

# Evaluación de técnicas de correspondencia de regiones para la estimación del movimiento superficial del océano

Javier Marcello<sup>1</sup>, Francisco Eugenio<sup>1</sup>, Ferran Marqués<sup>2</sup>

fmarcello@dsc.ulpgc.es

(1) Dpto. de Señales y Comunicaciones, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Campus de Tafira, Edificio B, 35017, Las Palmas de Gran Canaria

(2) Dpto. de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Universidad Politécnica de Cataluña, Campus Nord, D5, c/Jordi Girona 1-3, 08034 Barcelona.

Recibido el 20 de noviembre de 2007, aceptado el 7 de febrero de 2008

## RESUMEN

Se ha desarrollado una metodología para la estimación del movimiento superficial del océano que se basa en el uso de 12 técnicas de correspondencia de regiones. Para evaluar de forma exhaustiva cada una de ellas, se ha generado una base de datos que incluye secuencias sintéticas, secuencias reales de los sensores AVHRR y MODIS y medidas in-situ de velocidad obtenidas a partir de datos ADCP. Los resultados obtenidos han sido muy satisfactorios para 4 técnicas (SDAC -suma de las diferencias absolutas de media cero-, SDCC -suma de las diferencias cuadráticas de media cero-, SDCCN -suma de las diferencias cuadráticas de media cero normalizada- y CCN -correlación cruzada normalizada-), proporcionando resultados de mejor calidad que la técnica MCC (*Maximum Cross-Correlation*).

**PALABRAS CLAVE:** estimación de movimiento, correspondencia de regiones, corrientes marinas, estructuras oceanográficas y Maximum Cross-Correlation.

## ABSTRACT

A new methodology has been implemented to estimate the ocean surface motion by using 12 region-based matching techniques. To evaluate each one in detail, we have generated a database with synthetic sequences, real sequences of AVHRR and MODIS and a set of in-situ velocity measurements from a ship-mounted ADCP. Results have been very satisfactory with 4 techniques (zero-mean sum of absolute differences, zero-mean sum of square differences, normalized zero-mean sum of square differences and normalized cross-correlation) providing better performance than the classic MCC (*Maximum Cross-Correlation*) method.

**KEY WORDS:** motion estimation, region matching, marine currents, oceanographic features and Maximum Cross-Correlation.

## INTRODUCCIÓN

El océano involucra un complejo entramado de relaciones entre procesos físicos, químicos, biológicos y geológicos. Uno de los aspectos de mayor importancia en oceanografía es el estudio de la circulación oceánica, y por tanto, la estimación de las velocidades superficiales de las corrientes. Estas corrientes juegan un papel destacado en un gran número de actividades relacionadas con el océano, con el clima, con las misiones de búsqueda y rescate, con la con-

tención de vertidos contaminantes, con el control y explotación de los recursos marinos, etc.

En la década de los 80, diferentes estudios demostraron una buena correspondencia entre la evolución de las estructuras, a partir de secuencias de imágenes de sensores de teledetección en el rango visible e infrarrojo, y la trayectoria seguida por boyas a la deriva o las velocidades obtenidas por instrumentos oceanográficos. A pesar del potencial de la teledetección, los principales problemas y precauciones a tener en cuenta a la hora de calcular el movimiento

de las masas de agua en imágenes de satélites son: (i) la presencia de áreas de la imagen con intensidad muy uniforme (sin estructuras oceanográficas); (ii) la aparición, desaparición y deformación de las estructuras; (iii) el seguimiento de trayectorias arbitrarias y múltiples por parte de las estructuras; (iv) la presencia de ruido, generalmente a causa de nubes, calentamiento superficial o aerosoles y (v) la gran separación temporal (varias horas) entre imágenes. Además es fundamental garantizar una corrección geométrica de elevada precisión en las imágenes que componen la secuencia para poder medir de forma fiable el desplazamiento.

Los primeros métodos utilizados en el ámbito de la oceanografía física fueron los subjetivos, donde la velocidad es calculada a partir de la identificación del desplazamiento de estructuras oceanográficas, claramente distinguibles en una secuencia de imágenes, por un oceanógrafo experto y teniendo en cuenta el tiempo entre imágenes. Uno de los primeros en usar este método fue La Violette (1984) que efectuó el seguimiento de remolinos en el Mar de Alborán. Posteriormente, otros métodos más novedosos y totalmente automáticos han surgido basados en la resolución de la ecuación del flujo óptico, la ecuación del calor, el uso de gradientes, de la transformada wavelet o, recientemente, a partir de la aplicación de técnicas multifractales (Isern-Fontanet et al. 2007). Sin embargo, los métodos que mayor éxito han tenido son los que se fundamentan en la correspondencia de las estructuras en las secuencia de imágenes.

Dentro de las técnicas de correspondencia de regiones, la maximización del CoefCCN (llamado en la literatura el método MCC: Maximum Cross-Correlation) ha sido, sin lugar a dudas, la métrica más empleada para el estudio de la dinámica de las corrientes marinas. Esta técnica fue originalmente aplicada por Leese et al. (1971) para el seguimiento de nubes y, con posterioridad, otros autores también la han aplicado en oceanografía, con diferentes parámetros y preprocesados o postprocesados adicionales para intentar minimizar los problemas de rotación, escalado y deformación. Entre otros podemos destacar a Emery et al. (1986), García y Robinson (1989), Tokmakian et al. (1990), Holland y Yan (1992), Wu y Pairman (1995), Ghisolfi (1995), Moctezuma et al. (1995), García-Weil (1998), Borzelli et al. (1999), Domínguez et al. (2000), Bowen et al. (2002), Moulin (2004) o Alberotanza y Zandonella (2004). En general, los movimientos de las estructuras estimados por este método concuerdan con las

corrientes y vientos. Sin embargo, no se ha hecho hasta la fecha un estudio detallado de las precisiones de este tipo de técnicas.

Este artículo aborda este aspecto y se estructura de la siguiente manera. A continuación se proporcionan los fundamentos relativos a las técnicas de correspondencia. Seguidamente se detallan las diferentes bases de datos utilizadas en el proceso de evaluación. Se continúa con la presentación de los resultados más relevantes para finalizar con las principales conclusiones y contribuciones.

