

Capítulo 7. Biomasa y producción primaria

Antonio Bode, Ricardo Anadón, Jorge Lorenzo, Marcos Llope, Lorenzo Mene,
X. Anxelu G. Morán, Eva Teira y Manuel Varela

Resumen

Abstract

7.1. Introducción

7.2. Métodos

7.3. Variabilidad a escala regional: correlación espacial de las series

7.4. Biomasa y producción primaria en el océano próximo

7.5. Biomasa y producción primaria en la costa

7.6. Influencia climática y oceanográfica

7.7. Conclusiones

Resumen

A partir de series temporales largas de observaciones de la biomasa (clorofila-a) y producción (fijación de carbono) del fitoplancton se analiza su variabilidad a largo plazo en relación a los cambios en factores climáticos y oceanográficos en las aguas de la plataforma continental del norte y noroeste de la Península Ibérica. Específicamente se han estudiado los cambios relacionados con la estratificación superficial y el afloramiento costero. Las series comprenden periodos de 19 años para la producción primaria y de hasta 49 años para la biomasa. El análisis de las series revela que los ciclos estacionales que se repiten cada año son la principal fuente de variabilidad, debido principalmente a las proliferaciones de fitoplancton en los periodos de transición invierno-primavera y verano-otoño. En la costa noroeste (Galicia) las proliferaciones son más frecuentes e intensas durante la primavera y verano como consecuencia del afloramiento, mientras que en la costa norte (mar Cantábrico) la influencia del afloramiento y los valores de biomasa y producción primaria alcanzados son comparativamente menores. No se ha encontrado ninguna tendencia significativa al aumento o disminución de la biomasa de fitoplancton, aun considerando las series más largas. Sin embargo se ha observado un aumento significativo de la producción primaria en Galicia y una disminución equivalente de la misma en el mar Cantábrico. Las relaciones encontradas con los factores climáticos y oceanográficos analizados indican efectos a medio plazo que son poco explicables y sugieren que las interacciones entre clima y fitoplancton se producen de forma no lineal. Ni la estratificación superficial ni la disminución del afloramiento han tenido, hasta el momento, efectos negativos sobre la producción primaria en esta región. Se desconoce hasta qué punto las diferentes respuestas locales del fitoplancton al calentamiento de las aguas superficiales podrían estar moduladas por otros factores como la eutrofización y contaminación antropogénicas.

Abstract

Long term variability in phytoplankton biomass (chlorophyll-a) and primary production (carbon fixation) in relation to changes in climatic and oceanographic factors was analysed for shelf waters in the north and northwest of the Iberian Peninsula. Changes related to stratification in the water column and upwelling intensity were specifically addressed. The series include frequent measurements over 19 y for primary production and up to 49 y for biomass. Seasonal cycles repeated every year are the main source of variability emerging from the time-series analyses. Such seasonality is the consequence of phytoplankton blooms during the winter-spring and summer-autumn transition periods. In the northwest coast (Galicia) the blooms are more frequent than in the northern coast (Mar Cantábrico) due to the larger influence of the upwelling in the former, where both biomass and production values are higher. Even for the longest series there is no significant long-term trend in biomass, but primary production increased in Galicia and decreased in the Mar Cantábrico at nearly equivalent rates. Effects of external factors on phytoplankton biomass and production are strangely delayed for relative long periods, suggesting non-linear interactions between phytoplankton and climate. Neither the increase in surface stratification nor the decrease in upwelling intensity have negatively affected primary production in this region. The different local responses of phytoplankton to the warming of surface waters may be due to interactions with other factors as anthropogenic eutrophication and pollution still not well understood.

7.1. Introducción

El fitoplancton desempeña un papel fundamental en la regulación del clima y de la biosfera por dos razones principales. En primer lugar la fijación de CO₂ por las algas microscópicas y cianobacterias que constituyen el fitoplancton tiene un gran impacto en los ciclos biogeoquímicos globales debido a la gran extensión de los océanos. Diariamente el océano absorbe más de 100 millones de toneladas de carbono gracias a la fotosíntesis del fitoplancton (Behrenfeld et al., 2006), con lo que contribuye a estabilizar los niveles de CO₂ en la atmósfera y a retardar el calentamiento del planeta (IPCC, 2007b). En segundo lugar el fitoplancton constituye la base de las redes tróficas marinas, siendo estos microorganismos los principales productores primarios de todo el océano. Todos los grandes ecosistemas marinos, a excepción de las zonas costeras muy someras y casos especiales como las fumarolas volcánicas submarinas, dependen de la producción primaria del fitoplancton, que determina en gran medida la producción de recursos pesqueros (ej. Chassot et al., 2007).

El fitoplancton precisa de niveles adecuados de luz solar y nutrientes para crecer y reproducirse. La radiación útil para la fotosíntesis (photosynthetically active radiation, PAR) penetra sólo unas pocas decenas de metros en las aguas oceánicas, formando la denominada zona fótica. En esta zona el fitoplancton consume rápidamente los nutrientes disueltos por lo que, para mantener la producción primaria estos deben ser repuestos. Los nutrientes son aportados a la zona fótica fundamentalmente por la mezcla de las capas de agua, generalmente por enfriamiento de la superficie (como ocurre en invierno en las latitudes medias) aunque también hay aportes de importancia local en la zona costera (como ocurre en las desembocaduras de los ríos). También tienen gran importancia los aportes por afloramiento, o ascenso de aguas profundas cerca de la superficie por efecto de los vientos. Los grandes sistemas de afloramiento se localizan a ambos lados del ecuador y en los márgenes orientales de los océanos, siendo ecosistemas de una elevada producción biológica (Freon et al., 2009). Para sostener a las redes tróficas el fitoplancton debe mantenerse en la zona fótica con una renovación frecuente de nutrientes.

En gran parte del océano el calentamiento progresivo de la atmósfera, como consecuencia de los incrementos en la concentración del CO₂ atmosférico, ha provocado un calentamiento de las capas de agua más superficiales (Belkin, 2009). Este calentamiento acentúa la estratificación o separación de la capa superficial mezclada por el viento de las aguas profundas, por lo que dificulta la renovación de nutrientes. En gran parte del océano se ha observado que las áreas con menor biomasa de fitoplancton, como ocurre en las zonas subtropicales, se han expandido en la última década, lo que se ha atribuido a una mayor estratificación (McClain et al., 2004; Behrenfeld et al., 2006).

En este estudio se analiza la variabilidad en la biomasa y producción primaria del fitoplancton en la costa norte y noroeste de la Península Ibérica en relación a la hipótesis de una reducción

de ambas debido a la disminución en los nutrientes causada por un incremento en la estratificación, consecuencia a su vez del calentamiento de la superficie. Como se ha visto en el Capítulo 2 en esta región se detecta un incremento de la temperatura del agua en todas las capas de agua, pero con mayor grado en la superficie, en las últimas décadas. También se ha observado una disminución en la intensidad y frecuencia de los fenómenos de afloramiento (Capítulo 1), lo que posiblemente afecte a la disponibilidad de nutrientes para la producción primaria en la zona fótica (Capítulo 4). La biomasa de fitoplancton se estima a partir de la concentración de clorofila-a, el principal pigmento responsable de la fotosíntesis, ya que se dispone de medidas directas *in situ* en varias localidades y estimaciones en grandes zonas obtenidas a partir de sensores colocados en satélites. Las medidas de producción primaria proceden de experimentos *in situ* realizados a lo largo de los últimos 20 años en estaciones visitadas regularmente en la costa. Finalmente la variabilidad en biomasa y producción observada se compara con la variabilidad en los principales factores climáticos y oceanográficos que afectan al fitoplancton.

