

VARIABILIDAD DE LA PRODUCTIVIDAD PRIMARIA Y DE PIGMENTOS FOTOSINTÉTICOS EN UNA ZONA DE SURGENCIAS DE LA REGIÓN SUR DE LA CORRIENTE DE CALIFORNIA

Murillo Murillo, I.¹, R. Cervantes Duarte², G. Gaxiola Castro³, S. López López², F. Aguirre Bahena², E. González Rodríguez⁴, Á. Jiménez Illescas² & F. E. Hernández Sandoval¹

¹Unidad de Laboratorios de Servicios y Apoyo. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste SC. Mar Bermejo # 195, Col. Playa Palo de Santa Rita, C.P. 23090. La Paz, BCS., México. ²Departamento de Oceanología. Centro de Interdisciplinario en Ciencias Marinas-IPN. Avenida Instituto Politécnico Nacional s/n, Col. Playa Palo de Santa Rita, C.P. 23096. La Paz, BCS., México. ³Departamento de Oceanografía Biológica. Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada. Carretera Ensenada-Tijuana No. 3918, Zona Playitas, C.P. 22860. Ensenada, BC., México. ⁴Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada. Unidad La Paz. Miraflores No. 334, Col. Bellavista. C.P. 23050. La Paz, BCS., México. email: imurillo04@cibnor.mx.

RESUMEN. Se analizaron procesos y condiciones físicas y químicas de la columna de agua frente a Bahía Magdalena, BCS durante un ciclo anual (2008-2009), con el objetivo de determinar su influencia sobre la variabilidad estacional en la productividad primaria (método de ¹⁴C) y de algunos grupos del fitoplancton que se caracterizaron por perfil de pigmentos fotosintéticos. Se analizó información de viento local, Índice de Surgencia Costera, CTD (temperatura y salinidad) y nutrientes inorgánicos disueltos (NO₂⁻+NO₃⁻, PO₄³⁻ y SiO₃²⁻). La distribución de la temperatura en la columna de agua mostró tres etapas hidrográficas durante el año de muestreo (estratificación, transición y mezcla). Los valores integrados de los pigmentos fotosintéticos variaron de forma similar a la temperatura, con las menores concentraciones durante la etapa de estratificación y las mayores en mezcla. Los nutrientes y la productividad primaria (PP) mostraron dos condiciones temporales muy bien definidas, con valores bajos de septiembre a febrero y altos de marzo a junio. Estas dos etapas se presentaron en condiciones de baja (<66 m³ s⁻¹ 100 m línea de costa) y alta (>125 m³ s⁻¹ 100 m línea de costa) intensidad del índice de surgencias costeras, respectivamente. Se concluye que las surgencias costeras son un fenómeno que modula los niveles de PP (r= 0.74, p<0.05) frente a Bahía Magdalena, afectando la disponibilidad de nutrientes en la zona eufótica. La presencia y concentración de los pigmentos fotosintéticos mostraron una variabilidad modulada por las tres etapas hidrográficas, con mínima concentración durante estratificación y transición, y máxima en la etapa de mezcla debido a la presencia de las surgencias costeras (mezcla vertical).

Palabras clave: Productividad Primaria, surgencias costeras, pigmentos fotosintéticos, Región Sur de la Corriente de California, Península de Baja California.

Variability of the primary productivity and photosynthetic pigments in a swelling zone in the South region of the California Current

ABSTRACT. Processes and physical-chemical conditions of the water column off Bahía Magdalena, BCS were analyzed during an annual cycle (2008-2009), to determine their influence on the seasonal variability of primary production (¹⁴C) and selected phytoplankton groups characterized by their photosynthetic pigments. Local wind data, coastal upwelling index, temperature and salinity (CTD) and inorganic dissolved nutrients (NO₂⁻+NO₃⁻, PO₄³⁻ y SiO₃²⁻) were also analyzed. The temperature distribution in the water column showed three hydrographic stages during the study (stratification, transition and mixing). Integrated values of the photosynthetic pigments varied in a similar way as temperature, with lower concentrations during the stratification stage and higher during the mixing stage. Nutrients and primary productivity (PP) showed two defined seasonal conditions, with low values from September to February, and high values from March to June. These two stages were observed respectively during low (<66 m³ s⁻¹ 100 m shoreline) and high (>125 m³ s⁻¹ 100 m shoreline) intensity according to the coastal upwelling index. We conclude that coastal upwelling is the process modulating the PP level (r= 0.74, p<0.05) off Bahía Magdalena, influencing nutrient availability in the euphotic zone. The presence and concentration of photosynthetic pigments showed a modulated variability in the three hydrographical stages, with minimal concentrations during the stratification and transition, and a maximum at the mixing stage due to the presence of coastal upwelling (vertical mixing).

Keywords: Primary productivity, coastal upwelling, photosynthetic pigments, California Current southern region, Baja California peninsula.

Murillo Murillo, I., R. Cervantes Duarte, G. Gaxiola Castro, S. López López, F. Aguirre Bahena, E. González Rodríguez, Á. Jiménez Illescas & F. E. Hernández Sandoval. 2013. Variabilidad de la productividad primaria y de pigmentos fotosintéticos en una zona de surgencias de la región sur de la corriente de California. *CICIMAR Océánides*, 28(1): 23-26.

INTRODUCCIÓN

Los productores primarios son considerados como la base de la cadena trófica marina y la productividad primaria (PP) es un indicador de la magnitud a la que estos organismos

están incorporando carbono inorgánico en la zona eufótica (ZE). La PP depende de la variabilidad de diversos factores físicos y químicos en donde los nutrientes inorgánicos disueltos (NO₃⁻ y PO₄³⁻), irradiancia y temperatura son considerados los más relevantes (Lachkar

& Gruber, 2011). Para que estos factores estén presentes en condiciones óptimas para el crecimiento del fitoplancton, los procesos de advección, estratificación y mezcla juegan un papel determinante ya que se presentan en diferentes escalas espacio temporales en los ecosistemas marinos (Rossi *et al.*, 2009).

El Sistema de la Corriente de California (SCC) forma parte de uno de los cuatro sistemas de corriente con frontera oriental del océano, los cuales se caracterizan por aportar una alta riqueza biológica, producto de los niveles elevados de nutrientes inorgánicos transportados a la zona eufótica por las surgencias costeras (Carr & Kearns, 2003; Rossi *et al.*, 2009). La zona de la Corriente de California frente a Bahía Magdalena (BM) se encuentra ubicada al sur en la costa occidental de la Península de Baja California (BC), la cual es considerada el límite sureño del SCC (Aquad *et al.*, 2011). El sistema de corrientes y los procesos que controlan la dinámica (física, química y biológica) del ecosistema epipelágico frente a las costas de BC ya han sido descritos (Durazo & Baumgartner, 2002; Durazo, 2009; Durazo *et al.*, 2010; Gaxiola-Castro *et al.*, 2010). En esta región confluyen masas de agua con características diferentes. En primavera domina el agua subártica (fría y de baja salinidad) advectada por la Corriente de California (CC) y en otoño-invierno se incorpora cercana a la costa agua subtropical superficial (cálida, más salina y con baja concentración de nutrientes) (Hickey, 1998; Lynn & Simpson, 1987). Por lo anterior, esta región sureña de la CC es considerada como una zona de transición con condiciones oceanográficas entre templadas y subtropicales (Roden, 1971).

El viento es un factor que juega un papel determinante en la variabilidad de las condiciones físicas de la capa superior del océano. La magnitud y dirección del viento estacional frente a la Península de Baja California son afectadas por la ubicación del centro de alta presión del Océano Pacífico norte; el cual genera un flujo dominante hacia el sur-sureste (Castro & Martínez, 2010) con su mayor intensidad durante marzo-junio. El viento que fluye paralelo a la costa promueve surgencias costeras (Bakun & Nelson, 1977; Zaitzev *et al.*, 2003), las cuales transportan nutrientes inorgánicos hacia la zona eufótica y generan condiciones adecuadas para un mayor crecimiento del fitoplancton (Espinosa-Carreón *et al.*, 2004; Pérez-Bruinus *et al.*, 2007; Gaxiola-Castro *et al.*, 2010). Estos factores que varían estacionalmente y a escala interanual, modifican también la estructura de la comunidad fitoplanctónica (Kahru & Mitchell, 2000; Venrick, 2002) y los niveles de producción primaria (Gaxiola-Castro *et al.*, 2010).

