

Variabilidad de perfiles de clorofila *a* obtenidos por fluorescencia natural en el oeste y centro del Golfo de México en junio de 1999

Variability of chlorophyll *a* profiles obtained by natural fluorescence in the west and center Gulf of Mexico in June 1999

Martha Signoret,
Javier Aldeco
y María Teresa Barreiro

Departamento El Hombre y su Ambiente, Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Xochimilco, Calz. del Hueso 1100, Col. Villa Quietud, Coyoacán, 04960,
México, D.F. signoret@correo.xoc.uam.mx

Signoret M., J. Aldeco y M.T. Barreiro. 2006. Variabilidad de perfiles de clorofila *a* obtenidos por fluorescencia natural en el oeste y centro del Golfo de México en junio de 1999. *Hidrobiológica* 16 (3): 221-232.

RESUMEN

En junio de 1999 se llevó a cabo un crucero oceanográfico con el objetivo de identificar y caracterizar los patrones de distribución de la clorofila *a* en la columna de agua, desde el talud continental al norte del Estado de Veracruz, México, hasta el centro del Golfo de México. Las concentraciones de la clorofila *a* se registraron a partir de un perfilador de fluorescencia *in vivo* Biospherical PNF-300, en 14 estaciones oceanográficas realizadas a bordo del B/O "Justo Sierra". La profundidad de la termoclina coincidió con los patrones de circulación ciclónica y anticyclónica, en el borde del talud continental y en mar abierto. Las concentraciones de la clorofila *a* oscilaron entre 0.02 y 0.45 mg m⁻³ y las de la clorofila *a* integrada en la columna de agua, estuvieron comprendidas entre 1.7 y 12.7 mg m⁻². Estas cantidades fueron semejantes a las reportadas para otras épocas y regiones del Golfo de México, con un aporte mayor de biomasa nanofitoplántica. Los valores mayores se obtuvieron en las estaciones cercanas al talud y se asociaron con la frontera de circulación ciclónica de mediana intensidad. Se identificaron cuatro tipos de perfiles verticales de la clorofila *a*: a) presencia de una cresta profunda (95-110 m) asociada con el límite de la capa eufótica; b) distribución homogénea en la columna de agua; c) aparición de dos crestas o más, asociadas con la termoclina y bajas irradianzas; d) existencia de una microcapa o parche subsuperficial, independiente de la termoclina y de la irradiancia. De acuerdo a las concentraciones de clorofila *a*, se registraron diferentes condiciones tróficas en la columna de agua. Se resalta la importancia que tienen los patrones de distribución vertical de la clorofila *a* para los consumidores primarios de la biomasa fitoplánctica.

Palabras clave: Clorofila *a*, distribución, patrones, Golfo de México

ABSTRACT

In June 1999, an oceanographic cruise was carried out on board the O/V "Justo Sierra" with the aim to identify and characterize the chlorophyll *a* distribution patterns in the water column, from the continental slope of the northern part of Veracruz, Mexico, to the center of the Gulf of Mexico. Chlorophyll *a* concentrations were determined in 14 stations by *in vivo* fluorescence with a Biospherical PNF-300 profiler. Thermocline depth was in agreement with de cyclonic and anticyclonic circulation patterns nearby the continental slope and the open Gulf. Chlorophyll *a* concentrations ranged

between 0.02 and 0.45 mg m⁻³, and the integrated chlorophyll *a* values ranged between 1.7 and 12.7 mg m⁻². These values were similar to those given for other seasons and regions of the Gulf of Mexico, with a higher contribution by the nanophytoplankton. The higher values were observed close to the continental slope region related to the cyclonic circulation conditions. Four types of vertical profiles were identified as follows: a) one deep maximum (at a depth between 95 to 110 m) associated to the limit of the euphotic layer, b) the chlorophyll *a* profile was homogeneous, c) two or more maxima were visible, associated to the thermocline or to low irradiances, and d) the presence of a thin layer. Different trophic conditions were observed in the water column. Results are discussed pointing out the great importance of the vertical distribution patterns of chlorophyll *a* in the food web structure in the euphotic layer.

Key words: Chlorophyll *a*, distribution, patterns, Gulf of Mexico

INTRODUCCIÓN

El Golfo de México presenta un amplio espectro de variación de la biomasa fitoplánctica, que señala cambios en las condiciones ecológicas a diferentes escalas de espacio y tiempo. Estos cambios son consecuencia de los procesos hidrodinámicos y climáticos que ocurren en la región.

Los patrones espaciales y temporales de la concentración de la biomasa fitoplánctica, así como sus causas y efectos, deben ser comprendidos como una parte esencial del conocimiento de la dinámica hidrológica y biológica de este ecosistema.

La clorofila *a* es considerada como un indicador grueso de la biomasa fitoplánctica (Cowles *et al.*, 1993; Lambert *et al.*, 1999) y puede ser estimada en forma rutinaria, a partir de la fluorescencia *in vivo*, sin perturbar el medio.

La fluorescencia natural, conocida también como fluorescencia pasiva o inducida por el sol, se usa para estimar la concentración de la clorofila *a*, la actividad fotosintética y por ende, la productividad primaria en la columna de agua. Se trata de la emisión de fluorescencia de la clorofila *a*, estimulada por la luz solar, a una longitud de onda cercana a 683 nm (Chamberlin *et al.*, 1990). El uso de sensores *in situ* y en tiempo real resulta atractivo debido a la rapidez de los registros, al carácter no intrusivo y a la elevada resolución en los registros (centímetros y segundos).

La percepción remota del color del mar ha permitido establecer patrones de distribución horizontal de la clorofila *a* a macroescala, pero tiene una limitación en su alcance vertical. Diversos autores señalan que los sensores del color del mar sólo captan la información de los pigmentos fotosintetizadores en la quinta parte de la capa eufótica, es decir sólo el 20% del estrato superior de la columna de agua (Sathyendranath & Platt, 1993; Falkowski & Raven, 1997). De lo anterior se deriva que los estudios de los patrones de distribución vertical de la clorofila *a* en la columna de agua sean indispensables para evaluar el potencial productivo de los océanos y sus implicaciones en las redes tróficas.

Varias instituciones y grupos de investigadores, principalmente de México, Cuba, Estados Unidos y Rusia, han emprendido campañas oceanográficas con diferentes objetivos, que han incluido registros de clorofila *a* en diversas zonas y durante distintas temporadas. Muchos de esos trabajos han sido recopilados por diversos autores (Koblenz-Mishke *et al.*, 1970; El-Sayed *et al.*, 1972; Lohrenz *et al.*, 1999; Barreiro *et al.* 2003; Okolodkov, 2003); sin embargo, incluyen poca información sobre los patrones verticales de la clorofila *a* en el Golfo de México (Signoret *et al.* 1998; Salas-de-León *et al.*, 2004).

El objetivo del presente estudio fue el de identificar y caracterizar los patrones horizontales y verticales de la clorofila *a* y su relación con las condiciones térmicas y lumínicas de la capa eufótica así como con la dinámica oceanográfica.

AREA DE ESTUDIO

El área de estudio se localiza entre los 20° 30' y 23° de latitud N y los 92° 30' y 97° 30' de longitud O, desde la costa del norte del Estado de Veracruz y sur de Tamaulipas hasta la región profunda del Golfo de México, conocida como fosa de Sigsbee (Fig. 1).

