

Proceso extraordinario de formación de agua profunda en el Mediterráneo Occidental durante el invierno de 2005

Unusual extension of Western Mediterranean deep water formation during winter 2005

Jordi Salat⁽¹⁾, Mikhail Emelianov⁽¹⁾ y José Luís López-Jurado⁽²⁾

⁽¹⁾Institut de Ciències del Mar (CSIC), P. Marítim, 37-49, 08003, Barcelona, salat@icm.csic.es, mikhail@icm.csic.es

⁽²⁾Centre Oceanogràfic de les Balears (IEO), P.O. Box 291, 07080, Palma de Mallorca, lopez.jurado@ba.ieo.es

SUMMARY

The meteorological conditions in winter 2005, with anomalously low precipitation and unusual persistency of northerlies over the NW Mediterranean, caused an unusual surface temperature and salinity distribution over the region. This situation particularly affected the convection process that produces the Deep Water of the Western Mediterranean (WMDW), which covered a region larger than usual. The information from satellite images and data obtained during EFLUBIO Cruise (March 2005) showed the presence of deep convection cells from the traditional "MEDOC" area near the Gulf of Lions extending up to the east of Menorca. Thus it is expected that a much higher volume of new WMDW than usual should be produced during that winter.

A new WMDW, slightly denser ($+0.01 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), warmer ($+0.05^\circ\text{C}$) and saltier ($+0.03$) than usual has also been observed. It should be originated by the same convection process that typically produces the Western Intermediate Water (WIW), but due to the higher surface salinity and persistent winds, the resulting water became denser. The higher surface salinity may be related to both the low precipitation and the increase of deep convection in open sea that forced a higher extension of the Levantine Intermediate Water (LIW) compensatory upwelling. Moreover, at stations near the continental slope, a colder and even denser water was found (-0.1°C and $+0.025 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$). This water should penetrate deeper than the deep waters formed in open sea and should be originated by cascading.

1. INTRODUCCIÓN

La estructura típica de masas de agua del Mediterráneo Occidental (Fig. 1) se caracteriza por una capa de agua superficial de origen atlántico (AW). Por debajo de ésta se encuentran sucesivamente unas capas de aguas intermedias: de origen local (WIW) y originada en la cuenca oriental (LIW). Finalmente, por debajo de ésta última se halla el agua profunda del Mediterráneo Occidental (WMDW). La capa superficial se caracteriza por un mínimo de salinidad, al agua WIW le corresponde un mínimo de temperatura potencial, a la LIW un máximo de salinidad y uno relativo de temperatura, y, finalmente, en el agua profunda, temperatura y salinidad son ligeramente menores que en la LIW (Tabla 1).

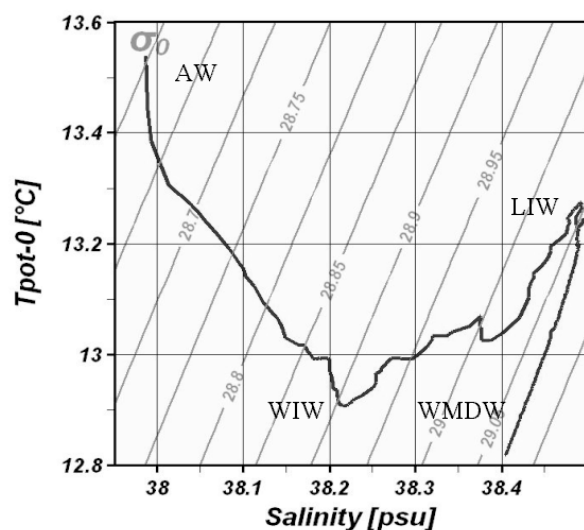


Figura 1.- Diagrama θS clásico en el Mediterráneo Occidental en invierno. (Typical winter θS diagram in the W. Mediterranean)

