

4.7. Tendencias de la clorofila oceánica en tiempos de cambios globales

Francesc Peters

La clorofila es un pigmento necesario para la fotosíntesis, y sirve como medida indirecta de la biomasa de productores primarios (principalmente fitoplancton) en el océano. Todos los ecosistemas dependen total o parcialmente del carbono orgánico producido por la fotosíntesis, es decir, el uso de CO_2 y H_2O para sintetizar azúcares mediante la energía de la radiación solar. Además, el fitoplancton, como las plantas terrestres, necesita nutrientes inorgánicos para crecer, y es aquí donde entra en escena el cambio global.

La preocupación sobre los efectos del cambio climático se ha adentrado en la sociedad en los últimos años desde que los científicos tienen ahora una alta certidumbre que la causa del cambio climático es humana (IPCC 2013). El incremento de la media de la temperatura global es incuestionable. Este incremento también se está trasladando a una subida de la temperatura del océano. La cantidad de calor por unidad de volumen que se necesita para incrementar la temperatura del agua de mar es 4500 veces más grande que para el aire y da una idea de la magnitud del calentamiento global. Las masas de agua superficiales de las regiones tropicales, subtropicales y templadas suelen estar desprovistas de nutrientes inorgánicos, limitando el crecimiento del fitoplancton, mientras que las capas profundas son ricas en estos nutrientes, pero faltas de luz solar. Los nutrientes se difunden lentamente hacia arriba. Una de las consecuencias del calentamiento del océano superficial es que la difusión vertical de los nutrientes desde aguas profundas todavía disminuye más y, por tanto, se espera que el fitoplancton decrezca.

El mar Mediterráneo, sobre todo por la profundidad de su cuenca y por su circulación

«anti-estuárica» respecto del océano Atlántico, es un mar oligotrófico con una concentración naturalmente baja de nutrientes superficiales y una biomasa clorofílica también baja. Esta oligotrofia incrementa aún más hacia el Mediterráneo oriental, que se considera una de las áreas ultraoligotróficas del mundo. Al mismo tiempo, la Mediterránea es una región donde el cambio climático se ve exacerbado, con un potencial de empobrecer todavía más las aguas superficiales. Mi hipótesis es que esta tendencia tendría que estar presente en la señal de la clorofila satelital. Así, en este trabajo analizo una serie temporal de 20 años de clorofila satelital en el mar Mediterráneo.

Aproximación al problema con datos de satélite

Uso la concentración de clorofila superficial en el Mediterráneo a partir de observaciones de múltiples satélites y de Sentinel-3 OLCI (Volpe *et al.* 2019). Los datos han sido promediados espacialmente en 179 celdas de 1×1 grados. Para eliminar la tendencia estacional (ciclo anual) he utilizado un ajuste de spline cúbico a los años superpuestos para cada una de las celdas, y he trabajado con los residuos de este ajuste. Luego he ajustado una ecuación lineal a estos residuos. La significación estadística se ha establecido en $\alpha=0,05$. Finalmente, para visualizar y comparar estas tendencias a largo plazo he calculado un parámetro Q_{10} , que da el factor de multiplicación de la clorofila después de 10 años, según $Q_{10} = 10^{b \cdot 10}$, donde b es la pendiente de la recta. He promediado los valores de Q_{10} para todo el Mediterráneo y para subregiones. Los valores medios se han comparado contra una hipótesis nula de $Q_{10} = 1$ con un test de t de dos colas.