Esta región se ve influenciada por la Corriente de Yucatán, la cual penetra en el Golfo y se convierte en la Corriente de Lazo formando un meandro. Debido a inestabilidades en la circulación, el meandro se desprende de la corriente principal, dando origen a un remolino anticiclónico el cual migra hacia el suroeste del Golfo; otra trayectoria es hacia el oeste y una menos frecuente, hacia el noroeste (Vukovich & Crissman, 1986). Esto señala que una de las áreas de influencia de los anillos anticiclónicos es el norte del litoral veracruzano y sur tamaulipeco. En su travesía, la capa superficial, la capa profunda y los bordes de los anillos se van degradando, esto es, se va transfiriendo energía al entorno en forma de filamentos o remolinos más pequeños. Una de las formas de pérdida de energía del remolino anticiclónico es atribuida a la generación de remolinos ciclónicos subsidiarios. Estos remolinos ciclónicos subsidiarios son ricos en nutrimentos.

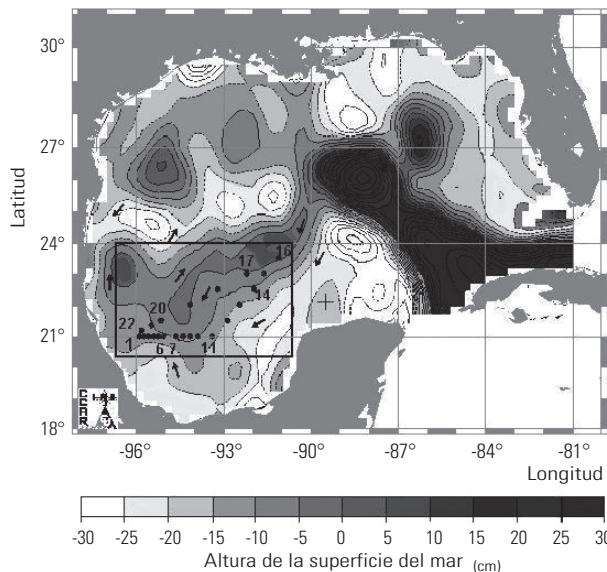


Figura 1. Localización de la zona de estudio y estaciones de muestreo sobreuestas a un mapa de altura de la superficie del mar, del 26 de junio de 1999, a partir del satélite TOPEX-ERS-2 (Colorado Center for Astrodynamics Research, Boulder, CO, USA).

tos y clorofila *a* (Biggs & Müller-Karger, 1994). Los remolinos anticiclónicos, al hacer contacto con la plataforma continental, pueden reaccionar de diversas maneras. Si el remolino es lo suficientemente fuerte (rasgos de velocidad aún diferenciados en las capas subsuperficiales y profundas), puede permanecer, migrar al norte o rebotar; en este lapso generará corrientes hacia afuera de la costa. Si el remolino no es fuerte, esto es, si sus características subsuperficiales no están bien definidas, la topografía del fondo se encargará de disipar los remanentes de energía subsuperficial, y la parte superficial penetrará a la plataforma continental generando corrientes hacia el norte y el sur (Smith, 1986). El proceso de choque de un remolino anticiclónico contra las plataformas continentales de los estados de Veracruz y Tamaulipas ha sido observado y descrito por Vidal *et al.* (1994).

Cuando los grandes anillos, provocados por la escisión de la Corriente de Lazo, chocan con el talud continental en la región oeste y norte del Golfo, introducen agua de la plataforma continental hacia el mar profundo y pueden generar un anillo ciclónico (Wiseman & Sturges, 1999); este fenómeno transporta nutrientes desde la plataforma continental y provoca plumas de alta concentración de clorofila, que se extienden cientos de kilómetros más allá de donde acaba el talud continental. Estas plumas han sido observadas en las imágenes de satélite (Biggs & Müller-Karger, 1994). De acuerdo al mapa de altimetría del mar (Fig. 1), se observó una zona de elevación del nivel de la superficie oceánica frente a Tamaulipas, lo cual indica vestigios de un anillo anticiclónico en la zona intermedia, entre el talud continental y la fosa profunda.

En cuanto a su productividad, las regiones oceánicas del Golfo de México han sido consideradas por diversos autores como oligotróficas (Licea & Santoyo, 1991; Biggs, 1992; Melo *et al.*, 2000). La baja productividad se vincula directamente con la dinámica de la Corriente de Lazo, particularmente por la formación de anillos calientes durante el verano (Biggs & Müller-Karger, 1994); Lohrenz *et al.*, 1999; Barreiro *et al.*, 2003). La concentración promedio de clorofila *a* para la zona oceánica del Golfo de México es de 0.15 mg m^{-3} ; sin embargo, si se incluye también a la zona de plataforma, el valor se incrementa a 0.45 mg m^{-3} (Aguirre, 2002; Barreiro *et al.*, 2003).

MATERIALES Y MÉTODOS

El crucero oceanográfico se realizó del 23 al 30 de junio de 1999 a bordo del B/O "Justo Sierra". En 14 estaciones de muestreo se registraron, en la columna de agua y en tiempo real, la temperatura, la irradianza fotosintéticamente activa PAR (Photosynthetic Active Radiance, por sus siglas en inglés) y la fluorescencia natural, con un perfilador PNF-300 de Biospherical Instruments. La temperatura se expresa en °C, la irradianza PAR en el logaritmo natural de $\mu\text{E cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$. Los valores de fluorescencia fueron transformados a concentraciones de clorofila *a* por el software del perfilador y se expresan en mg m^{-3} . En la tabla 1 se muestran los datos generales de cada una de estas 14 estaciones.

Con el objetivo de cuantificar la participación del micro y del nanofitoplanton a la biomasa productora, se tomaron muestras de agua a profundidades discretas para determinar la clorofila *a* por fluorometría, de acuerdo al método propuesto por Lorenzen (1966). Para separar la fracción correspondiente al nanofitoplanton se utilizó una malla de 10 µm de abertura de poro en el filtrado de las muestras. La extracción se hizo con acetona al 90 % y las lecturas de fluorescencia con un fluorómetro Sequoia-Turner 450, con filtros de excitación y emisión de 440 y 665 nm, respectivamente.

Para la integración de los valores de clorofila *a* por unidad de superficie (mg m^{-2}) se elaboró un programa en lenguaje Fortran para la aproximación de la integral del perfil de clorofila *a*, siguiendo el método de Rieman (Golstein *et al.*, 1980). Los datos provenientes del perfilador fueron leídos y se analizaron diferenciales de 1m. Los *n* valores de clorofila *a* contenidos en cada diferencial fueron promediados para obtener una concentración media:

$$(Cl_a)_i = \left(\sum_1^n Cl_a \right) / n,$$

donde *i* es el metro de profundidad que se promedia y *n* es el número de lecturas de concentración contenidos entre la profundidad *i* e *i*+1. Una vez obtenidas las concentraciones de cada uno de los metros del perfil, éstos se sumaron desde el dato más

Tabla 1. Datos generales de las estaciones y valores de la clorofila *a* integrada (junio de 1999).