La circulación en la mitad norte de la cuenca occidental es de tipo ciclónico. Agua de origen atlántico reciente circula hacia el este, desde el canal de Ibiza en dirección al Mar Ligur. Desde allí, y siguiendo el talud continental, la corriente vuelve al oeste hacia el canal de Ibiza nuevamente. A lo largo de este circuito, el agua gana

densidad por enfriamiento y evaporación, por lo que al llegar al canal de Ibiza, se sitúa por debajo de la que entra (Salat, 1995). A lo largo del circuito, parte del agua se desvía hacia la zona interior de la cuenca. Así, la parte central de la cuenca norte registra los valores más elevados de salinidad superficial ya que se trata de agua atlántica "envejecida", que citaremos como agua "residente" para diferenciarla de la que ha entrado recientemente en el Mediterráneo (López-Jurado *et al.*, 1995). La diferencia de salinidades entre ambas masas de agua superficiales puede ser superior a 1 (véase Tabla 1), por lo que se forma un frente oceánico superficial, el frente Norbaleár (Pinot *et al.*, 1994). Por otra parte, los principales ríos de la cuenca occidental desembocan en la costa norte (~70% de los aportes continentales de la cuenca), por lo que el aumento de salinidad a lo largo del circuito se halla parcialmente compensado por estos aportes en su parte costera (Salat, 1996).

Tabla 1.- Propiedades de las masas de agua del Mediterráneo Noroccidental en invierno incluyendo las nuevas masas de agua profunda (N y C) encontradas en 2005. (NW Mediterranean water mass properties in winter, including the new deep water masses found (N and C) in 2005)

Acronimo	θ ($^\circ\text{C}$)	S	σ_θ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
AW: reciente	>13	<37.2	<28.1
AW: envejecida	>13	38.0-38.2	<28.9
WIW	12.6-13.0	38.1-38.3	28.9-29.0
LIW	13.0-13.4	38.48-38.55	29.075
WMDW: O	12.75-12.82	38.43-38.47	29.115-29.120
WMDW: N	12.87-12.90	38.49-38.50	29.130
WMDW: C	12.72-12.78	38.47-38.48	29.145

En estas condiciones nos encontramos con unas estructuras frontales muy bien marcadas (Font *et al.*, 1988). Un frente plataforma-talud, el frente Norte, pegado al talud continental de la costa norte, reforzado por los aportes continentales, y cuya base se halla a unos 400 m, y el ya citado frente Norbaleár, no ligado a la batimetría, que separa las AW "más recientes" de las "residentes", y cuya profundidad no suele ser superior a 200 m. La circulación, pues, está en equilibrio geostrofico con estos frentes de densidad.

Durante la época invernal se producen diversos tipos de mezcla vertical y convección. Normalmente, la zona situada alrededor de 42°N 5°E , llamada comúnmente zona "MEDOC", que está muy ex-

puesta a vientos fuertes de componente norte, y es donde la convección alcanza el fondo y se produce la **WMDW** (MEDOC group, 1970). El mecanismo de formación involucra una fase previa de "precondicionado", en la que toda la capa por encima de la **LIW** se queda prácticamente homogénea. Le siguen fases de hundimiento y mezcla violenta, con movimientos verticales descendentes (de 5 a 10 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$) durante episodios de vientos fuertes, y en zonas de superficie relativamente pequeña (50-100 km^2), que se denominan "chimeneas" (Killworth, 1979). Este hundimiento se compensa con una subida, más o menos continuada a lo largo del invierno, de aguas intermedias cuya velocidad es de 20 a 50 veces más lenta (del orden de 1 a 2 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$), aunque de forma puntual se han registrado valores superiores en zonas pequeñas (Schott and Leaman, 1991). Así pues la superficie total afectada por el movimiento ascendente compensatorio puede ser del orden de unos pocos miles de km^2 . De esta forma, en los alrededores de las "chimeneas" encontramos la **LIW** en superficie o muy cerca de ella. Ello significa que en los sucesivos episodios de hundimiento, el agua superficial tendrá mayor densidad, por lo que a la larga conseguirá romper la estratificación de las aguas intermedias y alcanzar el fondo.

Los procesos de convección en la zona del frente Norte, a pesar de estar forzados por el mismo viento no llegan a alcanzar el fondo puesto que parten de aguas superficiales menos saladas (**AW** más "reciente" junto con los aportes continentales). Este tipo de convección es la que forma el **WIW** (Salat and Font, 1987) y es muy parecido al proceso de formación de la **LIW** cerca de Rodas en el Mediterráneo Oriental.

