

# Patrones de distribución de clorofila *a* y producción primaria en aguas del Golfo de México y del Mar Caribe

Martha Signoret<sup>1</sup>,  
Ceilia Bulit<sup>1</sup> y  
Roberto Pérez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Depto. El Hombre y su Ambiente, Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco, Calzada del Hueso 1100, 04960 México.

<sup>2</sup>Instituto de Oceanología, Ave. 1ra. 18406 e/184 y 186, Playa La Habana, Cuba.

---

Signoret, M., C. Bulit y R. Pérez, 1998. Patrones de distribución de clorofila *a* y producción primaria en aguas del Golfo de México y del Mar Caribe. *Hidrobiológica* 8 (2): 81-88.

## RESUMEN

En el verano de 1994 se llevó a cabo una campaña oceanográfica en el Golfo de México y en el Mar Caribe noroccidental con el objetivo de estudiar algunas características espaciales (horizontales y verticales) de la distribución de la clorofila *a* y de la producción fitoplanctónica relacionadas con la estructura térmica, luminosa y con la ubicación de la nutriclina en la columna de agua. Se evidenciaron diferencias geográficas en la región estudiada: las aguas de la plataforma de Yucatán fueron las más productivas, con valores de 0.84 y 2.11 gC. m<sup>-2</sup>. d<sup>-1</sup> mientras que las estaciones del Golfo de México y del Mar Caribe presentaron valores muy bajos (entre 0.07 y 0.14 gC. m<sup>-2</sup>. d<sup>-1</sup>). Se obtuvieron perfiles verticales donde se observan máximos de clorofila *a* (de 0.16 a 4.24 mg. m<sup>-3</sup>) ubicados siempre por debajo de la capa de mezcla, a profundidades entre 20 y 120 m en estaciones neríticas y oceánicas, respectivamente, con bajas intensidades luminosas (entre 0.2 y 5 % de I<sub>0</sub>) y relacionados en algunos casos con la nutriclina. En el Golfo de México y en el Mar Caribe se encuentra un tipo de perfil vertical característico de aguas oligotróficas tropicales, con bajas concentraciones de clorofila y con un máximo profundo localizado cerca de la nutriclina; la producción primaria es mínima. En cambio, en la plataforma de Yucatán el perfil se acerca hacia el extremo productivo de la estructura tropical típica, caracterizado por la alta concentración de clorofila y alta producción primaria así como por la presencia de una termoclina somera. La contribución del fitoplancton < 10 μm a la biomasa pigmentaria es cuantitativamente más importante (50 a 100% del total) en aguas oligotróficas que en aguas eutróficas (20 a 67% de la clorofila *a* total).

**Palabras clave:** Máximo de clorofila, productividad primaria, Golfo de México, Mar Caribe, estructura vertical.

## ABSTRACT

An oceanographic cruise was carried out in the Summer 1994 in the Gulf of Mexico and Caribbean Sea in order to study the spatial variability (horizontal and vertical) of the total chlorophyll *a* and primary production in relation to thermal structure, irradiance, and the nutricline position in the water column. The highest production rates were measured on the Yucatan shelf (0.84 and 2.11 gC. m<sup>-2</sup>. d<sup>-1</sup>) while in the Gulf of Mexico and Caribbean Sea the rates were much lower (0.07-0.14 gC. m<sup>-2</sup>. d<sup>-1</sup>). Vertical profiles with deep chlorophyll maxima (0.16 to 4.24 mg. m<sup>-3</sup>) were always situated below the mixed layer, between 20 and 120 m deep in neritic and oceanic waters, respectively, at low light intensities (between 0.2 and 5% of I<sub>0</sub>) and sometimes in relation to the nutricline. In the Gulf of Mexico and in the Caribbean Sea a vertical profile type which is characteristic for tropical oligotrophic waters, with low chlorophyll concentrations, a deep maximum near the nutricline and low primary production was found. In the Yucatan shelf the profile approximates to the productive extreme of typical tropical structure, with higher chlorophyll concentration, primary production and a shallow thermocline. In oligotrophic waters the phytoplankton fraction < 10 μm contributes with 50 to 100% of the total chlorophyll biomass while, in eutrophic waters its contribution ranges between 20 and 67 %.

**Key words:** Chlorophyll maximum, primary production, Gulf of Mexico, Caribbean Sea, vertical structure.

## INTRODUCCIÓN

La distribución de la clorofila *a* y de la producción fitoplanctónica, tanto en aguas oceánicas como costeras, se vincula directamente con características tales como la estratificación y la mezcla de la columna de agua, el espesor de la capa eufótica y la disponibilidad de los nutrientes.

En aguas tropicales del Atlántico, Herbland y Voituriez (1979) han hecho una caracterización de la columna de agua basándose en los aspectos señalados anteriormente y proponen la denominada "estructura tropical típica" la cual consiste en la coincidencia, en la columna de agua, de los niveles del máximo de clorofila, del máximo de producción primaria y de la nutriclina, vinculados al máximo gradiente térmico y al límite inferior de la capa eufótica.

