

CONTRIBUCIÓN AL CONOCIMIENTO DE LA PALEOCEANOGRAFÍA DEL MAR DE ALBORÁN (MEDITERRÁNEO OCCIDENTAL) MEDIANTE EL ESTUDIO DE LOS FORAMINÍFEROS PLANCTÓNICOS DE UN TESTIGO DE SONDEO (*)

José María GONZÁLEZ DONOSO,
Isabel María GONZÁLEZ PADILLA y Paul PALMQVIST

Departamento de Geología. Facultad de Ciencias.
Universidad de Málaga. 29071-Málaga. España.

ABSTRACT

The planktonic foraminiferal fauna is studied of a core in Quaternary sediments located in the Alboran Sea (Western Mediterranean). The oldest layers are dated somewhat earlier than 10.500 y. B. P. Three groups of species are established by means of visual examination, cluster analysis and *Q*-mode factor analysis. The first group, which is somewhat artificial, includes *Globorotalia inflata* (d'Orbigny), *Globigerina bulloides* d'Orbigny and *Globorotalia truncatulinoides* d'Orbigny. The second group is formed by *Neogloboquadrina pachyderma* (Ehrenberg), *Neogloboquadrina dutertrei* (d'Orbigny), intermediate forms between *N. pachyderma* and *N. dutertrei*, and *Globigerina quinqueloba* Natland. The third group consists only of *Globigerinoides ruber* (d'Orbigny). The results of transfer functions and *TS* diagrams allow us to infer a paleoceanographic change, consisting of an increase, with two important oscillations, in the surface water temperature and salinity of the Alboran Sea during a period of time between 10.500 and 7.000 B. P. Nevertheless, some changes in the relative frequency of the most important species do not always correlate with these paleoceanographic changes; in order to explain them, additional factors—such as water productivity and stratification—must be taken into account.

Keywords: Planktonic foraminifers, paleoceanography, cluster analysis, *Q*-mode factor analysis, transfer functions, *TS* diagrams, Quaternary, Alboran Sea, Western Mediterranean.

RESUMEN

Se estudia la fauna de foraminíferos planctónicos de un sondeo en materiales cuaternarios localizado en el mar de Alborán (Mediterráneo occidental), los más antiguos de los cuales alcanzan una edad algo superior a los 10.500 a. A. P. La inspección visual, el análisis de grupos y el análisis factorial en modo *Q* permiten establecer la existencia de tres grupos de especies. El primero, que incluye *Globorotalia inflata* (d'Orbigny), *Globigerina bulloides* d'Orbigny y *Globorotalia truncatulinoides* d'Orbigny, es un tanto artificial. El segundo integra *Neogloboquadrina pachyderma* (Ehrenberg), *Neogloboquadrina dutertrei* (d'Orbigny), las formas intermedias entre *N. pachyderma* y *N. dutertrei*, y *Globigerina quinqueloba* Natland. El tercero está formado por *Globigerinoides ruber* (d'Orbigny). Los resultados de las funciones de transferencia y los diagramas *TS* permiten inferir un cambio paleoceanográfico, consistente en un aumento, con dos oscilaciones importantes, de la temperatura y la salinidad de las aguas superficiales del mar de Alborán durante el intervalo de tiempo comprendido entre 10.500 y 7.000 a. A. P. Ahora bien, algunos de los cambios en la abundancia relativa de las especies más importantes no son siempre correlativos con estos cambios paleoceanográficos y para explicarlos se debe tener en cuenta la intervención de otros factores, tales como la productividad y la estratificación de las aguas.

Palabras clave: Foraminíferos planctónicos, paleoceanografía, análisis de grupos, análisis factorial en modo *Q*, funciones de transferencia, diagramas *TS*, Cuaternario, mar de Alborán, Mediterráneo occidental.

(*) Un avance de este artículo fue presentado en las *VI Jornadas de la Sociedad Española de Paleontología* (Granada, 29-31 de octubre de 1990).

INTRODUCCIÓN

El registro fósil de los foraminíferos planctónicos constituye, potencialmente, una base de datos excepcional para la reconstrucción de los cambios ambientales que acontecieron en los océanos duran-

te el pasado reciente, entendiéndose por tal el intervalo de tiempo en que las taxocenosis de estos organismos están constituidas por especies vivientes en los océanos actuales.

En el presente estudio se intenta estimar los valores de la temperatura y salinidad de las aguas

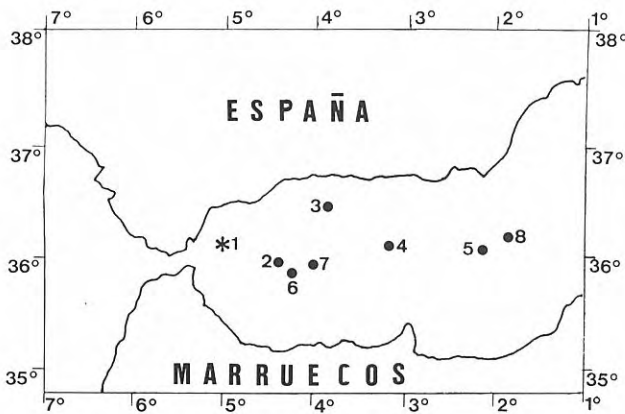


Figura 1. Mapa de localización de sondeos. *1: sondeo estudiado (CO-81-2; K-15). ● Sondeos que se citan en el texto: 2 KC8241, 3 KS8230, 4 KS8231, 5 KS8232 (Pujol y Vergnaud-Grazzini, 1989), 6 V10-078, 7 RC9-204 (Thunell, 1978), 8 TR173-16 (Loubere, 1982).

superficiales del mar de Alborán durante los últimos 11.000 años, a partir de la composición cuantitativa de las taxocenosis de foraminíferos planctónicos contenidas en el testigo de un sondeo, y se trata de explicar las variaciones de las frecuencias de las especies de estos organismos, en función de estos y otros factores ambientales.

Son numerosos los trabajos que versan sobre la interpretación de los cambios de las asociaciones de foraminíferos planctónicos recientes y sobre la utilización de tales asociaciones para inferir las condiciones paleoceanográficas que existían cuando se depositaron los materiales que las contienen. Sin embargo, los referidos al mar de Alborán son escasos: Thiede (1978, Fig. 2), en un trabajo sobre las paleotemperaturas en el Mediterráneo hace 18.000 años, estimó para el mar de Alborán —mediante funciones de transferencia del tipo de las descritas por Imbrie y Kipp, 1971— temperaturas invernales comprendidas entre 7° y 11° C (según la latitud) y estivales entre 13° y 19° C. Loubere (1982) estudió el significado de la asociación de 18.000 a. A. P. procedente de un sondeo del mar de Alborán, comparándola con otra de la misma edad del mar Balear. Duprat (1983), en un estudio de los foraminíferos planctónicos contenidos en los sedimentos cuaternarios del borde atlántico (desde Francia a Marruecos) incluyó un sondeo del mar de Alborán. En fin, Pujol y Vergnaud-Grazzini (1989) realizaron un detallado estudio de cuatro sondeos del mar de Alborán, estableciendo la bioestratigrafía e interpretando los cambios faunísticos observados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los materiales estudiados proceden del testigo del sondeo CO-81-2; K-15 (230 cm), realizado en el mar de Alborán (Fig. 1), sobre el margen progradante de la plataforma continental malagueña (36° 6,3' N y 5° 0,9' W), a una profundidad de 853 m. Estos

materiales han sido utilizados, previamente, en un estudio de las características de los sedimentos que se depositaron en los márgenes de la plataforma siliciclástica del suroeste español (Díaz y Maldonado, 1985).

En el testigo del sondeo se tomaron 23 muestras de 1 cm de espesor, con un espaciado de 10 cm, las cuales fueron levigadas por los procedimientos habituales, obteniéndose dos fracciones, > 0,063 y > 0,16 mm.

La fauna extraída de las muestras se compone principalmente de foraminíferos, planctónicos y bentónicos, y aparecen también restos de radiolias de equinidos y de conchas de moluscos. Dados los problemas que entraña la identificación de las especies de foraminíferos planctónicos a partir de individuos juveniles, se optó por estudiar sólo la fracción > 0,16 mm. De cada una de las muestras se tomó una porción de tamaño adecuado para suministrar unos 300 foraminíferos planctónicos, utilizando a estos fines un fraccionador aleatorio. Para poder aplicar las funciones de transferencia se adoptó el esquema taxonómico de Kipp (1976), a partir del cual es posible transformar los datos en otros comparables a los de Imbrie y Kipp (1971). La identificación de las especies y/o morfotipos, consecuentemente con lo anterior, se realizó utilizando, esencialmente, los trabajos de Parker (1962), Bé y Hamlin (1967) y Bé (1977), complementándolos, en los casos necesarios, con una amplia bibliografía taxonómica (sobre organismos del Neógeno y Reciente) que no se detalla por considerarse innecesario en este contexto.

Con objeto de estudiar el comportamiento de las frecuencias de las distintas especies, establecer las posibles asociaciones o grupos de especies en los niveles estudiados y efectuar inferencias paleoceanográficas, se han realizado los análisis matemáticos que se detallan a continuación:

Análisis univariantes

Para determinar si las diferencias de frecuencia relativa, entre niveles sucesivos y para cada una de las especies identificadas, son estadísticamente significativas, se utilizó un test de la *t* de Student para comparar porcentajes. En las especies más importantes, esto es, aquellas que representan en alguna de las muestras más del 2% de la fauna (Imbrie y Kipp, 1971; Kipp, 1976), se determinó si sus frecuencias relativas experimentan variaciones no aleatorias a lo largo del sondeo, efectuando el análisis de rachas de Wald-Wolfowitz (en Siegel, 1986) respecto a la frecuencia relativa media de cada especie en los niveles estudiados; la probabilidad de que las variaciones de las frecuencias relativas específicas se comporten de manera no aleatoria se calculó también mediante un test *t* (en Davis, 1986), comparando en este caso el número de rachas obtenido en cada especie con el número medio de rachas que se esperarían en una secuencia generada al azar.

Análisis multivariantes

La estructura multivariante de la matriz de datos

formada por los niveles muestreados y las especies de foraminíferos planctónicos identificados en ellos (aquellas con abundancia > 2% y cuyas frecuencias relativas varían significativamente a lo largo del tiempo, de acuerdo con el análisis de rachas) se investigó mediante análisis factorial y análisis de grupos, en modo *R* (efectuados a partir de la semimatriz de correlaciones entre las frecuencias de las especies) y en modo *Q* (trabajando con la semimatriz de correlaciones entre los niveles).

A tal fin, se utilizaron programas escritos en lenguaje *FORTRAN*, compilados a partir de los listados de Davis (1973). Las correlaciones entre niveles y entre especies se calcularon mediante el coeficiente de correlación de Pearson. Los fenogramas se obtuvieron utilizando la técnica secuencial aglomerativa *WPGMA*. Una buena revisión sobre los fundamentos y aplicaciones de estas metodologías de análisis multivariante se puede encontrar en Sneath y Sokal (1973), Reyment *et al.* (1984) y Davis (1986).

