciones biológicas, físicas y oceanográficas (Santamaría-del-Ángel *et al.* 1994, Hidalgo-González & Álvarez-Borrego 2001, Kahru *et al.* 2004, Espinosa-Carreón & Valdez-Holguín 2007). Una de esas regiones es conocida como Norte del Golfo de California (NGC), donde existe un alto endemismo de vertebrados e invertebrados acuáticos (Thompson *et al.* 2000) y es importante para la región por sus pesquerías (Rodríguez-Quiroz *et al.* 2010). El objetivo de esta investigación fue conocer la variabilidad estacional de la biomasa fitoplanctónica y su respuesta a diferentes condiciones El Niño y La Niña en el NGC de enero de 1997 a diciembre de 2011.

MATERIALES Y MÉTODOS

El Norte del Golfo de California (Fig. 1) se delimita entre las coordenadas geográficas: 29°-32°N y 112°-115°W. Abarca la región de las Grandes Islas (Ángel de la Guardia, Tiburón y San Esteban) hasta el Delta del Río Colorado, enmarcado por los estados de Baja California y Sonora. El clima es continental, existen variaciones diurnas y estacionales, la influencia del agua dulce del Río Colorado es de aportes nulos o reducidos (García 2004, Pérez-Arvizu *et al.* 2009). La precipitación media es de 68 mm, la tasa de evaporación promedio estimada es de 0,9 m año⁻¹, la distribución de salinidad y temperatura están determinados por los flujos estacionales de calor y humedad, y con la presencia de fuertes mezclas por marea con alturas de hasta 10 m y componentes diurnas y semidiurnas, y mezclas convectivas en invierno (Lavín & Organista 1988). Es considerada la zona más somera del Golfo de California, con corriente de marea fuertes, circulación caracterizada por flujo hacia el sur en invierno y hacia el norte durante el verano, en la costa continental se presentan surgencias en el invierno con los vientos de noroeste y en la costa peninsular durante el verano (Álvarez-Borrego 1983). El NGC se caracteriza por tener altas salinidades superficiales y temperaturas que oscilan entre los 10° y 30°C de invierno a verano (Sverdrup 1941, Robinson 1973).

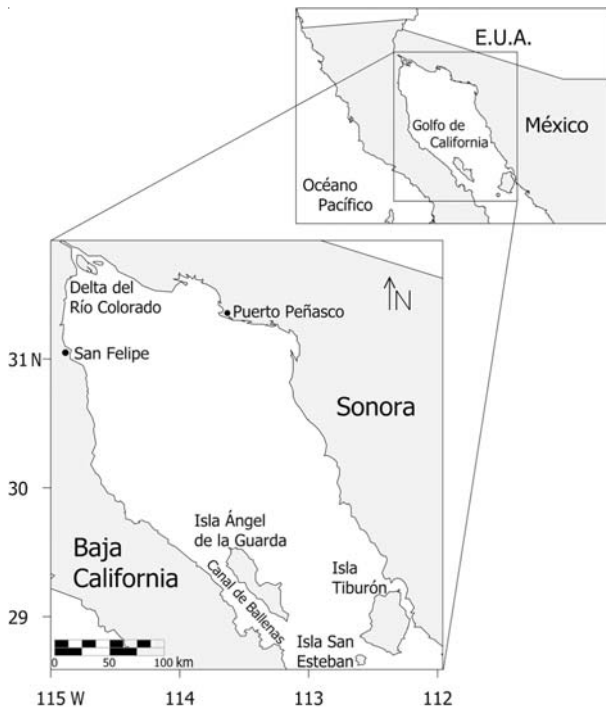


Figura 1. Ubicación área de estudio. Se delimita dentro del cuadrante la parte Norte del Golfo de California / Location of study area. Northern Gulf of California is remarked in the squared

Los compuestos mensuales globales de Clo-a de enero-agosto de 1997 se obtuvieron del sensor Ocean Color Temperature Scanner (OCTS) y de septiembre de 1997 a diciembre 2011 del sensor Sea-viewing Wide Field-of-view sensor (SeaWiFS¹). Estas imágenes mensuales son Nivel L3, las cuales han sido procesadas y corregidas con los algoritmos bio-ópticos y atmosféricos correspondientes (Barnes *et al.* 1994), con resolución de 9 km por pixel. De estos compuestos globales se extrajo un cuadrante que representa el área de estudio entre las coordenadas geográficas 29°-32°N y 112°-115°W. Por las condiciones ambientales presentes en el Golfo de California Santamaría-del-Ángel *et al.* (1994) reporta que es un lugar libre de nubes, lo cual permite tener imágenes libres de datos anómalos, por la limitación del sensor.

A partir de los 180 compuestos mensuales de la serie de tiempo de enero de 1997 a diciembre de 2007 de Clo-a del NGC, se obtuvo una imagen promedio y la climatología en las 4 épocas del año, la de invierno a partir del promedio de los compuestos de diciembre a febrero de todos los años, la de primavera de marzo a mayo, la de verano de junio a agosto y la de otoño septiembre a noviembre, respectivamente.

¹<<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>>

Para obtener el ciclo estacional de la serie de todos los compuestos mensuales se aplicó la siguiente ecuación:

$$F(x,t) = A_0(x) + A_1(x) \cos(\omega t - \phi_1) + A_2(x) \cos(2\omega t - \phi_2)$$

dónde: A_0 , A_1 , A_2 corresponden a la amplitud temporal media, la amplitud anual y la amplitud semianual para cada serie de tiempo; $\omega = 2\pi / 365,25$ es la frecuencia anual; ϕ_1 y ϕ_2 son las fases de los armónicos anual y semianual, respectivamente, t es el tiempo (año-día) y x es el número de datos de la serie de tiempo (Espinosa-Carreón *et al.* 2004).

Para realizar el cálculo de la anomalía estacional (señal anual más la señal semianual), se eliminó el valor medio de las series de tiempo de Clo-a, obteniéndose la curva representativa al ciclo estacional así como su porcentaje de explicación. Para magnificar la influencia de los procesos interanuales, en su fase cálida El Niño o en su fase fría La Niña, sobre la variabilidad de la Clo-a en el NGC, a la serie de tiempo se le sustrajo la señal estacional (Ec. 1), denominándose serie de tiempo no-estacional de Clo-a (es decir señal interanual). Todo el procesamiento anterior se realizó con ayuda del paquete computacional MatLab.