En el Golfo de México y en el Mar Caribe no se conoce mucho acerca de la estructura de la columna de agua y existen pocos estudios sobre la distribución de la clorofila *a* y de la producción primaria (Steele, 1964; Malone, 1971). De allí el interés de haber llevado a cabo un estudio en esta región con el objetivo de caracterizar los patrones espaciales horizontales y verticales de dichas variables en relación con la estructura térmica, luminosa y con la ubicación de la nutriclina en la columna de agua.

## MATERIAL Y MÉTODOS

La campaña oceanográfica se llevó a cabo a bordo del B/O (Buque Oceanográfico) Justo Sierra, del 16 de julio al 6 de agosto de 1994.

Se trabajó en seis estaciones ubicadas tanto en aguas oceánicas del Golfo de México y del Mar Caribe como en aguas neríticas de la plataforma de Yucatán (Fig. 1); esta última se caracteriza por presentar una surgencia cuya máxima intensidad se da durante la primavera y el verano (Merino, 1992).

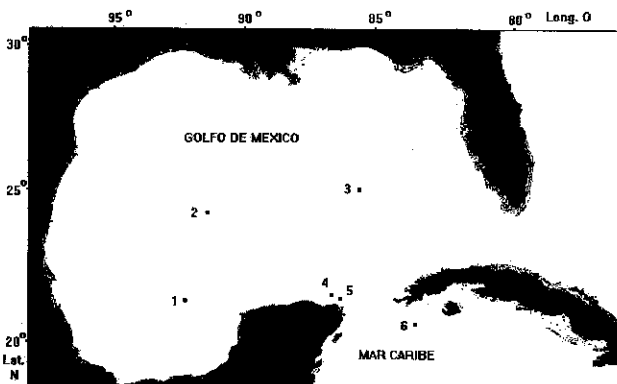


Figura 1. Área de estudio y localización de las estaciones de muestreo.

En cada una de las estaciones de muestreo se obtuvieron perfiles térmicos con una sonda oceanográfica "General Oceanics" (CTD), a la que estaba acoplada una roseta provista de botellas de 1.5 y 5 l de capacidad con las que se tomaron las muestras de agua, a cuatro profundidades: nivel subsuperficial (menos de un metro), nivel del máximo de clorofila, profundidad de la termoclina y en la profundidad del 1% de la irradianza incidente en superficie.

La irradianza se midió inmediatamente por debajo de la superficie con un irradiómetro Kahlsico, modelo 268 WA 310 y se utilizó un disco de Secchi para medir la transparencia, calcular el coeficiente de atenuación y posteriormente la profundidad correspondiente al 1% de irradianza superficial (Ros, 1979).

Para ubicar la profundidad del máximo de clorofila se tomaron muestras de agua a profundidades discretas (entre cuatro y once niveles) y se realizó una determinación inmediata de la fluorescencia del extracto acetónico. En cada nivel se filtró 1 l de agua sobre un filtro Whatman GF/F. El filtro se maceró en 8 ml de acetona al 90% y la fluorescencia del extracto se leyó de inmediato en un fluorómetro Sequoia Turner, modelo 450, equipado con un filtro de excitación de 440 nm y con uno de emisión de 665 nm.

Una vez establecida la profundidad del 1% de irradianza incidente en superficie, la profundidad de la termoclina (a partir de los perfiles del CTD) y la del máximo de clorofila, se procedió a la toma de agua en estos niveles y por debajo de la superficie con una botella General Oceanics de 30 l de capacidad.

Se midieron las concentraciones de clorofila *a* del fitoplancton < 10  $\mu$ m y del fitoplancton total. En cada caso se filtró 1 l de agua sobre los filtros del tipo ya mencionado. La fracción pequeña se separó usando una criba con malla de 10  $\mu$ m de abertura de poro. Se midió la fluorescencia con el fluorómetro referido, que había sido previamente calibrado contra un espectrofotómetro Perkin Elmer 553, usando diferentes diluciones de una solución madre de clorofila pura marca Sigma, de concentración conocida. De esa manera se obtuvieron las constantes de calibración para cada ventana del equipo (Aminot y Chaussepied, 1983; Anónimo, 1993; Lorenzen, 1966; Neveux, 1976). Se leyó la fluorescencia del extracto acetónico al cabo de dos horas de extracción, antes y después de acidificar con dos gotas de HCl 1 mol.l<sup>-1</sup> para corregir la interferencia por feopigmentos y se aplicaron las fórmulas de Lorenzen (1966) para calcular las concentraciones. En este trabajo se presenta la información referida a la clorofila *a*.

