

# Ciclos estacionales de fitoplacton (SeaWiFS) en secciones meridionales del Océano Atlántico

J. C. Elgue\*, C. García-Soto\*\* y G. Navarro\*  
carlos.soto@st.ieo.es

\* *Instituto Español de Oceanografía (IEO).  
Promontorio de San Martín, s/n. 39004 Santander*

\*\* *Instituto Canario de Ciencias Marinas (ICCM)  
Apdo. 56. 35200 Telde. Gran Canaria*

## RESUMEN

Se han usado secciones meridionales (80°N-80°S) de concentración de fitoplacton por satélite (SeaWiFS) para describir la estacionalidad de los ambientes fitoplactónicos principales del Océano Atlántico. El estudio se centra en la alternancia estacional hemisférica, el desplazamiento ecuatorial de la concentración de fitoplacton, los blooms de fitoplacton en latitudes templadas y subpolares y los afloramientos del margen oceánico oriental. Estos dos últimos ambientes presentan las mayores concentraciones fitoplactónicas del océano central (15-45°W).

**PALABRAS CLAVE:** fitoplacton, SeaWiFS, estacionalidad, bloom, Océano Atlántico.

## ABSTRACT

Meridional sections (80°N-80°S) of SeaWiFS chlorophyll concentration have been used to describe the seasonalities of the major phytoplankton environments in the Atlantic ocean. The analysis emphasizes the hemispheric seasonal shift, the equatorial displacement of phytoplankton concentration, the phytoplankton blooms of temperature and high latitudes and the eastern boundary upwellings. The last two environments show the highest concentration of phytoplankton in the central ocean (15-45°W).

**KEY WORDS:** phytoplankton, SeaWiFS, seasonality, bloom, Atlantic Ocean.

## INTRODUCCIÓN

Uno de los objetivos históricos de los oceanógrafos ha sido cuantificar la variabilidad estacional de la biomasa de fitoplancton en los océanos y comprender su relación con el medio físico subyacente. La disponibilidad de datos de color oceánico de sensores espaciales ha permitido a la Oceanografía Espacial avanzar hacia este objetivo más que ninguna otra disciplina oceanográfica. El sensor Coastal Zone Colour Scanner (CZCS) muestreó con una cobertura espacial prácticamente global y su vida operacional se extendió sobre un periodo suficientemente largo para proveer valores estacionales de biomasa fitoplanctónica de significación climatológica.

Son varias las investigaciones relacionadas que se pueden citar en el Océano Atlántico. McClain *et al.* (1990) analizó los ciclos anuales de concentración de fitoplancton (CZCS) en 11 localizaciones clave del Atlántico Norte seleccionadas como parte del primer Experimento Global GARP. Yoder *et al.*

(1993) describió la variabilidad fitoplanctónica (CZCS) del océano Global, incluyendo la cuenca Atlántica, en 5 cinturones latitudinales e hizo comparaciones entre diferentes cuencas. Banse y English (1994) examinaron el año climatológico presentando ciclos estacionales de concentración de fitoplancton (CZCS) en 48 localizaciones del océano Global incluyendo la región Atlántica. Rudyakov (1997) usó el análisis armónico para derivar la variabilidad anual y semianual de la concentración de fitoplancton en las 48 estaciones de Banse y English (1994). Longhurst (1998) analizó la estacionalidad de la concentración de clorofila en diferentes Provincias Biogeográficas.

En común con estos trabajos, el objetivo de este artículo es analizar el patrón estacional de gran escala de la concentración de clorofila derivada por satélite usando el conocimiento previo sobre la ecología fitoplanctónica y el medio ambiente físico. En contraste con ellos, enfatizamos ahora la variabilidad meridional evitando en el análisis de los datos

(datos SeaWiFS en este caso) localizaciones puntuales previamente seleccionadas (McClain *et al.*, 1990; Banse y English, 1994; Rudyakov, 1997; Longhurst, 1998) o regiones latitudinales amplias (Yoder *et al.*, 1993). Las climatologías estacionales son presentadas a lo largo de secciones meridionales continuas lo que permite definir más objetivamente los ciclos estacionales de concentración fitoplanctónica y sus transiciones a lo largo de latitudes.

