

# Cálculo de velocidades oceánicas superficiales en el área del afloramiento del NW de África mediante imágenes del sensor AVHRR

L. García Weil<sup>1</sup>, L. Nykjaer<sup>2</sup>, A. Tejera<sup>1</sup> y M. Cantón<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Física. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Las Palmas de Gran Canaria.

<sup>2</sup>Institute for Remote Sensing Applications. Joint Research Centre. Ispra. Italia.

## RESUMEN

En el presente estudio, una serie de pares de imágenes consecutivas del sensor Advance Very High Resolution Radiometer separadas entre sí 24 horas son utilizadas con el objetivo de deducir velocidades de flujo superficial en el área del afloramiento del NW de África. El método utilizado es el método de las correlaciones cruzadas bidimensionales entre imágenes de satélite sucesivas, que representan el movimiento de las estructuras observadas. Los resultados de aplicar este método son analizados y discutidos.

**PALABRAS CLAVE:** Velocidades de flujo superficial, área de afloramiento.

## ABSTRACT

In this study, some pairs of consecutive satellite images from the Advance Very High Resolution Radiometer (AVHRR) with a time separation of 24 hours are used in order to derive the sea surface flow velocities in the Northwest African upwelling area. The method used is the Maximum Cross Correlation Method (MCC), and it consists in locate the maxima of bidimensional cross correlations between consecutive images. That maxima represent the movement of the observed features. The results are analyzed and discussed.

**KEY WORDS:** Surface flow velocities, upwelling area.

## INTRODUCCIÓN

Un tópico de gran importancia en Oceanografía es el estudio de la circulación oceánica y por tanto, de la medida de las velocidades de corrientes.

Ya desde los primeros estudios intensivos que combinaban datos tomados in-situ e imágenes de satélite, se observó que existe una buena correspondencia entre las estructuras que aparecen en las escenas procedentes de los sensores remotos que trabajan en el rango visible e infrarrojo de longitudes de onda, y la trayectoria seguida por boyas derivantes o las velocidades medidas con ADCP (Acoustic e Doppler Current Profiler).

Esto ha motivado un interés creciente por parte de la comunidad científica oceanográfica, de usar estos datos de satélite para calcular el flujo superficial oceánico a partir del intrincado movimiento de las estructuras oceanográficas observadas. El interés para hacer esto no es solo científico, sino que además se encuentra apoyado por:

- La limitada resolución espacial de los métodos convencionales para medir velocidades en el océano con la consiguiente dificultad que ello conlleva para obtener un campo denso de velocidades.
- El relativo bajo coste, la alta densidad de datos y repetitividad ofrecida por las imágenes de satélite.

La idea de utilizar una distribución espacial y temporal de trazadores para estimar la circulación oceánica no se reduce al ámbito de los datos de satélite, sino que constituye un problema oceanográfico más general. De hecho, la imagen que tenemos hoy en día de la circulación oceánica ha sido elaborada por medio de una gran variedad de métodos y datos.

Existen diversas aproximaciones o métodos para deducir la circulación superficial oceánica a partir de una secuencia de imágenes de satélite. Estos son:

1.- Métodos subjetivos: En los cuales la velocidad es calculada a partir de la identificación del desplazamiento de características oceanográficas claramente observables en una secuencia de imágenes por medio de un operador, y el tiempo transcurrido entre éstas (Violette, 1984).

Este tipo de métodos constituye la aproximación más simple e inicialmente desarrollada, pero presenta la desventaja de que el número de vectores velocidad calculado con este método es relativamente pequeño y dependiente del operador.

2.- Métodos objetivos: Estos son independientes del operador y producen un campo de velocidades espacialmente denso, Dentro de esta categoría de métodos, se pueden distinguir dos grupos, que

intentan resolver el problema partiendo de aproximaciones diferentes. Estos son:

2.1. - Métodos desarrollados a partir de fundamentos basados en el análisis de imágenes digitales y de reconocimiento de formas (Emery et al., 1986).

2.2. - Métodos que han sido desarrollados dentro del ámbito general de la Oceanografía y la Geofísica, y que han sido adaptados para poder tratar los datos de satélite (Kelly, 1989). Estos métodos intentan resolver directamente la siguiente ecuación:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\partial C}{\partial t} + u \cdot \nabla C = k \nabla^2 C + S \quad (1)$$

para obtener la velocidad a partir de una secuencia de imágenes digitales. Esta ecuación es la ecuación de conservación del trazador utilizado y así  $C$  representa el valor que toma el trazador en la imagen,  $u$  es la velocidad,  $k$  es el coeficiente de difusión turbulenta y  $S$  es un término sumidero / fuente.