Estación	Fecha	Hora	Latitud	Longitud	Profundidad total m	Zona eufótica m	Clorofila <i>a</i> integrada mg m ⁻²	Espesor de integración m	Relación clorofila <i>a</i> espesor de integración
4	23.6.99	9:00	20° 59.400'	96° 31.300'	1400	nd	1.7	42	0.04
5	23.6.99	11:04	20° 58.843'	96° 22.184'	1600	nd	4	61	0.065
6	23.6.99	13:30	20° 58.989'	96° 11.094'	1700	83	5.9	116	0.051
8	24.6.99	9:00	21° 00.707'	95° 31.067'	2700	62	11.3	77	0.147
9	24.6.99	14:10	21° 00.498'	95° 16.606'	2950	92	11.3	127	0.089
11	25.6.99	8:30	21° 00.596'	94° 31.854'	3300	77	6.8	95	0.071
12	25.6.99	15:50	21° 30.461'	94° 00.801'	3100	115	11	141	0.078
14	26.6.99	11:50	22° 33.044'	93° 10.863'	3400	nd	2.9	45	0.065
16	27.6.99	11:10	23° 33.309'	92° 18.842'	3600	nd	3.2	71	0.045
17	28.6.99	9:00	23° 01.706'	93° 24.380'	3600	nd	2.1	65	0.049
18	29.6.99	15:20	22° 30.222'	94° 21.989'	3500	130	4.4	138	0.032
19	29.6.99	12:10	22° 00.611'	95° 16.332'	3200	101	12.7	153	0.083
20	29.6.99	9:00	21° 31.919'	96° 17.212'	1700	80	9.3	112	0.083
22	30.6.99	8:30	21° 10.225'	96° 55.248'	234	nd	5.1	88	0.058

nd = no determinada

superficial hasta la profundidad de muestreo para aproximar la integral,

$$Cl_a(mg.m^{-2}) = \sum_{i=1}^N (Cl_a)i,$$

donde Cl_a ($mg\ m^{-2}$) es la clorofila *a* integrada de la columna de agua, N es el último diferencial del perfil y corresponde a la profundidad de integración.

Para analizar algunos procesos hidrodinámicos se trabajó con una imagen de altura del mar TOPEX-ERS-2, del 26 de junio de 1999 (www.ccar.colorado.edu) (Fig. 1).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Procesos hidrodinámicos. Los procesos hidrodinámicos a macro y mesoescala pueden ser observados en las imágenes de anomalías de altura del mar o altimetría. La imagen de altimetría correspondiente a las fechas de la campaña (Fig. 1) muestra los rasgos más conspicuos, a saber: de la Corriente de Lazo se observa un proceso de desprendimiento para formar un remolino anticiclónico de ~330 km de diámetro; al noreste de este remolino hay otro ya desprendido de mucho menor tamaño. Hacia el suroeste del Golfo, se observa el vestigio de un gran remolino anticiclónico. Este no tiene una forma circular, sino elongada y las alturas son de mucho menor escala (~10 cm). Por abajo del paralelo 21° N se observan alturas negativas, propias de una circulación ciclónica. Las estaciones oceanográficas de

los transectos sur y sureste se ubicaron cerca de la frontera del remolino ciclónico, mientras que las del transecto norte se ubicaron cerca del centro del remolino anticiclónico y hasta su periferia, hacia el oeste (Fig. 1). También se observa, al sur del remolino anticiclónico en desprendimiento, una notoria zona de anomalía negativa propia de circulación ciclónica (24°N). La imagen de altimetría es similar a la mostrada por Sturges & Blaha (1976) pero con valores diferentes; estos autores calcularon la altimetría a partir de datos oceanográficos.

De acuerdo al párrafo anterior, en la figura 1 se han sobrepuerto flechas para sugerir la probable circulación del agua. Los valores de altura positivos (grises oscuros) indican zonas de convergencia, el agua en la superficie gira en el sentido de las manecillas del reloj alrededor de estas zonas y por la aceleración de Coriolis se acercan hacia el centro, donde se hunden. Mientras que las alturas con valores negativos (blanco y grises claros) tienen un comportamiento similar; el agua gira en contra de las manecillas del reloj y por la deflexión de Coriolis el agua tiende a alejarse de la depresión (divergencia) y asciende. Cuanto más altos son los valores de altura mayores serán las velocidades de la corriente. Por la diferencia de alturas se estima una corriente de mediana intensidad ($30-40\ cm\ s^{-1}$) al sur de las estaciones 14 a 16 y en las estaciones 6 a 8 y las corrientes podrían tener baja intensidad ($< 20\ cm\ s^{-1}$) en las estaciones 11-12, 18-19.

La termoclinia fue profunda en las estaciones con altura dinámica positiva, esto en congruencia con la circulación antici-

clónica señalada (estaciones 17 y 20). En la periferia del remolino ciclónico la termoclina fue somera (~ 35 m; estaciones 9 y 14), lo cual indica un ascenso de la masa de agua en la región.

Patrones de distribución vertical de la clorofila *a*. La cantidad de la clorofila *a* presentó amplias variaciones en su distribución vertical. Los valores menores fueron de 0.03 mg m^{-3} y los mayores de 0.48 mg m^{-3} , similares a los encontrados por Salas-de-León *et al.* (2004) en la zona del Cañón de Campeche. En las estaciones 6, 11, 12, 18, 19 y 20 (Fig. 1), se registró un máximo profundo de clorofila *a*, ubicado cerca de los 100 m de profundidad y asociado a una irradianza inferior al 1% de la incidente en superficie, es decir, por debajo de la capa eufótica. Las concentraciones de la clorofila *a* en el máximo fueron de ~ 0.3

mg m^{-3} (Fig. 2). Biggs & Müller-Karger (1994) encontraron valores similares en las zonas de surgencia de los anillos ciclónicos, generadas al interactuar los remolinos anticiclónicos con la plataforma continental.

En las estaciones 4, 5 y 17, la distribución vertical de la clorofila *a* fue relativamente homogénea e independiente de la termoclina (Fig. 3). Los valores de clorofila *a* fueron muy bajos ($\sim 0.03\text{--}0.06 \text{ mg m}^{-3}$) y corresponden a condiciones oligotróficas, de acuerdo a la clasificación que propusieron Koblenz-Miskhe & Vedernikov (1977). Estos autores señalan condiciones oligotróficas para concentraciones de clorofila *a* en el intervalo de 0.09 a 0.15 mg m^{-3} , mesotróficas, de 0.15 a 0.35 mg m^{-3} y eutróficas $> 0.35 \text{ mg m}^{-3}$ para aguas oceánicas.