Para medir la producción primaria se usó el método del  $C^{14}$ . Se hicieron incubaciones *in situ* (en la estación 6) e *in situ* simulado en un incubador colocado en la cubierta del barco. El incubador se dividió en compartimentos cubiertos con filtros neutrales, constituidos por distinto número de capas de tul negro cuya transmitancia había sido medida previamente y que permitieron simular la irradiancia de las cuatro profundidades de interés y se mantuvo con un flujo continuo de agua para controlar la temperatura. Las incubaciones de las muestras de agua provenientes de las cuatro profundidades seleccionadas tuvieron una duración de 6 horas y se realizaron a partir de las 10 horas. Para las incubaciones *in situ* se usaron soportes circulares en cuyo borde se colocaron las botellas DBO; los soportes se sujetaron a un cable y se ubicaron a las profundidades originales de las muestras de agua. Por cada profundidad se incubaron tres botellas claras y tres oscuras. A cada botella DBO de 300 ml se le inyectó 1 ml de una solución de bicarbonato de sodio marcado con 10  $\mu$ Curies de radioactividad. Las muestras se filtraron a través de filtros Whatman GF/F y se analizaron en un contador de centelleo

líquido LSC- 2 Nuclear Enterprise calibrado con un patrón LKB Amersham. Para los cálculos se aplicaron las fórmulas recomendadas por Fedorov (1977) y no se consideró la corrección por las botellas oscuras. Los resultados se expresan en  $mgC \cdot m^{-3} \cdot h^{-1}$ ; los valores obtenidos se integraron dentro de los límites de la zona eufótica y se multiplicaron por doce para obtener los valores diarios y compararlos con los resultados de otros trabajos.

En el análisis de la distribución vertical de la fluorescencia\* de la clorofila *a* y de la producción primaria se considerarán como máximos aquellos segmentos de los respectivos perfiles que iguallen o superen el valor de la media más una desviación standard.

\* Se refiere a la fluorescencia del extracto registrada en forma inmediata. En un trabajo anterior (Bulit *et al.*, 1995) se comprobó que no hay diferencia significativa entre los valores de fluorescencia obtenidos luego de la extracción inmediata y los posteriores a dos horas de extracción.

Tabla 1. Clorofila *a*, producción primaria y productividad en aguas del Golfo de México y Mar Caribe.

Est.	Ubicación geográfica		Nivel	Clor. <i>a</i> total	Clor. <i>a</i> fracc. <10 $\mu$ m	Clor. <i>a</i> total	Clor. <i>a</i> fracc. <10 $\mu$ m	P. primaria	P. primaria	P/B	
	LN	LO	m	mg.m <sup>-3</sup>	mg.m <sup>-3</sup>	mg.m <sup>-2</sup>	mg.m <sup>-2</sup>	mgC.m <sup>-3</sup> .h <sup>-1</sup>	gC.m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup>	mgC.mg cl <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup>	
1	21.00.00	92.39.06	0	0.04	0.04	11.6	6.31	0.25	0.13	6.2	
	Sur del Golfo		42	0.10	0.06						1.1
	de México		82	0.31	0.20						0.4
2	23.00.00	92.31.50	0	0.09	0.07	12.87	12.66	0.08	0.07	0.9	
	Oeste del Golfo		65	0.16	0.16						0.7
	de México		100	0.16	0.19						0.1
3	25.03.23	87.11.52	0	0.06	0.06	15.11	14.1	0.20	0.11	3.3	
	Este del Golfo		90	0.16	0.14						0.2
	de México		120	0.33	0.33						0.1
4	21.47.12	87.03.18	0	1.41	0.93	20.6	13.28	4.18	0.84	3	
	Plataforma de		10	1.39	0.88						3.5
	Yucatán		15	1.13	0.76						0.8
5	21.42.59	86.44.07	0	1.61	0.32	65.23	36.85	8.58	2.11	5.3	
	Plataforma de		5	1.03	0.34						-
	Yucatán		10	3.43	2.02						10.7
			20	4.24	2.66						1.36
6	20.32.24	83.52.06	0	0.05	0.04	12.84	10.48	0.09	0.14	2	
	Suroeste de Cuba		55	0.09	0.07						0.5
			100	0.23	0.24						0.6
			120	0.20	0.17						0.31

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Comparando las distintas regiones estudiadas se observan diferencias en la distribución de clorofila *a*, representada por el valor que integra el espesor de la columna de agua en la capa eufótica.

La plataforma de Yucatán presenta las mayores concentraciones de clorofila *a* total y de la fracción menor de 10  $\mu\text{m}$  (Tabla 1). Este patrón coincide con la tendencia de la información aportada por los registros del Coastal Zone Color Scanner sobre la concentración superficial de clorofila durante el periodo 1979-1986. En el verano se delimitan zonas con concentraciones altas del pigmento sobre la plataforma de Yucatán, mientras que el centro del Golfo de México y el sur de la isla de Cuba son áreas con concentraciones muy bajas (Müller-Karger *et al.*, 1991).

