

El color oceánico como herramienta para el estudio de fluctuaciones pesqueras: aplicación en el Golfo de Cádiz

G. Navarro y J. Ruiz

gabriel.navarro@icman.csic.es, javier.ruiz@icman.csic.es

*Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía (CSIC)
Avda. República Saharaui s/n. Puerto Real. Cádiz*

RESUMEN

En el presente trabajo se ejemplifica cómo el uso de datos recogidos por diferentes radiómetros en órbita es utilizado para entender la oceanografía física y biológica de la zona de plataforma del Golfo de Cádiz. Se muestra, además, como dicho conocimiento puede ser utilizado para analizar la dinámica de especies explotadas bajo aproximaciones que consideran la dinámica del conjunto del ecosistema.

PALABRAS CLAVE: Golfo de Cádiz, SeaWiFS, AVHRR, producción primaria, acoplamiento físico-biológico, recursos pesqueros.

ABSTRACT

In this work, data collected by several *in orbit* radiometers have been used to better understand the physical and biological oceanography in the continental shelf of the Gulf of Cádiz. In addition, it is shown that the generated remote sensing information can be applied to analyze the dynamics of fisheries resources that are exploited in the area under approximations that consider the dynamics of the entire ecosystem.

KEY WORDS: Gulf of Cádiz, SeaWiFS, AVHRR, primary production, physical-biological coupling, fisheries resources.

INTRODUCCIÓN

Aunque el Golfo de Cádiz (Figura 1) se encuentra situado en un lugar estratégico, conectando el océano Atlántico con el mar Mediterráneo, han sido muy escasos los estudios oceanográficos que se han realizado en la zona, y más concretamente en su plataforma continental. Este desconocimiento dificulta aproximaciones al uso sostenible de sus recursos pesqueros mediante planteamientos de carácter ecosistémico. Esta deficiencia de conocimiento se ha superado parcialmente en los últimos años con estudios realizados por diferentes instituciones en el área, enfocados principalmente a conocer la oceanografía física y biológica, y cómo los procesos oceanográficos influyen en el reclutamiento de especies de interés pesquero (García-Lafuente y Ruiz, en prensa y artículos en este monográfico) que son económicamente importantes en la región suratlántica de Andalucía.

Los estudios realizados hasta la fecha en el Golfo de Cádiz, muestran que la cuenca está suje-

ta a numerosos procesos oceanográficos con un carácter muy dinámico, sobre todo influidos por el régimen zonal de vientos. Algunos de estos trabajos están basados en imágenes térmicas que describen el patrón de afloramiento producido por el viento en los cabos San Vicente y Santa María (Folkard *et al.*, 1997); así como la existencia de una contracorriente hacia el oeste en la zona de plataforma (Relvas y Barton, 2002), sobre todo con vientos de levante. Vargas *et al.* (2003) a través de un análisis de descomposición en funciones empíricas ortogonales (EOF) sobre imágenes semanales de SST (temperatura superficial del mar), revelan la peculiaridad térmica de esta zona de plataforma, la cual presenta temperaturas mayores en verano y más frías en los meses invernales, comparadas ambas con el resto de la cuenca. Esta zona aparece también claramente definida en otros análisis EOF basados en imágenes semanales de clorofila estimada por el sensor SeaWiFS (Navarro y Ruiz, 2004).

G. Navarro y J. Ruiz

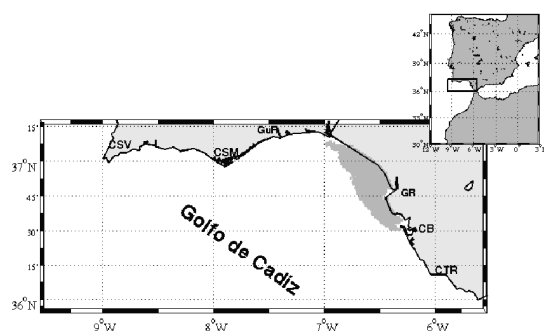


Figura 1. Localización geográfica del Golfo de Cádiz. La zona de plataforma estudiada viene diferenciada por el área gris entre Huelva y Cádiz delimitada a través del análisis EOF realizado por Navarro y Ruiz (2004). CSV (cabo San Vicente), CSM (cabo Santa María), Gu (río Guadiana), GR (río Guadalquivir), CB (bahía de Cádiz) y CTR (cabo Trafalgar).