## METODOLOGÍA

### Técnicas de correspondencia de regiones

Estos métodos se basan en obtener la mejor correspondencia entre regiones de la imagen en instantes consecutivos. Así, un píxel rodeado por su vecindad se usa como patrón y en la imagen siguiente se busca el mejor ajuste a ese patrón alrededor de un área de búsqueda. El desplazamiento que proporciona la mayor similitud da los vectores de desplazamiento en los 2 ejes (ver Figura 1).

Existen diferentes métricas de similitud entre regiones que se pueden minimizar o maximizar, según el caso, para obtener la mejor correspondencia. Las tres métricas básicas son la suma de las diferencias absolutas (SDA), la suma de las diferencias cuadráticas (SDC) y la correlación cruzada (CC). Aunque existen otras variantes a partir de la combinación de ellas o de su normalización.

Así, las 12 métricas estudiadas son las incluidas en la Tabla 1.

Su formulación para ventanas patrón cuadradas es:

$$SDA = \sum_{j=-n}^n \sum_{i=-n}^n |I_1(x+i, y+j) - I_2(x+d_x+i, y+d_y+j)|$$

$$SDAN = \frac{\sum_{j=-n}^n \sum_{i=-n}^n |I_1(x+i, y+j) - I_2(x+d_x+i, y+d_y+j)|}{\sqrt{\sum_{j=-n}^n \sum_{i=-n}^n [I_1(x+i, y+j)]^2 \cdot \sum_{j=-n}^n \sum_{i=-n}^n [I_2(x+d_x+i, y+d_y+j)]^2}}$$

$$SDAC = \sum_{j=-n}^n \sum_{i=-n}^n [I_1(x+i, y+j) - \bar{I}_1] - [I_2(x+d_x+i, y+d_y+j) - \bar{I}_2]$$

$$SDACN = \frac{\sum_{j=-n}^n \sum_{i=-n}^n [I_1(x+i, y+j) - \bar{I}_1] - [I_2(x+d_x+i, y+d_y+j) - \bar{I}_2]}{\sqrt{\sum_{j=-n}^n \sum_{i=-n}^n [I_1(x+i, y+j) - \bar{I}_1]^2 \cdot \sum_{j=-n}^n \sum_{i=-n}^n [I_2(x+d_x+i, y+d_y+j) - \bar{I}_2]^2}}$$

$$SDC = \sum_{j=-n}^n \sum_{i=-n}^n [I_1(x+i, y+j) - I_2(x+d_x+i, y+d_y+j)]^2$$

$$CC = \sum_{j=-n}^n \sum_{i=-n}^n I_1(x+i, y+j) \cdot I_2(x+d_x+i, y+d_y+j)$$

$$SDCN = \frac{\sum_{j=-n}^n \sum_{i=-n}^n [I_1(x+i, y+j) - I_2(x+d_x+i, y+d_y+j)]^2}{\sqrt{\sum_{j=-n}^n \sum_{i=-n}^n [I_1(x+i, y+j)]^2 \cdot \sum_{j=-n}^n \sum_{i=-n}^n [I_2(x+d_x+i, y+d_y+j)]^2}}$$

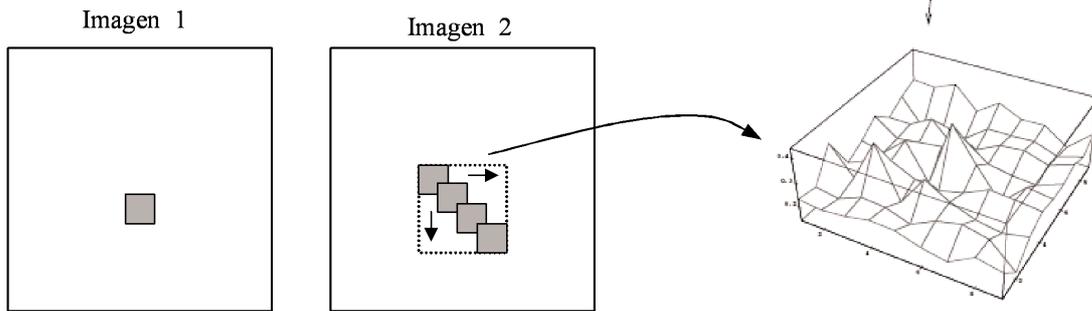
$$CCN = \frac{\sum_{j=-n}^n \sum_{i=-n}^n I_1(x+i, y+j) \cdot I_2(x+d_x+i, y+d_y+j)}{\sqrt{\sum_{j=-n}^n \sum_{i=-n}^n [I_1(x+i, y+j)]^2 \cdot \sum_{j=-n}^n \sum_{i=-n}^n [I_2(x+d_x+i, y+d_y+j)]^2}}$$

$$SDCC = \sum_{j=-n}^n \sum_{i=-n}^n [[I_1(x+i, y+j) - \bar{I}_1] - [I_2(x+d_x+i, y+d_y+j) - \bar{I}_2]]^2$$

$$CoefCC = \sum_{j=-n}^n \sum_{i=-n}^n [I_1(x+i, y+j) - \bar{I}_1] \cdot [I_2(x+d_x+i, y+d_y+j) - \bar{I}_2]$$

$$SDCCN = \frac{\sum_{j=-n}^n \sum_{i=-n}^n [[I_1(x+i, y+j) - \bar{I}_1] - [I_2(x+d_x+i, y+d_y+j) - \bar{I}_2]]^2}{\sqrt{\sum_{j=-n}^n \sum_{i=-n}^n [I_1(x+i, y+j) - \bar{I}_1]^2 \cdot \sum_{j=-n}^n \sum_{i=-n}^n [I_2(x+d_x+i, y+d_y+j) - \bar{I}_2]^2}}$$

$$CoefCCN = \frac{\sum_{j=-n}^n \sum_{i=-n}^n [I_1(x+i, y+j) - \bar{I}_1] \cdot [I_2(x+d_x+i, y+d_y+j) - \bar{I}_2]}{\sqrt{\sum_{j=-n}^n \sum_{i=-n}^n [I_1(x+i, y+j) - \bar{I}_1]^2 \cdot \sum_{j=-n}^n \sum_{i=-n}^n [I_2(x+d_x+i, y+d_y+j) - \bar{I}_2]^2}}$$



**Figura 1.** Desplazamiento de la ventana patrón dentro del área de búsqueda. El pico mayor de la superficie de correlación nos indica la posición donde se alcanza la máxima similitud.

