

Eventos de resuspensión de sedimento en el ascenso continental del margen Mediterráneo noroccidental

Sediment resuspension events in the northwestern Mediterranean continental rise

P. Puig, A. Palanques, J. Martín, M. Ribó y J. Font

Institut de Ciències del Mar, CSIC, Passeig Marítim de la Barceloneta, 37-49, E-08003 Barcelona, Spain. ppuig@icm.csic.es, albertp@icm.csic.es, jmartin@icm.csic.es, mribo@icm.csic.es, jfont@icm.csic.es

Resumen: El Mediterráneo noroccidental es un área de formación de aguas densas en mar abierto, provocada por vientos fríos y secos en invierno. Estudios recientes han evidenciado que las altas velocidades de la corriente asociadas a este proceso oceanográfico tienen la capacidad de resuspender sedimentos a lo largo de la cuenca. Para analizar en detalle las condiciones en las que se produce esta resuspensión y como se redistribuyen los sedimentos a lo largo del ascenso continental del margen Mediterráneo noroccidental, se analizaron las series temporales de instrumentos fondeados en esta región en invierno de 2006 y 2009. Varios incrementos de la concentración de sedimento en suspensión entre 1 y 2 mg/l fueron observados coincidiendo con aumentos de la velocidad de la corriente cerca del fondo superiores a 20 cm/s. Las concentraciones máximas llegaron a ser ~5 mg/l, mientras las velocidades asociadas alcanzaron 44 cm/s. Las direcciones de la corriente durante estos periodos fueron hacia el SSO y a lo largo del margen, sugiriendo la presencia de una corriente geostrofica (o contornítica) profunda. Esta fuerte corriente podría contribuir a la formación de un campo de formas de fondo (ondas de sedimento) que se desarrolla en el ascenso continental del margen norte Catalán.

Palabras clave: Resuspensión, convección profunda, *benthic storms*, corriente de contorno, *sediment waves*.

Abstract: The northwestern Mediterranean Sea is a region where open sea convection and deep-water formation occurs on a yearly basis due to winter heat losses and evaporation caused by cold and dry northerly winds. Recent studies have evidenced that this oceanographic phenomenon can increase deep currents and induce active sediment resuspension on the basin. To investigate the conditions when sediment resuspension occurs and how the suspended sediments are redistributed along the northwestern Mediterranean continental rise, an analysis of time series observations in this region during winter 2006 and 2009, when intense dense water formation took place, was conducted. Several peaks of suspended sediment concentration coincident with enhanced current speeds were observed during the sinking and spreading phase of newly formed dense water. Maximum concentrations reached ~5 mg/l while associated current increases ranged between 20 to 40 cm/s. Current directions during such resuspension events were preferentially towards SSW and along-margin suggesting the presence of an enhanced bottom geostrophic (or contour) current linked to dense water formation processes. Such sediment resuspension events could contribute to the development of a large field of muddy sediment waves found at the northern Catalan continental rise.

Key words: Resuspension, deep convection, *benthic storms*, contour current, *sediment waves*.

INTRODUCCIÓN

El Mediterráneo noroccidental se caracteriza por ser un área de formación y hundimiento de aguas densas en mar abierto por convección, generada por la pérdida de calor latente y la evaporación de las aguas superficiales a causa de los vientos fríos y secos que afectan esta región en invierno (MEDOC, 1970). Estas aguas densas contribuyen a la formación de la “Western Mediterranean Deep Water” (WMDW) y pueden llegar a hundirse hasta el fondo de la cuenca y esparcirse a lo largo de ella. Este fenómeno oceanográfico coexiste con el hundimiento invernal de

aguas densas de plataforma en forma de catarata submarina (i.e. *cascading*), que ocasionalmente pueden llegar también hasta la cuenca, arrastrando consigo grandes cantidades de sedimento en suspensión (Canals et al., 2006).

Estudios recientes han mostrado que, independientemente de los aportes de sedimento por *cascading* hacia grandes profundidades, las altas velocidades de la corriente asociadas a la convección de aguas densas en mar abierto, también tienen la capacidad de resuspender sedimentos a lo largo de la cuenca (Martín et al., 2010). Estas corrientes pueden

llegar a mantener velocidades cercanas al fondo superiores a 35 cm/s y provocar la removilización del sedimento superficial. Este tipo de eventos altamente energéticos se han observado con anterioridad en otros ambientes profundos, y siguiendo la definición de Hollister y McCave (1984), podrían considerarse *benthic storms*.