7.2. Métodos

La información sobre biomasa de fitoplancton se ha obtenido de distintas fuentes y zonas (Fig. 7.1). En primer lugar, las series más largas de observaciones se han obtenido a partir de la zona estándar F4 del Continuous Plankton Recorder (CPR, <http://www.sahfos.ac.uk/>). Corresponden a observaciones del color del fitoplancton realizadas sobre muestras del plancton recogido por una red de seda remolcada a una profundidad de 7 m de la superficie por barcos comerciales y que están relacionadas con la concentración de clorofila (Richardson et al., 2006). En segundo lugar, las medidas de clorofila-a superficial en amplias zonas de la plataforma continental se han obtenido de imágenes de satélite utilizando el sensor SeaWiFS, en forma de promedios semanales obtenidos en subzonas de 9x9 km desde el año 1998 (nivel 3, reproceso 5.2, datos descargados en junio de 2009; <http://reason.gsfc.nasa.gov/Giovanni/>). En las estaciones costeras del proyecto RADIALES (entre 80 y 100 m de profundidad máxima) en Vigo, A

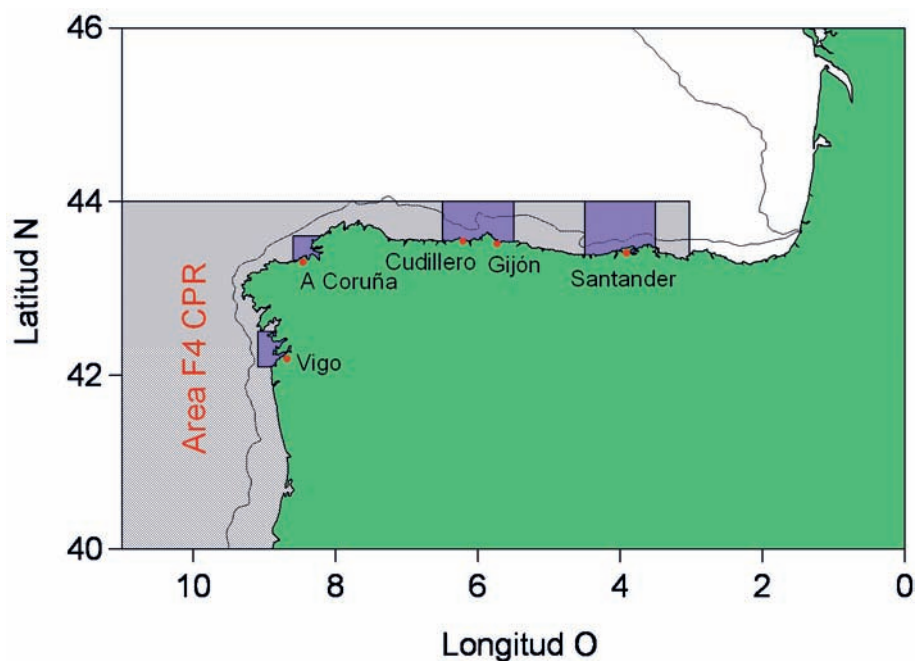


Figura 7.1. Situación de los puntos de muestreo en la costa, de las áreas de observación por satélite (recuadros azules) y de la zona F4 explorada por el Continuous Plankton Recorder (CPR, recuadro gris) de dónde se han obtenido las series de datos de biomasa de fitoplancton. Las medidas de producción primaria se han realizado en A Coruña y Cudillero.

Coruña, Cudillero Gijón y Santander se han tomado perfiles verticales de medidas *in situ* de clorofila mediante fluorímetros sumergibles calibrados con extractos de clorofila-a de muestras de plancton (<http://www.seriestemporales-ieo.com>). Finalmente, en las estaciones de A Coruña y Cudillero se han realizado medidas de producción primaria mediante incubaciones de plancton con ^{14}C correspondientes a 5 capas dentro de la zona fótica hasta llegar al 1% de PAR incidente en la superficie (Bode et al., 1996; Llope et al., 2007; Bode et al., 2011). Las incubaciones se realizaron en tierra simulando las condiciones de irradiancia y temperatura medidas *in situ*. Estas últimas medidas permiten comparar la producción primaria en dos zonas de características oceanográficas diferenciadas en cuanto a la influencia del afloramiento, mayor en A Coruña.

La variabilidad en biomasa y producción primaria se ha estudiado mediante descomposición de las series temporales en media, tendencia lineal, componentes periódicos y autocorrelación (Anexo I). Los residuos de la serie después de eliminar los componentes significativos, se han correlacionado con los correspondientes a variables ambientales representativas de las condiciones climáticas y oceanográficas. Las variables de ámbito regional utilizadas fueron: la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) promediada entre diciembre y marzo (Barnston y Livezey, 1987), la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO, Enfield et al., 2001) y el índice de afloramiento en 43°N , 11°O (AFLO, Lavín et al., 2000) promediado entre abril y setiembre (Capítulo 1). Las condiciones locales fueron representadas por la desviación típica de la temperatura y de la densidad (σ_t), como indicadores de estratificación en la columna de agua (una columna de agua estratificada tiene una mayor variabilidad en los valores de estas variables que una columna bien mezclada), las concentraciones de nitrato, fosfato y silicato, así como los cocientes entre estos nutrientes (Capítulo 4). La variabilidad de la clorofila en las distintas capas de agua y sus relaciones con los nutrientes se abordan en el Capítulo 4. En este capítulo se tratan los valores de biomasa y producción primaria integrada en la zona fótica, que en general se corresponde con la capa 0-50 m en la que han sido promediados los valores de las variables ambientales (temperatura, densidad y nutrientes).

7.3. Variabilidad a escala regional: correlación espacial de las series

A pesar de haberse obtenido con distintas metodologías y en distintas localizaciones geográficas muchas de las series de datos de biomasa y producción primaria empleadas en este estudio están correlacionadas entre sí. Este resultado es en parte esperable, dado que se refieren a una misma región del Atlántico nororiental, pero también confirma la coherencia de las diferentes observaciones. Así ocurre en el caso de la comparación entre las observaciones de clorofila del sensor SeaWifs y los datos medidos en las localidades costeras, con valores del coeficiente de correlación de 0.593, 0.596, 0.612 y 0.602 para Vigo, A Coruña, Cudillero y Santander, respectivamente (todos con $p < 0.001$, $n > 40$). En otros casos, sin embargo la ausencia de correlación significativa revela una dinámica diferente del fitoplancton a escala local. La serie de observaciones del color del fitoplancton del CPR (Fig. 7.2) no está correlacionada con ninguna de las demás series ($p > 0.05$, $n > 50$) en los periodos de observaciones concurrentes, lo que sugiere una diferencia en los patrones de variabilidad de la biomasa de fitoplancton en el océano próximo, por donde discurren la mayor parte de las rutas del CPR, con respecto a la plataforma continental y la costa, registrada en las series de SeaWifs y RADIALES aquí empleadas.

