

Relación entre los procesos atmosféricos y oceánicos a escala milenaria a partir del registro climático de los últimos 50.000 años del Mar de Alborán (Mediterráneo Occidental)

A. Moreno¹, I. Cacho², M. Canals², J.O. Grimalt³ y F.J. Sierro⁴

1 Instituto Pirenaico de Ecología, CSIC, Avda. Montañana 1005, 50080 Zaragoza. amoreno@ipe.csic.es

2 GRC Geociències Marines, Universitat de Barcelona, C/ Martí i Franqués, s/n, 08028 Barcelona. isabel@natura.geo.ub.es, miquel@natura.geo.ub.es

3 Instituto de Química Ambiental, CSIC, C/ Jordi Girona 18, 08034 Barcelona. jgoqam@iiqab.csic.es,

4 Departamento de Geología, Universidad de Salamanca, Plaza de la Merced s/n, 37008 Salamanca. sierro@gugu.usal.es

ABSTRACT

A wide multi-proxy dataset obtained from the extensively studied IMAGES core MD95-2043 recovered in the Alboran Sea (Western Mediterranean) is selected to analyze periodicities and phase relationships of the different oceanographic and atmospheric processes investigated at the millennial time-scale. The 1,470-yr cycle is the most significant cycle for the considered records with the exception of those reflecting conditions on land that show the higher significance at 3,300 and 8,000 frequency bands. This study allows establishing the evolution of oceanographic and atmospheric mechanisms that influenced the Western Mediterranean region in the course of a Dansgaard/Oeschger cycle thus making possible land-sea comparison in terms of timing of the different climatic processes.

Key words: Mediterranean Sea, multi-proxy approach, D/O variability, spectral and phase analyses.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años gran parte de la investigación paleoclimática se ha volcado en la identificación, caracterización y posterior modelización de los cambios abruptos que se produjeron durante el último ciclo glaciario, conocidos como los ciclos de Dansgaard-Oeschger (D/O). Estas variaciones climáticas rápidas fueron inicialmente descritas a partir del estudio de sondeos de hielo de Groenlandia (Dansgaard *et al.*, 1984) y estudios posteriores han constatado la presencia de esta variabilidad rápida en una amplia variedad de registros paleoclimáticos muy extendidos en la geografía terrestre. Los ciclos de D/O constan de un intervalo frío (estadial) que pasa a uno cálido (interstadial) bruscamente. Se ha observado que la mayor parte de ellos se agrupan en los denominados ciclos de Bond, que consisten en conjuntos de cuatro ciclos progresivamente más fríos y que culminan en un stadial particularmente prolongado y simultáneo a uno de los eventos de Heinrich descritos en el Atlántico Norte. A pesar de los esfuerzos dedicados al estudio de estas variaciones climáticas de escala milenaria, las causas originales de su desencadenamiento, los mecanismos por los que se transfieren entre regiones remotas, así como el motivo por el que se desarrollan con una periodicidad de 1.500 años son todavía objeto de discusión. Por lo tanto, se hace necesario para contribuir a

desentrañar el origen de los ciclos de D/O, el estudio detallado de registros paleoclimáticos en zonas sensibles a estos cambios climáticos rápidos y con suficiente tasa de sedimentación para resolver la escala de pocos cientos de años.

El sondeo MD95-2043 del Mar de Alborán (36°8,6'N; 2°37,3'O, 1.841 m. de profundidad) constituye un registro sedimentario ampliamente estudiado desde diferentes perspectivas paleoclimáticas y por ello se disponen de datos que cubren una variedad excepcional de indicadores paleoambientales y procesos tanto marinos como atmosféricos asociados. Dado que todos estos indicadores proceden del mismo registro sedimentario las incertidumbres cronoestratigráficas se reducen a la resolución del muestreo. Además, su posición geográfica a caballo entre África y Europa lo sitúa bajo la influencia simultánea de procesos climáticos de altas y bajas latitudes haciendo posible el estudio paralelo de mecanismos muy diferentes. Estos sedimentos han permitido investigar la evolución de una variedad de procesos de origen tanto oceánico como atmosférico a lo largo de los últimos 50.000 años en el Mediterráneo Occidental con una resolución temporal de 100-200 años (Cacho *et al.*, 1999; Cacho *et al.*, 2000; Moreno *et al.*, 2002; Sánchez-Goñi *et al.*, 2002). El trabajo que aquí se presenta recopila parte de los resultados más significativos obtenidos en el sondeo MD95-2043 con el objetivo de indagar en la relación temporal entre