En las costas de BC se han realizado diversos trabajos sobre la composición y variabilidad espacio-temporal del fitoplancton y los niveles de producción primaria. Zuria-Jordan *et al.* (1995) mediante composiciones mensuales de imágenes del satélite CZCS (Coastal Zone Color Scanner) determinaron la variación estacional promedio de clorofila-*a* frente a BM, con la máxima concentración de marzo a junio ($5-8 \text{ mg m}^{-3}$) y mínima de noviembre a febrero ($< 2 \text{ mg m}^{-3}$). Almazán-Becerril *et al.* (2010) describieron para octubre de 2003 en los primeros 100 m de profundidad frente a las costas de BC la distribución de los grupos del fitoplancton por medio de los pigmentos fotosintéticos característicos: peridina en dinoflagelados, zeaxantina en cianobacterias, aloxantinas

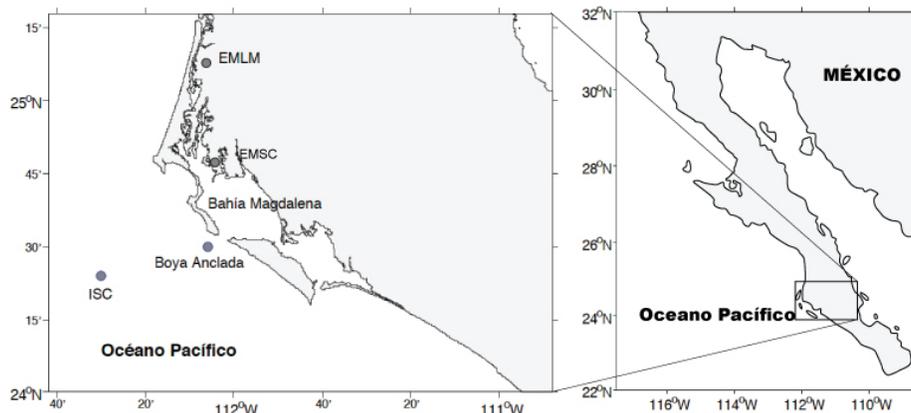


Figura 1. Localización de la estación Boya Anclada (24.5°N y 112.1°W) frente a Bahía Magdalena, Baja California Sur, México. Índice de Surgencia Costera (ISC) (24.4°N y 112.5°W) y estaciones meteorológicas (EMLM y EMSC) en Puerto López Mateos (25.11°N y 112.06°W) y Puerto San Carlos (24.80°N y 112.06°W) respectivamente.

Figure 1. Location of the anchored buoy (24.5°N and 112.1°W) off Bahía Magdalena, Baja California Sur, México. Coastal swell index (CSI) (24.4°N and 112.5°W) and meteorological stations (EMLM and EMSC) in Puerto López Mateos (25.11°N and 112.06°W) and Puerto San Carlos (24.80°N and 112.06°W) respectively.

en criptofitas, prasinoxantina en prasinofitas y divinil clorofila-*a* y *b* en *Prochlorococcus* sp. (Jeffrey *et al.*, 1997).

La zona costera fuera de Bahía Magdalena (Fig. 1) está sujeta a la variabilidad de los diversos procesos descritos para la región frente a la Península BC y es considerada como una de las zonas de surgencias costeras más importantes en el sur de la CC (Zaitzev *et al.*, 2003). Bajo este esquema se realizó un análisis de los procesos y las condiciones físicas y químicas de la columna de agua frente a BM, con el objetivo de determinar su influencia sobre la variabilidad en la productividad primaria y de algunos grupos de fitoplancton caracterizados a través del análisis de sus pigmentos fotosintéticos.

MATERIAL Y MÉTODO

Los datos de campo fueron obtenidos mensualmente entre agosto de 2008 y julio de 2009 (se realizaron dos muestreos: en 14 y 26 de marzo, 2009) en la estación Boya Anclada (BA) ubicada frente a BM (24.5°N y 112.1°W) (Fig. 1). Se realizaron en cada muestreo lanzes de CTD a la profundidad máxima permitida de 85 m con un equipo marca SeaBird modelo SBE-19 plus para medir temperatura, salinidad (conductividad) y densidad. A partir de la profundidad de desaparición del disco de Secchi (Z_s) se calculó el coeficiente de atenuación de luz difusa promedio en la columna de agua según: $K_d = 1.7 / Z_s$, donde 1.7 es la constante para aguas caso I (Kirk, 1994). Posteriormente se calcularon las profundidades de muestreo (Z), según la expresión de Lambert-Beer: $Z = (\ln E_0/E_z) / K_d$, donde, E_0 representa el total de la irradiancia superficial (100%) y E_z representa los niveles de irradiancia a 33, 10, 3.3 y 1%. En cada profundidad (Z) se recolectó agua por medio de botellas Niskin de 5 L de capacidad. Las muestras se colocaron en recipientes oscuros para su manejo posterior. De estos recipientes se depositaron tres submuestras en botellas transparentes de policarbonato de 250 mL y se inocularon con 5 μ Ci de ^{14}C como bicarbonato ácido de sodio ($\text{NaH}^{14}\text{CO}_3$), de acuerdo al método descrito por Steeman Nielsen (1952). Una vez inoculadas con la solución de bicarbonato radioactivo, una de las tres botellas fue cubierta con papel aluminio, para tener finalmente dos botellas claras y una oscura por cada profundidad de incubación. Cada serie de botellas fueron colocadas dentro de tubos transparentes de acrílico e incubadas a las profundidades físicas de donde fueron tomadas las muestras. El tiempo de incubación varió entre 1.5 a 2 horas, después del cual los tubos de acrílico fueron retirados y las muestras almacenadas en frío (4°C) y

oscuridad hasta su filtración en el laboratorio. La muestra contenida en cada botella de policarbonato fue pasada a través de filtros de membrana GN-6 de 45 μm de poro y 2.5 cm de diámetro para retener al fitoplancton marcado. Para esto se utilizó una bomba de vacío con una presión no mayor de 5 psi para disminuir la destrucción celular del fitoplancton en la muestra. Los filtros fueron puestos en frascos de centelleo líquido de 20 mL de capacidad a los que se les adicionó 0.5 mL de ácido clorhídrico al 10% para eliminar el ^{14}C inorgánico que no fue fijado por el fitoplancton (evaporándose como $^{14}\text{CO}_2$). Después de dos horas, a cada frasco se le agregó 10 mL de solución Ecolite y se almacenó hasta su posterior análisis en el laboratorio. Al momento de preparar las muestras para la incubación se llenó con agua correspondiente al nivel 100% de E_0 una botella de policarbonato extra, para cuantificar el tiempo cero (inicio del experimento) y determinar la actividad específica del carbono radiactivo añadido a todas las muestras (solución estándar de ^{14}C). La radioactividad final de las muestras fue determinada con un contador de centelleo líquido Beckman LS-6500. A partir de estos valores se calculó el carbono asimilado por el fitoplancton ($\text{mgC m}^{-3} \text{h}^{-1}$) de acuerdo a las ecuaciones de Parsons *et al.* (1984). Posteriormente se integraron los valores de cada profundidad de incubación dentro de la zona eufótica para expresarlos finalmente como $\text{gC m}^{-2} \text{d}^{-1}$. Para la determinación de las concentraciones de nutrientes inorgánicos disueltos (NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} y SiO_3^{2-}) y pigmentos fotosintéticos del fitoplancton se tomaron 2 L de muestra a cada profundidad de incubación y se conservaron en hielo y oscuridad hasta filtrarse en el laboratorio (aprox. 6 h). La filtración se realizó por medio de vacío en filtros de fibra de vidrio Whatman GF/F de 0.7 μm de tamaño de poro y 2.5 cm de diámetro, los cuales se guardaron a -30°C. El agua que pasó a través de los filtros se almacenó a -30°C en botellas de plástico de 500 mL para el posterior análisis de nutrientes. El análisis de nutrientes se realizó con un autoanalizador de iones de flujo continuo Lachat Instruments modelo QuikChem 8000 (Strickland & Parsons, 1972). El análisis de pigmentos fotosintéticos se realizó por HPLC (High Performance Liquid Chromatography) mediante el método de extracción con acetona (Vidussi *et al.*, 1996). Los pigmentos fotosintéticos se midieron en las muestras obtenidas de octubre 2008 a agosto 2009.

Los datos de dirección y velocidad del viento se obtuvieron de una estación meteorológica automatizada marca Davis instruments modelo Vantage Pro2 instalada en la Empacadora de Puerto Adolfo López Mateos (EMLM) (Fig. 1).

Los sensores fueron colocados en el techo del edificio a una altura aproximada de 20 m y los datos fueron colectados con una frecuencia de 30 minutos de diciembre 2008 a agosto 2009. Debido a la distancia entre EMLM y el sitio de estudio se realizó una correlación con una serie más corta de velocidad de el viento (diciembre 2008 a mayo 2009) de otra estación similar más cercana al sitio de muestreo ubicada en Puerto San Carlos (EMSC) (Fig. 1). Se obtuvo una alta correlación ($r = 0.98$, $p < 0.05$) entre ambas series por lo que se considera que es confiable y representativo del área de estudio utilizar la serie de la EMLM.

Los datos del Índice de Surgencias Costeras (ISC), calculados a partir de los campos de presión atmosférica obtenidos por el Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center (FNMOC) se tomaron del sitio web (http://las.pfeg.noaa.gov/las6_5/servlets/) del Pacific Fisheries Environmental Laboratory (PFEL) del cual se obtuvieron datos cada 6 h ($m^3 s^{-1}$ 100 m de línea de costa) en la estación ISC (24.4°N y 112.5°W) (Fig. 1).

A partir de los perfiles verticales de temperatura se calculó el Índice de Estratificación Térmica (IET) a cada 10 m de acuerdo a Ló-

pez-Cortes *et al.* (2003). Este índice se calculó obteniendo la diferencia de temperatura entre la profundidad superior y la de 10 m inferiores contados a partir de la profundidad superior y dividido entre 10 como sigue: $IET(P_n) = (TP_n - TP_{n+10}) / 10$, donde, $IET(P_n)$ = Índice de Estratificación Térmica a la profundidad n , TP_n = Temperatura a la profundidad n , TP_{n+10} = Temperatura a la profundidad $n+10$ m. Cada condición hidrográfica de la columna de agua se establece cuando se cumple una de las siguientes condiciones, estratificación si $IET > 0.200$, transición si $IET < 0.200 > 0.050$ y mezcla si $IET < 0.050$.