Es conocida la importancia que tiene la temperatura de la masa de agua para la puesta y desarrollo de numerosas especies de interés pesquero, constituyendo un factor que potencialmente regula las fluctuaciones en el reclutamiento de las mismas. Cambios en la temperatura de la columna de agua parecen ser uno de los condicionantes que han originado cambios en las pesquerías pelágicas de la zona durante las últimas décadas (Ruiz *et al.*, en prensa). Además de la temperatura del mar, la hidrodinámica de la zona también afecta al reclutamiento de estas especies. Esta hidrodinámica está fuertemente controlada por el forzamiento que el régimen de vientos ejerce sobre las corrientes en la zona de plataforma. Relvas y Barton (2002), determinaron que la contracorriente costera hacia el oeste en la plataforma continental se intensifica con los vientos de levante. En estas condiciones los huevos y larvas de boquerón (*Engraulis encrasicolus*) son advectados hacia el cabo San Vicente (Catalán *et al.*, en prensa), disminuyendo la probabilidad de permanecer en la zona de plataforma entre los cabos Trafalgar y Santa María y disminuyendo el reclutamiento y las capturas futuras (Ruiz *et al.*, en prensa).

Además de estos componentes puramente físicos, la información obtenida desde satélites puede ayudar a cuantificar la abundancia de productores primarios (fitoplancton) en el ecosistema pelágico y por lo tanto la cantidad de alimento disponible en la base de las redes tróficas. Los sensores de color oceánico nos permiten estimar la cantidad de fitoplancton en el océano a través de la cloro-

fila y calcular la producción primaria por medio de algoritmos empíricos. Especies de interés pesquero como los clupeidos se alimentan principalmente de fitoplancton y zooplancton en varias fases de su ciclo de vida (Blaxter y Hunter, 1982), y la cadena alimentaria de estas especies son en general cortas, presentando dos o tres componentes (Ryther, 1969; Pauly y Christensen, 1995). Esta circunstancia conecta estrechamente la dinámica de sus primeras fases vitales con la variabilidad física y biológica del ecosistema. Esta variabilidad en la zona de plataforma del Golfo de Cádiz está influenciada por el transporte de Ekman asociado al régimen de vientos. Éstos son fundamentalmente zonales y producen fases de afloramiento (*upwelling*) durante ponientes y hundimiento (*downwelling*) durante levantes. Además del efecto de los vientos, la producción primaria de la plataforma se ve muy influenciada por la presencia del río Guadalquivir y de otros ríos de menor caudal que desembocan en la misma, como son el Guadiana, Piedras y Tinto-Odiel. De ellos es el Guadalquivir el que tiene una importancia relevante no sólo en la biología de la zona, sino también en la hidrodinámica, ya que es un motor de la corriente de plataforma (García-Lafuente *et al.*, en prensa) y además es una fuente importante de nutrientes y materia orgánica en la zona (Huertas *et al.*, 2005).

El objetivo del presente trabajo es mostrar un ejemplo de la utilización de imágenes procedentes de radiómetros para aplicaciones como la gestión de recursos pesqueros en la cuenca suroeste de la Península Ibérica, donde multitud de factores ambientales y humanos controlan las fluctuaciones anuales de capturas.

MATERIAL Y MÉTODOS

Imágenes térmicas

Las imágenes térmicas (SST) utilizadas en este trabajo proceden del sensor AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), que se encuentra a bordo de los satélites de la serie NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Las imágenes fueron obtenidas vía Internet del DLR (Agencia Espacial Alemana), con una resolución espacial de 1.1 km (<http://isis.dlr.de/>). Las imágenes utilizadas en este trabajo se corresponden con promedios mensuales.

Imágenes SeaWiFS

Las imágenes procesadas del sensor SeaWiFS se corresponden con el nivel L1A (radiancias), y han sido procesadas a nivel L2 (datos geofísicos) y L3 (promedios temporales) mediante el software SeaDAS v4.6 (<http://seadas.gsfc.nasa.gov>). Las imágenes L1A fueron suministradas por el GSFC para las antenas HRPT situadas en las Islas Canarias (HCAN y HMAS) así como en Galicia (HSAN). Se ha utilizado el algoritmo OCv4 para obtener los datos de concentración de clorofila superficial (CHL). También se utilizó el programa SeaDAS v4.6 para proyectar las imágenes a proyección Mercator. Los promedios mensuales de clorofila y PAR (radiación fotosintéticamente activa) (L3), se formaron por la media aritmética de todas las escenas disponibles para ese mes píxel a píxel (excluyendo los datos erróneos como nubes, tierra, etc). Los promedios mensuales mantienen la resolución espacial de las imágenes diarias, es decir, 1.1 km en el nadir y éstos se hacen para disminuir el efecto de las nubes.

