

MARÍA JOSÉ LÓPEZ GARCÍA*

LOS APORTES DEL EBRO A LA
CUENCA MEDITERRÁNEA.
EL EPISODIO DE DICIEMBRE DE 1982
EN IMÁGENES TÉRMICAS

RESUMEN

Los aportes del Ebro, por su volumen, constituyen un elemento importante para compensar el déficit hídrico de la cuenca balear y condicionan la dinámica marina en la zona. En este trabajo se analiza, a partir de una serie de tres imágenes NOAA-AVHRR de diciembre de 1982 y enero de 1983, la magnitud y el desplazamiento de las aguas vertidas en Tortosa durante un episodio de crecida que se generó en la cabecera de la cuenca. La pluma de agua del Ebro adopta la trayectoria de la corriente liguro-provenzal-catalana que circula en dirección SW siguiendo la plataforma continental. Esta tendencia de las aguas continentales parece debida al efecto combinado de la acción de los vientos de componente norte que predominaron durante el período y al patrón general de la circulación superficial.

ABSTRACT

Three NOAA AVHRR images of December '82 and January '83 show the flow of water from the mouth of the Ebro River into the Balearic Basin and the subsequent incorporation of this water body into the Liguro-Provençal current that follows the continental shelf parallel to the coast. The revision of synoptic weather maps and the river flow gauges in the Ebro Basin shows that the water leaving the river mouth corresponds to a rise in the river level in the upper reaches of the Basin between 13 December and 16 January. On the other hand the wind patterns around the river mouth indicates that the diversion of the continental waters to the SW could be due to the combined effect of the wind on the surface and the general circulation in the basin.

INTRODUCCIÓN

El Mediterráneo es una "cuenca de concentración", esto es, un sistema donde las pérdidas por evaporación superan ampliamente las entradas de agua procedentes de la precipitación y los ríos. El déficit en el balance hídrico se compensa por el intercambio de aguas marinas de diferente salinidad del Océano Atlántico y el Mar Negro. Los aportes fluviales a la cuenca mediterránea constituyen -promediando cálculos de diversos auto-

* Departament de Geografia, Facultat de Geografia i Història. Universitat de València.

res- en torno a un 12% de las entradas globales de agua al sistema. Sin embargo, considerando exclusivamente las entradas de agua dulce, la contribución fluvial representa aproximadamente un tercio del total y procede principalmente de los grandes colectores (Ródano, Ebro, Po y Nilo) cuyas cuencas se extienden –al menos en parte- fuera del dominio propiamente mediterráneo.

En la cuenca balear, las descargas fluviales totalizan unos 113 km³/año, de los cuales aproximadamente el 85% corresponde a la escorrentia septentrional de la cuenca. La mayor parte de estos flujos proceden del Ródano con 66 km³/año y del Ebro con 25 km³/año, esto es, el 58 y 22% respectivamente del total de las descargas fluviales (MARGAT, 1982). Las aguas continentales, por su menor densidad, se extienden sobre la capa superficial del mar contribuyendo, con el tiempo, a modificar las características hidrológicas de esta masa de agua.

Los aportes del río Ebro a la cuenca balear constituyen, por tanto, un volumen importante que, por un lado, contribuye a compensar el déficit hídrico de la cuenca y, por otro, se suma a los factores que conforman la dinámica marina de las aguas superficiales. El papel del Ebro en la circulación marina superficial es fundamental en la medida en que sus aportes modifican las características de las masas de agua que se extienden sobre la plataforma continental. En el Mar Catalán es bien conocida la presencia de un frente, el frente catalán, como una estructura permanente localizada sobre el talud continental que se caracteriza por una marcada diferencia de salinidad entre las aguas más densas del centro de la cuenca y las aguas más ligeras alimentadas por aguas continentales (FONT *et al.*, 1988). En esta zona, el rasgo más sobresaliente de la circulación superficial es, sin duda, la corriente catalana, también denominada del norte (MILLOT, 1987), que constituye la prolongación de la liguro-provenzal circulando en sentido NE-SW por la plataforma continental. Esta corriente tiene carácter permanente, al menos durante el invierno en el tramo que va desde el Golfo de Lion hasta el delta del Ebro, pero adquiere patrones más complejos desde el delta hacia el sur probablemente debido a la interacción de la corriente con la topografía (ensanchamiento y cambio en la disposición de la plataforma continental, presencia del lóbulo del delta) y por las descargas procedentes del Ebro (FONT *et al.*, 1990).

