

# ANÁLISIS MULTIVARIANTE DE LAS ASOCIACIONES DE FORAMINÍFEROS PLANCTÓNICOS DE LOS SEDIMENTOS TORTONIENSES DE LA CUENCA DE LA ATALAYA (CORDILLERA BÉTICA, ESPAÑA)

Francisco SERRANO, Paul PALMQVIST, Antonio GUERRA-MERCHÁN  
y Alex ROMERO

Departamento de Geología, Facultad de Ciencias, Universidad. E-29071 Málaga

## ABSTRACT

A biostratigraphic study of planktonic foraminifers from the Atalaya basin (Murcia, Spain) reveals a very thick Tortonian sequence, which is relatively complete. The biostratigraphic intervals recognised are those of *Neogloboquadrina acostaensis* and *Neogloboquadrina humerosa*, which correspond to the Lower and Upper Tortonian, respectively. The assemblages of planktonic foraminifers are studied quantitatively by means of principal component analysis and clustering methods. *R*-mode analyses show assemblages with poor correlation. *Q*-mode analyses suggest a temporal ordering of samples into seven groups, which are internally highly correlated. The changes in the diversity and equitability of samples are also studied. The obtained results seem to reflect a slow and progressive water cooling during the Tortonian. The abrupt change from dextrally dominated populations of *Neogloboquadrina* to predominantly sinistral ones is interpreted as a consequence of the income of temperate Atlantic waters into the Western Mediterranean. Finally, the variations in the ratios of planktonic/total foraminifers and agglutinated/total bentonics are compared and it is concluded that both seem to be more related to the tectosedimentary evolution of the basin and the events that occurred in the eastern sector of the Betic Cordillera, than with important eustatic changes.

**Keywords:** Betic Cordillera, Tortonian, planktonic foraminifers, multivariate analysis.

## RESUMEN

El estudio bioestratigráfico de los foraminíferos planctónicos de la cuenca de la Atalaya pone de manifiesto la existencia de una secuencia tortoniense muy potente y relativamente completa. Se pueden reconocer los intervalos de *Neogloboquadrina acostaensis* y *Neogloboquadrina humerosa*, correspondientes al Tortoniense inferior y superior, respectivamente. Se han realizado análisis de componentes principales y de grupos sobre las asociaciones de foraminíferos planctónicos. Los análisis en modo *R* muestran, en general, asociaciones de especies con baja correlación, mientras los análisis en modo *Q* ordenan las muestras en siete grupos, con valores de correlación interna altos y estrecha relación temporal. También se analiza la diversidad y equitabilidad de las muestras. Los resultados obtenidos parecen reflejar un lento y débil, pero progresivo, enfriamiento de las aguas a lo largo del Tortoniense. El brusco cambio de enrollamiento predominante de dextrorso a sinistorso en *Neogloboquadrina* se interpreta debido a la entrada de las aguas atlánticas templadas al Mediterráneo. Finalmente, se comparan las variaciones de los porcentajes de planctónicos respecto al total de foraminíferos y de los aglutinantes respecto del conjunto de foraminíferos bentónicos, y se concluye que parecen estar más relacionadas con la evolución de la cuenca y los fenómenos acontecidos en el sector oriental de la Cordillera Bética que con cambios eustáticos importantes.

**Palabras clave:** Cordillera Bética, Tortoniense, foraminíferos planctónicos, análisis multivariante.

## INTRODUCCIÓN

La cuenca neógena de la Atalaya se localiza en la provincia de Murcia, al *SE* de la capital, entre las elevaciones de la Sierra de la Cresta del Gallo y la Sierra de Columbares. Está instalada sobre un substrato perteneciente a las Zonas Internas de la Cordillera Bética (Fig. 1). El estudio geológico regional ha sido abordado principalmente por Montenat (1973; 1977) y por Núñez *et al.* (1976). Estudios micropaleontológicos han sido llevados a cabo por Martínez (1969) y por Montenat y Martínez (1970).

La cuenca de la Atalaya destaca por la enorme potencia de sedimentos que se acumularon durante el Mioceno Superior. Particularmente para el Tortoniense, muestra una de las secuencias sedimentarias aflorantes más potentes y completas de la Cordillera Bética.

El análisis micropaleontológico permite detectar los biohorizontes más utilizados en las escalas bioestratigráficas basadas en foraminíferos planctónicos (Blow, 1969; D'Onofrio *et al.*, 1975; Zachariasse, 1975; Serrano, 1979; Bolli y Saunders, 1985).

En este trabajo se aborda el estudio de las variaciones poblacionales de foraminíferos planctónicos utilizando la metodología multivariante y se correlacionan con las modificaciones temporales observadas en el conjunto de los foraminíferos. Finalmente, se comparan las variaciones eustáticas deducidas por Haq *et al.* (1987) con los resultados obtenidos, a fin de deducir posibles relaciones de las variaciones poblacionales

con los cambios de masas de agua en la zona de comunicación marina Atlántico-Mediterráneo por el estrecho Nord-Bético durante el Tortoniense.

## LOS SEDIMENTOS TORTONIENSES DE LA CUENCA DE LA ATALAYA

La depresión de la Atalaya está ocupada por una potente serie margo-areniscosa de edad Tortoniense, que se puede seguir con bastante continuidad a través de la carretera comarcal que accede a la Sierra de Columbares por el puerto del Garruchal.

Una descripción de las características litológicas y estratigráficas ha sido realizada por Montenat (1973; 1977), donde señala la existencia de más de 1800 m de sedimentos tortonienses. En función de las buenas condiciones de exposición y su potencia, dicho autor definió la formación de la Atalaya (Montenat, 1973) para referirse a los materiales margoareniscosos tortonienses, eligiendo esta sección como secuencia tipo (Fig. 2).

La serie tortoniense comienza por un tramo detrítico compuesto por conglomerados y areniscas rojas depositados en ambientes continentales de abanicos aluviales. Hacia arriba, la sedimentación evoluciona a depósitos de transición marino-continental, donde alternan capas de areniscas y a veces conglomerados con capas detríticas más finas, general-

mente areniscas margosas con fauna. El conjunto supera los 200 m de potencia y compone la mayor parte de los relieves de la Cresta del Gallo.

Sobre los términos descritos comienza la serie francamente marina. La parte inferior de esta secuencia está constituida por unos 300-400 m de margas micáceas pardas con abundantes intercalaciones de areniscas turbidíticas que, en algunos tramos, dominan en potencia a los niveles margosos, especialmente hacia el techo. Por encima, descansa una potente serie formada principalmente por capas margosas, pero entre las que aún se siguen observando frecuentes intercalaciones de areniscas turbidíticas. El techo de este tramo está marcado por una discordancia suave, reflejo de una etapa de deformación intratortoniense provocada por una compresión *NW-SE* (Ott d'Estevou y Montenat, 1985), la cual ha sido detectada en la mayoría de las cuencas neógenas de la Cordillera Bética. Este conjunto sedimentario tortoniense, que abarca los términos detríticos rojos y las margas marinas con turbiditas, es denominado generalmente como Tortoniense I (*sensu* Montenat, 1973) para el conjunto de las cuencas neógenas de la Cordillera.

Sobre la discordancia se encuentran unos metros de gravas amarillentas con abundante matriz arenosa, que pasan gradualmente, en unas decenas de metros, a un nuevo tramo de unos 500 m de potencia, constituido por margas de tonos más claros que las anteriores, también con intercalaciones turbidíticas. En la parte alta de este tramo comienzan a intercalarse capas de areniscas no turbidíticas que, junto con depósitos de conglomerados canalizados, se hacen totalmente dominantes durante un tramo de unos 150 m, constituyendo los resaltes de Columbares. Depósitos correlacionables con este conjunto superior a la discordancia se encuentran ampliamente representados en la mayoría de las cuencas neógenas de la Cordillera Bética, denominados generalmente como Torto-

niense II (Montenat, 1973). Aunque en la cuenca de la Atalaya no se percibe discordancia en el techo del Tortoniense II, este episodio sedimentario terminó, globalmente en la Cordillera, con una fase tectónica caracterizada por compresión *N-S*, con movimientos transcurrentes de los sistemas de fracturas conjugadas *NW-SE* y *NE-SW* (Sanz de Galdeano, 1983). Este evento tectónico, unido a la tendencia regresiva que se manifiesta en el techo de las series, provocó un cambio paleogeográfico notable en la Cordillera, dejando las cuencas del sector central de la Cordillera (Antequera, Granada, Alcalá la Real, Guadix, Lorca) desconectadas de los medios marinos, continuando su relleno sedimentario con facies continentales (Rodríguez Fernández, 1982).

Por encima de las areniscas de Columbares se encuentra otro potente tramo margoso de tonos muy claros, que constituye las margas de Torremendo del Mioceno terminal (Montenat, 1973; 1977). El paso de las areniscas de Columbares a las Margas de Torremendo se realiza de forma rápida pero transicional, alternando capas de areniscas y de margas claras.

