

DETECCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE FITOPLANCTON Y CLOROFILA EN LAS AGUAS LITORALES VALENCIANAS A TRAVÉS DE LAS IMÁGENES NOAA-AVHRR¹

José QUEREDA SALA, Enrique MONTÓN CHIVA, José ESCRIG BARBERÁ
Ana Belén RUESCAS ORIENT y Belén MOLLÁ CANTAVELLA
Laboratorio de Clima, Universitat Jaume I. Castellón

RESUMEN

Esta comunicación establece la estrecha relación entre las concentraciones de fitoplancton, localizados con los sensores MODIS, y los frentes térmicos, localizados con el sensor AVHRR, de los satélites NOAA, lo que convierte a estos últimos en una herramienta óptima y más accesible para la localización de los frentes de pesca.

Palabras clave: Fitoplancton., MODIS, NOAA, upwelling, frentes térmicos, frentes de pesca

ABSTRACT

This paper establishes a close relationship between chlorophyll concentrations, detected by MODIS sensors, and the thermal fronts detected by AVHRR sensor on NOAA satellites. This makes AVHRR a useful and more accessible tool for locating fishing fronts.

Key words: phytoplankton , MODIS, NOAA, upwelling, thermal fronts, fishing fronts

1. INTRODUCCIÓN

La investigación desarrollada ha tenido como objetivo fundamental la detección y evaluación de las concentraciones de fitoplancton y clorofila en las aguas litorales de la Comunidad Valenciana mediante imaginería de satélites. Un objetivo de gran interés para la flota pesquera así como para el mejor conocimiento y aprovechamiento de nuestros recursos biológico-marinos a tenor de que el fitoplancton ocupa una posición primaria en la cadena alimenticia marina. Este productor es responsable de más del 95 % del total de la fotosíntesis.

2. FUNDAMENTOS CIENTÍFICO-TÉCNICOS

El método de estudio que venimos aplicando en la localización y cartografía estacional y diaria de las áreas de fitoplancton está basado en una síntesis de los dos tipos de técnicas que actualmente tratan de alcanzar este importante objetivo. Así, la teledetección de la cantidad de fitoplancton que se produce puede ser determinada mediante el análisis de la diferente absorción en las longitudes de onda del espectro visible. El empleo de técnicas basadas en la

¹ Trabajo de investigación dentro de la Directiva Marco del Agua, Conselleria de Territorio y Vivienda (Dirección General de Calidad Ambiental). MDA 3/05, GVA

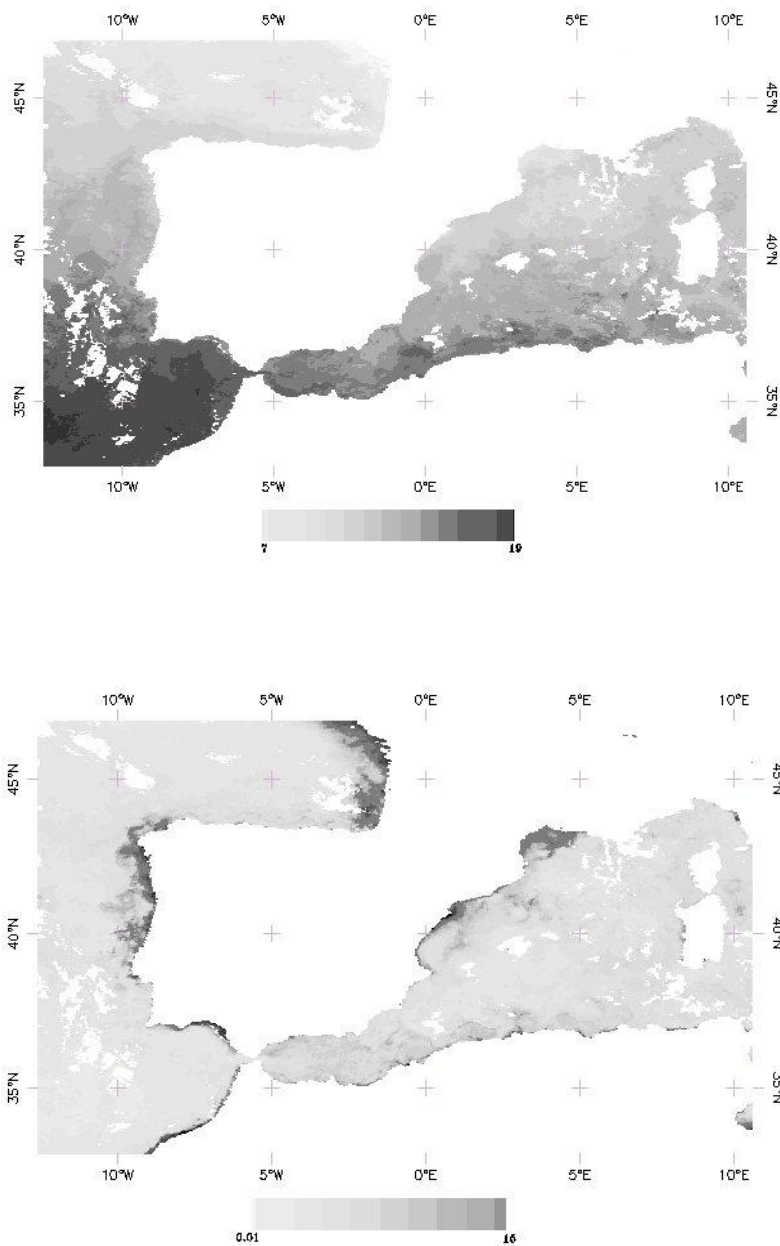
imágenes de satélite permite actualmente un gran avance ante la amplia cobertura geográfica de su información y la alta frecuencia temporal que desborda las complejas, costosas e inseguras medidas in situ. No obstante esta técnica tan solo ha sido aceptablemente resuelta con las imágenes de detección de clorofila de los sensores SeaWiFS (satélite OrbView-2) y más recientemente del MODIS Aqua. La gran limitación de esta imagerie es el embargo estratégico de 15 días a que están sometidas las imágenes del SeaWiFS por la administración norteamericana. En el caso de MODIS, la finalización del acuerdo entre la NASA y Orbimage obliga a pagar un elevado precio por las imágenes, aunque se suministran muestras de menor resolución (4 Kms.) y sometidas a un embargo de 3 días.