Con la finalidad de observar la respuesta del fitoplancton a la influencia de El Niño o La Niña se obtuvo el índice climático correspondiente al fenómeno Multivariate ENSO Index (MEI)². Se realizó una prueba estadística de correlación cruzada con la información del índice y la anomalía no-estacional, para obtener la co-variabilidad del MEI y los datos de clorofila en función del tiempo y determinar si existen diferencias significativas a través de una prueba T ($\alpha=0,05$) (Zar 1999). De acuerdo a los resultados obtenidos de la variabilidad interanual de la Clo-a (anomalía no-estacional) se escogieron situaciones contrastantes de la influencia de dos eventos El Niño y dos de La Niña en el NGC.

RESULTADOS

El patrón promedio de color del océano presenta, a excepción de unas bandas costeras de Baja California, en toda la región de estudio concentraciones de más de 1 mg m^{-3} , y se considera en este caso como un área eutrófica. Se aprecia un gradiente de concentración de Clo-a de la costa en dirección al centro del golfo, con áreas de concentraciones altas como el Delta del Río Colorado y las Grandes Islas representadas (Fig. 2).

²<<http://www.cdc.noaa.gov/Correlation/mei.data>>

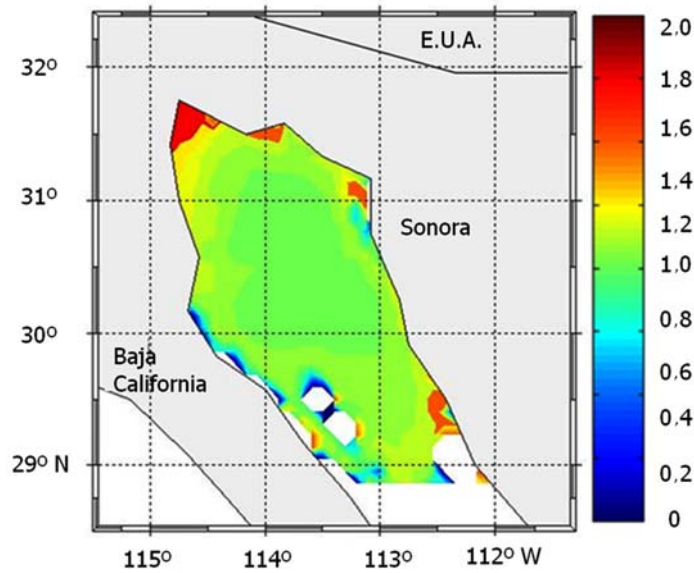


Figura 2. Concentración promedio de Clo-a (mg m^{-3}) del Norte del Golfo de California durante el periodo de estudio enero 1997 a diciembre de 2011 / Average concentration of Chl-a (mg m^{-3}) in the Northern Gulf of California during study period January 1997 to December 2007

Los valores máximos de concentración promedio mensual de Clo-a se estimaron en marzo ($2,5 \text{ mg m}^{-3}$) que corresponde a primavera, y los más bajos en julio-septiembre ($0,70 \text{ mg m}^{-3}$) que corresponde a fines de verano y principios de otoño (Fig. 3). En la figura 4 se muestran los mapas correspondientes para cada una de las estaciones climáticas donde se observa el patrón de distribución de Clo-a. Cabe señalar el gradiente hacia el área central del NGC.

El ciclo estacional de la biomasa fitoplanctónica explica el 46% de la varianza en el NGC (Fig. 5a); se aprecia una predominancia anual con máximos en febrero y marzo, y mínimos en junio julio. Durante 1997-1998 se observó una disminución en la concentración de Clo-a (Fig. 5a, puntos), ya que de acuerdo al ciclo estacional (línea continua) la anomalía positiva debería ser $\sim 1 \text{ mg m}^{-3}$, sin embargo, los registros indican valores con anomalías negativas.

La variabilidad de la Clo-a durante el periodo de estudio mostró años donde los valores estuvieron por encima de lo que establece el ciclo estacional, como en primavera de 1999. Este comportamiento se repitió el 2001 durante abril y marzo, donde se registraron anomalías positivas de $2,16$ y $1,15 \text{ mg m}^{-3}$ respectivamente. Durante 2002, en los mismos meses, las concentraciones fueron $2,05$ y $2,56 \text{ mg m}^{-3}$, respectivamente.

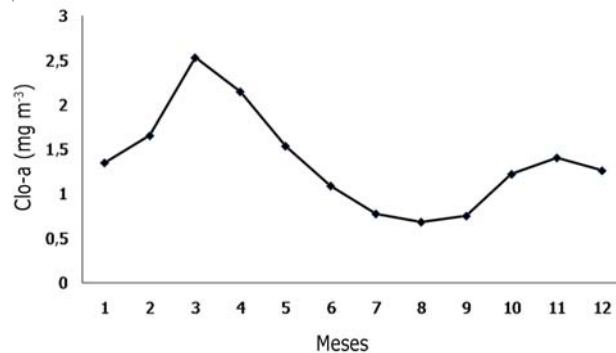


Figura 3. Concentración promedio de la Clo-a en la zona Norte del Golfo de California de enero 1997-diciembre 2011, datos estimados a partir de sensores remotos / Average concentration of Chl-a in the Northern Gulf of California from January 1997 to December 2011, data were calculated from remote sensing

En febrero de 2008 se observaron concentraciones de Clo-a de $2,0 \text{ mg m}^{-3}$. En 2009 se registraron anomalías positivas en enero ($2,0 \text{ mg m}^{-3}$) y febrero ($1,2 \text{ mg m}^{-3}$). Este patrón se repite también durante 2011 en invierno, cuando se registra la anomalía más alta del periodo estudiado con $3,08 \text{ mg m}^{-3}$ por encima de lo esperado. En años anteriores (2003-2007), el comportamiento de las anomalías son explicadas por el ciclo estacional.