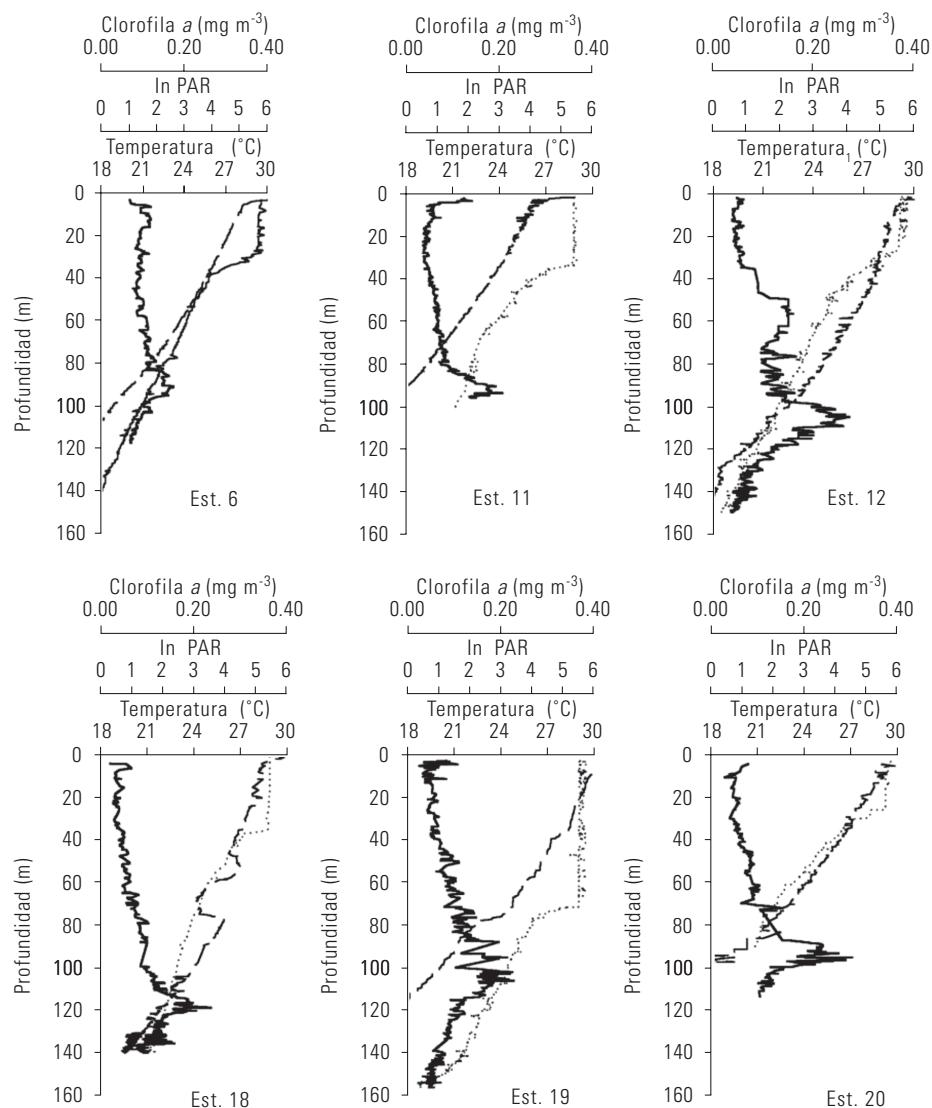


Figura 2. Distribución vertical de la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) (línea punteada), de la irradianza ($\log N$ de $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$) (línea interrumpida) y de la clorofila *a* (mg m^{-3}) con un máximo profundo (línea continua), en el oeste y centro del Golfo de México.

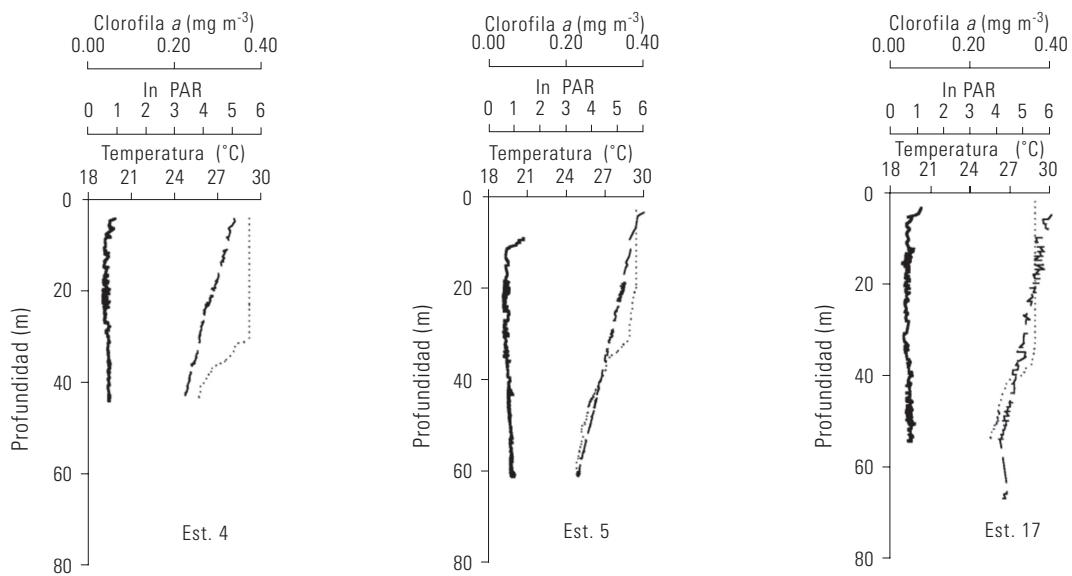


Figura 3. Distribución vertical de la temperatura (°C) (línea punteada), de la irradianza ($\log N$ de $\mu E\ m^{-2}\ s^{-1}$) (línea interrumpida) y de la clorofila *a* ($mg\ m^{-3}$) homogénea (línea continua), en el oeste y centro del Golfo de México.

Las estaciones 8, 9, 16 y 22 presentaron varias crestas de clorofila *a*; en unos casos, las superiores estuvieron cercanas a la termoclina y en otros, las inferiores en bajas irradiancias (Fig. 4). Los valores en los máximos fueron del orden de $0.14\ mg\ m^{-3}$ y los menores $\sim 0.05\ mg\ m^{-3}$. Estos son similares a los reportados por otros autores. Para el Golfo de México, Müller-Karger *et al.* (1991) detectaron concentraciones de $\sim 0.06\ mg\ m^{-3}$ en los meses de mayo y julio, mientras que en diciembre y febrero fueron $> 0.18\ mg\ m^{-3}$. Asimismo, estos autores proponen un valor promedio de $0.15\ mg\ m^{-3}$ para todo el Golfo. Los datos concuerdan con los reportados por Licea & Santoyo (1991) y Melo *et al.* (2000), quienes señalan que las aguas de la zona oceánica del Golfo de México son consideradas como oligotróficas.

En la estación 14 se observó, a 9 m de profundidad, una estructura semejante a la de una microcapa, con un espesor de 3 m y con concentraciones de clorofila *a* superiores en un orden de magnitud ($0.48\ mg\ m^{-3}$), respecto a los valores registrados por arriba y por debajo (Fig. 5). Las microcapas son agregados de numerosos microorganismos y pueden extenderse varios kilómetros y permanecer varios días. Su formación no ha sido aún bien entendida, aunque su presencia parece generalizada en muchos ambientes costeros y oceánicos (Cowles & Desiderio, 1993; Dekshenieks *et al.*, 2001; Alldredge *et al.*, 2002). Representan sitios tróficos muy relevantes para muchas especies del zooplancton, por lo que tienen un fuerte impacto en la estructura y el funcionamiento de las comunidades del plancton y en los flujos de materia y energía en las redes tróficas pelágicas (Cowles *et al.*, 1998).

Al contar con suficientes perfiles verticales de clorofila *a*, éstos llegan a ser descriptores valiosos de los patrones de dis-

tribución de la biomasa fitoplánctica y su vinculación con ciertas condiciones ambientales (Cowles *et al.*, 1993; García-Mendoza & Maske, 1996).

A partir de los resultados obtenidos, se observaron patrones diferentes en la concentración de la clorofila *a* y su distribución vertical. Estos se repitieron en diversas estaciones y básicamente fueron de cuatro tipos: 1) existencia de un máximo profundo asociado con el límite de la capa eufótica; 2) distribución homogénea en la columna de agua; 3) presencia de dos o más crestas asociadas, unas con la termoclina y otras con bajas irradiancias; 4) ocurrencia de una microcapa subsuperficial, independiente de la termoclina y de la irradiancia.

