

DISTRIBUCIÓN DE GRUPOS FUNCIONALES DE FITOPLANCTON EN LA ZONA EUFÓTICA DURANTE UN CICLO ANUAL EN BAHÍA DE LA PAZ, GOLFO DE CALIFORNIA

Verdugo-Díaz, Gerardo^{1*} & Ismael Gárate-Lizárraga¹

¹Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Departamento de Plancton y Ecología Marina, Apartado postal 592, Av. Instituto Politécnico Nacional S/N Col. Playa Palo de Santa Rita, La Paz, Baja California Sur, 23096, México. *Correspondencia del autor: gverdugo@ipn.mx

RESUMEN. La irradiancia juega un papel importante sobre la distribución de los grupos funcionales del fitoplancton a través de la zona eufótica. Con el propósito de caracterizar la variabilidad ambiental de la zona eufótica (tres niveles de irradiancia: 100, 10 y 1%) y su influencia sobre estos grupos funcionales, estos son abordados en este estudio. Asimismo, se determinaron los cambios en la estructura de los grupos funcionales del microfitoplancton como respuesta a la variabilidad en las condiciones hidrológicas. De esta manera, se presentan los resultados de la distribución vertical de la comunidad microfitoplanctónica en tres niveles de luz de la zona eufótica durante un ciclo anual (junio 2000-junio 2001) en un punto de muestreo dentro de Bahía de La Paz (24° 21.284 N; 110° 26.294 O). Se identificaron un total de 62 taxa: 45 especies de diatomeas (72.58 %); 11 de dinoflagelados (17.74 %), 3 de silicoflagelados (4.83 %), 1 ciliado (1.61%), 1 de cianofitas (1.61%), 1 de coccolitofóridos (1.61%). La mayor abundancia de diatomeas se registró en superficie, mientras que los dinoflagelados dominaron en el nivel con 10% de la irradiancia superficial; los silicoflagelados, aunque en menor magnitud, se asociaron al límite de la zona eufótica. A través del tiempo se registró la dominancia de diatomeas, seguidas por dinoflagelados en todos los niveles de irradiancia. Las condiciones ambientales durante el período cálido (>23°C) favorecieron a dinoflagelados autótrofos, mientras que el período de homogenización en la columna de agua (diciembre-abril) favoreció dinoflagelados heterótrofos del género *Protoperdinium* sobre la termoclina o debajo de la misma. La integración de asociaciones durante el período de homogeneidad en la columna de agua no fue clara debido a la mezcla de comunidades de fitoplancton provenientes de diferentes profundidades.

Palabras clave: Ciclo anual, zona eufótica, irradiancia, microfitoplancton, grupos funcionales, Golfo de California

Distribution of functional groups of phytoplankton in the euphotic zone during an annual cycle in Bahía de La Paz, Gulf of California

ABSTRACT. Irradiance plays an important role in the distribution of functional groups of phytoplankton in the euphotic zone. To characterize the environmental variability of the euphotic zone (in three levels of irradiance, 100, 10 and 1%) and its influence on the functional groups, the latter were studied. Similarly, changes in the structure of the microphytoplankton functional groups were determined as a response to the variability of hydrological conditions. Thus, results of the vertical distribution of microphytoplankton at three light quantity levels during an annual cycle (June 2000-June 2001) at a fixed sampling site in Bahía de La Paz (24° 21.284 N; 110° 26.294 W) are presented. A total of 62 taxa were identified: 45 diatom species (72.58%), 11 dinoflagellate species (17.74%), 3 species of silicoflagellates (4.83%), 1 ciliate species (1.61%), 1 cyanophyte (1.61%), and 1 coccolithophorid (1.61%). A higher abundance of diatoms was observed in the uppermost surface layer, while dinoflagellates were more abundant at the 10% irradiance level of the euphotic zone lower limit; silicoflagellates, although in a lesser magnitude, associated with the limit of the euphotic zone. Diatoms usually dominated, followed by dinoflagellates; this occurred at all three light quantity levels of the euphotic zone through the year. Environmental conditions during the warm period (>23°C) favored dinoflagellates; during the water-column homogenization period (December-April) conditions favored heterotrophic *Protoperdinium* species inhabiting the layers above or below the thermocline. However, the integration of species assemblages during the period of the homogenous water column was not clear due to mixing of different phytoplankton assemblages coming from different depth levels.

Keywords: Annual cycle, euphotic zone, irradiance, functional groups, microphytoplankton, Gulf of California.

Verdugo-Díaz, G. & I. Gárate-Lizárraga. 2018. Distribución de grupos funcionales de fitoplancton en la zona eufótica durante un ciclo anual en Bahía de La Paz, Golfo de California. *CICIMAR Oceánides*, 33(1):47-61.

INTRODUCCIÓN

La comunidad fitoplanctónica está constituida por diversos grupos taxonómicos que agrupan a su vez miles de especies, por lo cual la variabilidad temporal en su estructura y función es un aspecto de fundamental importancia para el metabolismo en los sistemas acuáticos, al estar modulados por la variabilidad ambiental (Calijuri *et al.*, 2002; Bortolini, *et al.* 2014). Los cambios en la estructura de la comunidad fitoplanctónica no se limitan a un cambio

en la composición de especies a través del tiempo, ya que diversos atributos de la comunidad pueden verse modificados dependiendo del factor o variable de presión que los provoque; la disponibilidad de nutrientes y la cantidad y la calidad de la luz disponible son algunos de los más importantes (Reynolds, 1977). Durante los últimos años se ha dedicado un gran esfuerzo a la investigación y a la propuesta de modelos biogeoquímicos que expliquen la estructura de esta comunidad (Anderson, 2005), y resalten la importancia de los grupos funcionales del fitoplancton

ton: Sin embargo, los resultados no han sido concluyentes, ya que se requiere gran cantidad de trabajo de campo que muchas veces explica solo en parte la variabilidad de la estructura de la comunidad (Ward *et al.*, 2013; Kwiatkowski *et al.*, 2014). Esto puede tornarse aún más complicado cuando al cambio de la composición de especies, se le agrega la variabilidad espacial de la estructura de la comunidad a diferentes profundidades, lo que implica adaptaciones fisiológicas relacionadas con la composición pigmentaria que les permitan utilizar las diferentes longitudes de onda y/o magnitudes de irradiancia existentes a diferentes profundidades. Estas pequeñas o grandes variaciones no solamente afectan a las funciones morfológicas y fisiológicas de los grupos de fitoplancton implicados, sino que pueden llegar a cobrar mayor importancia ecológica al ser factor condicionante para el desarrollo de otros niveles tróficos e incluso influir en las propiedades ópticas del medio marino con las consiguientes repercusiones ecológicas (Stramsky & Kiefer, 2001). En este estudio se planteó el objetivo de determinar la variabilidad estructural de los principales grupos fitoplanctónicos presentes en la zona eufótica y su relación con algunas variables físico-químicas durante un ciclo anual en Bahía de La Paz.

MATERIAL Y MÉTODOS

La Bahía de La Paz está ubicada sobre el margen suroriental de la Península de Baja California entre los 24° 10' y los 24° 47' N, y los 110° 20' y 110° 44' W (Fig. 1). Presenta un área aproximada de 2635 Km², tiene forma semi-elíptica con su eje mayor orientado en dirección NNW-SSE. La bahía se comunica con el Golfo de California por medio de dos bocas, una al noreste (Boca grande) y otra al este (Boca chica o Canal de San Lorenzo). El límite sureste de la boca grande se encuentra en los islotes. El límite al noroeste es Punta de Mechudo, donde hidrodinamicamente se marca la diferencia con el Canal de San José que es un sistema hidrodinámico distinto (Jiménez-Illescas *et al.*, 1997).

Se seleccionó una estación en la parte central de la Bahía de La Paz, localizada en los 24° 21.284 N; 110° 26.294 W, en donde se realizaron muestreos mensuales durante un ciclo anual (junio de 2000 a junio de 2001), exceptuando julio y diciembre del 2000. Se consideraron tres niveles de profundidad, mismos que fueron determinados por los porcentajes de penetración de la luz (100, 33 y 1%), calculados mediante el coeficiente de atenuación de la luz (Kd) a partir de la profundidad de desaparición del disco de Secchi (Brown *et al.*, 1989).

Mediante una botella Niskin se tomaron muestras de agua en las tres profundidades mencionadas, para posteriormente determinar la composición específica y la abundancia fitoplanctónica. Tanto el análisis cuantitativo como el cualitativo se realizaron siguiendo la metodología de Utermöhl (Hasle,

1978). Las muestras fueron fijadas en solución de lugol al 2%. Para estos análisis se utilizó un microscopio invertido con óptica planocromática. Se cuantificaron por separado las fracciones nano (5-20 µm) y microfitorplánctónica (> 20 µm), utilizando principalmente un objetivo de 40x. La identificación taxonómica del microfitorplanton se logró utilizando los trabajos de Hustedt (1930, 1959), Cupp (1943), Licea-Durán (1974), Sundström (1986), y Hasle y Syvertsen (1997), para diatomeas; Schiller (1933), Taylor (1976), Pesantes (1978), Balech (1988), y Steidinger y Tangen (1997), para dinoflagelados; Murray y Schrader (1983), y Schrader *et al.* (1986) para silicoflagelados.