En este contexto, se echan en falta estudios sistemáticos que evalúen la influencia de los aportes del Ebro en la variabilidad de la circulación superficial en el Golfo de Valencia. Los satélites artificiales constituyen un instrumento de gran valor para la adquisición sinóptica de datos con cierta regularidad. De todos los sensores operativos en la actualidad, el AVHRR del satélite NOAA proporciona imágenes térmicas con una resolución espacial de 1km x 1km, y una sensibilidad radiométrica de 0,12 K. Su periodicidad (4 imágenes diarias) y la disponibilidad de datos desde los años 70, le convierten en una herramienta de gran potencia para el estudio evolutivo de la pluma de agua en desembocadura.

La diferencia de temperatura entre aguas continentales y aguas marinas genera un frente térmico, en ocasiones, de elevado gradiente que permite identificar claramente la extensión de los aportes fluviales del Ebro en las imágenes térmicas. Este frente se observa prácticamente de forma constante durante el período de octubre a marzo, especialmente en los meses de diciembre, enero y marzo, si bien su presencia disminuye durante la primavera cuando apenas se detecta en ocasiones en el área más próxima al delta (LÓPEZ GARCÍA, 1991). En este trabajo se estudia la extensión y evolución de las aguas del Ebro en desembocadura durante un suceso de crecida que tuvo lugar en diciembre de

1982 a través del análisis de la pluma térmica observada en una serie de tres imágenes NOAA.

LA CRECIDA DE DICIEMBRE DE 1982

Durante el año hidrológico 1982-83 la estación de aforos de Tortosa registró una descarga de 14.091 Hm³. El valor medio de los aportes, calculado para los años 1913-35 y 1951-89, es de 15.781 Hm³, por lo que podemos decir que este año no fue anómalo en cuanto al volumen vertido, con una cifra incluso inferior a la media. Sin embargo, analizando los caudales medios diario del año (Figura 1) se identifican dos picos, el día 9 de noviembre y el 28 de diciembre, de 3.303 y 1.957 m³/s, que pueden considerarse sucesos de crecida al superarse en ambos casos el umbral de tres veces el caudal medio ($Q=545\text{m}^3/\text{s}$) que establece Davy (1978) para los fenómenos extraordinarios en el Ebro.

El suceso de diciembre es un episodio de larga duración especialmente adecuado para ser detectado y analizado mediante imágenes de satélite. El inicio de la curva de ascenso se puede identificar en el hidrograma (Figura 1) el día 12 de diciembre, después se suceden tres picos de crecida los días 17, 23 y 27, y el final de la curva de descenso se sitúa en torno al día 16 de enero. En total, entre los días 12 de diciembre y el 16 de enero se contabilizaron en Tortosa 3.235 Hm³ vertidos al mar. Siendo un suceso extraordinario por su magnitud, no lo es por su frecuencia, ya que la probabilidad de crecidas con caudales superiores a 1.957 m³/s en Tortosa es del 66%, con un periodo de recurrencia inferior a 2 años.

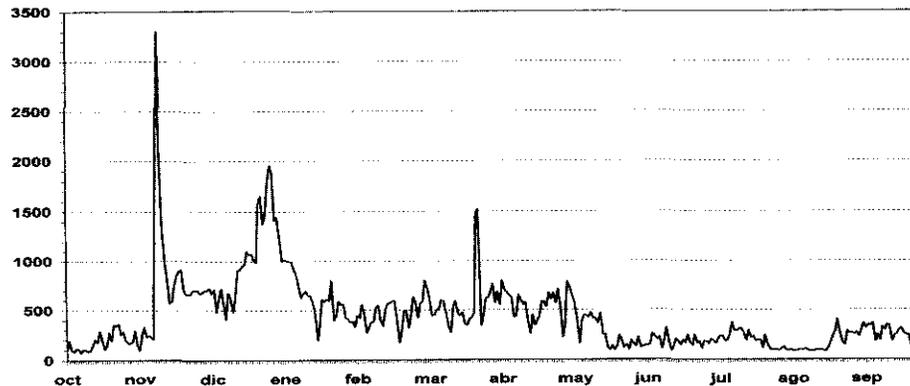


Figura 1. Caudales medios diarios (m³/s) registrados en la estación de aforos de Tortosa durante el año 1982-83.