Finalmente, en las plataformas del golfo de León y norte de Cataluña, sometidas igualmente a episodios fuertes de viento del norte, puede producirse un hundimiento costero, y esas aguas, más frías, se deslizan por el fondo de la plataforma hasta alcanzar el talud, por donde caen hasta alcanzar una capa de igual densidad (Fieux, 1971). Este proceso, comúnmente denominado "cascading" no se registra cada año y normalmente, cuando se produce, esas aguas no consiguen romper la barrera de la **LIW** por lo que engrosan las **WIW**. Ello se debe a que, por lo general, la salinidad de esas aguas es relativamente baja debido a la contribución de aguas procedentes de los ríos. No obstante, en inviernos severos y con poca precipitación, se ha reportado la presencia de aguas procedentes de "cascading" en niveles más profundos (Durrieu de Madron *et al.*, 2005).

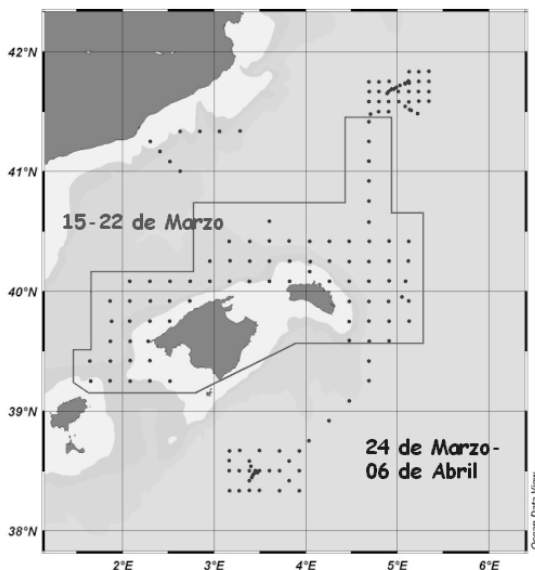


Figura 2.- Mapa de estaciones. (Map of stations)

2. DATOS

En marzo de 2005 se realizó la campaña oceanográfica EFLUBIO, en la zona norte y centro del Mediterráneo occidental, cuyos objetivos eran esencialmente biológicos y estaban relacionados con la es-

tructura del frente Norbalear y las condiciones post-convección profunda. La campaña tuvo dos partes: En la primera se realizó un recorrido que pretendía localizar y caracterizar el frente Norbalear, así como la situación en qué se encontraba la zona "MEDOC" (Fig. 2). Debido a que el interés estaba centrado en la capa más superficial, los perfiles de CTD, en general, se limitaron a un máximo de 600 m. Sólo algunos se hicieron hasta los 1000 m y muy pocos alcanzaron los 2000 m. Lamentablemente no se pudo alcanzar mayor profundidad en ningún punto por limitaciones en la carcasa del fluorómetro que llevaba asociada la batisonda. El modelo de CTD utilizado fue un Sbe-911 recientemente calibrado. Para visualizar los datos de los CTDs se ha empleado el software "Ocean Data View" (Schlitzer, 2004).

La segunda parte consistió en una serie de estaciones consecutivas en dos zonas claramente diferenciadas, una en "MEDOC" y la otra al sur de Baleares, en una zona donde era seguro que no había habido convección profunda y con aguas **AW** recientes en la capa superficial.

Además de los perfiles verticales de T, S, oxígeno disuelto, fluorescencia y transparencia del agua, realizados con el CTD, se analizaron T, S y fluorescencia superficiales a lo largo de todo el recorrido mediante un termosalinógrafo Sbe-21.

3. RESULTADOS

Dado que la campaña se realizó muy a finales de invierno, y que durante el muestreo el viento fue muy flojo, la capa superficial estaba empezándose a estratificar y, por consiguiente, no se pudieron observar episodios activos de formación de agua profunda. No obstante sí que se encontraron restos de varias "chimeneas" relativamente recientes, apenas cubiertas por una ligera capa más cálida, no sólo en la zona "MEDOC", sino que sorprendentemente también se localizaron en puntos al norte de Mallorca y al este de Menorca (Fig. 2), en zonas donde no es nada habitual. Asimismo se registraron valores de salinidad y densidad superficiales muy altos (> 38.45) en todo el recorrido entre "MEDOC" y Barcelona, hasta muy cerca de la costa.