El método utilizado en este estudio, es conocido como método de las correlaciones cruzadas máximas (CCM). Ha sido aplicado a pares de imágenes consecutivas del sensor AVHRR, y pertenece al grupo de los métodos objetivos desarrollados a partir de fundamentos basados en el análisis de imágenes digitales.

## MÉTODOS Y DATOS USADOS

Emery et al. (1986) fueron los primeros en aplicar el método CCM para calcular el flujo oceánico superficial utilizando imágenes del sensor AVHRR procedentes del área de Vancouver, extendiéndose su uso, y así más recientemente el método ha sido utilizado con el mismo fin, pero con imágenes de satélite de color del océano obtenidas con el sensor CZCS (García y Robinson, 1989). También se ha utilizado el método con el fin de estudiar el movimiento de fragmentos hielo en regiones polares utilizando datos de las bandas visibles del AVHRR y del radar de apertura sintética (SAR) (Ninnis et al., 1986).

Pero antes que en Oceanografía, el método había sido utilizado en Meteorología para obtener la velocidad de desplazamiento de las nubes utilizando pares de imágenes de satélites geosíncronos (Lesse et al., 1971).

El método supone que el cambio producido en las estructuras térmicas observadas en pares consecutivos de imágenes del sensor AVHRR es debido al flujo superficial oceánico dentro de una escala espacial limitada, y se basa en la localización del máximo de una matriz de coeficientes de correlaciones cruzadas bidimensionales calculada entre imágenes de satélite consecutivas, para así deducir

los vectores desplazamientos que representan el flujo superficial oceánico. Si suponemos que  $f(x, y)$  y  $g(x+\xi, y+\eta)$  representan un posible par de estructuras similares observados en dos imágenes consecutivas, siendo  $(\xi, \eta)$  las coordenadas representando el posible desplazamiento espacial de la estructura original entre las dos imágenes, la matriz de coeficientes de correlación cruzados viene dada por

$$\rho(\xi, \eta) = \frac{\text{cov}(f(x, y); g(x+\xi, y+\eta))}{[\text{var}(f(x, y))\text{var}(g(x+\xi, y+\eta))]^{1/2}} \quad (2)$$

donde la matriz de covarianza es

$$\text{cov}(f(x, y); g(x+\xi, y+\eta)) = \frac{1}{R} \iint_R (f(x, y) - \bar{f})(g(x+\xi, y+\eta) - \bar{g}(\xi, \eta)) dx dy \quad (3)$$

y las varianzas son calculadas a través de

$$\text{var}(f(x, y)) = \frac{1}{R} \iint_R (f(x, y) - \bar{f})^2 dx dy \quad (4)$$

y

$$\text{var}(g(x+\xi, y+\eta)) = \frac{1}{R} \iint_R (g(x+\xi, y+\eta) - \bar{g}(\xi, \eta))^2 dx dy \quad (5)$$

indicando  $R$  el área de integración rectangular que incluye a la estructura. Entonces, se buscan las coordenadas  $(\xi_0, \eta_0)$  para las cuales el coeficiente de correlación  $\rho(\xi_0, \eta_0)$  toma su valor máximo dentro del área de búsqueda. Por último, el valor de la velocidad para la estructura  $f(x, y)$  se calcula dividiendo las coordenadas  $(\xi_0, \eta_0)$  por el intervalo de tiempo transcurrido entre las dos imágenes.

En la figura 1 se ilustra el esquema seguido para deducir el campo de velocidades usando el método CCM, para dos imágenes de satélite consecutivas, la primera imagen es dividida en rectángulos contiguos denominados plantillas. Para cada plantilla, identificamos en la segunda imagen un área de búsqueda mayor denominada ventana de búsqueda, de modo que el centro de ésta coincide con el centro de la plantilla. Por tanto, las ventanas de búsqueda se superponen unas con otras, indicándose en la figura 1 la relación que existe entre una plantilla, una ventana de búsqueda, su matriz de correlación y el vector desplazamiento resultante.