Se describió la estructura de la comunidad microfitorplánctónica mediante índices ecológicos como el de diversidad de Shannon (H') (Pielou, 1969), índice de redundancia (REDI) (McIntire & Overton, 1971) y el Índice de Valor Biológico (IVB) (Dobs, 1981). De igual manera, se recolectó agua de los niveles considerados a fin de realizar la determinación de nitritos y nitratos por el método de Parsons *et al.* (1984), y se realizaron perfiles verticales de salinidad y temperatura con la finalidad de determinar las condiciones hidrográficas con un CTD Sea Bird-25, para posteriormente calcular el índice de estratificación propuesto por Simpson y Hunter (1974)

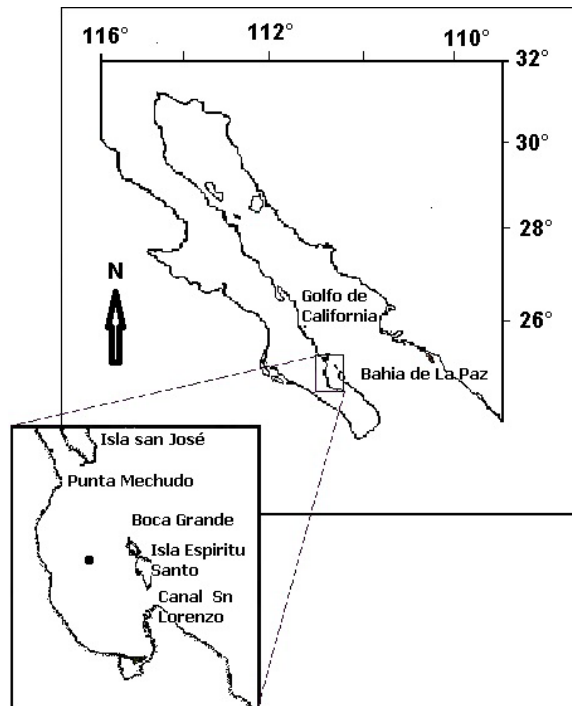


Figura 1.- Área de estudio y localización de la estación de muestreo.

RESULTADOS

Durante el período cálido (junio, agosto y septiembre) en el cual se registraron temperaturas superiores a los 23°C, se evidencia el inicio de la termoclina, aproximadamente a los 20 m de profundidad. Con el descenso de la temperatura y el inicio en el cambio del patrón de vientos dominantes, a partir de octubre se observó el hundimiento paulatino de la termoclina, así como la homogeneización de la columna de agua. Cuando el período de transición da paso a la temporada fría (diciembre-abril) las isotermas se presentan de manera vertical, evidenciando una capa de mezcla profunda. A finales de este período se presenta el segundo tiempo de transición, caracterizado una termoclina a menor profundidad y un incipiente inicio de la estratificación en donde las isotermas presentan el inicio de una distribución horizontal, para posteriormente evidenciar una columna de agua estratificada durante de mayo y junio del 2001 (Fig. 2).

Se presenta la distribución de las isopícnas como evidencia para localizar los períodos de estratificación y de homogeneidad en la columna de agua. Se observó durante el período cálido un incremento gradual en los valores de sigma-t conforme se incrementa la profundidad. Este patrón es consistente en los primeros 40 m de profundidad. Por lo que respecta al período frío, este presentó una distribución homogénea de las isopícnas en la vertical, confirmando una capa de mezcla de aproximadamente 60 m de profundidad (Fig. 3).

Con la finalidad de determinar la estructura de la columna de agua, se calculó el Índice de Estrati-

ficación de Simpson (IES) a partir de los registros de temperatura, densidad y sigma t . Sus valores representan la cantidad de energía mecánica requerida para producir mezcla vertical. Si estos tienden a cero, se relacionan con una columna de agua altamente mezclada, incrementando sus valores conforme se presenta la estratificación. Respecto a este índice, de junio a septiembre de 2000 se registraron valores superiores a los 200 $J m^{-3}$. En octubre, que es considerado como período de transición, se observó una clara disminución (165.8 $J m^{-3}$). Durante noviembre, enero y febrero el IES presentó valores de cero al estar la columna de agua completamente mezclada (0 a 50 m). Durante marzo, abril y mayo se registraron valores entre los 150 y 160 $J m^{-3}$ meses que se consideraron como período cálido. Durante junio 2001 se superaron nuevamente los 200 $J m^{-3}$ (Fig. 4).

La distribución de los nitritos en la zona eufótica presentó valores inferiores a 0.2 μM durante el período comprendido entre junio y octubre de 2000. Al inicio de la homogeneización en la columna de agua (noviembre), sus valores registraron un incremento gradual, alcanzando sus máximos durante marzo (1.2 μM). Posteriormente, se inició un decremento en las concentraciones de nitritos durante abril, mayo y junio; asimismo, se observó una distribución estratificada de este nutriente (Fig. 5).

La distribución de los nitratos en la zona eufótica se presentó de manera estratificada durante todo el año. Los valores menores (< 2.5 μM) se asociaron a la capa superficial, principalmente durante el período cálido (julio a septiembre del 2000). Los valores máximos se presentaron en profundidades ma-

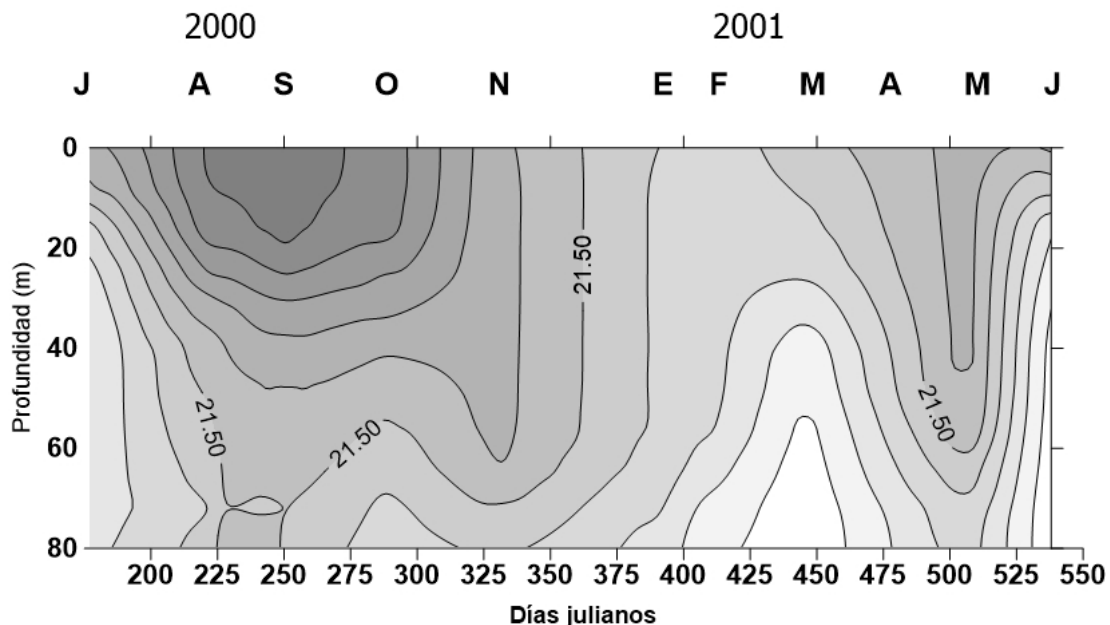


Figura 2.- Distribución vertical de la temperatura a través del ciclo anual (días Julianos) en la estación de muestreo en Bahía de La Paz (2000-2001).

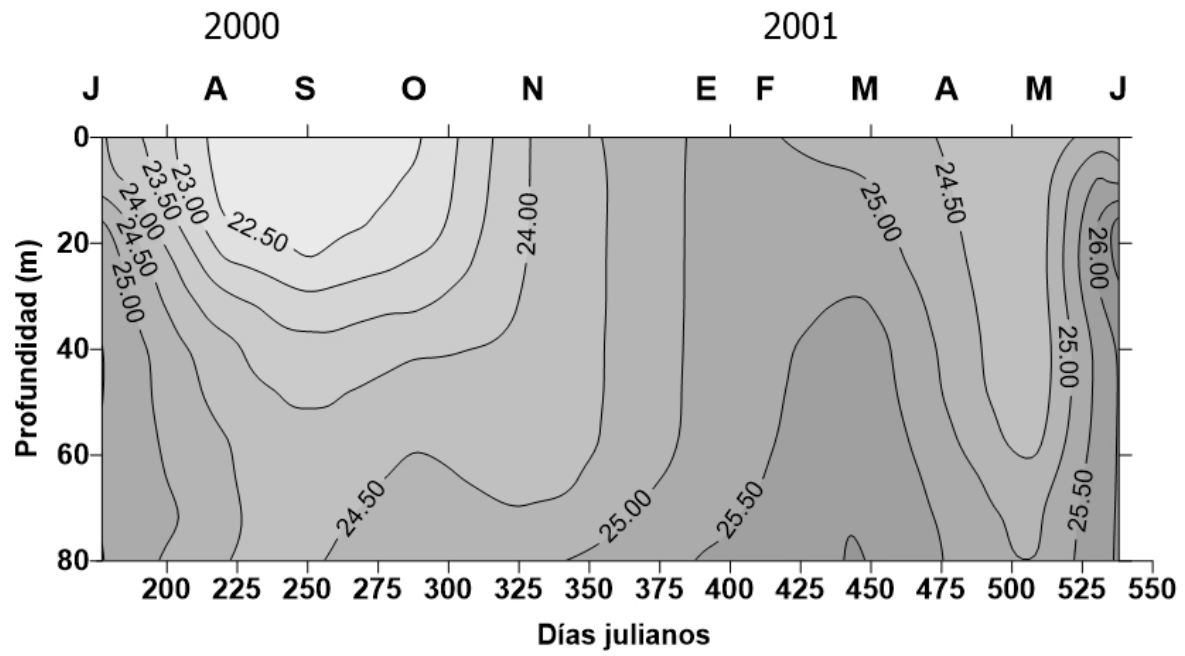


Figura 3.- Distribución vertical de sigma-t a través del ciclo anual (días Julianos), en la estación de muestreo en Bahía de La Paz (2000-2001).

