

ESTUDIO DE ESTRUCTURAS TERMICAS EN EL MAR DE ALBORAN. ANALISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES DE LA TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR EN LA ZONA

M. Parada Sanguino

Dpto. Tecnología Electrónica, Facultad de Informática y Estadística. Reina Mercedes s/n. 41012 Sevilla. Tfno: 954-552788, Fax: 954-552764.

M. Cantón Garbín

Dpto. Lenguajes y Computación, Facultad de Ciencias. Universidad de Almería. Tfno y Fax: 950-215129.

L. Villar y J.M. Moreira Madueño

Servicio de Evaluación de Recursos Naturales. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía. Avda. de las Acacias s/n. 41092 Sevilla. Tfno: 954480200.

RESUMEN.- Se presenta el estudio sobre la evolución de las estructuras térmicas en el Mar de Alborán, realizado a partir del análisis de 48 imágenes AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) del año 1993, relacionándolas con el flujo a través de Gibraltar y con los datos de viento y presión atmosférica en la zona, observándose la correlación entre el flujo y la aparición de los giros así como la influencia de los datos meteorológicos en la situación y tamaño de los mismos. Mediante el estudio en componentes principales de 12 imágenes de temperatura máxima se han extraído conclusiones sobre el comportamiento estacional de dichos giros.

ABSTRACT.- In this paper, the evolution of thermal structures in the Alboran Sea with the help of AVHRR images, is presented. We have analyzed 48 images, taken with a weekly periodicity along the year 1993, in conjunction with flow through Gibraltar strait and meteorologic data. The correlation of those data with the presence, size and location of the gyres has been shown. Principal components analysis of a subset of 12 images, one per month, have allowed us to observe the seasonal behaviour of the gyres.

1.- INTRODUCCION

Las causas de la existencia y evolución de uno o dos giros en el Mar de Alborán ha sido objeto de estudio en repetidas ocasiones en los últimos años (Cheney y Doblar, 1982; La Violette, 1984 y 1986; Preller, 1986, Bormans y Garrett, 1989), dando lugar a diferentes teorías basadas unas en la morfología del estrecho y la relación entre los flujos de agua entrante y saliente por el mismo (Heburn y La Violette, 1990; Bormans et al., 1986; Preller, 1986), y otras en la influencia que las condiciones meteorológicas tienen sobre el comportamiento de los giros (Cheney y Doblar, 1982). También los diferentes autores discrepan entre la condición pasajera o permanente de los giros. Es por todo ello que el estudio se ha planteado desde dos puntos de vista diferentes. En primer lugar, se han tratado 48 imágenes diarias, extrayendo de ellas el máximo de información por observación directa

tanto de los mapas de temperatura superficial como de los de temperatura de brillo. Se han revisado varios trabajos relativos al flujo de agua a través del estrecho y se han estudiado datos de viento y de presión atmosférica de la misma fecha de la imagen, para investigar la correlación entre ellos y la evolución de los giros de Alborán. Un segundo punto de vista ha sido el análisis de componentes principales de 12 imágenes de temperatura máxima, una por mes, para extraer de él la información de la varianza tanto espacial como temporal de las imágenes, lo que nos ha permitido saber cuáles de los fenómenos observados en las imágenes son más permanentes a lo largo de un año.

2.- ESTUDIO DE IMAGENES DIARIAS

La zona en la que se ha realizado esta parte del estudio es la comprendida entre las coordenadas 35°N 8°W y 40°N 1°E, que cubre las zonas del golfo de Cádiz, estrecho de Gibraltar y mar de Alborán. Las imágenes tratadas son HRPT adquiridas por el sensor AVHRR a bordo del satélite NOAA 11 a lo largo de 1993.

Se ha contado además con los datos de dirección e intensidad del viento en las estaciones meteorológicas de Cádiz, Tarifa y Gibraltar y con los mapas de isobaras en superficie.

Para estudiar la correlación entre la situación de los giros y la distribución de flujo en el estrecho, se han utilizado los trabajos de Ovchinnikov, 1974 y Manzella y La Violette, 1990.