Debido a que los procesos que actúan en la superficie del océano son bastante complicados, puede ocurrir que en algunas áreas no exista correspondencia entre las estructuras de temperatura presentes entre un par de imágenes consecutivas. Es necesario por tanto establecer un nivel de significancia para los máximos coeficientes de correlación encontrados. Existen diversos métodos para lograr esto, basados todos en el cálculo de la matriz de auto correlación. Por simplicidad, nosotros hemos adoptado el nivel de correlación deducido

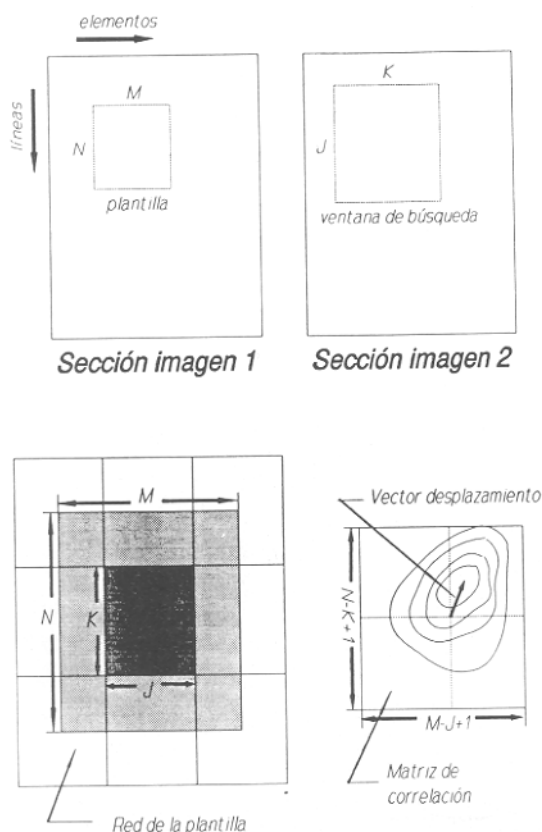


Fig. 1.- Representación gráfica del método CCM.

por Emery et al. (1986) utilizando estos métodos, que es igual a 0.6.

Los datos utilizados han sido suministrados por el sensor AVHRR (Advance Very High Resolution Radiometer) y corresponden a las fechas indicadas en la tabla 1.

Satélite	Fecha	Orbita	Hora de pase
NOAA-9	07 Junio 1987	12798	16:15
NOAA-9	08 Junio 1987	12812	16:04
NOAA-9	09 Junio 1987	12826	15:57
NOAA-9	13 Agosto 1988	18907	16:30
NOAA-9	14 Agosto 1988	18921	16:41
NOAA-9	15 Agosto 1988	18935	16:54
NOAA-9	16 Agosto 1988	18949	16:25

Tabla 1.- Imágenes del sensor AVHRR utilizadas con el método CCM.

Todas las imágenes utilizadas fueron sometidas al mismo procesamiento. En primer lugar las radiancias de los canales infrarrojos 4 y 5 del AVHRR fueron convertidas a temperatura de brillo, para posteriormente realizar la corrección atmosférica utilizando un algoritmo del tipo "split-window" desarrollado por Castagné et al. (1986), que tiene por expresión la siguiente:

$$T_s = T_4 + 2(T_4 - T_5) + 0.5 \quad (6)$$

donde  $T_s$  es la temperatura de la superficie del mar (TSM), y  $T_4$  y  $T_5$  son las temperaturas de

brillo de los canales 4 y 5 del AVHRR respectivamente.

Seguidamente estas imágenes fueron corregidas geoméricamente y registradas a una proyección Mercator común. El área final de todas las imágenes analizadas es de 512x512 km. aproximadamente, y cubren las áreas del afloramiento del NW de África de Cabo Ghir (centrada aproximadamente a una latitud de 31°N) y de Dakhla (centrada aproximadamente a una latitud de 24°N).

Después de esto y para eliminar parte del ruido existente, en las imágenes, previo a la aplicación del método de las correlaciones cruzadas máximas, un filtro 3x3 de media móvil fue aplicado a todas las imágenes utilizadas.

Una vez hecho esto el método CCM anteriormente descrito fue aplicado a todos los pares de imágenes consecutivas de la Tabla 1. Los tamaños de la plantilla y la ventana de búsqueda utilizados en este estudio, son iguales a aquellos usados por Emery, y son 22x22 pixels y 32x32 pixels respectivamente. El coeficiente de correlación no era calculado para una plantilla o su correspondiente ventana de búsqueda si el porcentaje de nubes y tierra en ellas era superior al 25% del total de los pixels. Esto es:

$$p_1 + p_2 \geq 0.25 \quad (7)$$

Además un test denominado de coherencia espacial fue aplicado para obtener un campo de velocidades especialmente coherente. El test consiste en calcular el vector velocidad para una plantilla determinada, únicamente si existe otra plantilla para la cual el correspondiente vector velocidad no difiere en dirección más allá de un determinado rango. En nuestro caso el rango utilizado ha sido de 30°.