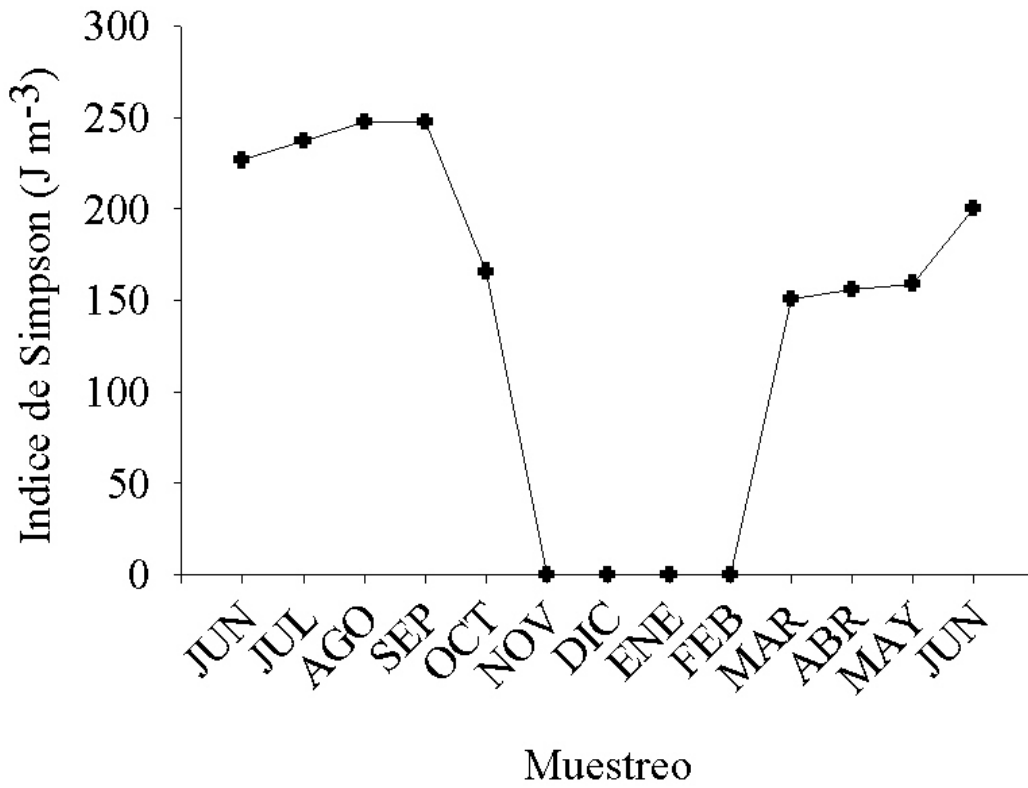


Figura 4.- Valores del IES de junio del 2000 a junio del 2001 en Bahía de La Paz.

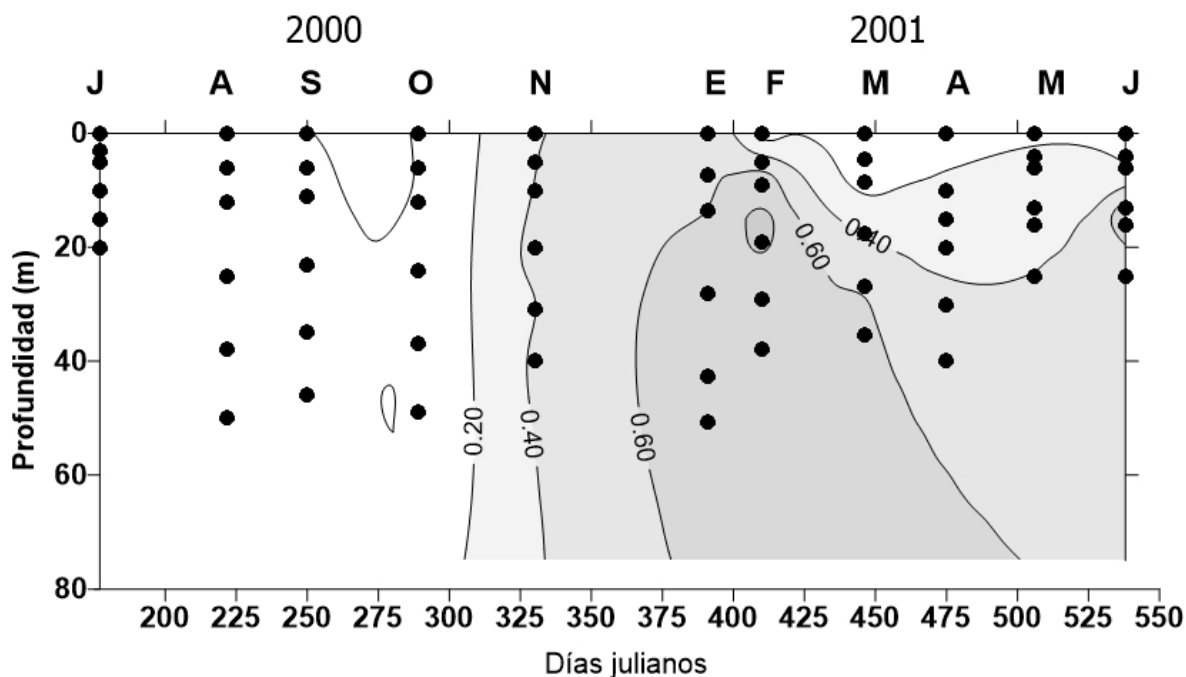


Figura 5.- Distribución vertical de los nitritos a través del ciclo anual (días Julianos) en la estación de muestreo en Bahía de La Paz (2000-2001).

yores de la zona eufótica. Durante octubre de 2000 y marzo de 2001 fue evidente la incursión de agua profunda hacia la zona eufótica con el consiguiente aporte de nitratos hacia esta zona iluminada (Fig. 6).

En relación con el elenco sistemático determinado a través del año en la zona eufótica, se identificaron un total de 62 taxa; de estos, 45 (72.58 %) corresponden a diatomeas, 11 (17.74 %) a dinoflagelados, tres silicoflagelados (4.83 %) y 1 (1.5 %) especie de cianofita, de cocolitoforido (1.63%) y de ciliado (1.63%) (Tabla 1). Realizando un análisis de la distribución porcentual de los principales grupos fitoplanctónicos en tres niveles de la zona eufótica (100, 10 y 1%), las diatomeas registraron su mayor representación en el nivel superficial, mientras que los dinoflagelados estuvieron mayormente representados en el nivel de 10% de la irradiancia superficial; los silicoflagelados presentaron su mayor importancia porcentual hacia el límite de la zona eufótica (Fig. 7).

La fracción de mayor tamaño o microfitoplancton registrada en el nivel superficial no presentó una preferencia por el período cálido o frío; su comportamiento fue más bien homogéneo a través del año con valores que oscilaron entre 500 y 2,600 cél L⁻¹; a excepción de mayo en que presentó la máxima abundancia que fue de 9,300 cél L⁻¹ debido a la proliferación de *Pseudo-nitzschia delicatissima*. Para el nivel de 10% de la irradiancia superficial se observó un comportamiento similar, la proliferación de *P. delicatissima* también ocasionó la abundancia mayor que fue de 6,300 cél L⁻¹ en total. En este nivel,

además, se presentó una abundancia alta durante junio (6200 cél L⁻¹) ocasionada por la proliferación de esta misma especie y del ciliado *Messodinium rubrum*. Por lo que respecta a las abundancias del microfitoplancton en el límite de la zona eufótica, se observó una curva similar a la del nivel anterior, sin embargo, es notoria la proliferación de mayor magnitud registrada para esta fracción que se dio durante junio de 2000, la cual alcanzó las 14,000 cél L⁻¹ y estuvo conformada de manera mayoritaria por *Thalassiosira* sp. (5,200 cél L⁻¹) y *Thalassionema frauenfeldii* con 3,400 cél L⁻¹ (Fig. 8).

La fracción fitoplanctónica de menor tamaño fue invariablemente la dominante a través del ciclo anual y en las diferentes profundidades consideradas. Su intervalo de variación fue amplio con valores que van desde 10,000 hasta 575,000 cél L⁻¹ (Fig. 9).

En cuanto a la abundancia fitoplanctónica total se observó el mismo comportamiento que presentó la fracción de menor tamaño, ya que la aportación del nanofitoplancton generalmente es mayor al 95% (Fig. 10).