Las concentraciones de clorofila encontradas en las estaciones oceánicas son típicas de mares oligotróficos e incluso coinciden con las del Mediterráneo oriental, de naturaleza ultraoligotrófica, donde se han hallado valores discretos desde 9.2 hasta 423  $\text{ng. l}^{-1}$  (Yacobi *et al.*, 1995).

En cuanto a la producción primaria, la zona más productiva se localiza en las costas de Yucatán (estaciones 4 y 5), donde los valores superan los 0.8  $\text{gC. m}^{-2} \text{d}^{-1}$  y los 2  $\text{gC. m}^{-2} \text{d}^{-1}$ , respectivamente. En esta área existe un afloramiento provocado por la fricción de la corriente de Yucatán con el talud y con la plataforma, que fertiliza la zona y promueve un incremento en la producción, tal como lo señala Merino (1992). Los valores obtenidos son del mismo orden que el de los encontrados por Margalef (1972) en un afloramiento del noroeste de África y similares a los referidos por Gaxiola y Alvarez (1986) para aguas del Golfo de California.

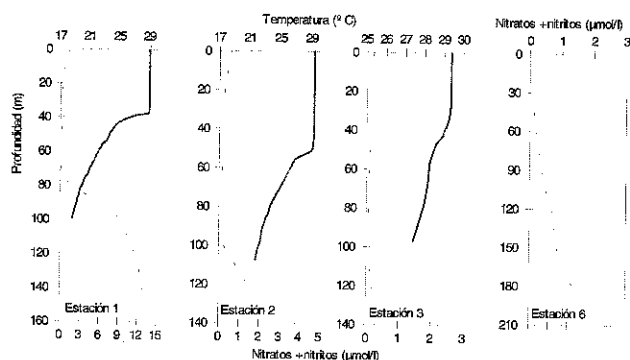


Figura 2. Perfiles de temperatura (línea llena) y distribución vertical de nitratos + nitritos (línea punteada) en las estaciones del Golfo de México y del Mar Caribe. (Los datos de nitratos + nitritos han sido tomados de Penié *et al.*, 1995.)

Por otra parte, los resultados de las estaciones del Golfo de México y del Mar Caribe (entre 0.07 y 0.14  $\text{gC.m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ) son semejantes a los que Gaxiola y Alvarez (1986) obtuvieron en aguas del Pacífico ubicadas a la misma latitud.

Un rasgo destacado de los perfiles verticales de las estaciones oceánicas es la presencia de un máximo profundo de fluorescencia y de clorofila *a* cuya magnitud supera entre cinco y ocho veces la de la capa superficial y que se localiza en las proximidades de la nutriclina (Figs. 2 y 3). En los perfiles de las estaciones 1, 2, 3 y 6 se aprecia un pico de máxima fluorescencia entre los 80 y los 110 m de profundidad, mientras que los máximos de clorofila *a* total y de la fracción < 10  $\mu\text{m}$  son un poco más profundos. La temperatura en ese nivel varía entre 18.5 y 27 °C. Siguiendo el criterio aquí propuesto, en la estación 2 no se define un máximo de clorofila *a*.

Las concentraciones de la clorofila *a* total y del fitoplancton < 10  $\mu\text{m}$  son bajas y oscilan entre 0.04 y 0.33  $\text{mg. m}^{-3}$  (Tabla 1).

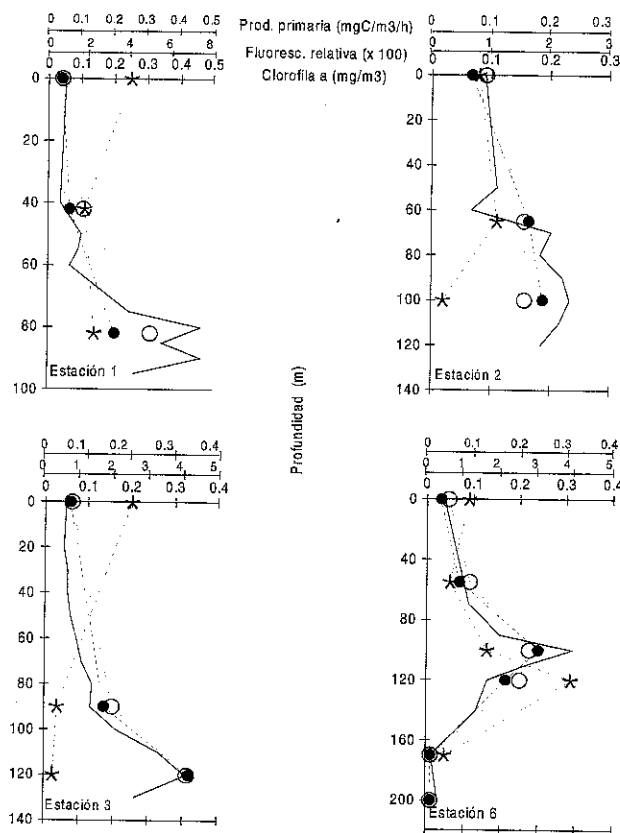


Figura 3. Perfil vertical de fluorescencia (línea llena, sin marcas), clorofila *a* total (círculos), clorofila *a* < 10  $\mu\text{m}$  (puntos oscuros) y producción primaria (asteriscos) en las estaciones del Golfo de México y del Mar Caribe.