El objetivo principal de este artículo es analizar las condiciones en las que se producen eventos de resuspensión durante las *benthic storms* en el Mediterráneo noroccidental, y determinar cómo se redistribuyen los sedimentos a lo largo del ascenso continental. Para tal fin, se analizan las series temporales de instrumentos fondeados en esta región durante los meses de invierno de 2006 y 2009, cuando la formación de aguas densas en mar abierto fue elevada y la convección llegó al fondo de la cuenca.

MÉTODOS

La Figura 1 ilustra la batimetría del margen continental del Mediterráneo noroccidental con la situación de los fondeos que registraron las series temporales analizadas en este artículo.

Durante el proyecto HERMES, se mantuvieron nueve anclajes oceanográficos a lo largo de los ejes de los cañones submarinos de Lacaze-Duthiers y de Cap de Creus y en el talud al sud de ellos, a 300, 1000, 1500 y 1900 m de profundidad (ver Palanques et al., este volumen). Cada uno de estos anclajes estaba equipado con un correntímetro Aandera RCM9 con sensores de temperatura, conductividad, presión y turbidez, situado a 5 m sobre el fondo marino. En este artículo solo se discuten los datos de los correntímetros fondeados en el ascenso continental a 1900 m de profundidad, uno situado en el eje del cañón de Cap de Creus próximo a la confluencia con el cañón de Lacaze-Duthiers y otro situado más hacia el sur, en el talud adyacente (Fig. 1). Los anclajes se mantuvieron desde octubre de 2005 a noviembre de 2006, en dos fondeos sucesivos, y el intervalo de muestreo de los correntímetros fue de 30 minutos. El correntímetro del anclaje situado en el talud se inundó en el segundo fondeo y no registró datos a partir de finales de abril de 2006.

Más hacia el sur, en el talud adyacente al cañón submarino de La Fonera, y en el marco del programa de registro de series de la CIESM Hydrochanges (www.ciesm.org/marine/programs/hydrochanges.htm), el Instituto de Ciencias del Mar de Barcelona mantiene un anclaje a 1890 m de profundidad (Fig. 1). Esta posición se escogió porque fue ocupada con anterioridad en 1993-94 durante un estudio para registrar la dispersión del agua profunda generada por convección (Send et al., 1996), y de donde existían registros previos. El anclaje está equipado con un correntímetro Aanderaa RCM11 con sensores de

temperatura, conductividad, presión y turbidez, y un registrador de temperatura, presión y salinidad de alta precisión SeaBird (SBE37), situados a 11 y 15 m sobre el fondo marino, respectivamente. El periodo de registro que se muestra en este artículo abarca desde junio de 2008 a septiembre de 2009 y el intervalo de muestreo del correntímetro fue de 120 minutos.

Las medidas de turbidez obtenidas por sensores instalados en los correntímetros Aanderaa, registradas en FTU (*formazine turbidity units*), fueron convertidas a concentración de sedimento en suspensión (mg/l) siguiendo la calibración general de Guillén et al (2001).

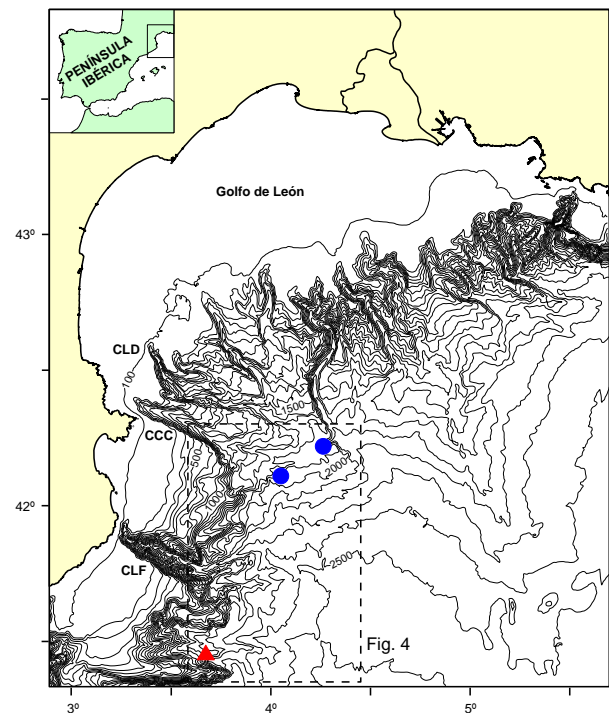


FIGURA 1. Mapa batimétrico del Mediterráneo noroccidental con la situación de los fondeos de 2005-2006 (círculos azules) al sur del cañón de Lacaze-Duthiers y del cañón de Cap de Creus (CLD y CCC) y del fondeo de 2008-2009 (triángulo rojo) al sur del cañón de La Fonera (CLF). La caja delimitada con una línea discontinua corresponde a la imagen de batimetría multihaz de la Figura 4.