## METODOLOGÍA

Las distribuciones meridionales de concentración fitoplanctónica (SeaWiFS) presentadas en este estudio fueron elaboradas en el Instituto Español de Oceanografía (IEO) usando los archivos de Nivel 3 (datos mensuales y globales) provistos por la NASA (GSFC-DAAC). Se seleccionaron para el estudio archivos que cubrieran cuatro años completos desde el comienzo de la adquisición al igual que en Pingree, Kuo y García-Soto (2002). Cada archivo global fue submuestreado para seleccionar la región Atlántica desde 75°W hasta 15°W y el archivo resultante fue cortado en seis subregiones de 15° de longitud. Cada una de estas subregiones fue promediada en una sección meridional con una resolución de 1° latitud y 15° de longitud. El promedio espacial excluyó los valores blanqueados en GSFC DAAC que representan la presencia de tierra, nubes y hielo, brillo solar, blooms de cocolitofórficos (e.g. García-Soto *et al.*, 1995 y 1996) y grandes ángulos zénit (solar y del satélite) entre otros factores. Para cada sección y mes se generó un promedio de 4 años y estos archivos fueron finalmente analizados frente al tiempo (meses) para cada rango de longitud.

Se generó una distribución latitud-tiempo similar usando todos los datos SeaWiFS desde 75°W hasta 15°W para analizar la contribución de cada sección meridional (15° de anchura) a la estacionalidad del área completa. El porcentaje de varianza explicado por cada transecto con respecto a la distribución general fue calculado como un coeficiente de correlación de Pearson ( $r^2$ ) con un valor por mes y grado de latitud. Los valores  $r^2$  encontrados fueron respectivamente 6%, 13%, 69%, 45% 39% y 38% para los 6 rangos de longitud analizados en el Océano Atlántico: 75-60°W, 60-45°W, 45-30°W, 30-15°W, 15-00°W y 00-15°E.

Una descripción detallada de la estructura física del Océano Atlántico es dada por Longhurst (1998) e información complementaria sobre corrientes e

hidrografía puede ser encontrada en Woods (1984). McClain *et al.* (1990) y McClain y Firestone (1993) proveen distribuciones climatológicas del afloramiento de Ekman en el Atlántico Norte.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los ciclos estacionales de concentración de fitoplancton (SeaWiFS) son presentados para dos secciones meridionales en la Figura 1. La escala de tiempo (mes) es mostrada como un año repetido (meses 13-24) para revelar más claramente el ciclo estacional. Las unidades de los contornos en estas figuras son concentración de clorofila SeaWiFS en miligramos por metro cúbico ( $\text{mg m}^{-3}$ ).  $r^2$  en cada transecto indica el porcentaje de varianza que es explicado con respecto a un transecto meridional que promedia todo el área (75-15°E; ver metodología). Las secciones meridionales más centrales (45-30°W y 30-15°W), con una predominancia clara de aguas oceánicas, muestran los porcentajes de varianza explicada más altos (69% y 45%) de la distribución general. Estas secciones centrales son usadas aquí como las figuras clave para la descripción de los resultados dado que representan el modo dominante de la estacionalidad en el océano Atlántico. La Figura 1a es básicamente un corte central en el Atlántico Norte y la Figura 1b es usado como un corte central en el Atlántico Sur, particularmente cuando se comparan diferentes ambientes fitoplanctónicos entre los hemisferios Norte y Sur.

### Alternancia estacional hemisférica de la concentración de fitoplancton

Los resultados SeaWiFS entre 45°W y 15°W (Figuras 1a y 1b) muestran las oscilaciones estacionales clásicas de los máximos de clorofila entre los hemisferios Norte y Sur debidos a las estacionalidades opuestas de la insolación solar. Los blooms de fitoplancton de latitudes templadas y polares ( $\geq 1 \text{ mg m}^{-3}$  y en dirección polar desde 40°N ó 40°S) tienen lugar en primavera-verano, desde Abril hasta Octubre en el hemisferio Norte y desde Octubre hasta Febrero en el hemisferio Sur. Las concentraciones mínimas están situadas cerca de los Trópicos y también muestran una oscilación estacional. Los máximos de clorofila locales se desarrollan en estas regiones durante otoño-invierno, desde Noviembre a Marzo en las latitudes boreales ( $0.1\text{-}0.15 \text{ mg m}^{-3}$ ) y desde Mayo a Octubre en las regiones australes

X. A. Padín y G. Navarro

(0.05-0.1 mg m<sup>-3</sup>). La insolación solar es un factor relevante para el fitoplancton porque controla en gran manera la estratificación de la capa de mezcla, el deshielo en zonas polares (creando así estabilidad a través del agua dulce liberada) y la luz disponible (también dependiente de la nubosidad). A nivel atmosférico el desequilibrio latitudinal de la radiación solar entrante entre el Ecuador y los Polos (también con estacionalidades hemisféricas opuestas) da lugar a los principales sistemas de vientos que se trasladan en océano como *stress* del viento. Éste a su vez induce mezcla vertical o energía cinética según las latitudes (e.g. Woods, 1984).