Por todo ello y ante las incertidumbres que plantea el futuro inmediato de las plataformas de teledetección, estamos llevando a cabo simultáneamente una posible validación del método seguido sobre los pares de imágenes NOAA-AVHRR y FENGYUN. En este sentido proseguimos las investigaciones, tal y como se viene realizando en algunos centros especializados, conducentes a la búsqueda de un algoritmo riguroso que permita restituir la concentración de fitoplancton en el espectro de radiación de la PAR (Radiación Fotosintética Activa), entre 0,4 y 0,7 μm absorbida por los pigmentos de clorofila. El espectro de absorción de las moléculas de clorofila muestra una excelente absorción en el rojo (0.66-0.64 μm) y en el azul-violeta (0.46-0.41 μm), con menor intensidad en el anaranjado-amarillo y nula en el verde que es reflejado. Esta restitución o asignación de píxeles con la concentración de clorofila, actualmente extraída de los sensores MODIS Aqua y SeaWiFS será posible, próximamente, gracias a la recepción del satélite chino FENGYUN-1/2D que cuenta con tres canales en esa parte del espectro radiactivo visible.

La segunda técnica aplicada a esta detección de producción primaria marina, es la localización y seguimiento de afloramientos de aguas profundas o “*upwelling*”. Este proceso termodinámico determina que aguas del fondo, frías y ricas en nutrientes, asciendan hasta la superficie. Estas aguas, caracterizadas así por su baja temperatura pueden ser detectadas mediante imágenes de satélite. La teledetección ha traído la posibilidad de visualizar tales áreas hacia donde se sienten atraídas las especies marinas. Áreas conocidas también como frentes de pesca definidos por ser límite entre diferentes masas de agua con características fisico-químicas distintas (temperatura, salinidad y densidad) llevando asociadas a su vez grandes cantidades de plancton transportado desde el fondo por movimientos convectivos en el seno de las aguas. El proceso de “*upwelling*” es el elemento fundamental para asegurar que un frente térmico es un frente de pesca.

La teledetección de estos procesos de “*upwelling*”, en nuestro caso sobre las imágenes NOAA-AVHRR, ha sido validada mediante observaciones “in situ” obtenidas de los registros de la estación universitaria marina frente a las costas de Castellón. El cálculo de la temperatura superficial del mar, a través de las imágenes IR del NOAA-AVHRR, es realizado mediante el algoritmo Split-Window propuesto por la propia NOAA. De este modo, las imágenes de la temperatura de brillo asignada a los píxeles en los canales térmicos 4 y 5 del AVHRR son convertidas en mapas SST (Tsm, temperatura superficial del mar). La cartografía es trazada mediante la georeferenciación y eliminación de nubes a través de máscaras siempre en tiempo real. Los mapas de anomalía térmica sirven así para identificar los frentes térmicos.

DETECCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE FITOPLANCTON Y CLOROFILA
EN LAS AGUAS LITORALES VALENCIANAS A TRAVÉS DE LAS IMÁGENES NOAA-AVHRR



Figs. 1 y 2. Concentración de clorofila (mg/m^3) y Tsm (Temperatura superficial del mar). Par de imágenes promedio de la 2^a semana de febrero de los frentes térmicos obtenidos del sensor AVHRR del NOAA (Laboratorio de Climatología, Univ. Jaume I) y de la concentración de clorofila en baja resolución del MODIS y SeaWiFS (satélite OrbView-2).