Funciones de transferencia

Para obtener estimaciones de las características paleoceanográficas (temperatura y salinidad) de las aguas superficiales del mar de Alborán a lo largo del intervalo de tiempo representado en las muestras analizadas, se recurrió a la utilización de varias funciones de transferencia. Estas funciones son, en esencia, ecuaciones que permiten estimar, a partir de las frecuencias relativas de las especies en una muestra, las condiciones ambientales que reinaron durante el depósito de la misma. Las funciones de transferencia utilizadas fueron las siguientes:

a) Las funciones de regresión múltiple para la temperatura de las aguas superficiales en invierno (febrero) y verano (agosto) y la salinidad de Imbrie y Kipp (1971; salinidad media) y Kipp (1976; salinidad invernal).

b) La función de la "media ponderada", según fue expuesta por Berger y Gardner (1975), utilizando en ella los valores óptimos y los rangos de temperatura para las especies suministrados por Bé y Tolderlund (1971) y Bé (1977), y empleando, para su calibración, los datos del universo de muestreo reunido por Imbrie y Kipp (1971).

Conviene indicar que las funciones de transferencia sólo pueden utilizarse, con garantías, para inferir el valor de las variables hidrológicas en muestras que se sitúen dentro del rango medioambiental presente en el área geográfica en la que las funciones han sido calibradas (Atlántico). Bajo situaciones no análogas (como puede que sea nuestro caso, en el que las muestras estudiadas pertenecen a una zona geográfica diferente) los resultados obtenidos han de contemplarse con más reservas, al poderse tratar de extrapolaciones.

Diagramas *TS*

Como segunda aproximación para obtener estimaciones de las condiciones de temperatura y salinidad, se utilizaron los diagramas de Loubere (1981), elaborados a partir de datos sobre las frecuencias relativas de las especies de foraminíferos planctónicos en sedimentos recientes del Atlántico Norte y del Mediterráneo Occidental, y temperaturas y salinidades en las aguas superficiales correspondientes. Cada especie delimita para cada muestra, según su frecuencia, un área en el diagrama *TS*. Superponien-

ESPECIES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
<i>G. bulloides</i>	46,6	44,1	42,9	56,7	48,7	35,1	40,6	35,2	44,2	35,4	40,3	36,1	28,6	25,2	37,2	24	17,8	21,3	26,7	10,2	19,4	27,3	35,6
<i>G. falconensis</i>	5,3	2,3	4,3	2,5	6,2	2,6	2,7	1,4	7,8	8,5	4,3	4,3	1,4	1,6	2,6	1	2,2	2,8	4,5	4,2	1,8	0,7	2,1
<i>N. pachyderma</i>	0	1,3	1,2	1	2,3	3	2,4	4,5	1,2	6,6	3,3	2,7	8,1	6,8	9,5	29,4	35,9	22,9	24,3	42,1	48,1	47,2	34,3
<i>N. dutertrei</i>	0	0,3	0	0	0	0	0,5	0	0	0	0	0	0,3	0	0	1	1,8	3,8	3,8	4,2	3,2	1,4	1
Inermios N.p./N.d.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0,3	0	0	0,7	3,3	11,5	12,3	15,4	14,4	19,3	14,1	17	18
<i>G. inflata</i>	36,7	38,2	36,7	25,4	32,5	35,1	33,9	37,6	29,5	28,5	30,4	31,8	38,4	39,4	14,23	8,5	4	2,8	2,7	3,4	2,8	1,8	4,2
<i>G. ruber-elongatus</i>	6,4	4,5	6,8	8,1	4	11,5	11,6	12,6	10,4	13,8	13,2	17,2	19	19,7	25,6	20,3	16,6	21,3	8,3	8	3,2	1,1	0,4
<i>G. truncatulinoides</i>	2,3	1,6	3,4	2,5	1,6	3,6	2,7	1,7	1,5	1	0,7	1,3	0	0,7	0	0,3	0	0	0,7	1,1	0,4	0	0
<i>G. oscitans</i>	0	2,3	0	0	1,6	0,7	0,8	1,1	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,4	0	0,4	0,6	1	0,4	0,4	0	0,4
<i>G. glutinata</i>	0,6	0,3	0	0,6	1	0,7	0,5	0,7	1,7	0,7	1,7	2	0	0,7	1,5	0	0	1,6	0,3	0	0	0,7	0
<i>G. hiruta</i>	0,3	1	0,3	0	0	0,3	0,3	0	0	0,3	0	0	0	0,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>G. trilobus(sacculif.)</i>	1,8	2	2,2	2,2	2	6,2	2,7	3,8	0,3	0	2,3	1,3	1,7	1	1,8	1,7	0,4	1,3	0,7	0	0	0	0
<i>C. universa</i>	0	1	0,3	0,3	0	0,7	0	0	0	0,3	0,3	0	0,3	0	1,5	0	0,4	0,9	0,3	0	0	0	0
<i>O. aequilateralis</i>	0	1	0	0	1,3	0	0	0,7	1,5	2,6	1,7	0	1	1,9	0,7	1,4	0,4	0,3	0	0,4	0,4	0,4	0
<i>O. suturalis</i>	0	0	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0,3	0,4	0	0	0	0	0	0
<i>G. obesa</i>	0	0	0,6	0,6	0	0	0,8	0	0,6	0	0	0	0	0,7	0	0	0	0	0	0	0,4	0	0
<i>G. humilis</i>	0	0	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>G. conglobatus</i>	0	0	0	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0,3	0,4	0	0,3	0	0,4	0	0
<i>G. quinqueloba</i>	0	0	0	0	0	0	0	0,4	0	0	0,3	0,7	0	0	0,7	1	6,2	4,4	6,2	5,3	4,2	2,1	1
<i>G. tenellus</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0,7	0,7	0	0,3	0	0	0,4	0	1	0,4	0	0	0
<i>G. crotonensis</i>	0	0	0	0	0,3	0	0	0,4	0,6	0,3	0	0	0	0,3	0	0	0,4	0	1	1,1	1,1	0,4	0
<i>G. crassaliformis</i>	0	0	0	0	0	0	0,5	0	0,3	0,7	0	0	0	0,3	0	0	0,4	0	0	0	0,4	0	0
<i>G. calida</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0	0	0,4	0	0	0	0	0	0
<i>G. bilobata</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,4	0	0	0	0	0	0
<i>G. scitula</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0	0	0	0	0
<i>G. crassula</i>	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 1. Frecuencias relativas (en %) de las especies de foraminíferos planctónicos identificadas en los niveles del testigo de sondeo.

se utilizaron los diagramas de Loubere (1981), elaborados a partir de datos sobre las frecuencias relativas de las especies de foraminíferos planctónicos en sedimentos recientes del Atlántico Norte y del Mediterráneo Occidental, y temperaturas y salinidades en las aguas superficiales correspondientes. Cada especie delimita para cada muestra, según su frecuencia, un área en el diagrama *TS*. Superponien-

Bioventos	Nivel	I	II
A	4	2700	2000
Bo	9	4000	3900
I	14	7000	6500
Pm/Ro	15	6500-7000	7000
P ₁	17	8500	8300
Q ₁	19	9000	9400
Rr	20	9500	10000
P ₂	22	10700	10500

Tabla 2. Edades absolutas de los bioeventos identificados; **I:** edades indicadas por Pujol y Vergnaud-Grazzini (1989); **II:** edades corregidas para nuestro sondeo (ver Figs. 9a y 9b).

ESPECIE	N ₁	N ₂	R	P
<i>G. bulloides</i>	14	9	5	0,0018**
<i>G. falconensis</i>	9	10	10	0,8258
<i>N. pachyderma</i>	8	15	2	0,0001***
<i>N. dutertrei</i>	8	15	2	0,0001***
Intermedios N.p./N.d.	8	15	2	0,0001***
<i>G. inflata</i>	14	9	2	0,0006***
<i>G. ruber-elongatus</i>	12	11	5	0,0014**
<i>G. truncatulinoides</i>	10	13	4	0,0003***
<i>G. oscitans</i>	11	12	9	0,1416
<i>G. glutinata</i>	11	12	11	0,5286
<i>G. trilobus</i>	12	11	8	0,0559
<i>G. aequilateralis</i>	10	13	9	0,1498
<i>G. quinqueloba</i>	6	17	3	0,0001***

Tabla 3. Resultados de la prueba de las rachas de Wald-Wolfowitz para las especies con abundancia mayor del 2% en uno o más niveles. Los asteriscos representan el nivel de significación, tomando las dos colas de la distribución *t* (**: 99%; ***: 99,9%). *R*: número de rachas, *N1*: número de niveles por encima de la frecuencia relativa media, *N2*: número de niveles por debajo de la media.

do las áreas correspondientes a las distintas especies presentes en una muestra, se obtiene un área *TS* en la cual deben quedar incluidos los valores correspondientes a la muestra en cuestión.

Ni qué decir tiene que esta técnica sólo se puede aplicar a muestras que queden comprendidas dentro del hipervolumen que incluye las muestras de Loubere en un hiperespacio cada uno de cuyos ejes representaría las frecuencias de una especie.

RESULTADOS

Los resultados del análisis faunístico de las muestras estudiadas aparecen en la Tabla 1, en la que se indican las frecuencias relativas de las especies de foraminíferos planctónicos identificadas en las mismas, expresadas en tantos por ciento respecto del total de ejemplares separados en cada nivel.

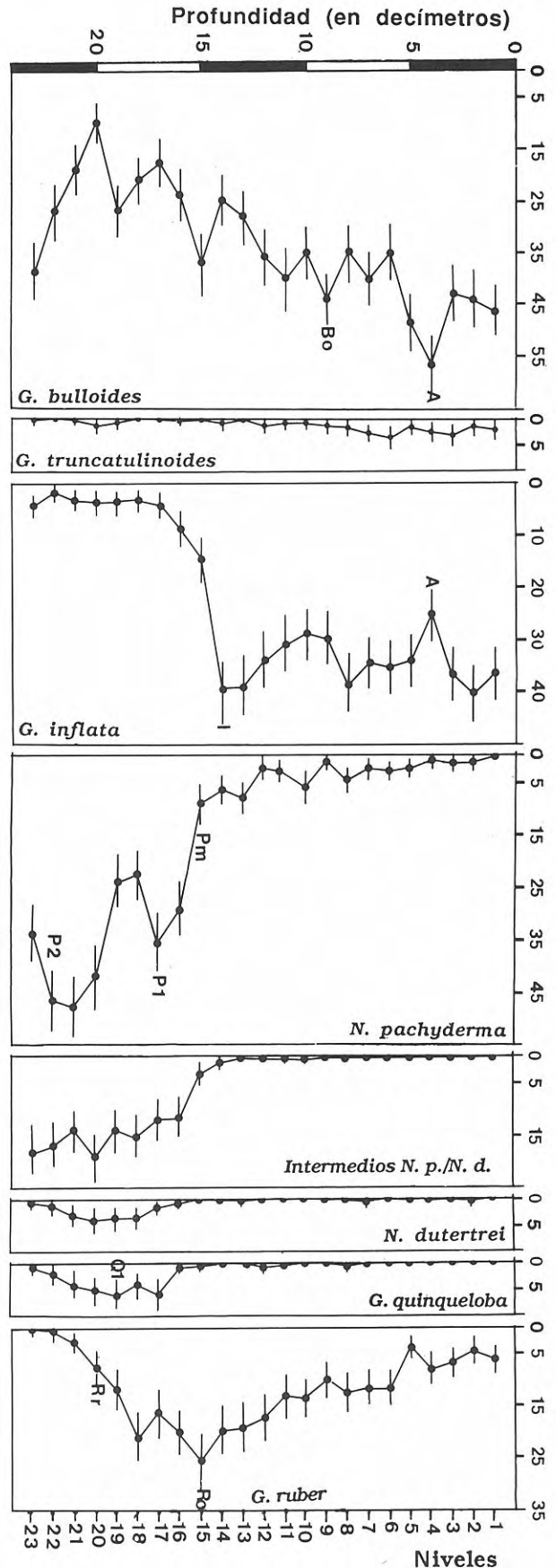


Figura 2. Frecuencias relativas (en %) de las especies de foraminíferos planctónicos que muestran variaciones significativas de acuerdo con el test de las rachas ($p < 0,01$); las barras horizontales representan el intervalo de confianza del 95% en torno a los porcentajes.