2.1.- Tratamiento

Para evitar la distorsión producida en cada imagen por la forma y rotación de la Tierra, así como por la variación en la órbita y altura del satélite, se han sometido todas las imágenes a un proceso de corrección orbital en el que, partiendo de un modelo de Tierra esférica y una órbita circular, se han utilizado parámetros orbitales coincidentes con la fecha de la imagen (TBUS) y de 1 a 4 puntos de control dependiendo de la distorsión inicial que presentara cada imagen. Las imágenes más distorsionadas inicialmente, se han sometido después a un segundo proceso de corrección lineal por puntos de control. Después de ambas correcciones en ningún caso el error fue mayor de un pixel.

Los números digitales de las imágenes así tratadas, se han convertido a continuación a temperatura de brillo calculando la energía medida por el sensor como una función lineal de los valores digitales y convirtiendo ésta a temperatura mediante la inversa de la ecuación de Planck. La temperatura superficial se ha obtenido sometiendo las imágenes a un método de corrección del tipo "split-window". El algoritmo utilizado ha sido el empleado en el C.M.S. de Lannion (Castagne et al. 1986) habiéndose validado mediante el empleo de datos de una campaña oceanográfica realizada por el Instituto Español de Oceanografía en fechas coincidentes con la toma de las imágenes. El error cuadrático medio producido es de 0'45C.

En las Figuras 1 y 2 se muestran, a modo de ejemplo, las imágenes de temperatura superficial y de brillo correspondientes al 11 de Junio y el 3 de Octubre de 1993 respectivamente.

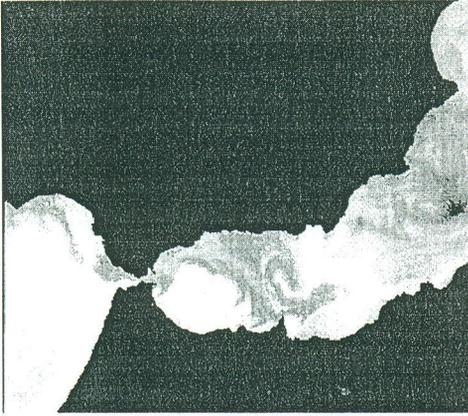


Figura 1.- Mapa de temperatura superficial del día 11-Junio-1993 (C. 15)

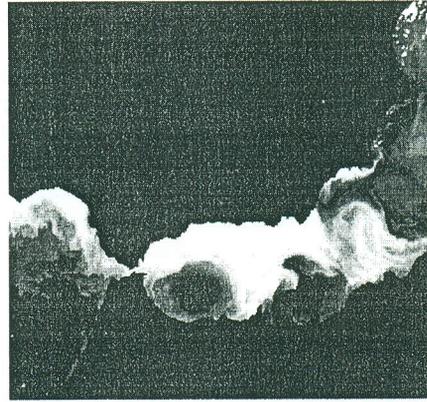


Figura 2.- Imagen de temperatura de brillo del día 3-October-1993

3.- ANALISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES

A grandes rasgos el ACP consiste en realizar una transformación a una serie de imágenes de forma que cada pixel con un valor digital determinado en cada una de las imágenes se refiera a unos nuevos ejes obtenidos a partir de la matriz de covarianza, en los que dichos datos no están correlacionados. En el nuevo espacio los datos tienen la mayoría de la varianza a lo largo del primer eje, la siguiente en el segundo eje, y así sucesivamente.

La matriz de covarianza, que da información sobre la correlación existente entre las diferentes imágenes a estudiar, se obtiene a partir de la matriz de datos de las imágenes D'_{MN} con dimensiones $M \times N$ donde M es el número de pixels de una imagen y N es el número de imágenes. Los autores que han utilizado el ACP (Lagerloef y Berstein, 1988; Paden et al., 1991, Hernández-Guerra y Nykjær, 1995) coinciden en describir dos modos de abordar la obtención de las Componentes Principales:

a) A cada elemento de la matriz D'_{MN} se le resta la media de todos los datos tomados en el mismo instante (media de cada imagen):

$$D_{MN} = D'_{MN} - \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M D'_{jN} \quad (1)$$

b) A cada elemento de la matriz de datos D'_{MN} se le resta la media temporal de todas las imágenes:

$$D_{MN} = D'_{MN} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D'_{Mi} \quad (2)$$

Al calcular las componentes principales a partir de la matriz de covarianza obtenida con la matriz de datos de la ecuación 1, se obtienen las componentes principales espaciales o de gradiente, más indicadas para estudiar estructuras que permanecen estables en el tiempo. En el segundo caso se obtienen las temporales o de covarianza, útiles para estudiar estructuras asociadas con fenómenos de calentamiento o enfriamiento temporal. En nuestro trabajo se han abordado ambos tipos de análisis.