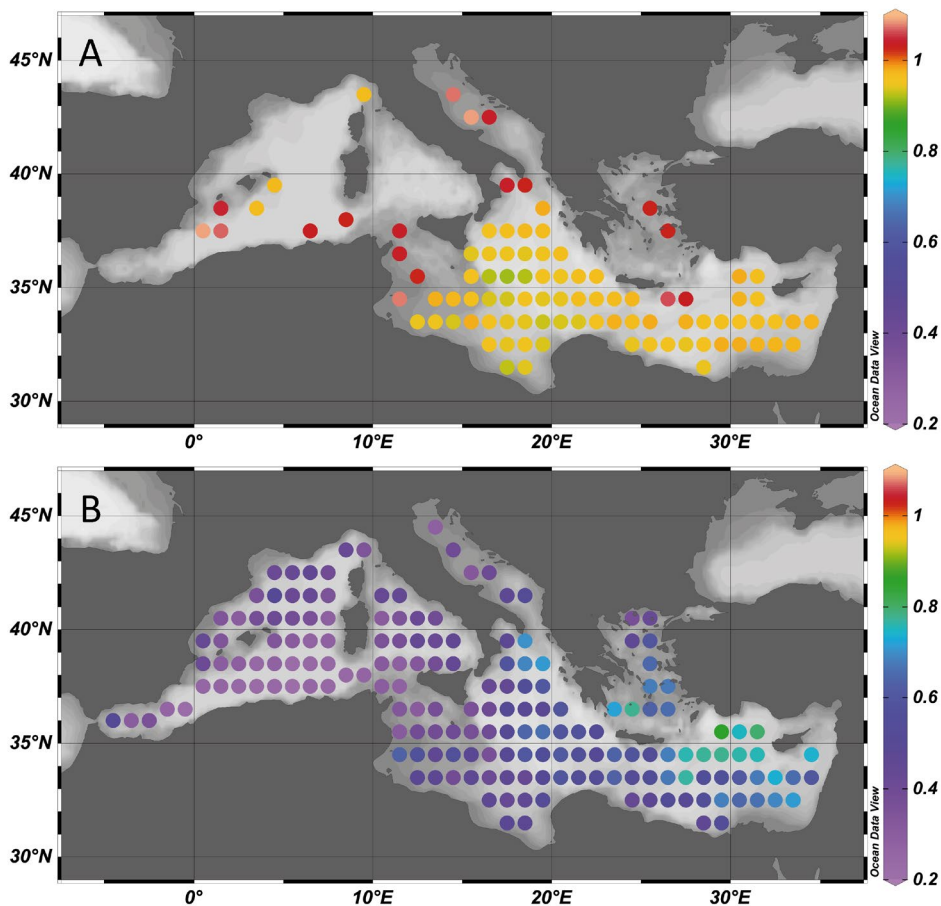


Figura 1. Valores de Q_{10} derivados de las series temporales de clorofila satelital. Solo se muestran celdas con tendencias significativas ($p \leq 0,05$). A, tendencias para la serie entera (1998 a 2017). B, tendencias derivadas para los últimos años (2013-2017).

Tendencias de la clorofila en el Mediterráneo

En la serie 1998-2007 hay una ligera, pero estadísticamente significativa tendencia de la clorofila a disminuir en el Mediterráneo con una Q_{10} de 0,98 (figura 1A). Pero hay diferencias regionales. No se observa ninguna tendencia significativa en el Mediterráneo occidental ni en el mar Egeo. Hay una tendencia a incrementar la clorofila en el Adriático, mientras que decrecimientos de la clorofila se observan en el Jónico y en el Mediterráneo oriental. Sin embargo, la serie temporal de los residuos del ajuste estacional no suele ser una tendencia monótona creciente o decreciente. En general se observan tendencias crecientes en la primera mitad de

la serie y decrecientes después. En un segundo análisis, he focalizado en los últimos 5 años de la serie (2013-2017). Ahora se observa una tendencia fuerte y decreciente de la clorofila (figura 1B) con una Q_{10} media para el Mediterráneo de 0,47 (tabla 1). Los decrecimientos más grandes se encuentran en el Mediterráneo occidental, en el Adriático y en el mar Jónico, mientras que en el mar Egeo y en el Mediterráneo oriental se observan decrecimientos un poco menores.

Mensaje que nos llevamos

Parece que hay un punto de cambio en el sistema en cuanto al decrecimiento de la clorofila en el Mediterráneo que se encuentra entre el 2007 y el 2017, dependiendo de la celda específica consi-

Tabla 1. Sumario de valores Q_{10} para la concentración de clorofila (media, se: error estándar, i n: número de celdas) en el mar Mediterráneo y las subregiones[†]. Significación del test de t contra $Q_{10}=1$ es $p<0,05$ (*), $p<0,01$ (**) o $p<0,001$ (***).