Los resultados de fijación del carbono también son bajos y sus valores varían entre 0.02 y 0.31 mgC. m<sup>-3</sup>. h<sup>-1</sup>. En las estaciones 1 y 3 la producción es máxima en las aguas superficiales, mientras que en las estaciones 2 y 6 el máximo se alcanza a los 65 y a los 120 m de profundidad, respectivamente (Fig. 3). Es necesario considerar la falta de resolución vertical de estos resultados; lo cual implica que en los perfiles obtenidos puede no haberse detectado el máximo de producción primaria.

La baja concentración de pigmentos y la baja producción, aunadas a la existencia de una termoclina profunda, permiten relacionar estos perfiles con la "estructura tropical típica" descrita por Herbrand y Voituriez (1979) y más precisamente, con su extremo oligotrófico (Cullen, 1982). La estructura tropical típica, derivada del acoplamiento estrecho entre los procesos físicos y biológicos en numerosas estaciones del este del océano Atlántico tropical, se caracteriza en el perfil vertical por la asociación del máximo de clorofila, de la nutriclina y del máximo de producción primaria, dentro de ciertos límites. El extremo oligotrófico presenta una termoclina y una nutriclina profundas, bajas concentraciones de clorofila y producción primaria mínima.

La distribución vertical de la fijación del carbono no se ajusta al modelo de la "estructura tropical típica", con excepción de la estación localizada en aguas del Mar Caribe. El estrato de máxima producción primaria ha sido bastante menos profundo que el máximo de clorofila y tampoco se ha acoplado con la nutriclina, de manera similar a lo que ocurre en aguas de la bahía del sur de California (Cullen y Eppley, 1981). En este sentido, se presenta una discrepancia respecto al esquema de Herbrand y Voituriez (1979), donde los máximos coinciden espacialmente en la dimensión vertical.

El índice de productividad (P/B) varía entre 0.1 y 6.2 mgC. mgcl a<sup>-1</sup>. h<sup>-1</sup> y coincide con los resultados obtenidos por Estrada (1985) en el Mar Mediterráneo. En estas estaciones puede apreciarse que los mayores valores se localizan en las aguas superficiales donde la concentración de clorofila es mínima y el índice decrece a medida que aumenta la profundidad, con excepción de la estación ubicada en el Mar Caribe.

En cuanto a las condiciones luminosas, los máximos de clorofila *a* reciben entre 0.2 y 2% de I<sub>0</sub> (intensidad incidente en superficie). El espesor de la capa eufótica - considerada como la columna de agua comprendida entre la superficie y la profundidad a la cual llega el 1% de I<sub>0</sub> - va desde 79 hasta 119 m, en las aguas más transparentes del suroeste de Cuba (Tabla 2). Hay que destacar que en las estaciones del Golfo de México los máximos de fluorescencia y de clorofila *a* se localizan por debajo de la base de la capa eufótica, por lo que constituirían una adaptación a la baja intensidad luminosa y al incremento en la disponibilidad de nutrientes (Steele, 1964; Cullen, 1982).

Por lo que respecta a la relación con el gradiente de nutrientes (Fig. 2), en las estaciones 1, 2 y 6, se detecta una nutriclina en las inmediaciones de los máximos clorofilanos, ubicada a 100, a 120 y a 200 m, respectivamente, mientras que en la estación 3 no se ha identificado ese gradiente en el espesor estudiado (Penié *et al.*, 1995). La columna de agua de las estaciones oceánicas visitadas está estratificada y en todos los casos hay una termoclina a profundidades que varían entre 38 y 55 m de modo que existe una barrera para el ingreso de nutrientes a la capa de mezcla, rasgo característico de las aguas pobres tropicales.

Tabla 2. Características de los perfiles en las distintas estaciones de muestreo.