RESULTADOS

La serie del viento paralelo a la costa medido en la EMLM mostró alta variabilidad de la intensidad en el ciclo anual (diciembre 2008 a agosto 2009). En promedio se observaron dos etapas, la primera de diciembre a febrero con una velocidad de $0.8 \pm 0.4 m s^{-1}$ y la segunda de marzo a junio de $1.6 \pm 0.2 m s^{-1}$ (Fig. 2a). En julio disminuyó nuevamente hasta $0.7 m s^{-1}$.

El ISC al igual que la componente del viento paralelo a la costa mostró una alta variabilidad y la misma tendencia. Se mantuvo alrededor de $66 (\pm 10 m^3 s^{-1} 100 m$ línea de costa) de agosto a febrero y aumentó hasta $125 (\pm 20$

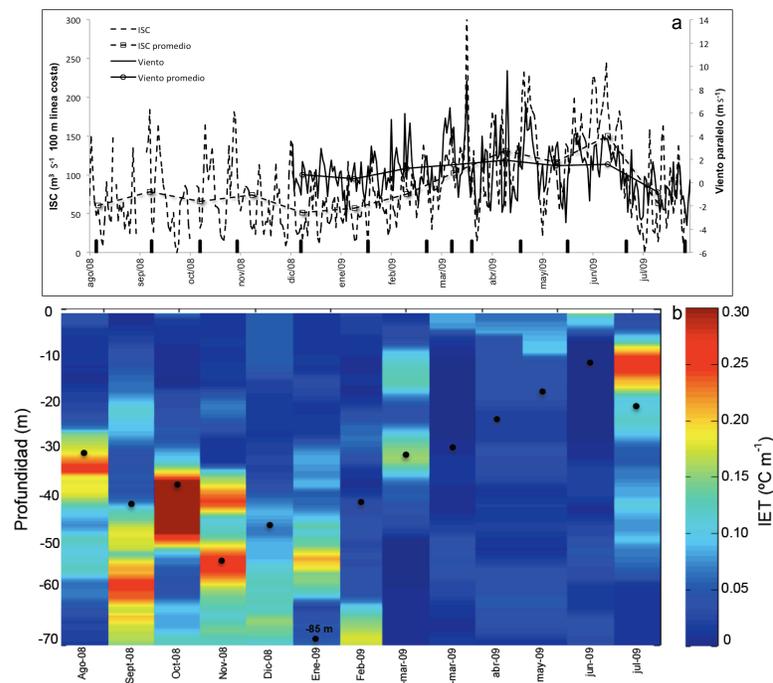


Figura 2. a) Velocidad del viento paralelo a la costa para la estación EMLM del 8 diciembre 2008 al 31 julio 2009 e Índice de Surgencia Costera (ISC) del 12 agosto 2008 al 31 julio 2009. Las líneas verticales en el eje x corresponden a la fecha del muestreo. b) Distribución temporal del IET y de la profundidad de la zona eufótica en metros (puntos negros).

Figure 2. a) Wind velocity parallel to the coast at station EMLM from December 8, 2008 to July 31, 2009 and Shore Swell Index (ISC) from August 12, 2008 to July 31, 2009. Vertical lines in X axis are sampling date. b) Temporal distribution of IET and the deep of the euphotic zone in meters (black dots).

$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ 100 m línea de costa) de marzo a junio. En julio disminuyó nuevamente hasta $63 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 100 m línea de costa (Fig. 2a). El coeficiente de correlación (r) entre ISC y la velocidad del viento fue 0.47 ($p= 0.05$) para el periodo en el cual se obtuvieron datos de ambos parámetros (diciembre 2008 a julio 2009).

Los resultados obtenidos a través del Índice de Estratificación Térmica (IET) mostraron tres etapas hidrográficas: estratificación de agosto a noviembre (IET entre 0.258 y 0.654 $^{\circ}\text{C m}^{-1}$), transición (estratificación débil) de diciembre al 14 de marzo (IET entre 0.155 y 0.197 $^{\circ}\text{C m}^{-1}$) y mezcla del 26 de marzo a junio (IET < 0.050) (Fig. 2b).

La profundidad promedio de la zona eufótica (ZE) determinada con el disco de Secchi durante estratificación y transición varió entre 41 m (± 9) y 47 m (± 24) respectivamente, con una disminución hasta 21 m (± 6) durante el periodo de mezcla (Fig. 2b).

La profundidad límite de la ZE ($E_z = 1\%$) fue ligeramente más somera en relación a la pro-

fundidad donde IET fue máxima (excepto en enero). Esto es un indicador de que se formó una barrera física que limita el intercambio de propiedades, *i.e.*, nutrientes con la ZE.

La temperatura, salinidad y densidad obtenidas en la estación BA se muestran a nivel superficial y a 50 m de profundidad (Fig. 3). En general, en las tres variables se observa un marcado patrón estacional tanto en superficie como a 50 m. La temperatura superficial presentó valores superiores a los observadas a 50 m. Los valores más altos se midieron de agosto-noviembre de 2008 (27°C en superficie y 21°C a 50 m) como resultado del calentamiento solar. De noviembre a febrero se observó un descenso de la temperatura de 25°C a 19°C en superficie y de 22°C a 18°C a 50 m. En marzo-junio se observó la temperatura más baja tanto en superficie como a 50 m (18°C y 13°C , respectivamente) producto de las surgencias costeras, con un nuevo incremento de julio-agosto. El gradiente de temperatura entre superficie y 50 m fue mayor de agosto-noviembre e inferior de abril-junio (Fig. 3a).

La salinidad de agosto al 14 de marzo (Fig. 3b) presentó en superficie valores más altos que a 50 m, con un descenso continuo de 34.9 a 34.4 para superficie y de 34.7 a 34.2 a 50 m. En el muestreo del 26 de marzo se observó la salinidad ligeramente más alta a 50 m que en superficie, lo que se mantuvo en los meses siguientes (abril-julio), esto es una señal del inicio de la temporada de surgencias costeras, las cuales transportan agua de menor salinidad a la superficie (34.2).

La densidad presentó una distribución temporal similar a la temperatura con valores más altos a 50 m. En el periodo marzo-junio se mantuvo constante con valores promedio de $\sigma_t = 25.0$ en superficie y $\sigma_t = 26.0$ a 50 m (Fig. 3c).

Las masas de agua son importantes ya que de acuerdo a sus características influyen en la variabilidad de las propiedades físicas, químicas y biológicas en los ecosistemas marinos. Frente a BM se determinó para cada etapa hidrográfica el tipo de masa por medio de diagramas TS utilizando los perfiles promedio de salinidad y temperatura (Fig. 4), de acuerdo a Durazo y Baumgartner (2002). Se encontró que durante la etapa de estratificación domina el agua de origen Subtropical Superficial (AStS) en toda la columna de agua y en la etapa de transición se observó la presencia de AStS en los primeros 40 m y agua de transición (ATr) debajo de los 40 m de profundidad. El ATr ha sido definida como un mezcla de AStS con agua subártica (ASA). En la etapa de mezcla

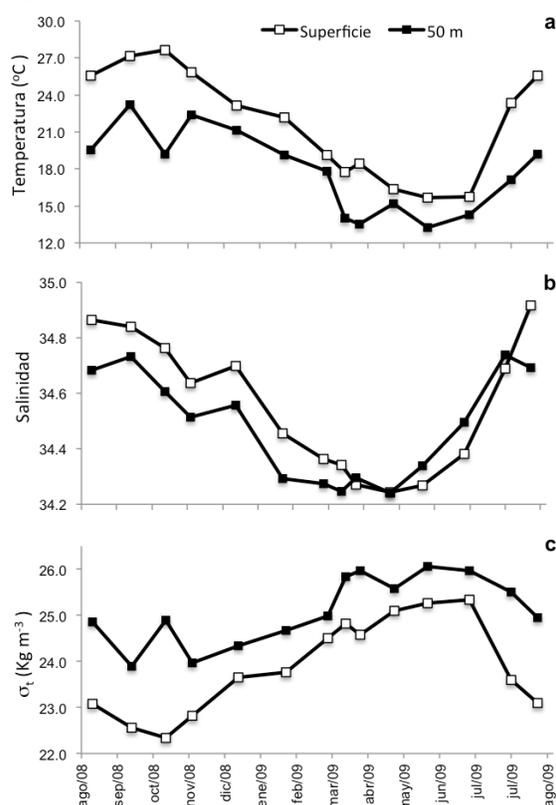


Figura 3. Series de tiempo de temperatura (a), salinidad (b) y densidad (c) en superficie y a 50 m de profundidad frente a Bahía Magdalena.

Figure 3. Time series of temperature (a), salinity (b), and density (c) at surface and at 50 m deep in front of Bahía Magdalena

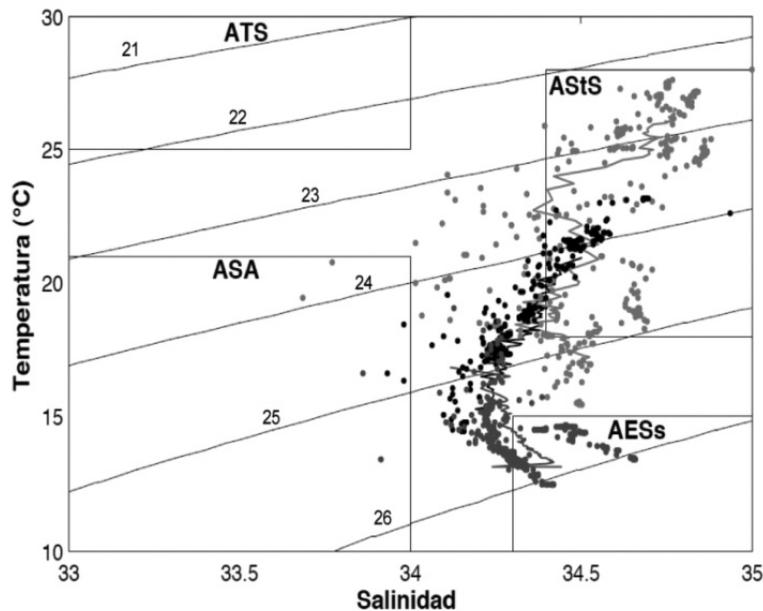


Figura 4. Diagrama TS para cada etapa hidrográfica. Estratificación (puntos gris bajo), transición (puntos negros) y mezcla (puntos gris alto). Las líneas indican valores promedio. Los límites de las masas de agua fueron tomados de Durazo y Baumgartner (2002).