	Mediterráneo	Mediterráneo occidental	Adriático	Jónico	Egeo	Mediterráneo oriental
n	179	65	6	49	11	48
Años 1998-2017						
Media (se)	0,985*** (0,003)	1,002 (0,003)	1,041* (0,013)	0,966*** (0,005)	1,004 (0,005)	0,970*** (0,003)
Años 2013-2017						
Media (se)	0,474*** (0,012)	0,336*** (0,010)	0,400*** (0,036)	0,483*** (0,015)	0,601*** (0,039)	0,633*** (0,016)

[†] Mediterráneo occidental (desde el estrecho de Gibraltar al estrecho de Sicilia), el mar Adriático (bajando hasta 40°N), el mar Jónico (desde 40°N hasta África y desde el estrecho de Sicilia hasta los 20°E), el mar Egeo (desde Creta hacia el norte, entre Grecia en el oeste y Turquía en el este), y el Mediterráneo oriental (desde los 20°E hacia el este, excluyendo el mar Egeo).

derada. Podemos especular que el declivio en los aportes continentales de fósforo debido a cambios legislativos en el Mediterráneo norte parcialmente explicarían el decrecimiento de la clorofila. Pero cuando se observa una tendencia sinóptica para todo el Mediterráneo, se espera un efecto a gran escala relacionado con la disponibilidad de nutrientes más que declivios locales o costeros. Esta tendencia encajaría con la hipótesis de una mayor separación entre las masas de agua superficiales y profundas debido al incremento de la temperatura del agua. Otros estudios también están observando tendencias en el decrecimiento de la clorofila oceánica (Gregg y Rousseaux 2019), aportando confianza a estos resultados. A pesar de todo, los valores absolutos del decrecimiento permanecen inciertos.

La clorofila refleja la biomasa fitoplanctónica y sabemos que la biomasa está relacionada con la biodiversidad (Irigoién *et al.* 2004). Para una biomasa fitoplanctónica baja hay una relación directa con la riqueza de especies y, por tanto, esperaríamos una reducción de la biodiversidad del fitoplancton. Este es un aspecto preocupante considerando que el Mediterráneo se considera un exponente en biodiversidad marina (Coll *et al.* 2010). Así mismo, si las altas tasas de extinción observadas para organismos terrestres son extrapolables al plancton, un estrés adicional ligado a la biomasa podría desestructurar fuertemente los ecosistemas marinos. Más allá de aspectos de estabilidad del ecosistema, se prevé consecuencias importantes para las pesquerías que dependen directa o indirectamente de la

biomasa fitoplanctónica. Este trabajo también destaca la importancia de tener series temporales largas cuando direccionamos temas de cambio climático. Las tendencias son a menudo pequeñas y las series largas son cruciales para determinar la significación estadística entre el ruido inherente.

Si las tendencias decrecientes observadas para los años 2013-2017 se mantienen, los niveles de clorofila en el Mediterráneo en diez años serán aproximadamente la mitad de los actuales para toda la cuenca, un poco más en el este y decreciendo hacia el oeste. Esto será un cambio drástico para todo el ecosistema.

Referencias

- Coll M., Piroddi C., Steenbeek J., *et al.* 2010. The biodiversity of the Mediterranean Sea: Estimates, patterns, and threats. *PLoS ONE* 5: e11842.
- Gregg W.W., Rousseaux C.S. 2019. Global ocean primary production trends in the modern ocean color satellite record (1998-2015). *Environ. Res. Lett.* 14: 124011.
- IPCC. 2013. *Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* In: Stocker T.F., Qin D., *et al.* (Eds). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Irigoién X., Huisman J., Harris R.P. 2004. Global biodiversity patterns of marine phytoplankton and zooplankton. *Nature* 429: 863867.
- Volpe G., Colella S., Brando V.E., *et al.* 2019. Mediterranean ocean colour Level 3 operational multi-sensor processing. *Ocean Sci.* 15: 127-146.

DOI: <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/14092>