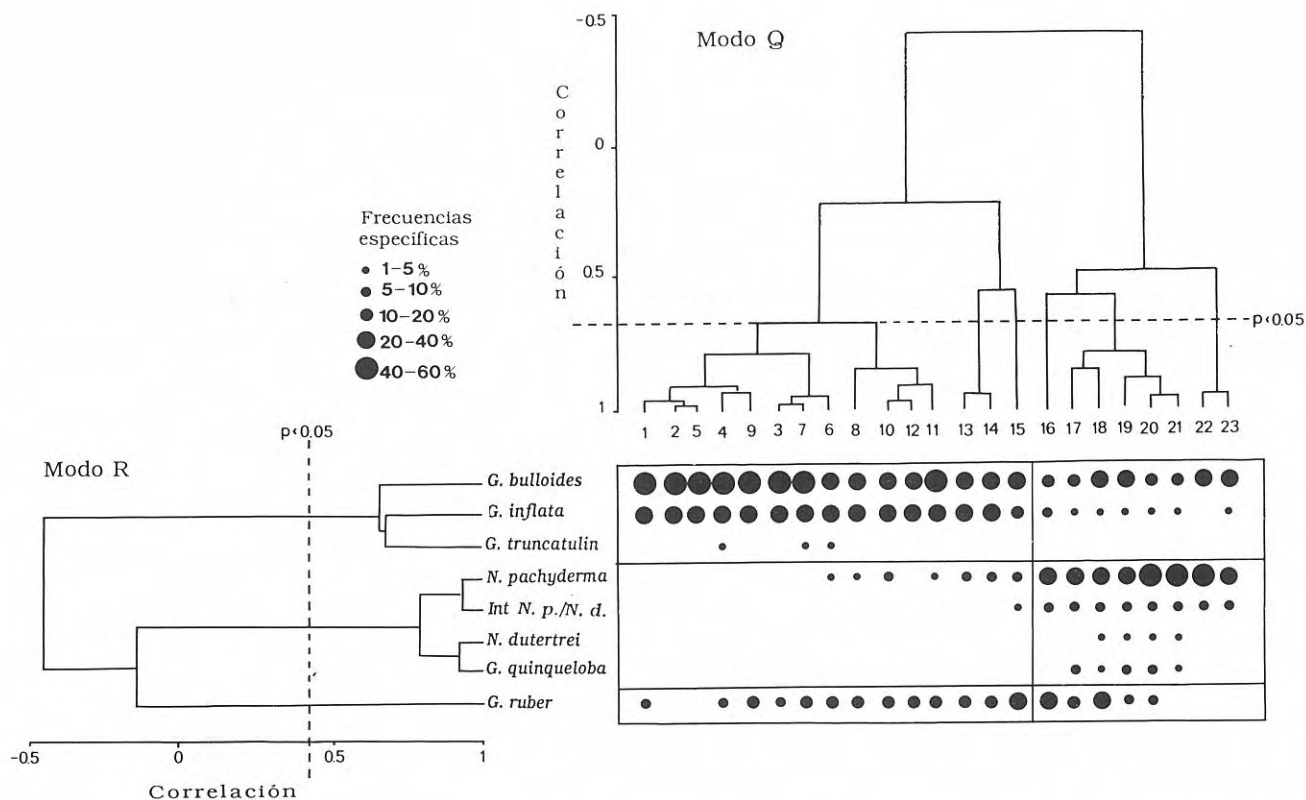


Figura 3. Análisis de grupos. Relación entre los dendrogramas obtenidos para las especies (modo R) y los niveles (modo Q) de acuerdo con las frecuencias relativas de las especies, expresadas en tantos por ciento, de forma categorizada.

Edad de los materiales

Pujol y Vergnaud-Grazzini (1989) en un estudio de la secuencia de deglaciación desde el último episodio glacial (18.000 a. A. P.) en el mar de Alborán, a partir de la microfauna de foraminíferos planctónicos contenida en cuatro testigos de sondeos, suministraron las edades absolutas de 13 bioeventos; los 9 más recientes se pueden identificar en el sondeo objeto del presente estudio, lo que nos permite asignar unas edades absolutas a varios niveles (Tabla 2), aunque existen algunos problemas de detalle (debidos a inversiones del orden temporal de ciertos bioeventos y a aspectos poco claros o incluso autocontradictorios del trabajo de Pujol y Vergnaud-Grazzini). De acuerdo con estos datos, los materiales más antiguos recogidos en el sondeo alcanzarían una edad algo superior a los 10.500 a. A. P.

En el trabajo de Pujol y Vergnaud-Grazzini (1989) no se reconoce ningún bioevento posterior al *Bo* (4.000 a. A. P.). Sin embargo, en nuestro sondeo se observa, en la muestra 4, un marcado máximo de *G. bulloides* al que corresponde un mínimo (post *I*) de *G. inflata*; dado que en el sondeo KS8230 (el que parece disponer de un muestreo más denso en los últimos 4.000 años) de Pujol y Vergnaud-Grazzini (1989) se observa una situación parecida en un nivel que sitúan a 2.700 a. A. P., pensamos que conviene investigar este posible biohorizonte (que designaremos provisionalmente con la sigla *A*), dado que sería la única —por ahora— referencia bioestratigráfica de foraminíferos planctónicos dentro de los últimos 4.000 años, para el mar de Alborán.

Resultados de los análisis univariantes

En la Tabla 3 se encuentran los valores obtenidos para el número de rachas (*R*) y el número de pasos (*N*₁ y *N*₂) en las variaciones de las frecuencias relativas de las especies más importantes; en ella también se indica si tales variaciones resultan estadísticamente significativas. Según puede apreciarse, las frecuencias relativas de *Globigerina bulloides* d'Orbigny, *Neogloboquadrina pachyderma* (Ehrenberg), *Neogloboquadrina dutertrei* (d'Orbigny), formas intermedias entre *N. pachyderma* y *N. dutertrei* ("P-D intergrade" *sensu* Kipp, 1976), *Globorotalia inflata* (d'Orbigny), *Globigerinoides ruber* (d'Orbigny), *Globorotalia truncatulinoides* (d'Orbigny) y *Globigerina quinqueloba* Natland muestran variaciones significativas a lo largo del intervalo de tiempo representado en los niveles estudiados. Por el contrario, las variaciones de *Globigerina falconensis* Blow, *Globorotalia oscitans* Todd, *Globigerinita glutinata* Egger, *Globigerinoides trilobus* (Reuss) y *Globigerinella aequilateralis* (Brady) no resultan estadísticamente significativas y puede decirse, por tanto, que se comportan, a todos los efectos, de manera similar a una secuencia de cambios generada al azar. Dado que el objetivo final del trabajo es poner de manifiesto variaciones significativas de los factores medioambientales en el tiempo, a partir de las variaciones faunísticas, en los análisis multivariantes sólo se considerarán las especies que han mostrado variaciones significativas en el análisis de rachas.

En lo que respecta a las diferencias de frecuencia relativa de las especies entre los sucesivos nive-

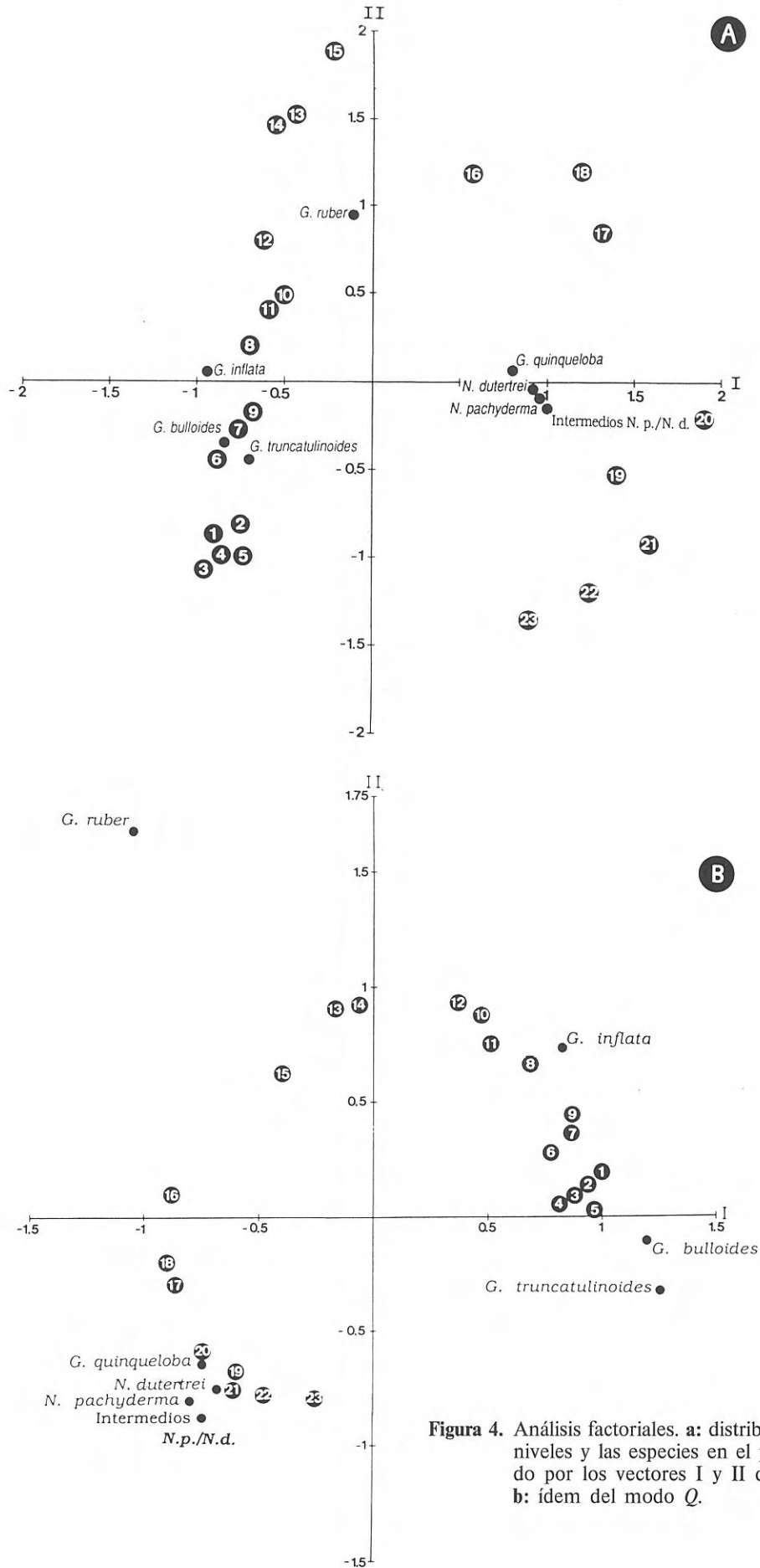


Figura 4. Análisis factoriales. a: distribución de los niveles y las especies en el plano definido por los vectores I y II del modo R; b: idem del modo Q.

les, en la Fig. 2 aparecen representados los porcentajes con sus intervalos de confianza del 95 %, lo que permite en cada caso estimar si tales diferencias de frecuencia resultan estadísticamente significativas a ese nivel.