Figure 4. Salinity-Temperature diagram for each hydrographic step. Stratification (low grey dots), transition (black dots) and mixture (high grey dots). Lines indicates mean values. The water masses boundaries were taken from Durazo and Baumgartner (2002).

se encontró ATr en los primeros 40 m y agua Ecuatorial Subsuperficial (AESs) debajo de esta profundidad. No se detectó la presencia de ASA en la etapa de mezcla cuando el flujo de la CC es máximo; ello podría indicar que el ASA llega a la zona de estudio mezclada con AESs.

La distribución temporal de los nutrientes inorgánicos disueltos ($\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$, PO_4^{3-} y SiO_3^{2-}) en superficie y 20 m de profundidad mostró básicamente dos periodos, uno de baja concentración que corresponde a la etapa de estratificación y transición (agosto a febrero) y otro de alta concentración que corresponde a la etapa de mezcla (marzo a junio), ambos periodos asociados a la disminución y aumento de la intensidad de las surgencias costeras, respectivamente (Fig. 2a). Dentro de esta variabilidad se encontró que para el periodo de baja concentración de nutrientes no se tiene un patrón definido entre superficie y 20 m. Por el contrario, en el periodo de alta concentración se observó un menor concentración en superficie que a 20 m, observándose 10.79 (± 8.03 mM) y 15.94 (± 5.62 mM) de $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$, 1.16 (± 0.58 mM) y 1.40 (± 0.43 mM) de PO_4^{3-} y 13.03 (± 7.22 mM) y 18.70 (± 6.44 mM) de SiO_3^{2-} .

En mayo-junio las concentraciones de nutrientes fueron altas, el promedio entre superficie y 20 m varió alrededor de 17.55 (± 3.22

mM) para $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$, de 1.70 (± 0.05 mM) para PO_4^{3-} y de 22.05 (± 2.79 mM) para SiO_3^{2-} (Fig. 5).

Se correlacionó la temperatura superficial (Fig. 3a) contra la concentración de $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$, PO_4^{3-} y SiO_3^{2-} superficiales y a 50 m (Fig. 5). Para superficie se obtuvieron coeficientes de correlación (r , $p = 0.05$) negativos de -0.67, -0.65 y -0.25, respectivamente y para 50 m de -0.81, -0.61 y -0.57, respectivamente. Las correlaciones negativas encontradas para temperatura y nutrientes muestran que la alta concentración de nutrientes está asociada con temperaturas bajas (13°C).

Con base en las concentraciones de nutrientes inorgánicos disueltos de $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$ y PO_4^{3-} se calculó el promedio de la relación de Redfield nitrógeno: fósforo (N:P, 16:1) para los dos periodos. En el de baja concentración de nutrientes, esta relación fue de 4.6 (± 1.9) con una baja concentración de $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$. En el de alta concentración, la relación N:P aumentó hasta 10.8 (± 1.8), *i.e.*, la concentración de $\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$ aumentó más del doble respecto a la concentración de PO_4^{3-} .

Los perfiles verticales de PP medidos en la ZE mostraron al igual que los nutrientes dos periodos muy marcados, baja PP de septiembre a febrero con un promedio de 20.59 (± 22.48 $\text{mgC m}^{-3} \text{d}^{-1}$) y otro de alta PP de marzo a junio

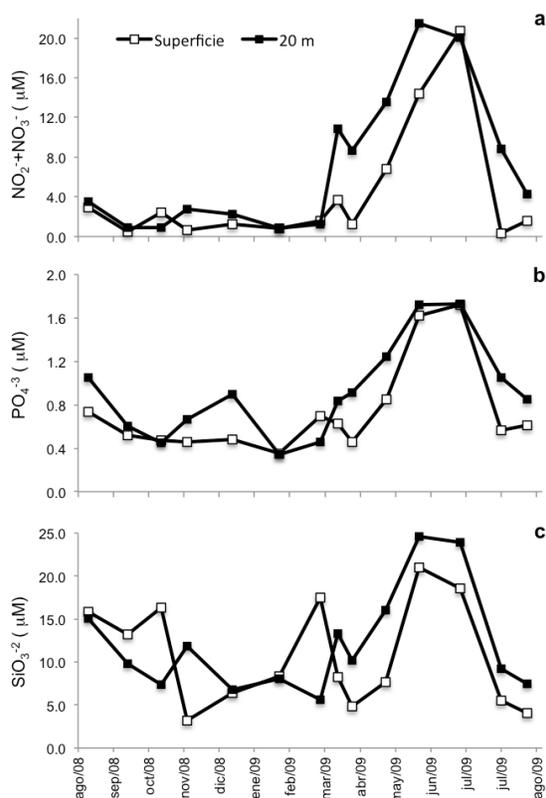


Figura 5. Distribución temporal de nutrientes inorgánicos disueltos en superficie y 20 m (valor interpolado) en la estación Boya Anclada.

Figure 5. Temporal distribution of inorganic dissolved nutrients at surface and at 20 m (interpolated value) in the anchored buoy station.

con un promedio fue de $94.43 (\pm 80.85 \text{ mgC m}^{-3} \text{ d}^{-1})$. En el periodo de marzo a junio se observó que en la capa superficial (hasta 33% de irradiancia) la PP fue mucho más alta ($169.81 \text{ mgC m}^{-3} \text{ d}^{-1} \pm 80.85$) que en la capa inferior a 33% de irradiancia ($44.17 \text{ mgC m}^{-3} \text{ d}^{-1} \pm 41.53$) (Fig. 5a).

La productividad primaria (PP) integrada en la ZE presentó valores mínimos de septiembre a febrero entre 0.16 y $1.11 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ y máximos de marzo a junio de 2009 entre 1.414 y $2.228 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Fig. 5b). La PP presentó una correlación alta con el ISC ($r = 0.74$, $p = 0.05$) y un coeficiente de determinación ($R^2 = 0.54$, $y = 0.0151x - 0.1251$) que explica que hasta un 54% de la PP se relaciona con el ISC. Se correlacionó la serie de PP integrada con el valor donde IET fue máxima y se encontró una alta correlación negativa ($r = -0.56$, $p = 0.05$), lo que indica que en el periodo de estratificación y transición cuando el IET es >0.2 los niveles de PP son bajos y cuando los valores de IET es <0.2 los niveles de PP aumentan. El coeficiente de determinación ($R^2 = 0.31$, $y = -2.2453x$

+ 1.6243) indica que un 31% de la variabilidad de la PP se puede explicar por medio de este índice.

La serie temporal de los pigmentos fotosintéticos integrados en la ZE mostró de manera general mínima concentración de agosto a febrero y un incremento a partir del muestreo del 26 de marzo y hasta junio, para disminuir en julio-agosto (Fig. 7). La tabla 1 muestra los pigmentos fotosintéticos integrados en la ZE (mg m^{-2}) para cada etapa hidrográfica. En general, se observó que todos se incrementaron hasta un 238% (± 176) de estratificación a mezcla.

La Chl-a es utilizada como un indicador de la cantidad de biomasa del fitoplancton en los ecosistemas acuáticos, ya que es el pigmento más abundante. La Chl-a presentó una concentración promedio integrada de $11.6 \pm 0.1 \text{ mg m}^{-2}$ en la etapa de estratificación y aumentó en la etapa de transición hasta $16.1 \pm 3.0 \text{ mg m}^{-2}$ (39%), con un incremento en la etapa de mezcla hasta $31.2 \pm 1.4 \text{ mg m}^{-2}$ (93%) respecto a la etapa de transición.

La Chl-b y Chl-c presentaron una tendencia similar a la Chl-a pero de menor magnitud. La Chl-b en estratificación fue de $1.8 \pm 1.3 \text{ mg m}^{-2}$ y en transición $2.8 \pm 0.4 \text{ mg m}^{-2}$ (60% de incremento). En la etapa de mezcla aumentó hasta $4.0 \pm 2.7 \text{ mg m}^{-2}$ (40%) y su contribución promedio a la biomasa total (respecto a la Chl-a) fue de 15%. La Chl-c se mantuvo constante ($1.9 \pm 0.1 \text{ mg m}^{-2}$) de estratificación a transición y en la etapa de mezcla aumentó hasta $2.1 \pm 0.8 \text{ mg m}^{-2}$ (13%). Este resultado indica que la Chl-c en general mostró una concentración constante en el ciclo anual muestreado y su contribución promedio a la biomasa total (respecto a la Chl-a) fue de el 10%.