Las observaciones visuales de pares de imágenes permiten deducir que existe una alta correlación entre la Tsm (temperatura superficial del mar) y la clorofila. Esta alta correlación en el ámbito de las aguas litorales queda validada por los registros de las sondas térmicas de la estación marina. Consecuentemente el objetivo final o fundamental del trabajo ha sido la caracterización del parámetro de aguas frías que mejor permita identificar las zonas de alta

concentración de clorofila. En última instancia, obtener la imagen real de producción biológica primaria marina con las imágenes del NOAA, sensor AVHRR, mediante las funciones de ajuste de áreas y gradientes térmicos realizado con la aplicación del software ENVI (figuras 1 y 2).

3. EQUIPAMIENTO CIENTÍFICO

El equipamiento en instrumental científico-técnico que actualmente posee el Laboratorio de Climatología de la Universitat Jaume I ha permitido abordar con observaciones suficientes el objetivo previsto. Este equipamiento cubre toda la recepción en imaginería de satélites meteorológicos geoestacionarios (METEOSAT 8-MSG) y satélites polares (NOAA y FENGYUN), paralelamente a una red de 15 estaciones automáticas de meteorología (AWS) y calidad del aire, así como de control termodinámico de las aguas marinas. Esta red cuenta con una estación de excepcional ubicación sobre el mismo nivel del mar, en la plataforma artificial que *British Petroleum* (BPOil) tiene a 3 Km. de la costa.

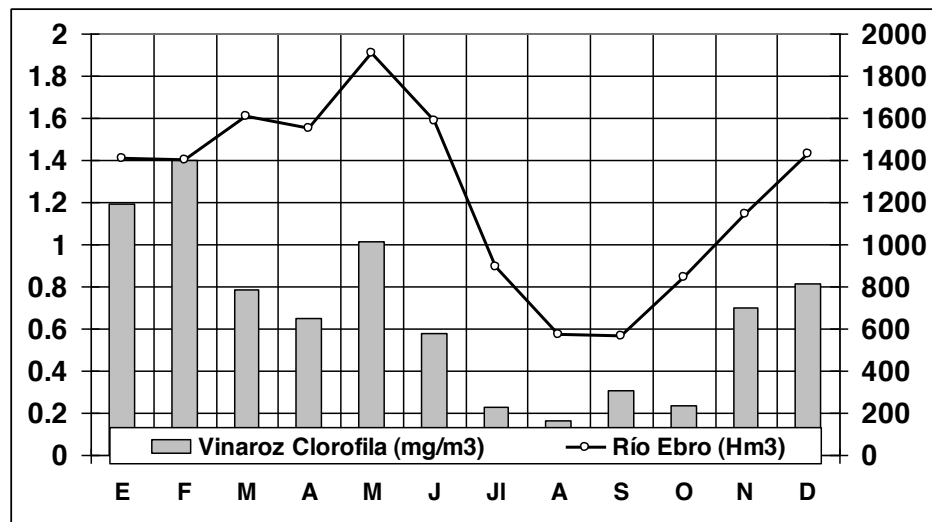


Fig. 3. Caudales medios (Hm³) del Río Ebro en Tortosa (1914-2004). C.H.E. y concentración de clorofila frente a Vinaroz (MODIS, 2002-2005).

4. LOS FACTORES INHERENTES A LA PRODUCCIÓN Y CONCENTRACIÓN DE LA CLOROFILA EN LAS AGUAS LITORALES DE LA COMUNIDAD VALENCIANA

La cartografía de la concentración clorofílica en las aguas litorales valencianas ha constituido el fundamento de las investigaciones desarrolladas. Esta cartografía es el mejor laboratorio para conocer los factores inherentes a la concentración de clorofila.

4. 1. Las aportaciones fluviales

Un hecho resulta básico: el mar es esencialmente un consumidor y no un productor de fitoplancton. Consecuentemente, las aportaciones del ecosistema terrestre son la fuente fundamental de fitoplancton. Las áreas clorofílicas privilegiadas, en mayor o menor medida, están vinculadas a las grandes desembocaduras fluviales. Un expresivo ejemplo de esta

afirmación, obviando el paralelismo con el ciclo agrícola y biológico anual, es la elevada correlación de los regímenes fluviales mediterráneos con el régimen mostrado por la concentración de clorofila en las aguas costeras (figura. 3). El coeficiente de determinación entre ambas series de valores alcanza un elevado valor de $R^2 = 0.95$.

4. 2. Los procesos de “*upwelling*”

Constituyen el proceso hidrodinámico más relevante para el mantenimiento en suspensión del fitoplancton cerca de las aguas superficiales. En esencia este proceso viene a definir el mecanismo de sumersión en profundidad de las aguas más frías, saladas y densas de superficie y su substitución por las aguas frías aunque menos saladas y densas del fondo. Estas aguas ascendentes provocan el remonte hasta la superficie de los nutrientes básicos que son mantenidos en suspensión convectiva. Tal y como hemos afirmado en los fundamentos científico-técnicos, el “*upwelling*” es el mecanismo que permite identificar a los frentes de aguas frías como auténticos frentes de pesca.