En el nivel superficial la diversidad (H') alcanzó valores entre 0.83 y 2.70, presentando el valor mínimo durante mayo de 2001 y el máximo en marzo del mismo año. No se observó una asociación estrecha de este índice con las condiciones térmicas prevalientes en la capa superficial. Los valores mayores de diversidad a través del ciclo anual responden generalmente, tanto al componente de la riqueza específica, como al de la homogeneidad en la dis-

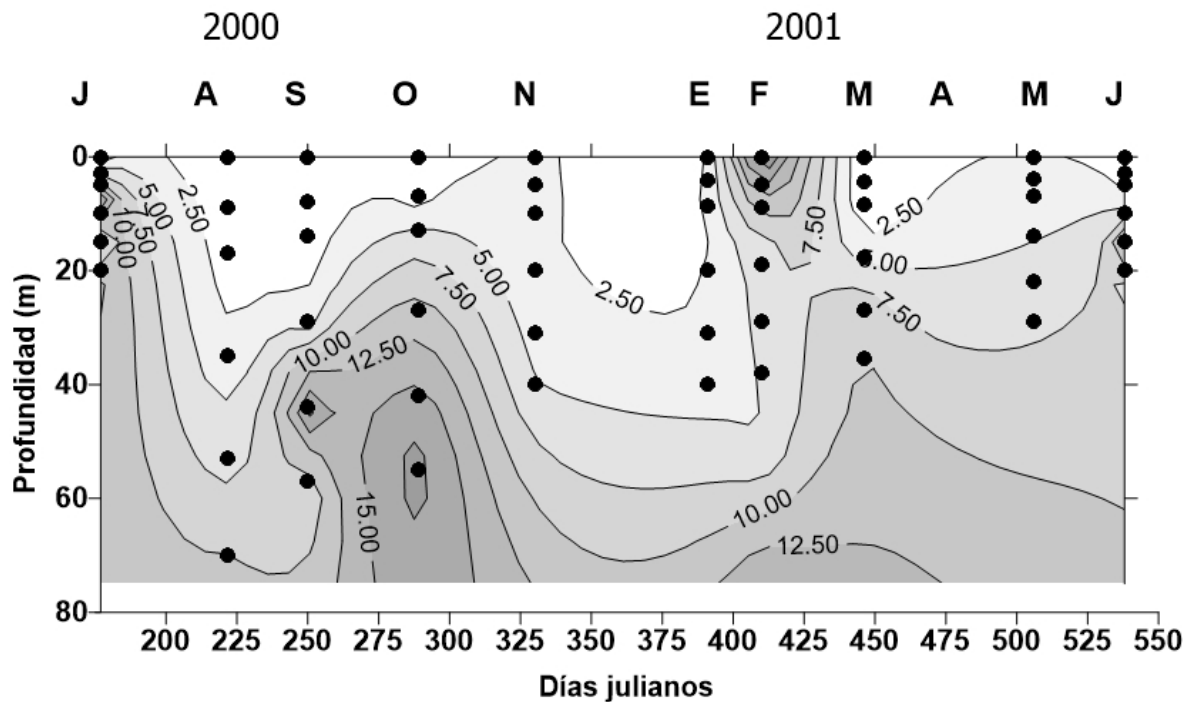


Figura 6.- Distribución vertical de los nitratos a través del ciclo anual (días Julianos) en la estación de muestreo en Bahía de La Paz (2000-2001).

tribución de las especies, ya que estos altos valores coinciden con las mayores riquezas específicas así, como con las redundancias menores. Por el contrario, los valores mínimos de diversidad coincidieron con las menores riquezas de especies, así como con las mayores redundancias. El alto valor de redundancia observado durante septiembre (0.45) fue ocasionado por la proliferación de *M. rubrum*, mientras que el registrado en mayo (0.64) fue provocado por el florecimiento de *P. delicatissima* (Fig. 11).

En relación con el segundo nivel considerado, la variación de la diversidad (H') fue entre 0.74 y 2.86. Para este nivel, aunque se presentó un comportamiento similar al anterior, se observó cierta tendencia a presentar los valores mayores de este índice durante el período frío. Aunque los dos componentes de la diversidad influyen generalmente en su aumento o disminución, se observaron casos como el de agosto, cuando la redundancia fue de 0.04 y la diversidad (1.39) no fue de las mayores, dado que la riqueza específica fue también baja. El caso de noviembre contrasta, ya que se registró una de las redundancias más bajas (0.045) y la mayor diversidad observada (2.86), lo cual está correlacionado con la mayor riqueza específica registrada durante este mes ($S=8$) del ciclo anual. La proliferación de la diatomea *P. delicatissima* durante octubre y mayo ocasionó la baja en la diversidad (Fig. 12).

En el límite inferior de la zona eufótica se registró un intervalo menor de variabilidad de la diversidad. Los valores de H' variaron entre 1.24 y 2.89, a

pesar de que la redundancia incrementó sus valores. Es importante hacer mención de que en este nivel también se observó la proliferación de *P. delicatissima* como la más importante. Asimismo, en este nivel también fue evidente la tendencia a presentar especies dominantes a través de todo el año, lo cual en cierta forma ocasionó que los valores de riqueza específica no incrementaran la diversidad (Fig. 13).

Mediante el cálculo del Índice de Valor Biológico fue posible evidenciar la mayor importancia del grupo de las diatomeas durante el período frío, así como la aparición o incremento en los valores de importancia de especies de dinoflagelados durante el período cálido. En la tabla 2 se muestran las especies que por su abundancia y persistencia a través del tiempo se consideraron las más importantes; de esta manera se pudieron identificar los taxones representativos del período cálido (*P. delicatissima*, *M. rubrum* y *Protoperidinium* sp.), y del período frío (*Coscinodiscus perforatus* y *Chaetoceros compressus*) y especies como *Thalassionema frauenfeldii* que se mantuvieron abundantes a través de la mayor parte del año.

DISCUSIÓN

La hidrodinámica de la estación de muestreo ubicada en la Bahía de La Paz mostró un patrón ampliamente reconocido para la zona sur del Golfo de California en donde se ha mencionado que la principal fuente de variación temporal permite el registro de un período cálido (junio-octubre) y otro frío (diciembre-abril), los cuales tienen repercusión directa

Tabla 1. Especies de microfitoplancton identificadas en Bahía de La Paz durante un ciclo anual (junio de 2000 a junio de 2001).

DIATOMEAS	<i>Thalassionema frauenfeldii</i> (Grunow) Tempère & Peragallo 1910
<i>Amphora</i> sp.	<i>Thalassionema nitzschioides</i> (Grunow) Mereschkowsky 1902
<i>Cerataulina pelagica</i> (Cleve) Hendey 1937	<i>Thalassiosira</i> sp 1
<i>Chaetoceros brevis</i> F.Schütt 1895	<i>Thalassiosira</i> sp 2
<i>Chaetoceros coarctatus</i> Lauder 1864	<i>Thalassiothrix delicatula</i> Cupp 1943
<i>Chaetoceros compressus</i> Lauder 1864	<i>Triceratium favus</i> Ehrenberg 1839
<i>Chaetoceros curvisetus</i> Cleve 1889	<i>Trieres mobiliensis</i> (Bailey) Ashworth & Theriot in Ashworth et al. 2013
<i>Chaetoceros lorenzianus</i> Grunow 1863	
<i>Chaetoceros peruvianus</i> Brightwell 1856	DINOFLAGELADOS
<i>Chaetoceros radicans</i> F.Schütt 1895	<i>Akashiwo sanguinea</i> (K.Hirasaka) G.Hansen & Moestrup in Daugbjerg, G.Hansen, J.Larsen & Moestrup 2000
<i>Chaetoceros</i> sp.	Dinoflagelado no identificado
<i>Coscinodiscus perforatus</i> Ehrenberg 1844	<i>Dinophysis caudata</i> Saville-Kent 1881
<i>Coscinodiscus</i> sp.	<i>Gymnodinium</i> sp.
<i>Cylindrotheca closterium</i> (Ehrenberg) Reimann & J.C.Lewin 1964	<i>Oxytoxum</i> sp.
<i>Detonula pumila</i> (Castracane) Gran 1900	<i>Prorocentrum koreanum</i> M.-S. Han, S. Y. Cho et P. Wang
<i>Grammatophora marina</i> (Lyngbye) Kützing 1844	<i>Prorocentrum</i> sp.
<i>Guinardia flaccida</i> (Castracane) H.Peragallo 1892	<i>Tripos brevis</i> (Ostenfeld & Johannes Schmidt) F.Gómez 2013
<i>Guinardia striata</i> (Stolterfoth) Hasle in Hasle & Syvertsen 1996	<i>Tripos furca</i> (Ehrenberg) F.Gómez 2013
<i>Haslea gigantea</i> (Hustedt) Simonsen 1974	<i>Tripos fusus</i> (Ehrenberg) F.Gómez 2013
<i>Hemiaulus chinensis</i> Greville 1865	<i>Tripos teres</i> (Kofoid) F.Gómez 2013
<i>Leptocylindrus danicus</i> Cleve 1889	
<i>Leptocylindrus mediterraneus</i> (H.Peragallo) Hasle 1975	SILICOFLAGELADOS
<i>Navicula cancellata</i> Donkin 1872	<i>Dictyocha fibula</i> Ehrenberg 1839
<i>Navicula</i> sp.	<i>Octactis pulchra</i> J.Schiller 1925
<i>Odontella aurita</i> (Lyngbye) C.Agardh 1832	<i>Octactis speculum</i> (Ehrenberg) F.H.Chang, J.M.Grieve & J.E.Sutherland in F.H.Chang, J.Sutherland & Bradford-Grieve 2017
<i>Planktoniella sol</i> (G.C.Wallich) Schütt 1892	
<i>Proboscia alata</i> (Brightwell) Sundström 1986	CIANOFITAS
<i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i> (Cleve) Heiden in Heiden & Kolbe 1928	<i>Trichodesmium</i> sp.
<i>Pseudo-nitzschia pacifica</i> (Cupp) Hustedt 1958	
<i>Pseudo-nitzschia pungens</i> (Grunow ex Cleve) Hasle 1993	
<i>Pseudo-nitzschia</i> sp.	
<i>Pseudosolenia calcar-avis</i> (Schultze) B.G.Sundström 1986	
<i>Rhizosolenia bergonii</i> H.Peragallo 1892	CILIADO
<i>Rhizosolenia castracaneii</i> H.Peragallo	<i>Messodinium rubrum</i> Lohmann, 1908
<i>Rhizosolenia clevei</i> Ostenfeld 1902	
<i>Rhizosolenia debyana</i> H.Peragallo 1892	
<i>Rhizosolenia setigera</i> Brightwell 1858	COCOLITOFÓRIDOS
<i>Rhizosolenia</i> sp.	
<i>Stephanopyxis palmeriana</i> (Greville) Grunow 1884	Cocolitofórido no identificado