<b>Métricas de Correspondencia de Regiones</b>	
<b>SDA:</b>	Suma de las diferencias absolutas
<b>SDAN:</b>	Suma de las diferencias absolutas normalizada
<b>SDAC:</b>	Suma de las diferencias absolutas de media cero
<b>SDACN:</b>	Suma de las diferencias absolutas de media cero normalizada
<b>SDC:</b>	Suma de las diferencias cuadráticas
<b>SDCN:</b>	Suma de las diferencias cuadráticas normalizada
<b>SDCC:</b>	Suma de las diferencias cuadráticas de media cero
<b>SDCCN:</b>	Suma de las diferencias cuadráticas de media cero normalizada
<b>CC:</b>	Correlación cruzada
<b>CCN:</b>	Correlación cruzada normalizada
<b>CoefCC:</b>	Coficiente de correlación cruzada
<b>CoefCCN:</b>	Coficiente de correlación cruzada normalizado

**Tabla 1.** Métricas usadas en las técnicas de correspondencia de regiones.

donde (dx,dy) representa el desplazamiento en valores enteros de píxel e  $\bar{x}$  representa la media de esa imagen en la ventana. Hay que destacar que para obtener buenas estimaciones del movimiento es necesario ajustar adecuadamente los parámetros asociados (tamaño del patrón y de la ventana de búsqueda). Finalmente, otro parámetro afecta al desplazamiento del patrón (salto o solapamiento patrón) y en consecuencia a la densidad de vectores.

Como se ha indicado, únicamente la métrica CoefCCN (técnica MCC) ha sido usada sistemáticamente para la estimación del movimiento superficial del mar. Sin embargo, como se demostrará más adelante, existen 4 métricas que proporcionan mejores resultados.

### Metodología de evaluación

A la hora de evaluar las prestaciones de cada una de las doce métricas anteriormente descritas es necesario disponer de una base de datos que abarque tanto secuencias sintéticas, como secuencias reales y medidas in-situ obtenidas mediante instrumentación oceanográfica.

#### Secuencias sintéticas

La gran ventaja del uso de secuencias sintéticas es que los campos de movimiento y las características de las imágenes pueden ser controlados en su totalidad. Así, al conocer de forma precisa los vectores de movimiento aplicados a la imagen inicial, se puede cuantificar el error en el campo de vectores obtenido. Se han creado secuencias sintéticas mediante la aplicación de los movimientos globales de traslación, rotación, escalado y combinación de los tres movimientos anteriores (movimiento afin). Para la generación de estas transformaciones geométricas que modifican la relación espacial entre los píxeles se ha aplicado la siguiente formulación, donde el movimiento de traslación simplemente mueve cada píxel (X,Y) según un offset ( $\Delta X, \Delta Y$ ) aplicado a cada coordenada para obtener:

$$X' = X + \Delta X$$

$$Y' = Y + \Delta Y$$

el de escalado requiere la inclusión de un coeficiente multiplicativo para cada coordenada:

$$X' = \alpha X$$

$$Y' = \beta Y$$

mientras que la rotación de una imagen, según un ángulo  $\phi$ , introduce una interdependencia entre las coordenadas originales de la forma:

$$X' = X + Y \operatorname{sen}\phi$$

$$Y' = Y - X \operatorname{cos}\phi$$

Finalmente, el movimiento afin combina los movimientos anteriores y puede expresarse como:

$$X' = \alpha X + Y \operatorname{sen}\phi + \Delta X$$

$$Y' = \beta Y - X \operatorname{cos}\phi + \Delta Y$$

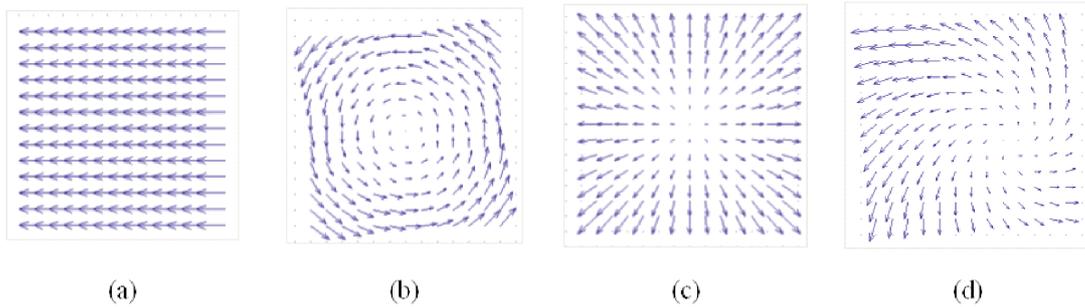
Se han elegido valores medios en los parámetros de estos movimientos en función de las variaciones habituales que se producen en la zona oceanográfica de Canarias y en una secuencia de imágenes separadas 12 horas (Marcello, 2006). El campo de vectores de movimiento generado es el que se presenta en la Figura 2.

Se han elegido 2 imágenes reales de temperatura superficial del mar de 90x90 píxeles obtenidas por el sensor AVHRR (NOAA) y que presentan estructuras. Como se muestra en la Figura 3, la primera incluye un filamento en la costa NO Africana y la segunda presenta un remolino ciclónico al sur de la isla de Gran Canaria.