RESULTADOS

Las series temporales de velocidad de la corriente y de la concentración de sedimento en suspensión obtenidas por los dos correntímetros fondeados durante el proyecto HERMES se muestran en la Figura 2.

Durante los dos primeros meses de registro, ambos instrumentos registraron velocidades inferiores a los 10 cm/s y concentraciones ~0.2 mg/l. A mediados de diciembre de 2005, las velocidades aumentaron a valores cercanos a los 20 cm/s y se empezaron a registrar pequeños aumentos de la concentración de sedimento en suspensión, aunque inferiores a 1 mg/l. A partir de enero de 2006 las corrientes cercanas al fondo en ambos puntos de muestreo superaron repetidamente los 30 cm/s, a la vez que se producían incrementos de

la concentración de sedimento en suspensión entre 1 y 2 mg/l. Puntualmente, en el correntímetro fondeado en el eje del cañón de Cap de Creus se registraron concentraciones de ~5 mg/l, aunque fue en el talud adyacente donde las concentraciones fueron por lo general más elevadas. En la serie del correntímetro del eje del cañón se pudo observar que estos aumentos de turbidez cerca del fondo perduraron hasta principios de junio de 2006, mientras que las velocidades no disminuyeron por debajo de 10 cm/s hasta finales de julio. En total, este periodo caracterizado por altas velocidades y aumentos de la concentración duró 7 meses.

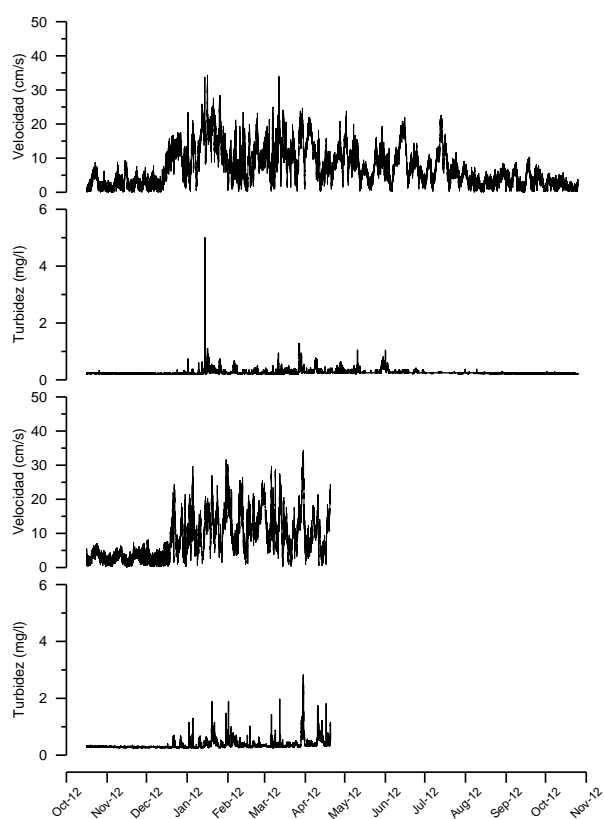


FIGURA 2. Registros de velocidad de la corriente y concentración de sedimento en suspensión medidas por los dos correntímetros fondeados durante el proyecto HERMES en el ascenso continental al sur del cañón de Lacaze-Duthiers y del cañón de Cap de Creus (ver posición en Fig. 1). Ambos instrumentos estuvieron fondeados a 1900 m de profundidad, 5 m sobre el fondo.

Las series temporales registradas por el anclaje Hydrochanges desde junio de 2008 hasta setiembre de 2009 se muestran en la Figura 3.