Estos patrones de distribución vertical de la biomasa fitoplánctica tienen implicaciones en las redes tróficas asociadas. La disponibilidad de alimento para el zooplancton herbívoro es diferente cuando el fitoplancton está concentrado en una capa delgada ($< 5\ m$) pero en cantidades altas ($> 0.4\ mg\ m^{-3}$), a si está disperso en un espesor amplio ($> 10\ m$) y en bajas concentraciones ($< 0.1\ mg\ m^{-3}$). Igualmente, no es lo mismo si la mayor cantidad de clorofila *a* está en un solo máximo o bien la distribución vertical muestra varias crestas o es homogénea. El zooplancton herbívoro y filtrador tiene que acoplarse a dichos patrones para disponer, en cada caso, del alimento requerido (Waters & Mitchell, 2002; Gallager *et al.*, 2004). Este acoplamiento permite un buen funcionamiento de la denominada "bomba biológica" (Longhurst & Harrison, 1989).

Con base en la clasificación de Koblenz-Mishke & Vedernikov (1977), presentada anteriormente, los resultados

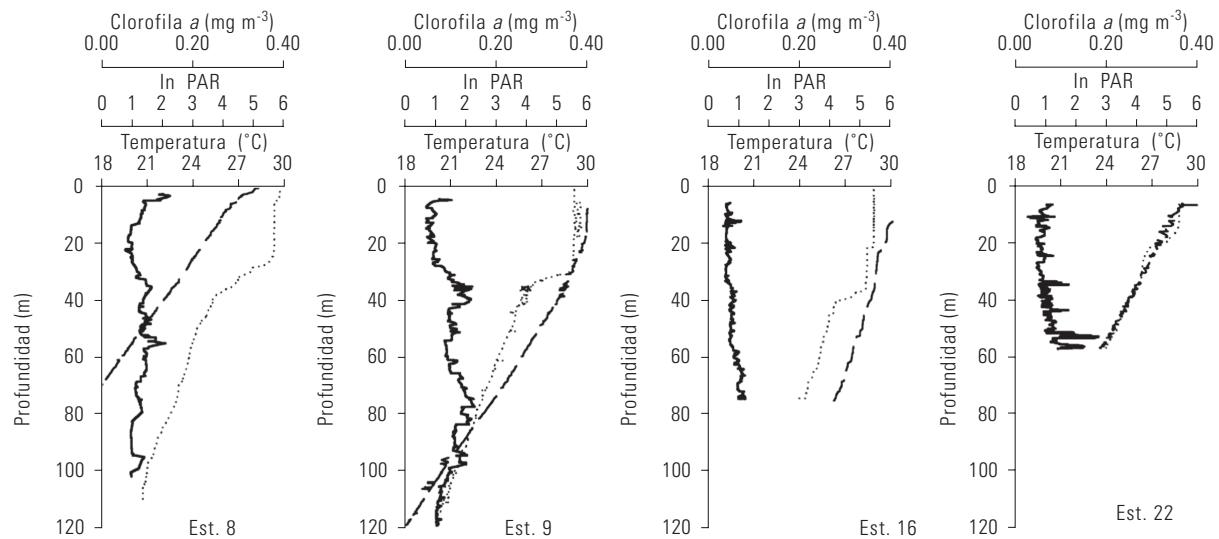


Figura 4. Distribución vertical de la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) (línea punteada), de la irradianza ($\log N$ de $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$) (línea interrumpida) y de la clorofila *a* (mg m^{-3}) con varias crestas (línea continua), en el oeste y centro del Golfo de México.

obtenidos en cada estación de muestreo evidenciaron la presencia de diferentes condiciones tróficas en la columna de agua, de acuerdo a las concentraciones de clorofila *a*. Es decir, en estaciones cercanas a la costa y estaciones de la región central del Golfo de México predominaron aguas oligotróficas en la capa eufótica, con excepción de la profundidad del máximo de clorofila, nivel donde las aguas fueron mesotróficas. A su vez, en el borde del talud, las aguas fueron eutróficas, en el nivel del

máximo de clorofila y mesotróficas en el resto de la columna de agua. Este patrón estuvo asociado a la circulación ciclónica detectada en la región (Fig. 1). Biggs & Müller-Karger (1994) han observado que en el Golfo de México los remolinos ciclónicos son ricos en nutrientes y clorofila *a*. A su vez, Toner *et al.* (2003), en el Golfo de México, encontraron que en la zona de interacción de anillos ciclónicos y anticiclónicos se forman plumas con alto contenido en clorofila *a*.

Cabe mencionar que las características tróficas y de distribución vertical de la biomasa fitoplánctica no son detectadas por los sensores del color del mar, los cuales captan la fluorescencia en una capa limitada a la quinta parte de la zona eufótica (Falkowsky & Raven, 1997). En el presente estudio, los máximos profundos de clorofila *a*, en el área de estudio, quedarían totalmente fuera del alcance de los sensores remotos. Lo anterior, tiene implicaciones importantes respecto a lo que muestran las imágenes de satélite y la interpretación que se ha dado de ellas en cuanto a la ubicación de zonas de mayor o de menor productividad en el Golfo de México.

Otra particularidad observada y que tiene implicaciones en las redes tróficas pelágicas, fue la predominancia, en la comunidad fitoplánctica, de la fracción menor de 10 μm , es decir, la comunidad mejor representada fue la correspondiente a las formas pequeñas, particularmente en la base de la capa eufótica (Tabla 2). Lo anterior coincide con lo reportado por Cullen & Eppley (1981), quienes señalan que las formas predominantes en los máximos profundos de clorofila *a* son fitoflageladas pequeñas y cocolitofóridos. El micro y mesozooplancton se alimentan de ellas.

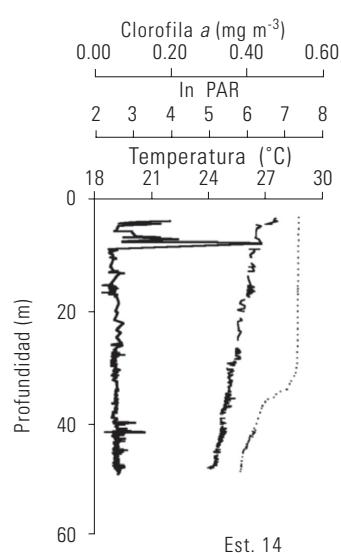


Figura 5. Distribución vertical de la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) (línea punteada), de la irradianza ($\log N$ de $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$) (línea interrumpida) y de la clorofila *a* (mg m^{-3}) con una microcapa (línea continua), en el oeste y centro del Golfo de México.

Para explicar la formación de los máximos de clorofila *a* se han propuesto varias posibilidades entre las que resaltan: a) una mayor densidad de células fitoplácticas derivada de patrones de comportamiento y adaptación a profundidades vinculadas con la nutricina; b) elevadas tasas de crecimiento ante condiciones favorables a la división celular; c) una mayor cantidad de biomasa por hundimiento de los organismos o por procesos físicos de acumulación; d) mayor proporción de clorofila *a* en relación a la biomasa, derivada de una mayor eficiencia enzimática a determinadas irradianzas, en general bajas (Steele, 1964; Cullen & Eppley, 1981; Cullen, 1982).