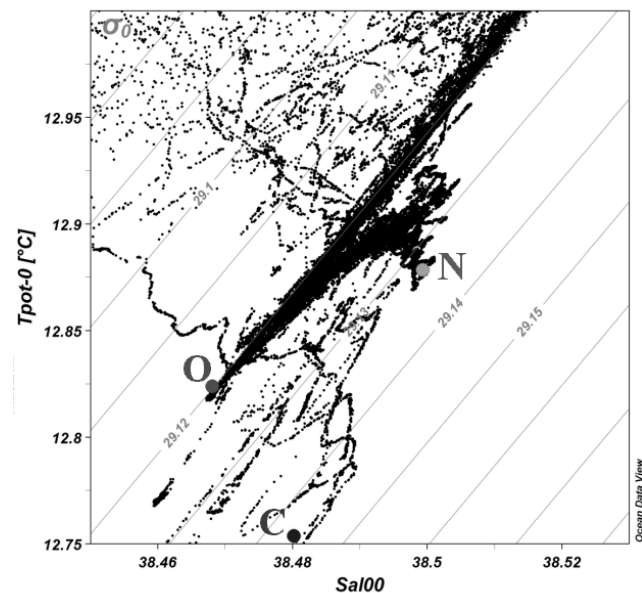


Figura 3.-Detalle del diagrama 0S general correspondiente a las aguas profundas. Los puntos O, N y C se refieren a las aguas profundas: las típicas, las nuevas y las que proceden de "cascading", respectivamente. (Detailed 0S diagram corresponding to the deep waters. The points marked with O, N and C are referring to: the typical (Old) deep water, the New deep water and the water formed by Cascading respectively.)

La estructura vertical también resultó ser bastante diferente de lo habitual. Aparte de la presencia de **LIW** cerca de superficie en el norte, se registraron valores de salinidad extraordinariamente altos (>38.6) en la **LIW** en puntos situados al este de Menorca. En lo referente a las aguas profundas en numerosas estaciones se observó

una agua más densa, más salada y ligeramente más cálida (Tabla 1), que la típica **WMDW**, por debajo de la línea de ésta en el diagrama θS (Fig. 3). Esta agua se encontraba por debajo de unos 1000 m en las estaciones situadas al norte de Baleares en que se muestreó a esa profundidad. En algunas, incluso, aparecía más arriba, a menos de 600 m. Por último, cabe destacar que en la sección vertical que se realizó frente a Barcelona (Fig. 4), justo al principio de la segunda parte, encontramos una situación de mezcla intensa de plataforma (por debajo de los 25 m) que daba lugar a una agua mucho más densa, esencialmente más fría (Tabla 1), que se situaría en los niveles más profundos en las estaciones del talud de esta misma sección.

4. DISCUSIÓN

Las precipitaciones durante el año hidrológico 2004-2005 fueron muy escasas en la cuenca mediterránea. En muchos puntos se registraron los mínimos absolutos de las series históricas. Desde el 25 de enero al 10 de marzo de 2005, las temperaturas fueron más bajas que la media, especialmente las máximas diarias, y los vientos de componente Norte intensos y persistentes. En la costa del Rosellón, por ejemplo, según MétéoFrance durante este periodo, se registraron un total de 34 días de vientos de componente norte durante los cuales el viento superó los $100 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ($\sim 30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Asimismo, el 28 de febrero se registró la temperatura máxima más baja en Perpiñán, en una serie de más de 75 años.

Esta situación excepcional explicaría la notable extensión en la superficie afectada por el fenómeno de convección profunda, que alcanzó latitudes más bajas de lo habitual. Aparte de los datos de la campaña EFLUBIO, que muestran restos de "chimeneas" al E de Menorca o al N de Mallorca (entre 150 y 200 millas más al sur de la zona "MEDOC"), las imágenes obtenidas por el satélite Sea-WiFS muestran repetidamente muy baja concentración de clorofila superficial en toda la zona central del Mediterráneo Noroccidental durante el mes de febrero y principios de marzo. Las imágenes de clorofila son muy útiles para "ver" las "chimeneas" puesto que niveles muy bajos de clorofila superficial durante esta época del año están asociados a la formación de agua profunda, tal como se suele observar *in situ* con un fluorómetro de superficie (e.g. Schott *et al.*, 1988)

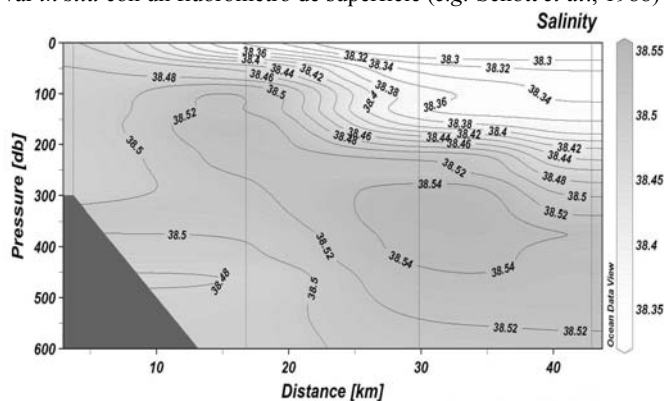


Figura 4.- Sección vertical de S frente a Barcelona. (Vertical section of S in front of Barcelona).