En esta posición, las velocidades de la corriente durante los primeros cinco meses de registro fueron por lo general inferiores a 5 cm/s, y desde finales de noviembre de 2008 a finales de enero de 2009, inferiores a 10 cm/s. Durante este periodo la concentración de sedimento en suspensión registró valores de base ~0.2 mg/l. A partir de febrero de 2009, las velocidades empezaron a incrementarse de forma progresiva, hasta alcanzar un pico de 44 cm/s. En los

momentos en que las velocidades fueron superiores a los 20 cm/s, se observaron aumentos de concentración de sedimento en suspensión ~1 mg/l, llegando a ~5mg/l en el pico de la velocidad de la corriente. Las velocidades elevadas por encima de 20 cm/s se mantuvieron hasta finales de mayo de 2009, mostrando una clara oscilación en la intensidad y dirección (no graficada) de la corriente de varios días. Durante ese periodo, la concentración de sedimento en suspensión sólo aumentó de forma aislada a mediados de abril de 2009. En total, este periodo caracterizado por altas velocidades y aumentos de la concentración en invierno de 2009 duró 4 meses.

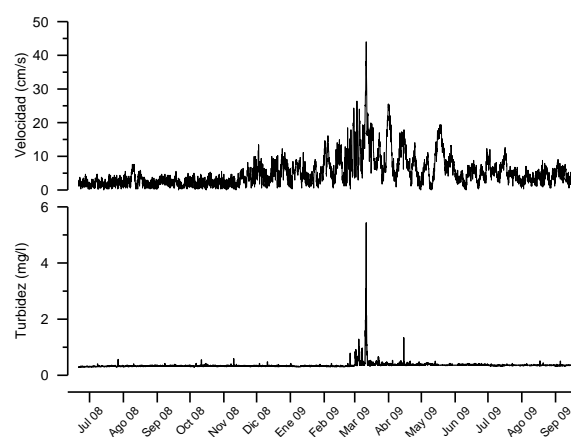


FIGURA 3. Registros de velocidad de la corriente y concentración de sedimento en suspensión medidas por el correntímetros fondeados en el ascenso continental al sur del cañón de La Fonera (ver posición en Fig. 1). Este instrumento estuvo fondeado a 1890 m de profundidad, 11 m sobre el fondo.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El análisis de las series temporales de los correntímetros fondeados en el ascenso continental del margen ha evidenciado la presencia de periodos de varios meses de duración con velocidades cercanas al fondo superiores a los 20 cm/s y con capacidad para resuspender sedimentos. Estos tipo de episodios altamente energéticos fueron observados por primera vez por Hammond (1974) y se estudiaron en detalle en el ascenso continental de Nueva Escocia (Canadá) durante el proyecto HEBBLE, donde se les atribuyó el termino *benthic storms* para denominarlos (Hollister y McCave, 1984). Aunque el origen de estos episodios no fue dilucidado del todo, la hipótesis más aceptada implicaba la intensificación de una onda topográfica excitada por oscilaciones de la Corriente del Golfo (Hollister y Nowell, 1991).

Los periodos en que se observaron *benthic storms* en el Mediterráneo noroccidental coincidieron con los inviernos de 2006 y 2009 en los que la producción de aguas densas fue elevada y la convección llegó al fondo de la cuenca (CIESM, 2009). Cabe destacar que durante el invierno de 2006, la formación de aguas densas en la plataforma del Golfo de León fue elevada

y el consiguiente *cascading* alcanzó grandes profundidades. Sin embargo, la señal de la llegada de las aguas de *cascading* al ascenso continental fue con posterioridad al inicio de la *benthic storm*, por lo que los primeros picos de resuspensión observados en el registro son debidos exclusivamente a los aumentos de la velocidad provocados por la convección profunda (Palanques et al., este volumen). Sin embargo, en invierno de 2009 el *cascading* de aguas densas de plataforma fue poco intenso y el aumento de la velocidad de la corriente y los picos de resuspensión se debieron exclusivamente a la convección de aguas densas en mar abierto. En el Mar Liger, donde no llega la influencia directa del *cascading* de la plataforma del Golfo de León, los efectos de la resuspensión por la convección profunda del invierno de 2006 provocaron un aumento cerca del fondo de dos órdenes de magnitud en los flujos de partículas registrados con trampas de sedimento (Martín et al., 2010).