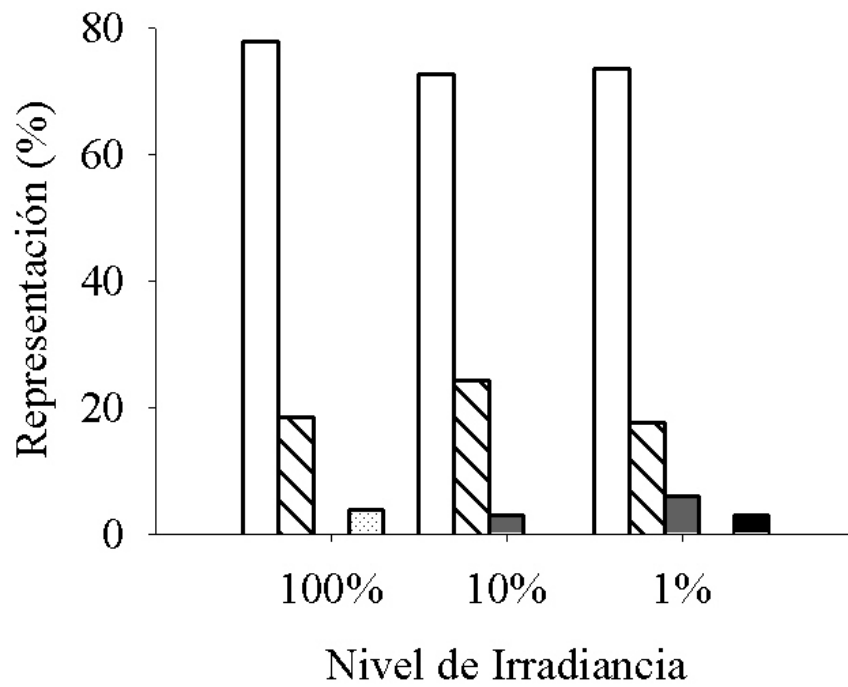


Figura 7.- Representación porcentual de los principales grupos fitoplanctónicos en la zona eufótica de Bahía de La Paz de junio de 2000 a junio de 2001: Diatomeas (barra vacía), dinoflagelados (barra con líneas diagonales), cianofitas (barra punteada), silicoflagelados (barra gris), coccolitofóridos (barra negra).

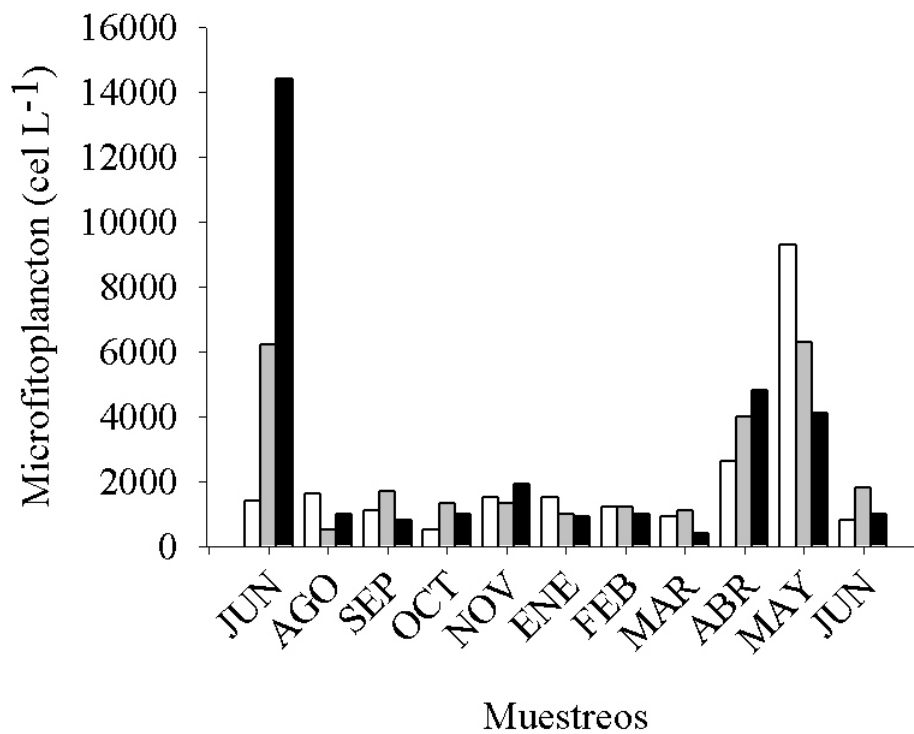


Figura 8.- Ciclo anual de la abundancia microfitoplanctónica de junio de 2000 a junio de 2001 en Bahía de La Paz. 100% (barra vacía), 10% (barra gris), 1% de la irradiancia superficial (barra negra).

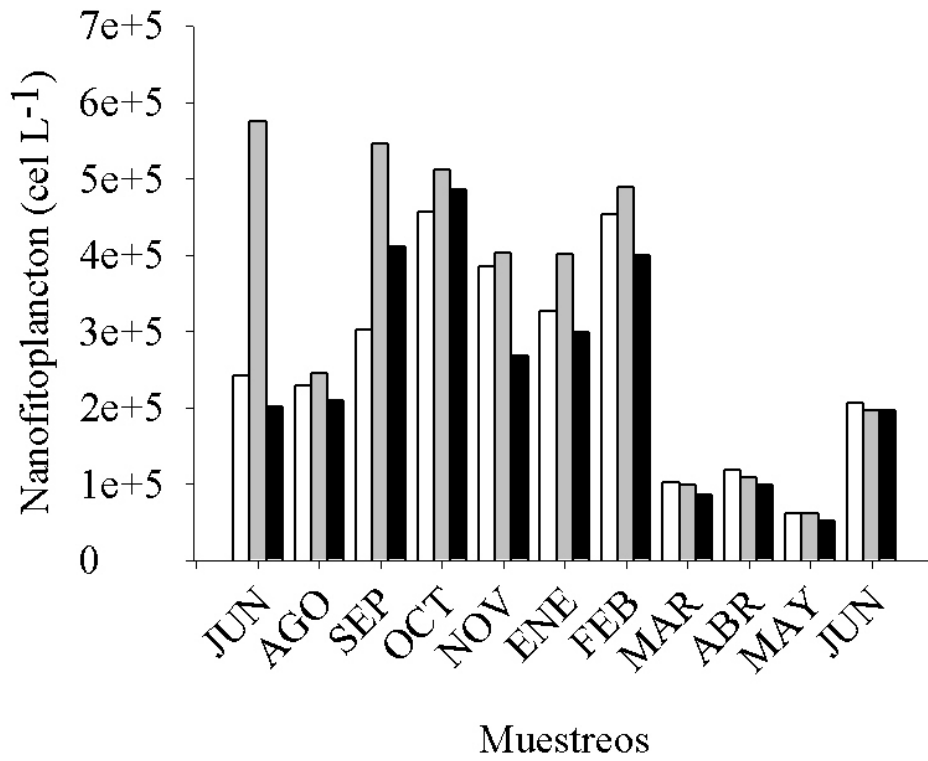


Figura 9.- Ciclo anual de la abundancia nanofitopláctónica de junio de 2000 a junio de 2001 en Bahía de La Paz. 100% (barra vacía), 10% (barra gris), 1% de la irradiancia superficial (barra negra).

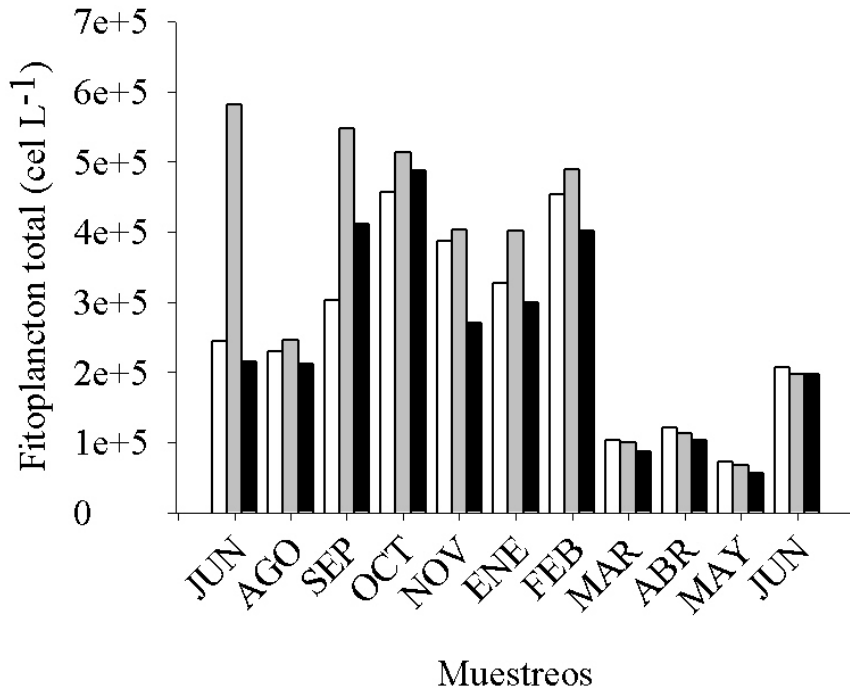


Figura 10.- Ciclo anual de la abundancia fitoplanctónica total de junio de 2000 a junio de 2001. 100% (barra vacía), 10% (barra gris), 1% de la irradiancia superficial (barra negra).