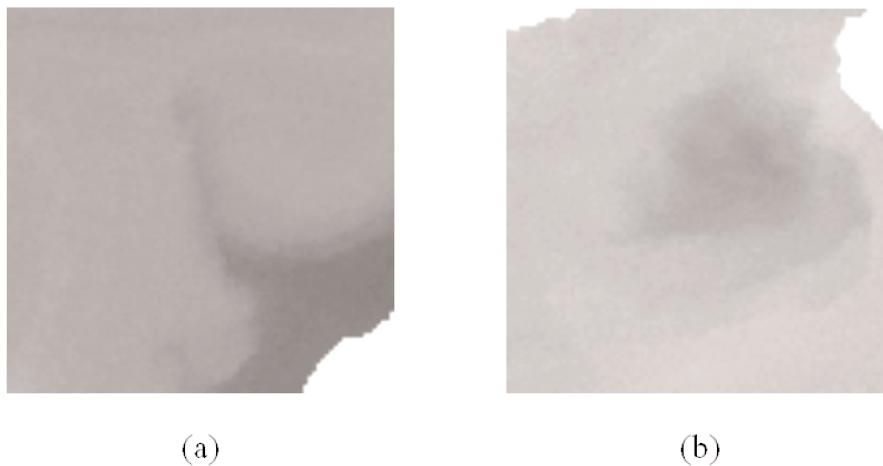
Como se comentó con anterioridad, en secuencias reales, además de los diversos movimientos superficiales, se producen otro tipo de transformaciones que deberemos contabilizar para poder hacer una evaluación más realista de los errores generados por cada técnica. En este sentido se optó por la inclusión de un parámetro de variación en el contraste de la imagen sintética generada tras el movimiento y, además, se degradó la imagen mediante la adición de ruido gaussiano (media: 0 y varianza: 0.01) y de ruido impulsivo sal y pimienta (densidad: 1%). Este proceso de transformación y degradación se puede expresar como:

$$g(x, y) = TI \left[ TG(f(x, y)) \right] + \eta_G(x, y) + \eta_{SP}(x, y)$$

donde la  $g(x,y)$  es la imagen generada a partir la función de transformación de intensidad (TI) aplicada sobre la imagen inicial  $f(x,y)$ , a la que previamente se le ha realizado una transformación geométrica (TG) y degradada mediante la inclusión de ruido aditivo gaussiano  $\eta_G(x,y)$  y sal y pimienta  $\eta_{SP}(x,y)$ . Para secuencias sintéticas, dado que campo de vectores usado es perfectamente conocido, los parámetros para la medida del error en cada técnica han sido la media y desviación típica del error en el ángulo y en el módulo, y la probabilidad de error.



**Figura 2.** Transformaciones geométricas: (a) traslación, (b) rotación, (c) escalado y (d) movimiento afin.



**Figura 3.** Imágenes reales usadas para generar las secuencias sintéticas: (a) AVHRR-2 (NOAA-14) del 3 de julio de 2000 y (b) AVHRR-3 (NOAA-16) del 4 de julio de 2004.

### Secuencias reales

Con el objeto de analizar cualitativamente los movimientos obtenidos en imágenes consecutivas de teledetección y para poder verificar si, en efecto, los resultados con secuencias sintéticas son extrapolables al mundo real, se han generado secuencias reales de 12 y 24 horas, con imágenes diurnas y nocturnas de diferentes épocas del año y obtenidas por diferentes sensores.

Las imágenes de las secuencias se corresponden con el producto de temperatura superficial del mar obtenido a partir de los datos de los sensores AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) y MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Ambos instrumentos permiten medir la radiación terrestre en longitudes de onda desde el visible al infrarrojo térmico. AVHRR se encuentra embarcado en los satélites de la serie NOAA y consigue imágenes en 6 bandas con resoluciones

espaciales en el nadir de 1.1 Km. De otra parte, el sensor MODIS está embarcado en las plataformas EOS-TERRA y AQUA y proporciona alta sensibilidad radiométrica en 36 bandas espectrales con resoluciones espaciales de 250 m., 500 m y 1 Km (esta última resolución es la disponible para las imágenes de temperatura superficial del mar).

En el caso de usar secuencias reales, dado que el campo de vectores de referencia no es conocido, los parámetros para la medida del error en cada técnica se basan en análisis visual de la coherencia en el módulo y ángulo en la vecindad de cada vector, para identificar aquellos erróneos. Además, aplicando conocimientos de oceanografía física, seremos capaces de analizar el campo de vectores obtenido por cada técnica y de identificar visualmente aquellas zonas donde los flujos de la corriente sean erróneos o al menos sospechosos. Finalmente, mediante la animación de la secuencia de imágenes, de forma subjetiva se pueden obtener las direcciones en las que se aprecia un movimiento claro de las estructu-

ras. Este proceso puede asimilarse a la elección de puntos de control en las zonas características de las estructuras de las dos imágenes y el dibujo de su variación espacial en la secuencia.

### Medidas in-situ

La campaña CORICA (Hernández-Guerra et al., 2005) se realizó del 7 al 27 de Septiembre de 2003 con el buque oceanográfico Thalassa del IFREMER. El buque salió del archipiélago y analizó las corrientes a 29° N de latitud, luego las de 26° O de longitud y se dirigió a la costa Africana siguiendo la latitud de 20° N para retornar a Canarias desde 20.5° O.

Cuando se dispone de medidas de la velocidad obtenidas por instrumentación oceanográfica (ADCP: Acoustic Doppler Current Profilers) es posible evaluar la calidad de los vectores generados por las diferentes técnicas, tanto en módulo como en ángulo. Los parámetros estadísticos empleados para analizar la precisión han sido el sesgo, el error cuadrático medio, y el factor de calidad que combina en cua-