Resultados de los análisis multivariantes

Los dendrogramas resultantes de efectuar los análisis de grupos de las especies (modo *R*) y de los niveles (modo *Q*) se encuentran representados conjuntamente en la Fig. 3. En el dendrograma en modo *R* se puede apreciar la existencia de dos grupos, ambos integrados por especies que se correlacionan directamente entre sí. El primero de tales grupos incluye a *G. bulloides*, *G. inflata* y *G. truncatulinoides* ($r = 0,661$; $p < 0,001$) y se designará en lo que sigue como grupo de *G. inflata*. El otro grupo integra a *N. pachyderma*, intermedios *N.p./N.d.*, *N. dutertrei* y *G. quinqueloba*, especies cuyas frecuencias se correlacionan de forma muy significativa ($r = 0,786$; $p < 0,001$); este conjunto de especies se denominará en adelante grupo de *N. pachyderma* (conviene aclarar que el 99,8 % de los individuos identificados como pertenecientes a esta especie son formas dextrorsas; sólo han aparecido 2 ejemplares sinistrorsos en el nivel 17); este grupo de especies se une a *G. ruber* a un nivel de correlación no significativo ($r = 0,138$) y el conjunto se agrupa, a su vez, con el grupo de *G. inflata* ($r = -0,452$; $p > 0,05$).

En el dendrograma en modo *Q* se diferencian dos grandes grupos de niveles: 1 al 15 y 16 al 23; ambos grupos se correlacionan inversamente entre sí, aunque tal correlación no es significativa ($r = -0,444$). El primero de los grupos se escinde en dos subgrupos (niveles 1-12 y 13-15) y el segundo también (niveles 16-21 y 22-23). En la Fig. 3 se han representado de forma gráfica las abundancias específicas, en tantos por ciento y previamente categorizadas. De esta manera se puede apreciar más claramente el motivo de la agrupación de los niveles (las variaciones en la abundancia relativa de los distintos grupos de especies), pudiéndose observar cómo en los niveles más recientes (1 al 15) hay un claro predominio de *G. bulloides* y *G. inflata*, mientras que en los niveles más antiguos (16 al 23) *G. bulloides*, aunque abundante, no lo es ya tanto, *G. inflata* es bastante más escasa. *N. pachyderma* aumenta de frecuencia y están presentes *N. dutertrei*, intermedios *N.p./N.d.* y *G. quinqueloba*. En los niveles intermedios de la secuencia destaca la mayor abundancia de *G. ruber*, presente en casi todas las muestras excepto las más antiguas.

Los resultados obtenidos con las dos modalidades de análisis factorial utilizadas son altamente congruentes entre sí, como se desprende de la comparación de los correspondientes diagramas de la Fig. 4: rotando los ejes de uno se obtiene una figura parecida a la imagen especular del otro, con posiciones relativas de los niveles casi idénticas; por esta razón, pasaremos a discutir sólo el análisis en modo *Q*, al ser ésta la técnica más empleada en la biblio-

FACTORES ESPECIES	I	II
<i>N. pachyderma</i>	-0,7994	-0,7717
<i>N. dutertrei</i>	-0,6733	-0,7542
Intermedios <i>N.p./N.d.</i>	-0,7581	-0,8810
<i>G. quinqueloba</i>	-0,7585	-0,6223
<i>G. inflata</i>	0,8221	0,7464
<i>G. bulloides</i>	1,2176	-0,1334
<i>G. truncatulinoides</i>	1,2523	-0,3446
<i>G. ruber-elongatus</i>	-1,0739	1,6352

Tabla 4. Análisis en modo *Q*. Factores de carga para las especies en los factores I y II.

grafía consultada. Los factores I y II aglutinan, aproximadamente, el 86,5 % de la variancia original de las variables (frecuencias relativas de las especies en los niveles). De acuerdo con la magnitud y signo de los factores de carga de las especies en los factores (Tabla 4), el factor I ordena hacia su lado positivo a los niveles con valores altos para las especies del grupo de *G. inflata*, en especial *G. bulloides* y *G. truncatulinoides*, mientras que hacia su lado negativo se disponen aquellos niveles en los que predominan las especies del grupo de *N. pachyderma* y *G. ruber*. En lo concerniente al factor II, las especies con factor de carga positivo más importante son *G. inflata* y *G. ruber*, mientras que todas las del grupo de *N. pachyderma* tienen valores negativos. Ahora bien, al representar los factores de carga de las especies sobre el diagrama que relaciona los factores I y II (Fig. 4b) se puede observar que si bien el grupo de *N. pachyderma* y *G. ruber* quedan claramente individualizados, las especies del grupo de *G. inflata* se dispersan, en lugar de formar la agrupación detectada mediante el análisis de grupos (Fig. 3). ¿Cuál de estas dos alternativas reflejaría mejor la realidad? Una observación de la Fig. 2 parece indicar que los resultados obtenidos con el análisis factorial son más congruentes con las variaciones de la frecuencia relativa de estas especies en los niveles estudiados, pues aunque las tres experimentan aumentos de frecuencia a lo largo de la columna, tales aumentos no son totalmente correlativos: el de *G. inflata* es más brusco que los de *G. truncatulinoides* y *G. bulloides*, y esta última especie incluso muestra un tramo inicial de la secuencia en el que disminuye su frecuencia; además, si se comparan las frecuencias de *G. bulloides* y *G. inflata* durante el tramo de niveles 1-14, en el que *G. inflata* es abundante, la correlación obtenida entre ambas es inversa y significativa ($r = -0,554$; $p < 0,05$); el grupo de *G. inflata* sería, por tanto, un artefacto.

Si se analiza ahora la distribución de los niveles sobre el plano definido por estos dos factores (Fig. 4b) se puede observar una cierta ordenación de los mismos en forma de parábola (efecto Guttman), la cual refleja en buena medida la agrupación del dendrograma (Fig. 3): los niveles más recientes (1-14) varían desde valores positivos en el eje I y próximos

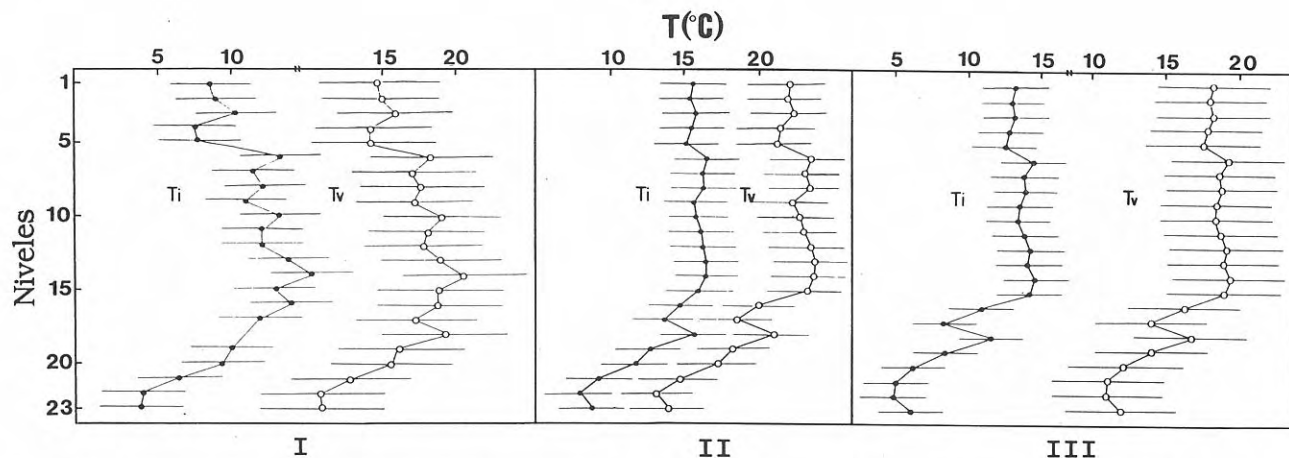


Figura 5. Estimaciones de paleotemperaturas de invierno (círculos negros, T_i) y de verano (círculos blancos, T_v) obtenidas con las funciones de transferencia. I: Imbrie y Kipp (1971), II: Kipp (1976), III: Berger y Gardner (1975).

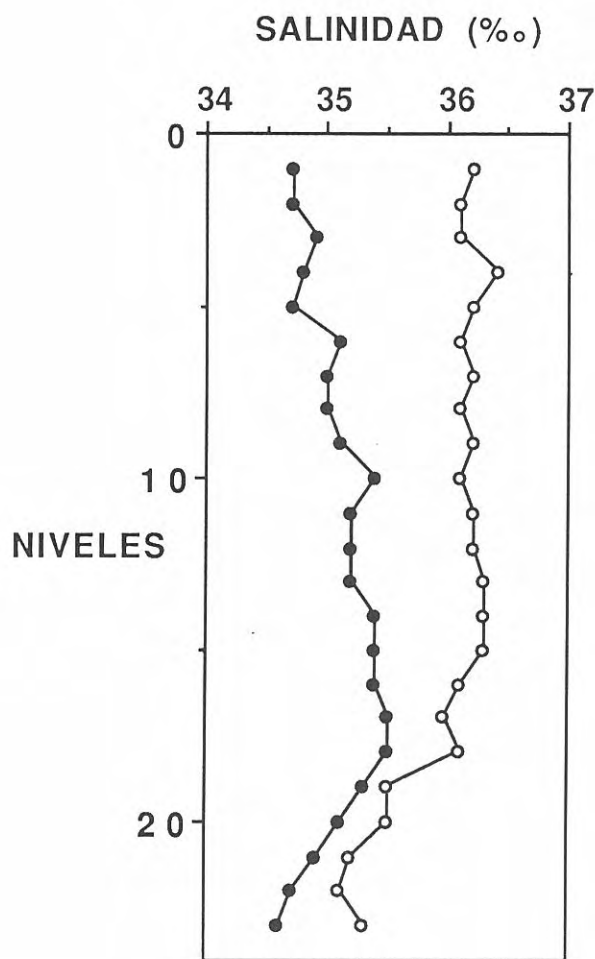


Figura 6. Curvas de paleosalinidades para los niveles estudiados del sondeo, obtenidas a partir de las funciones de Imbrie y Kipp (1971) (círculos negros) y Kipp (1976) (círculos blancos).