Este fenómeno de “*upwelling*” viene ya condicionado por los escenarios y procesos termohalinos generados en la cuenca valenciana. No obstante, su desarrollo específico viene activado por la circulación atmosférica en las capas bajas. El régimen del viento en la zona litoral del mediterráneo valenciano muestra una dinámica regida por el soplido de flujos del N y NW que con carácter casi absoluto en dirección y especialmente en fuerza, se mantiene durante los meses invernales desde octubre a marzo. Estos vientos fríos y secos, determinan una evaporación intensa con un aumento de la densidad y una sumersión en profundidad de las aguas superficiales que son substituidas por las aguas frescas, aunque menos saladas y más ligeras del fondo (figura 4).

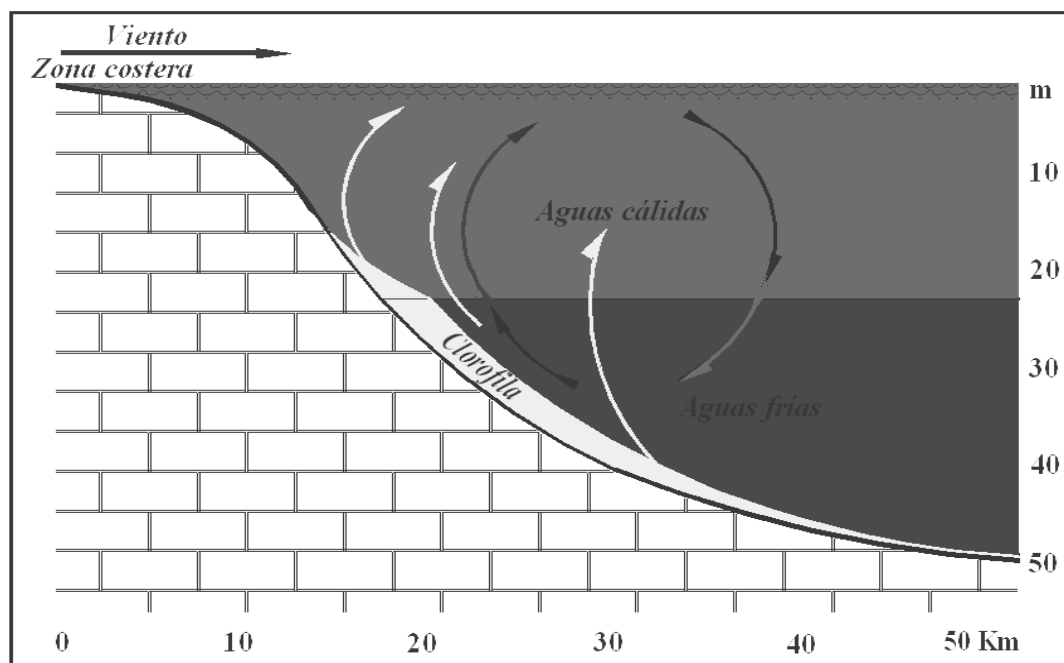


Fig. 4. Esquema del mecanismo de “*upwelling*” en las aguas litorales valencianas.