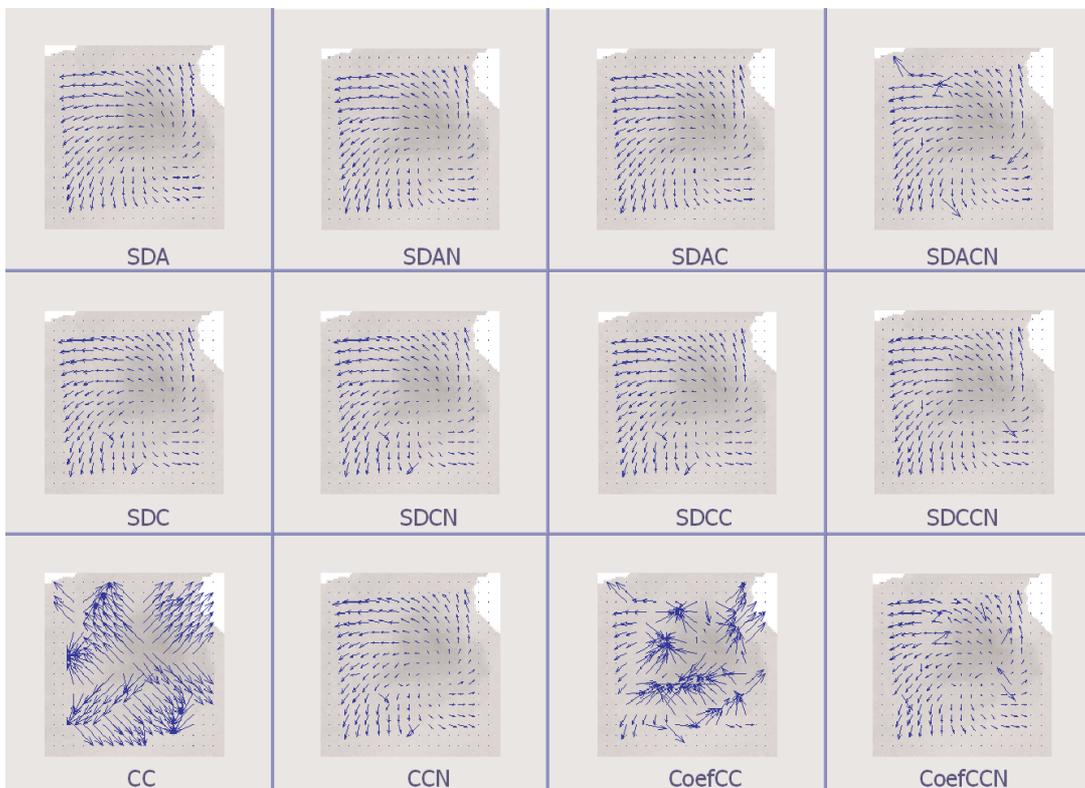
dratura ambos errores.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se han examinado en detalle las prestaciones de las 12 técnicas de correspondencia de regiones. Además, se analizaron también los resultados obtenidos al incluir un filtrado previo a cada imagen de la secuencia. Es importante destacar que los resultados presentados se han obtenido sin la aplicación de un postprocesado que elimine vectores con baja coherencia espacial, para de esta manera poder comparar los datos brutos. Dada la gran cantidad de datos obtenidos (Marcello, 2006), a continuación se presentan únicamente los resultados más relevantes.

Para secuencias sintéticas, cuando únicamente se aplican transformaciones geométricas, la mayoría de métricas proporcionan resultados excelentes.

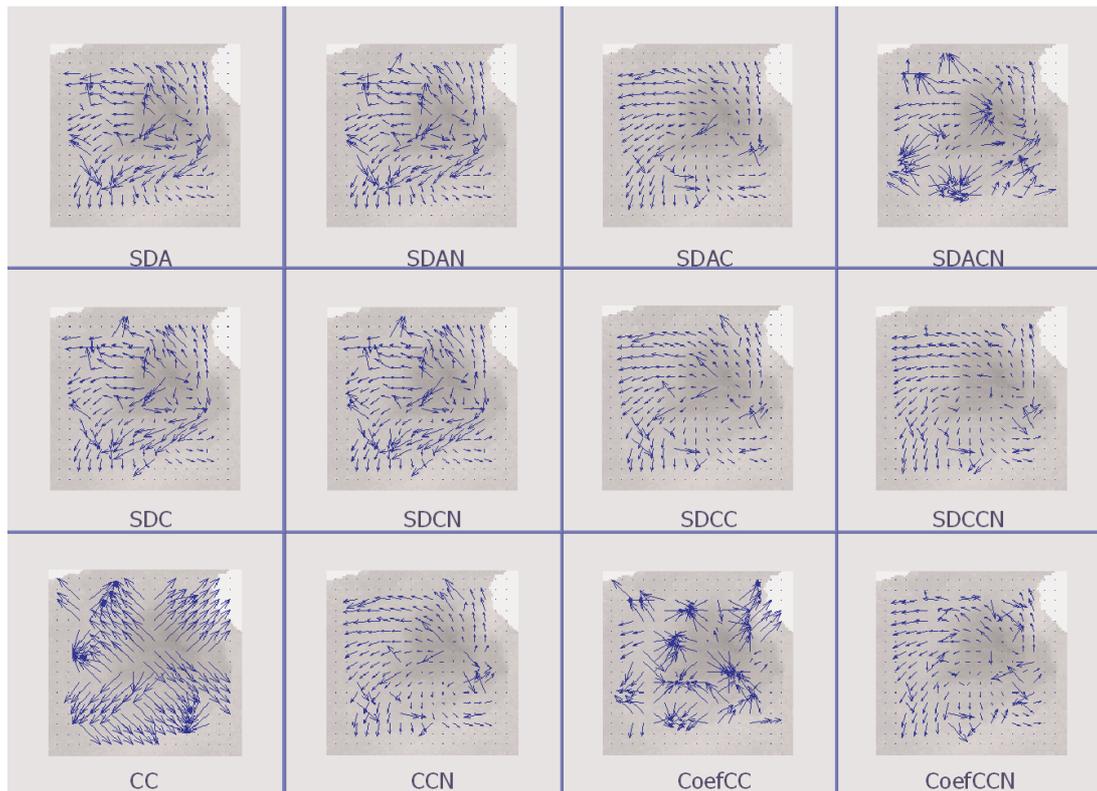
Como se muestra en la Figura 4 para el caso de movimiento afín, únicamente CC y CoefCC generar un campo erróneo. Destacar que CoefCCN (MCC) proporciona también cierto número de vectores incorrectos.