## BIOESTRATIGRAFÍA Y CRONOESTRATIGRAFÍA

El primer nivel margoso muestreado, depositado sobre las facies detríticas rojas, contiene una microfauna marina constituida casi exclusivamente por foraminíferos aglutinantes, predominantemente *Trochammina* y *Astrorhycidae*, y escasos restos carbonosos. Este nivel no ha sido incluido en la base de datos debido a la ausencia de foraminíferos planctónicos. En un nivel algo superior (21) los foraminíferos aglutinantes siguen siendo muy abundantes, pero ya se encuentran bien representados los foraminíferos bentónicos calcáreos, cuya asociación está formada principalmente por *Ammonia*, *Cibicides*, *Florilus* y *Pullenia*. Los foraminíferos planctónicos del nivel 21 representan sólo el 11,77% del conjunto, pero cabe destacar la abundancia del grupo de *Globorotalia menardii* (28% del total de planctónicos).

En relación con los foraminíferos planctónicos de mayor valor bioestratigráfico, desde los primeros niveles se detecta la presencia de *Neogloboquadrina acostaensis* (Blow), que muestra crecimiento predominantemente dextrorso. Por el contrario, en estos primeros niveles no se encuentran formas asimilables a *Neogloboquadrina humerosa* (Takayanagi y Saito). Todo ello permite asignar la base de la sección a la zona de *N. acostaensis* (Serrano, 1979), correspondiente al Tortoniense inferior, de acuerdo con la correlación bio-cronoestratigráfica de la Fig. 2.

En el nivel 34 se observan los primeros ejemplares asignables a *N. humerosa*, aún con morfologías poco desarrolladas, del tipo *Neogloboquadrina praehumerosa* (Natori); en todos los niveles anteriores, las asociaciones de *Neogloboquadrina* siguen mostrando crecimiento predominantemente dextrorso. El biohorizonte de primera aparición de *N. humerosa* permite marcar la base de la zona de *N. humerosa* y ha sido utilizado para caracterizar el comienzo del Tortoniense superior (Serrano, 1979).

El crecimiento dextrorso de *Neogloboquadrina* sigue siendo predominante hasta el nivel 41 (sólo en el nivel 38 los porcentajes de ejemplares dextrorsos y sinistrorsos son muy similares). A partir del nivel 42, los ejemplares sinistrorsos predominan permanentemente y en porcentajes normalmente superiores al 80%. El intervalo de *Neogloboquadrina* dextrorsa con presencia de *N. humerosa* permite diferenciar una parte baja del Tortoniense superior. La discordancia observada entre los niveles 37 y 38 se localiza, consecuentemente, dentro de este intervalo.

Los eventos bioestratigráficos que caracterizan la parte más alta de las secuencias tortonienses en el dominio mediterráneo, como pueden ser las apariciones de *Globorotalia sute-*

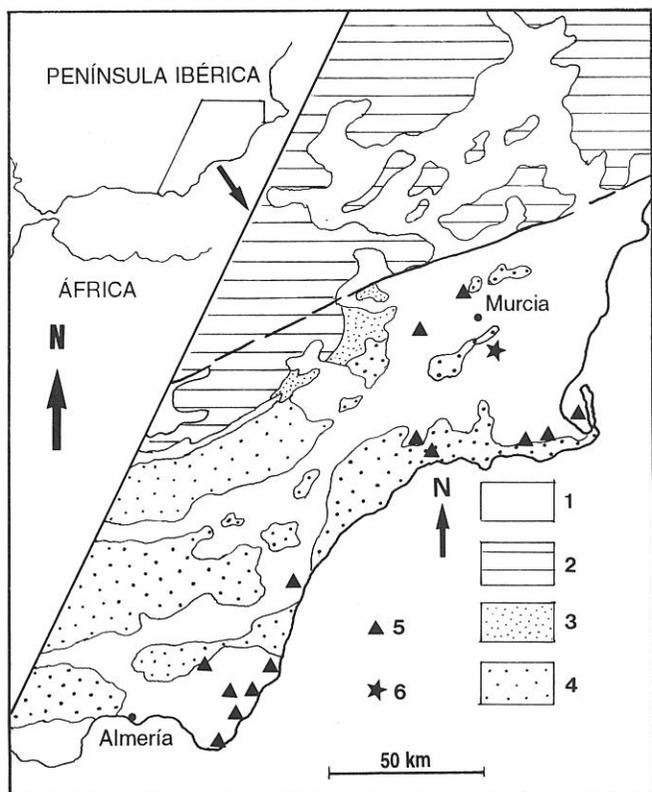


Figura 1. Esquema geológico del sector oriental de la Cordillera Bética. 1: Cuencas neógenas; 2: Zonas Externas; 3: Unidades afines al Complejo de los flyschs del Campo de Gibraltar; 4: Zonas Internas; 5: Áreas de actividad volcánica neógena; 6: Localización de la Cuenca de la Atalaya.

rae Catalano y Sprovieri y de *Globorotalia juanai* Bermúdez y Bolli, o la presencia del grupo de *Globorotalia menardii* con ejemplares predominantemente dextrorsos durante un corto intervalo en el paso del Tortoniense al Messiniense (D'Onofrio *et al.*, 1975; González Donoso y Serrano, 1977; Serrano, 1979; Sierro, 1985), no han sido detectados en la sección de la Atalaya, lo que puede explicarse, al menos en parte, porque

los sedimentos más altos del Tortoniense corresponden a las areniscas de Columbares.

Por encima de las areniscas de Columbares, la muestra tomada en la base de las margas de Torremendo (nivel 48) contiene *Globorotalia mediterranea* Catalano y Sprovieri y las poblaciones de *Neogloboquadrina* siguen constituidas por formas predominantemente sinistrorsas. Estos sucesos bioestrati-

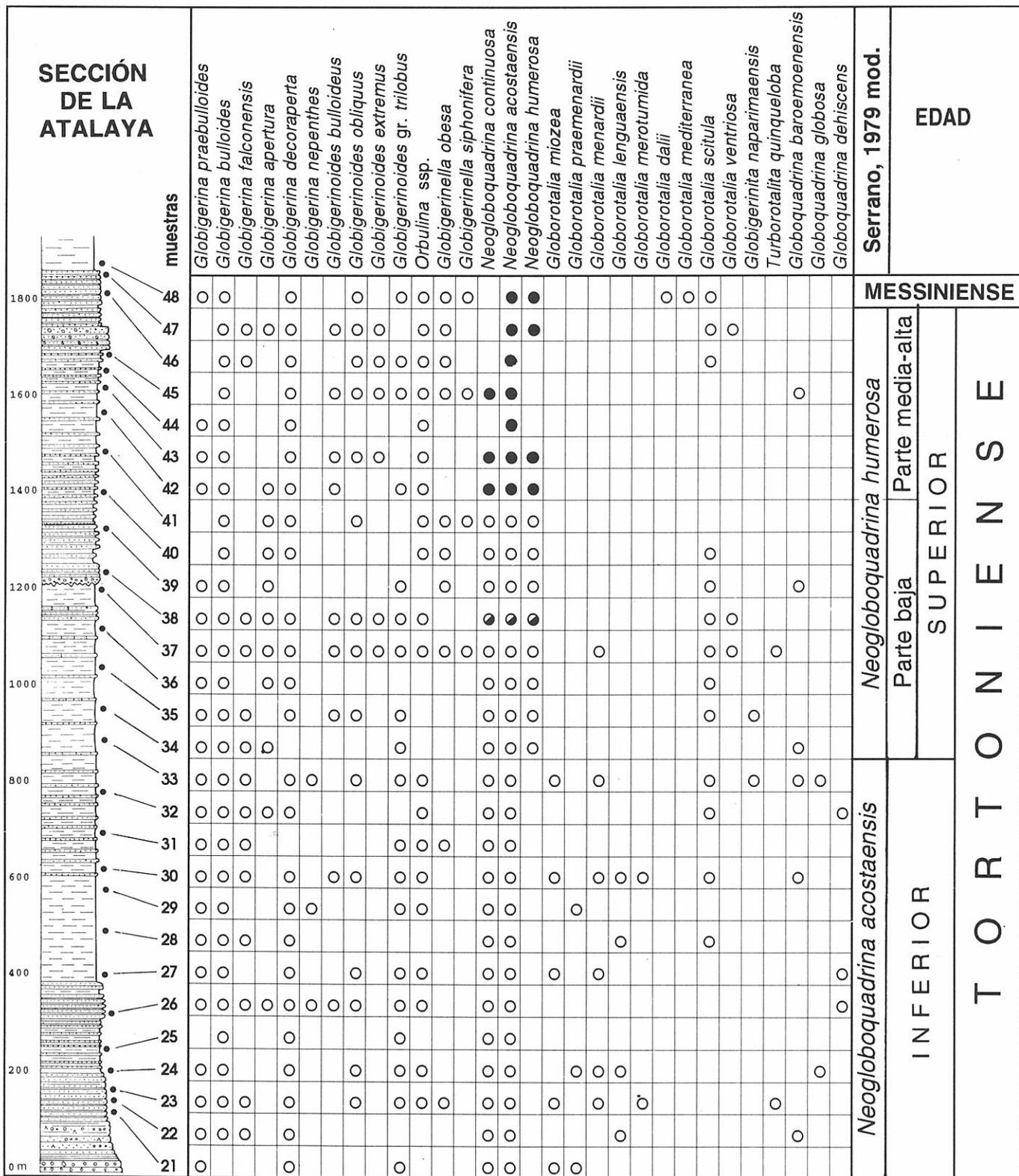


Figura 2. Distribución de los foraminíferos planctónicos en los sedimentos tortonienses de la Cuenca de la Atalaya y escalas bio y cronoestratigráfica utilizadas (para *Neogloboquadrina*: los círculos blancos representan predominio dextrorso y los círculos negros predominio sinistrorso). La secuencia estratigráfica ha sido extraída de Montecat (1977), donde se especifican las litologías (ver también texto).