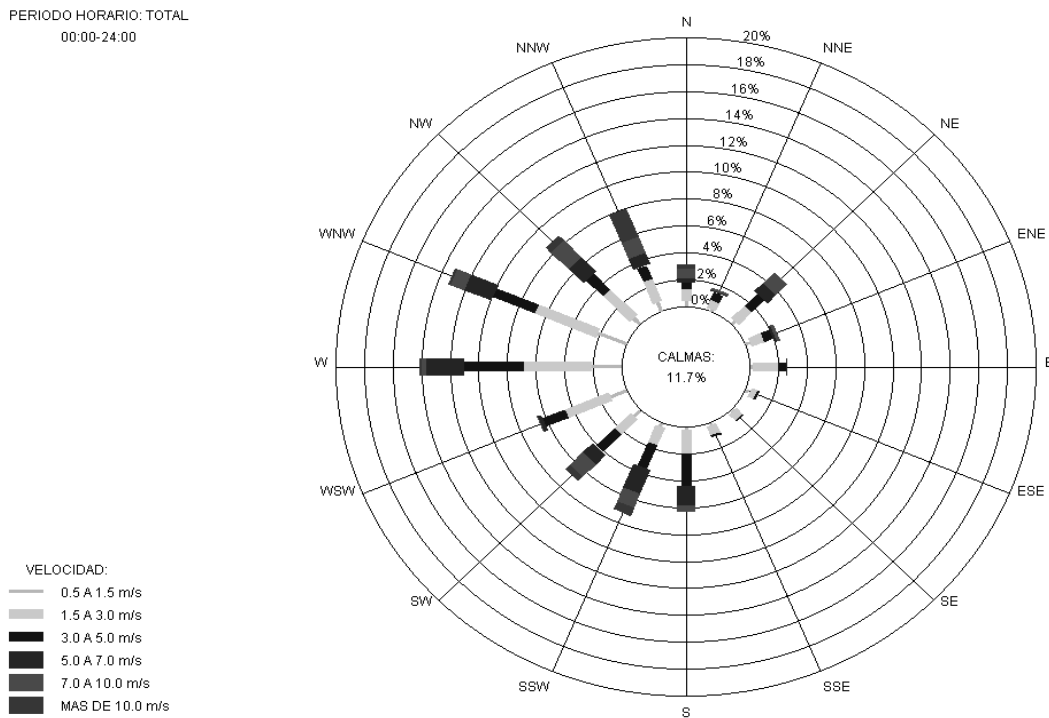


Fig. 5. El régimen aéreo invernal (enero) muestra un acusado predominio, en dirección y fuerza, de los flujos terrales altamente evaporativos sobre la superficie marina. (Observatorio marino de la Universitat Jaume I, plataforma de BPOil).

Bajo estas condiciones, la masa de agua tiene la temperatura T_m , a la cual corresponde la presión saturante E_m . Sobre la superficie del agua la masa de aire tiene una temperatura T , a la cual corresponde la presión de vapor saturante E . Si el aire no está saturado, y este es muy especialmente el caso del período invernal con humedades relativas inferiores al 30-40% en los vientos continentales secos (figura 5), la presión de vapor que hay realmente, e , será menor que E . Dado que la temperatura del agua es mayor que la del aire, E_m será mayor que E y consecuentemente que e . De este modo, inicialmente,

$$E_m > E > e$$

y la evaporación de agua en el aire es proporcional a la diferencia

$$\text{Evaporación} = E_m - e$$

Un proceso evaporativo (figura 6) que continuará hasta que esa diferencia se equilibre. No obstante, antes de alcanzar este equilibrio, el proceso molecular determina que e se iguale a E y consecuentemente que el aire se sature. De hecho, ello podría no ser suficiente para detener el proceso ya que:

$$e = E < E_m$$

DETECCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE FITOPLANCTON Y CLOROFILA
EN LAS AGUAS LITORALES VALENCIANAS A TRAVÉS DE LAS IMÁGENES NOAA-AVHRR

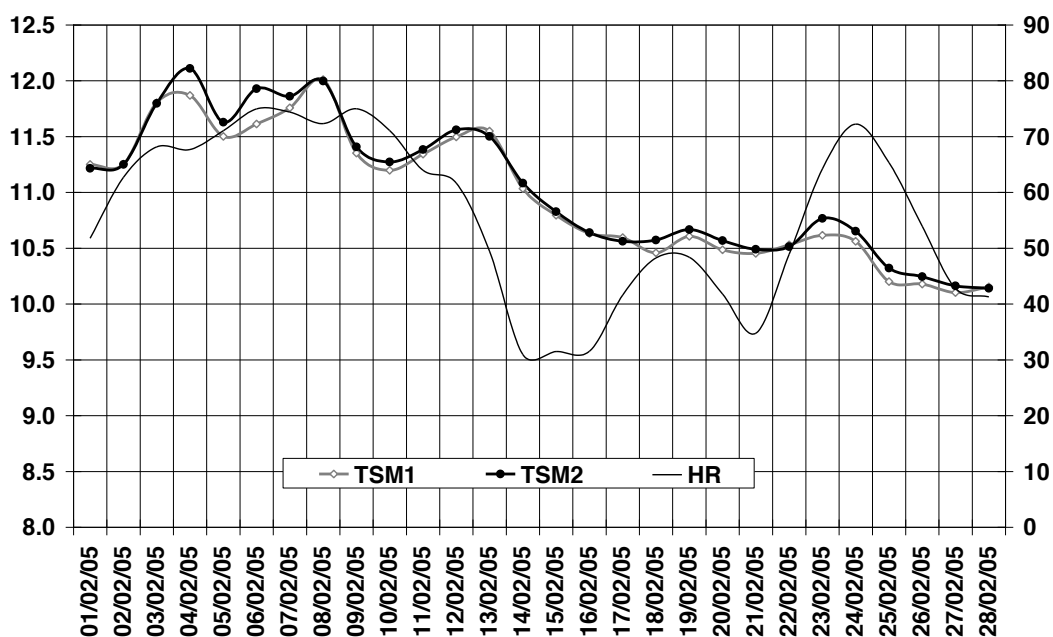


Fig. 6. El proceso de “*upwelling*” invernal y de convección termo-halina en la capa activa marina se traduce en la igualdad térmica de las sondas termográficas Tsm1 (a -3 m) y Tsm2 (a -1 m). Asimismo es apreciable el papel de los vientos secos, con humedades relativas inferiores incluso al 30%, en el enfriamiento de la capa superficial (Tsm2). Observatorio marino.

5. LA DETECCIÓN Y EVALUACIÓN EN TIEMPO REAL DE LA CONCENTRACIÓN DE FITOPLANCTON Y CLOROFILA EN LAS AGUAS LITORALES VALENCIANAS A TRAVÉS DE LAS IMÁGENES NOAA-AVHRR.