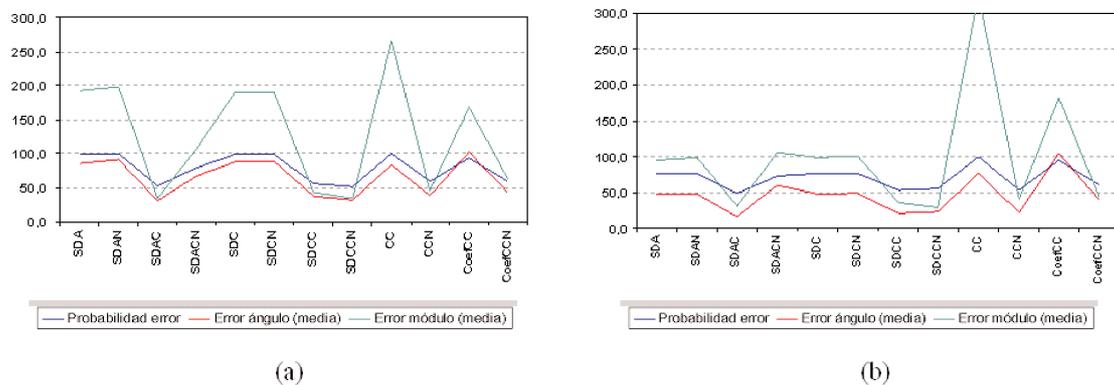
**Figura 4.** Vectores de movimiento obtenidos por cada métrica para el movimiento afín aplicado sobre la imagen del molino y sin filtrado previo (patrón: 10 píxeles, ventana: 30 píxeles y salto: 5 píxeles).

Cuando además del movimiento también se incluyen variaciones en el contraste y se introduce ruido, los resultados empeoran. Sin embargo, los vectores erróneos se presentan aisladamente y por tanto podrán ser eliminados fácilmente aplicando un post-procesado basado en umbrales de coherencia espacial. Aquellas métricas que restan el valor medio de la imagen y que normalizan son las más robustas

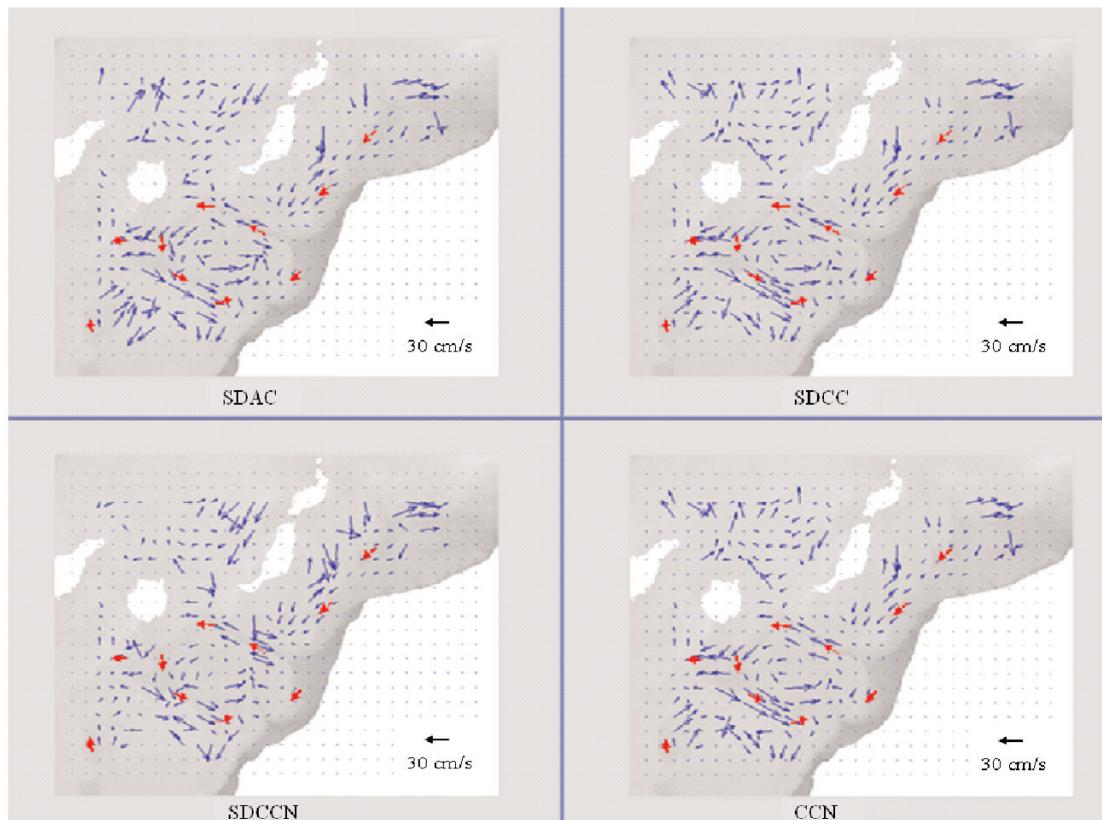
y no se ven tan afectadas por las variaciones en el sesgo del histograma entre las 2 imágenes de la secuencia. No es posible encontrar una métrica que mejore globalmente todas las estadísticas de error, pero los mejores resultados se obtienen con SDAC, SDCC, SDCCN, CCN. La métrica CoefCCN (MCC) proporciona resultados aceptables aunque con errores en ángulo y módulo mayores. A modo



**Figura 5.** Vectores de movimiento obtenidos por cada métrica, para el movimiento afín + variación de contraste + ruidos, aplicados sobre la imagen del remolino y sin filtrado previo (patrón: 10 píxeles, ventana: 30 píxeles y salto: 5 píxeles).



**Figura 6.** Probabilidad de error y errores medios en el ángulo y en el módulo, para cada métrica en secuencias con movimiento afín, variación de contraste y adición de ruidos y sin la aplicación de ningún filtrado previo: (a) imagen de filamento y (b) imagen de remolino.