3.1.- Componentes principales espaciales

El resultado de la aplicación del ACP espaciales a la zona del Mar de Alborán, se muestra en las Figuras 3 y 4. En la primera de ellas se muestran las amplitudes temporales de los 4 primeros modos. Estos dan explicación del 38.87%, 22.65%, 10.00% y 7.53% respectivamente de la varianza espacial de la temperatura superficial del mar. En la Figura 4 se muestran las amplitudes espaciales de los mismos modos. En ella, el primer modo espacial aparece como una distribución en la que los dos giros aparecen como estructuras que, en promedio, son estables. Sin embargo, mientras el giro occidental aparece muy bien trazado con un centro cálido y rodeado de aguas frías, el segundo giro no tiene una situación tan definida, presentando en la mitad Norte de la cuenca una distribución poco clara. Aparece muy nítido, como agua fría, el chorro de entrada Atlántico. Las amplitudes temporales, en la Figura 3, dan una distribución estacional muy clara. El máximo del modo está en Junio, con una subida bastante rápida del invierno a la primavera. Se mantiene en verano y cae rápidamente en otoño hasta dar el mínimo en invierno, presentando en Noviembre una amplitud negativa. El resto de las amplitudes son positivas.

Aunque para obtener conclusiones definitivas haría falta hacer el estudio para un período de tiempo más largo, esta distribución de las amplitudes temporales nos permite afirmar que, en promedio, el giro occidental es una estructura bastante permanente sobre todo en los meses de verano. El giro oriental tiene un comportamiento más variable.

Las amplitudes temporales del 2º modo son claramente positivas en Abril, Junio y Julio, mientras que son muy negativas en Mayo y sobre todo en Septiembre y Octubre. Estudiadas las imágenes de estos meses se observa que todas presentan un rasgo común característico: la marcada diferencia de temperatura con el resto de la imagen, en la zona de entrada de Agua Atlántica y en la costa española entre Málaga y cabo de Gata. Todas las imágenes que aparecen en este modo con amplitud temporal positiva grande, presentan las aguas costeras malagueñas muy cálidas. El chorro de entrada es frío pero de poca fuerza. Por el contrario, las tres imágenes que tienen amplitudes negativas muestran un chorro entrante muy fuerte, con agua muy fría que penetra hasta el cabo de Gata enfriando, por tanto, la zona costera española. El resto de las imágenes estudiadas presentan esta zona costera y el chorro con temperaturas intermedias y no significativas. Este modo da, por tanto, información sobre estructuras que, cuando aparecen, tienen una variación muy importante de temperatura con el resto de la imagen pero que no son permanentes en el año y además presentan una variación importante de temperatura de unos meses a otros lo que hace que las amplitudes temporales varíen de signo.

Los modos 3º y 4º resaltan estructuras particulares de las imágenes. El tercero resalta el fuerte enfriamiento de la zona Este de la cuenca, marcando el frente Almería-Orán. Esta es una estructura que, a pesar de su nombre, cambia mucho de posición y por ello no aparece en los dos primeros modos que dan cuenta de estructuras más permanentes. El cuarto modo espacial, por su parte, sólo presenta información de aquellas estructuras más diferenciadas en todas las imágenes. Concretamente, las amplitudes temporales, nos indican que la colaboración de todas las imágenes es pequeña, salvo de las dos que tienen estructuras más peculiares, Octubre y Noviembre y más esta última, siendo la imagen que muestra las amplitudes espaciales muy similar a ella. Esta similitud de estos modos con las imágenes de partida no se hubiese dado si el estudio se hubiera hecho con más imágenes. El último además presenta bastante ruido por lo que no le damos mucho valor.