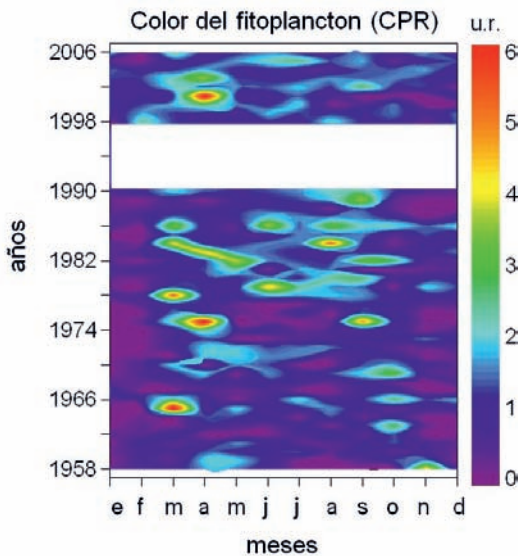


Figura 7.2. Variación temporal de los valores medios mensuales de color del fitoplancton (escala en unidades relativas) medido a partir del Continuous Plankton Recorder en el área estándar F4. Modificado de Bode et al. (2009).

7.4. Biomasa y producción primaria en el océano próximo

En la serie del CPR (Fig. 7.2) se distinguen generalmente dos periodos de valores elevados al año correspondientes a las proliferaciones de fitoplancton en las épocas de transición invierno-primavera y verano-otoño, aunque en ocasiones se distinguen máximos de importancia secundaria en la época de afloramiento estival. Aunque los valores observados desde 1997 no alcanzan los máximos observados en el periodo 1958-1986 no se han encontrado tendencias significativas en los valores medios anuales en ninguno de los dos periodos con observaciones continuas (Bode et al., 2009). Estudios previos de la misma variable del CPR en todo el Atlántico nordeste habían encontrado un incremento aparente de la biomasa de fitoplancton hasta 2002 (Leterme et al., 2005), aunque las nuevas observaciones confirman que los cambios no son iguales en toda la región. Una reconstrucción de los valores medios anuales de biomasa y producción primaria a partir del sensor SeaWiFS indica que no existen tendencias significativas en las mismas desde 1998 en toda la región que abarca desde el mar Céltico y el Golfo de Vizcaya hasta la plataforma continental del noroeste ibérico (Sherman y Hempel, 2009). Esta ausencia de tendencias claras, a pesar de registrarse un calentamiento progresivo del océano en el mismo periodo, puede explicarse por la elevada heterogeneidad de ambientes de la región, debida por una parte a la transición desde zonas de aguas profundas e influencia netamente oceánica a zonas costeras, y por otra a los gradientes de intensidad de afloramiento decreciente de sur a norte y de oeste a este (Lavin et al., 2006). Por tanto no se puede dar una única respuesta al comportamiento a largo plazo del fitoplancton en la región y se evidencia la necesidad de disponer de análisis subregionales y locales de su variabilidad.

7.5. Biomasa y producción primaria en la costa

La variabilidad de la biomasa de fitoplancton sobre la plataforma continental de esta región está muy influida por la actividad estacional del afloramiento (Bode et al., 1996; Nogueira et al., 1998). Las proliferaciones de fitoplancton detectadas desde el satélite mediante el sensor SeaWifs son muy frecuentes durante gran parte del año en la costa de las Rías Baixas y también, aunque con menores valores de biomasa, en las Rías Altas (Fig. 7.3a, b). En contraste, los valores de biomasa son mucho menores en el mar Cantábrico, donde la dinámica estacional del fitoplancton se caracteriza por un máximo principal durante la primavera y otro de menor importancia en el otoño (Fig. 7.3b, c). De esta forma el modelo estacional común observado desde 1998 marca una diferencia fundamental entre el ciclo anual de la biomasa de fitoplancton en Galicia, con un periodo de proliferaciones que se extiende durante gran parte de la primavera y verano, y el del Cantábrico, con un máximo de menor duración en la época de transición invierno-primavera y en ocasiones otro en verano-otoño (Fig. 7.4a). Además, los valores medios estacionales reflejan el gradiente de productividad causado por el afloramiento costero, más intenso en Galicia, de forma que los valores de biomasa disminuyen de sur a norte en Galicia y de oeste a este en el Cantábrico. Esta estacionalidad constituye el principal componente identificado en la variabilidad de las series del sensor SeaWifs en todas las zonas analizadas (Tabla 7.1), resultando generalmente significativos los ciclos de 12 o incluso 6 meses, como en A Coruña y Santander. El término de autocorrelación, significativo en las series de Galicia pero no en las del Cantábrico, revela la importancia del afloramiento en el mantenimiento de una elevada biomasa del fitoplancton durante gran parte del año. A pesar de registrarse elevados

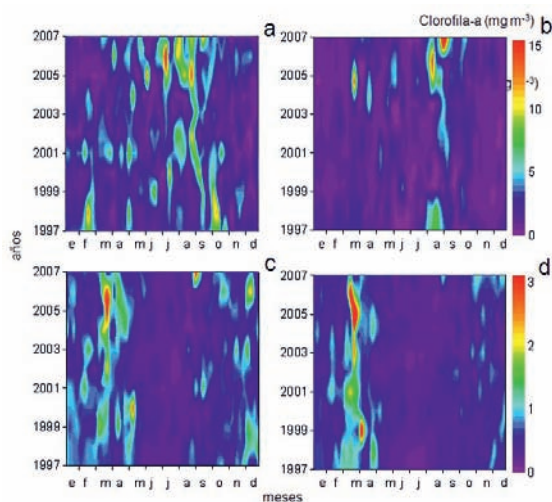


Figura 7.3. Distribución temporal de los valores medios semanales de la concentración de clorofila superficial (mg Cl a m^{-3}) medida a partir de las observaciones del satélite SeaWifs en las distintas áreas seleccionadas: Rías de Vigo y Pontevedra (a), A Coruña (b), Asturias (c) y Santander (d). Nótese las distintas escalas para las zonas de Galicia (a, b) y del Mar Cantábrico (c, d). Modificado de Bode et al. (2011 b).