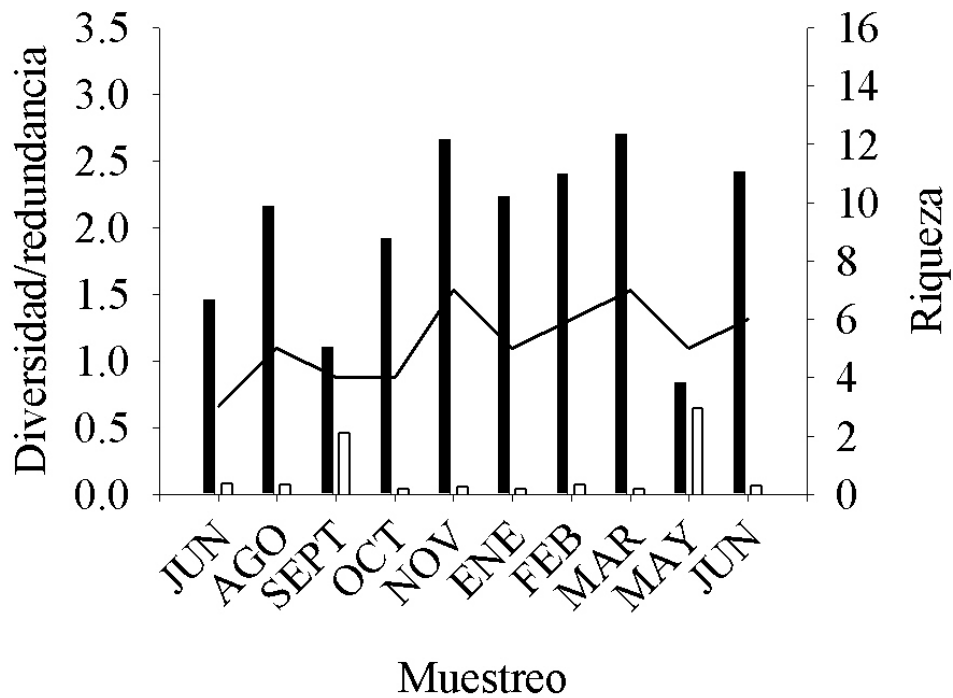


Figura 11.- Diversidad (barra negra), redundancia (barra vacía) y riqueza específica (línea continua) para el ciclo anual en el nivel superficial de junio de 2000 a junio de 2001 en Bahía de La Paz.

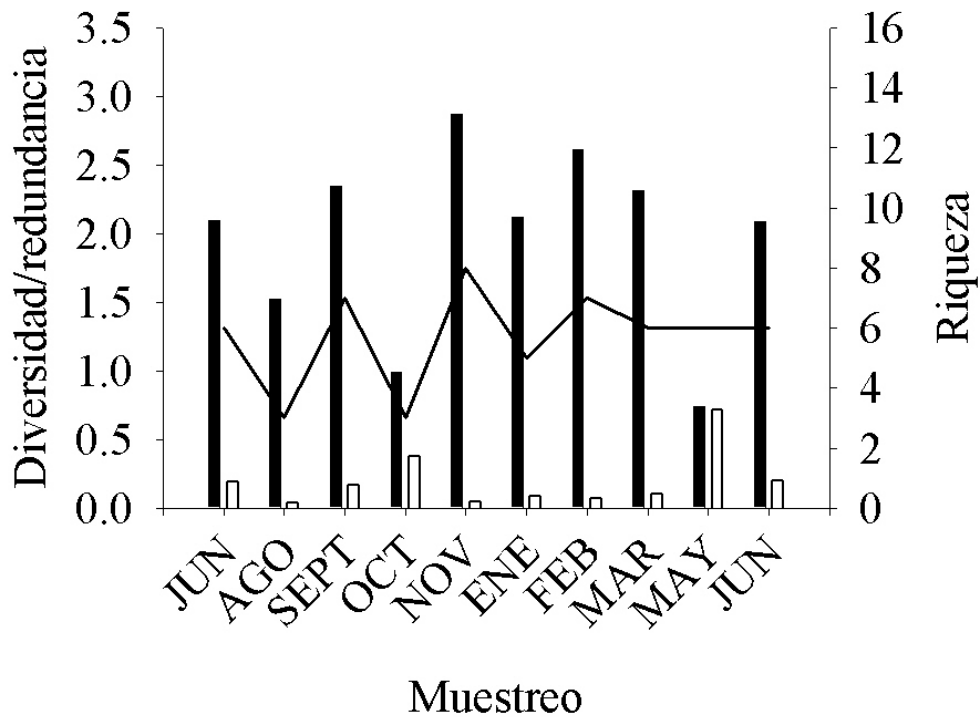
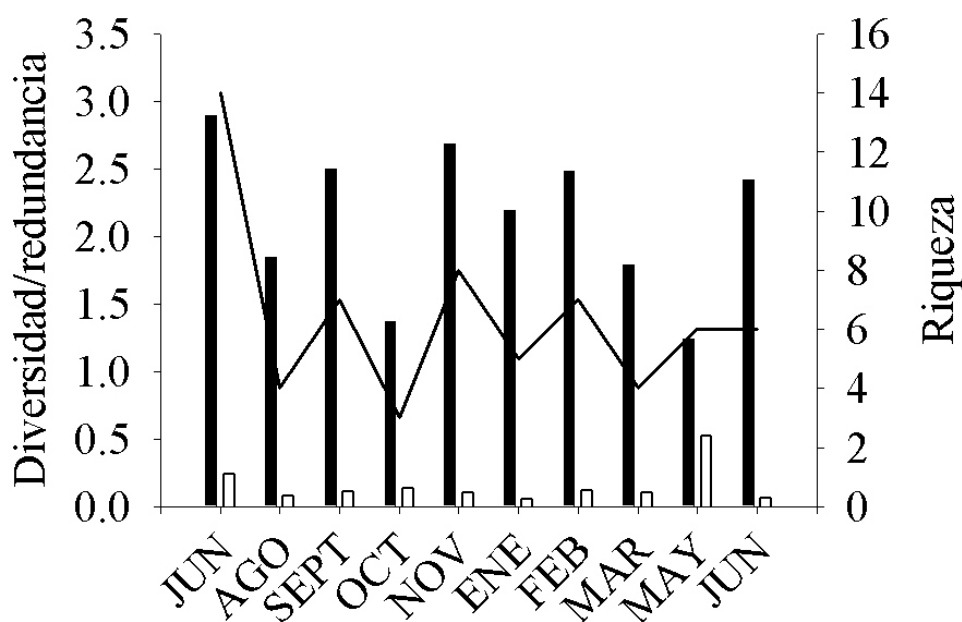


Figura 12.- Valores de diversidad (barra negra), redundancia (barra vacía) y riqueza específica (línea continua) para el ciclo anual en el nivel de 10% de la irradiancia superficial de junio de 2000 a junio de 2001 en Bahía de La Paz.



Muestreo

Figura 13.- Valores de diversidad (barra negra), redundancia (barra vacía) y riqueza específica (línea continua) para el ciclo anual en el nivel de 1% de la irradiancia superficial de junio de 2000 a junio de 2001 en Bahía de La Paz.

sobre importantes variables como la concentración de nutrientes y clorofila y por ende, en la estructura de la comunidad fitoplanctónica (Martínez-López *et al.*, 2001; Verdugo-Díaz *et al.*, 2010) y en la producción primaria (Verdugo-Díaz, *et al.*, 2014).

A pesar de la variabilidad en la estructura de la comunidad fitoplanctónica a través del tiempo y el espacio, fue clara la dominancia de las diatomeas sobre los demás grupos fitoplanctónicos, tanto durante los meses fríos como en los cálidos; si bien los dinoflagelados presentaron una mayor importancia durante el verano sin llegar a ser más abundantes que las diatomeas. Observaciones similares han sido realizadas en esta bahía (Signoret & Santoyo, 1980; Nienhuis, 1982), así como para Bahía Concepción,

B.C.S. (Martínez-López & Gárate-Lizárraga, 1994; Verdugo-Díaz *et al.*, 2010) y de manera general para los ambientes oceánico y costero (Gárate-Lizárraga *et al.*, 1990; Valiela, 1995). Al respecto, Chang *et al.* (2003), mencionan la mayor representación de las diatomeas en el ambiente marino, sobre todo durante la primavera cuando las condiciones de irradiancia y las concentraciones de nutrientes son óptimas para un rápido crecimiento, mismas que son favorables en primera instancia para diatomeas.

Dentro de la composición por tallas de la comunidad fitoplanctónica registrada en esta investigación se encontró una dominancia generalizada del nanofitoplancton a través del ciclo anual en donde su aporte a la abundancia total superó el 95%;

Tabla 2.- Principales especies determinadas mediante el cálculo del Índice de Valor Biológico.