Perfil vertical	Est. 1	Est. 2	Est. 3	Est. 4	Est. 5	Est. 6
Prof. total (m)	2,600	>3,000	>3,000	25	35	>3,000
Prof. capa eufótica (m)	79	84	90	13.6	23	119
Prof. termoclina (m)	38	50	39	5.6	subsuperficial	55
Prof. máximo clor. <i>a</i> (m)	80	n.d.*	120	n.d.	20	100 a 120
Prof. máximo fluoresc. (m)	80 a 90	90 a 100	110 a 130	10	15 y 25	100 a 110
Prof. máx. prod. prim. (m)	0	60	0	10	10	120
Prof. nutriclina (m)	100	120	n.d.	n.d.	n.d.	200
% I <sub>0</sub> en el máximo clor. <i>a</i> (%)	0.9	0.4	0.2	3	5	2
Temp. en el máximo clor. <i>a</i> (°C)	20.1	18.5	27	18.5	16.7	-

\* n.d. = no detectado

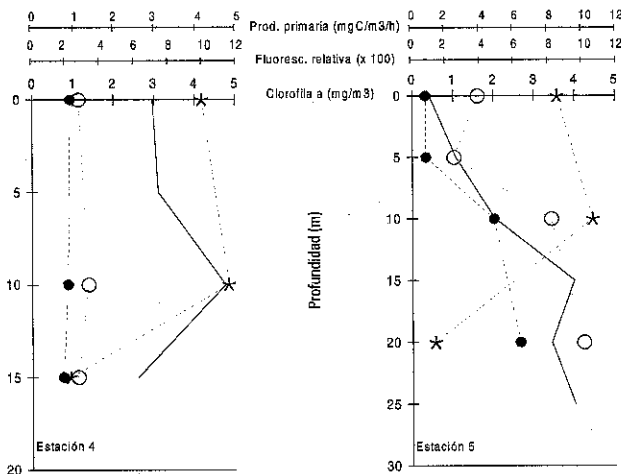


Figura 4. Perfil vertical de fluorescencia (línea llena, sin marcas), clorofila *a* total (círculos), clorofila *a* < 10  $\mu\text{m}$  (puntos oscuros) y producción primaria (asteriscos) en las estaciones de la plataforma de Yucatán.

Relacionando las condiciones luminosas y la estructura térmica de la columna de agua, en todas las estaciones estudiadas el estrato eufótico ha sido más profundo que la capa de mezcla, de manera que están dadas las condiciones que promueven el crecimiento efectivo del fitoplancton (Sverdrup, 1953). Los perfiles de fluorescencia no se interrelacionan con los de temperatura y el máximo de fluorescencia no se ha localizado, en ninguna estación, dentro de la capa de mezcla sino por debajo de ella.

Las estaciones neríticas ubicadas en aguas afloradas de la corriente de Yucatán son las más productivas, según los resultados de este trabajo. Los perfiles verticales de las estaciones 4 y 5 muestran un máximo de fluorescencia entre los 10 y los 25 m (Fig. 4). En la estación 4 la distribución vertical de clorofila *a* es homogénea, con valores elevados y no se identifica un estrato de máxima concentración de acuerdo con el criterio establecido. En cambio, en la estación 5 se define un nivel máximo de clorofila *a* total y del fitoplancton menor de 10  $\mu\text{m}$ , a los 20 m de profundidad. Los valores de clorofila *a* total en todos los niveles son altos, mayores de 1  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$  y llegan hasta 4.24  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , en tanto que la clorofila *a* contenida en las células menores de 10  $\mu\text{m}$  varía entre 0.32 y 2.66  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$  (Tabla 1). Respecto a la fijación autótrofa del carbono, a 10 m de profundidad se localiza la capa más productiva, con valores entre 4.85 y 10.7  $\text{mgC}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ ; en cambio, los mayores índices de productividad se dan en aguas superficiales.

Estos perfiles verticales pueden ubicarse en el extremo productivo de la "estructura tropical típica", caracterizado por la alta concentración de clorofila y la alta producción primaria (Cullen, 1982).

Cullen y Eppley (1981) expresan que los perfiles con cambios graduales pueden asociarse con mezcla intensa, en tanto que Takahashi y Hori (1984) sostienen que en las aguas que afloran el desarrollo del máximo de clorofila es menos pronunciado.

A diferencia de las estaciones oligotróficas, en la zona de la plataforma de Yucatán el máximo de clorofila no constituye una adaptación fisiológica a irradiancias bajas; este máximo abarca toda la capa de agua cercana al fondo y, en coincidencia con lo señalado por Merino (1992), se trata de un crecimiento notorio de los productores primarios en el espesor del agua que aflora. Incluso, a 20 m de profundidad la sobresaturación de oxígeno (6.11  $\text{ml}\cdot\text{l}^{-1}$ , 112% de saturación) denota la presencia de fitoplancton productivo (Fig. 5). Este hecho se apoya además en la observación de que la producción primaria en el nivel del 1% de  $I_0$  tiene la suficiente magnitud como para afirmar que la capa productiva es más profunda que la eufótica (Gaxiola y Alvarez, 1986; Prézelin y Glover, 1991). En esta región de la surgencia se manifiesta la presencia de una "válvula" de oxígeno que implica el escape hacia la atmósfera: entre 0 y 5 m se presentó sobresaturación de oxígeno con niveles de 135% y 123%, respectivamente (Margalef, 1997; Merino, 1992).