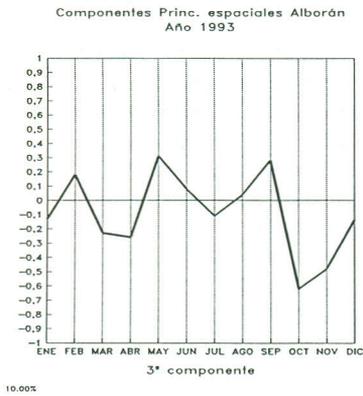
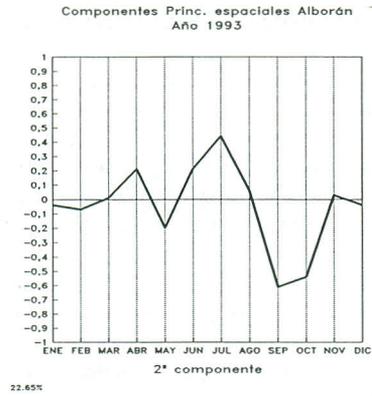
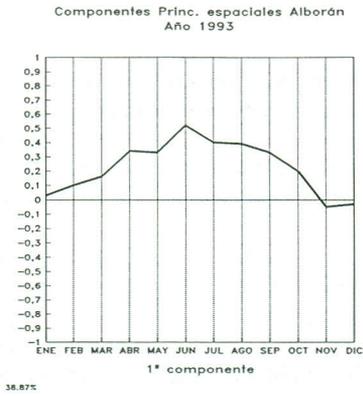


Figura 3.- Amplitudes temporales de las componentes principales espaciales.

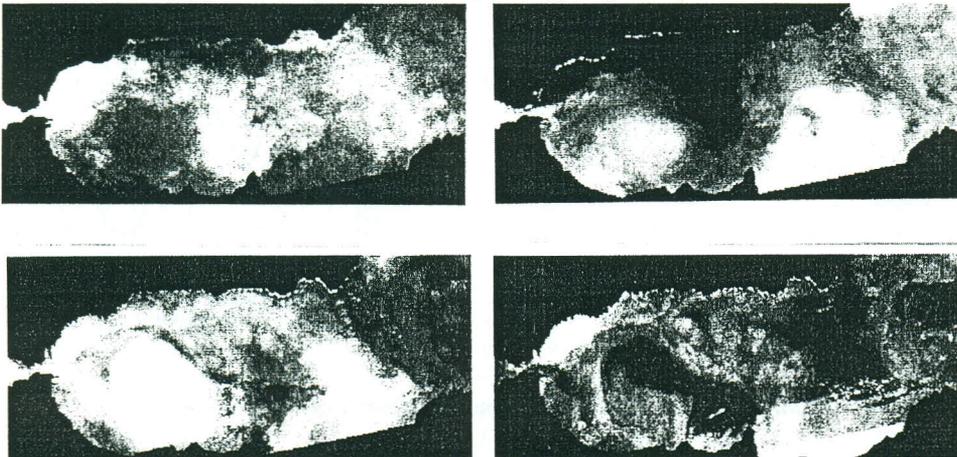


Figura 4.- Amplitudes espaciales de las componentes principales espaciales.

3.2.- Componentes principales temporales

En las Figuras 5 y 6 se muestran los 2 primeros modos del ACP realizado a partir de la matriz de covarianza temporal. De estos modos, el primero cubre prácticamente toda la varianza temporal ya que da cuenta del 93.50% de la misma. Los modos segundo, tercero y cuarto no tienen prácticamente ningún valor. Representan, respectivamente, el 2.18%, 1.13% y 0.83% de la varianza, lo que indica que el comportamiento de la zona es básicamente estacional.