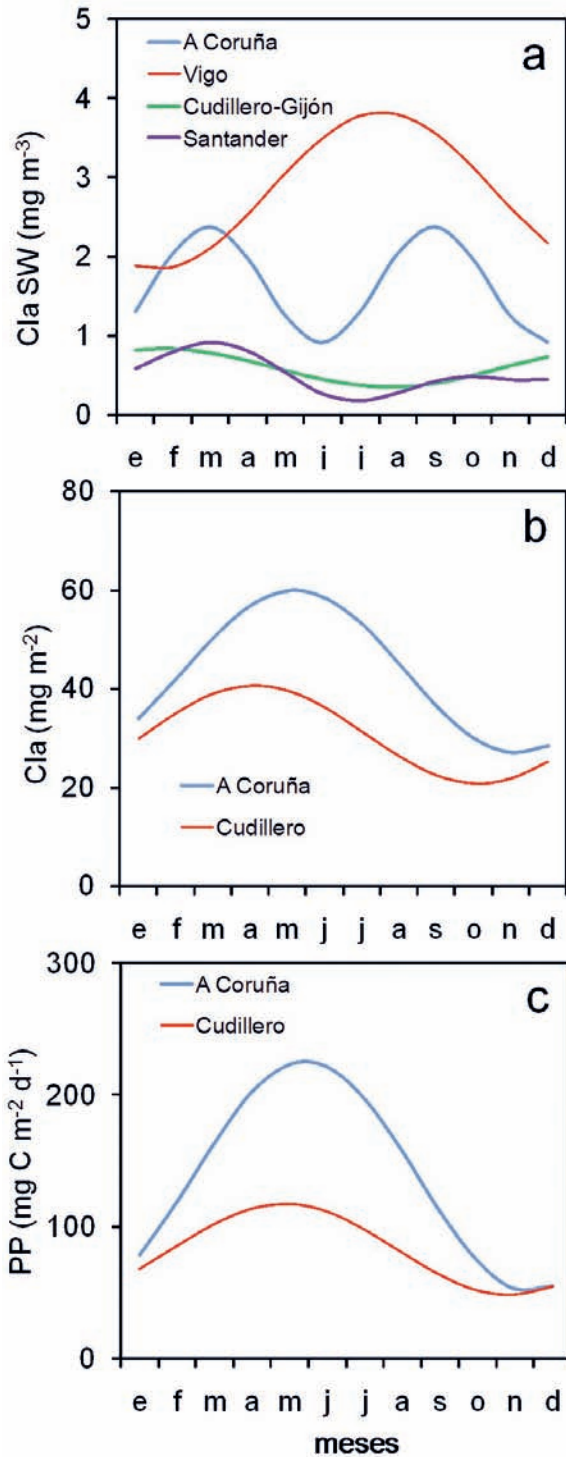


Figura 7.4. Estacionalidad de las medidas de clorofila del satélite SeaWifs (a, mg Cla m^{-3}), in situ (b, mg Cla m^{-2}) y de las medidas de producción primaria (c, $\text{mg C m}^{-2} \text{d}^{-1}$). Modificado de Bode et al. (2011b).

valores de biomasa en los últimos años, por ejemplo en las proliferaciones de los años 2005 y 2006 en verano en Galicia y en primavera en el Cantábrico (Fig. 7.3), únicamente la serie de la zona de A Coruña presenta una tendencia significativa creciente (Fig. 7.5, Tabla 7.1). Es de destacar que ninguna de las series indica una disminución de la biomasa de fitoplancton en la región.

Las series del sensor SeaWiifs analizadas anteriormente ofrecen una imagen coherente en el tiempo de las proliferaciones de fitoplancton, a la vez que integran los resultados en zonas geográficas amplias. Sin embargo, la dinámica del fitoplancton se caracteriza por una elevada heterogeneidad espacial, tanto en la superficie como en su distribución vertical. Las series de datos recogidos *in situ* en estaciones costeras permiten analizar estas variaciones en detalle (Fig. 7.6). Al igual que en las series SeaWiifs con las que están correlacionadas, en todas las series costeras se registran proliferaciones de corta duración que alcanzan mayores valores en Galicia que en el Cantábrico. La mayor parte de la biomasa se concentra en la capa más superficial, como corresponde a una zona fótica de aproximadamente 50 m para estas estaciones. Sin embargo durante periodos de intensa mezcla vertical o hundimiento de aguas superficiales (Casas et al., 1997) la biomasa de fitoplancton se reparte por toda la columna de agua, como ocurre al final del verano y en invierno (Fig. 7.6). Existen diferencias apreciables en los patrones de

variable	serie	periodo	Media	Tendencia lineal		Componentes periódicos					Autocorrelación		Total	
			\bar{x}	b	a	%V _t	T	A	θ	T _{max}	%V _{CC}	ϕ	%V _{AR}	%V _M
Cla-SW	Vigo	1998-2007	2.84	-	-	-	12	0.99	2.31	7.58	17.20	0.24	4.64	21.84
	A Coruña	1998-2007	1.64	0.11	-226.14	4.76	6	0.73	3.18	2.96	11.55	0.24	4.71	21.01
	Cudillero-Gijón	1998-2007	0.59	-	-	-	12	0.24	5.35	1.78	31.74	-	-	31.74
	Santander	1998-2007	0.51	-	-	-	12	0.26	5.07	2.31	32.71	-	-	46.23
Cla	A Coruña	1989-2007	43.44	-	-	-	12	16.48	3.57	5.18	16.16	-	-	16.16
	Cudillero	1992-2007	30.65	-	-	-	12	9.91	4.12	4.13	11.16	-	-	11.16
PP	A Coruña	1989-2007	138.07	4.95	-9893.40	4.82	12	87.22	3.44	5.43	24.40	-	-	29.22
	Cudillero	1992-2007	82.84	-4.11	8210.40	6.72	12	34.51	3.74	4.86	11.33	-	-	30.36
Radiación PAR	A Coruña	1989-2007	1361.24	-	-	-	12	921.89	2.99	6.28	94.56	-	-	94.56
		1993-2007	25.08	-	-	-	12	17.99	2.99	6.29	94.60	-	-	94.60

Tabla 7.1. Componentes de la varianza de las series mensuales de datos de biomasa y producción del fitoplancton y de la radiación solar en distintas localidades de la costa. Cla-SW: clorofila superficial estimada a partir del satélite SeaWiifs (mg Cla m^{-3}), Cla: clorofila medida *in situ* integrada en la columna de agua (mg Cla m^{-2}), PP: producción primaria medida experimentalmente ($\text{mg C m}^{-2} \text{d}^{-1}$), Radiación: radiación solar total medida en A Coruña ($\text{W m}^{-2} \text{d}^{-1}$), PAR: radiación fotosintéticamente activa medida en A Coruña ($\text{mol fotones m}^{-2} \text{d}^{-1}$). Los componentes de la varianza de cada serie son: la media (\bar{x}), la tendencia lineal (a: ordenada en el origen, b: pendiente), los componentes periódicos (T: período en meses, A: amplitud, θ : fase en radianes y T_{max}: valor máximo para cada componente) y la autocorrelación para el desfase 1 (ϕ : coeficiente de autocorrelación). Sólo se indican los componentes significativos ($p < 0.05$). %V_t, %V_{CC}, %V_{AR} y %V_M: porcentajes de varianza explicados por los diferentes componentes y por el modelo total (ver Anexo I).