Patrones de distribución horizontal de la clorofila *a*. A partir de los registros de la concentración de clorofila *a*, integrados en la columna de agua, se obtuvo la cantidad total por unidad de superficie oceánica en cada localidad. Este valor permitió estimar la distribución horizontal en la zona de estudio de la biomasa fitopláctica en el mes de junio de 1999. En la Tabla 1 se muestran los valores de la integración para cada sitio de muestreo, así como la profundidad de integración. Con el objeto de ponderar la productividad en la zona de estudio se calcularon los cocientes entre la cantidad de clorofila *a* en mg m⁻² (los valores integrados) y el espesor de la capa de integración, en metros (Fig. 6).

Los valores mayores de clorofila *a* por unidad de área y su ponderación respecto al espesor de integración fueron registra-

dos en la región intermedia de los transectos estudiados, con valores del orden de 9.3 hasta 12.7 mg m⁻² en espesores de integración de 77 hasta 150 m (Fig. 6). Estos valores se ubicaron en zonas lejanas a la costa (estaciones 8, 9, 12, 19 y 20), en la región del talud continental y en coincidencia con la circulación ciclónica, observada en el transecto sur y el borde de la circulación anticiclónica en el transecto norte. Los patrones de circulación observados permiten sugerir un enriquecimiento en nutrientos, lo cual favorecería el desarrollo del fitoplancton, particularmente el nanofitoplancton. Este desarrollo del fitoplancton se pone en evidencia al registrarse concentraciones de clorofila *a* del doble de la magnitud de las registradas en las zonas alejadas de la circulación ciclónica, como son las estaciones cercanas a la costa (4, 5, 6 y 22) y las de la zona centro del Golfo (16, 17 y 18), donde se registraron concentraciones de 1 a 6 mg m⁻². De acuerdo a evaluaciones hechas en la región noreste del Golfo de México (Hu et al., 2003), tanto a bordo de cruceros, como con sensores remotos, la circulación anticiclónica provoca una gran variación en la distribución de la clorofila *a*, siendo mayor en los bordes del anillo anticiclónico, que en centro del mismo.

Las regiones con valores ≤ 5 mg m⁻² se localizaron tanto cerca de la costa (estaciones 4, 5, 6 y 22) como en la zona centro del Golfo de México (estaciones 16, 17 y 18), fuera de la influencia de la circulación ciclónica.

Tabla 2. Proporción del nanofitoplancton en las estaciones y profundidades muestreadas en el oeste y centro del Golfo de México.

Estaciones con varias crestas de clorofila <i>a</i>	Profundidad del máximo de clorofila <i>a</i> (m)	Porcentaje del nanofitoplancton %	Estaciones con un máximo de clorofila <i>a</i> profundo	Profundidad del máximo de clorofila <i>a</i> (m)	Porcentaje del nanofitoplancton %
8	30	18	12	6	90
	80	18		11	90
	100	100		12	67
9	10	75	18	18	110
	35	60		19	110
	80	100		20	90
	90	32			
	100	67			
16	40	33	5	4	5
	70	50			27
	80	75			33
	100	57		5	33
22	20	33	30		65
	40	67			100
	50	83			
	60	29		14	10
Estación con presencia de una microcapa			Profundidad de la microcapa (m)		%
					100

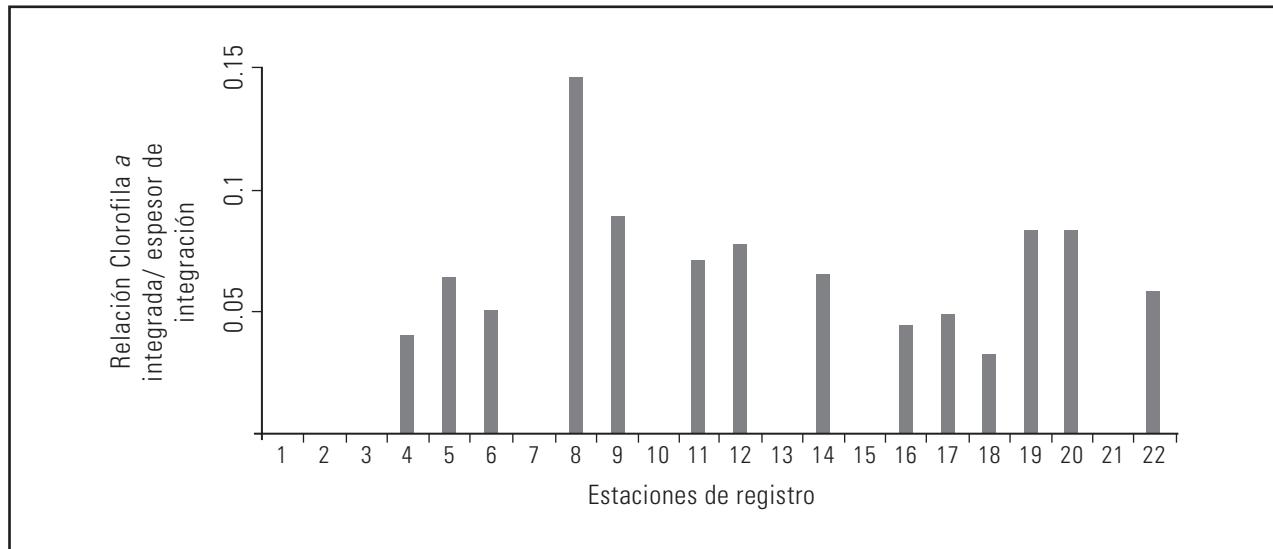


Figura 6. Patrón de distribución horizontal de la clorofila *a* integrada, en el oeste y centro del Golfo de México.

Los intervalos de abundancia de clorofila *a* por unidad de área, reportados para áreas costeras del Golfo de México son del orden de 6 a 10 mg m⁻² (Segura-Gortárez *et al.*, 1982; Biggs & Sánchez, 1997). Estos valores son equivalentes a los registrados en este trabajo para zonas ubicadas fuera de la plataforma continental, aunque estos autores no mencionan el espesor integrado. Para la plataforma de Yucatán, donde se generan surgencias y frentes, se han reportado valores desde 20 hasta 65 mg m⁻² (Pérez de los Reyes *et al.*, 1996; Merino, 1997; Signoret *et al.*, 1998) y para la región noroeste del talud continental de la península, se reportan intervalos de 18 a 46 mg m⁻² (Biggs, 1992). El-Sayed *et al.* (1972) señalan valores promedio de 12.42 mg m⁻² para todo el Golfo de México.

En revisiones de trabajos publicados sobre patrones de distribución de la clorofila *a* y de producción primaria en el Golfo de México (Barreiro *et al.*, 2003; Lohrenz *et al.*, 1999) se discute el hecho de que estos patrones se dan a varias escalas de acuerdo a la influencia de determinados procesos hidrodinámicos y climáticos; es decir, la influencia de descargas de sistemas fluviales se considera de escala local, mientras que los fenómenos oceánicos como surgencias, anillos ciclónicos, anticiclónicos, frentes, entre otros, tienen impacto en áreas mayores y se describen como procesos de meso o macroescala. Este enfoque podría explicar algunas diferencias registradas en los patrones horizontales reportados por diversos autores y hace pensar que son los procesos hidrodinámicos presentes en cada sitio los que determinan las cantidades de biomasa fitoplánctica, independientemente de la cercanía a la costa.

En los registros de fluorescencia de la clorofila *a* en el Golfo de México, es usual observar a la zona costera como la

de mayor riqueza, debido a la dinámica costera a escala local, incluyendo los aportes de aguas epicontinentales, el oleaje y corrientes costeras generadas por el viento, que sin lugar a duda remueven e incorporan los nutrientes de la interfase agua-sedimento.