Algoritmo de producción primaria

Las tasas de producción primaria (PP) se estimaron utilizando el modelo VGPM de Behrenfeld y Falkowski (1997) a través de la ecuación:

$$PP_{Z_{1\%}} = 0.66125 \times P_{opt}^B \times \frac{E_0}{E_0 + 4.1} \times Z_{1\%} \times C_{sat} \times D_{irr}$$

donde P_{opt}^B es la tasa máxima de fijación de carbono en la columna de agua ($\text{mgC mgChl}^{-1} \text{h}^{-1}$) calculada a partir de los datos de SST (Behrenfeld y Falkowski, 1997); E_0 es la radiación diaria que llega a la superficie del océano (PAR, $\text{mol quanta m}^{-2} \text{d}^{-1}$) y puede obtenerse de los datos procedentes del sensor SeaWiFS; $Z_{1\%}$ es la profundidad de la capa fótica que se calcula a partir de la concentración de clorofila superficial (Morel y Berthon, 1989); CHL (mgChl m^{-3}) es la concentración de clorofila superficial derivada del sensor SeaWiFS y D_{irr} es el fotoperiodo (en horas) siguiendo la ecuación de Platt *et al.* (1990). El modelo VGPM fue implementado sobre las imágenes mensuales de CHL, PAR y SST, reteniendo la resolución espacial de 1.1 km.

RESULTADOS Y DISCUSION

La climatología mensual del periodo de estudio (1998-2004) para SST, CHL y PP se presenta en la Figura 2, así como las anomalías mensuales que han sido calculadas como la diferencia entre el promedio mensual y el valor climatológico mensual.

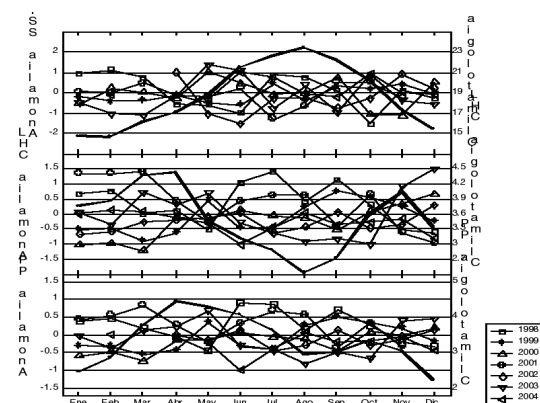


Figura 2. Serie mensual de climatologías y anomalías para la SST ($^{\circ}\text{C}$), concentración de clorofila (CHL, mgChl m^{-3}) y producción primaria (PP, $\text{gC m}^{-2}\text{d}^{-1}$) en la zona de plataforma.

La climatología de SST muestra un patrón estacional muy claro, con máximos en verano (23°C , agosto) y mínimos en los meses de invierno (15°C , enero). Las anomalías de SST pueden alcanzar el 10% del valor promedio durante los diferentes años de estudio. La plataforma es la zona con menor inercia térmica y mayor rango de variación entre verano e invierno respecto al conjunto de la cuenca (Vargas *et al.*, 2003; Navarro y Ruiz, 2004). Uno de los principales agentes de este rango de variación térmica puede tener su origen en el calentamiento que ocurre en las marismas del Guadalquivir durante el flujo y reflujo marea (García-Lafuente *et al.*, en prensa). En ese calentamiento local del entorno estuárico del Guadalquivir puede tener su origen la corriente costera en dirección hacia el oeste del conjunto de la plataforma, corriente asociada a gradientes de presión no compensados geostroficamente por la proximidad de la costa.