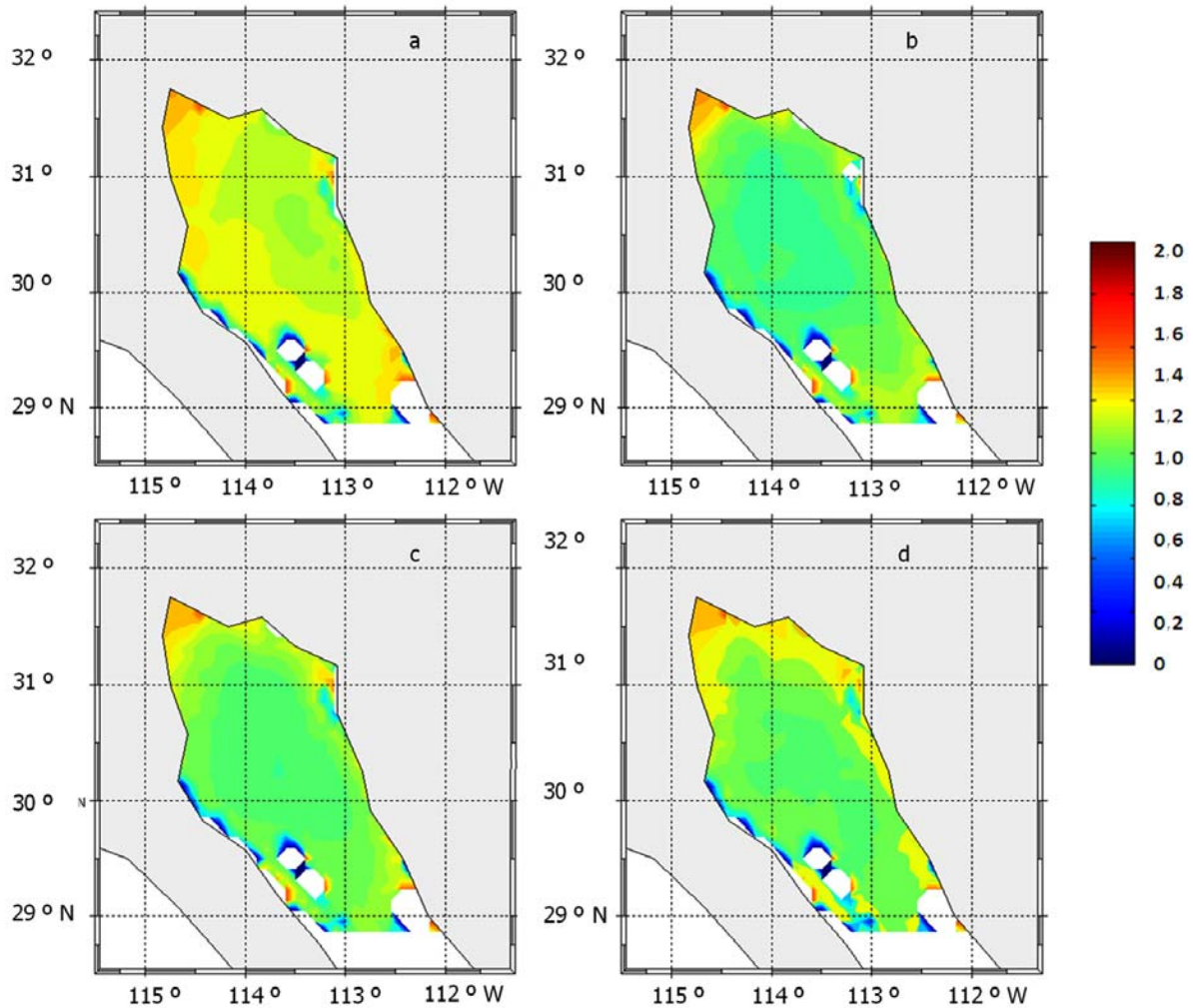


Figura 4. Estacionalidad de la Clo-a (mg m^{-3}) a) primavera (días 60-121, 1997-2011). b) verano (122-213, 1997-2011). c) otoño (214-334, 1997-2011). d) invierno (335-059, 1997-2011). Sensor SeaWiFS en días julianos / Seasonality of Chl-a (mg m^{-3}) a) Spring (days 60-121, 1997-2011). b) Summer (122-213, 1997-2011). c) Autumn (214-334, 1997-2011). d) Winter (335-059, 1997-2011). SeaWiFS Sensor in Julian days

En la variabilidad interanual de la Clo-a (Fig. 5b) se apreció que durante El Niño de 1997-1998 las concentraciones de pigmentos disminuyeron, pero no en todo el evento: la anomalía negativa se apreció durante enero-marzo de 1997 y 1998, con valores aproximadamente $-1,0 \text{ mg m}^{-3}$. El cambio a condiciones frías, La Niña, que de acuerdo con el MEI (Fig. 5c) comenzó a partir de agosto de 1998, no generó un cambio abrupto en las concentraciones de pigmentos, reflejándose anomalías positivas hasta abril-junio de 1999, lo cual es inusual para

el NGC debido a que las mayores concentraciones se registran normalmente en enero-marzo de cada año. En 2001 y 2002 las anomalías positivas en marzo ($1,5 \text{ mg m}^{-3}$), y abril ($2,0 \text{ mg m}^{-3}$), correspondieron a un cambio de condiciones ambientales, que coinciden con el cambio de anomalías negativas a positivas del MEI. En 2007 se presentó nuevamente el inicio de condiciones frías pero el sistema se comportó como en la década anterior, no hubo un reflejo inmediato en el incremento de la Clo-a, sino hasta 2008 y 2009 cuando los pulsos con anomalías