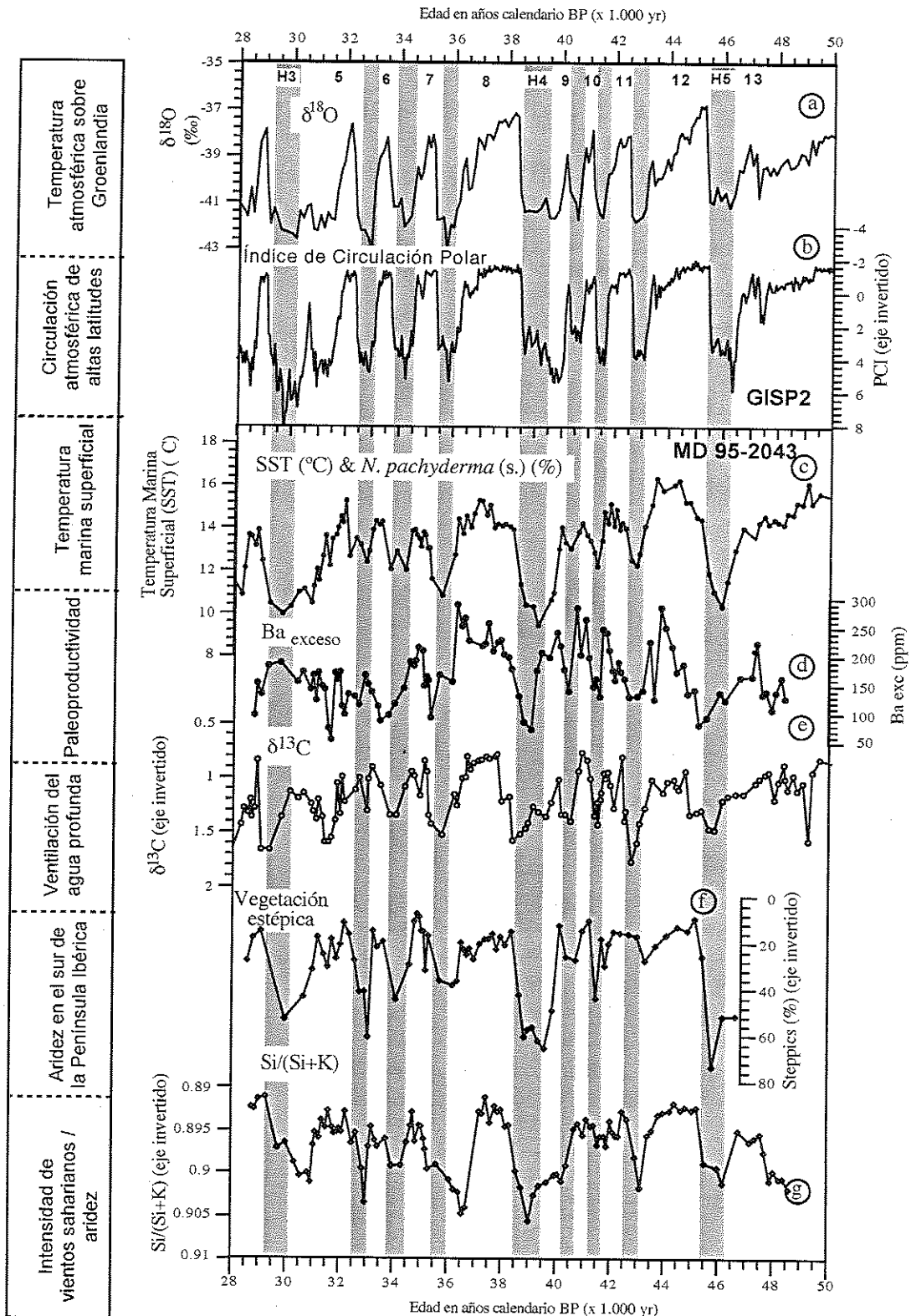