En cuanto a la localización de la crecida, el análisis de los hidrogramas en las distintas estaciones de aforo a lo largo de la cuenca indica que la avenida estaba ya formada en Castejón donde se inicia la curva de ascenso el día 12 de diciembre, se produce un primer pico el día 15, un segundo el 22 y un tercer pico el día 26 en el que se registró el máximo caudal diario (2.010 m³/s) (Figura 2). El suceso se registra con similares características en Zaragoza, donde se alcanza un caudal máximo diario de 1.850 m³/s el día 28, y en Tortosa donde se registra el primer pico con dos días de retraso respecto a Castejón.

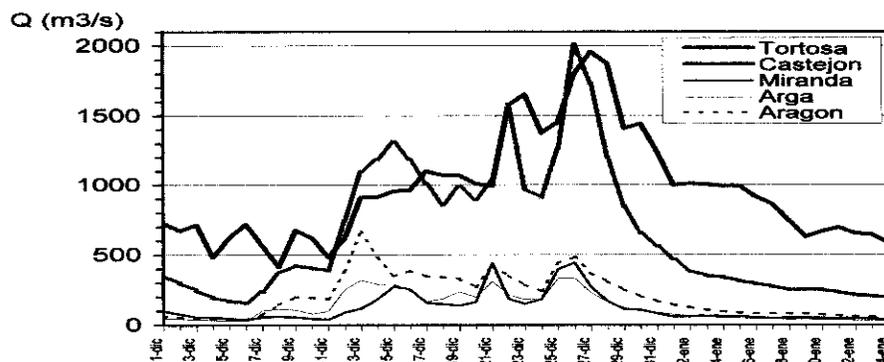


Figura 2. Hidrograma de la crecida en las distintas estaciones de aforo.

Esta avenida se forma por las contribuciones procedentes de la cabecera del Ebro y de los afluentes pirenaicos occidentales de la margen izquierda, especialmente el río Arga y el Aragón (Figura 3). Es, por tanto, una crecida del tipo pirineo-cantábrico (DAVY, 1978), las más frecuentes en el Ebro, que se producen en invierno (de diciembre a febrero) provocadas por la entrada de vientos atlánticos del oeste o noroeste, con el paso de frentes que provocan precipitaciones intensas. Estas crecidas son voluminosas, suelen instalarse durante varios días y su evolución es lenta. En el hidrograma (Figura 2) puede verse el suceso formado en Miranda del Ebro con un primer pico el día 15, un segundo el 21 cuando se alcanzan valores máximos ($443 \text{ m}^3/\text{s}$) y un tercer pico el día 26. En el río Arga y en el Aragón la crecida se formó con anterioridad. En el Arga se registra un primer pico el día 13, un segundo el 21 y el tercer pico y máximo el día 26 ($333 \text{ m}^3/\text{s}$). En el Aragón, el caudal máximo se registra durante el primer pico que tiene lugar también el día 13 ($668 \text{ m}^3/\text{s}$), y se registran otras dos crestas los días 21 y 26.