La 19'-BF y la 19'-HF son pigmentos característicos del grupo de los silicoflagelados y coccolitoforidos, respectivamente. Estos pigmentos fueron observados en la etapa de transición a una concentración promedio de 1.5 ± 0.5 y $0.5 \pm 0.1 \text{ mg m}^{-2}$, respectivamente. En la etapa de mezcla la 19'-BF aumentó hasta $3.4 \pm 1.0 \text{ mg m}^{-2}$ (134%) y la 19'-HF disminuyó hasta $0.1 \pm 0.2 \text{ mg m}^{-2}$ (-80%). La contribución promedio a la biomasa total (respecto a la Chl-a) fue del 10% para la 19'-BF y menor al 1.5% para la 19'-HF.

La fucoxantina es el pigmento característico de las diatomeas y estuvo presente en todos los periodos hidrográficos. Se incrementó un 70% de estratificación a transición ($1.0 \pm 0.6 \text{ mg m}^{-2}$ a $1.8 \pm 0.5 \text{ mg m}^{-2}$) y en la etapa de mezcla se incrementó ($3.5 \pm 0.9 \text{ mg m}^{-2}$) un 97% con respecto a la etapa de transición. La contribución promedio de la fucoxantina a la biomasa

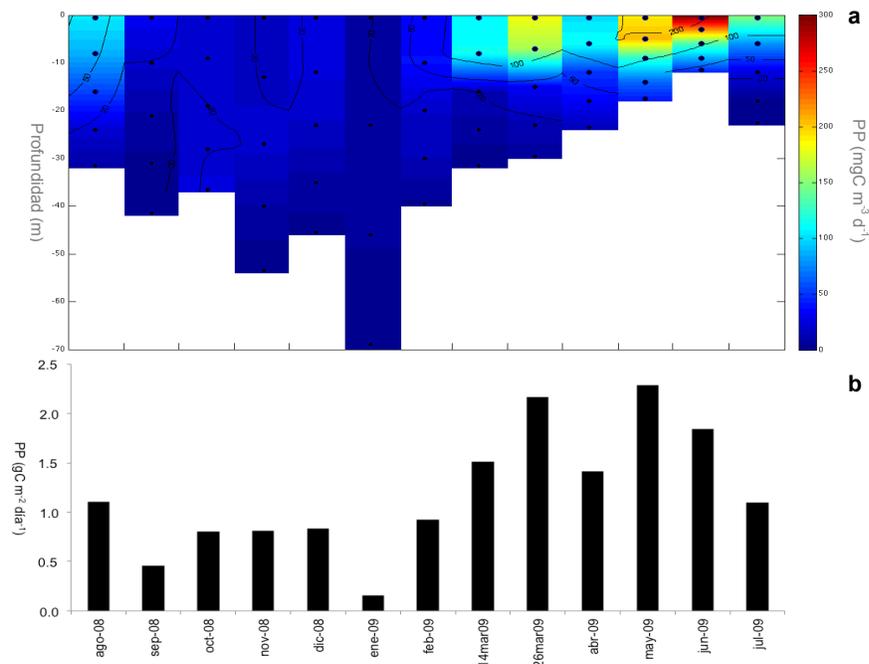


Figura 6. a) Sección vertical de productividad primaria a 5 niveles de irradiación superficial, 100%, 33%, 10%, 3% y 1% (puntos negros) y b) PP integrada en la ZE.
Figure 6. a) Vertical section of primary productivity at 5 levels of surface irradiance, 100%, 33%, 10%, and 1% (black dots), and b) PP integrated to the ZE.

total (respecto a la Chl-a) fue de 10%. El fuerte incremento de este pigmento representativo de las diatomeas en transición y mezcla, así como su contribución a la biomasa total (10%) está relacionada con el enriquecimiento por nutrientes de la ZE (Fig. 5) debido a la intensificación de las surgencias costeras (Fig. 2a).

La zeaxantina es el pigmento característico

del grupo de las cianobacterias y su variabilidad respecto a las etapas hidrográficas fue diferente al resto de los pigmentos. El valor más alto de zeaxantina se midió en el periodo estratificado ($2.8 \pm 0.1 \text{ mg m}^{-2}$) y disminuyó 271% en transición ($0.7 \pm 0.4 \text{ mg m}^{-2}$). En la etapa de mezcla se registró un incremento (134%) respecto a la etapa de transición ($1.8 \pm 1.9 \text{ mg m}^{-2}$).

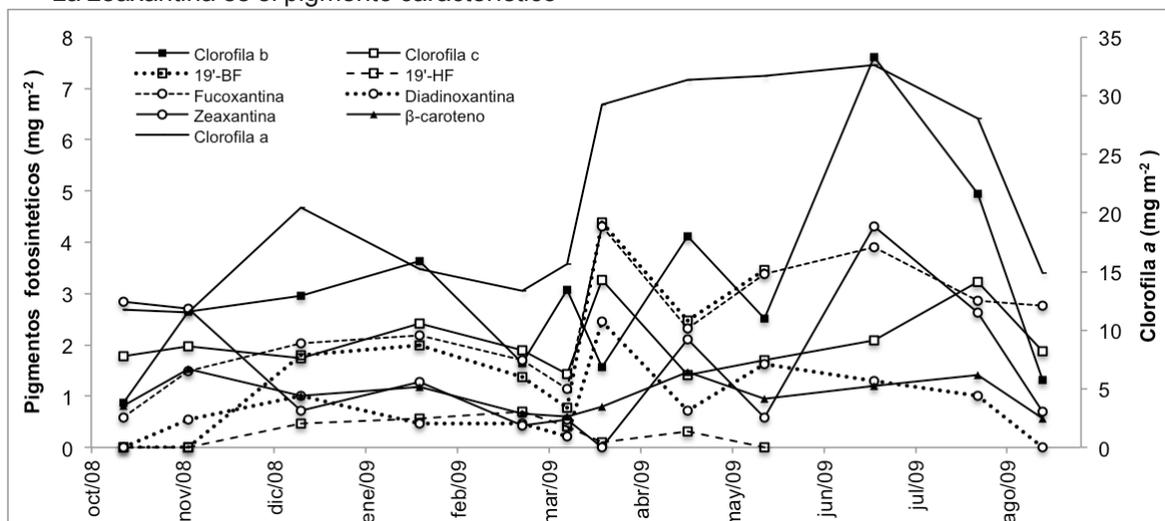


Figura 7. Distribución temporal de pigmentos fotosintéticos integrados en la zona eufótica en la estación BA frente a Bahía Magdalena de octubre de 2008 a agosto 2009.
Figure 7. Temporal distribution of photosynthetic pigments integrated in the euphotic zone at station BA in front of Bahía Magdalena from October 2008 to August 2009.

Tabla 1. Valores promedio y desviación estándar (mg m⁻²) de pigmentos fotosintéticos para cada periodo hidrográfico. E= Estratificación (octubre-noviembre 2008), T=Transición (diciembre 2008-14 marzo 2009) y M= Mezcla (26 marzo-Junio 2009) frente a Bahía Magdalena, BCS. Chl a, b y c = Clorofila a, b y c, 19'-BF= 19-butanoil-oxi-fucoxantina, 19'-HF= 19-hexanoil-oxi-fucoxantina, Fucox= Fucoxantina, Diadinox= Diadinoxantina, Zeax= Zeaxantina y β -carot= β -caroteno

	Chl a	Chl b	Chl c	19'-BF	19'-HF	Fucox	Diadinox	Zeax	β -carot
E	11.620 (± 0.138)	1.762 (± 1.262)	1.884 (± 0.136)	0.000	0.000	1.042 (± 0.639)	0.269 (± 0.380)	2.772 (± 0.090)	1.169 (± 0.506)
T	16.180 (± 3.011)	2.824 (± 0.845)	1.869 (± 0.415)	1.485 (± 0.544)	0.533 (± 0.124)	1.767 (± 0.463)	0.540 (± 0.338)	0.747 (± 0.380)	0.859 (± 0.277)
M	31.220 (± 1.434)	3.950 (± 2.654)	2.113 (± 0.812)	3.445 (± 0.959)	0.137 (± 0.163)	3.483 (± 0.865)	1.523 (± 0.732)	1.750 (± 1.928)	1.100 (± 0.295)

Su contribución a la biomasa total en la etapa de estratificación fue del 24%, la más alta respecto a los otros pigmentos mostrados en la tabla 1. Esto indica que en condiciones de baja concentración de nutrientes durante la etapa de estratificación (Fig. 5) el grupo de las cianobacterias fue el grupo dominante.

El β -caroteno mostró una variabilidad similar a la zeaxantina. La mayor concentración se encontró en la etapa de estratificación y disminuyó 26% en transición (1.2 ± 0.5 mg m⁻² a 0.9 ± 0.3 mg m⁻²). En la etapa de transición a mezcla aumentó a una concentración similar a la encontrada en la etapa de estratificación (1.1 ± 0.3 mg m⁻²) y representó un aumento de 28%. Su contribución a la biomasa total en la etapa de estratificación fue del 10% y en promedio de 6%. El β -caroteno está presente en grupos de fitoplancton como pigmento menor (1-10%) entre los que se encuentran clorofíceas, prasinofíceas y euglenofitas, entre otras; como pigmento en trazas (<1%) se encuentra en las bacilariofitas y dinofitas, entre otras.

DISCUSIÓN

El ciclo anual de las variables descritas en la estación BA se discuten con el objetivo de determinar los procesos físicos que modifican las condiciones hidrológicas en la columna de agua y cómo estos cambios impactan los niveles de PP y en algunos grupos de fitoplancton frente a BM.