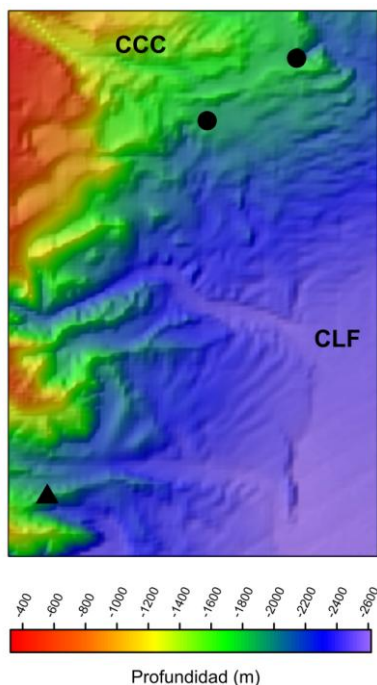


FIGURA 4. Relieve sombreado y batimetría detallada de los campos de "sediment waves" que se desarrollan en el ascenso continental del Mediterráneo noroccidental, al sur del cañón de Cap de Creus (CCC) y cañón de La Fonera (CLF), con la localización de los fondeos descritos en este artículo (ver posición en Fig. 1). Los datos batimétricos proceden de la compilación realizada por el Departamento de Geología Marina del Instituto de Ciencias del Mar del CSIC (<http://www.icm.csic.es/geo/gma/MCB/index.htm>) con datos facilitados por IFREMER y la Universidad de Barcelona.

Las *benthic storms* además de provocar resuspensión, contribuyen en gran medida a la redistribución de sedimentos a lo largo del ascenso continental (Hollister y Nowell, 1991). Además, las corrientes de fondo intensas y persistentes pueden, a la vez, llegar a desarrollar formas de fondo (*sediment waves*) a lo largo del margen continental (Wynn y Stow, 2002). En la zona de estudio, el ascenso

continental del Mediterráneo noroccidental se caracteriza por la presencia de unos amplios campos de *sediment waves* (Fig. 4). El origen del campo situado al sur del cañón de Cap de Creus fue interpretado por Jallet y Giresse (2005) como exclusivamente ligado a los procesos de *cascading*. Sin embargo, el análisis de los eventos de resuspensión actuales registrados en las inmediaciones de estos campos de *sediment waves*, indica un mayor control de la circulación inducida por la formación de aguas densas por convección profunda. Las direcciones de la corriente durante los periodos de resuspensión de sedimento fueron hacia el SSO (no representado), sugiriendo la presencia de una corriente geostrofica (o contornítica) profunda a lo largo del ascenso continental que se intensifica periódicamente con la formación de aguas densas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado en parte por los proyectos Europeos HERMES (GOCE-CT-2005-511234-1) y HERMIONE (contrato: 226354).

REFERENCIAS

- Canals, M., Puig, P., Durrieu de Madron, X., Heussner, S., Palanques, A. y Fabres, J. (2006): Flushing submarine canyons. *Nature*, 444: 354-357.
- CIESM (2009): Dynamics of Mediterranean Deep Waters. *CIESM Workshop Monographs*, 38, 132 p.
- Hammond, A.L. (1974): Undersea storms: Experiment in the Atlantic. *Science*, 185: 244-247.
- Hollister, C.G. y McCave, I.N. (1984): Sedimentation under deep-sea storms. *Nature*, 309: 220-225.
- Hollister, C.G. y Nowell, A.R.M. (1991): HEBBLE epilogue. *Marine Geology*, 99: 445-460.
- Jallet, L. y Giresse, P. (2005): Construction of the Pyreneo-Languedocian Sedimentary Ridge and associated sediment waves in the deep western Gulf of Lions (Western Mediterranean). *Marine and Petroleum Geology*, 22: 865-888.
- Martín, J., Miquel, J.C. y Khripounoff, A. (2010): Impact of open sea deep convection on sediment remobilization in the western Mediterranean. *Geophysical Research Letters*, 37: L13604.
- MEDOC Group (1970). Observation of formation of deep water in the Mediterranean Sea, 1969. *Nature*, 227: 1037-1040.
- Palanques, A., Puig, P., Durrieu de Madron, X., Sanchez-Vidal, A., Pasqual, C., Martín, J., Calafat, A., Heussner, S. y Canals, M. (2012): Multi-step sediment transport in the Cap de Creus submarine canyon and adjacent continental slope (northwestern Mediterranean). *Geo-Temas*.
- Wynn, R.B. y Stow, D.A.V. (2002): Classification and characterisation of deep-water sediment waves. *Marine Geology*, 192: 7-22.