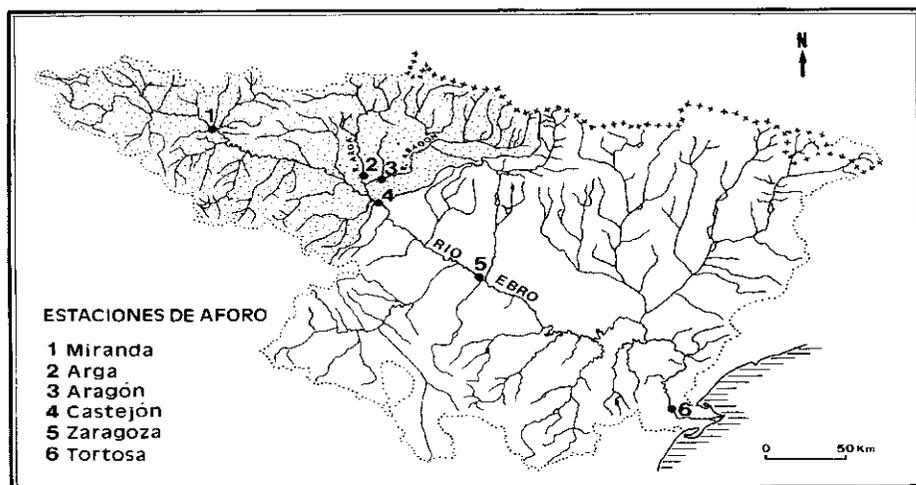


Figura 3. Superficie afectada por la crecida de diciembre de 1982 en la cuenca del Ebro. Se indica la localización de las estaciones de aforo.

Los picos del día 13 en el Aragón y en el Arga y el del día 15 en Miranda del Ebro se registran en Castejón casi inmediatamente, donde se contabilizan $1.312 \text{ m}^3/\text{s}$ el día 15. Sin embargo, este pico llegará a Tortosa con un desfase de dos días y con cierta aminoración del caudal ($1.101 \text{ m}^3/\text{s}$) probablemente por laminación de los embales. Este efecto se deja notar especialmente al observar el tiempo de duración de la crecida. Si bien en Castejón tiene una duración de 20 días, en el caso de Tortosa se prolonga 15 días más, como pone de manifiesto las diferencias en la curva de descenso del hidrograma.

La situación meteorológica responsable de la avenida es una típica situación invernal de flujos del N y NW que se mantiene durante varios días. Entre los días 8 y 23 de diciembre, la mitad norte de la península ibérica se encuentra afectada por el paso continuo de familias de frentes del frente polar, con el anticiclón de las Azores situado en su posición invernal en el Atlántico, al SW de la península, y una serie de bajas presiones circulando a latitudes entre 50° y 60° N sobre las Islas Británicas. Estos frentes dieron lugar a precipitaciones de origen oceánico más o menos continuas durante el mes de diciembre en el norte de la península. El análisis de los mapas sinópticos nos permite identificar tres situaciones como responsables de la crecida, los días 10-13, 16-17 y 20-22, durante los cuales se intensifican los frentes sobre la cabecera del Ebro (Figura 4).

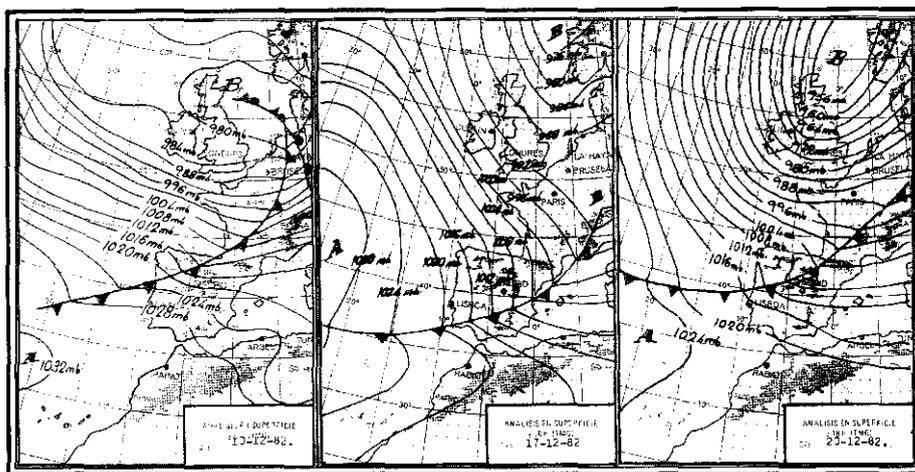


Figura 4. Situación sinóptica en superficie responsable de las precipitaciones de diciembre 1982 en la cabecera del Ebro.

LAS IMÁGENES NOAA

Por su resolución temporal, espacial y radiométrica, las imágenes de la serie NOAA son, en la actualidad, las más adecuadas para la determinación de la temperatura superficial del mar y para el estudio de la circulación superficial y de los frentes térmicos tanto a escala regional como global. El sensor *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) del satélite NOAA proporciona imágenes térmicas en tres canales con una resolución espacial de $1,1 \text{ km}^2$ al nadir y una resolución radiométrica (*Noise Equivalent difference Temperature*) de $0,12 \text{ K}$ a 300 K , con un intervalo de digitalización de la señal de 1024

niveles (FUSCO y MUIRHEAD, 1987). Los satélites NOAA operan con dos satélites en órbita heliosíncrona complementaria, a una altitud de aproximadamente 850 km, uno cruza el ecuador a las 7.30 y 19.30 hora solar local y el otro a las 2.30 y 14.30, de tal forma que, entre los dos, proporcionan cuatro imágenes diarias y permiten el estudio de la evolución de frentes y estructuras térmicas.