### Desplazamiento ecuatorial de la concentración de fitoplancton

A pesar de la alternancia estacional general, hay algunas diferencias hemisféricas en las estacionalidades que pueden ser observadas. El mínimo cerca de los Trópicos está centrado en 28°N en el hemisferio Norte (Figura 1a) y en 20°S en el hemisferio Sur (Figura 1b). Esta diferencia latitudinal resulta del desplazamiento hacia el norte del margen norte del Giro Subtropical del Atlántico Sur. Un desplazamiento similar hacia el norte puede ser observado en las regiones Ecuatoriales (ver Figura 1a) con picos de clorofila en 0-2°S y en 6-10°N asociadas al sistema de Corrientes Ecuatoriales (e.g. Pingree, Kuo y García-Soto, 2002). El hemisferio Sur tiene una región Tropical oligotrófica con una concentración de clorofila (ver extensión del contorno 0.05 mg m<sup>-3</sup>) menor que el hemisferio Norte. Los valores máximos en el hemisferio Sur al norte del Círculo Polar (66.5°S) son también aproximadamente un 50% más bajos que los del hemisferio Norte y están localizados en dos bandas zonales, cerca de 43°S (el Frente de la Convergencia Subtropical) y 52°S (el Frente Antártico). La Convergencia Subtropical separa en el hemisferio Sur la circulación anticiclónica de la mayoría de las corrientes de la circulación ciclónica de la Corriente Circumpolar Antártica. No existe un ambiente equivalente en el hemisferio Norte.

### Blooms de fitoplancton en latitudes templadas y polares

En el hemisferio Norte, la concentración mínima de clorofila a (<0.05 mg m<sup>-3</sup>) se observa en 26-28°N en Junio e incluso en esta región oligotrófica extrema se puede describir un ciclo estacional de clorofila. En

Enero/Febrero tiene lugar un máximo (~0.1 mg m<sup>-3</sup>), cuando la mezcla vertical por viento (aunque débil a estas latitudes) profundiza en la capa de mezcla lo suficiente como para incrementar los nutrientes accesibles para el crecimiento fitoplanctónico (e.g. Pingree, García-Soto y Sinha, 1999). Desde este máximo Subtropical (Enero/Febrero; 0.1 mg m<sup>-3</sup>), se observa un incremento de los máximos anuales de clorofila en dirección polar a través de las latitudes Subtropicales y Templadas hasta un pico máximo de ~1.5 mg m<sup>-3</sup> en Junio a 52°N. Esto nos indica una velocidad de progresión media del bloom para esta región de ~3.5° de latitud por mes. El incremento meridional de los valores máximos resulta del aumento de la accesibilidad de los nutrientes en la capa de mezcla al comienzo de la estación de crecimiento (e.g. Campbell y Aarup, 1992). Ésta a su vez es originada por una mezcla invernal progresivamente más intensa hacia las latitudes más altas (e.g. Woods, 1984). Al norte de 52°N, las concentraciones de bloom (≥1 mg m<sup>-3</sup>) se extienden en latitud hasta el 56°N y en tiempo hasta Septiembre.

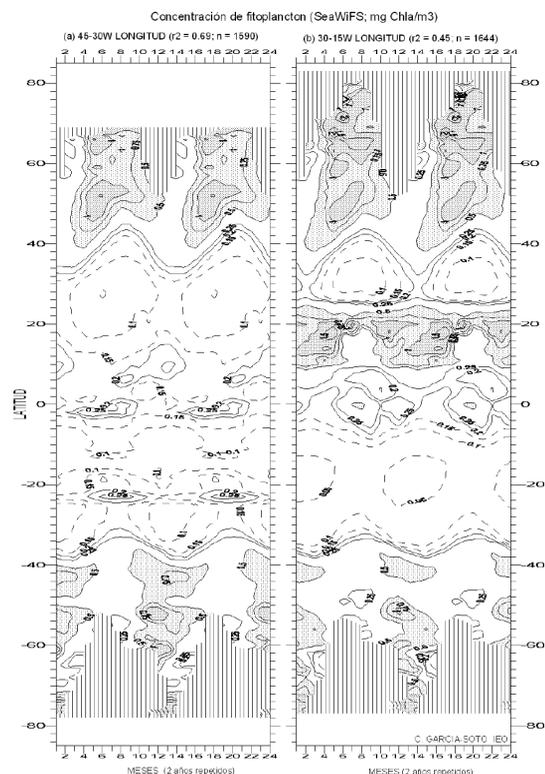


Figura 1. Distribución meridional de la concentración de fitoplancton (SeaWiFS) en el Océano Atlántico en las longitudes (a) 45-30°W y (b) 30-15°W.