La capa de máxima clorofila recibe entre 3 y 5 % de  $I_0$ , valores que coinciden con los mencionados por Steele (1964) y por Takahashi y Hori (1984). Cullen y Eppley (1981) también encuentran el máximo de fluorescencia dentro de

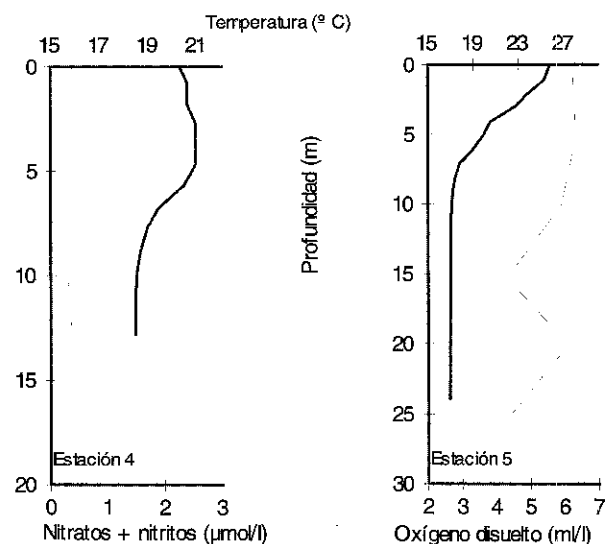


Figura 5. Perfiles de temperatura (línea llena), de oxígeno disuelto (línea de trazos) y de nitratos + nitritos (línea punteada) en las estaciones de la plataforma de Yucatán. (Los datos de oxígeno disuelto y de nitratos + nitritos han sido tomados de Penié et al., 1995.)

la capa eufótica. La estructura térmica de la columna de agua en las dos estaciones (Fig. 5) se caracteriza por la presencia de una termoclina muy cercana a la superficie, sobre todo en la estación 5, rasgo que, aunado a la amplia variación de temperatura entre las aguas superficiales y las más profundas (en 20 m se registran 10° C de diferencia), indica la surgencia de aguas de fondo. Las temperaturas en los niveles máximos de fluorescencia oscilan entre 16.7 y 18.5 ° C y son las menores encontradas en este trabajo, mientras que las concentraciones de nitritos y nitratos estuvieron por debajo del límite de detección (Tabla 2) (Penié *et al.*, 1995).

En cuanto a la contribución de las diferentes clases de tamaño a la biomasa pigmentaria, en las estaciones oligotróficas entre el 50 y el 100% de la clorofila corresponde a la fracción menor de 10  $\mu\text{m}$ , mientras que en la zona del afloramiento esta proporción va desde 20 hasta 67 % (Tabla 1).

Crisholm (1992) sintetiza la idea de que la contribución de las células pequeñas aumenta a medida que la concentración de clorofila total disminuye. Malone (1971) estudió las variaciones en la biomasa y en la producción primaria del fitoplancton en el Pacífico tropical y en el Caribe y encontró que, tanto en aguas neríticas como en oceánicas, la biomasa y la producción primaria del nanoplancton (< 20  $\mu\text{m}$ ) superan a la del fitoplancton de red (entre 20 y 90  $\mu\text{m}$ ). Herbland *et al.* (1987) encuentran que en el Atlántico ecuatorial, en promedio, el 90% de la clorofila *a* total está contenido en la fracción menor de 20  $\mu\text{m}$  mientras que en la región de afloramiento cercana a Dakar la proporción baja a menos de 60%.

En términos generales se ha logrado caracterizar la columna de agua de la zona eufótica de diferentes estaciones tropicales y su proyección en superficie. Los resultados obtenidos con el nivel presente de análisis pueden encuadrarse dentro de la teoría y de los modelos existentes para los mares cálidos, aunque se dan variaciones y peculiaridades sobre cuyo origen y explicación debe profundizarse en el estudio del acoplamiento con los procesos físicos, sobre todo en las regiones de afloramiento.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece al CONACyT por el apoyo recibido para esta investigación, tanto por parte de la Dirección Adjunta de Investigación Científica como por parte de la Dirección Adjunta de Asuntos Bilaterales. Un reconocimiento especial al C. de A. Leobardo Ríos, Capitán del B/O Justo Sierra y a toda la tripulación del barco por su desinteresada ayuda

en el desarrollo de la campaña oceanográfica. Asimismo se agradece al Biól. Armando García Rodríguez el procesamiento de las muestras con C<sup>14</sup> y a la Dra. Pilar Ortega, la resolución de las ecuaciones integrales.