En este trabajo se han analizado tres imágenes del satélite NOAA 7, AVHRR, de la banda 4 (10,3-11,3 μm), correspondientes a los días 20 de diciembre de 1982 (3.01h TMG), 4 de enero de 1983 (3.20h TMG) y 17 de enero de 1983 (13.54h TMG), tomando subimágenes de 300 x 300 píxeles, centradas en el Golfo de Valencia. Las imágenes fueron inicialmente procesadas en el Centre d'Océanologie de Marseille, La Seyne (Francia) con el *software* CARTO PC y posteriormente en el Departamento de Geografía de la Universitat de València utilizando el *software* IDRISI para Windows, para producir mapas de temperatura superficial relativa que permiten destacar los frentes y las estructuras térmicas más importantes. Se ha aplicado una corrección geométrica basada en la selección de puntos de control sobre la imagen para generar mapas en proyección Mercator, comparables entre sí. Todas las imágenes han sido realizadas mediante una paleta de colores fríos y cálidos, con intervalos de 0,2^o C, de forma que los tonos fríos corresponden a los valores de temperatura más baja y los tonos cálidos a las más altas. Dado que los objetivos del trabajo no precisan el análisis de los valores absolutos de temperatura, no se ha aplicado ningún método de corrección atmosférica a la imagen.

La afluencia de aguas continentales al mar es fácilmente detectable en las imágenes térmicas debido al fuerte gradiente de temperatura existente entre las aguas continentales y las marinas. En el caso del Ebro, generalmente, las aguas continentales son más frías que las marinas, formándose entre ellas un frente térmico con gradientes superiores a 0,5^o/km. Las aguas de los ríos, por su menor densidad, se extienden sobre las capas marinas y forman una pluma de agua cuya evolución en el tiempo es susceptible de ser analizada en las imágenes de satélite. Debido a la magnitud de las descargas del Ebro, en las imágenes NOAA se suele observar con frecuencia un frente térmico junto al delta. La crecida de diciembre de 1982 supuso el vertido de un volumen de 3.235 Hm³ de agua al mar, el cual pudo ser detectado en las imágenes de satélite. La figura 5 muestra la secuencia de 3 imágenes. En la imagen del día 20, al inicio del suceso, se observa un frente frío rodeando al delta en una situación que podemos considerar típica en invierno. En la imagen del día 4 de enero, prácticamente cuando ha pasado el pico de la crecida y se han vertido 1.797 Hm³ se observa en la imagen una gran masa de agua frente al delta sobre la plataforma continental. El fuerte gradiente térmico entre las aguas continentales y las marinas indica que no se ha producido la mezcla entre ambos tipos de agua. Días después, en la imagen del día 17 de enero, cuando los aportes del Ebro se han incrementado en 813 Hm³, se ha formado una gran pluma de agua que se desplaza hacia el suroeste sobre la plataforma continental y que alcanza hasta el paralelo 40, afectando prácticamente toda la mitad norte del Golfo de Valencia.

En la desembocadura del Ebro, diversos estudios (FONT, 1990; FONT *et al.*, 1990) han demostrado que la circulación reviste un marcado carácter termohalino, esto es, ligado a las diferencias de densidad entre las masas de agua, y no se debe a la variabilidad del viento. La comparación entre los registros de viento y de corrientes tomados simultáneamente en la plataforma continental, 35 km frente al delta (FONT, 1990) indica que el campo de vientos no es responsable de la circulación marina en la zona. La trayectoria SSW del flujo principal es independiente del régimen de vientos, si bien el viento puede