**Grupo de *G. bulloides***

*Globigerina bulloides* d'Orbigny  
*Globigerina praebulloides* Blow  
*Globigerina falconensis* Blow  
*Globigerina riveroae* Bolli & Bermúdez

**Grupo de *G. decoraperta***

*Globigerina decoraperta* Takayanagi & Saito  
*Globigerina decoraperta* forma *conica* Serrano  
*Globigerina apertura* Cushman  
*Globigerina druryi* Akers  
*Globigerina nepenthes* Todd  
*Globigerinoides bulloideus* Crescenti

**Globoquadrina**

*Globoquadrina baroemoenensis* (Le Roy)  
*Globoquadrina globosa* Bolli)  
*Globoquadrina altispira* (Cushman & Jarvis)  
*Globoquadrina dehiscens* (Chap. Parr & Col.)

**Orbulina**

*Orbulina universa* d'Orbigny  
*Orbulina suturalis* Brönnimann  
*Orbulina bilobata* (d'Orbigny)

**Grupo de *G. obesa***

*Globigerinella obesa* (Bolli)  
*Globigerinella siphonifera* (d'Orbigny)

**Grupo de *G. obliquus***

*Globigerinoides obliquus* Bolli  
*Globigerinoides extremus* Bolli & Bermúdez  
*Globigerinoides amplus* Perconig  
*Globigerinoides bollii* Blow

**Grupo de *G. trilobus***

*Globigerinoides trilobus* (Reuss)  
*Globigerinoides inmaturus* LeRoy  
*Globigerinoides quadrilobatus* (d'Orbigny)  
*Globigerinoides irregularis* LeRoy  
*Globigerinoides sacculifer* (Brady)

**Neogloboquadrina (Grupos dextrorso+sinistorso)**

*Neogloboquadrina continuosa* (Blow)  
*Neogloboquadrina acostaensis* (Blow)  
*Neogloboquadrina humerosa* (Tak. & Saito)  
*Neogloboquadrina incompta* (Cifelli)  
*Neogloboquadrina pachyderma* (Ehremberg)

**Grupo de *G. scitula***

*Globorotalia scitula* (Brady)  
*Globorotalia ventriosa* Ogniben

**Grupo de *G. menardii***

*Globorotalia menardii* (Parker, Jones & Brady)  
*Globorotalia praemenardii* Cush. & Stainforth  
*Globorotalia miozea* Finlay

Tabla 1. Composición de los grupos de especies de foraminíferos planctónicos considerados en los análisis multivariantes.

	bull	decp	tril	obli	neod	neos	obes	scif	mena	glob	orbu
48	0,12	0,10	0,27	0,06	0,02	0,24	0,14	0,01	0,00	0,00	0,01
47	0,41	0,31	0,01	0,02	0,00	0,20	0,01	0,03	0,00	0,00	0,00
46	0,43	0,17	0,13	0,09	0,02	0,06	0,00	0,01	0,01	0,07	0,01
45	0,17	0,22	0,19	0,24	0,01	0,03	0,02	0,00	0,00	0,10	0,01
44	0,27	0,38	0,04	0,16	0,01	0,05	0,02	0,00	0,00	0,07	0,01
43	0,34	0,22	0,01	0,01	0,08	0,34	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01
42	0,14	0,24	0,01	0,00	0,22	0,39	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02
41	0,57	0,20	0,00	0,00	0,17	0,01	0,01	0,01	0,00	0,02	0,00
40	0,38	0,18	0,01	0,00	0,35	0,06	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00
39	0,23	0,03	0,01	0,00	0,63	0,08	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
38	0,22	0,29	0,05	0,05	0,16	0,16	0,01	0,01	0,00	0,01	0,03
37	0,37	0,08	0,07	0,00	0,42	0,02	0,01	0,00	0,00	0,02	0,00
36	0,43	0,07	0,00	0,00	0,39	0,03	0,00	0,01	0,00	0,05	0,00
35	0,56	0,06	0,00	0,00	0,31	0,01	0,00	0,01	0,00	0,03	0,00
34	0,43	0,13	0,00	0,00	0,42	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
33	0,63	0,02	0,03	0,01	0,27	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
32	0,31	0,10	0,00	0,00	0,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01
31	0,48	0,08	0,01	0,01	0,35	0,03	0,00	0,01	0,00	0,01	0,02
30	0,56	0,08	0,02	0,02	0,18	0,00	0,00	0,10	0,01	0,01	0,02
29	0,30	0,10	0,00	0,00	0,54	0,04	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
28	0,59	0,09	0,00	0,00	0,24	0,02	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00
27	0,46	0,23	0,01	0,00	0,16	0,02	0,00	0,00	0,00	0,08	0,02
26	0,11	0,43	0,01	0,10	0,32	0,00	0,01	0,00	0,00	0,02	0,01
25	0,00	0,40	0,20	0,10	0,07	0,03	0,10	0,00	0,00	0,10	0,00
24	0,19	0,18	0,01	0,03	0,54	0,04	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00
23	0,13	0,42	0,03	0,02	0,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08	0,01
22	0,00	0,05	0,00	0,05	0,26	0,08	0,00	0,00	0,00	0,60	0,00
21	0,04	0,20	0,00	0,04	0,16	0,00	0,00	0,00	0,32	0,24	0,00

Tabla 2. Abundancia relativa (en tantos por uno) de los grupos de especies de foraminíferos planctónicos en las muestras (**glob**: *Globoquadrina*; **mena**: grupo de *Globorotalia menardii*; **orbu**: *Orbulina*; **neos**: *Neogloboquadrina sinistorso*; **obli**: grupo de *Globigerinoides obliquus*; **obes**: grupo de *Globigerinella obesa*; **tril**: grupo de *Globigerinoides trilobus*; **decp**: grupo de *Globigerina decoraperta*; **neod**: *Neogloboquadrina sinistorso*; **scif**: grupo de *Globorotalia scitula*; **bull**: grupo de *Globigerina bulloides*).

gráficos son característicos del Messiniense inferior (D'Onofrio *et al.*, 1975; Zachariasse, 1975; Serrano, 1979; Iaccarino, 1985).

**RESULTADOS DEL ANÁLISIS MULTIVARIANTE**

La base de datos del conjunto de foraminíferos se ha elaborado a partir de la identificación de aproximadamente 300 individuos, separados de la muestra mediante un tamiz de 125 µm y seleccionados por un cuarteador. Una vez identificadas las distintas especies (morfortipos) de planctónicos, se agruparon por supuestas afinidades filogenéticas, de modo que los grupos reflejaran posibles poblaciones. Cada grupo se ha denominado con un nombre representativo, referente a una especie del grupo o al género que los engloba (Tabla 1). Sus abundancias relativas se recogen en la Tabla 2.

En el caso de *Neogloboquadrina*, el conjunto de los ejemplares se han separado en dos grupos de acuerdo con su sentido de crecimiento dextrorso o sinistorso, ya que parecen comportarse como dos poblaciones separadas. Además de los grupos indicados en la Tabla 1, también se distinguieron otros: grupo *Globorotalia mediterranea-dalii*, grupo *Globorotalia linguaensis-merotumida-pleiotumida*, grupo *Turborotalita*, grupo *Globigerinella* y grupo *Sphaeroidinellopsis*. Sin embargo, estos últimos no se han incluido en los análisis multivariantes, porque sus frecuencias relativas representan menos del 5% en todas las muestras y pueden presentar variaciones aleatorias en su abundancia, motivadas por errores sistemáticos de muestreo (véase Paul, 1992). Además, la ausencia común en la mayor parte de las muestras eleva artificialmente sus valores de correlación.