a cero en el II, hasta valores próximos a cero en el eje I y positivos en el II; los restantes niveles, a excepción del 15, se disponen también ordenados, en este caso desde los valores negativos en el eje I y próximos a cero en el II, hacia los valores próximos a cero en el eje I y negativos en el II; el nivel 15 se

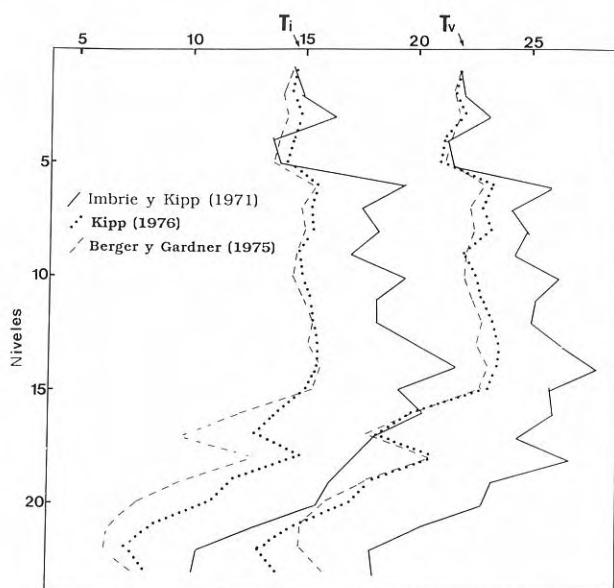


Figura 7. Secuencias de paleotemperaturas, ajustadas sumando a los valores estimados para cada uno de los niveles la diferencia entre el valor actual y el estimado para el nivel I. T_i : temperatura invernal; T_v : temperatura estival.

coloca en una situación intermedia entre ambos grupos, tomando un valor negativo en el eje I y positivo en el II. Conviene indicar que los valores de las comunalidades, obtenidos para los niveles con sólo estos dos factores, son bastante altos, del orden del 90 % ó incluso superiores.

Resultados de las funciones de transferencia

En la Fig. 5 se representan los valores de las paleotemperaturas de las aguas superficiales del mar de Alborán, obtenidos mediante la aplicación de las funciones de transferencia a los niveles estudiados; los respectivos errores estándar de dichas funciones se han utilizado para representar el intervalo de confianza del 95 % en torno a las estimaciones.

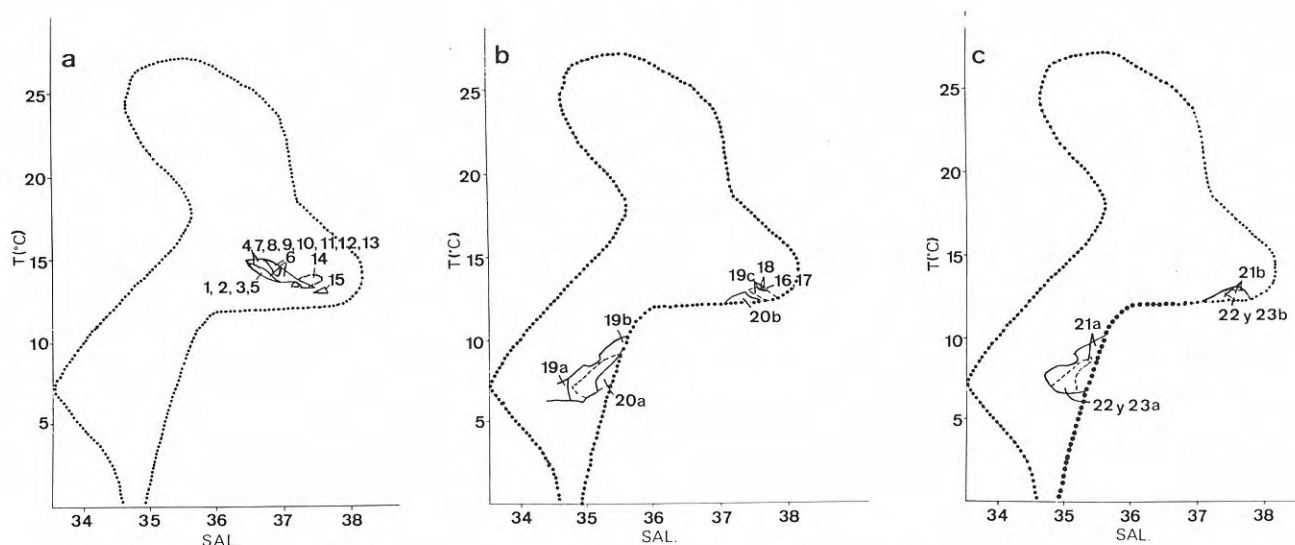


Figura 8. Áreas T/S para los niveles estudiados (A: niveles 1-15; B: 16-20; C: 21-23).

Si se ajustan todas las secuencias de paleotemperaturas, sumando a los valores estimados para cada uno de los 23 niveles la diferencia entre el valor actual y el estimado para el nivel 1, se puede observar (Fig. 7) que las secuencias basadas en Kipp (1976) y en Berger y Gardner (1975) casi se superponen en el tramo comprendido entre los niveles 1 y 15, coincidencia que se mantiene hasta el nivel 21 en las secuencias de verano; en el tramo restante, pese a no haber coincidencia, las variaciones son del mismo signo en ambas curvas.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se pueden diferenciar dos zonas en las secuencias de temperaturas: una primera estaría comprendida entre los niveles 23 y 15, abarcando el intervalo de tiempo transcurrido entre algo más de 10.500 a. A. P. y los 7.000 a. A. P., según los datos sobre edades de los bioeventos suministrados por Pujol y Vergnaud-Grazzini (1989) (ver Tabla 2), y en ella las temperaturas experimentan un ascenso general, aunque se dan dos inversiones en esta tendencia, en los niveles 22 y 17 (localizados a 10.500 y 8.300 a. A. P., respectivamente); la segunda zona estaría comprendida entre los niveles 15 y 1 (7.000 a. A. P. hasta los tiempos recientes), en los que las temperaturas permanecen relativamente estacionarias, aunque se da un ligero descenso a partir del nivel 5 (situado a algo más de 2.000 a. A. P.), para continuar en el resto de la secuencia con valores ya similares a los actuales.

En la Fig. 6 se representan las estimaciones de los valores de salinidad superficial obtenidos con las funciones de transferencia. Las semejanzas de las secuencias con las de paleotemperaturas correspondientes, son notables.

Resultados de los diagramas TS

En la Fig. 8 se muestran las áreas de temperatura y salinidad invernales en que quedaría incluida cada muestra del sondeo, a partir de los diagramas

TS de Loubere (1981) para las especies *G. ruber*, *G. inflata*, *N. pachyderma*, intermedios *N.p./N.d.*, *G. trilobus*, *N. dutertrei*, *G. menardii*, *G. falconensis* y *G. glutinata*, considerando los intervalos de confianza calculados para las abundancias específicas en cada nivel. Una parte de los niveles estudiados no plantea ninguna dificultad cuando se trata de establecer el área de superposición para las distintas zonas del diagrama definidas por las frecuencias relativas de cada una de las especies, pero en algunas muestras sí se presentan ciertas complicaciones menores; así, el área indicada para el nivel 2 es la de superposición de todas las especies a excepción de *G. falconensis* (que debería en este caso tener una frecuencia comprendida entre el 5% y el 15%); para los niveles 4, 6, 7, 8 y 13 el área marcada muestra dos regiones separadas por un estrangulamiento y la de menor salinidad no sería válida según la abundancia de *G. falconensis* en estos niveles (que nuevamente debería ser del 5% al 15%); finalmente, en el caso de los niveles 19 al 23 se ha señalado más de un área posible en el diagrama y de ellas las 19b, 20a, 21a, 22a y 23a no son válidas según las frecuencias de *G. glutinata* (que deberían ser mayores del 5%) y el área 22b no es correcta según la abundancia que presenta *G. inflata* en este nivel (aunque hay que tener en cuenta que en el diagrama original de Loubere no hay muestras en esta zona, por lo que los valores están extrapolados).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

1) Sobre los valores estimados por las funciones de transferencia y los diagramas TS

Para estimar cuál de los tres conjuntos de secuencias de paleotemperaturas es el más correcto, se pueden comparar las frecuencias registradas para algunas de las especies con las frecuencias que deberían presentar según las paleotemperaturas esti-

	Ti	Tv	Si/Sm	Comun.
Core top VI0-078 de Thunell (1978)				
Estimado con Imbrie y Kipp (1971)	13,6	19,3	35,3	0,55
Estimado con Kipp (1976)	16,9	23,9	36,2	0,77
Estimado con Berger y Gardner (1975)	14,3	19,2		
Interpolado a partir de Gorshkov (1979)	14	22	36	
Core top RC9-204 de Thunell (1978)				
Estimado con Imbrie y Kipp (1971)	14,1	19,9	35,5	0,48
Estimado con Kipp (1976)	16,7	24,1	36,2	0,76
Estimado con Berger y Gardner (1975)	14,5	19,3		
Interpolado a partir de Gorshkov (1979)	14	22	36	
Core top TR 173-16 de Loubere (1982)				
Estimado con Imbrie y Kipp (1971)	10,1	16,2	35	0,57
Estimado con Kipp (1976)	15,5	22,3	36,1	0,82
Estimado con Berger y Gardner (1975)	12,6	17,8		
Interpolado a partir de Gorshkov (1979)	14	24	36-37	

Tabla 5. Resultados obtenidos mediante la aplicación de las funciones de transferencia a tres cimas de testigos de sondeo procedentes del Mar de Alborán (los datos de frecuencias de las muestras de Thunell proceden de una com. pers.).

madas, de acuerdo con los datos recientes sobre distribución y abundancia de estas especies recopilados por Loubere (1981). Así, por ejemplo, a temperaturas invernales comprendidas entre 3 y 6°C, como las estimadas por las funciones de Imbrie y Kipp (1971) y de Berger y Gardner (1975) para los niveles más antiguos, la forma sinistrorsa de *N. pachyderma* (apenas registrada) debería mostrar una abundancia relativa del 20% al 60%, mientras que la dextrorsa debería representar menos del 20%; la función de Kipp (1976) estima paleotemperaturas invernales superiores a 8°C, para las que las formas dextrorsas deben ser (como ocurre) superiores al 20%, aunque hay que llegar a 8,5°C para que las formas sinistrorsas lleguen a estar ausentes. Por ello, la función de Kipp (1976) parece estimar mejor las temperaturas más bajas, aunque las minusvalora algo.