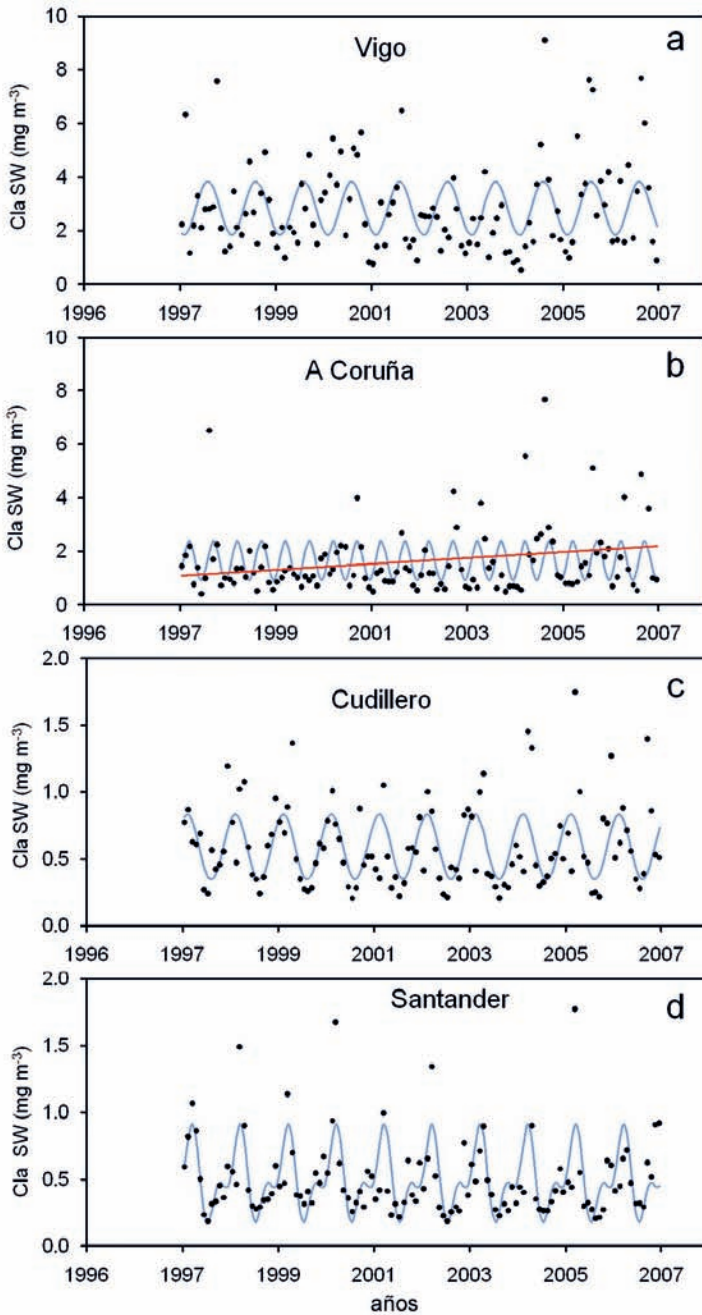


Figura 7.5. Variación temporal de los valores medios mensuales de clorofila superficial (mg Cla m^{-3}) medida a partir de las observaciones del satélite SeaWifs en las distintas áreas seleccionadas: Rías de Vigo y Pontevedra (a), A Coruña (b), Asturias (c) y Santander (d). Las líneas continuas indican las componentes periódicas (azul) y la tendencia (roja) significativas ($P < 0.05$).

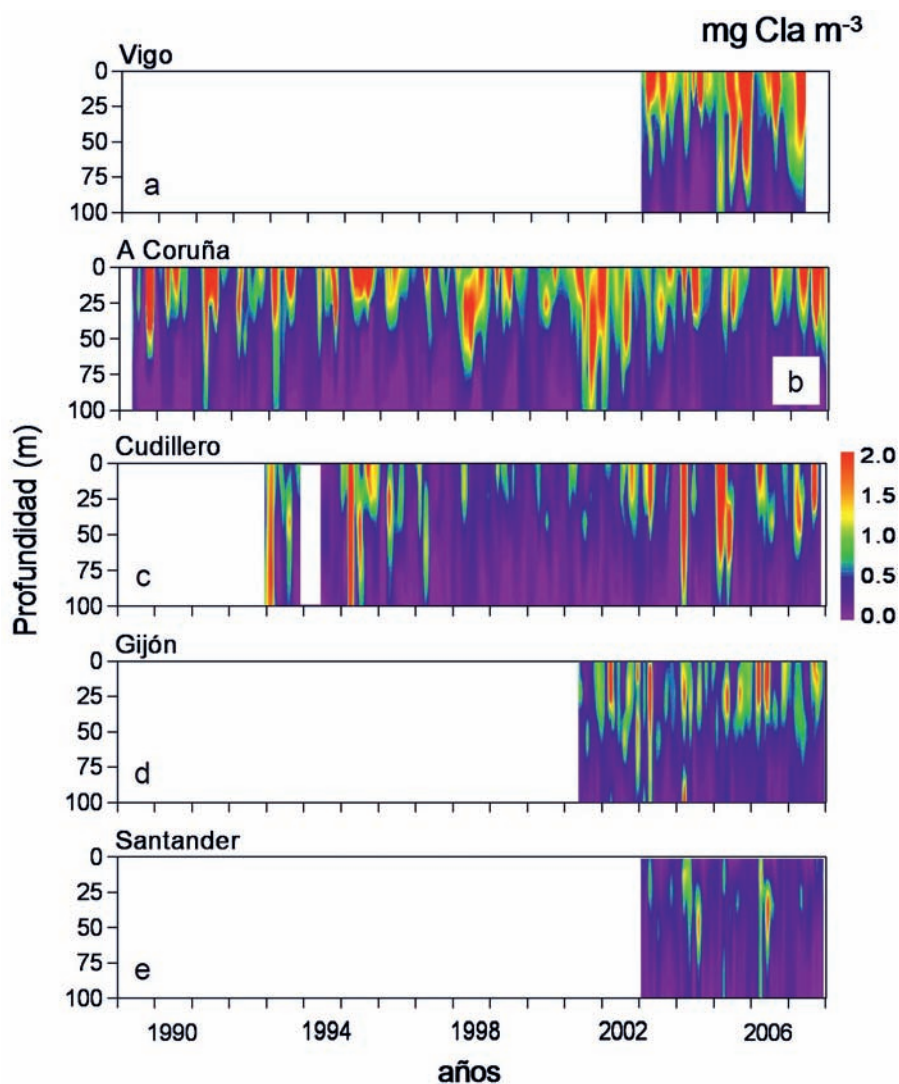


Figura 7.6. Distribución temporal de los valores de la concentración de clorofila medidos en la columna de agua (mg Cla m^{-3}) en Vigo (a), A Coruña (b), Cudillero (c), Gijón (d) y Santander (e). Modificado de Bode et al. (2011).

variabilidad de localidades relativamente próximas. Así, a pesar de disponer de una serie de datos más corta, en los momentos de hundimiento se observa que la biomasa de fitoplancton en toda la columna de agua es mayor en Vigo que en A Coruña, donde la biomasa se concentra generalmente en la zona fótica, probablemente debido al distinto tamaño de las rías respectivas. La regeneración de nutrientes a partir de la materia orgánica inicialmente producida por los eventos de afloramiento es muy elevada en las proximidades de las Rías Baixas (Prego et al., 1999). En el Cantábrico, se aprecian proliferaciones de fitoplancton más frecuentes en Gijón,

aunque menos intensas, que en Cudillero, a pesar de que las estaciones muestreadas distan menos de 60 km entre sí. Finalmente, los valores de biomasa registrados son mucho menores en Santander que en las localidades asturianas.

Las series más largas, en A Coruña y Cudillero, donde además hay medidas concurrentes de producción primaria, permiten un análisis comparativo más detallado. En el caso de la biomasa ambas series presentan un ciclo significativo de 12 meses (aunque no de 6 meses como en el caso de la serie SeaWifs para la zona de A Coruña) y se alcanzan valores menores en Cudillero (Fig. 7.4b, Tabla 7.1). La producción primaria sigue un patrón similar al de la biomasa en A Coruña mientras que en Cudillero presenta un patrón bimodal con un máximo principal en primavera y segundo máximo en otoño (Fig. 7.4c). No se han encontrado tendencias interanuales significativas en biomasa, sin embargo los mayores valores de cada serie se han registrado en los periodos 1992-1996 y 2002-2006 en A Coruña ($>100 \text{ mg C l}^{-1}$) y en Cudillero ($>50 \text{ mg C l}^{-1}$) en 1993-1997 y 2003-2007 (Fig. 7.7 a, b). Esto sugiere la existencia de ciclos decadales en la biomasa, aún no significativos en las series disponibles por su duración relativamente corta para detectarlos con claridad. En contraste con lo observado para la biomasa, la producción primaria presenta una tendencia lineal creciente en A Coruña y decreciente en Cudillero (Fig. 7.7c, d). Los valores absolutos de ambas tendencias son muy similares (entre 4 y 5 $\text{mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ por año, Tabla 7.1), lo que supone que, en promedio, cada año se compensa el aumento de fijación de carbono en Galicia con la disminución observada en el Cantábrico. En todo caso, en ninguna de las series se ha detectado una variación apreciable en la aparición de pulsos de producción elevada ($>400 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ en A Coruña y $>200 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ en Cudillero, Fig. 7.7).