Con respecto a la concentración de clorofila, se observa que la climatología mensual presenta un patrón bimodal, con máximos en los meses de primavera y en los de otoño. El primero de ellos, de mayor intensidad, se alcanza en los meses de marzo y abril ($\approx 4.5 \text{ mgChl m}^{-3}$), mientras que el segundo *bloom* se

produce entre los meses de octubre y noviembre ($\approx 3.8 \text{ mgChl m}^{-3}$). El mínimo anual se produce en el mes de agosto, con una concentración cercana a 2.5 mgChl m^{-3} . Las anomalías representan un porcentaje alto del valor medio de clorofila ($\approx 30\%$), lo que indica una variabilidad interanual bastante elevada, apareciendo al año entre dos y tres máximos. Por último, el patrón mensual de producción primaria presenta un patrón diferente al de la clorofila superficial, con máximos en primavera-verano y mínimos en invierno. Los valores climatológicos oscilan entre 2.2 y $4.5 \text{ gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, siendo el máximo de producción primaria coincidente en marzo con el máximo de clorofila. Esto también ocurre en invierno, cuando coinciden los mínimos de clorofila y producción primaria en el mes de diciembre.

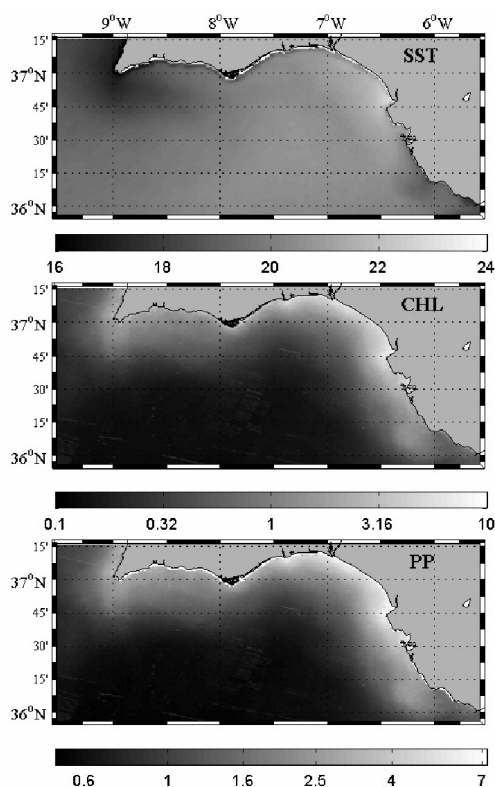


Figura 3. Imagen climatológica para el mes de junio de SST ($^{\circ}\text{C}$), concentración de clorofila (mgChl m^{-3}) y producción primaria ($\text{gC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$).

Independientemente del mes en el que nos encontremos, la concentración de clorofila y producción primaria es mayor en esta zona costera cercana a la desembocadura del río Guadalquivir con respecto al resto de la cuenca (Navarro y Ruiz, 2004). A modo de ejemplo, en la Figura 3 se presenta la imagen cli-

matológica para el mes de junio de SST, CHL y PP. Además, existe una conexión clara entre el régimen de vientos y la concentración de clorofila en la zona de plataforma (Navarro y Ruiz, 2004). El viento de poniente se asocia con un descenso de la temperatura y un aumento en la concentración de clorofila, y al contrario ocurre cuando sopla viento de levante (Navarro y Ruiz, 2004). La franja costera identificada en la Figura 1 coincide con el área de máxima abundancia de larvas de boquerón en el golfo de Cádiz (Ruiz *et al.*, en prensa). Estos máximos ocurren durante los meses estivales en los que la estratificación de la columna de agua genera condiciones oligotróficas para el conjunto de la cuenca a excepción de esta franja costera. Temperaturas cálidas y concentraciones de clorofila superiores al resto de la cuenca (Figura 3) favorecen la puesta y supervivencia larvaria de especies de elevado interés económico como el boquerón. No es por tanto extraño que las fases iniciales de la vida de esta especie se concentren en esta franja costera. No obstante, como las imágenes de satélite muestran (Relvas y Barton, 2002; Vargas *et al.*, 2003; Navarro y Ruiz, 2004), se trata de una zona muy dinámica que es especialmente sensible a las condiciones meteorológicas. La concentración de fases larvares en esta zona tiene, por tanto, un componente doble que desde nuestra visión humana podríamos calificar como positivo y negativo. Por un lado, permite un rápido desarrollo en un entorno cálido y con abundante alimento. Por otro, el fuerte dinamismo de la zona impone a estas fases iniciales un entorno inestable que bajo determinadas circunstancias meteorológicas puede llevar al fracaso reproductor y a fallos en el reclutamiento. La inestabilidad oceanográfica que registran los satélites en esta franja de plataforma parece de hecho originar parte del éxito/fracaso de reclutamiento de especies como el boquerón y las fluctuaciones de capturas de esta especie en el Golfo de Cádiz (Ruiz *et al.*, en prensa).