**Figura 7.** Campo de vectores generados por cada métrica (patrón: 40 píxeles, ventana: 100 píxeles y salto: 15 píxeles) para la secuencia de imágenes de TSM del sensor AVHRR-NOAA 16 (29 de octubre 2002 14:43 hr. y 30 de octubre 2002 14:31 hr.)

de ejemplo, en la Figura 5 se muestran los campos de vectores obtenidos por cada métrica para la peor situación (movimiento afín + variación de contraste + ruido gaussiano + ruido impulsivo) sobre la imagen del remolino y sin filtrado previo. En la Figura 6 se presentan los resultados cuantitativos, nuevamente para la peor situación, tras la comparación de los vectores estimados con los de referencia. Los parámetros de medida del error incluidos son la probabilidad de error y el valor medio del error en el ángulo (grados) y en el módulo (%). Se observa que las métricas SDAC, SDCC, SDCCN, CCN logran errores en el ángulo y módulo cercanos a 30° y 30%, respectivamente; mientras los errores para CoefCCN (MCC) se aproximan a 40° y 50%. En cuanto al estudio del mejor tipo de filtrado previo, se obtiene que el filtro mediano es el que proporciona menores errores, aunque los resultados son muy similares al caso de no aplicar filtro.

Se evaluaron las métricas usando secuencias reales de imágenes de temperatura superficial del mar a

partir de datos AVHRR y MODIS. Mediante inspección visual se obtiene que nuevamente las métricas SDAC, SDCC, SDCCN, CCN generan los campos de vectores más coherentes y en concordancia con los movimientos conocidos para cada zona a partir de conocimientos de oceanografía física.

Las zonas de estudio han sido la Corriente de Canarias (30 secuencias) y la Corriente del Golfo (10 secuencias). Se han seleccionado estos sistemas circulatorios por ser bastante representativos, ricos en estructuras mesoescalares y tener características bastante diferentes. La Corriente de Canarias es lenta (5-30 cm/s) y fluye a lo largo de la costa Africana de Norte a Sur todo el año, girando al Este hacia el océano abierto a 20-25° N. La Corriente del Golfo se origina en el Golfo de Méjico asciende por la costa Este de Estados Unidos. Se trata de una corriente mucho más rápida (hasta 2 m/s) y cálida.

A modo de ejemplo, en la Figura 7 se presentan los vectores de movimiento obtenidos para las mejores métricas (color azul) y los vectores estimados visual-

mente (color rojo). Se aprecia que, salvo por algunos vectores incoherentes que podrán ser eliminados en el postprocesado, las técnicas modelan perfectamente el movimiento descrito de las aguas. Se observa el afloramiento costero con la presencia de un filamento perfectamente definido que llega perpendicularmente casi hasta el SE de la costa de Gran Canaria para luego curvarse retornando y formando una especie de remolino. El resto de las corrientes son en general paralelas a los frentes (es decir prácticamente paralelas a la costa Africana) y en sentido ecuatorial. El módulo de los vectores es elevado en el filamento y prácticamente nulo en el centro del remolino y en el resto se mantienen dentro de los márgenes habituales de la Corriente de Canarias.

En la Figura 8 se muestran los vectores obtenidos por las métricas SDAC y CoefCCN para la zona del Golfo. El resultado es satisfactorio (tanto en módulo como ángulo), modelando bien el North Atlantic Drift.

Finalmente, el flujo obtenido por las técnicas de correspondencia fue comparado con medidas in-situ obtenidas a 30 m. de profundidad mediante ADCP para la zona de la Corriente de Canarias y la Nor-ecuatorial. La magnitud de la velocidad tiene un sesgo negativo, es decir, que las velocidades calculadas son entre un 35% a 45% inferiores con respecto a las medidas reales. Los ángulos se ajustan mejor tanto en sesgo como en error cuadrático medio. Nuevamente las cuatro técnicas de correspondencia de regiones proporcionan resultados satisfactorios y globalmente la SDCC es la que presenta la mejor figura de calidad conjunta. Hay que tener en cuenta que la muestra disponible no es muy elevada, aunque los valores obtenidos son coherentes con los resultados anteriores y con los datos proporcionados

por diversos autores (Kelly y Strub, 1992; Bowen et al., 2002 o Moulin, 2004).

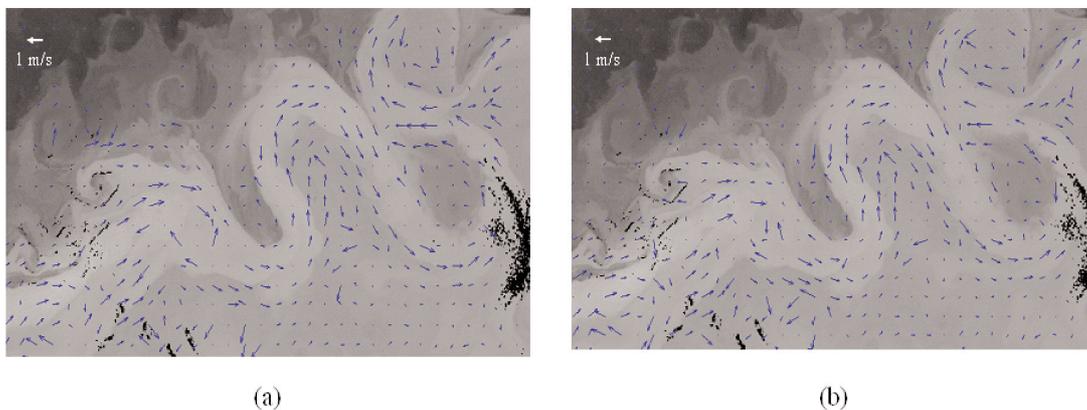
## CONCLUSIONES

Se ha efectuado un estudio novedoso y minucioso de diferentes técnicas de correspondencia de regiones y las conclusiones más relevantes han sido presentadas.

Para evaluar de forma exhaustiva las prestaciones de cada una de las técnicas, se han creado y usado secuencias sintéticas a partir de la aplicación de transformaciones geométricas (traslación, rotación, escalado y afin). Además, con el fin de que la secuencia sea lo más realista posible, también se ha incluido una variación en la intensidad y una degradación mediante ruido aditivo gaussiano e impulsivo. Para la validación, también se han usado secuencias reales, creando una base de datos de imágenes consecutivas de los sensores AVHRR y MODIS, que ha permitido disponer de decenas de secuencias separadas 12 y 24 horas. Finalmente, se han obtenido medidas in-situ de corriente a partir de instrumentación oceanográfica.