La variabilidad en el patrón de vientos registrado en la EMLM (Fig. 2a) es controlada principalmente por el semipermanente Centro de Alta Presión del Pacífico Norte (CAP), localizado cerca de 32°N/140°W (Amador *et al.*, 2006). El CAP produce fuertes gradientes de presión, originando una componente dominante del viento hacia el ecuador (sur de ~40°N) la mayor parte de el año (Zaitsev *et al.*, 2003; Amador *et al.*, 2006; Castro & Martínez, 2010). La importancia de estos vientos en la zona de estudio es que además de influir en el flujo de la Corriente de California son favorables a la

generación de surgencias costeras debido al transporte de Ekman hacia fuera de la costa (Espinosa-Carreón *et al.*, 2004; Pérez-Brunius *et al.*, 2007) con su periodo más intenso durante marzo-junio (Fig. 2a), aunque son persistentes pero en menor intensidad el resto del año (Zaitsev *et al.*, 2003).

La correlación entre la series de viento paralelo a la costa en dirección sur e ISC es alta ($r = 0.47$, $p < 0.05$) e indica que el incremento y la persistencia de la intensidad del viento en los meses de marzo a junio 2009 fue el generador de las surgencia costeras. Por el contrario, durante agosto a febrero condiciones de baja intensidad de viento promueven valores de ISC bajos (Fig. 2a).

La variabilidad de la temperatura y la salinidad (Fig. 3a) concuerda con el patrón descrito para la capa superficial al sur de Punta Eugenia a 25.5°N (línea 137) (Durazo *et al.*, 2010, Gómez-Valdés & Jerónimo, 2009), con máxima temperatura y salinidad en otoño (19°C y 34.2, respectivamente) y mínima (16°C y 33.9, respectivamente) en primavera.

Los altos valores superficiales de temperatura y salinidad (27°C - 34.8) observados en la etapa de estratificación (agosto-noviembre 2008) (Fig. 3a y b) son consecuencia de la evaporación debida a la ganancia de calor por el océano en verano (Durazo *et al.*, 2010; Castro & Martínez 2010), al debilitamiento de los vientos (Fig. 2a), y a la presencia de agua subtropical superficial (AStS) cálida y de alta salinidad (Fig. 4). Este conjunto de factores elevan la temperatura de la capa superficial del mar y promueven condiciones de estratificación térmica con el valor máximo de IET (0.646) en octubre (Fig. 2b); por ello observamos salinidad más alta (34.8) en superficie y menor salinidad a 50 m de profundidad (34.6) (Fig. 3b).

Durazo *et al.* (2010) reportaron que la salinidad se incrementa como resultado de la influencia de Agua Tropical Superficial (ATS) y AStS. En la porción sur de la región IME-COCAL estos autores encontraron valores de

33.90 en primavera-verano y 34.20 en otoño-invierno. Los datos de salinidad superficial reportados por Durazo *et al.* (2010) de 33.90 para primavera-verano son inferiores a los encontrados frente a BM (34.25) debido a que la malla de IMECOCAL sólo llega hasta los 25.5°N. Valores de salinidad de 34.20 frente a BM han sido reportados por Auad *et al.* (2011) para invierno y verano; estas son comparables con la etapa de mezcla de nuestro trabajo.

Las masas de agua observadas en este trabajo a través de diagramas T-S muestran que el ASA no se encontró frente a BM en todo el ciclo muestreado, con un dominio de AStS durante estratificación en superficie, AStS mezclada con ATr durante transición y en el periodo de mezcla AESs y ATr (Fig. 4). La influencia de ASA es máxima en primavera-verano y conforme avanza hacia el sur es ligeramente modificada por calentamiento solar y advección con AStS y ATS incrementando su salinidad y temperatura (Durazo *et al.*, 2010). Por el contrario el efecto del AStS y ATS disminuye conforme esta agua avanza hacia el polo y no se registran más allá de Punta Eugenia (a 28°N) en la porción norte de la región IMECOCAL donde el ASA domina todo el año (Durazo *et al.*, 2010). Los valores de salinidad (34.25) encontrados frente a BM durante la etapa de mezcla es representativa de la CC modificada por AStS más salina (34.4 a 35.7) y ATS (33.0 a 34.0). De acuerdo a los diagramas T-S de Durazo *et al.* (2010) es Agua Transicional (ATr) derivada de la mezcla de AStS y ASA (Durazo & Baumgartner, 2002).

En la etapa de mezcla se encontró agua ligeramente menos salina (-0.05) en la superficie (34.29 ± 0.06) que a 50 m (34.34 ± 0.11) (Fig. 3b) lo cual se debe a que el agua frente a BM se mezcla con ATr y a que las surgencias transportan agua fría y de menor salinidad (Fig. 3a y b) a la superficie, que durante las condiciones de estratificación se mantuvo en la capa inferior de la columna de agua. Durazo *et al.* (2010) encontraron que la profundidad de donde proviene el agua de surgencias, tanto para la región norte como para la región sur de IMECOCAL, es entre 70 y 100 m. Esto explica porqué la salinidad frente a BM fue ligeramente menor en superficie durante marzo-junio 2009.

Un caso contrario al observado frente a BM ocurre en la zona sur (por debajo de Punta Eugenia) de la región IMECOCAL, donde el agua profunda advectada por las surgencias costeras es más salina (34.2) que la superficial (33.7) (Durazo *et al.*, 2010). Otro aspecto importante es el incremento de los vientos en dirección sur paralelo a la costa (Castro & Martínez 2010), que fortalece el flujo de la CC hacia el ecuador

y promueve la intensificación de las surgencias costeras (Zaitzev *et al.*, 2003; Durazo *et al.*, 2010) que frente a BM acarrearán agua fría y de baja salinidad a la superficie (Fig. 3a y b). La variabilidad estacional de la capa superficial ($\sigma_t < 26 \text{ kg m}^{-3}$) sugiere que la influencia de ASA que acarrea la CC es máxima durante primavera (Fig. 3b), durante la época de surgencias (Pérez-Brunius *et al.* 2007).

Zaitzev *et al.* (2010) delimitaron en la zona oceánica frente a BM una zona de surgencias costeras en base a los promedios mensuales de temperatura superficial del mar (TSM), encontraron para el promedio de mayo las máximas anomalías de TSM cercanas a la costa; la baja (alta) concentración de nutrientes (Fig. 5) corresponde a bajos (altos) valores del índice de surgencias (Fig. 2a). Estos dos periodos tan marcados están ampliamente relacionados con el incremento de las surgencias costeras. Gaxiola-Castro *et al.* (2010) han reportado esta variabilidad de los nutrientes para las costas de BC, encontrando que es modulada por procesos de mesoescala como las surgencias costeras.

La concentración de nutrientes en la ZE corresponde con la productividad primaria (Fig. 6). La proporción molar de la composición del fitoplancton está dada por la relación de Redfield C:N:P (106:16:1). Para la zona de estudio (24.5°N) no existen trabajos sobre este tema; los pocos trabajos que existen sobre la dinámica de nutrientes se han realizado entre los 32°N y 25°N frente a BC y la razón $\text{NO}_3^-:\text{PO}_4^{3-}$ es generalmente menor a 16:1 (~14), tal como lo expresan Sigman *et al.* (2005).

En nuestro trabajo la baja relación molar promedio obtenida en las etapas de estratificación y transición ($\text{NO}_3^-:\text{PO}_4^{3-} = 4.6 \pm 3.3$) promovió bajos niveles de PP como resultado de una deficiencia en la fuente de nitrógeno como NO_3^- . En la etapa de mezcla la relación molar fue mayor ($\text{NO}_3^-:\text{PO}_4^{3-} = 10.2 \pm 5.6$) aumentando los niveles de PP. En las costas de BC Gaxiola-Castro *et al.* (2010) reportaron concentraciones de PO_4^{3-} por encima de ~0.3 μM , con limitación por NO_3^- para el crecimiento del fitoplancton suponiendo que en esa región podrían existir otras fuentes de nutrientes nitrogenados importantes no consideradas en su análisis. Rodríguez-Mata (2006) encontró en la boca de Bahía Magdalena en diciembre del 2004 una razón N:P menor a 5 y concluyó que esto podría significar limitaciones de nitrógeno. Camacho-Ibar *et al.* (2003) encontraron alta relación (cercana a 16) entre nitrógeno inorgánico disuelto y fósforo inorgánico disuelto (NID:PID) durante alta intensidad de surgencias en la zona oceánica adyacente a Bahía de San Quintín en febrero

de 1996, resultado similar al obtenido en nuestra zona de estudio en condiciones de surgencias.

El coeficiente de correlación estimado entre la productividad primaria e ISC ($r=0.77$, $p<0.05$) demuestra que las surgencias costeras son un mecanismo que modula la concentración de nutrientes en la zona eufótica y genera condiciones adecuadas para el crecimiento del fitoplancton (Fig. 2a y 6).

La magnitud de la PP en el océano se relaciona estrechamente con la profundidad a la que se encuentra la nutriclina. La posición de la nutriclina con respecto a la ZE (1% de la irradiancia superficial) es determinante. Si la nutriclina es más (o menos) profunda que la ZE entonces tendremos baja (o alta) concentración de nutrientes y baja (o alta) PP (Mantyla *et al.* 2008). En nuestro estudio la profundidad donde IET fue máximo estuvo por debajo de la profundidad de la ZE (excepto en enero 2009). Esto pudo formar una barrera física que limitó la inyección de nutrientes a la ZE en el periodo estratificado (Fig. 2b) como lo expresan López-Calderón *et al.* (2006).

En el análisis de PP se observó que en el periodo de alta productividad de marzo a junio 2009 la mayor parte de la PP (72%) se produce en la capa superior de la columna de agua, con límite en la primera profundidad óptica (Sup-33% irradiancia). Esto se observa claramente en los perfiles verticales de PP (Fig. 6a).