Otra estrategia posible para someter a prueba la fiabilidad de las funciones de transferencia consiste en estimar con ellas los valores de temperatura y salinidad correspondientes a muestras del Mediterráneo (no utilizadas en su calibración original) con valores conocidos para estas variables. Hemos optado por estimar los valores para tres cimas de sondeos, procedentes del mar de Alborán (Thunell, 1978; Loubere, 1982); de acuerdo con los resultados obtenidos (Tabla 5), la función de Kipp (1976) estima las temperaturas estivales con errores de hasta 2,1°C y sobrevalora las invernales hasta en 2,9°C, mientras que infravalora las salinidades en un 0,2‰; las funciones de Imbrie y Kipp (1971) y de Berger y Gardner (1975) suministran resultados en conjunto menos satisfactorios: infravaloran las temperaturas invernales hasta en 3,9° y 1,4°C, respectivamente, y las estivales hasta en 7,8° y 6,2°C, respectivamente; en cuanto a la salinidad, la función de Imbrie y Kipp (1971) la minusvalora hasta en un 0,7‰.

Por último, los valores de las comunalidades correspondientes a la función de Imbrie y Kipp (1971) para las muestras del testigo de sondeo son bastante bajos, menores del 70% (entre el 29% y el 67%), mientras que las suministradas por la de Kipp (1976) son más altas (entre el 73% y el 83%); las comunalidades correspondientes a las cimas de los

sondeos siguen la misma pauta. Según esto, las estimaciones realizadas con la función de Kipp (1976) parecen ser las mejores, aunque también se deben contemplar con ciertas reservas, pues según Loubere (1982) comunalidades menores del 80% pueden indicar errores significativos en la estimación.

Si se comparan los intervalos de temperaturas y salinidades estimados mediante los diagramas *TS* con los valores calculados mediante las funciones de transferencia (Figs. 5 y 8), dando por buenos los primeros, la función de Kipp (1976) sobrevalora algo las temperaturas (en especial los niveles 14, 15, 16 y 18) e infravalora las salinidades (especialmente los niveles 14 al 18); la función de Berger y Gardner (1975) ofrece resultados parecidos en la comparación y, finalmente, es la función de Imbrie y Kipp (1971) la que ofrece peores estimaciones, infravalorando bastante las temperaturas.

2) Sobre las variaciones de las frecuencias relativas de las especies

Los resultados de los análisis multivariantes indican la existencia de tres entidades distinguibles en el conjunto de especies importantes y con variaciones significativas: una, el grupo de *N. pachyderma*, predomina en los niveles más antiguos (23 al 16); otra, el grupo de *G. inflata*, no es en sí un verdadero grupo, dado que sus especies no varían correlativamente, pero sustituyen a las del primero en los niveles más recientes (15 al 1); la tercera entidad comprende sólo a *G. ruber*, especie que experimenta variaciones de frecuencia relativa que no se correlacionan con las de las anteriores, pues su abundancia aumenta de forma significativa sólo en los niveles intermedios (18 al 12) del sondeo.

Si atendemos a los resultados de las funciones de transferencia, esta sustitución podría leerse como el reflejo del aumento de la temperatura: un grupo de especies de aguas más frías (el de *N. pachyderma*) es sustituido por otro de aguas más cálidas (el de *G. inflata*) y *G. ruber* tiene su máximo desarrollo en condiciones intermedias. Pero las cosas no son tan fáciles. Ciertamente, según las recopilaciones y datos de numerosos autores (vg., Boltovskoy y Wright, 1976; Bé, 1977; Lipps, 1979; Pujol, 1980; Loubere, 1981, 1982), *N. pachyderma* es una especie de aguas más frías que *G. inflata*, pero *N. dutertrei* tiene sus máximas frecuencias, en el Atlántico Norte, aproximadamente en las mismas latitudes que *G. inflata*, mientras que *G. ruber* se desarrolla, sobre todo, en aguas más cálidas que todas las especies anteriores y *G. bulloides* puede alcanzar altas proporciones en un amplio rango de temperaturas. Es evidente, por tanto, que ordenaciones y agrupaciones de especies y muestras no se pueden interpretar de manera tan sencilla, pues no son consecuencia exclusiva de los cambios de temperatura, sino que algo más juega en su determinación.

Analicemos, entonces, las correspondencias entre los cambios de paleotemperaturas invernales, según son estimados a partir de la función de Kipp (1976), y las frecuencias de las especies (Tabla 6); para

Niveles	<i>N. pachyderma</i> + intermedios <i>N.p./N.d.</i>	<i>G. bulloides</i>	<i>G. inflata</i>	<i>G. ruber</i>	Temperatura	$\delta^{13}\text{C}$
2-1	-	+	-	+	+	
3-2	+	+	+	-	-	
4-3	+	⊖*	⊕*	-	+	⊖
5-4	-	⊕*	-*	⊕*	+	⊕
6-5	-	⊕*	-	-*	-	⊕
7-6	+	-	+	-	+	
8-7	-	+	-	-	-	
9-8	⊕*	-*	⊕*	+	+	-
10-9	-*	⊕*	+	-	-	-
11-10	+	-	-	+	-	-
12-11	+	+	-	-	-	+
13-12	-*	⊕*	-	-	-	⊕
14-13	+	-	-	-		⊕
15-14	-*	⊖*	⊕*	-	+	⊖
16-15	⊖*	⊕*	⊕*	+	+	+
17-16	-	+	⊕*	+	+	+
18-17	⊕*	-	+	-	⊖	-
19-18	-	-	+	⊕*	⊕	-
20-19	⊖*	⊕*	-	+	+	+
21-20	-	-*	+	⊕*	⊕	⊖
22-21	-	-*	+	+	+	⊖
23-22	⊕*	-*	-	+	-	

Tabla 6. Cambios entre niveles sucesivos del sondeo de la frecuencia relativa de *N. pachyderma* + intermedios *N.p./N.d.*, *G. bulloides*, *G. inflata* y *G. ruber*: < 0,5 % (trazo normal), 5-10 % (negritas), > 10 % (círculos), * (cambio significativo con $p < 0,05$); cambios de temperatura invernal: < 1°C (trazo normal), 1°-2°C (negritas), > 2°C (círculos); cambios de $\delta^{13}\text{C}$: < 0,1 (trazo normal), 0,1-0,2 (negritas), > 0,2 (círculos).

simplificar la exposición, vamos a considerar por separado las secuencias 23-15 y 15-1.

2a) Secuencia 23-15

En la Tabla 6 se advierte que a cada cambio de temperatura corresponde un cambio de signo contrario de la frecuencia acumulada de *N. pachyderma* e intermedios entre *N. pachyderma* y *N. dutertrei*, pero las magnitudes de los cambios no concuerdan:

a grandes aumentos de temperatura, pequeños descensos de frecuencia y viceversa. Es obvio, por tanto, que la temperatura no es el único factor a tener en cuenta en este caso para explicar las variaciones de frecuencia relativa.

Si a continuación se consideran las frecuencias de *G. bulloides*, 5 cambios son de igual signo que los de temperatura y 3 de signo contrario. No es la temperatura, entonces, el factor que determina la frecuencia de *G. bulloides*.

Según Pujol y Vergnaud-Grazzini (1989) *G. bulloides* prolifera, actualmente, en las aguas subsuperficiales del mar de Alborán, en primavera y verano. Durante este intervalo las aguas están bien estratificadas, al aumentar el gradiente de la termoclina y, por tanto, el de la pincoclina; en tales circunstancias, los nutrientes reciclados (esto es, regenerados por mineralización de la materia orgánica) se acumulan cerca de la superficie, en lugar de dispersarse, formándose una nutriclina de reciclados en la que puede proliferar el fitoplancton. La intensificación de esta situación favorecerá, por tanto, esta producción primaria estival, localizada precisamente en la región de la columna de agua habitada por *G. bulloides*.

Supongamos, entonces, que sea la productividad estival el principal factor que determina la frecuencia de *G. bulloides*; entonces, según el modelo expuesto, los cambios de frecuencia de *G. bulloides* deberían correlacionarse directamente con los de productividad estival y éstos con los de estratificación. Para estimar los segundos no se dispone de las ecuaciones de transferencia adecuadas, pero sí se pueden estimar los primeros a partir de los cambios de $\delta^{13}\text{C}$: dado que, en la fotosíntesis, la proporción de ^{12}C en el carbono extraído es mayor que la proporción de ^{12}C en el carbono del CO_2 disuelto, el CO_2 de las aguas superficiales experimentará un enriquecimiento relativo en ^{13}C al aumentar la cantidad de fitoplancton, con lo que también aumentará el $\delta^{13}\text{C}$ calculado sobre las conchas de una especie de foraminífero que viva en la zona de alta productividad estival (véase, vg., Bouvier-Soumagnac y Duplessy, 1985; Vergnaud-Grazzini *et al.*, 1986; Spero y Williams, 1988).

Por desgracia, no disponemos de tales datos para nuestro sondeo, pero de acuerdo con los valores de las frecuencias de *G. bulloides* y $\delta^{13}\text{C}$ (medidos en la concha de *G. bulloides*) suministrados para el sondeo KC8241 (relativamente próximo al nuestro) por Pujol y Vergnaud-Grazzini (1989, Figs. 5c y 7), la correlación entre ambas variables, para el tramo comprendido entre 11.000 a. A. P. y la actualidad, es directa y estadísticamente significativa ($r = 0,73$; $p < 0,01$); de ser cierto, en este caso, que las variaciones a corto plazo de ^{13}C se relacionan con las de productividad, estas últimas serían entonces las responsables de los cambios de frecuencia de *G. bulloides*.