Ha constituido el objetivo principal de la investigación desarrollada. Un objetivo que ha sido satisfactoriamente alcanzado sobre los conocimientos adquiridos en las etapas complementarias definidas por la elaboración de la cartografía mensual y semanal de clorofila y de la Tsm, así como por el discernimiento de los factores inherentes a la concentración de clorofila en las aguas marinas.

La metodología aplicada a la detección en tiempo real de la concentración de clorofila en las aguas litorales valencianas ha consistido en la comparación de pares de imágenes, de escala diaria, de concentración de clorofila (SeaWiFS y MODIS) y SST (Tsm) (infra-rojo NOAA-AVHRR). Estas imágenes han sido tratadas con la misma técnica que las imágenes de escalas mensuales y semanales: una calibración y navegación de las imágenes realizada siguiendo las indicaciones de la NOAA KLM User’s guide, integradas en el software SIAMIV. En una segunda fase y para el ajuste de áreas y gradientes así como de tratamiento de imágenes se ha utilizado el programa ENVI que es susceptible de la georeferenciación MODIS.

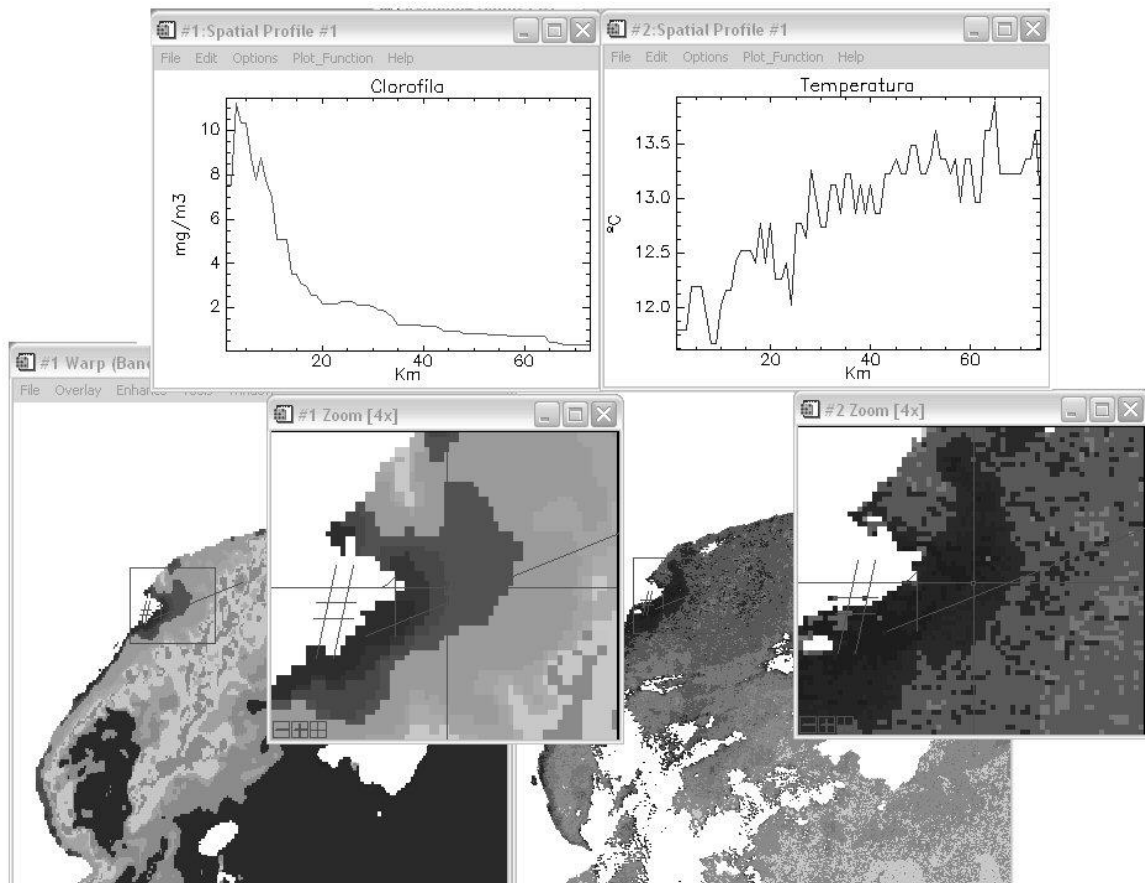


Fig. 7. Composición de imágenes de clorofila y Tsm con zona de georeferenciación y transecto de gradientes. Situación correspondiente al día 12-02-2004.