Las estaciones 13 a 17, aunque se ubican en aguas donde la profundidad total es >1000 m, están cerca del borde del talud y probablemente reciben agua de los afloramientos del norte de la plataforma continental de Yucatán (López-Veneroni, 1987; Zavala-Hidalgo *et al.* 2003), según indica la corriente (Fig. 1). Lo anterior, podría explicar altas concentraciones de clorofila *a* fuera de la zona del talud, mar adentro.

Como un señalamiento final, muchos autores han afirmado que las aguas costeras presentan mayor biomasa fitoplánctica y que va decreciendo conforme se aleja uno de la costa (Segura-Gortárez *et al.*, 1982; Guo *et al.*, 1994; Lohrenz *et al.*, 1997; Lohrenz *et al.*, 1999; Licea & Luna, 1999). Algunas de estas aseveraciones se basan en la observación de imágenes de satélite donde se destacan las plumas de descarga de sistemas fluviales y estuarinos, o bien se apoyan en muestreros discretos limitados a los primeros estratos de la zona eufótica. Los resultados de este trabajo muestran la importancia de la distribución vertical de la clorofila *a* en la columna de agua, de manera que el valor total por unidad de superficie oceánica puede ser subestimado si no se consideran todos los estratos en los que se distribuye la comunidad fitoplánctica, inclusive por debajo de la zona eufótica. La influencia de la circulación oceánica determina zonas de altas concentraciones de clorofila *a* que, como se mencionó, no se observa por los satélites.

AGRADECIMIENTOS

Al Departamento El Hombre y su Ambiente de la Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco, por el apoyo recibido durante la realización del estudio. A la Dra. Elva Escobar Briones del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM, por la invitación a participar en la campaña oceanográfica como parte de su proyecto "Comunidades benthicas de zonas profundas", y al Dr. David A. Salas de León, del Laboratorio de Oceanografía Física del ICMYI, por las facilidades brindadas. Al Capitán del B/O "Justo Sierra" y a toda la tripulación del barco, por su apoyo durante el desarrollo de la campaña oceanográfica.

REFERENCIAS

- AGUIRRE G., R. 2002. Primary production in the southern Gulf of Mexico estimated from solar-stimulated natural fluorescence. *Hidrobiologica* 12(1): 21-28.
- ALLDREDGE, A.L., T.J. COWLES, S. MACINTYRE, J.E.B. RINES, P.L. DONAGHAY, CH.F.GREENLAW, D.V. HOLLIDAY, M.M. DEKSHENIEKS, J.M. SULLIVAN & J.R.V.ZANEVELD. 2002. Occurrence and mechanisms of formation of a dramatic thin layer of marine snow in a shallow Pacific Fjord. *Marine Ecology Progress Series* 233: 1-12.
- BARREIRO, M.T., M. SIGNORET & C. BULIT. 2003. Patrones de distribución de biomasa y producción primaria fitoplántica en el Golfo de México. In: Barreiro M.T., M.E. Meave , M. Signoret & G. Figueroa (Eds.). *Planctología Mexicana*. Sociedad Mexicana de Planctología y Universidad Autónoma Metropolitana, México, pp. 125-142.
- BIGGS, D.C. 1992. Nutrients, plankton and productivity in a warm core ring in the Western Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research* 97(C2): 2143-2154.
- BIGGS, D. C., & F. MÜLLER-KARGER. 1994. Ship and satellite observations of chlorophyll stocks in interacting cyclone-anticyclone eddy pairs in the western Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research* 99 (C4): 7371-7384.
- BIGGS D.C. & L.L. SÁNCHEZ. 1997. Nutrient enhanced primary productivity of the Texas-Louisiana continental shelf. *Journal of Marine Systems* 11(3-4): 237-247.
- CHAMBERLIN, W.S., C.R. BOOTH, D.A. KIEFER, J.H. MORROW & R.C. MURPHY. 1990. Evidence for a simple relationship between natural fluorescence, photosynthesis and chlorophyll in the sea. *Deep-Sea Research* 37 (6), 951-973.
- COWLES, T.J. & R.A. DESIDERIO. 1993. Resolution of biological microstructure through in situ fluorescence emission spectra. *Oceanography* 6: 105-111.
- COWLES, T. J., R.A. DESIDERIO & S. NEUER. 1993. *In situ* characterization of phytoplankton from vertical profiles of fluorescence emission spectra. *Marine Biology* 115: 217-222.
- COWLES T.J., R.A. DESIDERIO & M.E. CARR. 1998. Small-scale planktonic structure: persistence and trophic consequences. In: Cowles, T. & P. Donaghay (Eds.), 1998. Thin layers: observations of small-scale patterns and processes in the upper ocean. *Oceanography* 11 (1): 4-9.
- CULLEN, J .J. 1982. The deep chlorophyll maximum: comparing vertical profiles of chlorophyll a. *Canadian Journal of Aquatic Science* 39: 791-803.
- CULLEN, J. J. & R. EPPELY, 1981. Chlorophyll maximum layers of the Southern California Bight and possible mechanisms of their formation and maintenance. *Oceanologica Acta* 4 (1): 23-32.
- DEKSHENIEKS, M.M., P.L.DONAGHAY, J.M. SULLIVAN, J.E.B. RINES, T.R. OSBORN & M.S. TWARDOWSKI. 2001. Temporal and spatial occurrence of thin phytoplankton layers in relation to physical processes. *Marine Ecology Progress Series* 223: 61-71.
- EL-SAYED, S.Z., W.M. SACKET, L.M. JEFFREY, A.D. FREDERICKS, R.P. SAUNDERS, P.S. CONGER, G.A. FRYXELL, K.A. STEIDINGER & S.A. EARLE. 1972. *Serial Atlas of Marine Environment. Chemistry, Primary Productivity and Benthic Algae of the Gulf of Mexico*. Folio 22 American Geographical Society, Nueva York, 29 p. y 6 láminas.
- FALKOWSKI, P. & J. RAVEN. 1997. *Aquatic Photosynthesis*. Blackwell Sci., Massachussets, 375 p.
- GALLAGER, S.M., H. YAMAZAKI, & C. DAVIS. 2004. Contribution of fine-scale vertical structure and swimming behavior to formation of plankton layers on Georges Bank. *Marine Ecology Progress Series* 267: 27-43.
- GARCÍA-MENDOZA, E. & H. MASKE. 1996. The relationship of solar-stimulated natural fluorescence and primary productivity in Mexican Pacific waters. *Limnology and Oceanography* 41 (8): 1697-1710.
- GOLSTEIN, L.J., D.C. LAY & D.I. SCHNEIDER 1980. *Calculus and Applications*. Prentice-Hall, Englewood, USA, 557 p.
- GUO, L., C.H. COLEMAN & P.H. SANTSCHI. 1994. The distribution of colloidal and dissolved organic carbon in the Gulf of Mexico. *Marine Chemistry* 45:105-119.
- HU, CH., F.E. MULLER-KARGER, D.C. BIGGS, K.L.CARDER, B. NAVADAN, D. NADEAU & J. VANDERBLOEMEN. 2003. Comparison of ship and satellite bio-optical measurements on the continental margin of the NE Gulf of Mexico. *International Journal of Remote Sensing* 24(13): 2595-2612
- KOBLENZ-MISHKE, OJ, V.K. VOLKOVINSKY & J.C. KABANOVA, 1970. Plankton primary production of the world ocean. In: WW Woster