## RESULTADOS

En las siguientes figuras se presentan los resultados obtenidos al aplicar el método de las CCM a las regiones y Dakhla. En ellas se representan las velocidades mediante flechas que indican su magnitud y sentido. Los cuadrados indican aquellos puntos cuyo máximo coeficiente de correlación es inferior al límite establecido. Por otro lado, los rombos simbolizan aquellos lugares donde no se verifica el test de coherencia espacial, y con cruces se representan aquellas áreas cuyo porcentaje de tierra o nubes es superior al 25%.

La figura 2 representa una imagen de TSM de la región de Cabo Ghir correspondiente al 14 de Agosto de 1988, en la que aparecen sobrepuestas las velocidades calculadas con las imágenes de los días 14 y 15 de Agosto de 1988. Lo más destacaba de esta figura es el aspecto espacialmente coherente del flujo paralelo a la costa en la parte superior de la imagen, a modo de fuerte chorro costero, lo que coincide con las condiciones que aparecen

cuando el afloramiento costero está presente. Este flujo se desvía hacia aguas oceánicas en la región donde se observa el lamento de agua fría de Cabo Ghir, como es de esperar.

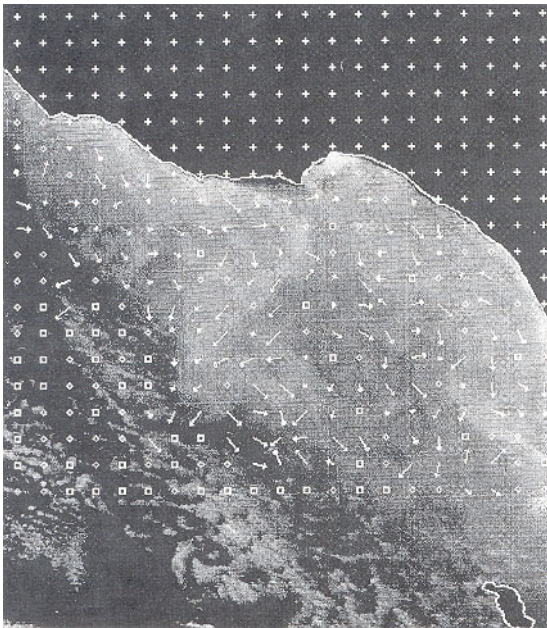


Fig. 2.- Imagen AVHRR del 14 de Agosto de 1988 de la región de Cabo Ghir, en la que aparecen sobrepuestos los vectores velocidad calculados.

La figura 3 muestra la imagen de TSM para la misma región el día 15 de Agosto de 1988, y sobrepuestas las velocidades calculadas con las imágenes de los días 15 y 16, es decir, la situación correspondiente a un día después. Como se observa existe una gran similitud entre esta figura y la anterior ya que las condiciones son bastante semejantes.

Por último, la figura 4 refleja la situación encon-

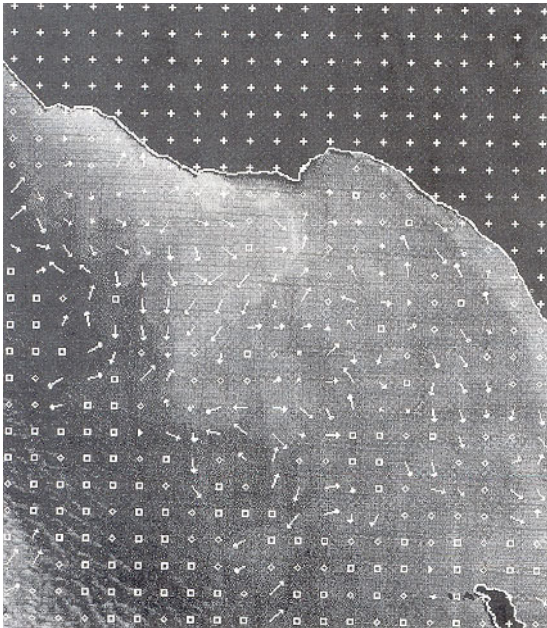


Fig. 3.- Imagen AVHRR del 15 de Agosto de 1988 de la región de Cabo Ghir, en la que aparecen sobrepuestos los vectores velocidad calculados.

trada en día 8 de Junio de 1987 para una imagen de TSM correspondiente al área de Dakhla y sobrepuestas las velocidades calculadas con las imágenes de los días 8 y 9 de Junio. En esta figura, la señal en temperatura del afloramiento es bastante fuerte y se observan al menos tres filamentos, presentando uno de ellos (el situado más hacia el Norte) una fuerte curvatura. El campo de velocidades como se observa es espacialmente coherente, lo que aumenta la confianza en los resultados obtenidos, y se corresponde bastante con las estructuras identificadas.