El incremento en la concentración de pigmentos (clorofila *a* de 11.62 a 31.22 mg m⁻²) de estratificación a mezcla promueve una mayor absorción de luz disminuyendo la profundidad de la ZE. González-Silvera *et al.* (2010) encontraron que el incremento de la clorofila total lleva a una mayor capacidad de absorción de luz y que las aguas costeras absorben más luz por la mayor abundancia de fitoplancton. Como se muestra en la figura 7 y la tabla 1, la concentración de los pigmentos fotosintéticos (PF) fue diferente en los tres periodos hidrográficos antes descritos.

La medición de la PP medida a través de la fijación de carbono es un dato general que incluye la aportación de todos los grupos de fitoplancton presentes en la muestra y con el análisis del perfil de los pigmentos fotosintéticos es posible estimar que grupos fueron los que mayormente aportaron a la PP medida. En el periodo estratificado el grupo de las cianobacterias contribuyó con el 24% a la PP total, en transición y mezcla disminuyó a 5 y 6 %, respectivamente. La fucoxantina (diatomeas) contribuyó a la PP en 9, 11 y 11% durante estratificación, transición y mezcla, respectiva-

mente.

La 19'-BF es un pigmento característico de las crisofitas (silicoflagelados) y la 19'-HF de las primnesiofitas. En el periodo estratificado estos dos pigmentos no se encontraron (Tabla 1). Sánchez-Robles (2011) reportó ausencia de cocolitofóridos en el mismo sitio y fecha de muestreo utilizando microscopía para identificar fitoplancton. En el periodo estratificado esto destaca, ya que este grupo se halla en diferentes ambientes tolerando un amplio espectro de temperatura desde aguas cálidas tropicales y subtropicales hasta en aguas antárticas a 6°C, y hasta -1°C en aguas subárticas (Manton *et al.* 1976, 1977).

Tanto la 19'-HF como la 19'-BF se incrementan de estratificación a mezcla, aunque la 19'-BF es más importante. La 19'-BF es característica de las crisofitas las cuales incluyen al grupo de los silicoflagelados como el más importante que las representa en el ambiente marino. Los silicoflagelados proliferan a temperaturas inferiores a 15°C (Van Valkenburg & Norris, 1970; Van Valkenburg, 1980), condiciones que se presentan en el periodo de mezcla.

La fucoxantina es abundante y característica de las bacilariofitas (diatomeas). El incremento de estratificación a mezcla de la fucoxantina se debe a que las diatomeas proliferan rápidamente en respuesta a condiciones de enriquecimiento de nutrientes como ocurre con las surgencias costeras. Sánchez-Robles (2011) encontró frente a Bahía Magdalena incrementos de microplancton (principalmente diatomeas) cuando se presentaron las máximas concentraciones de NO₃⁻ en el periodo de máxima actividad de surgencias (marzo-junio 2009).

Las cianobacterias (zeaxantina) proliferan en aguas cálidas tropicales y subtropicales con baja concentración de nutrientes (aguas oligotróficas) (Jeffrey *et al.*, 1997). El periodo de estratificación coincide con las características antes mencionadas es por ello que en dicho periodo se registró la máxima concentración (2.77 mg m⁻² ±0.09) de zeaxantina. Sin embargo, también se registró una concentración significativa en el periodo de mezcla (1.75 mg m⁻² ±1.93). La presencia de los productores primarios de talla pequeña (pico y nanoplancton) está confinada a ambientes oligotróficos (periodo estratificado) (Barber & Hiscock, 2006). Sin embargo, estudios recientes muestran la importancia del fitoplancton de talla pequeña en la trama trófica en zonas costeras eutróficas como las condiciones de enriquecimiento de la etapa de mezcla (Barber & Hiscock, 2006), de tal manera que pueden aportar un alto porcen-

taje de la biomasa fotosintética total (entre el 30 y 50%) (Campbell *et al.*, 1994) en este tipo de ambientes. En este trabajo las cianobacterias en el periodo de estratificación aportaron 24% a la biomasa respecto a la clorofila *a*. La presencia de cianobacterias (zeaxantina) en el periodo de mezcla (6% a la biomasa respecto a la clorofila *a*) es una muestra de que el picoplancton contribuye a la productividad primaria en esta zona de surgencias. En las costas de BC, Millán *et al.* (2010) reportaron para noviembre 2002 y 2003 que nano y picoplancton dominaron la comunidad del fitoplancton, para junio 2003 destacó al microplancton como el grupo dominante. Un resultado similar a este se encontró en nuestro estudio.

CONCLUSIONES

Las condiciones hidrográficas frente a Bahía Magdalena medidas durante el ciclo anual se caracterizan por mostrar dos patrones. El primero se refiere a la estructura física de la columna de agua medida a través del Índice de Estratificación Térmica que describe tres etapas hidrográficas: estratificación (agosto 2008 a noviembre 2008), transición (diciembre 2008 al 14 de marzo 2009) y mezcla (del 26 marzo a junio del 2009). El segundo se refiere a la distribución temporal, la cual presenta dos condiciones. La primera comprende desde finales del verano y el otoño con presencia de agua cálida, salina y baja densidad producto de la influencia de agua tropical y subtropical superficial (Fig. 2a, b y c), debilitamiento de los vientos (Fig. 3) y el incremento del calentamiento solar (Fig. 2a). La segunda condición comprende de primavera (marzo) a inicios de verano (junio) y presenta agua fría, menos salina y alta densidad producto de la influencia de la CC (modificada) y las surgencias costeras locales y regionales advectadas hasta la zona de estudio por las corrientes superficiales.

Los altos niveles de productividad primaria *in situ* en primavera e inicios de verano ($1.93 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) están modulados por la máxima intensidad de surgencias ($125 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ 100 m}^{-1}$ línea de costa) que acarrearán alta concentración de nutrientes a la zona eufótica. Los niveles moderados ($0.73 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) observados en otoño-invierno son modulados por la estratificación térmica de la columna de agua asociada con baja intensidad de surgencias ($66 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ 100 m}^{-1}$ línea de costa). Esto induce baja concentración de nutrientes en la zona eufótica.

En el periodo de alta productividad se presenta el mayor porcentaje (72%) de la PP total en la primera profundidad óptica de la zona eufótica (33% irradiancia).

El incremento de la concentración de los pigmentos fotosintéticos en el ciclo anual analizado están modulados por las condiciones hidrográficas de la columna de agua, los cuales se incrementan de estratificación a mezcla.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la valiosa colaboración de la IBQ Celina Beltran Camacho en el análisis de nutrientes. La radioactividad final de las muestras fue determinada en el Departamento de Oceanografía Biológica del CICESE. Los análisis de nutrientes y de pigmentos fotosintéticos se hicieron en: Laboratorio de Análisis Químico de Aguas y Laboratorio de Pigmentos del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, SC.

REFERENCIAS

- Almazán-Becerril, A., E. García-Mendoza & D. A. Rivas-Camargo. 2010. Distribución de pigmentos fotosintéticos y grupos de fitoplancton durante octubre de 2003. 263-276, en: Gaxiola-Castro G. & Durazo-Arvizu R. (Eds.). *Dinámica del Ecosistema Pelágico frente a Baja California, 1997-2007: Diez años de investigaciones de la Corriente de California*. Instituto Nacional de Ecología. México.
- Amador J. A., E. J. Alfaro, O. G. Lizano & O. V. Magaña. 2006. Atmospheric forcing of the Eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography*, 69: 101-142. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2006.03.007>
- Auad, G., D. Roemmich & J. Gilson. 2011. The California Current System in relation to the Northeast Pacific Ocean circulation. *Progress in Oceanography*, 91: 576-592. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2011.09.004>
- Barber, R. T. & M. R. Hiscock. 2006. A rising tide lifts all phytoplankton: Growth response of other phytoplankton taxa in diatom-dominated blooms. *Global Biogeochem. Cycles*, 20: 1-12. <https://doi.org/10.1029/2006GB002726>
- Bakun, A. & C. S. Nelson. 1977. Climatology of upwelling related process of Baja California. *CalCOFI Reports*, 19: 107-127.
- Camacho-Ibar, V. F., J. D. Carriquiry & S. V. Smith. 2003. Non-conservative P and N Fluxes and Net Ecosystem Production in San Quintin Bay, México. *Estuaries*, 26: 1220-1237. <https://doi.org/10.1007/BF02803626>
- Carr, M. E. & E. J. Kearns. 2003. Production regimes in four Eastern Boundary Currents systems. *Deep Sea Research II*, 50: 3199-3221. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2003.07.015>