Esta extensión anómala, tanto en la superficie afectada por la convección como en el periodo de formación de agua profunda, requiere haber sido compensada con la ascensión de un volumen mayor de lo habitual de aguas intermedias, especialmente la **LIW**. Ello explicaría, pues, la presencia de ésta a poca profundidad en muchas estaciones, y justificaría los altos valores de salinidad superficial en todo el transecto entre la zona "MEDOC" y Barcelona. Asimismo, como mecanismo de compensación, también podría haber habido un incremento en la entrada de **LIW** a través del canal de Sicilia. De hecho algunos valores de salinidad (> 38.6) de esas aguas en el E. de Menorca durante la campaña, así lo sugieren. Por otra parte, la escasez de precipitaciones y, en consecuencia, de aportes fluviales, también ha debido contribuir a un aumento de la salinidad cerca de la costa y en las plataformas continentales. Debido a ambos factores, el frente plataforma-talud habría desaparecido o se

habría debilitado considerablemente y en su lugar, en el transecto frente a Barcelona, se observa una tendencia ascendente de la **LIW** en dirección a la costa (Fig. 4). En estas condiciones, los procesos de convección en la zona cercana al talud habrían encontrado aguas de superficie más saladas, con características más próximas a la **LIW** que a las **AW** relativamente recientes con contribución de aguas continentales. Así pues, al ser enfiadas y evaporadas por los fuertes vientos del norte, en lugar de dar lugar a aguas del tipo **WIW**, habrían formado aguas con densidad suficiente para alcanzar niveles profundos como la **WMDW** tipo N (Tabla 1; Fig. 3).

Durante el invierno de 1999 también se encontró una zona de formación de agua profunda cerca del talud, donde normalmente se esperaría encontrar formación de **WIW**. En aquella ocasión la corriente de talud tampoco alcanzaba Barcelona, pues se encontraba bloqueada por un remolino anticiclónico anclado en la parte central de la cuenca catalano-balear (Pascual *et al.*, 2002), y el agua profunda formada en aquellas circunstancias también era más densa, algo más salada y más fría, que la **WMDW** de mar abierto (Estrada *et al.*, 2004) y se situaba en profundidades cercanas a los 2000 m.

El cambio de las características del agua de partida en procesos de formación de aguas profundas sería parecido al que ocurrió en el proceso de formación del agua profunda de Creta (**CDW**), cuyo aumento de densidad a finales de la década de los 80 contribuyó a la etapa de transición de aguas profundas en el Mediterráneo oriental en la década de los 90 (Theocharis *et al.*, 1993). De hecho la signatura de las **CDW** en los diagramas θS es análoga a la que encontramos en nuestros datos respecto al agua de tipo N.

Asimismo, los procesos de "cascading" en las zonas de plataforma, también partirían de aguas superficiales más saladas de lo habitual, especialmente debido a la falta de precipitación y aportes fluviales. En este caso, pues, nos encontramos con unas aguas menos saladas que las de tipo N pero más frías, y en definitiva más densas, que corresponden a las aguas **WMDW** tipo C (Tabla 1; Fig. 3).

No es la primera vez que se observan aguas ligeramente más cálidas y saladas por debajo de la típica **WMDW**. Ya en los años 80, el profesor Henri Lacombe y colaboradores (1985) citaban su presencia en algunos perfiles, por debajo de 2500 m. La denominaban "agua de fondo" y consideraban que no podía provenir de formación por "cascading" de plataforma sino que debía haber sido formada por convección en mar abierto. Por el contrario, Bethoux *et al.* (2002) al analizar diferentes apariciones de estas aguas más densas en los últimos 40 años, si consideraron que se trataba de aguas procedentes de "cascading" de plataforma, en años especialmente secos e inviernos ventosos. Durrieu de Madron *et al.*, (2005) estudiaron detalladamente un episodio de "cascading" en el Golfo de León y comprobaron que, efectivamente, a través de los cañones, y bajo determinadas condiciones ambientales (poca pluviosidad y vientos persistentes) el agua densa así formada llegaba a alcanzar el fondo.