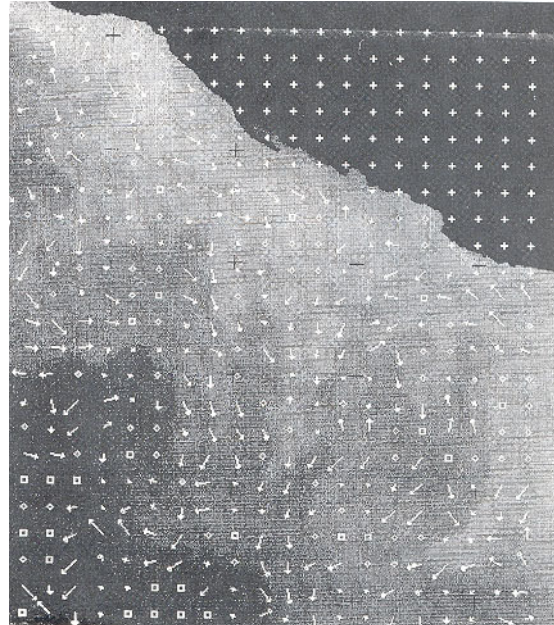


Fig. 4.- imagen AVHRR del 8 de Junio de 1987 de la región de Dakhla, en la que aparecen sobrepuestos los vectores velocidad calculados.

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos indican que el método de las correlaciones cruzadas máximas permite obtener un campo de velocidades especialmente coherente en la región oceánica del Noroeste de África, cuando la señal de temperatura superficial del afloramiento es lo suficientemente fuerte, lo cual aumenta la confianza en los resultados obtenidos.

De cualquier modo, el cálculo de velocidades superficiales oceánicas con imágenes de satélite desarrollado es susceptible de posibles mejoras como serían: 1) El desarrollo de un buen método de discriminación y clasificación de nubes, 2) La utilización de imágenes procedentes del sensor AVHRR cuya separación temporal sea menor, 3) El desarrollo de otros métodos con los que comparar y complementar los resultados, y 4) El uso de simulaciones que permitan evaluar como afectan los diferentes procesos físicos a la señal y la evolución temporal de la temperatura superficial del mar registrada por medio de satélites.

Por último, existen algunos problemas que siempre se han de considerar a la hora de interpretar los resultados obtenidos, como serían por ejemplo, la no correspondencia entre la temperatura superficial del mar y la extensión de las corrientes oceánicas, y el importante papel que por ejemplo pueden jugar en los lugares donde se encuentran presentes los filamentos los procesos de subducción.

## BIBLIOGRAFÍA

- CASTAGNE, N. et al. 1986. Operational measurement of sea surface temperature at CMS Lannion from NOAA-7 AVHRR data. *Int. J. Remote Sensing* 7: 953-984.
- EMERY, W. J. et al. 1986. An objective, method for computing advective surface velocities from sequential infrared satellite images. *J. Geophys. Res.* 91: 12865-12878.
- GARCIA, A. E. y ROBINSON, I. S. 1989. Sea surface velocities in shallow seas extracted from sequential Coastal Zone Col or Scanner Satellite Data. *J. Geophys. Res.* 94: 12681-12691.
- KFLLY, A. K., 1989. An inverse model for near-surface velocity from infrared images. *J. Phys. Oceanogr.* 19: 1845-1864.
- LA VIOLETE, P. E. 1984. The advection of sub-mesoscale thermal features in the Alboran Sea Gyre. *J. Phys. Oceanogr.* 14:450-505.
- LESSE J. A. et al. 1971. An automated technique for obtaining cloud motion from geosynchronous satellite data using cross correlation. *J. App Meteor.* 10: 118-132.
- NINNIS, R. M., EMERY, W. J. y COLLINS, M. J. 1986. Automated Extraction of pack ice motion from advence very high resolution radiometer imagery. *J. Geophys. Res.* 91: 10725-10734