Esta metodología y técnica se ha aplicado al examen de un total de 18 situaciones diarias definidas por el par de imágenes clorofila-Tsm. Estas situaciones han sido elegidas por su especial calidad y claridad, en días despejados de aerosoles africanos y sin necesidad de máscaras de nubes. El análisis de las mismas ha consistido en la elaboración de transectos correspondientes a la diagonal de mayor extensión espacial de la concentración de clorofila. Estas diagonales, aproximadamente de unos 60 Km de longitud, han permitido obtener el valor de la clorofila en cada uno de los puntos píxel georeferenciados. Dado que la resolución de imágenes diarias es de 1x1 Km, cada transecto ha comprendido aproximadamente unos 60 puntos. Simultáneamente cada uno de esos puntos de evaluación clorofílica ha sido comparado con el valor térmico de las aguas marinas en imágenes NOAA-AVHRR, de idéntica resolución espacial 1x1 Km (figuras 7 y 8).

DETECCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE FITOPLANCTON Y CLOROFILA EN LAS AGUAS LITORALES VALENCIANAS A TRAVÉS DE LAS IMÁGENES NOAA-AVHRR

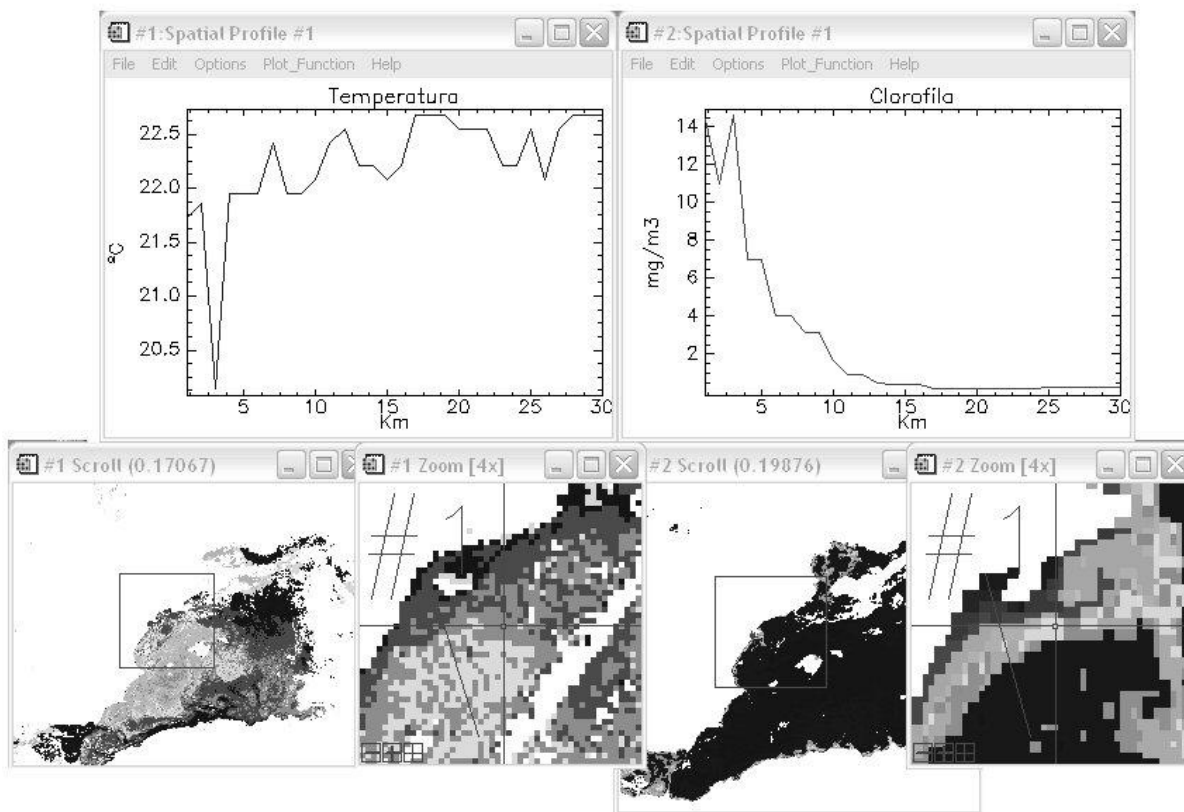


Fig. 8. Composición de imágenes de clorofila y Tsm con zona de georeferenciación y transecto de gradientes. Situación correspondiente al día 30-09-2004.