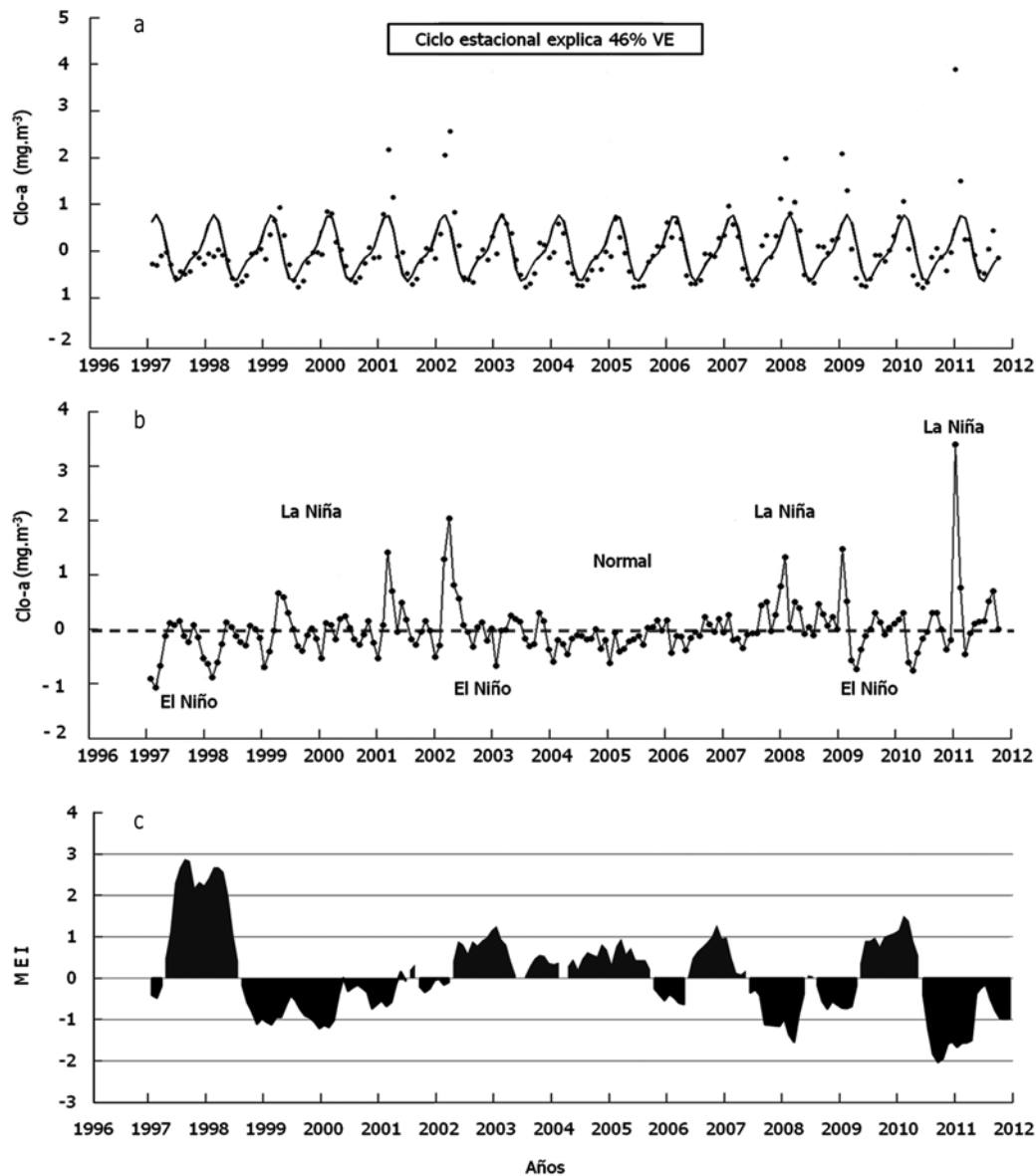


Figura 5. a) Anomalías de datos promedios de Clo-a de enero 1997 a diciembre de 2011 (asteriscos más línea punteada), ciclo estacional (línea continua), b) anomalías de datos promedio de clorofila con el ciclo estacional removido, c) índice climático Multivariate ENOA Index (MEI) de enero 1997 a diciembre 2011 / a) Anomaly of Chl-a average data January 1997 to December 2011 (dashed line and asterisk) seasonally cycle (solid line), b) Anomaly of chlorophyll average data without seasonally cycle, c) Climatic index Multivariate ENOA Index (MEI) from January 1997 to December 2011

positivas se registran por encima de $1,3 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. Durante el 2009, se presentaron de nuevo cambios a condiciones cálidas, lo cual se refleja en la disminución de la Clo-a durante El Niño 2009-2010, que mostró el mismo comportamiento en la Clo-a que en El Niño 1997-1998, es decir, la disminución de la Clo-a no se presentó durante todo el tiempo del evento, sino que las anomalías negativas se manifiestan al inicio del cambio de

condiciones frías a cálidas y unos meses antes del cambio de cálidas a frías. A mediados de 2010 dio inicio el evento de La Niña más intenso de todo el periodo de estudio (Fig. 5c), así como también el registro de las anomalías positivas más altas, $3,5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Al realizar la correlación entre el MEI y la variabilidad interanual de la Clo-a se obtuvo un coeficiente inverso y significativo de $r = -0,21$ ($\alpha = 0,05$; $n = 180$), lo que sugiere