- (ed), *Scientific exploration of the South Pacific*, Natl Acad Sci Washington D.C., p. 183-193.
- KOBLENTZ-MISHKE, O.I. & V.I. VEDERNIKOV. 1977. Primary Production. In: Vinogradov, M.E. (Ed.), *Oceanology. 2. Biological Productivity*, Nauka, Moscu, 399 p.
- LAMBERT, C.D., T.S. BIANCHI & P.H. SANTSCHI. 1999. Cross-shelf changes in phytoplankton community composition in the Gulf of Mexico (Texas shelf/slope): use of plant pigments as biomarkers. *Continental Shelf Research* 19: 1-21.
- LICEA, S. & H. SANTOYO. 1991. Algunas características ecológicas del fitoplancton de la región central de la Bahía de Campeche. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México* 18 (2): 157-167.
- LICEA, S. & R. LUNA. 1999. Spatio-Temporal variation of phytoplankton on the continental margin in the S.W. Gulf of Mexico. *Revista de la Sociedad Mexicana de Historia Natural* 49: 83-99.
- LOHRENZ, S.E., G.L. FAHNENSTIEL, D.G. REDALJE, G.A. LANG, X.G. CHEN & M.J. DAGG. 1997. Variations in primary production of northern Gulf of Mexico continental shelf waters linked to nutrient inputs from the Mississippi River. *Marine Ecology Progress Series* 155: 45-54.
- LOHRENZ, S.E., D.A. WISENBURG, R.A. ARNONE & X. CHEN. 1999. What controls primary production in the Gulf of Mexico? In: H. Kumpf, K. Steidinger & K. Sherman (Eds.). *The Gulf of Mexico, Large Marine Ecosystem. Assessment, sustainability and management*. Blackwell Sci. Cap. 9 pp. 151-169.
- LONGHURST, A.R. & W.G. HARRISON, 1989. The biological pump: profiles of plankton production and consumption in the upper ocean. *Progress in Oceanography* 22: 47-123.
- LÓPEZ-VENERONI, D. 1987. Masas de agua y nutrientes en la Plataforma de Yucatán durante el verano de 1984. Memoria. II Reunión Indicativa de Actividades Regionales Relacionadas con la Oceanografía (Golfo de México y Mar Caribe). Veracruz, Ver., del 25 al 27 de noviembre de 1987. Comisión Intersecretarial de Investigación Oceanográfica. Secretaría de Marina, pp. 278-294.
- LORENZEN, C.L. 1966. A method for the continuous measurement of *in vivo* chlorophyll concentration. *Deep-Sea Research* 13: 223-227.
- MELO, N., F. MÜLLER-KARGER, S. CERDEIRA, R. PÉREZ, I. VICTORIA, P. CÁRDENAS & I. MITRANI. 2000. Near-surface phytoplankton distribution in the western Intra-Americas Sea: The Influence of El Niño and weather events. *Journal of Geophysical Research* 105(6): 14029-14043.
- MERINO, M. 1997. Upwelling on the Yucatan Shelf: hydrographic evidence. *Journal of Marine Systems* 13(1-4): 101-121.
- MÜLLER-KARGER F.E., J.J. WALSH, R.H. EVANS & M.B. MEYERS. 1991. On the Seasonal Phytoplankton Concentration and Sea-Surface Temperature Cycles of the Gulf of Mexico As Determined By Satellites. *Journal of Geophysical Research-Oceans* 96 (C7): 12645-12665.
- OKOLODKOV, Y.B. 2003. A review of Russian plankton research in the Gulf of Mexico and the Caribbean Sea in the 1960-1980s. *Hidrobiologica* 13 (1): 207-221.
- PÉREZ DE LOS REYES, R., I. VICTORIA DEL RÍO, M. SIGNORET, A. GALLEGOS, I. PENIÉ, C. GIL-VARONA, C. BULIT, N. MELO-GONZÁLEZ, F. MÜLLER-KARGER, S. CERDEIRA & M. MERINO 1996. Reporte de un frente hidrológico al N.E. de la Península de Yucatán. Manifestaciones físicas, químicas e hidrobiológicas. *Boletín de la Sociedad Meteorológica de Cuba* 2(1) Publicación electrónica, ISNN 1025-921 X pp 1-11.
- SALAS DE LEÓN, D.A., M.A. MONREAL-GÓMEZ, M. SIGNORET & J. ALDECÓ. 2004. Anticyclonic-cyclonic eddies and their impact on near-surface chlorophyll stocks and oxygen supersaturation over the Campeche Canyon, Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research* 119, C05012, doi:10.1029/2002JC001614.
- SATHYENDRANATH, S. & T. PLATT. 1993. Remote sensing of water-column primary production. *International Council for Exploration of the Sea Marine Science Symposium*, 197: 236-243.
- SEGURA-GORTÁREZ, M.J., E. BATLLORI-SAMPEDRO, V. OLVERA-VIASCÁN & S. DOMÍNGUEZ-RUÍZ. 1982. Productividad primaria en la región sureste del Golfo de México (mayo de 1982). *Biología Marina* 1 (5): 237-276.
- SIGNORET, M., C. BULIT & R. PÉREZ. 1998. Patrones de distribución de clorofila a y producción primaria en aguas del Golfo de México y del Mar Caribe. *Hidrobiologica* 8 (2): 81-88.
- SMITH, D.C. 1986. A numerical study of loop current eddy interaction with topography in the western Gulf of Mexico. *Journal of Physical Oceanography* 16 (7): 1260-1272.
- STEELE, J.H. 1964. A study of production in the Gulf of Mexico. *Journal of Marine Research* 22 (3): 211-222.
- STURGES, W. & J.P. BLAHA, 1976. A western boundary currents in the Gulf of Mexico. *Science* 192: 367-369.
- TONER, M., A.D. KIRWAN, A.C. POJE, L.H. KANTHA, F.E. MÜLLER-KARGER, & C.K.R. JONES. 2003. Chlorophyll dispersal by eddy-eddy interactions in the Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research* 108, No. C4, 3105, doi: 10.1029/2002JC001499.
- VIDAL, M.V.V., F.V. VIDAL, A.F. HERNÁNDEZ, E. MEZA & J.M. PÉREZ-MOLERO. 1994. Baroclinic flows, transports, and kinematic properties in a cyclonic-anticyclonic-cyclonic ring triad in the Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research* 99 (C4): 7571-7597.
- VUKOVICH, F.M. & B.W. CRISSMAN. 1986. Aspects of warm rings in the Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research* 91 (C2): 2645-2660.

- WATERS, R.L. & J.G. MITCHELL. 2002. Centimetre-scale spatial structure of estuarine *in vivo* fluorescence profiles. *Marine Ecology Progress Series* 237: 51-63.
- WISEMAN, W.J. & W. STURGES. 1999. Physical Oceanography of the Gulf of Mexico: Process that regulate its biology. In: H. Kumpf, K. Steidinger & K. Sherman (Eds.). *The Gulf of Mexico, Large Marine Ecosystem. Assessment, Sustainability and Management*. Blackwell Sci., pp. 77-91.
- ZAVALA-HIDALGO, J. S. L. MOREY & J. J. O'BRIEN. 2003. Cyclonic eddies Northeast of the Campeche Bank from altimetry data. *Journal of Physical Oceanography* 33: 623-629.

Recibido: 28 de octubre de 2004.

Aceptado: 15 de diciembre de 2005.