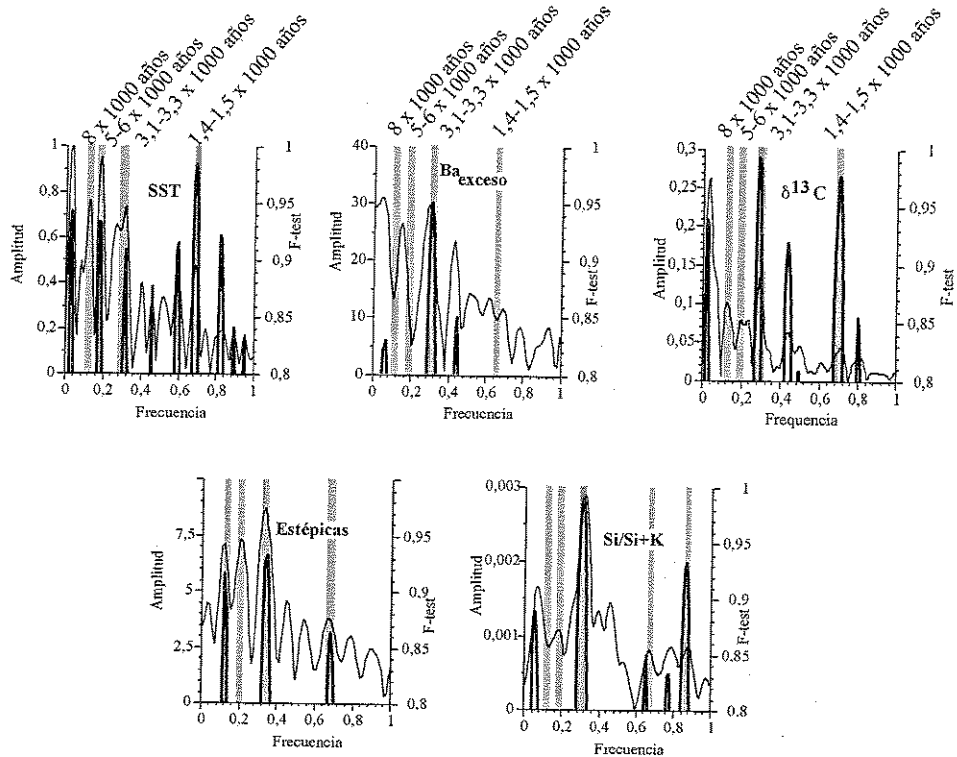