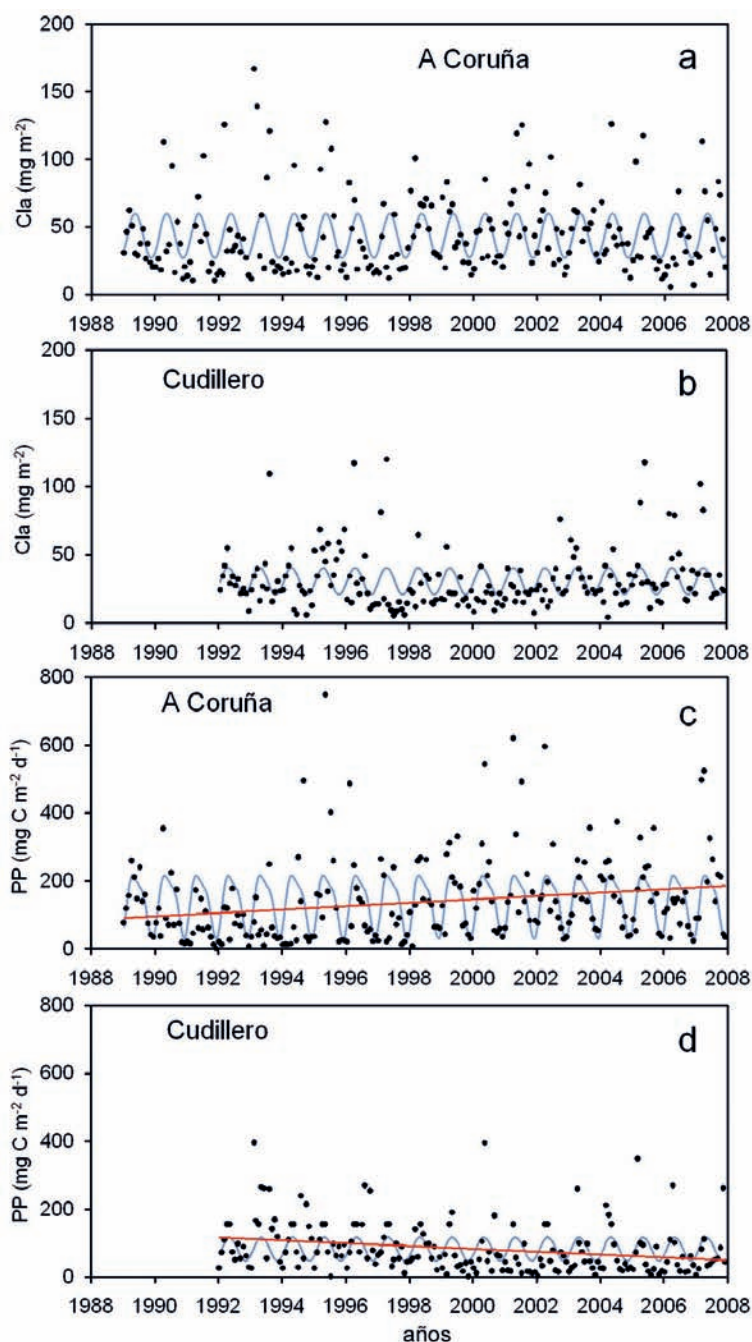


Figura 7.7. Variación temporal de los valores medios mensuales de clorofila integrada en la columna de agua (a, b, mg Cla m⁻²) y de la producción primaria (c, d, mg C m⁻² d⁻¹) medidas en A Coruña (a, c) y Cudillero (b, d). Las líneas continuas indican las componente periódicas (azul) y la tendencia (roja) significativas ($p < 0.05$).

7.6. Influencia climática y oceanográfica

Las causas últimas en las variaciones de biomasa y producción primaria deben estar en las alteraciones de luz y nutrientes en el agua. Los niveles de irradiancia están determinados en primer lugar por el ciclo solar estacional. Un análisis de los valores de irradiancia solar total y de PAR, medidos de forma independiente en A Coruña indica que no ha habido variaciones notables en los últimos 20 años (Fig. 7.8). En ambos casos el análisis de series revela que no existe tendencia interanual y que el único factor significativo es el ciclo anual que se repite cada 12 meses (Tabla 7.1, Fig. 7.9). Por tanto el incremento en producción primaria medido en A Coruña no se puede atribuir a un incremento en la radiación solar incidente. Tampoco hay evidencias de que se hayan producido cambios en la penetración de la luz en las aguas, ya que la profundidad de la zona eufótica, indicada de forma aproximada por la capa de alta biomasa de fitoplancton (ej. Bode et al., 2004), se ha mantenido entre los mismos límites a lo largo de la serie (Fig. 7.6 b).

Otros factores, como el incremento en la temperatura del agua, su estratificación y la concentración de nutrientes en la zona fótica, pueden haber influido en la variabilidad local observada en biomasa y producción primaria. En el capítulo 4 se ha visto la correlación negativa de las series mensuales de clorofila con la temperatura y positiva con el nitrato, tanto en A Coruña como en Cudillero, indicando la rápida respuesta del fitoplancton al afloramiento en ambas zonas. A la misma escala temporal (meses) las series de clorofila y producción de A Coruña presentan correlaciones significativas ($p < 0.05$) y positivas con algunas variables climáticas, como la clorofila con el índice de afloramiento ($r = 0.151$) y la producción primaria con el índice NAO ($r = 0.130$). Sin embargo no se han encontrado correlaciones significativas a esta escala para las series de Cudillero. Esto sugiere que los efectos climáticos no siempre se manifiestan de forma inmediata. Un análisis de las series de valores medios anuales de una selección de variables ambientales indica la existencia de tendencias significativas al aumento de la temperatura superficial, de la estratificación (medida a partir de la desviación típica de la densidad del agua) y de las concentraciones de silicato en A Coruña (Tabla 7.2). En Cudillero, sin embargo, se detecta una tendencia creciente en la relación entre nitrato y silicato, mientras que no resultan significativas las variaciones en temperatura y estratificación. Estos resultados, como se ha visto en los capítulos 2 y 4, sugieren la existencia de variabilidad interanual en las propiedades de las masas de agua de la región que puede afectar al crecimiento del fitoplancton. Mientras que no es posible concluir un cambio definido a largo plazo en estratificación, principalmente debido a la mezcla invernal intensa del año 2005 (Capítulo 2), se ha observado un incremento en las concentraciones de nitrato y fosfato tanto en Galicia como en el Cantábrico (Capítulo 4). En todo caso la detección de los cambios en la estratificación y en los nutrientes depende de la longitud de las series, como evidencian los aparentes ciclos plurianuales en el fosfato (Bode et al., 2011b).