## LITERATURA CITADA

- AMINOT, A. y M. CHAUSSEPIED, 1983. *Manuel des analyses chimiques en milieu marin*. CNEXO (ed.), Brest, 395 p.
- ANÓNIMO, 1993. Determination of chlorophyll in natural waters by fluorometry. *Turner Reviews*, 4 p.
- BULT, C., M. SIGNORET y R. PÉREZ, 1995. Estrategias metodológicas para estimar la biomasa fitoplanctónica por medio de la concentración pigmentaria. *Memorias del VI Congreso Latinoamericano de Ciencias del Mar*, Mar del Plata, Argentina, p. 41.
- CRISHOLM, S. W., 1992. Phytoplankton size. pp. 213-237. En: P. G. FALKOWSKI y A. D. WOODHEAD (eds.). *Primary productivity and biogeochemical cycles in the sea*. Plenum Press, Nueva York.
- CULLEN, J. y R. EPPLEY, 1981. Chlorophyll maximum layers of the Southern California Bight and possible mechanisms of their formation and maintenance. *Oceanologica Acta*, 4(1):23-32.
- CULLEN, J. J., 1982. The deep chlorophyll maximum: comparing vertical profiles of chlorophyll *a*. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 39:791-803.
- ESTRADA, M., 1985. Primary production at the deep chlorophyll maximum in the western Mediterranean. pp. 109-122. En: P. E. GIBBS (ed.). *Proceedings of the 19th European Marine Biology Symposium*, Plymouth, 1984. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- FEDOROV, V. D., 1977. *Métodos de determinación de la concentración del fitoplancton y de su actividad*. Moscú, 189 p. (en ruso).
- GAXIOLA, G. y S. ALVAREZ, 1986. Productividad primaria del Pacífico mexicano. *Ciencias Marinas*, 12(3):26-33.
- HERBLAND, A. y B. VOITURIEZ, 1979. Hydrological structure analysis for estimating the primary production in the tropical Atlantic Ocean. *Journal of Marine Research*, 37:87-101.
- HERBLAND, A., A. LE-BOUTELLER y P. RAIMBAULT, 1987. Does the nutrient enrichment of the equatorial upwelling influence the size structure of phytoplankton in the Atlantic Ocean? pp. 115-120. En: D. HALPERN y T. R. BARBER (eds.). *Vertical motion in the equatorial upper ocean*. *Proceedings of the International Symposium on vertical motion in the equatorial upper ocean and its effects upon living resources and the atmosphere*. *Oceanologica Acta*, vol. HS, no. 6.
- LORENZEN, C. J., 1966. A method for the continuous measurement of *in vivo* chlorophyll concentration. *Deep-Sea Research*, 13:223-227.

- MALONE, T. C., 1971. The relative importance of nanoplankton and netplankton as primary producers in tropical oceanic and neritic phytoplankton communities. *Limnology and Oceanography*, 16:633-639.
- MARGALEF, R., 1972. Fitoplancton de la región de afloramiento del noroeste de Africa. *Resultados Expediciones Científicas del buque oceanográfico "Comide de Saavedra"*, 1: 23-51.
- MARGALEF, R., 1997. *Our Biosphere*. Ecology Institute Nordbunte, Oldendorf/Luhe, 176 p.
- MERINO, M., 1992. Afloramiento en la plataforma de Yucatán: estructura y fertilización. Tesis doctoral, UNAM, México, 255 p.
- MÜLLER-KARGER, F., J. WALSH, R. EVANS y M. 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*, 96(C7): 12645-12665.
- NEVEUX, J., 1976. Dosage de la chlorophylle a et de la phéophytine a par fluorimétrie. *Annales de l'Institut Océanographique*, 52 (2) : 165-174.
- PENÍ, I., E. RODRÍGUEZ y M. E. ZAMUDIO, 1995. Oceanografía Química. En : SIGNORET, M. y R. PÉREZ (eds.). Productividad planctónica en aguas del Golfo de México y Mar Caribe noroccidental. Informe Técnico CONACyT, México, D.F.
- PRÉZELIN, B. B. y H. E. GLOVER, 1991. Variability in time/space estimate of phytoplankton biomass and productivity in the Sargasso Sea. *Journal of Plankton Research*, (13) Supplement: 45-67.
- ROS, J., 1979. *Prácticas de Ecología*. Omega (ed.), Barcelona, 181 p.
- STEELE, J. H., 1964. A study of production in the Gulf of Mexico. *Journal of Marine Research*, 22(3): 211-222.
- SVERDRUP, H. U., 1953. On conditions for the vernal blooming of phytoplankton. *Journal du Conseil pour l'Exploration de la Mer*, 18: 287-295.
- TAKAHASHI, M. y T. HORI, 1984. Abundance of picophytoplankton in the subsurface chlorophyll maximum layer in subtropical and tropical waters. *Marine Biology*, 79: 177-186.
- YACOBI, Y. Z., T. ZOHARY, N. KRESS, A. HECHT, R. D. ROBARTS, M. WAISER, A. M. WOOD y W. K. LI, 1995. Chlorophyll distribution throughout the south-eastern Mediterranean in relation to the physical structure of the water mass. *Journal of Marine Systems*, 6(3):179-190.

Recibido: 27 de febrero de 1998.

Aceptado: 31 de julio de 1998.