En cualquier caso, todos los datos recogidos hasta la fecha sitúan estas aguas "de fondo", para seguir la terminología de Lacombe, por debajo de los 2000 m. Por el contrario, en el caso que nos ocupa, las encontramos alrededor de 1000 m, e incluso a menor profundidad en algunas estaciones. Es más, en todos los perfiles suficientemente profundos de la mitad norte del área de muestreo, se pueden observar estas aguas más densas que la típica **WMDW** por debajo de los 1200 m. Es decir, se trata de un volumen muy importante de agua profunda "nueva" formada por convección en mar abierto (tipo N), presumiblemente no muy lejos del talud continental. Por otra parte, en las estaciones muestreadas en la plataforma, cerca del talud continental, aparece el agua formada por "cascading" de plataforma (tipo C). Dado que sólo se muestrearon las estaciones de la sección frente a Barcelona, no podemos precisar cual fue el alcance y la contribución del fenómeno de "cascading" en el volumen de agua profunda formada en 2005. No obstante, es de suponer que si estas aguas se registraron en zonas como Barcelona, que normalmente no están tan expuestas a los fuertes vientos del norte, seguramente se habrían encontrado en toda la plataforma, desde el Golfo de León.

Aparte de estas aguas tipo N y C, que hasta la fecha se habían considerado como "de fondo", se observa que también se formó la

típica WMDW (tipo O) no sólo en el área MEDOC sino en toda la región central hasta latitudes cercanas a los 40°N.

Posteriormente a la campaña EFLUBIO, en junio-julio de 2005, durante otra campaña, llamada TUNIBAL, se obtuvieron perfiles de CTD hasta el fondo en numerosas estaciones (López-Jurado *et al.*, 2005), en cuyos diagramas θS se muestra que las aguas tipo N y C están unidas por una línea de mezcla, formando una nueva masa de agua profunda (Fig. 5). Dada la limitación de profundidad de muestreo en EFLUBIO, no sabemos si estas aguas tipo ya estaban unidas en marzo. En cualquier caso, estas observaciones cuatro meses más tarde y en estaciones, algunas de ellas alejadas más de 400 km de la zona "MEDOC", ponen de manifiesto la importancia y el alcance del fenómeno aquí descrito, cuya señal puede haberse registrado en toda la cuenca del Mediterráneo Occidental.

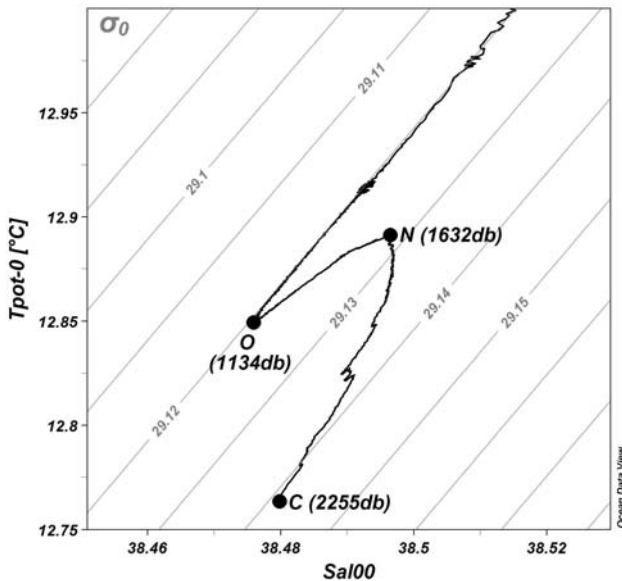


Figura 5.- Detalle del diagrama θS de la estación 121 (40°40'145 N, 3°23'298 E) de Tunibal, el 15 de julio de 2005. La escala del gráfico y los puntos O, N y C coinciden con los de la Fig. 3. (Detailed θS diagram corresponding to Station #121 (40°40'145 N, 3°23'298 E) of Tunibal Cruise. Graphic scale and points O, N and C coincide with those in Fig. 3)