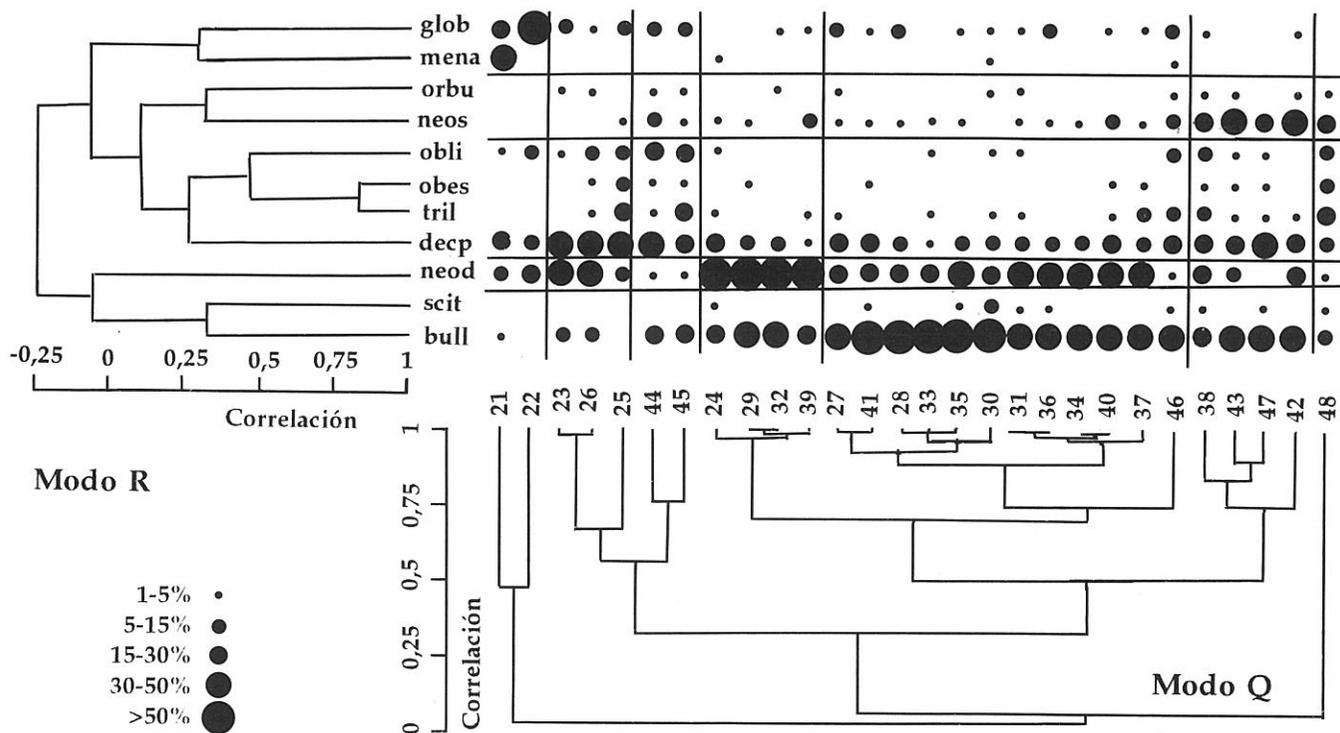


Figura 3. Dendrogramas obtenidos a partir del análisis de grupos según los modos R y Q. Las frecuencias relativas de los grupos de especies de foraminíferos planctónicos en las muestras se presentan de forma categorizada (mismas abreviaturas que en Tabla 2).

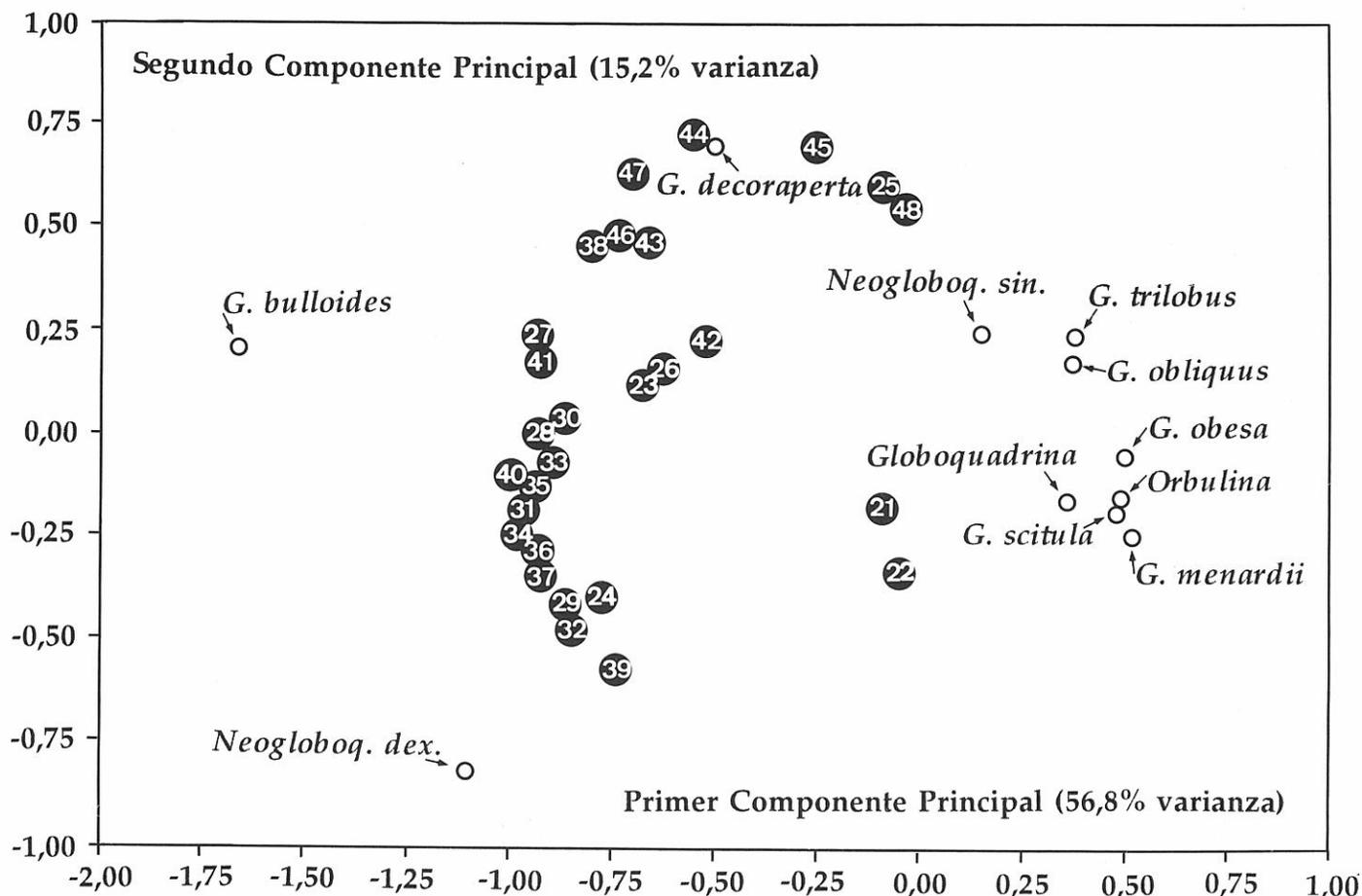


Figura 4. Resultados del análisis de componentes principales en modo Q. Se han representado los valores que toman las muestras y los factores de carga de las especies de foraminíferos planctónicos sobre los ejes I y II.

A partir de la semimatriz de correlaciones entre las muestras se realizó un análisis de componentes principales (Reyment *et al.*, 1984; Reyment y Jöreskog, 1993) y un análisis de grupos (Sneath y Sokal, 1973; Davies, 1986), ambos en modo *Q*. También se ha utilizado la semimatriz de correlaciones entre las especies para realizar un análisis de grupos en modo *R*. Los cálculos necesarios se efectuaron usando la versión 1.70 del programa informático *NTSYS-pc* (Rohlf, 1992).

### Análisis de grupos

Los resultados de los análisis de grupos se muestran en la Fig. 3, donde se han representado conjuntamente los dendrogramas en los modos *Q* y *R*, obtenidos ambos a partir de la secuencia aglomerativa *UPGMA* (Sneath y Sokal, 1973). En general, el análisis para las especies permite caracterizar asociaciones a niveles bajos de correlación, pues si exceptuamos el valor superior a 0,75 que mantienen *G. obesa* y *G. trilobus*, el resto de las correlaciones quedan por debajo de 0,5. En función de ello, hemos optado por utilizar un nivel de correlación superior a 0,25, diferenciando cinco grupos de especies: asociación *Globoquadrina* y *G. menardii*, asociación *O. univversa* y *Neogloboquadrina sinistrorsa*, asociación *G. obliquus*, *G. obesa*, *G. trilobus* y *G. decoraperta*, asociación *Neogloboquadrina dextrorsa* y asociación *G. scitula* y *G. bulloides*. Las frecuencias relativas de las distintas especies en las muestras, expresadas de forma categorizada (véase González Donoso *et al.*, 1991), permiten apreciar visualmente el significado de las agrupaciones conseguidas en los dendrogramas.

El análisis para las muestras indica la existencia de seis grupos, si tomamos valores de correlación por encima de 0,5. El primer grupo está constituido por las más bajas (21 y 22), quedando claramente separado del resto, con un valor promedio de correlación prácticamente nulo (0,03); incluso entre ellos mismos, el valor de correlación es bastante bajo, muy próximo a 0,5. Se caracteriza por el predominio de *Globoquadrina*, porcentajes de representación medios del grupo de *G. decoraperta* y de *Neogloboquadrina dextrorsa*, y proporciones muy bajas del grupo de *G. bulloides*.