FIGURA 1. Comparación de diferentes indicadores seleccionados del testigo MD95-2043 y del testigo de hielo de Groenlandia GISP2: a) $\delta^{18}\text{O}$, b) Índice de Circulación Polar de GISP2, c) temperaturas marinas superficiales mediante el índice Uk'37, d) exceso de bario, e) $\delta^{13}\text{C}$ (ben-tónicos), f) vegetación estépica y g) relación $\text{Si}/(\text{Si}+\text{K})$ del testigo marino MD95-2043.

los diferentes procesos, es decir, analizar primero las ciclicidades que aparecen en el registro de Alborán para después estudiar las relaciones de fase entre los distintos indicadores. Este tratamiento estadístico de los datos nos

permitirá interpretar mejor los diferentes patrones de variación a una escala milenaria y conseguir una mejor representación de los escenarios climáticos inferidos para los ciclos de D/O en la región Mediterránea.

(a)



(b)

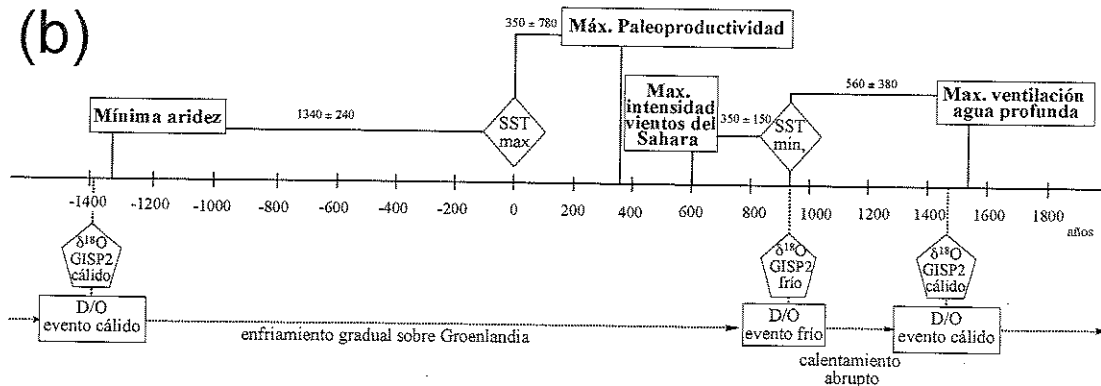


FIGURA 2. a) Análisis espectrales de algunos registros seleccionados del testigo MD95-2043 expresados como la amplitud respecto a la frecuencia (línea fina) y valores del F-test estadístico (línea gruesa). Se utilizó el predeterminado nivel de compromiso (anchura de banda = 0,66; n° de ventanas = 6). Los ciclos de 8.000, 5.000, 3.300 y 1.470 años se marcan con líneas verticales. b) Línea temporal de relaciones de fase de los distintos procesos a lo largo de un ciclo de D/O.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Variabilidad milenaria durante el último periodo glaciario en la región Mediterránea

La variabilidad climática asociada a los ciclos de D/O se identificó primeramente en el sondeo del Mar de Alborán gracias al registro de las temperaturas superficiales oceánicas obtenido a partir de datos de alkenonas y asociaciones de foraminíferos (Cacho *et al.*, 1999). Otros sondeos han permitido confirmar esta variabilidad rápida glaciario de las

aguas marinas superficiales dentro de la cuenca de Alborán (Comboureu Nebout *et al.*, 2002; Pérez-Folgado *et al.*, 2003) y también su extensión a otras cuencas Mediterráneas. En el sondeo del Mar de Alborán se han observado asimismo variaciones en la productividad oceánica siguiendo los ciclos de D/O, produciéndose un aumento del carbono orgánico y el bario biogénico durante la parte cálida del ciclo, los interestadiales, que podría ser debido al desplazamiento meridional del sistema de vientos del noroeste hasta la latitud del Mar de Alborán con el consiguiente aumento del afloramiento de aguas ricas en nutrientes. Por

otro lado, dado que el sondeo se encuentra bajo la influencia del agua profunda del Mediterráneo Occidental formada en el Golfo de León en gran medida debida a la acción de los vientos fríos del noroeste, variaciones en los isótopos de los foraminíferos bentónicos registradas en Alborán permiten seguir los cambios en la formación de dicha masa de agua. Los resultados obtenidos indican que los vientos del noroeste fueron más intensos durante los estadiales de los ciclos de D/O (Cacho *et al.*, 2000). El análisis de diferentes indicadores en el sondeo del Mar de Alborán ha permitido conocer también la variación de procesos ligados al ambiente continental, como los cambios en la cubierta vegetal o las condiciones de aridez y humedad. De esta manera, se han detectado cambios bruscos en las asociaciones polínicas, predominando las plantas estépicas durante los estadiales indicando así unas condiciones más áridas en el sur de la Península Ibérica en esos periodos (Sánchez-Goñi *et al.*, 2002). El contenido en determinados elementos que se asocian a los aportes eólicos o fluviales apoya la hipótesis anterior (Moreno *et al.*, 2002). Por último, los análisis granulométricos de la fracción terrígena junto a otros indicadores geoquímicos permiten reconstruir la intensidad de los vientos provenientes del Sahara y Norte de África que transportan ingentes cantidades de polvo hacia nuestras latitudes (Moreno *et al.*, 2002). De ese estudio se desprende una intensificación de dichos vientos de origen africano durante los periodos fríos de los ciclos de D/O.

Una vez conocida la variación milenaria tanto de procesos oceánicos como atmosféricos durante el estadio isotópico 3 (Fig. 1) es interesante explorar las ciclicidades presentes en los procesos estudiados y sus relaciones temporales.