Reuniendo en una gráfica los valores de $\delta^{13}\text{C}$ del sondeo KC8241 y los de las frecuencias de *G. bulloides* en nuestro sondeo (asignando a los niveles correspondientes a bioeventos las correspondientes edades absolutas e interpolando los valores interme-

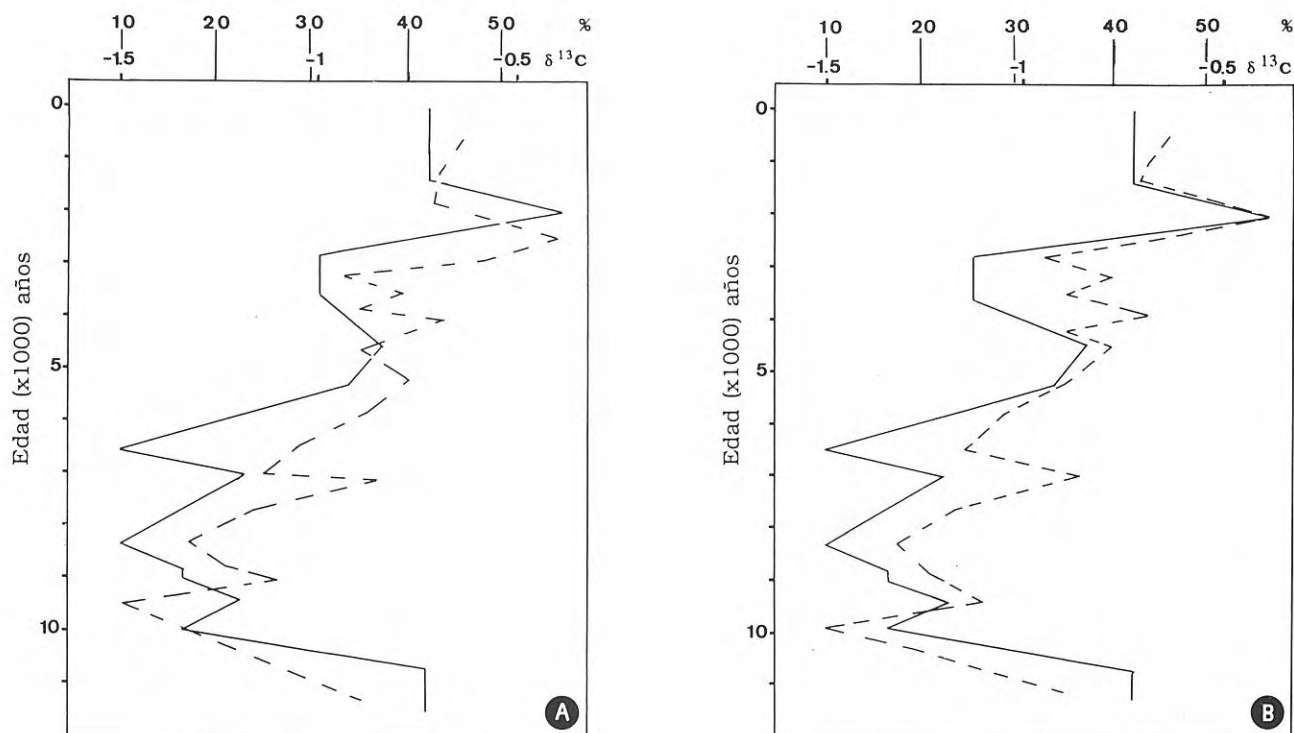


Figura 9. Frecuencias relativas de *G. bulloides* en el sondeo estudiado (línea de trazo discontinuo) y valores de $\delta^{13}\text{C}$ (línea de trazo continuo) en el sondeo KC8241 (Pujol y Vergnaud-Grazzini, 1989); **A:** la serie de *G. bulloides* se correlaciona con la de $\delta^{13}\text{C}$ asignando a los bioeventos identificados en el sondeo aquí estudiado las edades absolutas indicadas por Pujol y Vergnaud-Grazzini (1989, tabla IV); **B:** ajuste de los desfases, suponiendo que las edades indicadas para los niveles del sondeo KC8241 son correctas.

dios) se observa que las dos secuencias son similares, pero están desfasadas (Fig. 9a); realizando los correspondientes ajustes, la coincidencia entre las amplitudes de las variaciones de ambas secuencias es realmente notable (Fig. 9b) y los bioeventos pasan a tener las edades absolutas que se indican en la parte derecha de la Tabla 2, si son correctas las edades indicadas por Pujol y Vergnaud-Grazzini para los niveles del sondeo KC8241. Entonces, los cambios observados en la frecuencia de *G. bulloides* en nuestro sondeo se pueden explicar como debidos, fundamentalmente, a variaciones de la productividad estival.

Pero esto, además, puede explicar la poca correspondencia entre las magnitudes de los cambios de temperatura y de *N. pachyderma*. Esta especie, según Pujol y Vergnaud-Grazzini (1989) se desarrolla preferentemente en invierno, entre 100 y 400 m de profundidad, si la columna de agua está verticalmente homogeneizada, lo que permite mayor surgencia de nutrientes profundos y, por tanto, mayor productividad. Los cambios de estratificación general afectarían entonces de manera inversa a *N. pachyderma* y *G. bulloides*: una intensificación general de la estratificación supondría menor homogeneización invernal de la columna de agua y, por tanto, menor aporte de nutrientes profundos, con la consiguiente menor productividad invernal, que se traduciría en unas condiciones más desfavorables para *N. pachyderma*; sin embargo, el aumento de estratificación daría lugar a una mayor concentración de nutrientes

en la nutriclina estival, con el consiguiente aumento de la productividad en la misma y, por tanto, condiciones más favorables para la proliferación de *G. bulloides*. Un debilitamiento de la estratificación general tendría consecuencias opuestas. El modelo sería entonces el siguiente: un cambio de temperatura tendería a producir un cambio de frecuencia de *N. pachyderma* de magnitud equiparable y sentido inverso, pero su efecto podría ser parcialmente contrarrestado, en algunos casos, por cambios de la estratificación de sentido contrario a los de temperatura.

De acuerdo con esto, los incrementos de temperatura en 22-21, 21-20 y 19-18, que están acompañados por pequeños descensos de la frecuencia de *N. pachyderma* (Tabla 6), coincidirían con disminuciones de la estratificación general; así, aumentaría la productividad de invierno, lo que contrarrestaría en parte los efectos negativos del aumento de temperatura sobre *N. pachyderma*; pero esto supondría, también, disminución de la estratificación estival con lo que la concentración de nutrientes reciclados en la nutriclina disminuiría y, por ende, la productividad estival, la frecuencia de *G. bulloides* y el $\delta^{13}\text{C}$ medido en la concha de esta especie.

Los incrementos de temperatura en 20-19 y 16-15 están acompañados por importantes descensos de la frecuencia de *N. pachyderma*. En este caso, por el contrario, la estratificación general aumentaría, con lo que el efecto negativo del incremento de la temperatura invernal sobre *N. pachyderma* se vería reforzado por una disminución de los nutrientes

profundos y, por tanto, de la productividad invernal, mientras que la estival, al haber mayor retención de nutrientes reciclados, aumentaría y, de ahí, las subidas de porcentajes de *G. bulloides*.

Siguiendo la misma línea de argumentación, los dos aumentos de frecuencia de *N. pachyderma* que se detectan en 23-22 y 18-17 corresponderían a decrementos de la temperatura, el segundo coincidente con un aumento de la homogeneización invernal, fruto de un descenso de la estratificación general; así, el descenso de temperatura, que favorecería la proliferación de *N. pachyderma*, sería reforzado por un aumento de la productividad invernal, pero la estival descendería al disminuir la concentración de nutrientes retenidos en la nutriclina y, por tanto, descendería la frecuencia de *G. bulloides*.

Atendiendo a los cambios de frecuencia de *G. ruber*, en la Tabla 6 se puede ver cómo se corresponden con otros de temperatura de igual signo y que las magnitudes relativas de ambas series de cambios no son tan dispares como en el caso de *N. pachyderma*. La única discrepancia radica en el descenso de temperaturas en 23-22, al que corresponde un aumento de las frecuencias de *G. ruber*, pero dado el pequeño número de ejemplares implicados (1 y 3, respectivamente) es obvio que la "anomalía" se explica por un error de muestreo. La temperatura es, por tanto, suficiente para explicar las frecuencias en el caso estudiado.

Procediendo de igual manera con las variaciones de frecuencia de *G. inflata*, se detectan 6 cambios del mismo signo que los de temperaturas y 2 de signo contrario. Ahora bien, hasta el nivel 17 los porcentajes de *G. inflata* son muy bajos, menores del 5%, y las diferencias no son estadísticamente significativas, con lo que el sentido de los cambios de frecuencia puede estar determinado también por errores de muestreo; en los niveles restantes, los dos cambios de frecuencia son del mismo signo que los de paleotemperaturas.

2b) Secuencia 15-1

Aceptando la interpretación brindada para los cambios en la secuencia anterior, la de ésta es más sencilla.

En el caso de *N. pachyderma* (más intermedios *N.p./N.d.*) se advierten 7 cambios en el mismo sentido que los de temperatura y 7 en el contrario, pero sólo 5 son significativos y 3 de ellos (13-12, 10-9 y 9-8) son del mismo sentido que los cambios de temperatura. Este último aspecto es, evidentemente, anómalo si se acepta que los cambios de frecuencia de la especie están inversamente correlacionados con los de temperatura; una posible solución sería pensar que durante este intervalo, medioambientalmente desfavorable para ella, su abundancia se correlacionaría fundamentalmente con la productividad invernal; habida cuenta que los 3 cambios de igual signo que los de temperatura coinciden con cambios de signo contrario en la frecuencia de *G. bulloides*, cabe pensar en variaciones de la estratificación como en la primera parte de la secuencia: aumentos de *N.*

pachyderma acompañados por disminuciones de *G. bulloides* significarían mayor homogeneidad vertical, con el consiguiente aumento del aporte de nutrientes profundos en invierno (incremento de la productividad invernal y aumento de *N. pachyderma*) y menor retención de nutrientes reciclados en la nutriclina estival (disminución de la productividad estival en la nutriclina y de *G. bulloides*).

Cuando la comparación se efectúa con las frecuencias de *G. ruber*, la situación varía: 9 cambios son del mismo signo y 4 inversos a los de temperaturas, pero sólo 2 son significativos y ambos, como es esperable, del mismo signo que los de temperaturas. Ahora bien, aunque sólo estos 2 cambios sean significativos, la secuencia 15-1 muestra en conjunto un neto descenso de frecuencias, desde un máximo que corresponde, precisamente, al nivel 15 (25,6% de frecuencia), a porcentajes del orden del 5% en los niveles más recientes. Este cambio de frecuencias no puede explicarse en función de cambios de temperatura y salinidad, suponiendo que las estimaciones realizadas con la función de Kipp (1976) sean correctas; haría falta que las secuencias de temperaturas y/o salinidades fuesen también decrecientes dentro del universo de muestreo recogido por Loubere (1981). Si se comparan, entonces, las secuencias de cambios de frecuencia de *G. bulloides* y de *G. ruber*, se detectan 6 cambios de igual sentido y 8 de sentido contrario; procediendo de igual manera con la secuencia de *G. inflata*, se observan también 6 de igual sentido y 8 contrarios, aunque no coincidentes con los anteriores; ni la productividad estival en la nutriclina (*G. bulloides*) ni la invernal (*G. inflata*, como después veremos) parecen ser, por tanto, los responsables del descenso de *G. ruber*. Otras comparaciones tampoco resuelven el problema. Por ejemplo, la función de Kipp (1976) para temperaturas de verano a 100 m de profundidad, genera una secuencia decreciente, coincidente a grandes rasgos —pero no en todos— con la de *G. ruber*, pero este organismo vive en aguas superficiales. La estacionalidad, medida como diferencia entre las temperaturas superficiales de agosto y febrero, es también decreciente y a grandes rasgos coincidente con la de *G. ruber*, pero es difícil interpretar tal relación, si es que existe y no es una coincidencia. En resumen, a no ser que los cambios de los porcentajes de *G. ruber* no reflejen cambios de la frecuencia absoluta de esta especie, sino cambios de las otras más abundantes (*G. inflata* y *G. bulloides*), el descenso de frecuencia de la especie hay que interpretarlo con algún factor medioambiental no considerado aquí, como puede ser la productividad otoñal.