Fecha/Especies	<i>P. delicatissima</i>	<i>C. perforatus</i>	<i>M. rubrum</i>	<i>Protoperdinium</i> sp	<i>T. frauenfeldii</i>	<i>C. compressus</i>
Junio 2000	95.7	0.0	88.4	13.8	28.3	0.0
Agosto	58.3	0.0	45.8	25.0	12.5	0.0
Septiembre	81.0	0.0	50.0	48.2	4.7	0.0
Octubre	81.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Noviembre	0.0	82.1	0.0	0.0	58.3	28.8
Enero 2001	0.0	41.1	0.0	0.0	15.6	62.2
Febrero	0.0	62.5	0.0	0.0	15.6	0.0
Marzo	29.8	61.4	0.0	27.2	0.0	0.0
Mayo	100.0	0.0	30.2	54.2	0.0	0.0
Junio	100.0	40.2	0.0	11.8	0.0	0.0

ello coincide con lo observado en bahías aledañas como Bahía Concepción, B.C.S. (Verdugo-Díaz *et al.*, 2010). Gilmartin & Revelante (1978) reportaron concentraciones altas de esta fracción en el Golfo de California ($0.3 - 2.0 \times 10^{-3}$ céls/l). Al ser la fracción dominante en cuanto a abundancia la de menor talla, puede inferirse su importancia como productores primarios de gran relevancia y ser concordantes con las observaciones realizadas al respecto por Peña *et al.* (1990), quienes sugieren que la biomasa de los productores primarios de menor talla es muchas veces de una mayor importancia que la aportada por fracciones de mayor tamaño, debido en parte a su mayor capacidad de asimilación de nutrientes, aún bajo condiciones de oligotrofia que pudieran limitar el crecimiento de especies microfitoplanctónicas (Fogg *et al.*, 1986; Verdugo-Díaz, *et al.*, 2014). Otra característica observada en la fracción de menor tamaño, fue la capacidad de proliferar y presentar máximas abundancias en la zona subsuperficial coincidente con la formación de la termoclina (junio del 2000), o por debajo de ella (septiembre del 2000), a pesar de las condiciones oligotróficas persistentes. Nuestros resultados son claros en este aspecto, al observarse una incursión de agua de mayor profundidad y rica en nutrientes con una homogeneidad en la columna de agua (periodo frío), situación no observada durante el periodo de estratificación. A este respecto, Sharples *et al.* (2001) encontraron que la termoclina estacional es una barrera física en el océano que separa la capa superficial de mezcla de la capa profunda, y puede evitar una comunicación entre las aguas superficiales y pobres en nutrientes con aguas más profundas con una mayor concentración de nutrientes. De igual manera, se ha reportado que, bajo condiciones de penumbra, la fracción nanofitoplanctónica puede tener una alta capacidad productiva debido a su mayor eficiencia en la utilización de la escasa luz disponible (Agustí *et al.* 1994; Verdugo-Díaz, *et al.*, 2014). Al respecto, se han registrado especies como *E. huxleyi* o algunas proclorofitas que pueden funcionar fotoquímicamente a irradiancias tan bajas como $1.3 \mu\text{mol cuanta m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Moore *et al.*, 1995; Riegman *et al.*, 1998).

A pesar de que la abundancia de la fracción microfitoplanctónica fue significativamente menor, presentó algunos pulsos importantes, sobre todo en la profundidad de la termoclina (junio de 2000), lo cual pudo estar asociado con la incursión de aguas provenientes de profundidades mayores a la profundidad de compensación, caracterizadas por sus concentraciones mayores de nitratos. Este nutriente es importante para la comunidad microfitoplanctónica, sobre todo para los estrategas “r” como diatomeas que proliferan rápidamente bajo estas condiciones (Margalef, 1978), y que han sido reconocidas como el grupo de mayor importancia dentro de los productores primarios, especialmente en aguas costeras (Valiela, 1995).

En relación con la variabilidad estacional de la

comunidad fitoplanctónica, ha sido registrada una sucesión de especies de diatomeas a flagelados, sobre todo en latitudes templadas, en donde la capacidad de flotabilidad de estos microorganismos cobra gran importancia (Macintyre *et al.*, 1997). Por otra parte, la variabilidad de la biomasa ha sido atribuida a comunidades de mayor tamaño, principalmente en las capas superficiales de la zona eufótica, mientras que las mayores biomásas de las comunidades nano o picofitoplanctónicas se han asociado a zonas más profundas cercanas a la profundidad de compensación (Li, 2002). No obstante, Goericke (2011) menciona que estos patrones de talla y estructura no necesariamente son un patrón generalizado en diversas zonas como el sistema de la Corriente de California.

En relación con los valores calculados para el índice de diversidad del nivel superficial, se observó cierta tendencia a presentar máximos durante noviembre a marzo ($H' = 2.23$ a 2.70). Los mínimos se observaron de junio a octubre con registros entre 1.10 y 2.15. Los valores de diversidad calculados en la presente investigación caen dentro del rango reportado para esta misma zona por Signoret y Santoyo (1980) quienes encontraron diversidades entre 1.98 y 4.02, pero a su vez son inferiores a los reportados por Nienhuis (1982), lo cual se relaciona con la alta variabilidad temporal que se presenta en la bahía.

A pesar de que en esta zona se cuenta con pocos estudios en los cuales se aborde la estructura de la comunidad de manera sistemática, tanto en espacio como en tiempo, cambios similares a los aquí documentados se han reportado en otros sistemas con condiciones ambientales similares (Gilmartin & Revelante, 1978; Santoyo & Signoret, 1980). Asimismo, puede inferirse con base en la hipótesis de la perturbación intermedia (Padisák, 1993), que los valores menores observados durante verano responden a que, después de un periodo de mezcla (noviembre a abril), pocas especies pueden proliferar y colonizar con éxito un ambiente con condiciones nuevas. Las pocas especies con alto grado de capacidad competitiva que pueden proliferar, ocasionan una mayor dominancia y por ende una baja en la diversidad específica (Weithoff *et al.*, 2001). Es importante enfatizar que a través del año considerado se pudo corroborar la importancia en los cambios estacionales de las especies del fitoplancton como respuesta a los cambios ambientales. De igual manera, se documentó la importancia de la fracción nanofitoplanctónica, particularmente durante la temporada cálida. Por otra parte, en relación con la variabilidad espacial de la comunidad fitoplanctónica, se encontró que la formación de la termoclina puede ser un factor influyente en la acumulación de fitoplancton, ya que al funcionar como una barrera física que impide el hundimiento de estas partículas de origen biogénico; relacionado también con la profundidad, los resultados obtenidos dejan en claro que la atenuación de la luz en la columna de agua juega un papel importan-

te en la distribución y abundancia de la comunidad fitoplanctónica. En este sentido, se determinaron los principales grupos funcionales del fitoplancton, así como las especies asociadas a la profundidad de compensación (equivalente a 60 m en sus profundidades mayores) las cuales han desarrollado estrategias fisiológicas que les permite funcionar a bajas irradiancias al tener bajos índices de saturación de la luz.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Instituto Politécnico Nacional el apoyo brindado a través del proyecto "Biodiversidad de microorganismos planctónicos participantes en la exportación (hacia aguas profundas) y remoción del nitrógeno en un ecosistema costero con bajo impacto antropogénico". (SIP-20144020). IGL agradece al proyecto SIP-20161235. Los autores son becarios COFAA. GVD agradece al CONACyT y al IPN por las becas para estudios de doctorado. A Yuri B. Okolodkov (Universidad Veracruzana, Instituto de Ciencias Marinas y Pesquerías) y a Marcia M. Gowing de la Universidad de California en Santa Cruz, California, EUA, por la revisión del resumen en inglés.