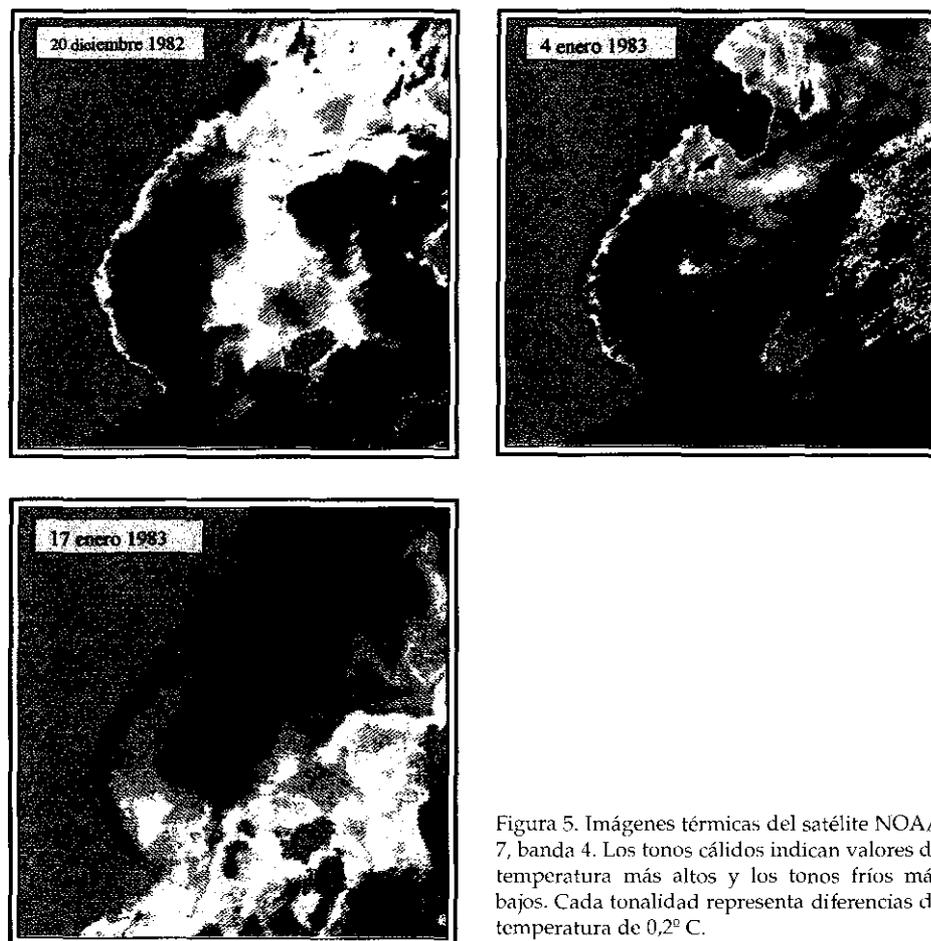


Figura 5. Imágenes térmicas del satélite NOAA 7, banda 4. Los tonos cálidos indican valores de temperatura más altos y los tonos fríos más bajos. Cada tonalidad representa diferencias de temperatura de 0,2° C.

contribuir a intensificar la corriente durante la estación fría, cuando se producen fuertes y persistentes flujos del NW.

En el caso de las aguas continentales, la situación es algo especial, pues se trata de una capa de agua dulce (menos densa) que se extiende sobre las aguas marinas de mayor salinidad y densidad. Existe, por tanto, estratificación de las aguas y la influencia del viento puede afectar a las capas más superficiales. Estudios sobre la dinámica superficial de la pluma de agua del Ródano realizados a partir de imágenes NOAA (DEMARCO y WALD, 1984) encontraron una fuerte dependencia en la evolución de las aguas respecto al viento dominante y también al débito del río. El análisis, que se extiende para el período 1979-81 y utiliza 150 imágenes, demuestra una clara respuesta de la pluma de agua a la acción del viento. Para velocidades de viento superiores a 3 m/s la capa de agua superficial se desvía a la derecha de la dirección del viento con un ángulo aproximado de 50° de acuerdo con la teoría de Eckmann. El tiempo de acoplamiento entre el viento y la corriente

depende poco del viento y sobre todo del débito del río, siendo de 5 horas para un débito medio y superior (más de 24 h) durante las crecidas.