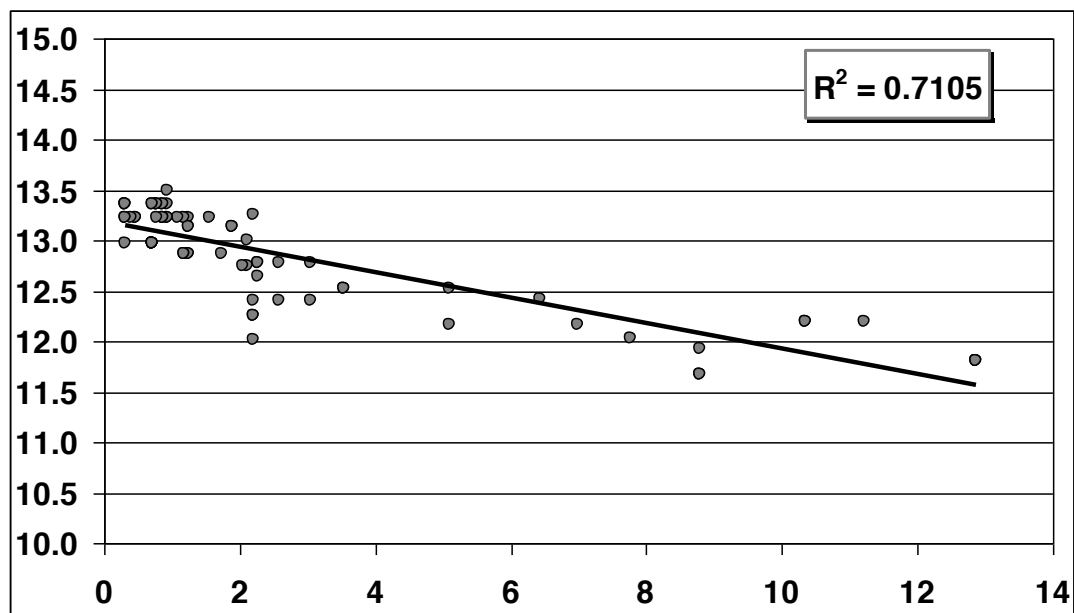


Fig. 9. Función de ajuste entre los promedios de píxeles de clorofila y los de Tsm.

Este análisis ha permitido obtener los diversos perfiles espaciales de la concentración de clorofila y de la temperatura superficial del mar (Tsm). Tal y como muestran las figuras, la vinculación de los frentes térmicos y de los frentes de clorofila o frentes de pesca son de una alta correlación inversa. El valor de la misma en promedio de todas las situaciones analizadas (18) alcanza un elevado valor con coeficiente de determinación $R^2 > 0.71$ (figura 9). Consecuentemente la detección y evaluación de la concentración de clorofila en las aguas litorales valencianas puede ser detectada a través de las imágenes infra-rojas del NOAA-AVHRR.

6. CONCLUSIONES

Las imágenes de satélite de los sensores MODIS y SeaWiFS habían demostrado la estrecha relación entre la temperatura marina y la concentración de clorofila. Sin embargo, se trata de imágenes de difícil acceso y de un elevado precio, frente a aquellas obtenidas a partir del NOAA y FENGYUN, con un precio más accesible. La comparación de las imágenes MODIS y las térmicas del NOAA-AVHRR muestran una estrecha correlación y permiten emplear estas últimas para la detección de áreas de fitoplancton y frentes de pesca. El siguiente paso será el desarrollo de un algoritmo para el tratamiento de las imágenes del FENGYUN, con canales más apropiados para el estudio de la clorofila.

7. REFERENCIAS

- CARDER, K.L., CHEN, F.R., LEE, Z., HAWES, S.K. y CANNIZZARO, J.P. (2003). *MODIS Ocean Science Team Algorithm Theoretical Basis Document Case 2 Chlorophyll a*. College of Marine Science, University of South Florida. pp.67
- CLARK, D.K. (1997). *MODIS. Algorithm theoretical basis document Bio-optical algorithms Case 1 waters*. National Oceanic and Atmospheric Administration. National Environmental Satellite Service. Washington, D.C. pp.36
- LA VIOLETTE, P.E. (editor) (1994). *Seasonal and Interannual Variability of the Western Mediterranean Sea*. De la serie: Coastal and Estuarine Studies. American Geophysical Union. pp.373.
- NAVARRO, G. y RUIZ, J. (2005). Variabilidad espacio-temporal del fitoplancton en el Golfo de Cádiz a través de imágenes térmicas y de color oceánico. *Actas del XI Congreso Nacional de Teledetección*, 21-23 Septiembre 2005. Puerto de la Cruz, Tenerife, pp.157-160
- O'REILLY, J.E., MARITORENA, S., MITCHELL, B.G., SIEGEL, D.A., CARDER, K.L., GARVER, S.A., KAHRU, M. y MCCLAIN, C. (1998). Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS. *Journal of Geophysical Research*, vol.103, N° C11, pp. 24.937-24.9453
- SÁNCHEZ-VIDAL, A., CALAFAT, A., CANALS, M. y FABRES, J. (2004). Particle fluxes in the Almeria-Oran front: control by coastal upwelling and sea surface circulation. *Journal of Marine Systems*, 52, pp.89-106
- TANG, D., HIROSHI, K. y LUIS, A.J. (2001). Short-term variability of phytoplankton blooms associated with a cold eddy in the northwestern Arabian Sea. *Remote Sensing of Environment*, 81, pp.82-89.
- TARELA, A., COTOS, J.M., SORDO, I. y ARIAS, J.E. (2001). Desarrollo de herramientas software para el estudio comparativo de imágenes de temperatura superficial y de concentración de clorofila en aguas de afloramiento ibérico. *Revista de Teledetección*, N° 15, pp.13-26.