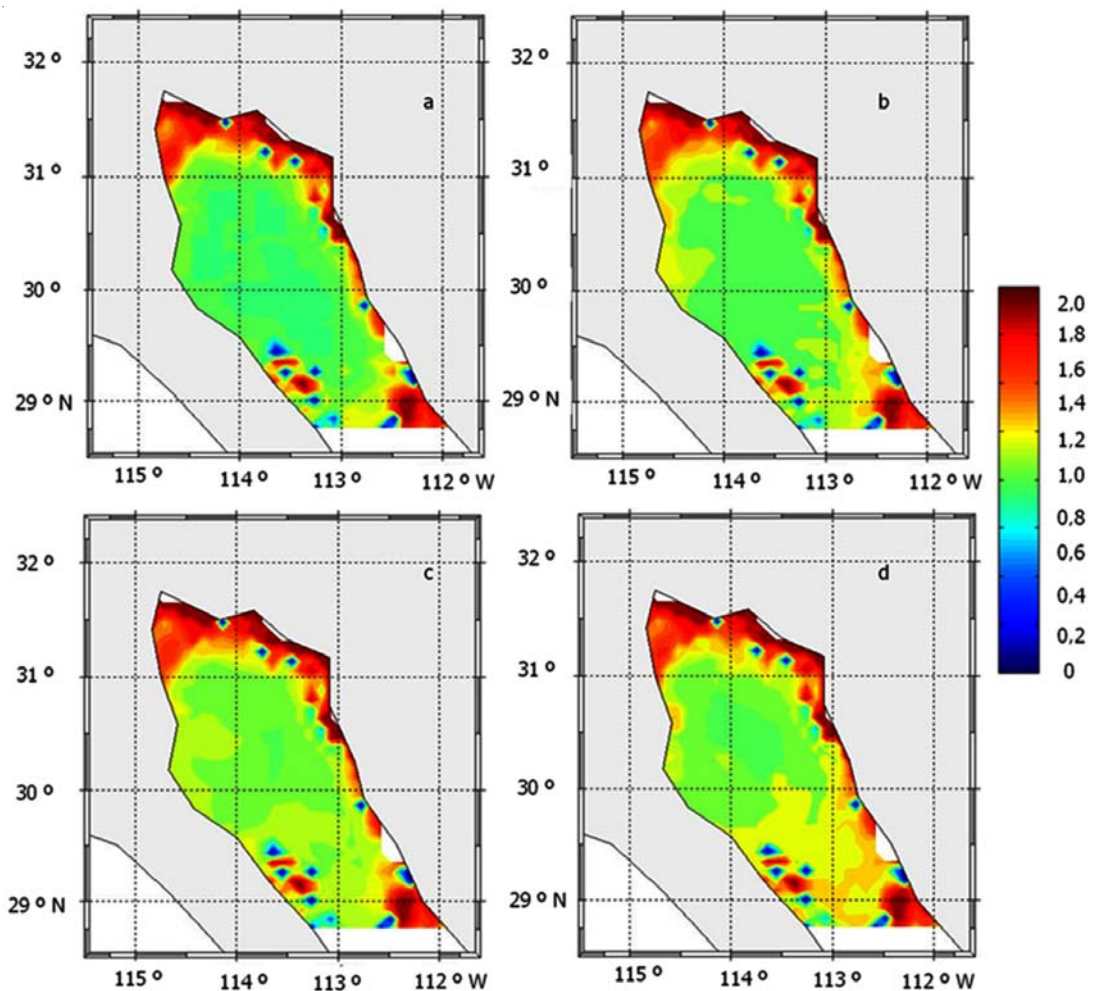


Figura 6. Distribución espacial de la clorofila-a (mg m^{-3}) en condiciones El Niño: a) marzo-abril de 1998, b) marzo-abril de 2002; en condiciones La Niña: c) marzo-abril 1999, d) marzo-abril 2011 / Spatial distribution pattern of chlorophyll-a (mg m^{-3}) during the El Niño conditions: a) March-April 1998, b) March-April 2002; during La Niña: c) March-April 1999, d) March-April 2011

la influencia de los eventos El Niño y La Niña sobre la biomasa fitoplanctónica en el NGC.

Se observa El Niño 1997-1998 y 2002 (Fig. 6a y 6b) y La Niña 1999-2001 y 2011 (Fig. 6c y 6d), en los 4 eventos se presentaron en la zona costera de Sonora y de las Grandes Islas altas concentraciones de Clo-a de $1,8 \text{ mg m}^{-3}$ con un gradiente hacia la porción central con concentraciones por debajo de $1,0 \text{ mg m}^{-3}$. Es importante resaltar que el cambio de condiciones se refleja principalmente en la zona central del área de estudio, y de manera general en La Niña 2011, el área de concentración de Clo-a ($> 1,2 \text{ mg m}^{-3}$) cubre una extensión mayor, así como El Niño 2002 fue de menor impacto en el NGC.

DISCUSIÓN

El patrón espacial promedio de la Clo-a está influido por procesos físico-químicos, como el movimiento de las masas de agua, disponibilidad de nutrientes, cantidad y calidad de radiación solar que llega a la columna de agua y la temperatura (Platt & Sathyendranath 1999), y por agentes biológicos, como reproducción diferencial, pastoreo y la historia taxonómica de la comunidad fitoplanctónica (Yentsch 1981).

Por otra parte, la región de las Grandes Islas, posee condiciones locales únicas (Sverdrup 1941), con las menores temperaturas superficiales (Robinson 1973), las mayores concentraciones de nutrientes y CO_2 (Álvarez-

Borrego *et al.* 1978, Hidalgo-González *et al.* 1997) de todo el Golfo de California, y se encuentran de manera persistente en esa región; las corrientes de marea son muy intensas, con altas tasas de disipación de la energía de las mareas ($> 0,3 \text{ W m}^{-2}$; Argote *et al.* 1995) y la intensa mezcla crea una situación parecida a una surgencia constante. La mezcla generada por las mareas entre las islas San Lorenzo y San Esteban agita vigorosamente la columna de agua hasta más de 500 m de profundidad que transportan aguas más frías y ricas en nutrientes hacia la superficie (Simpson *et al.* 1994).

La estacionalidad del NGC (Fig. 4) está determinada por los vientos, el calentamiento intenso y surgencias costeras, lo que genera cambios marcados en temperatura, salinidad, el patrón de corrientes y el nivel del mar (Álvarez-Borrego 2010). Los vientos generan surgencias en la costa oriental en invierno y primavera (Roden & Groves 1959, Badán-Dagón *et al.* 1985), la circulación en forma de remolinos transporta el agua de surgencias (Martínez-Díaz de León 2001), con lo que se forman frentes, plumas y chorros que promueven mayor disponibilidad de nutrientes en la columna de agua y por lo tanto un incremento en la biomasa fitoplanctónica (Zeitzschel 1969), donde se han registrado concentraciones de hasta 10 mg m^{-3} en el NGC (Santamaría-del-Ángel *et al.* 1994). También durante el verano ocurren surgencias en la costa occidental, pero son de menor intensidad y se extienden en una región menor (Robinson 1973).

Las condiciones anteriores explican una mayor cobertura de altas concentraciones de clorofila-a durante invierno y primavera. Las bajas concentraciones de verano son consecuencia de la estratificación, lo cual se refleja en surgencias más débiles, en comparación con las registradas en primavera-invierno, y aparentemente de aguas menos profundas (Santamaría-del-Ángel *et al.* 1999), lo cual coincide con los resultados de este estudio, donde se muestra que en la distribución promedio de verano y otoño se presentaron bajas concentraciones de clorofila-a (Fig. 4b y 4c).

El efecto de los eventos interanuales como El Niño 1997-1998 sobre la biomasa fitoplanctónica para todo el golfo fue reportado por Espinosa-Carreón & Valdez-Holguín (2007), quienes indican que la disminución en la concentración de Clo-a en esos años se debe principalmente a los efectos de El Niño, que propician un escenario con bajas concentraciones de nutrientes, bajos niveles de oxígeno disuelto, baja salinidad, altas temperaturas y por lo tanto aguas de baja productividad

primaria, procesos que también afectaron a la biomasa fitoplanctónica en el NGC.

Hidalgo-González & Álvarez-Borrego (2004) y Kahru *et al.* (2004) reportaron la productividad primaria e influencia de El Niño 1997-1998 en el Golfo de California. Los cambios fueron menos evidentes en la parte Norte, sin embargo, en esta investigación, la influencia del El Niño no fue registrada durante todo el evento, sino únicamente en marzo y abril de 1997 y 1998. Esto sugiere, de acuerdo a la respuesta del ciclo estacional, que durante el invierno se darían condiciones de viento, luz, temperatura, nutrientes y estabilidad en la columna de agua apropiadas para el incremento de la biomasa fitoplanctónica, pero debido a la influencia del El Niño las condiciones cambiaron e inhibieron el crecimiento de la comunidad fitoplanctónica. Es importante considerar que durante primavera-verano de 1997 la variabilidad interanual de Clo-a fue cercana a cero (Fig. 5b), es decir, que se ajusta al ciclo estacional, y que durante estas épocas climáticas prevalecen condiciones de anomalías negativas de Clo-a (Fig. 5a) (sin considerar la parte norte del área de estudio, que obedece a condiciones locales, Fig. 4b y 4c), lo que sugiere que la especies fitoplanctónicas dominantes en primavera y verano estarían aclimatadas a temperaturas cálidas y bajas concentraciones de nutrientes en la columna de agua, por lo que el efecto de El Niño en estas épocas climáticas en el NGC ya no representa un forzamiento más a la disminución de la población fitoplanctónica.