REFERENCIAS

- Anderson, T.R. 2005. Plankton functional type modelling: running before we can walk? *Jour. Plank. Res.*, 27: 1073–1081.
- Balech, E. 1988. Los Dinoflagelados del Atlántico Sudoccidental. *Pub. Especial Inst. Español de Oceanogr.*, No. 1, 88. 310 p.
- Bortolini, J.C., L.C. Rodrigues, S. Jati & S. Train. 2014. Phytoplankton functional and morphological groups as indicators of environmental variability in a lateral channel of the Upper Paraná River floodplain. *Acta Limnol. Bras.*, 26(1): 98–108 <http://dx.doi.org/10.1590/S2179-975X2014000100011>
- Brown, J., A. Colling, D. Park, J. Phillips, D. Rothery & J. Wright. 1989. Light and sound in seawater. In: Bearman, G. (De) Seawater: its composition, properties and behavior. 165 p.
- Calijuri, M.C., A.C.A. Dos Santos & S. Jati. 2002. Temporal changes in the phytoplankton community structure in a tropical and eutrophic reservoir (Barra Bonita, S.P.-Brazil). *Jour. Plank. Res.*, 24: 617–634.
- Chang, F.H., J. Zeldis, M. Gall & J. hall. 2003. Seasonal and spatial variation of phytoplankton assemblages, biomass and cell size from spring to summer across the north-eastern New Zealand continental shelf. *Jour. Plank. Res.*, 25: 737–758.
- Cupp, E.E. 1943. Marine plankton diatoms of the West Coast of North-America. *Bull. Scripps Inst. Oceanogr.*, 5: 1–238.
- Dobs, F.C. 1981. Community ecology of a shallow subtidal sand flat, with emphasis on sediment reworking by *Clymenella torquata* (Polychaeta: Maldenidae). M.Sc. Thesis. University of Connecticut. Storrs. Connecticut. 145 p.
- Fogg, G.E. 1986. Picoplankton. Proceedings of the Royal Society of London 228: 1–30.
- Gárate-Lizárraga, I., D.A. Siqueiros-Beltrones & C.H. Lechuga-Devéze. 1990. Estructura de las asociaciones microfitoroplanctónicas de la región central del Golfo de California en el otoño de 1986. *Cienc. Mar.*, 16(3): 131–153.
- Gárate-Lizárraga, I., M.L., Hernández-Orozco, C.J. Band-Schmidt & G. Serrano-Casillas. 2001. Red tides along the coasts of Baja California Sur, Mexico (1984 to 2001). *Oceánides*, 16(2): 127–134.
- Gárate-Lizárraga, I., C. J. Band-Schmidt, F. Aguirre-Baena, & T. Grayeb del Alamo, 2009. A multi-species microalgae bloom in Bahía de La Paz, Gulf of California, México (June 2008). *CICIMAR Oceánides*, 24(1), 15-29.
- Gilmartin, M. & N. Revelante., 1978. The phytoplankton characteristics of the barrier island lagoons of the Gulf of California. *Est. Coast. Mar. Sci.*, 7: 29–42.
- Goericke, R. 2011. The size structure of marine phytoplankton communities—What are the rules? *CalCOFI Reports*. 52; 198–204.
- Hasle, G.R., 1978. *Using the inverted microscope*. 191–196, In: Sournia A. (ed.). Phytoplankton manual. UNESCO. Paris.
- Hasle, G.R. & E.E. Syvertsen. 1997. *Marine diatoms*. 1–385, In: Tomas C.R. (Ed.). Identifying marine phytoplankton pp. Academic Press, San Diego.
- Hustedt, F. 1930. Bacillariophyta. En: Pasher, A. Die Susswasser-Flora Mitteleuropas. Otto Koeltz Science Pub. W. Germany 466 p.
- Hustedt, F. 1959. Die Kieselalgen Deutschlands, Oesterreichs under Schweiz. En: L. Raberhorst (ed.), Kryptogamen-Flora. Band VII, P. I-II. Johnson Rep. Co., N.Y., 845 p.
- Jiménez-Illescas A.R., M. Obeso-Nieblas & D.A. Salas de León. 1997. *Oceanografía física de la Bahía de La Paz, B.C.S.* 31-41, En: Urbán-Ramírez, J. & M. Ramírez-Rodríguez (eds). La Bahía de La Paz investigación y conservación. U.A.B.C.S.

- Kwiatkowski, L., A. Yool, J.I. Allen, T.R. Anderson, R. Barciela, E.T. Buitenhuis, M. Butenschön, C. Enright, P.R. Halloran, C. Le Quéré, L. de Mora, Racault, B. Sinha, I.J. Totterdell & P.M. Cox. 2014. iMarNet: an ocean biogeochemistry model intercomparison project within a common physical ocean modelling framework. *Biogeosciences*, 11: 7291–7304, doi:10.5194/bg-11-7291-2014.
- Li, W.K.W. 2002. Macroecological patterns of phytoplankton in the northwestern North Atlantic Ocean. *Nature*, 419:154–157.
- Licea-Durán, S. 1974. Sistemática y distribución de diatomeas de la Laguna de Agiabampo, Son./Sin., México. *An. Centro Cienc. del Mar y Limnol. U.N.A.M.*, 1: 99–157.
- López-Cortés, D.J., Gárate-Lizárraga, I., Bustillos-Guzmán, J.J. & F.E. Hernández-Sandoval. 2008. Blooms of *Myrionecta rubra* in Bahía de La Paz, Gulf of California, during early summer of 2005. *CICIMAR Océánides*, 23(1, 2): 1–10.
- Margalef, R. 1978. Life-Forms of phytoplankton as survival alternatives in an unstable environment. *Oceanol. Acta*, 1: 493–509.
- Martínez-López, A. & I. Gárate-Lizárraga. 1994. Cantidad y calidad de la materia orgánica particulada en Bahía Concepción en la temporada de reproducción de la almeja catarina *Argopecten circularis* (Sowerby, 1835). *Cienc. Mar.*, 20(3): 301–320.
- Martínez-López A., R. Cervantes-Duarte, A. Reyes-Salinas & J.E. Valdez-Holguín. 2001. Cambio estacional de clorofila *a* en la Bahía de La Paz, B.C.S., México. *Hidrobiológica*, 11(1): 45–52.
- McIntire, C.D. & W.S. Overton. 1971. Distributional patterns in assemblages of attached diatoms from Yaquina Estuary, Oregon. *Ecology*, 52: 758–777.
- Macintyre, J.G., J.J. Cullen & A.D. Cembella. 1997. Vertical migration, nutrition and toxicity in the dinoflagellate *Alexandrium tamarense*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 148: 201–216.
- Moore, L.R., R. Goericke & S.W. Chisholm. 1995. Comparative physiology of *Synechococcus* and *Prochlorococcus*: influence of light and temperature on growth, pigments, fluorescence and absorptive properties. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 116: 259–275.
- Murray, D. & H. Schrader. 1983. Distribution of silicoflagellates in plankton and core samples from the Gulf of California. *Mar. Micropaleont.*, 7: 517–539.
- Nienhuis, J.H. 1982. Phytoplankton characteristics in the southern part of the Gulf of California. *CIBCASIO*, 6: 152–168.
- Padisák, J., 1993. The influence of different disturbance frequencies on the species richness, diversity and equitability of phytoplankton in shallow lakes. *Hydrobiologia*, 249: 135–156.
- Parsons, T.R., Y. Maita & C.M. Lalli. 1984. A manual the chemical y biological methods for seawater analysis. Pergamon Press. 173 p.
- Peña, M.A., M.R. Lewis & W.G. Harrison. 1990. Primary productivity and size structure of phytoplankton biomass on a transect bb the equator at 135°W in the Pacific Ocean. *Deep-Sea Res.*, 37: 295–315.
- Pesantes, F. 1978. Dinoflagelados del Golfo de Guayaquil. *Bol. Inst. Oceanogr. de la Armada. INOCAR*, 2(2): 1–98.
- Pielou, E.C. 1969. *An introduction to mathematical ecology*. Wiley-Interscience, New York. 286 p.
- Reynolds, C.S. 1997. Vegetation Processes in the Pelagic: A Model for Ecosystem Theory Oldendorf/Luhe Ecology Institute. 371 p.
- Riegman, R., W. Stolte, & A.A.M. Noordeloos. 1998. *A model system approach to biological climate forcing: The example of Emiliana huxleyi*. Final Report Subproject (b): Physiology. *NIOZ-Rapport 1998–8*, NIOZ, The Netherlands.
- Schrader, H., N. Piasias & G. Cheng. 1986. Seasonal variation of silicoflagellates in phytoplankton and varved sediments in the Gulf of California. *Mar. Micropaleontol.*, 10: 207–233.
- Schiller, J. 1933. Dinoflagellates (Peridineae) in monographischer Behandlung teil 2. *In: Rabenhorst's Kryptogamen-Flora*, Leipzig. 598 p.
- Sharples, J., C.M. Moore, T.P. Rippeth, P.M. Holligan, D.J. Hydes, N.R. Fisher & H. Simpson. 2001. Phytoplankton distribution and survival in the thermocline. *Limnol. Oceanogr.*, 46(3): 486–496.
- Signoret, M. & H. Santoyo. 1980. Aspectos ecológicos del plancton de la Bahía de La Paz, Baja California sur. *An. Centro Cienc. del Mar y Limnol.*, 7(2): 217–248.
- Steidinger, K.A. & K. Tangen. 1997. Dinoflagellates, 387–584, *In: Tomas, C.R. (Ed.) Identifying*

- marine phytoplankton*. Academic Press: San Diego.
- Simpson, J.H. & J.R. Hunter. 1974. Fronts in the Irish Sea. *Nature*, 250: 404–406.
- Sundström, B.G. 1986. *The marine diatom genus Rhizosolenia. A new approach to the taxonomy*. PhD thesis, Lund Univ., Sweden, 245 p.
- Taylor, F.J.R. 1976. Dinoflagellates from the International Indian Ocean Expedition. A report on material collected by the R. VF. "Anton Bruun" 1963-1964. *Bib. Bot.*, 132: 1–134.
- Valiela, I. 1995. Marine ecological processes. Springer-Verlag. New York, U.S.A. 546 p.
- Verdugo-Díaz, G., A. Martínez-López & I. Gárate-Lizárraga. 2010. Ecological indicators of the phytoplankton community structure in Bahía Concepción, Mexico. *CICIMAR, -Oceánides*, 25(2): 95–102.
- Verdugo-Díaz, G., A. Martínez-López, G. Gaxiola-Castro & J.E. Valdez-Holguín. 2012. Phytoplankton photosynthetic parameters from the Gulf of California southern region. *Rev. Biol. Mar. y Oceanol.*, 47(3) 527–535.
- Verdugo-Díaz, G., A. Martínez-López, M.M. Villegas-Aguilera & G. Gaxiola-Castro. 2014. Producción primaria y eficiencia fotosintética en Cuenca Alfonso, Bahía de La Paz, Golfo de California, México. *Rev. Biol. Mar. y Oceanol.*, 49(3): 527–536.
- Ward, B.A., M. Schartau, A. Oschlies, A.P. Martin, M.J. Follows & T.R. Anderson. 2013. When is a biogeochemical model too complex? Objective model reduction and selection for North Atlantic time-series sites, *Prog. Oceanogr.*, 116: 49–65.
- Weithoff, G., N. Walz & U. Gaedke. 2001. The intermediate disturbance hypothesis-species diversity or functional diversity. *Jour. Plank. Res.*, 23(10): 1147–1155.