También se observa en latitudes templadas desde 46°N hasta 50°N la ocurrencia de blooms de otoño entre Septiembre y Diciembre con concentraciones de clorofila en el rango 0.5-0.75 mg m<sup>-3</sup>. El pico de clorofila se mueve hacia el sur desde verano hasta otoño (con una velocidad de 2° de latitud por mes) como era esperado.

El bloom de primavera de las regiones Templadas está separado de los blooms Subpolares más al norte ( $\geq 1$  mg m<sup>-3</sup>) por una región amplia de menor concentración de clorofila (centrada cerca de 58°N) que resulta de la elevada mezcla vertical al sur de Groenlandia e Islandia (e.g. McClain y Firestone, 1993). Al norte de 68°N las concentraciones de clorofila  $\geq 1$  mg m<sup>-3</sup> progresan en dirección polar desde Abril/Mayo hasta Julio/Agosto consistentemente con el retroceso estacional del margen del hielo como es observado por ejemplo en imágenes de microondas (Brown *et al.*, 1989).

### Estacionalidades en los afloramientos del margen oceánico oriental

En los rangos de latitud 14°N a 32°N (45-30°W) y 10°S a 32°S (30-15°W) se pueden observar ambientes oligotróficos extensivos lejos de la influencia de los continentes Africano y Americano. Hacia el este, en el hemisferio Norte, esta región oligotrófica está fuertemente modificada por los efectos biológicos del afloramiento costero del NO de África (McClain *et al.*, 1990) y por el sistema de corrientes Nor-Ecuatoriales cerca de África (NEC y NECC; McClain y Firestone, 1993). Este ambiente fitoplanctónico ( $\geq 0.25$  mg m<sup>-3</sup>) se extiende desde 26°N (Cabo Bojador) hasta 6°N y es el único ambiente del Atlántico (45-15°W) comparable en intensidad ( $\geq 1.5$  mg m<sup>-3</sup>) a los blooms de latitudes Templadas y Subpolares.

Se observan picos relevantes de clorofila ( $\geq 1.5$  mg m<sup>-3</sup>) durante Julio y Abril/Mayo en la región 16-21°N que incluye los focos de afloramiento principales de Cabo Blanco (21°N) y Cabo Timiris (19°N). Desde 21°N, donde el máximo de clorofila tiene lugar en Julio, y hacia el sur los valores de clorofila  $\geq 1$  mg m<sup>-3</sup> en la primera mitad del año indican que la estación de afloramiento comienza progresivamente más temprano y dura más tiempo con latitudes decrecientes (por ejemplo desde Febrero hasta Mayo en 16°N). Durante la segunda mitad del año, los valores de clorofila  $\geq 1$  mg m<sup>-3</sup> muestran un patrón inverso con un segundo máximo desde Septiembre hasta Febrero cerca de 20°N y restringido a Noviembre en 16°N.

En el margen oceánico oriental del Hemisferio Sur (Figura no mostrada) existe un ambiente comparable que incluye el efecto sobre el crecimiento fitoplanctónico del afloramiento costero del Sur de Benguella (Shannon y Pillar, 1986) y su interacción ciclónica al norte (domo de Angola) con la Corriente Sur-Ecuatorial (SEC; Longhurst, 1998). En este ambiente, los picos de clorofila  $\geq 1$  mg m<sup>-3</sup> están más extendidos estacionalmente (Junio Diciembre) en la región 18-16°S que incluye el área de afloramiento de Cabo Frío (18°S). Desde la proximidad de esta región, el afloramiento parte en dirección NO hacia el océano interior como la Corriente Oceánica de Benguella o límite NE del Giro Subtropical del hemisferio Sur.