El grupo 2 está formado por las muestras 23 y 26, con una correlación muy alta (0,97); a ellas se puede añadir la 25, una muestra algo anómala porque el número de individuos planctónicos encontrados ha sido muy bajo y, en consecuencia, los porcentajes son poco significativos. A pesar de ello, el grupo se puede caracterizar por el predominio de *G. decoraperta* y *Neogloboquadrina dextrorsa*, mientras que *G. bulloides* sigue estando representada con porcentajes bajos.

El grupo 3 está constituido por las muestras 44 y 45 (correlación 0,76), procedentes de la parte media del Tortoniense superior; se caracteriza por una distribución más homogénea de los grupos, con representaciones relativamente altas de *G. decoraperta*, *G. obliquus*, *G. bulloides* y *G. trilobus* y más bajas de *Neogloboquadrina* (con predominio sinistrorso).

El grupo 4 engloba a muestras (24, 29, 32 y 39; correlación promedio de 0,96) procedentes del Tortoniense inferior y de la parte baja del Tortoniense superior. Está caracterizado por el dominio de *Neogloboquadrina dextrorsa* (54-63 % del total de foraminíferos planctónicos) y una representación media-alta de *G. bulloides* (19-31 %).

El grupo 5 está compuesto por la mayor parte de las muestras tomadas en la parte alta del Tortoniense inferior y en la parte baja del Tortoniense superior. Si exceptuamos la muestra 46, que presenta una correlación (0,74) notablemente más baja que el resto (correlación media de 0,88), las características generales son semejantes a las del grupo anterior, también formado por muestras de edades parecidas. Realmente, ambos grupos muestran un valor de correlación alto entre sí (0,69) y podían haber sido considerados como uno solo; la separación se ha establecido, fundamentalmente, porque jun-

tos reúnen la mayor parte de las muestras. La diferencia esencial entre ambos es que *G. bulloides* ha pasado a ser predominante (37-63 %), sobrepasando a *Neogloboquadrina dextrorsa* (16-42 %), pero ambas poblaciones siguen siendo abundantes, dominando claramente en las asociaciones.

El grupo 6 contiene muestras procedentes de la parte media y alta del Tortoniense superior. En general, se caracteriza por un ligero predominio de *G. bulloides*, *G. decoraperta* y *Neogloboquadrina sinistrorsa*, pero con representación de casi todos los grupos en la mayoría de las muestras (ver Tabla 2 y datos de diversidad). La muestra 48, única procedente del Messiniense inferior, queda aislada del resto, constituyendo por sí sola un grupo independiente. La característica más destacable parece ser la homogeneidad en las proporciones de los grupos (si exceptuamos la ausencia de *G. menardii*, que es sustituida por *G. mediterranea*-*G. dali* y de *Globoquadrina*). Así pues, en este aspecto mantiene cierta semejanza con los grupos 3, 6 y la muestra 46.

### Análisis de componentes principales

En el análisis de componentes principales en modo *Q* (Fig. 4), los dos primeros ejes explican aproximadamente el 72 % de la varianza original de las muestras (56,79 y 15,15 %, respectivamente). El tercer eje explica el 11,95 %, valor que resulta próximo al que se obtiene siguiendo una distribución de varianzas conforme al modelo del bastón roto (14,03, 10,45 y 8,67 % para los tres primeros ejes, respectivamente), por lo que ya no ha sido considerado en la discusión. En esta figura se han representado tanto los valores obtenidos por las muestras en ambos componentes principales como los factores de carga de las variables (frecuencia relativa de las especies en las muestras). La distribución de las muestras en el diagrama factorial sigue una cierta forma de herradura que recuerda al efecto Guttman (véase Reyment y Jöreskog, 1993), indicadora de la existencia de un fuerte gradiente en su composición, que se puede interpretar a partir de los factores de carga de las especies en los componentes principales. Así, en función de estos últimos, el primer eje deja hacia sus valores negativos a las muestras en las que predominan *G. bulloides*, *Neogloboquadrina dextrorsa* y, en menor medida, *G. decoraperta*, mientras que hacia sus valores positivos se sitúan las que muestran una abundancia mayor en las restantes especies. Respecto al segundo componente principal, las muestras con frecuencias altas de *Neogloboquadrina dextrorsa* se disponen hacia los valores negativos, mientras que aquellas en las que predominan *G. decoraperta* y, en menor medida, *Neogloboquadrina sinistrorsa*, *G. bulloides*, *G. trilobus* y *G. obliquus* toman valores positivos en este eje; las muestras donde abundan más las restantes especies se sitúan sobre valores próximos a cero o ligeramente negativos.

### Otras variables analizadas

Además de los análisis desarrollados previamente, se han estimado otras variables: proporción de ejemplares sinistrorsos en el conjunto de *Neogloboquadrina*, proporción de planctónicos en relación al total de foraminíferos, frecuencia de formas aglutinantes respecto al conjunto de bentónicos, equitabilidad y diversidad de foraminíferos planctónicos.

El modo de crecimiento de *Neogloboquadrina* (Fig. 5C) permite dividir la sección en una parte inferior (hasta el nivel 41) correspondiente al Tortoniense inferior y a la parte baja del Tortoniense superior, con formas predominantemente dextrorsas, y una parte superior para el resto del Tortoniense (continuando durante el Messiniense inferior) con claro predominio sinistrorso.

La curva de proporción de planctónicos respecto al total

de foraminíferos (Fig. 5D) muestra unos valores iniciales bajos con una clara tendencia creciente hasta el nivel 28, a partir del cual se mantiene con valores próximos al 90 % durante la mayor parte del ciclo sedimentario tortoniense. La parte final de este ciclo se refleja con un descenso en la proporción de planctónicos.

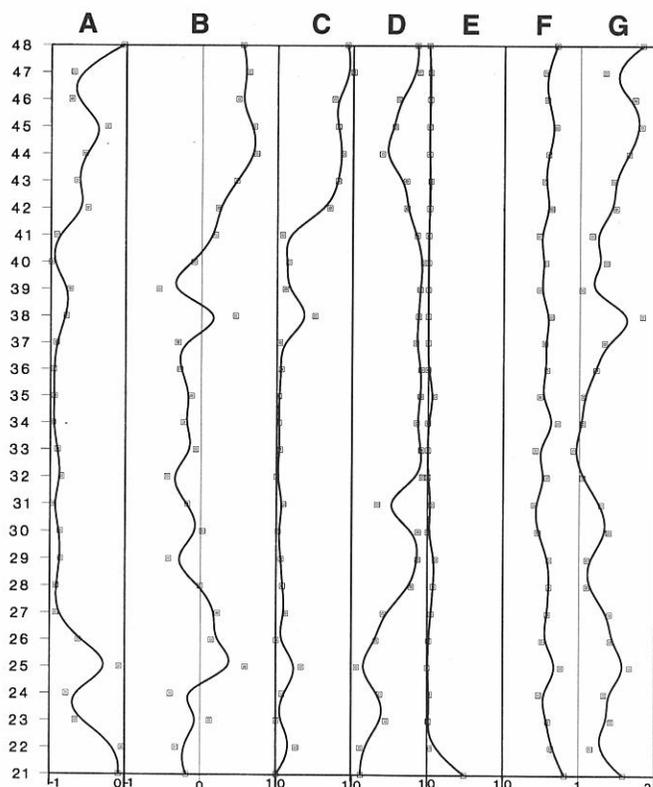
Los foraminíferos aglutinantes (Fig. 5E) son proporcionalmente muy abundantes en la base de la serie (nivel 21 y otros inferiores no incluidos en la base de datos), pero muestran valores muy bajos (normalmente <5 %) a partir del nivel 22.

Para calcular los valores de equitabilidad se ha utilizado el índice *E* de Buzas-Gibson (ver Palmqvist *et al.*, 1989). En general, los resultados muestran valores intermedios (Fig. 5F) desviándose ligeramente hacia valores superiores en las muestras 21 y 25 (0,809 y 0,759, respectivamente), lo que puede deberse a errores de muestreo, dado que ambas suministran muy pocos individuos.

La diversidad se ha calculado mediante el índice *H* de Shannon-Wiener. En términos generales, se puede señalar que la diversidad (Fig. 5G) toma valores relativamente bajos en la parte inferior de la sección, mientras que en la parte superior se observa una tendencia creciente. Si se utiliza un valor de diversidad de 1,45 como referencia, por encima quedan las muestras que forman las agrupaciones 3, 6 (menos la muestra 47) y las muestras 48 y 46 del análisis de grupos. A ellas hay que añadir las muestras 21 y 25, que nuevamente presentan un cierto comportamiento anómalo.