Aun no se ha determinado con exactitud los mecanismos por los cuales la Clo-a del NGC disminuye durante los eventos El Niño. En el Golfo de California obedece principalmente a la intrusión de Agua Superficial Tropical, la disminución de la mezcla vertical por el incremento de la estratificación térmica (Kahru *et al.* 2004) y a la dominancia de nanofitoplancton con bajo contenido de clorofila (Valdez-Holguín & Lara-Lara 1987). Además, el forzamiento que ejerce el Océano Pacífico en el golfo es notable cuando hay intrusión de Agua Subtropical (Castro *et al.* 2000), la cual tiene características diferentes al Agua del Golfo de California, en temperatura, salinidad y nivel medio del mar.

Posterior al evento El Niño 1997-1998, el MEI indicó un cambio de condiciones por lo que prevaleció el evento frío La Niña. Durante estas condiciones se presentaron baja temperatura, bajo nivel del mar y alta disponibilidad de nutrientes en la zona eufótica (Chávez *et al.* 2002), por lo tanto, la biomasa fitoplanctónica debería haberse incrementado, pero no fue así ya que las concentraciones

estuvieron dentro del promedio, es decir, no hubo respuesta del fitoplancton al evento La Niña 1999, lo que sugiere que la baja biomasa fitoplanctónica fue producto de la dinámica de procesos locales, como la mezcla vertical, asociada a fuertes vientos, que generan un efecto en el fitoplancton a lo largo de la columna de agua (ascendente-descendente, Gaxiola-Castro *et al.* 2002). Espinosa-Carreón & Valdez-Holguín (2007) sugirieron que no hubo incremento en la Clo-a en el Golfo de California durante La Niña 1999 debido a la elevada turbulencia producida por el viento, que no permitió al fitoplancton desarrollarse adecuadamente.

En 2001 y 2002 se observaron pulsos importantes en la señal de Clo-a, por encima de lo esperado para el sistema, las anomalías fueron positivas y coincidentes con las negativas en el MEI. ¿Porqué fue hasta estos años que se reflejan anomalías positivas de Clo-a y sólo en los meses de enero-marzo? Se sugiere que la respuesta podría estar basada en la sucesión y adaptación fitoplanctónica durante las diferentes estaciones climáticas. Sin embargo, esta suposición debe comprobarse.

Hayward *et al.* (1999) indicaron que la transición de El Niño-La Niña fue registrada para la Corriente de California y que el evento La Niña prevaleció durante 33 meses, por lo que se sugiere que las mismas condiciones se presentaron en el NGC a partir de los resultados anteriormente descritos en los años de 1999, 2000, 2001 y principios del 2002 para el NGC.

A finales del 2002 y 2003 el MEI indica el retorno a condiciones El Niño. El cambio a esta fase cálida no presentó el mismo efecto que el evento 1997-1998, ya que la variabilidad estuvo alrededor de cero (Fig. 5b). Durazo *et al.* (2005) reportaron la presencia en estos años de un evento El Niño débil, que minimizó sus efectos en California debido a una mayor intrusión de Agua del Subártico. Por lo anterior, durante 2002 y 2003 el efecto de El Niño en el NGC también se vio minimizado.

De acuerdo con Georicke *et al.* (2005, 2007) y Peterson *et al.* (2006) de 2004 a 2007 las condiciones que prevalecieron en el Sistema de la Corriente de California fueron algunas frías y otras con influencia de procesos locales. El MEI indicó la prevalencia de condiciones cálidas (la mayoría con anomalías menores a la unidad) desde 2003 a 2007. En esos mismos años, en el NGC la variabilidad de la Clo-a fue mínima, ajustándose prácticamente al ciclo estacional, es decir, que el efecto de los procesos interanuales fue mínimo por lo que para el área de estudio a ese periodo se le nombra como 'normal' (Fig. 5b).

De 2007 a 2009 prevalecieron condiciones La Niña (McClatchie *et al.* 2009), registrándose altas concentraciones de Clo-a en el sistema, debido a que en este evento se registró baja temperatura, bajo nivel del mar, una mayor disponibilidad de nutrientes en la columna de agua y por lo tanto un incremento en la biomasa fitoplanctónica (Chávez *et al.* 2002). En el NGC en 2008 y 2009 se registraron pulsos de Clo-a superiores a $1,3 \text{ mg m}^{-3}$. Hacia finales 2009 se registró un cambio a condiciones cálidas que dieron paso a El Niño 2010, que fue amortiguado por el evento La Niña 2011 (Bjorkstedt *et al.* 2011), registrándose en el área de estudio anomalías extraordinarias de $3,5 \text{ mg m}^{-3}$.

Herrera-Cervantes *et al.* (2010) reportaron que en el Golfo de California se presenta una contradicción en la respuesta de la biomasa fitoplanctónica y la influencia de los eventos El Niño y La Niña. En este estudio, en el NGC se registró la respuesta de la clorofila-a a los eventos El Niño y La Niña, considerándose eventos fuertes como en 1997-1998 con anomalías negativas de Clo-a considerables, y débiles como en 2002 proceso que fue minimizado por la influencia del Agua Subártica, por lo que no se apreció una clara respuesta en la Clo-a. Por lo anterior, y de acuerdo a los resultados de este estudio, no es que haya una contradicción entre la respuesta del fitoplancton y los eventos interanuales, y se sugiere que del paso de un evento fuerte como El Niño (1997-1998) a La Niña (1999), la respuesta de la biomasa fitoplanctónica fue muy lenta debido al gran cambio de condiciones oceanográficas (vientos, turbulencia, etc.). Sin embargo, cuando el paso se origina de un evento El Niño débil (2009-2010) a La Niña (2011), el sistema promueve un incremento en la biomasa fitoplanctónica debido probablemente a que las condiciones ambientales de un evento a otro representan un menor estrés y permiten que el fitoplancton responda adecuadamente, aunque también es importante considerar la sucesión de especies que prevalecen de una época a otra. Por lo tanto, es importante continuar con estos estudios enfocándose a comprobar lo anterior, y conocer el efecto de los forzamientos locales y remotos en el sistema.