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren expresar su agradecimiento a todo equipo científico participante en la campaña EFLUBIO, dirigida por M.L. Fernández de Puelles, así como al capitán, oficiales y tripulación del B/O Cornide de Saavedra. Este trabajo ha sido financiado por el MEC a través del Proyecto: REN2002-04151-C02-01 / MAR

6. REFERENCIAS

- Bethoux, J.P., X. Durieu de Madron, F. Nyffeler and D. Tailliez (2002): "Deep water in the western Mediterranean: peculiar 1999 and 2000 characteristics, shelf formation hypothesis, variability since 1970 and geochemical inferences". *Journal of Marine Systems*, **33-34**, 117-131
- Durieu de Madron, X., V. Zervakis, A. Theoharis and D. Georgopoulos (2005): "Comments on "Cascades of dense water around the world ocean"". *Progress In Oceanography*, **64**, 1, 83-90.
- Estrada, M, J. Salat, M. Emelianov, L. Arin, D. Blasco and A. Morales (2004): "Implications of a winter circulation anomaly in the Catalan-Balearic Sea for deep mixing and phytoplankton distributions". *Rapp. Comm. int. Mer Médit.*, **37**, 96.
- Fieux, M. (1971): "Observations hydrologiques hivernales dans le "rech" Lacaze-Duthiers (Golfe du Lion)". *Cahiers Océanographiques*, **23**, 8, 677-686.
- Font, J., J. Salat and J. Tintoré (1988): "Permanent features of the circulation in the Catalan sea". In: H.J. Minas and P. Nival (eds.): *Pelagic Mediterranean oceanography*, *Oceanologica Acta*, **9**, 51-57.
- Killworth, P.D. (1979): "On "chimney" formation in the ocean". *J. Physical Oceanography*, **9**, 531-554.
- Lacombe, H., P. Tchernia and L. Gamberoni (1985): "Variable bottom water in the western Mediterranean". *Progress in Oceanography*, **14**, 319-338.

- López-Jurado, J.L., J.M. García-Lafuente and N. Cano-Lucaya (1995): "Hydrographic conditions in the Ibiza Channel during Novembre 1990, March 1991 and July 1992." *Oceanologica Acta*, **18**, 235-244.
- López-Jurado, J.L., C. González-Pola and P. Vélez-Belchi (2005): "Abrupt shift of the long-term warming trend at the Balearic Sea, western Mediterranean Sea, in summer 2005". *Geophysical Research Letters*, **32**, L24606
- MEDOC Group (1970): "Observation of formation of deep water in the Mediterranean". *Nature*, **227**, 1037-1040.
- Pascual, A., Nardelli, B. B., Larnicol, G., Emelianov, M., Gomis, D. (2002): "A case of an intense anticyclonic eddy in the Balearic Sea (western Mediterranean)". *Journal of Geophysical Research*, **197**, C11, doi: 10.1029/2001JCC000913.
- Pinot, J.M., J. Tintoré and D. Gomis (1994): "Quasi-synoptic mesoscale variability in the Balearic sea". *Deep-sea Research*, **41**, 897-914.
- Salat, J. (1995): "The interaction between the Catalan and Balearic currents in the southern Catalan sea". *Oceanologica Acta*, **18**, 227-234.
- Salat, J. (1996): "Review of hydrographic environmental factors that may influence anchovy habitats in northwestern Mediterranean". In: I. Palomera and P. Rubiés (eds.): *The european anchovy and its environment*. *Scientia Marina*, **60**, Supl. 2, 21-32.
- Salat, J. and J. Font (1987): "Water mass structure near and offshore the Catalan coast during winters 1982 and 1983". *Annales Geophysicae*, **5B**, 1, 49-54.
- Schott, F. and K.D. Leaman (1991): "Observations with Moored Acoustic Doppler Current Profilers in the Convection Regime in the Gulf of Lion". *J. Physical Oceanography*, **21**, 558-574.
- Schott, F., K.D. Leaman and R.G. Zika (1988): "Deep-mixing in the Gulf of Lions". *Geophysical Research Letters*, **15**, 800-803.
- Schlitzer, R., 2004. "Ocean Data View software", <http://www.awi-bremerhaven.de/GEO/ODV>.
- Theoharis A., D. Georgopoulos, A. Lascaratos and K. Nittis (1993): "Water masses and circulation in the central region of the Eastern Mediterranean: Eastern Ionian, South Aegean and Northwest Levantine, 1986-87". *Deep-Sea Research, Part II* **40**, 6, 1121-1142.