Se ha aplicado esta extensa base de datos de referencia en el proceso de validación de las 12 métricas de correspondencia de regiones y se han conseguido resultados altamente satisfactorios, con campo de vectores que modelan bien las transformaciones geométricas aplicadas y el flujo real de las estructuras en la Corriente de Canarias y del Golfo. Las técnicas de correspondencias de regiones que proporcionan mejores resultados son SDAC, SDCC, SDCCN y CCN.

Es importante destacar que la técnica CoefCCN (MCC: Maximum Cross-Correlation), que ha sido



**Figura 8.** Flujo calculado para una secuencia de imágenes (19 Abril 2005 18:37 y 20 Abril 2005 2:29) usando las métricas (patrón: 50 píxeles, ventana: 110 píxeles y salto: 30 píxeles): (a) SDAC y (b) CoefCCN.

tradicionalmente la métrica usada hasta la fecha, proporciona resultados satisfactorios pero con errores superiores en módulo y ángulo comparativamente con las 4 anteriores métricas al ser analizada sobre las tres bases de datos.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer al DAAC del Goddard Space Flight Center de la NASA por las imágenes MODIS, al Institute of Coastal and Marine Sciences de la Rutgers University por las imágenes AVHRR de la Corriente del Golfo y al Dr. Alonso Hernández Guerra del Servicio de Oceanografía Física de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria por las medidas in-situ obtenidas mediante ADCP.

## REFERENCIAS

- ALBEROTANZA, L. y ZANDONELLA, A. 2004. Surface current circulation estimation using AVHRR images and comparison with HF radar current measurements. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 25, nº 7-8, pp: 1357-1362.
- BORZELLI, G., MANZELLA, S., MARULLO y SANTOLERI, R. 1999. Observations of coastal filaments in the Adriatic Sea. *Journal of Marine Systems*, Vol.20, pp: 187-203.
- BOWEN, M.M., EMERY, W.J., WILKIN, J.L., TILDESLEY, P.C., BARTON I.J. y KNEWTON, R. 2002. Extracting multiyear surface currents from sequential thermal imagery using the maximum cross-correlation technique. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, Vol.19(10), pp: 1665-1676.
- DOMÍNGUES, C.M., GONZALVES, G.A., GHISOLFI, R.D. y GARCÍA, C.A.E. 2000. Advective Surface Velocities Derived from Sequential Infrared Images in the Southwestern Atlantic Ocean. *Remote Sensing of Environment*, Vol.. 73, nº 2, pp: 218-226.
- EMERY, W.J., THOMAS, A.C., COLLINS, M.J., CRAWFORD, W.J. y MACKAS, D.L. 1986. An objective method for computing advective surface velocities from sequential infrared satellites images. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 91 C11-12, pp: 12865-12878.
- GARCIA, C.A. y ROBINSON, I.S. 1989. Sea surface velocities in shallow seas extracted from sequential CZCS satellite data. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 94-C12, pp:12681-12691.
- GARCÍA WEIL, L. 1998. *Descripción y análisis cuantitativo mediante series de imágenes de satélite de la dinámica de las aguas superficiales del noroeste de África*. Tesis Doctoral, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Las Palmas.
- GHISOLFI, R.D. 1995. Estimativas da velocidade superficial no oceano Atlantico Sul Ocidental utilizando imagens seqüenciais do satélite AVHRR/NOAA. *Dissertação de mestrado em Sensoramento Remoto*, Univ. Federal do Rio Grande so Sul, Brasil.
- HERNÁNDEZ-GUERRA A., FRAILE-NUÑEZ, E., LOPEZ-LAATZEN, F., MARTÍNEZ, A., PARRI-LLA, G. y VÉLEZ-BELCHÍ, P. 2005. Canary Current and North Equatorial Current from an inverse box model. *Journal of Geophysical Research*, Vol.110, nº C12.
- HOLLAND, J.A. y YAN, X.H. 1992. Ocean thermal feature recognition, discrimination and tracking using infrared satellite imagery. *IEEE Trans. Geosciences and Remote Sensing*, Vol. 30, nº 5, pp: 1046-1053.
- ISERN-FONTANET, J., TURIEL, A., GARCÍA-LADONA, E. y FONT, J., 2007. Microcanonical multifractal formalism: Application to the estimation of ocean surface velocities, *J. Geophys. Res.*, 112, C05024, doi:10.1029/2006JC003878.
- KELLY, K.A. y STRUB, P.T. 1992. Comparison of velocity estimates from advanced very high resolution radiometer in the coastal transition zone. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 97-c6, pp: 9653-9668.
- LA VIOLETTE, P.E. 1984. The advection of submesoscale thermal in the Alboran Sea Gyre. *Journal of Physical Oceanography*, Vol.14, pp: 550-565.
- LEESE, J.A., NOVAK, C.S. y CLARK, B.B. 1971. An Automated Technique for Obtaining Cloud Motion from Geosynchronous Satellite Data Using Cross Correlation. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 10, nº 1, pp: 118-132.
- MARCELLO, J. 2006. *Desarrollo de técnicas de procesamiento de imágenes multitemporales y multisensoriales para la detección y seguimiento de estructuras oceanográficas*. Tesis doctoral Universidad de Las Palmas de Gran

Canaria. Las Palmas.

- MOCTEZUMA, M., MAITRE, H. y PARMIGIANI, F. 1995. Sea-ice velocity fields estimation on Ross Sea with NOAA-AVHRR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol.33, n°:5, pp: 1286-1292.
- MOULIN, A. 2004. *A comparison of two methods measuring surface coastal circulation: CODAR versus satellite estimation using the Maximum Cross-Correlation Technique*. Technical report. Florida Institute of Technology, Melbourne, Florida.
- TOKMAKIAN, R., STRUB, P.T. y MCCLEAN-PADMAN, J. 1990. Evaluation of the maximum correlation method of estimating sea surface velocities from sequential satellite images. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol.7, pp: 852-865.
- WU, Q.X. y PAIRMAN, D. 1995. A relaxation labelling technique for computing sea surface velocities from sea surface temperature. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 33, n° 1, pp: 216-220.