### Correlación de variables

En la Fig. 5 se correlacionan las distintas variables analizadas, tomando como dos parámetros independientes los valo-



**Figura 5.** Correlación entre las variables analizadas. A: Valores del eje I en el análisis de componentes principales; B: Valores del eje II en el mismo análisis. C: proporción de *Neogloboquadrina sinistrorsa*; D: proporción de planctónicos en relación al total de foraminíferos; E: proporción de formas aglutinantes sobre el total de foraminíferos bentónicos; F: valores de diversidad; G: valores de equitabilidad. Las proporciones vienen dadas en tantos por uno.

	A	B	C	D	E	F	G
G: Equitabilidad	0,664***	0,293	0,235	-0,263	0,424*	0,470*	1,000
F: Diversidad	0,556**	0,792***	0,638***	-0,310	0,069	1,000	
E: % aglutinantes	0,310	-0,187	-0,206	-0,428*	1,000		
D: % planctónicos	-0,520**	-0,134	0,006	1,000			
C: % neoglob. sin.	0,439*	0,711***	1,000				
B: Comp. Princ. II	0,398*	1,000					
A: Comp. Princ. I	1,000						

**Tabla 3.** Semimatriz de correlaciones entre las variables de la Figura 5 (\*:  $p < 0,05$ ; \*\*:  $p < 0,01$ ; \*\*\*:  $p < 0,001$ ).

res que presentan las muestras en los ejes I y II del análisis de componentes principales en modo Q (Figs. 5A y 5B, respectivamente).

Las correlaciones obtenidas se indican en la Tabla 3. Los valores más altos de correlación directa los presentan el segundo componente principal con la diversidad (0,792) y con *Neogloboquadrina sinistrorsa* (0,711), el primer componente principal con la equitabilidad (0,664) y con la diversidad (0,556), y *Neogloboquadrina sinistrorsa* con la diversidad (0,638). En general, los valores de correlación inversa son menores; los más destacables son los que presentan la proporción de planctónicos con el primer componente principal (-0,520) y, en menor medida, con la proporción de aglutinantes (-0,428).

## DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En el análisis de grupos en modo R, la baja correlación generalizada refleja una mala diferenciación de las asociaciones dentro del conjunto, lo que puede indicar una notable homogeneidad en la composición de las muestras, sin que se produzcan sustituciones importantes a lo largo de la sección. Estos débiles cambios en la composición de las asociaciones reflejarían sólo pequeñas variaciones paleoambientales en el área estudiada a lo largo del Tortonense.

Los grupos de muestras, establecidos a partir del análisis de componentes principales en modo Q, muestran una ordenación acorde, en líneas generales, con la secuencia estratigráfica. Esto parece reflejar que los cambios paleoambientales, sin ser grandes, vienen marcados por una tendencia direccional a lo largo del Tortonense.

El grupo 1 reúne a los niveles de la parte más baja del Tortonense inferior muestreado. Las asociaciones dominantes (*Globoquadrina-G. decoraperta-Neogloboquadrina dextrorsa*) parecen reflejar condiciones de aguas relativamente cálidas, si se comparan con las distribuciones de las asociaciones más similares observadas actualmente (Bé y Tolderlund, 1971; Kipp, 1976; Pujol, 1980) y con la composición de las asociaciones tortonienses en función de la latitud (Srinivasan y Kennett, 1981; Kennett y Srinivasan, 1983; Bolli *et al.*, 1985).

El grupo 2 reúne a muestras inmediatamente superiores, también dentro del Tortonense inferior. Sus asociaciones (*G. decoraperta-Neogloboquadrina dextrorsa*) podrían indicar condiciones de las aguas similares a las del grupo 1, quizás algo menos cálidas en función del descenso de *Globoquadrina*.

En orden cronológico, los siguientes grupos son el 4 y el 5, estrechamente correlacionados y que engloban a las muestras pertenecientes a un amplio intervalo, abarcando aún una parte importante del Tortonense inferior y la parte baja del Tortonense superior. La única muestra que se sale de este intervalo es la 46, pero queda separada del resto del grupo 5 por un grado de correlación menor. Las diferencias principales respecto a los grupos anteriores son: la sustitución de *G. decoraperta* por *G. bulloides* como grupo dominante dentro de *Globigerina*, menor representación de *Globoquadrina* e incremento de *Neogloboquadrina*. Estos cambios pueden reflejar un ligero enfriamiento de las aguas en relación con las condiciones correspondientes a los grupos 1 y 2, aunque dentro de ambientes templado-cálidos (Kipp, 1976; Pujol, 1980).

Los grupos que reúnen las muestras más modernas son

el 6 y el 3, pertenecientes a la parte media-alta del Tortonien-se superior. Sólo la muestra 38 se sale del intervalo y, por el contrario, cronológicamente habría que incluir la muestra 46 del grupo 5. Aunque los niveles de correlación entre ellos son bajos, probablemente porque en el grupo 3 y en la muestra 46 es escasa *Neogloboquadrina*, las muestras se asemejan en que presentan predominio de *Neogloboquadrina* sinistrorsa y diversidad alta (media de 1,7 para el grupo 3, de 1,52 para el grupo 6 y un valor de 1,72 para la muestra 46, frente a una media de 1,36 para el conjunto de las muestras).

Actualmente, según el gradiente latitudinal de distribución y abundancia de *N. pachyderma* en el hemisferio norte (Imbrie y Kipp, 1972; Kipp, 1976), se observa un claro dominio de ejemplares sinistrorsos en las aguas frías, especialmente a partir de los 65° N en el Atlántico oriental. De acuerdo con esto, el cambio de predominio a sinistrorso podría ser indicativo de un descenso de la temperatura de las aguas superficiales. No obstante, factores como la disponibilidad de nutrientes y las diferencias en el ritmo de reproducción entre formas dextrorsas y sinistrorsas parecen influir también en las proporciones de unas y otras (Ufkes y Zachariasse, 1993). Esto podría explicar que en las aguas atlánticas de Namibia el cambio en el predominio de enrollamiento se produzca a una temperatura de 14,5° C, notablemente superior a la del hemisferio N (Ufkes y Zachariasse, 1993). Durante el Tortonien-se, la sustitución de las formas dextrorsas por las sinistrorsas en *Neogloboquadrina* parece ocurrir sincrónicamente en todo el Mediterráneo Occidental. Este evento puede corresponder al momento en que, en un proceso de progresivo enfriamiento, las masas de agua atlántica que portan las formas sinistrorsas, y que iban ocupando paulatinamente latitudes más bajas, alcanzan la entrada del Mediterráneo. No obstante, la asociación que acompaña a estas formas, con *G. decoraperta*, *Globoquadrina*, *G. trilobus* y *G. obliquus* bien representadas, parece corresponder a temperaturas superiores a las que en la actualidad se produce el cambio de enrollamiento en el hemisferio N (aproximadamente 9° C). Benson *et al.* (1991) han indicado la existencia de un doble canal de comunicación entre el Atlántico y el Mediterráneo, con entrada de agua atlántica por el corredor rifeño y salida por el portal ibérico. Este sistema de doble canal provocaría durante el Messiniense inferior un efecto de sifón, introduciendo agua atlántica de la parte alta de la psicrosfera al Mediterráneo. Si el doble canal estuviera funcionando también durante el Tortonien-se superior, implicaría que las poblaciones sinistrorsas de *Neogloboquadrina* tendrían que alcanzar el estrecho rifeño (aproximadamente latitud 34° N) para entrar al Mediterráneo.

En cuanto a la diversidad, su valor es función directa del número de morfotipos presentes y de la homogeneidad en su distribución. Los valores resultantes pueden estar condicionados por multitud de factores, que actúan tanto sobre la biocenosis (condiciones físico-químicas de las aguas, productividad, tasas de renovación, sustitución de poblaciones por cambios estacionales acusados), como sobre la tafocenosis (selección por transporte, disolución selectiva de especies). Es difícil determinar en qué medida han actuado cada uno de estos factores, aunque sí parece probable que los cambios estacionales puedan tener una importancia comparativamente mayor en etapas climáticas templadas, resultando tafocenosis con diversidades relativamente altas.

En resumen, las características de los grupos 6 y 3 parecen reflejar unas condiciones de aguas más frías que las asociaciones anteriores, pero aún mantenidas en condiciones templadas.