AGRADECIMIENTOS

EMPA agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT por la beca de posgrado (61423). EAAN recibió financiamiento de CONACYT (CB-2012-1, Proyecto 178727). TLEC recibió financiamiento del Proyecto SIP20060413, SIP20131828 y becas EDI y COFAA. E. Alcántara-Razo del Laboratorio de Ecología aplicada y pesquerías del CIBNOR colaboró en la edición de las figuras.

LITERATURA CITADA

- Álvarez-Borrego S.** 1983. Gulf of California. Estuarine and Enclosed Seas, pp. 427-449. Elsevier Science Publication, Amsterdam.
- Álvarez-Borrego S.** 2010. Physical, chemical, and biological oceanography of the Gulf of California. En: Brusca GC (ed). The Gulf of California: Biodiversity and conservation, pp. 24-48. The University of Arizona Press, Tucson.
- Álvarez-Borrego S, JA Rivera, G Gaxiola-Castro, MJ Acosta-Ruíz & RA Schwartzlose.** 1978. Nutrientes en el Golfo de California. *Ciencias Marinas* 6: 13-22.
- Argote ML, A Amador, MF Lavin & JR Hunter.** 1995. Tidal dissipation and stratification in the Gulf of California. *Journal of Geophysical Research* 100: 16103-16118.
- Badán-Dangón A, DJ Koblinsky & T Baumgartner.** 1985. Spring and summer in the Gulf of California: observations of surface thermal patterns. *Oceanologica Acta* 8: 13-22.
- Barnes RA, AW Holmes, WL Barnes, WE Esaias, CR McClain & T Svitek.** 1994. SeaWiFS prelaunch radiometric calibration and spectral characterization. *SeaWiFS Technical Report Series* 23: 1-55.
- Bjorkstedt EP, R Goericke, S McClatchie, E Weber, W Watson, N Lo, B Peterson, B Emmett, J Peterson, R Durazo, G Gaxiola-Castro, F Chavez, JT Pennington, CA Collins, J Field, S Ralston, K Sakuma, SJ Bograd, FB Schwing, Y Xue, W Sydeman, SA Thompson, JA Santora, J Largier, C Halle, S Morgan, SY Kim, K Merkers, J Hildebrand & L Munger.** 2010. State of the California Current 2009-2010: Regional variation persists through transition from La Niña to El Niño (and back?). *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports* 51: 39-69.
- Bjorkstedt EP, R Goericke, S McClatchie, E Weber, W Watson, N Lo, B Peterson, B Emmett, R Brodeur, J Peterson, J Gómez-Valdés, G Gaxiola-Castro, B Lavaniegos, F Chavez, CA Collins, J Field, K Sakuma, SJ Bograd, FB Schwing, P Warzybork, R Bradley, J Jahncke, GS Campbell, JA Hildebrand, WJ Sydman, SA Thompson, J Largier, C Halle, SY Kim & J Abell.** 2011. State of the California Current 2010-2011: Regionally variable responses to a strong (but fleeting?) La Niña. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports* 52: 36-68.
- Castro R, A Mascarenhas, R Durazo & C Collins.** 2000. Variación estacional de la temperatura y la salinidad en la entrada del Golfo de California, México. *Ciencias Marinas* 26(4): 561-583.
- Chávez FP, JT Pennington, CG Castro, JP Ryan, RP Michisaki, B Schlining, P Walz, KR Buck, A McPhaden & CA Collins.** 2002. Biological and chemical consequences of the 1997-1998 El Niño in central California waters. *Progress in Oceanography* 54: 205-232.
- Doney SC.** 2006. Plankton in warmer world. *Nature* 444: 659-696.
- Durazo R, G Gaxiola-Castro, B Lavaniegos & R Castro-Valdez.** 2005. Condiciones oceanológicas frente a la costa occidental de Baja California, 2002-2003: Influencia de un El Niño débil y del incremento de agua subártica. *Ciencias Marinas* 31(3): 537-552.
- Espinosa-Carreón L & E Valdez-Holguín.** 2007. Variabilidad interanual de la clorofila en Golfo de California. *Ecología Aplicada* 6(1-2): 83-92.
- Espinosa-Carreón TL, PT Strub, E Beier, F Ocampo-Torres & G Gaxiola-Castro.** 2004. Seasonal and interannual variability of satellite-derived chlorophyll pigment, surface height, and temperature off Baja California. *Journal of Geophysical Research* 109: C03039. <doi:10.1029/2003JC002105>
- Espinosa-Carreón TL, G Gaxiola-Castro, E Beier, PT Strub & A Kurczyn.** 2012. Effects of mesoscale processes on phytoplankton chlorophyll off Baja California. *Journal of Geophysical Research* 117: C04005 <doi:10.1029/2011JC007604>
- García E.** 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen, 90 pp. Instituto de Geografía UNAM, México.
- Gaxiola-Castro G, S Alvarez-Borrego, S Nájera-Martínez & AR Zirino.** 2002. Internal waves effect on the Gulf of California phytoplankton. *Ciencias Marinas* 28(3): 297-309.
- Gaxiola-Castro G, R Durazo, B Lavaniegos, ME De la Cruz-Orozco, E Millán-Núñez, L Soto-Mardones & J Cepeda-Morales.** 2008. Pelagic ecosystem response to interannual variability off Baja California. *Ciencias Marinas* 34: 263-270.
- Goericke R, SD Bogard, G Gaxiola-Castro, J Gómez-Valdés, R Hooff, A Huyer, KD Hyrenbach, BE Lavaniegos, A Mantyla, WT Peterson, F Chavez, FB Schwing, RL Smith, WJ Sideman, E Vendrick, R Durazo & PA Wheeler.** 2005. The state of the California Current, 2004-2005: still cool? *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports* 46: 32-71.
- Goericke R, E Vendrick, T Koslow, JR Lara-Lara, G Gaxiola-Castro, J Gómez-Valdés, MJ Weise, WJ Sideman, JT Harvey, FB Schwing, SD Bogard, KD Hyrenbach, WT Peterson, RT Emmett, RW Bradley & NCH Lo.** 2007. The state of the California Current, 2006-2007: regional and local processes dominate. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports* 48: 33-66.
- Hayward TL, TR Baumgartner, DM Checkley, R Durazo, G Gaxiola-Castro, KD Hyrenbach, AW Mantyla, MM Mullin, T Murphree, FB Schwing, PE Smith & M Tegner.** 1999. The State of the California Current, 1998-1999: transition to cool-water conditions. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports* 40: 29-62.
- Herrera-Cervantes H, SE Lluch-Cota, DB Lluch-Cota, G Gutiérrez de Velasco-Sanromán & D Lluch-Belda.** 2010. ENSO influence on satellite-derived chlorophyll trends in the Gulf of California. *Atmósfera* 23(3): 253-262.
- Hidalgo-González RM & S Alvarez Borrego.** 2001. Chlorophyll profiles and the water column structure in the Gulf of California. *Oceanologica Acta* 24: 19-28.