Las amplitudes temporales del primer modo (Figura 5) de nuevo hacen referencia al comportamiento estacional de la zona. El máximo se tiene en Agosto con amplitud grande y positiva y el mínimo en Febrero con amplitud también grande pero negativa. El valor medio de las amplitudes es aproximadamente cero. Esto conduce a que pixels cuyo valor no cambia de unas imágenes a otras tengan en la imagen de amplitudes espaciales (Figura 6) valores próximos a cero que aparecen en tonos claros. En cambio aquellos pixels que tienen una variación estacional alta, muestran en dicha imagen valores distintos de cero con tonos más oscuros. Se deduce por tanto que, a lo largo del año, sólo ha permanecido invariable el chorro de agua Atlántica que en todos los meses tiene temperaturas frías y casi iguales (en torno a los 14-16°C) y aparece en blanco en la imagen. También se aprecia de color claro toda la zona circundante del primer giro lo que indica que, si bien su temperatura no es tan constante como la del chorro de Agua Atlántica sí permanece fija durante bastante tiempo. En cambio la zona costera próxima a Málaga, como indicamos al estudiar el 2º modo espacial, varía mucho su temperatura a lo largo del año, siendo la zona más cálida de las imágenes de verano y la más fría en algunas de otoño o invierno. Aparece, por tanto, en negro en la imagen. El centro del giro occidental aparece así mismo ligeramente más oscuro que el resto de los puntos circundantes. Esto se explica ya que, si bien esta zona siempre es más cálida que otras, sin embargo su temperatura varía mucho de invierno a verano. Los otros puntos de la imagen aparecen muy uniformes como corresponde a puntos que sufren, a lo largo del año, cambios de temperatura intermedios.

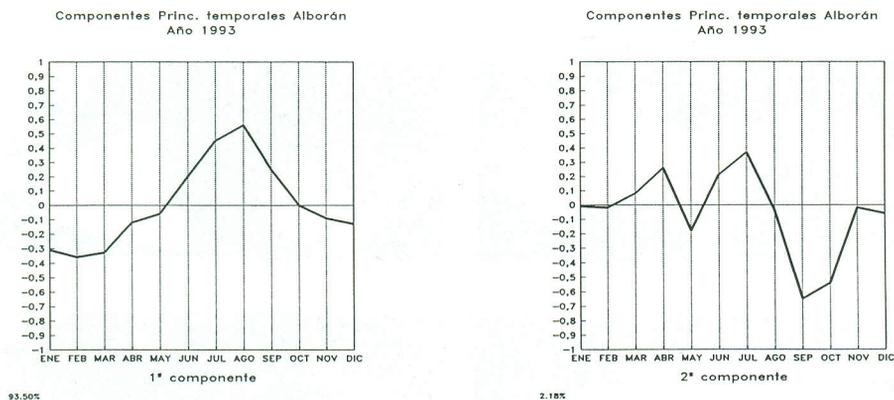


Figura 5.- Amplitudes temporales de las componentes principales temporales

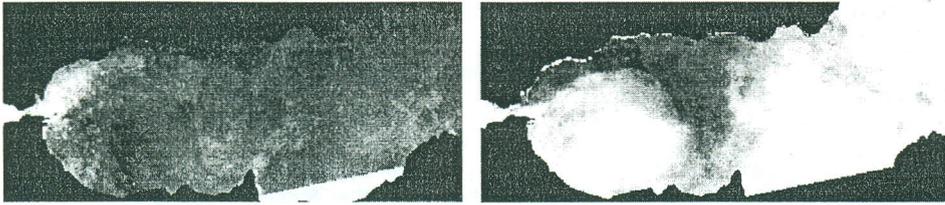


Figura 6.- Amplitudes espaciales de las componentes principales temporales.

4.- CONCLUSIONES

De la observación de todas las imágenes junto a los mapas meteorológicos y de viento se han podido deducir las siguientes conclusiones:

- El GIRO OCCIDENTAL es una estructura que, aunque ayudada por la geometría del estrecho, está provocada principalmente por la distribución relativa de intercambio de agua en el mismo, tanto en la capa superficial como en la profunda. Es una estructura que puede desaparecer. Aparece siempre que el flujo de agua Atlántica superficial sea suficiente y no superado por el flujo de agua en profundidad. Aparece tanto más desarrollado y desplazado al Este cuanto mayor sea el flujo en superficie. Por el contrario aparece recludo en el Oeste cuando el flujo en superficie es menor. De acuerdo con la distribución de flujos de Ovchinnikov, observamos que la máxima probabilidad de giro se tiene en los meses de Junio, Julio, Agosto y Septiembre, siendo la mínima en Diciembre, Enero y Febrero. Las condiciones meteorológicas las consideramos muy influyentes para la situación y tamaño del giro: Vientos de Poniente fuertes y baja presión en el Mediterráneo empujan el giro hacia el Este, mientras que vientos de Levante fuertes y altas presiones en el Mediterráneo producen el efecto contrario.
- El GIRO ORIENTAL no tiene un comportamiento causa-efecto tan acusado, pero sí se observa su tendencia a aparecer en primavera-verano y a desaparecer el resto del año. Las causas parecen estar, como apuntan algunos autores (Heburn y La Violette, 1990), en las corrientes y vientos de la zona exterior a Alborán.
- El FRENTE ALMERÍA-ORÁN presenta ubicación y gradientes de temperatura muy distintos según la época del año desde 0'5°C en invierno hasta 3°C en verano. A veces aparece, al menos en superficie, sin que exista el giro oriental.

Como resultado del estudio análisis de componentes principales las conclusiones son las siguientes:

- La zona tiene un comportamiento claramente estacional en la que todas las estructuras varían en temperatura a lo largo del año, salvo la entrada por Gibraltar del chorro atlántico y, en menor manera, su prolongación para formar el primer giro.
- El giro occidental es la estructura que resulta, en promedio, más permanente. El giro oriental varía su situación geográfica de una forma más notoria.
- El frente Almería-Orán es una estructura muy variable tanto en posición como en el gradiente de temperatura que presenta, como lo demuestra el que sólo aparezca en el tercer modo espacial.
- El chorro de Agua Atlántica entrante por Gibraltar forma, en las proximidades de la costa española, una estructura bastante permanente pero que presenta un marcado comportamiento estacional con variaciones de temperatura muy importantes.

5.- REFERENCIAS

- Bormans, M., Garrett, C. and Thompson, K.R. 1986. Seasonal variability of the surface inflow through the strait of Gibraltar. *Oceanologica Acta*.9: 403-414.
- Bormans, M and Garrett, C. 1989. A simple criterion for gyre formation by the surface outflow from a strait with application to the Alboran Sea. *J. Geoph. Res.* **94**: 12637-12644.
- Castagne, N., Le Borgne, J., Le Vourch, J. and Orly, P. 1986. Operational measurement of sea surface temperatures at CMS Lannion from NOAA-7 AVHRR data. *Int. J. Rem. Sensing.* **7**: 953-984.
- Cheney, R.E. and Doblal, R.A. 1982. Structure and variability of the Alboran sea frontal system. *J. Geoph. Res.* **87**: 585-594.
- Heburn, G.W. and La Violette P.E. 1990. Variations in the structure of the anticyclonic gyres found in the Alboran sea. *J. Geoph. Res.* **95**: 1599-1613.
- Hernández-Guerra, A. and Nyjær, L. 1995. Sea surface temperature variability off Northwest Africa: 1981-1989. Remitido.
- Lagerloef, G.S.E. and Berstein, R.L. 1988. Empirical orthogonal function analysis of Advanced Very High Resolution Radiometer surface temperature patterns in Santa Barbara Channel. *J. Geoph. Res.* **93**: 6863-6873.
- La Violette, P.E. 1984. The advent of submesoscale thermal features in the Alboran sea Gyre. *J. Physical Oceanography.* **14**: 550-565.
- La Violette, P.E. 1986. Short-term measurements of surface currents associated with the Alboran sea Gyre during Donde Va?. *J. Physical Oceanography.* **16**: 262-279.
- Manzella, G.M.R. and La Violette, P.E. 1990. The seasonal variation of water mass content in the western Mediterranean and its relationship with the inflows through the straits of Gibraltar and Sicily. *J. Geoph. Res.* **95**: 1623-1626.
- Ovchinnikov, I.M. 1974. On the water balance of the Mediterranean sea. *Oceanology.* **14**: 198-202.
- Paden, C.A., Abbott, M.R. and Winant, C.D. 1991. Tidal and atmospheric forcing of the upper ocean in the gulf of California. 1. Sea surface variability. *J. Geoph. Res.* **96**: 18337-18359.
- Preller, R.H. 1986. A numerical study of the Alboran sea Gyre. *Progress in Oceanography.* **16**: 113-146.