El análisis del campo de vientos durante el suceso del invierno del 82-83, a partir de los datos del observatorio de Tortosa, muestra un predominio claro de los vientos de componente norte. Entre los días 20 de diciembre y 17 de enero, casi el 80% de los registros corresponden a vientos de dirección NNE (38%), NNW (22%) y N (19%), con velocidades medias respectivas de 3,8, 5,3 y 4,2 m/s. En cuanto a las rachas máximas, predominan las direcciones NNE (46%) NNW (21%) y NW (17%). La gran masa de agua del Ebro que se forma en desembocadura observada en la imagen del día 4 de enero se convierte en la imagen del día 17 en una extensa pluma que se localiza sobre toda la plataforma y se desplaza en dirección SW. Carecemos de imágenes entre los días 4 y 17 de enero para conocer exactamente en que momento se produce la desviación del flujo. Durante los días precedentes a la imagen del 17 los vientos máximos son de dirección NW y NNW, lo que concuerda con el desvío de la trayectoria de la pluma de agua a la derecha del viento según la ley de Eckmann. Al parecer, las aguas del Ebro se desvían hacia el SW por la acción del viento y adoptan la trayectoria SW de la corriente principal en la zona.

CONCLUSIONES

Las imágenes térmicas, especialmente de invierno, permiten estudiar la extensión y evolución de los aportes del Ebro a la cuenca balear debido al fuerte gradiente térmico entre las aguas continentales frías y las aguas marinas más cálidas. Las imágenes analizadas ponen de manifiesto la importancia que las aguas continentales pueden alcanzar durante momentos de fuerte débito, los cuales, en el Ebro, se producen con cierta frecuencia durante los meses de invierno. Las aguas continentales contribuyen a incrementar las diferencias de salinidad existentes entre las aguas costeras y las del centro de la cuenca, y refuerzan el frente catalán, de carácter halino.

El análisis de la evolución de la pluma térmica durante el suceso de invierno 82-83 muestra el acoplamiento de las aguas continentales a la acción del viento y a la corriente principal. La pluma de agua adquiere dirección SW desviada por los fuertes vientos del N y se incorpora a la corriente liguro-provenzal-catalana que circula por la plataforma continental.

Si bien este trabajo ilustra el comportamiento del Ebro durante un momento singular de crecida, el estudio sistemático por teledetección de diferentes sucesos contribuiría a incrementar nuestros conocimientos acerca del papel del Ebro en la dinámica litoral del Golfo de Valencia.

Agradecimientos

Agradezco al Centre d'Océanologie de Marseille, La Seyne (Francia) la amable cesión de las imágenes NOAA utilizadas en este trabajo y al Dr. C. Millot su colaboración y las facilidades prestadas durante mi estancia en dicho centro. Este trabajo se ha realizado en el marco del proyecto de CICYT, AMB95-0817.

BIBLIOGRAFÍA

- DAVY, L. (1978): *L'Ebre, étude hydrologique*, Université de Lille III, Lille, 2 tomos y mapas.
 DEMARCO, H. et L. WALD (1984): *La dynamique superficielle du panache du Rhône*

- d'après l'imagerie infrarouge satellitaire, *Oceanologica Acta* 7 (2), 159-162.
- FONT, J., J. SALAT y J. TINTORÉ (1988): Permanent features of the circulation in the Catalan Sea, *Oceanologica Acta* S-9, 51-57.
- FONT, J., J. SALAT y A. JULIÀ (1990) Marine circulation along the Ebro continental margin, *Marine Geology* 95, 165-177.
- FONT, J. (1990): A comparison of Seasonal Winds With Currents on the Continental Slope of the Catalan Sea (Northwestern Mediterranean), *Journal of Geophysical Research* 95, C2, 1537-1545.
- FUSCO, L. Y K. MUIRHEAD (1987): AVHRR Data Services in Europe-The Earthnet approach, *ESA Bulletin* 49, 9-19.
- LÓPEZ GARCÍA, M.J. (1991) *La temperatura del Mar Balear a partir de imágenes de satélite*, Departamento de Geografía, Universidad de Valencia, 158 p.
- MARGAT, J. (1982): Les ressources en eau du bassin méditerranéen, *Méditerranée* 2, 15-29.
- MILLOT, C. (1987): Circulation in the Western Mediterranean Sea, *Oceanologica Acta* 10 (2), 143-149.