En ambientes actuales, se ha observado que la proporción de planctónicos respecto al total de foraminíferos suele aumentar con la batimetría de los depósitos (Boltovskoy y Wrigth, 1976; Bizon y Bizon, 1984). No obstante, bajo determinadas condiciones (v.g., fondos poco oxigenados) se pueden dar proporciones muy altas de planctónicos en medios

poco profundos. En la cuenca de la Atalaya, la proporción de planctónicos a lo largo de la sección es alta, si exceptuamos los niveles inferiores (Fig. 5D). Por otra parte, no se observa relación entre incremento en la proporción de foraminíferos planctónicos y en la abundancia de determinadas formas presumiblemente profundas (esencialmente *Globorotalia* y *Sphaeroidinellopsis*). Ambas observaciones podrían indicar que, en general, los sedimentos se depositaron en ambientes no someros, a profundidades superiores a la altura de la columna de agua en que se desarrollan, primordialmente, el conjunto de los foraminíferos planctónicos. En estas condiciones, los cambios eustáticos, cuya diferencia máxima para el intervalo estudiado, deducida de la curva de Haq *et al.* (1987), está alrededor de 50 m, harían notar sus efectos esencialmente en las plataformas someras, pero apenas se percibirían en áreas de depósito que superaran el centenar de metros de profundidad, como la que se puede suponer para la mayor parte de la sección de la Atalaya. Pero, en la Cordillera Bética, el Tortonien-se es una etapa de alta movilidad tectónica, con desarrollo de cuencas muy subsidentes (como la propia cuenca de la Atalaya) y áreas que sufren elevaciones rápidas e importantes. En consecuencia, aunque las variaciones de las proporciones de planctónicos fueran un indicador estrictamente batimétrico, en este caso habría que suponer que es, fundamentalmente, un reflejo de la relación subsidencia/aporte. Se puede explicar así que los planctónicos sean porcentualmente altos durante la mayor parte de la evolución sedimentaria tortonien-se, excepto en la fase inicial de formación de la cuenca y, en menor medida, en la fase final regresiva correspondiente al depósito de las areniscas de Columbares.

Un argumento en favor de la interpretación anterior es la ausencia de correlación inversa estadísticamente significativa entre la proporción de planctónicos y la de *Neogloboquadrina* sinistrorsa (la correlación es directa y extremadamente baja, con un valor de 0,006). Si la proporción de planctónicos dependiese exclusivamente del nivel eustático, debería estar más relacionada con la paleotemperatura de las aguas superficiales, cuyos cambios han quedado, presumiblemente, registrados en los cambios de enrollamiento de *Neogloboquadrina*.

Por otra parte, es destacable la correlación inversa significativa que mantiene la proporción de planctónicos con el componente *I* (-0,520). Esto puede ser debido a que los valores del componente *I* vienen marcados fundamentalmente por el peso que ejerce *G. bulloides* y, en menor medida, *Neogloboquadrina* dextrorsa y *G. decoraperta*, dominantes en las asociaciones de los grupos 4 y 5 (que reúnen la mayor parte de las muestras, excepto las primeras y las últimas). A su vez, también se aprecia un cierto paralelismo con la curva eustática de Haq *et al.* (1987), donde se observa el máximo eustático del ciclo *TB 3.2* hacia la parte media del Tortonien-se superior (Guerra-Merchán y Serrano, 1993). Esto podría significar que los factores de eustatismo y subsidencia actuaron en el mismo sentido de profundización de la cuenca, pero habría que explicar la conjunción de elevación eustática y enfriamiento de las aguas, que, en ausencia de otros factores deben mostrar, al menos globalmente, comportamiento contrario. No obstante, la correlación cronológica en intervalos cortos es arriesgada y pequeñas variaciones en la correlación pueden dar comportamientos inversos.

La correlación inversa significativa que se manifiesta entre las proporciones de foraminíferos planctónicos y aglutinantes (-0,428) parece deberse a la influencia de la disolución en las tafocenosis, que es radical en las primeras muestras (Fig. 5D-E). La abundancia relativa de las formas aglutinantes en estos primeros niveles debe estar relacionada con la disolución de los caparzones calcáreos, producida bien durante la fase de depósito-enterramiento o durante la diagénesis temprana. Aunque estos fenómenos son frecuentes en aguas profundas, en este caso las asociaciones conservadas de bentónicos calcáreos, formadas predominantemente desde las mues-

tras más bajas por *Ammonia*, *Cibicides*, *Florilus* y *Pullenia*, parecen indicar medios no profundos, probablemente de algunos centenares de metros. Los factores causantes de la fuerte disolución no están claros, pero este fenómeno también se ha observado para el mismo episodio en otras cuencas orientales de la Cordillera (v.g., Sorbas). La importante actividad volcánica en ese sector de la Cordillera durante la primera parte del Tortoniense (Serrano, 1992) y, probablemente, un cierto confinamiento durante la primera etapa de evolución de las cuencas, con poca renovación de las aguas de fondo, lo que propiciaría unas condiciones reductoras y anóxicas (inferibles por la abundancia de yeso y por las tonalidades oscuras en los sedimentos que indicarían una mayor conservación de materia orgánica), pueden haber influido decisivamente en la disolución de los caparzones calcáreos.

## CONCLUSIONES

El estudio bioestratigráfico de la secuencia sedimentaria de la cuenca de la Atalaya que aflora entre Cresta del Gallo y Columbares permite reconocer los intervalos de *Neogloboquadrina acostaensis* y *Neogloboquadrina humerosa* (sensu Serrano, 1979), correspondientes al Tortoniense inferior y al Tortoniense superior, respectivamente.

La baja correlación que presentan las asociaciones de especies agrupadas en el análisis en modo *R* es indicativa de su escasa diferenciación. Esto parece deberse a que no hay sustituciones importantes entre asociaciones paleoecológicas claramente diferenciadas, sino sólo cambios menores dentro de ellas. Concluimos que puede ser el reflejo de la inexistencia de variaciones paleoambientales fuertes durante el Tortoniense, al menos en el área de estudio.

Por el contrario, las agrupaciones de muestras que realiza el análisis en modo *Q* presentan valores de correlación notablemente mayores, ordenándose con una fuerte componente temporal. Esto se ha interpretado como el resultado de modificaciones paleoambientales marcadas por una tendencia direccional a lo largo del Tortoniense.

La integración de los análisis en modo *Q* y *R* permite la caracterización paleoecológica de los grupos de muestras desde un punto de vista cuantitativo. A partir de ella, se ha deducido que existe un lento pero progresivo enfriamiento de las aguas atlánticas que entran al Mediterráneo.

El evento marcado por el brusco cambio de enrollamiento que presenta *Neogloboquadrina* se interpreta como el momento en el que las aguas atlánticas que portan las poblaciones sinistrorsas alcanzan la entrada del Mediterráneo.

Se aprecia un aumento de la diversidad en los niveles correspondientes a medios templados. Se concluye que puede estar en relación con cambios en las asociaciones provocados por variaciones estacionales, que no son discriminables en las muestras.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Proyecto PB 93-1000 de la DGICYT y por los Grupos de Investigación 1350 y 4039 de la Junta de Andalucía.

## BIBLIOGRAFÍA

- Bé, A.W.H. 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 the Oceans*. (Eds. B.M. Funnell & W.R. Riedel), 105-149. Cambridge University Press.
- Benson, R.H., Rakic-El Bied, K. and Bonaduce, G. 1991. An important current reversal (influx) in the Rifian Corridor (Morocco) at the Tortonian-Messinian boundary: the end of Tethys Ocean. *Paleoceanography*, **6**, 164-192.
- Bizon, G. et Bizon, J.J. 1984. Les foraminifères des sédiments profonds. In: *Écologie des microorganismes en Méditerranée occidentale (ECOMED)* (Coords. J.J. Bizon & P.F. Burollet) 104-139. Association Française des techniciens du Pétrole, Paris (France).
- Blow, W.H., 1969. Late Middle Eocene to Recent planktonic foraminiferal biostratigraphy. *Proceedings First International Conference on Planktonic Microfossils Geneva, 1967* (Eds. P. Brönnimann & H.H. Renz), E.J. Brill, Leiden, **1**, 199-422.
- Bolli, H.M., Saunders, J.B. and Perch-Nielsen, K. (eds.) 1985. *Plankton Stratigraphy*. Cambridge University Press, Cambridge, 1032 pp.
- Bolli, H.M. and Saunders, J.B. 1985. Oligocene to Holocene low latitude planktonic foraminifera. In: *Plankton Stratigraphy* (Eds. H. Bolli, J. Saunders & K. Perch-Nielsen), 155-262. Cambridge University Press, Cambridge.
- Boltovskoy, E. and Wright, R. 1976. *Recent Foraminifera*. Dr. W. Junk b.v., Publ., The Hague, 515 pp.
- Davis, J.C. 1986. *Statistics and Data Analysis in Geology*, second edition. John Wiley & Sons, New York, 646 pp.
- D'Onofrio, S., Giannelli, L., Iaccarino, S., Morlotti, E., Romeo, M., Salvatoreini, G., Sampo, M. and Sprovieri, R., 1975. Planktonic foraminifera from some Italian sections and the problem of the lower boundary of the Messinian. *Bollettino Società Paleontologica Italiana*, **14**, 177-196.
- González Donoso, J.M., González Padilla, I.M. y Palmqvist, P. 1991. Contribución al conocimiento de la paleoceanografía del mar de Alborán (Mediterráneo Occidental) mediante el uso de los foraminíferos planctónicos de un testigo de sondeo. *Revista española de Paleontología*, **6**, 191-205.
- González Donoso, J.M. y Serrano, F. 1977. Bio y Cronoestratigrafía de los materiales pre-evaporíticos de Sorbas (Almería). *Libro guía de excursiones, Sem. Messinense*, **3**, 69-76, Málaga.
- Guerra-Merchán, A. and Serrano, F. 1993. Tectosedimentary setting and chronostratigraphy of the Neogene reefs in the Almanzora Corridor (Betic Cordillera, Spain). *Geobios*, **26**, 57-67.
- Hag, B.U., Hardenbol, J. and Vail, P.R., 1987. Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic. *Science*, **235**, 1157-1166.
- Iaccarino S., 1985. Mediterranean Miocene and Pliocene planktonic foraminifera. In: *Plankton Stratigraphy* (Bolli H., Saunders J. and Perch-Nielsen K., Ed.), Cambridge University Press, 283-314.
- Imbrie, J. and Kipp, N.G. 1971. A new micropaleontological method for quantitative paleoclimatology: application to a Late Pleistocene Caribbean core. In: *The Late Cenozoic glacial ages* (K.K. Turekian, Ed.), 71-181. Yale University Press.
- Kennett, J.P. and Srinivasan, S. 1983. *Neogene Planktonic Foraminifera; a phylogenetic atlas*. Hutchinson Ross Publishing Company, Stroudsburg, 263 pp.
- 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.
- Martínez, C. 1969. Estudio micropaleontológico de cuatro cortes del Mioceno de Murcia. *Revista española de Micropaleontología*, **1**, 147-180.
- Montenat, Ch. 1973. *Les formations néogènes et quaternaires du Levant espagnol*. Thèse Sciences, Orsay-Paris sud, 1170 pp.
- Montenat, Ch. 1977. Les bassins néogènes du Levant d'Alicante et de Murcia. Stratigraphie, paléogéographie et évolution dynamique. *Documents Laboratoire de Géologie Faculté des Sciences de Lyon*, **69**, 1-345.
- Montenat, Ch. et Martínez, C. 1970. Stratigraphie et micropaléontologie du Néogène au Sud de Murcia (Chaînes bétiques - Espagne). *Comptes Rendus de la Academie des Sciences de Paris*, **270**, 592-595.
- Núñez, A., Martínez, W., Colodrón, I., Cabañas, I., Uralde, M.A. y Navidad, M. 1976. *Hoja 934 del Mapa Geológico de España E. 1:50.000*. Servicio de Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Ministerio de Industria, Madrid, 34 pp.
- Ott d'Estevou, P. et Montenat, C. 1985. Evolution structurale de la zone bétique orientale (Espagne) du Tortonien à l'Holocène. *Comptes Rendus de la Academie des Sciences de Paris*, **300**, 363-368.
- Palmqvist, P., Guerrero, S. y Salva, M.I. 1989. Estudio paleoecológico de la fauna de moluscos de un afloramiento de materiales pliocénicos en Estepona (Málaga, España). *Revista española de Paleontología*, **4**, 29-38.
- Paul, C.R.C. 1992. How complete does the fossil record have to be? *Revista española de Paleontología*, **7**, 127-133.
- 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*, **10**, 254 pp.