## CONCLUSIONES

Se han elaborado estacionalidades meridionales de gran escala (80°N-80°S) de la concentración de fitoplancton (SeaWiFS) para secciones meridionales del Océano Atlántico y los resultados han sido examinados desde el conocimiento previo de la estructura física del océano y la ecología fitoplanctónica. El análisis se ha centrado en las subregiones Atlánticas centrales (45-30°W y 30-15°W) que representan el porcentaje más alto de la varianza explicada (69% y 45% respectivamente) en todo el área analizada (75°W a 15°E). Las mayores concentraciones de fitoplancton en el Océano Atlántico corresponden al bloom primaveral en latitudes Templadas y Subpolares y a las regiones de afloramiento del margen oceánico oriental y sus estacionalidades han sido analizadas en mayor detalle. El estudio estacional presentado y su continuación futura (el análisis de la variabilidad interanual) son relevantes en el contexto de las medidas tomadas por barcos oceanográficos (e.g. B.O. Hespérides) en sus transectos meridionales hacia la Antártida. limitados (e.g. Maraño *et al.*, 2000) a observaciones en las estaciones de primavera y otoño.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración de un Editor suplente en la evaluación de este manuscrito Este estudio forma parte del Programa EUROSAT del Instituto Español de Oceanografía (IEO).

X. A. Padín y G. Navarro

**BIBLIOGRAFÍA**

- BANSE, K. y ENGLISH, D. C. 1994. Seasonality of CZCS phytoplankton pigment in the offshore oceans. *J. Geophys. Res.* 99: 7323-7345.
- BROWN, J., COLLING, A., PARK, D., PHILIPS, D., ROTHERY, D. y WRIGTH, J. 1989. Circulation in High Latitudes. En *Ocean Circulation*, G. Bearman Ed. Pergamon Press, Oxford, pp. 148-154.
- CAMPBELL, J. W. y AARUP, T. 1992. New production in the N Atlantic derived from seasonal patterns of surface chlorophyll. *Deep-Sea Res. Part I* 39: 1669-1694.
- GARCÍA-SOTO, C., FERNÁNDEZ, E., PINGREE, R. D. y HARBOUR, D. S. 1995. Evolution and structure of a shelf coccolithophore bloom in the western English Channel. *J. Plankton Res.* 17: 2011-2036.
- GARCÍA-SOTO, C., SINHA, B. y PINGREE, R. D. 1996. Mapping a bloom of the coccolithophorid *Emiliania huxleyi* from Airborne Thematic Mapper Data. *J. Mar. Biol. Assoc. UK* 76: 839-849.
- LONGHURST, A. R. 1998. *Ecological Geography of the Sea*. Academic Press, London, 398 pp.
- MARAÑÓN, E., HOLLIGAN, P. M., VARELA, M., MOURIÑO, B. y BALE, A. J. 2000. Basin-scale variability of phytoplankton biomass, production and growth in the Atlantic Ocean. *Deep-Sea Res. Part I* 47: 825-857.
- McCLAIN, C. R. y FIRESTONE, J. 1993. An investigation of Ekman upwelling in the North Atlantic. *J. Geophys. Res.* 98: 12327-12339.
- McCLAIN, C. R., ESAIAS, W. E., FELDMAN, G. C., ELROD, J. y ENDRES, D. 1990. Physical and biological processes in the N Atlantic during the First GARP Global Experiment. *J. Geophys. Res.* 101: 3697-3713.
- PINGREE, R. D., GARCÍA-SOTO, C. y SINHA, B. 1999. Position and structure of the Subtropical/Azores Current Front from combined Lagrangian and remote sensing (IR/altimeter/SeaWiFS) measurements. *J. Mar. Biol. Assoc. UK* 79: 351-376.
- PINGREE, R. D., KUO, Y.-H. y GARCÍA-SOTO, C. 2002. Can the Subtropical North Atlantic permanent thermocline be observed from space? *J. Mar. Biol. Assoc. UK* 82: 1-17.
- RUDYAKOV, J. A. 1997. Quantifying seasonal phytoplankton oscillations in the global offshore ocean. *Mar. Ecol.-Progr. Ser.* 146: 225-230.
- SHANNON, L. V. y PILLAR, S. C. 1986. The Benguela ecosystem. Part III, Plankton. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.* 24: 65-170.
- WOODS, J. D. 1984. *The Warm watersphere of the NE Atlantic*. Institut für Meereskunde, Kiel, 34 pp.
- YODER, J. A., McCLAIN, C. R., FELDMAN, G. C. y ESAIAS, W. E. 1993. Annual cycles of phytoplankton chlorophyll concentrations in the global oceans: A satellite view. *Global Biogeochem. Cycles* 5: 119-134.