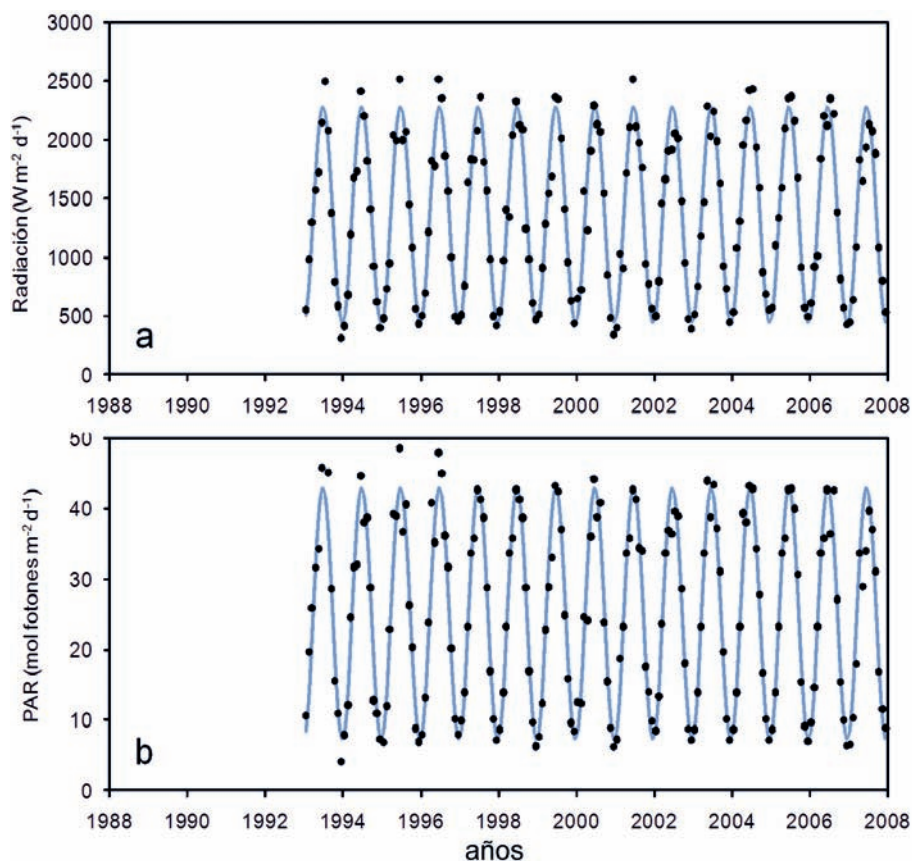


Figura 7.8. Variación temporal de los valores medios mensuales de radiación solar total (a, $\text{W m}^{-2} \text{d}^{-1}$) y de la radiación fotosintéticamente activa (b, PAR, $\text{mol fotones m}^{-2} \text{d}^{-1}$) medidas en A Coruña.

Las correlaciones cruzadas entre las series medias anuales mostraron efectos significativos ($p < 0.05$) de las concentraciones de fosfato sobre la clorofila ($r = -0.498$, con un retardo de 1 año) y de nitrato sobre la producción primaria ($r = 0.514$, sin retardo) en A Coruña, mientras que de nuevo no se encontraron correlaciones significativas en las series de Cudillero. Sin embargo las proporciones de nutrientes tienen una influencia positiva sobre la producción primaria. Así la relación N:P se correlaciona positivamente y sin retardo con la clorofila en A Coruña ($r = 0.620$) y con la producción primaria en Cudillero ($r = 0.680$). También la relación N:Si se correlaciona de forma positiva con la producción primaria en Cudillero ($r = 0.634$, con retardo de 1 año). Estos resultados apoyan la hipótesis de que la producción, al igual que ocurre con la composición de especies del fitoplancton en esta región experimenta cambios decadales relacionados con las proporciones de nutrientes inorgánicos de las masas de agua presentes en la zona (Llope et al., 2007), siendo el fosfato y el silicato los principales responsables de estas variaciones. Por otro lado, la estratificación térmica ($dt T$) favorece la acumulación de biomasa de fitoplancton en Cudillero en el mismo año ($r = 0.575$, $p < 0.05$), lo que también se observa con el índice de afloramiento estacional ($r = 0.572$, $p < 0.05$). Estos resultados confirman que

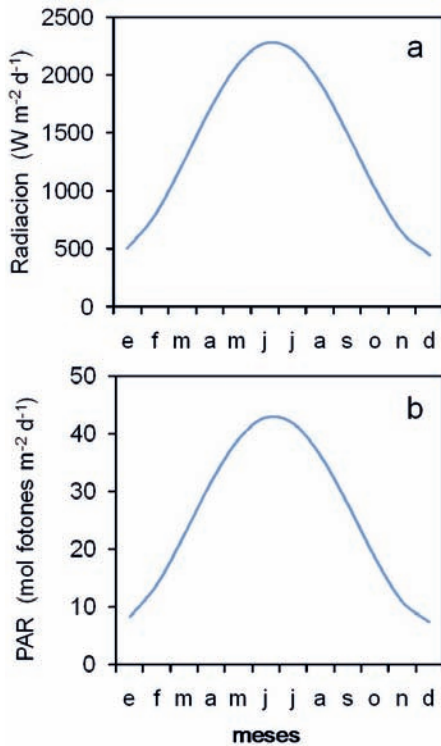


Figura 7.9. Ciclo estacional de la radiación solar total (a, $W m^{-2} d^{-1}$) y de la radiación fotosintéticamente activa (b, PAR, mol fotones $m^{-2} d^{-1}$) medidas en A Coruña.

no siempre es esperable un efecto negativo del calentamiento de la superficie del océano y de la estratificación térmica sobre la biomasa y producción del fitoplancton. En los grandes ecosistemas neríticos del océano no se han registrado, en general, grandes variaciones decadales en la biomasa y producción del fitoplancton (Sherman y Hempel, 2009) a pesar del progresivo calentamiento de las aguas. Sin embargo, en las áreas centrales de los océanos, especialmente del Atlántico Norte, se ha detectado un incremento en el tamaño de las áreas con baja biomasa de fitoplancton, lo que se atribuye al descenso en el aporte de nutrientes debido a la creciente estratificación (Behrenfeld et al., 2006). En todo caso las evidencias actuales apuntan a una respuesta heterogénea del fitoplancton en las distintas regiones oceánicas (ver una revisión reciente en Bode et al., 2011c).

Los aportes de nutrientes y la variabilidad en las propiedades de las masas de agua dependen en gran medida de las condiciones climáticas. La Oscilación del Atlántico Norte (NAO), uno de los principales factores de variación atmosférica que afecta al clima de Europa (Barnston y Livezey, 1987), presenta una ligera pero significativa tendencia a la disminución durante el periodo estudiado (Tabla 7.2), lo que indica una menor diferencia entre los sistemas de altas y bajas presiones de la región (Capítulo 1). En este periodo la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO) presenta una tendencia positiva, consecuencia del calentamiento progresivo del océano. Finalmente el índice que mide la intensidad del afloramiento para la zona Galicia-Cantábrico ha disminuido de forma significativa en la primavera y verano desde 1990 (Tabla 7.2). De estas variables sólo NAO se correlaciona positivamente con la producción medida en A Coruña, aunque con un retardo de un año ($r = 0.677$, $p < 0.05$).