- Hidalgo-González RM & S Alvarez-Borrego. 2004.** Total and new production in the Gulf of California estimated from ocean color data from the satellite sensor SeaWiFS. *Deep-Sea Research II* 51: 739-752.
- Hidalgo-González RM, S Alvarez-Borrego & A Zirino. 1997.** Mixing in the region of the Midriff Islands of the Gulf of California: Effect on surface pCO₂. *Ciencias Marinas* 23: 317-327.
- Kahru M, SG Marinone, SE Lluch-Cota, A Parés-Sierra & G Mitchell. 2004.** Ocean color variability in the Gulf of California: scales from the El Niño-La Niña cycle to tides. *Deep Sea Research II* 51: 139-146.
- Kahru M, R Kudela, M Manzano-Sarabia & G Mitchell. 2007.** Trends in primary production in the California Current detected with satellite data. *Journal of Geophysical Research* 114: C02004.<doi:10.1029/2008JC004979>
- Kirk JTO. 1994.** Light and photosynthesis in aquatic ecosystems, 525 pp. Cambridge University Press, Science, New York.
- Lavín MF & S Organista. 1988.** Surface heat flux in the Northern Gulf of California. *Journal of Geophysical Research* 93: 14033-14038.
- Mann KH & JR Lazier. 1996.** Dynamics of marine ecosystems. Biological-physical interactions in the oceans, 466 pp. Blackwell, Oxford.
- Martínez-Díaz de León A. 2001.** Upper-ocean circulation patterns in the Northern Gulf Of California, expressed in Ers-2 synthetic aperture radar imagery. *Ciencias Marinas* 27(2): 209-221.
- McClatchie S, R Goericke, FB Schwing, SJ Bograd, W Peterson, R Emmett, R Charter, W Watson, N Lo, K Hill, C Collins, M Kahru, BG Mitchell, JA Koslow, J Gomez-Valdes, BE Lavaniegos, G Gaxiola-Castro, J Gottschalk, ML'Heureux, Y Xue, M Manzano-Sarabia, E Bjorkstedt, S Ralston, J Field, L Rogers-Bennett, L Munger, G Campbell, K Merckens, D Camacho, A Havron, A Douglas & J Hildebrand. 2009.** The state of the California Current, 2008-2009: Cold conditions drive regional difference. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports* 50: 43-68.
- Pérez-Arvizu EM, EA Aragon-Noriega & TL Espinosa-Carreón. 2009.** Response of the shrimp population in the upper gulf of California to fluctuations in discharges of the Colorado River. *Crustaceana* 82(5): 615-625.
- Peterson WT, R Emmet, R Goericke, E Venrick, AW Mantyla, SJ Bograd, FB Schwing, R Hewitt, NCH Lo, WH Watson, J Barlow, M Lowry, S Ralston, KA Forney, BE Lavaniegos-Espejo, WJ Sydeman, KD Hyrenbach, RW Bradley, FP Chávez, P Warzybok, K Hunter, S Benson, M Weise, J Harvey, G Gaxiola-Castro & R Durazo-Arvizu. 2006.** The state of the California current, 2005-2006: Warm in the north, cold in the south. *California Cooperative Oceanic Fisheries Investigations Reports* 47: 30-74.
- Platt T & S Sathyendranath. 1999.** Spatial structure of pelagic ecosystem processes in the global ocean. *Ecosystems* 2: 384-394.
- Robinson MK. 1973.** Atlas of monthly mean sea subsurface in the Gulf of California, México. San Diego Society of Natural History, *Memoir* 5: 1-97.
- Roden GI & GW Groves. 1959.** Recent oceanographic investigations in the Gulf of California. *Journal of Marine Research* 18: 10-35.
- Rodríguez-Quiroz G, EA Aragón-Noriega, W Valenzuela-Quiñónez & HM Esparza-Leal. 2010.** Artisanal fisheries in the conservation zones of the Upper Gulf of California. *Revista de Biología Marina y Oceanografía* 45(1): 89-98.
- Santamaría-del-Ángel E, S Álvarez Borrego & FE Muller-Karger. 1994.** Gulf of California biogeographic regions based on coastal zone color scanner imagery. *Journal of Geophysical Research* 99: 7411-7421.
- Santamaría-del-Ángel EM, S Álvarez-Borrego, R Millán-Núñez & FE Muller-Karger. 1999.** Sobre el efecto débil de las surgencias de verano en la biomasa fitoplanctónica del Golfo de California. *Revista de La Sociedad Mexicana de Historia Natural* 49: 207-212.
- Simpson JH, AJ Souza & MF Lavín. 1994.** Tidal mixing in the Gulf of California. In: Beven KJ, PC Chatwin & JH Millbank (eds). *Mixing and transport in the environment*, pp. 169-182 pp. John Wiley & Sons, London.
- Sverdrup HU. 1941.** The Gulf of California: Preliminary discussion on the cruise of the E. W. Scripps in February and March 1939. *Proceedings of the Sixth Pacific Science Congress, held at Berkeley, Stanford, and San Francisco, July 24 to August 12, 1939, Vol. 3: 161-166.*
- Thompson D, T Findley & A Kerstitch. 2000.** Reef fishes of the Sea of the Cortez. The rocky-shore fishes of Gulf of California, 374 pp. University of Texas Press, Austin.
- Valdez-Holguín JE & R Lara-Lara. 1987.** Primary productivity of the Gulf of California of El Niño 1982-1983 event. *Ciencias Marinas* 13: 34-50.
- Wolter K & MS Timlin. 2011.** El Niño/Southern Oscillation behaviour since 1871 as diagnosed in an extended multivariate ENSO index (MEI.ext). *International Journal of Climatology* 31: 1074-1087.
- Yentsch CS. 1981.** Phytoplankton growth in the sea, a coalescence of discipline. In: Falkowski PG (ed). *Primary productivity in the Sea*, pp. 17-32. Plenum Press, New York.
- Zar J. 1999.** *Biostatistical analysis*, 663 pp. Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- Zeitzchel, B. 1969.** Primary productivity in the Gulf of California. *Marine Biology* 3: 201-207.

Recibido el 17 de junio de 2012 y aceptado el 4 de marzo de 2013

Editor: Claudia Bustos