La secuencia de cambios de *G. inflata* durante el tramo 15-1, que comienza con un espectacular aumento de la frecuencia en 15-14, coincide, en buena parte, con la de cambios de temperatura: 9 cambios son del mismo signo y 4 inversos; de los 4 significativos, 3 (15-14, 9-8 y 4-3) son del mismo signo y 1 (5-4) de signo contrario; es evidente que la temperatura juega un importante papel en la determinación de las frecuencias de *G. inflata*, tras alcanzarse el mínimo necesario para su proliferación (en 15-14), pero también es evidente que no es el único

factor. Dado que todos los cambios significativos de *G. inflata* van acompañados por cambios de *G. bulloides* de signo contrario, una explicación (en la línea de la que se citó previamente) sería, siguiendo a Pujol y Vergnaud-Grazzini (1989), que los aumentos de *G. inflata* se correlacionan con aguas poco estratificadas y ricas en nutrientes durante el invierno y principio de primavera, mientras que los de *G. bulloides* corresponderían a aguas bien estratificadas, con aumento de la nutriclina subsuperficial de nutrientes reciclados, de manera análoga a como ocurría con el par *N. pachyderma-G. bulloides*; de acuerdo con esta interpretación, *G. inflata* sustituiría ecológicamente a *N. pachyderma* al subir la temperatura de las aguas, a partir del nivel 15.

3) Sobre el significado de los ejes principales

Si se reúnen en una gráfica (Fig. 10) los valores de temperaturas invernales estimados con la función de Kipp (1976) y los valores de $\delta^{13}\text{C}$, asignados por correlación con el sondeo KC8241 de Pujol y Vergnaud-Grazzini (1989), se puede apreciar como los niveles se ordenan según una parábola, de manera similar a lo que ocurre en el diagrama de los ejes I y II del análisis factorial en modo *Q*, aunque se aprecien algunas diferencias. Dado que la abundancia relativa de las especies determina la ordenación conseguida en el modo *Q*, habría que pensar que son la temperatura y la productividad los principales factores responsables de las frecuencias relativas de las especies y, por tanto, de la composición de cada muestra. Así, comparando ambas gráficas (Figs. 4b y 10) se observa que los valores en el eje I del análisis factorial parecen estar directamente correlacionados tanto con la temperatura como con la productividad, pues los niveles que toman en él valores positivos altos se corresponden, a grandes rasgos, con situaciones de alta temperatura y productividad; por otra parte, los valores positivos en el eje II se correlacionan directamente con la temperatura y, en menor medida, inversamente con la productividad.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Prof. Maldonado, del Instituto de Ciencias del Mar de Barcelona (C.S.I.C.), el habernos cedido amablemente las muestras del sondeo CO-81-2; K-15.

BIBLIOGRAFÍA

- Bé, A. W. 1977. An ecological, zoogeographic and taxonomic review of recent planktonic foraminifera. In: *Oceanic Micropaleontology*, A.T.S. Ramsay (Ed.). Academic Press, London, 1, 1-100.
- Bé, A. W. and Tolderlund, D. S. 1971. Distribution and ecology of living planktonic foraminifera in surface waters of the Atlantic and Indian oceans. In: *The micropaleontology of oceans*. Funnell, B. M. y Riedel, W. R. (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, 105-149.
- Be, A. W. and Hamlin, W. H. 1967. Ecology of Recent planktonic Foraminifera: Part 3. Distribution in the North Atlantic during the summer of 1962. *Micropaleontology*, 13, 87-106.
- Berger, W. H. and Gardner, J. V. 1975. On the determination of pleistocene temperatures from planktonic foraminifera. *Journal of Foraminiferal Research*, 5, 102-113.
- Blanc, F., Blanc-Vernet, L., Laurec, A., Le Champion, J. et Pastouret, L. 1975. Application paléocéologique de la méthode d'analyse factorielle in composantes principales: II. Étude des spèces de Méditerranée Orientale. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 18, 293-312.
- Blanc, F., Blanc-Vernet, L., Laurec, A., Le Champion, J. et Pastouret, L. 1976. Application paléocéologique de la méthode d'analyse factorielle en composantes principales: III. Les séquences paléoclimatiques. Conclusions générales. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 20, 277-296.
- Boltovskoy, E. and Wright, R. 1976. *Recent Foraminifera*. Dr. W. Junk b. v. Publishers, The Hague, 515 pp.
- Bouvier-Soumagnac, Y. and Duplessy, J.C. 1985. Carbon and oxygen isotopic composition of planktonic foraminifera from laboratory culture, plankton tows and Recent sediment: Implications for the reconstruction of paleoclimatic conditions and of the global carbon cycle. *Journal of Foraminiferal Research*, 15, 302-320.
- Davis, J. C. 1973. *Statistics and data analysis in Geology*. John Wiley & Sons, New York, 550 pp.
- Davis, J. C. 1986. *Statistics and data analysis in Geology*. Second edition. John Wiley & Sons, New York, 646 pp.

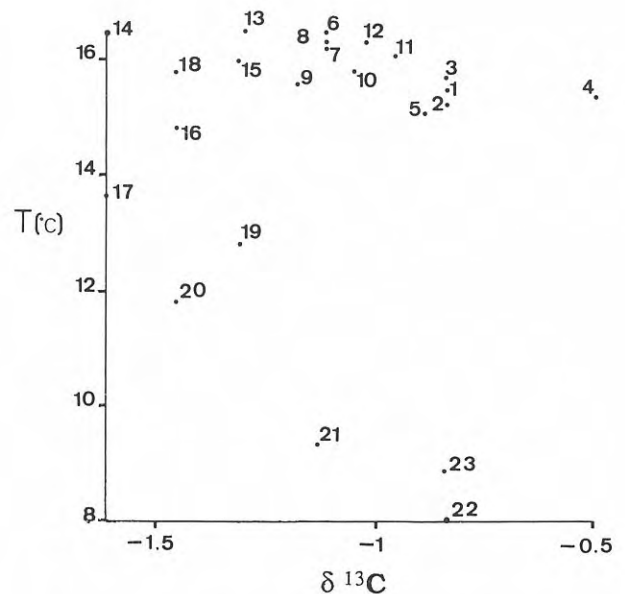


Figura 10. Distribución de los niveles del testigo de sondeo en el diagrama que relaciona la temperatura invernal (estimaciones obtenidas con la función de Kipp, 1976) y los valores de $\delta^{13}\text{C}$ en las conchas de *G. bulloides*—productividad estival— (los valores de $\delta^{13}\text{C}$ se han inferido a partir de los datos de Pujol y Vergnaud-Grazzini, 1989; ver Fig. 9).

- Díaz, J. I. y Maldonado, A. 1985. Facies y procesos en los márgenes continentales del Mediterráneo Suroccidental: tratamiento estadístico de variables sedimentológicas. *Acta Geológica Hispánica*, **20**, 41-57.
- Duprat, J. 1983. Les foraminifères planctoniques du Quaternaire terminal d'un domaine péricontinental (Golfe de Gascogne, côtes Ouest-Ibériques, mer d'Alboran). Écologie-Biostratigraphie. *Bulletin Institut Géologique du Bassin d'Aquitaine*, **33**, 71-150.
- Gorshkov, S. (Ed.) 1979. *World Ocean Atlas, Vol. 2, Atlantic and Indian Oceans*. Pergamon Press, Oxford, 306 pp.
- Imbrie, J. and Kipp, N. G. 1971. A new micropalaeontological method for quantitative paleoclimatology: application to a late Pleistocene Caribbean core. In: *The Late Cenozoic glacial ages*, K. K. Turekian (Ed.), Yale University Press, 71-181.
- Kipp, N. G. 1976. A new transfer function for estimating past sea-surface conditions from sea-bed distributions of planktonic foraminiferal assemblages in the North Atlantic. *Memoirs of the Geological Society of America*, **145**, 3-41.
- Lipps, J. H. 1979. The ecology and paleoecology of planktic foraminifera. In: *Foraminiferal ecology and paleoecology*. SEPM short course, **6**, 62-104.
- Loubere, P. 1981. Oceanographic parameters reflected in the seabed distribution of planktic foraminifera from the North Atlantic and Mediterranean Sea. *Journal of Foraminiferal Research*, **11**, 137-158.
- Loubere, P. 1982. The Western Mediterranean during the last glacial: attacking a no-analog problem. *Marine Micropaleontology*, **7**, 311-325.
- Luz, B. and Bernstein, M. 1976. Planktonic foraminifera and quantitative paleoclimatology of the Eastern Mediterranean. *Marine Micropaleontology*, **1**, 307-323.
- Muerdter, D. R., Kennett, J. P. and Thunell, R.C. 1984. Late quaternary sapropel sediments in the Eastern Mediterranean Sea. Faunal variations and chronology. *Quaternary Research*, **21**, 385-403.
- Parker, F. L. 1962. Planktonic foraminiferal species in Pacific sediments. *Micropaleontology*, **8**, 219-254.
- Pujol, C. 1980. Les foraminifères planctoniques de l'Atlantique nord au Quaternaire. Écologie-stratigraphie-environnement. *Mémoires de l'Institut de géologie du Bassin d'Aquitaine*, **X**, 254 pp.
- Pujol, C. and Vergnaud-Grazzini, C. 1989. Paleogeography of the Last Deglaciation in the Alborán Sea (Western Mediterranean). Stable isotopes and planktonic foraminiferal records. *Marine Micropaleontology*, **15**, 153-179.
- Reyment, R. A., Blackith R. E. and Campbell, N. A. 1984. *Multivariate Morphometrics*. Academic Press, London, 233 pp.
- Ruddiman, W. F. 1977. Investigations of Quaternary climate based on planktonic foraminifera. In: *Oceanic Micropaleontology*. A.T.S. Ramsay (Ed.). Academic Press, London, **1**, p. 101-162.
- Siegel, S. 1986. *Estadística no paramétrica*. Trillas, México D.F., 344 pp.
- Sneath, P. H. A. and Sokal, R. R. 1973. *Numerical taxonomy*. W. H. Freeman and Company, San Francisco, 573 pp.
- Spero, H.J. and Williams, D.F. 1988. Extracting environmental information from planktonic foraminiferal $\delta^{13}C$ data. *Nature*, **335**, 717-719.
- Thiede, J. 1978. A glacial Mediterranean. *Nature*, **276**, 680-683.
- Thunell, R. C. 1978. Distribution of recent planktonic foraminifera in surface sediments of the Mediterranean Sea. *Marine Micropaleontology*, **3**, 147-173.
- Thunell, R. C. 1979. Pliocene-Pleistocene paleotemperature and paleosalinity history of the Mediterranean Sea: Results from DSDP Sites 125 and 132. *Marine Micropaleontology*, **4**, 173-187.
- Thunell, R. C. and Lohmann, G. P. 1979. Planktonic foraminiferal fauna associated with Eastern Mediterranean Quaternary stagnations. *Nature*, **281**, 211-213.
- Thunell, R. C. and Williams, D. F. 1983. Paleotemperature and paleosalinity history of the Eastern Mediterranean during the late Quaternary. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **44**, 23-39.
- Vergnaud-Grazzini, G., Devaux, M. and Znaidi, J. 1986. Stable isotope "anomalies" in Mediterranean Pleistocene records. *Marine Micropaleontology*, **10**, 35-69.

Manuscrito recibido: 12 de febrero, 1991.

Manuscrito aceptado: 10 de mayo, 1991.