CONCLUSIONES

Este trabajo muestra cómo la puesta del boquerón en los meses de verano coincide tanto temporal como espacialmente con una zona de plataforma con temperaturas cálidas y abundante concentración de productores primarios, circunstancias que favorecen la supervivencia de las fases larvares. El análisis de imágenes térmicas y de color oceánico también muestra que se trata de una zona inestable

con importantes fluctuaciones asociadas a eventos meteorológicos. Esta inestabilidad puede afectar al éxito reproductor de esta especie y estar en el origen de las fluctuaciones que presentan estas pesquerías en el Golfo de Cádiz.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la Junta de Andalucía y por el Ministerio de Educación y Ciencia a través de los proyectos CYTMAR99-0643-C03-02 y VEM2004-08579.

BIBLIOGRAFÍA

- BEHRENFELD, M. J. y FALKOWSKI, P. G. 1997. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. *Limnol. Oceanogr.* 42 (1): 1-20.
- BLAXTER, J. H. S. y HUNTER, J. R. 1982. The biology of the clupeoid fishes. *Adv. Mar. Biol.* 20: 1-223.
- CATALÁN, I. A., RUBÍN, J. P., NAVARRO, G. y PRIETO, L. (en prensa). Larval fish distribution in two different hydrographic situations in the Gulf of Cádiz. *Deep Sea Res. Part II*.
- FOLKARD, A. M., DAVIES, P. A., FIÚZA, A. F. G. y AMBAR, I. 1997. Remotely sensed sea surface thermal patterns in the Gulf of Cádiz and the Strait of Gibraltar: Variability, correlations, and relationships with the surface wind field. *J. Geophys. Res.* 102 (C3): 5669-5683.
- GARCÍA-LAFUENTE, J., DELGADO, J., CRIADO-ALDEANUEVA, F., BRUNO, M. y VARGAS, J. M. (en prensa). Water masses circulation in the continental shelf of the Gulf of Cádiz. *Deep Sea Res. Part II*.
- GARCÍA-LAFUENTE, J. y RUIZ, J. (en prensa). The Gulf of Cádiz oceanography: multidisciplinary view. *Deep Sea Res. Part II*.
- HUERTAS, E., NAVARRO, G., RODRÍGUEZ-GÁLVEZ, S. y PRIETO, L. 2005. The influence of phytoplankton biomass on the spatial distribution of carbon dioxide in surface sea water of a coastal area of the Gulf of Cádiz (southwestern Spain). *Can. J. Bot.* 83: 929-940.
- NAVARRO, G. y RUIZ, J. 2004. Elements of spatial and temporal variability of plankton in the gulf of Cádiz: an analysis based on EOF decomposition of SeaWiFS images. *Proc. SPIE* 5233: 34-42.
- MOREL, A. y BERTHON, J. F. 1989. Surface pigments, algal biomass profiles and potential production of the euphotic layer: Relationships reinvestigated in view of remote-sensing applications. *Limnol. Oceanogr.* 34 (8): 1545-1562.
- PAULY, D. y CHRISTENSEN, V. 1995. Primary production required to sustain global fisheries. *Nature* 374: 255-257.
- PLATT, T., SATHYENDRANATH, S. y RAVINDRAN, P. 1990. Primary production by phytoplankton: analytic solutions for daily rates per unit area of water surface. *Proc. R. Soc. Lond.* 241: 101-111.
- RELVAS, P. y BARTON, E. D. 2002. Mesoscale patterns in the Cape Sao Vicente (Iberian Peninsula) upwelling region. *J. Geophys. Res.* 107 (C10): 3164.
- RUIZ, J., GARCÍA-ISARCH, E., HUERTAS, E., PRIETO, L., JUÁREZ, A., MUÑOZ, J. L., SÁNCHEZ LA-MADRID, A., RODRÍGUEZ, S., NARANJO, J. M. y BALDÓ, F. (en prensa). Meteorological forcing and ocean dynamics controlling *Engraulis encrasicolus* early life stages and catches in the Gulf of Cadiz. *Deep Sea Res. Part II*.
- RYTHER, J. H., 1969. Photosynthesis and fish production in the sea. *Science* 166: 72-76.
- VARGAS, J. M., GARCÍA-LAFUENTE, J., DELGADO, J. y CRIADO-ALDEANUEVA, F. 2003. Seasonal and wind-induced variability of Sea Surface Temperature patterns in the Gulf of Cádiz. *J. Mar. Sys.* 38: 205-219.