Análisis de frecuencia y de fase entre los distintos indicadores y sus implicaciones

Para extraer las frecuencias significativas de los indicadores seleccionados en la figura 1, se realizaron análisis espectrales de los que se representan algunos resultados en la figura 2a. El principal resultado obtenido de este tratamiento es la confirmación estadística de la presencia de los ciclos de D/O (ciclo de 1.500 años) en el registro de Alborán, tanto en procesos atmosféricos como oceánicos. Otras ciclicidades presentes, pero menos significativas, son de 8.000, 5.000 y 3.300 años. La primera, 8.000 años, proviene de la presencia de tres eventos de Heinrich (HE3, 4 y 5) muy marcados, sobretudo en los indicadores de procesos terrestres (cambios en la cubierta vegetal, aridez/humedad) y en las temperaturas superficiales del Mar de Alborán. El ciclo de 5.000 años sólo es robusto estadísticamente en el registro de ventilación de las aguas profundas del Mar de Alborán y en el Índice de Circulación Polar estableciéndose una conexión clara entre la circulación atmosférica de altas latitudes y la formación de agua profunda en el Mediterráneo Occidental. La ciclicidad de 3.300 años se debe a los dos *ciclos largos* de D/O: los números 8 y 12. Para el análisis

de fases, nos centraremos en esos *ciclos largos* ya que todos los indicadores están mejor representados y los resultados obtenidos tendrán un menor error temporal.

El análisis de fases realizado permite ordenar en una línea temporal equivalente a un ciclo de D/O a todos los procesos que siguen esa variabilidad. De este modo se observa qué compartimentos del sistema climático responden antes o después a la ciclicidad de 1.500 años (Fig. 2b). Es especialmente remarcable el hecho de que los indicadores de los aportes de polvo de origen sahariano responden antes que los procesos de latitudes altas (ej. vientos del noroeste) y antes que las temperaturas marinas superficiales, apuntando así al importante papel que pueden tener procesos atmosféricos de bajas latitudes en el desencadenamiento o transmisión de la variabilidad climática asociada a los ciclos de D/O.

REFERENCIAS

- Cacho, I., Grimalt, J.O., Pelejero, C., Canals, M., Sierro, F.J., Flores, J.A. y Shackleton, N.J. (1999): Dansgaard-Oeschger and Heinrich event imprints in Alboran Sea temperatures. *Paleoceanography*, 14: 698-705.
- Cacho, I., Grimalt, J.O., Sierro, F.J., Shackleton, N.J. y Canals, M. (2000): Evidence for enhanced Mediterranean thermohaline circulation during rapid climatic coolings. *Earth and Planetary Science Letters*, 183: 417-429.
- Combouret, N., Turon, J.L., Zahn, R., Capotondi, L., Londeix, L. y Pahnke, K. (2002): Enhanced aridity and atmospheric high-pressure stability over the western Mediterranean during the North Atlantic cold events of the past 50 k.y. *Geology*, 30: 863-866.
- Dansgaard, W., Johnsen, S.J., Clausen, H.B., Dahl-Jensen, D., Gundestrup, N.S., Hammer, C.U. y Oeschger, H. (1984): North Atlantic climatic oscillations revealed by deep Greenland ice cores. En: *Climate Processes and Climate Sensitivity* (J.E. Hansen y T. Takahashi, Eds.). Maurice Ewing. American Geophysical Union, Washington, 288-298.
- Moreno, A., Cacho, I., Canals, M., Prins, M.A., Sánchez-Goñi, M.F., Grimalt, J.O. y Weltje, G.J. (2002): Saharan dust transport and high latitude glacial climatic variability: the Alboran Sea record. *Quaternary Research*, 58: 318-328.
- Pérez-Folgado, M., Sierro, F.J., Flores, J.A., Cacho, I., Grimalt, J.O., Zahn, R. y Shackleton, N.J. (2003): Western Mediterranean planktonic foraminifera events and millennial climatic variability during the last 70 kyr. *Marine Micropaleontology*, 48: 49-70.
- Sánchez-Goñi, M.F., Cacho, I., Turon, J.L., Guiot, J., Sierro, F.J., Peyrouquet, J-P., Grimalt, J.O. y Shackleton, N.J. (2002): Synchronicity between marine and terrestrial responses to millennial scale climatic variability during the last glacial period in the Mediterranean region. *Climate Dynamics*, 19: 95-105.