variable	zona	periodo	b	a	%V _t	r	p
Cla	A Coruña	1989-2007	-	-	-	-	-
	Cudillero	1993-2007	-	-	-	-	-
PP	A Coruña	1990-2007	13.71	-27397.30	60.89	0.780	0.000
	Cudillero	1993-2007	-	-	-	-	-
N	A Coruña	1989-2007	-	-	-	-	-
	Cudillero	1993-2007	-	-	-	-	-
P	A Coruña	1989-2007	-	-	-	-	-
	Cudillero	1993-2007	-	-	-	-	-
Si	A Coruña	1991-2007	3.31	-6616.08	37.60	0.613	0.009
	Cudillero	1993-2007	-	-	-	-	-
N:P	A Coruña	1989-2007	-	-	-	-	-
	Cudillero	1993-2007	-	-	-	-	-
N:Si	A Coruña	1991-2007	-0.09	184.19	24.84	-0.498	0.042
	Cudillero	1993-2007	0.05	-93.18	29.55	0.544	0.036
SST	A Coruña	1989-2006	0.03	-59.74	23.23	0.482	0.043
	Cudillero	1989-2006	-	-	-	-	-
dtT	A Coruña	1991-2007	-	-	-	-	-
	Cudillero	1993-2007	-	-	-	-	-
dtσ _t	A Coruña	1991-2007	0.01	-19.14	44.69	0.669	0.003
	Cudillero	1993-2007	-	-	-	-	-
NAO _{DM}		1989-2007	-0.04	85.21	28.28	-0.532	0.019
AMO		1989-2007	0.02	-48.76	58.30	0.764	0.000
AFLO _{AS}		1989-2007	-10.18	20339.99	23.54	-0.485	0.035

Tabla 7.2. Tendencias interanuales significativas. Parámetros de la regresión lineal entre los valores medios anuales de biomasa (Cla, mg m⁻²), producción primaria (PP, mg C m⁻² d⁻¹), nitrato (N, mmol m⁻²), fosfato (P, mmol m⁻²), silicato (Si, mmol m⁻²), índices N:P y N:Si, temperatura superficial (SST, °C), desviación típica de la temperatura (dtT, °C) y de la densidad (dtσ_t), todas ellas integradas o promediadas en la zona fótica de las estaciones de A Coruña (40 m) y Cudillero (50 m), y el año de muestreo. También se indican los parámetros de las regresiones significativas en el caso de la Oscilación del Atlántico Norte promediada entre diciembre y marzo (NAO_{DM}), del valor medio anual de la Oscilación Multidecadal del Atlántico (AMO) y del índice de afloramiento (AFLO_{AS}) calculado para una celda de 2°x2° centrada en 43° N, 11° W y promediado entre abril y setiembre. b: tendencia interanual, a: constante, %V_t: porcentaje de varianza total explicada, r: coeficiente de correlación, p: significación.

Estos resultados confirman que no es posible establecer una única respuesta de la biomasa y producción del fitoplancton costero a los cambios inducidos por el clima. Por una parte, la elevada heterogeneidad espacial característica del plancton nerítico, hace que el crecimiento rápido del fitoplancton ante condiciones adecuadas de luz y nutrientes, como las aportadas por los fenómenos de afloramiento, compense el efecto negativo que supone el establecimiento de una capa superficial inmiscible con las aguas profundas, como sucede en el océano abierto. La existencia de frentes de marea, aportes de ríos y afloramientos, entre otros, modifica constantemente las condiciones de estratificación que pueden limitar la producción primaria. Esto explica que no haya muchas relaciones directas entre la variabilidad climática, como el índice NAO, y las variables del plancton (Bode et al., 2009). Incluso las variables ambientales de relación más directa con la producción del fitoplancton, como la estratificación o los nutrientes, presentan pocas correlaciones significativas a medio y largo plazo, indicando que los efectos a estas escalas pueden manifestarse incluso al cabo de varios años, como consecuencia de interacciones no lineales que se amplifican con el tiempo. El retardo en la respuesta a una perturbación es característico del fitoplancton que vive en ambientes fluctuantes, como las zonas de afloramiento, pues una mayor diversidad de tasas de crecimiento y respuestas fisiológicas favorece una mayor duración de los retardos (Duarte, 1990). En contraste, los estudios a muy corta escala temporal (días, semanas) permiten establecer relaciones lineales entre los factores ambientales, como el viento y los nutrientes, y la producción del fitoplancton (Álvarez-Salgado et al., 2002). Así se ha estimado, a partir del descenso en la intensidad del afloramiento, que la producción primaria de Galicia puede haber disminuido un 50% en los últimos 40 años (Pérez y Boscolo, 2010). Un primer análisis de la clorofila superficial medida por satélite indicó un aparente descenso de los valores medios en la zona oceánica próxima a Galicia (Pérez et al., 2010). La extrapolación de estas relaciones a escalas temporales más largas, sin embargo, se contradice con la falta de evidencias de disminución en las series temporales de medidas directas de biomasa (Pérez et al., 2010) y producción (Varela et al., 2006; Bode et al., 2011b, c).

Además de los efectos climáticos hay que tener en cuenta su interacción con otros cambios ambientales causados directamente por la actividad humana. Ninguna región del océano se conserva inalterada pero en concreto toda la región del nordeste del Atlántico presenta un elevado grado de impacto antropogénico por múltiples efectos, que incluyen desde la pesca y tráfico marítimo intenso, a la contaminación, especialmente en la zona costera (Halpern et al., 2008). No se conocen suficientemente los efectos concretos que la sobrepesca produce sobre el fitoplancton y la bases de la cadena trófica, aunque en el mar Cantábrico se ha estimado que las principales especies de peces capturadas no tienen un gran efecto directo sobre el fitoplancton (Sánchez y Olaso, 2004). Mayor podría ser la influencia de la contaminación, con un doble efecto. Por una parte el aporte directo de nutrientes antropogénicos estimularía la producción primaria llegando a causar eutrofización en algunas áreas. Por otra parte los vertidos de tóxicos y contaminantes reducirían el crecimiento del fitoplancton y por tanto la producción. Sin embargo, a excepción de zonas costeras muy localizadas o catástrofes ecológicas concretas (OSPAR, 2000, Varela et al., 2006), no se dispone de información suficiente para comprobar el grado de influencia directa de la eutrofización o de la contaminación sobre la biomasa y producción primaria en la plataforma continental del Atlántico en el noroeste de España.

7.7. Conclusiones

1. A pesar de un calentamiento progresivo del océano en las últimas décadas en toda la región, la biomasa y producción primaria del Atlántico nordibérico no presenta una tendencia interanual uniforme. Las series de observaciones analizadas indican que no han existido cambios importantes en la biomasa media anual desde 1958 en el océano próximo y desde 1990 en las aguas costeras.
2. Las diferencias locales pueden atribuirse a la distinta influencia del afloramiento costero, que permite mayor biomasa y producción en Galicia que en el mar Cantábrico. Las series indican un aumento de la producción primaria en A Coruña que se corresponde con una disminución equivalente en Cudillero.
3. Aparte de los factores directamente relacionados con el afloramiento, como temperaturas relativamente frías y altas concentraciones de nutrientes, las correlaciones con factores climáticos y oceanográficos no permiten deducir un efecto directo e inmediato de éstos sobre la biomasa y la producción. Por el contrario, existen evidencias de interacciones no lineales con factores como la composición relativa de los nutrientes, que inducen respuestas en el fitoplancton retardadas en el tiempo. A diferencia del océano profundo, no se han encontrado evidencias de un efecto negativo de la estratificación térmica sobre la biomasa y producción del fitoplancton en esta región.
4. Se desconocen las interacciones de los efectos indirectos del clima sobre la producción primaria con los efectos directos causados por otros factores de origen antropogénico como la eutrofización y contaminación crecientes de la zona costera.