- Campbell, L., H.A. Nolla & D. Vaultot. 1994. The importance of *Prochlorococcus* to community structure in the central North Pacific Ocean. *Limnology and Oceanography*, 34: 954-961.
<https://doi.org/10.4319/lo.1994.39.4.0954>
- Castro, R. & A. Martínez. 2010. Variabilidad espacial y temporal del campo de viento frente a la Península de Baja California. 129-147, en: Gaxiola Castro, G. y R. Durazo (eds.). *Dinámica del Ecosistema Pelágico frente a Baja California, 1997-2007: Diez años de Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California*.
- Durazo, R., A. M. Ramírez-Manguilar, L. E. Miranda & L. A. Soto-Mardones. 2010. Climatología de variables hidrográficas. 25-57, en: Gaxiola-Castro, G. & R. Durazo (eds.). *Dinámica del Ecosistema Pelágico frente a Baja California, 1997-2007: Diez años de Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California*.
- Durazo, R. & T. R. Baumgartner. 2002. Evolution of oceanographic conditions off Baja California, 1997-1999. *Progress in Oceanography*, 54: 7-31.
[https://doi.org/10.1016/S0079-6611\(02\)00041-1](https://doi.org/10.1016/S0079-6611(02)00041-1)
- Durazo R. 2009. Climate and upper ocean variability off Baja California, Mexico: 1997-2008. *Progress in Oceanography*, 83: 361-368.
<https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.07.043>
- Espinosa-Carreón, T. L., T. 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: 1-20.
<https://doi.org/10.1029/2003JC002105>
- Gaxiola-Castro, G., B. Lavaniegos-Espejo, A. Martínez, R. Castro & T. L. Espinosa-Carreón. 2010a. Pelagic ecosystem response to climate variability in the Pacific Ocean off Baja California. 163-182, en: Simard, S. W. & M. E. Austin (eds.). *Climate Change and Variability*.
<https://doi.org/10.5772/9807>
- Gaxiola-Castro, G., M. E. De la Cruz-Orozco, S. Nájera-Martínez, M. D. Martínez-Gaxiola & A. Rodríguez-Gamboa. 2010b. Nutrientes: Efectos de procesos locales y de gran escala. 209-222, en: Gaxiola-Castro, G. & R. Durazo (eds.). *Dinámica del Ecosistema Pelágico frente a Baja California, 1997-2007: Diez años de Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California*.
- Gómez-Valdés, J. & G. Jerónimo. 2009. Upper mixed layer temperature and salinity variability in the tropical boundary of the California Current, 1997-2007. *Journal of Geophysical Research*, 114: 1-14.
<https://doi.org/10.1029/2008JC004793>
- González-Silvera A., R. Millán-Núñez, E. Santamaría del Ángel, O. Barocio-León & C.C. Trees. 2010. Absorción de luz y estructura de tamaño del fitoplancton. 291-304, en: Gaxiola-Castro, G. & R. Durazo (eds.). *Dinámica del Ecosistema Pelágico frente a Baja California, 1997-2007: Diez años de Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California*.
- Hickey, B. M. 1998. Coastal oceanography of western North America, from the tip of Baja California to Vancouver Island. *In The Sea*, 11: 345-393.
- Jeffrey S. W., R. F. C. Mantoura & S. W. Wright. 1997. *Phytoplankton Pigments in Oceanography: Guidelines to modern methods*. Monographs on Oceanographic Methodology No. 10. UNESCO Publishing. 661 p.
- Kirk, T. J. 1994. *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems*. Cambridge University Press, New York.
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511623370>
- Kahru M. & B. G. Mitchell. 2000. Influence of the 1997-98 El Niño on the surface chlorophyll in the California Current. *Geophysical Research Letters*, 27: 2937-2940.
<https://doi.org/10.1029/2000GL011486>
- Lachkar, Z. & N. Gruber. 2011. What controls biological productivity in coastal upwelling systems? Insights from a comparative modeling study? *Biogeochemical Discussions*, 8: 5617-5652.
<https://doi.org/10.5194/bgd-8-5617-2011>
- López-Cortés, D. J., J. J. Bustillos-Guzmán, I. Gárate-Lizárraga, F. E. Hernández-Sandoval & I. Murillo-Murillo. 2003. Phytoplankton biomasses and hydrographic conditions during El Niño 1997-1998 in Bahía Concepción, Gulf of California, México. *Geofísica Internacional*, 42(3): 495-504.
- López-Calderón, J., H. Manzo-Monroy, E. Santamaría del Ángel, R. Castro, A. González-Silvera & R. Millán-Núñez. 2006. Mesoscale variability of the Mexican Tropical Pacific using TOPEX and SeaWiFS data. *Marine Science*, 32: 539-549.
<https://doi.org/10.7773/cm.v32i3.1125>
- Lynn, R. J. & J. J. Simpson. 1987. The California Current System: The seasonal variability of its physical characteristics. *Journal of Geophysical Research*, 92: 947-966.
<https://doi.org/10.1029/JC092iC12p12947>

- Mantyla, A. W., Bograd S. J. & Venrick E. L. 2008. Patterns and controls of chlorophyll-a and primary productivity cycles in the Southern California Bight. *Journal Marine Systems*, 73: 46-60.
<https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2007.08.001>
- Manton, I., J. Sutherland & K. Oates. 1976. Artic coccolithophorids: two species of *Turrisphaera* gen. nov. from West Greenland, Alaska and the Northwest passage. *Proceedings of the Royal Society of London*, 194: 179-194.
<https://doi.org/10.1098/rspb.1976.0072>
- Manton, I., J. Sutherland & K. Oates. 1977. Artic coccolithophorids: *Wigwamma artica* gen. et sp. nov. from Greenland and artic Canada. *Proceedings of the Royal Society of London*, 197: 145-168.
<https://doi.org/10.1098/rspb.1977.0063>
- Millán-Nuñez, E. 2010. Variabilidad interanual del nano y microfitoplancton: Inviernos 2001 y 2007. 241-262, en: Gaxiola-Castro, G. & Durazo-Arvizu R. (Eds.) *Dinámica del Ecosistema Pelágico frente a Baja California, 1997-2007: Diez años de investigaciones de la Corriente de California*. Instituto Nacional de Ecología. México.
- Parsons, T. R. 1984. *A manual of chemical and biological methods for seawater analysis*. Pergamon Press. 172.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-030287-4.50053-0>
- Pérez-Brunius, P., M. López, A. Pares-Sierra & J. Pineda. 2007. Comparison of upwelling indices off Baja California derived from three different wind data sources. *CalCOFI Reports*, 48: 204-214.
- Roden, G. I. 1971. Aspects of the transition zone in the Northeastern Pacific. *Journal of Geophysical Research*, 76: 3462-3475.
<https://doi.org/10.1029/JC076i015p03462>
- Rodríguez-Mata, L. M. 2006. *Estudio a microescala de los nutrientes y variables hidrológicas en Bahía Magdalena, B. C. S., México*. Tesis de maestría. CICIMAR-IPN, 89 p.
- Rossi, V., C. López, E. Hernández-García, J. Sudre, V. Garçon & Y. Morel. 2009. Surface mixing and biological activity in the four Eastern Boundary Upwelling Systems. *Geophysical Processes*, 16: 557-568.
<https://doi.org/10.5194/npg-16-557-2009>
- Sánchez-Robles, C. 2011. *Estructura trófica planctónica (<200um) en la zona de surgencias frente a Bahía Magdalena*. Tesis de maestría. CICIMAR-IPN, 112 p.
- Sigman, D. M., J. Granger, P. J. DiFiore, M. F. Lehmann, R. Ho, G. Cane & A. Van Geen. 2005. Coupled nitrogen and oxygen isotope measurements of nitrate along the eastern North Pacific margin. *Global Biogeochemical Cycles*, 19: 1-14.
<https://doi.org/10.1029/2005GB002458>
- Stemann-Nielsen, E. 1952. The use of radioactive carbon (¹⁴C) for measuring organic production in the sea. *Journal. Cons. Int. Explor. Mer.*, 8: 117-140.
<https://doi.org/10.1093/icesjms/18.2.117>
- Strickland, J. D. H. & T. R. Parsons. 1972. *A practical handbook of seawater analysis*. Second Edition, Bulletin 167. Fisheries Research Board of Canada.
- Van Valkenburg, S. D. 1980. Silicoflagelates. 355-350, en: Cox, E. R. (Ed.). *Phytoflagellates*. Elsevier.
- Van Valkenburg, S. D. & R. E. Norris. 1970. The growth and morphology of the silicoflagellate *Dictyocha fibula* Ehrenberg in culture. *Journal Phycology*, 6: 48-54.
<https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.1970.tb02356.x>
- Venrick, L. E. 2002. Floral patterns in the California Current System off southern California: 1990-1996. *Journal Marine Research*, 60:171-189.
<https://doi.org/10.1357/002224002762341294>
- Vidussi-Claustre, F. H., J. Bustillos-Guzmán, C. Cailleau & J. C. Marty. 1996. Rapid HPLC method for determination of phytoplankton chemotaxonomic pigments: separation of chlorophyll a from divinyl-chlorophyll a and zeaxanthin from lutein. *Journal of Plankton Research*, 18: 2377-2382.
<https://doi.org/10.1093/plankt/18.12.2377>
- Zaytzev, O., R. Cervantes-Duarte, O. Sánchez-Montante & A. Gallegos-García. 2003. Coastal upwelling activity on the Pacific Shelf of the Baja California Peninsula. *Journal of Oceanography*, 59: 489-502.
<https://doi.org/10.1023/A:1025544700632>
- Zaitzev, O., O. Sánchez-Montante & M. Saldívar-Reyes. 2010. Seasonal variations of the thermohaline structure in the Magdalena-Almejas Bay lagoon system and adjacent sea. *Ciencias Marinas*, 36 (4): 413-432.
<https://doi.org/10.7773/cm.v36i4.1668>
- Zuria-Jordan, I. L., S. Álvarez-Borrego, E. Santa María del Ángel & F. E. Muller-Karger. 1995. Estimación de la biomasa fitoplanctónica derivada de datos de satélite frente a Baja California Sur. *Ciencias Marinas*, 21(3): 265-280.
<https://doi.org/10.7773/cm.v21i3.998>

Copyright (c) 2013 Murillo Murillo, I., R. Cervantes Duarte, G. Gaxiola Castro, S. López López, F. Aguirre Bahena, E. González Rodríguez, Á. Jiménez Illescas & F. E. Hernández Sandoval.



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia - Texto completo de la licencia](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)