- Reyment, R.A., Blackith, R.E. and Campbell, N.A. 1984. *Multivariate Morphometrics*. Second edition. Academic Press, London, 233 pp.
- Reyment, R.A. and Jöreskog, K.G. 1993. *Applied Factor Analysis in the Natural Sciences*. Second edition. Cambridge University Press, Cambridge, 371 pp.
- Rodríguez Fernández, J. 1982. *El Mioceno del sector central de las Cordilleras Béticas*. Tesis doctoral. Universidad de Granada, 224 pp.
- Rohlf, F.J. 1992. *NTSYS-pc. Numerical Taxonomy and Multivariate Analysis System*, version 1.70. Exeter Software.
- Sanz de Galdeano, C. 1983. Los accidentes y fracturas principales de las Cordilleras Béticas. *Estudios Geológicos*, **39**, 157-165.
- Serrano, F. 1979. *Los foraminíferos planctónicos del Mioceno superior de la cuenca de Ronda y su comparación con los de otras áreas de las Cordilleras Béticas*. Tesis doctoral. Universidad de Málaga, 272 pp.
- Serrano, F. 1992. Biostratigraphic Control of Neogene volcanism in Sierra de Gata (South-East Spain). *Geologie en Mijnbouw*, **71**, 3-14.
- Sierro, F.J. 1985. The replacement of the "*Globorotalia menardii*" group by the *Globorotalia miotumida* group: an aid to recognizing the Tortonian-Messinian boundary in the Mediterranean and adjacent atlantic. *Marine Micropaleontology*, **9**, 525-535.
- Srinivasan, M.S. and Kennett, J.P. 1981. Neogene Planktonic foraminiferal biostratigraphy and evolution: Equatorial to Subantarctic, South Pacific. *Marine Micropaleontology*, **6**, 499-534.
- Sneath, P.H.A. and Sokal, R.R. 1973. *Numerical Taxonomy. The Principles and Practice of Numerical Classification*. W.H. Freeman and Company, San Francisco, 573 pp.
- Ufkes, E. and Zachariasse, W.J. 1993. Origin of coiling differences in living neogloboquadrinids in the Walvis Bay region, off Namibia, southwest Africa. *Micropaleontology*, **39**, 283-287.
- Zachariasse, W.J. 1975. Planktonic foraminiferal biostratigraphy of the Late Neogene of Crete (Greece). *Utrecht Micropaleontological Bulletin*, **11**, 1-171.

Manuscrito recibido: 23 de septiembre, 1994  
Manuscrito aceptado: 15 de febrero, 1995

\* \* \*

## RECENSIONES

Richard A. Reyment & K. G. Jöreskog, 1993. *Applied Factor Analysis in the Natural Sciences*

Cambridge University Press, Cambridge, xii + 371 pp., 67 figs., 73 tabs., con apéndice de programas informativos por L. F. Marcus. ISBN 0-521-41242-0, entelado.

Esta obra constituye la segunda edición, totalmente revisada y actualizada, del libro *Geological Factor Analysis*, el cual apareció en 1976 y se puede considerar, con pleno derecho, como todo un clásico de la Estadística Multivariante aplicada a la resolución de problemas geológicos.

En el primer capítulo, de naturaleza introductoria, se discute sobre la naturaleza multivariante de los datos que se manejan en el ámbito de las Ciencias de la Vida y de la Tierra, se presenta un ejemplo preliminar de análisis factorial y se revisan las aplicaciones potenciales de este tipo de técnicas en diversas disciplinas, como la Petrología, la Sedimentología y la Paleontología. En el segundo se desarrollan los conceptos matemáticos básicos, principalmente los fundamentos del álgebra matricial que resultan de utilidad en Estadística Multivariante, con especial atención al cálculo e interpretación geométrica de los valores y vectores propios de una matriz, así como al desarrollo del teorema de Eckart-Young para la obtención de los valores siguientes y la dualidad de modos *Q-R*. Los capítulos tercero y cuarto se destinan al análisis en modo *R*, mediante componentes principales y factorial en sentido estricto, abordándose tópicos diversos, como las rotaciones ortogonal y oblicua de los factores, los intervalos de confianza para los autovalores, el análisis robusto de componentes principales y el tratamiento de datos composicionales. El quinto se ocupa del análisis en modo *Q*, mediante el método de las coordenadas principales de Gower y el análisis factorial de Imbrie, el último con aplicaciones importantes en los campos de la sedimentología y la micropaleontología; asimismo, se discuten otros tópicos, como los coeficientes de semejanza y el número de muestras ideales (*end members*), para finalizar con el análisis de las distribuciones asimétricas. En el sexto capítulo se introducen los dos métodos *Q-R* simultáneos, el análisis de correspondencias y el de correlaciones canónicas, este último raramente tratado en otros libros dedicados a la estadística multivariante. El séptimo incluye una guía muy útil y didáctica sobre los sucesivos pasos que se han de seguir a la hora de aplicar estas metodologías, comenzando por diversos criterios para la elección de variables apropiadas en cada caso, sus escalas de medidas y las transformaciones posibles, la elección de los coeficientes de asociación y, finalmente, una extensa discusión sobre el tipo de método factorial más adecuado para resolver las distintas situaciones. El capítulo octavo, el más extenso y con el que termina la obra, está destinado a presentar toda una serie de ejemplos sobre aplicaciones del análisis factorial, que cubren la práctica totalidad de las disciplinas pertenecientes al ámbito de las Ciencias Geológicas, como la Geoquímica y la Mineralogía, los análisis granulométricos en Sedimentología, el estudio de la composición de los suelos o diversos análisis cuantitativos en Petrología.

Particularmente interesantes resultan las aplicaciones paleontológicas, entre las que se incluyen los métodos de Imbrie y Kipp (1971), que permiten establecer asociaciones a partir del análisis multidimensional de la composición de las tafocenosis de foraminíferos planctó-

nicos en las cimas de testigos de sondeos y el desarrollo de funciones paleoceanográficas de transferencia, o el análisis de deformaciones principales (*principal warps*) de Bookstein (1991), que posibilita estudiar el cambio en las posiciones relativas de un conjunto de puntos equivalentes o *landmarks* entre dos formas que se comparen, elaborando diagramas donde se puede apreciar visualmente —y caracterizar métricamente— cómo habría de dilatarse, comprimirse y curvarse localmente el plano cartesiano que contiene a dichos puntos para pasar desde una configuración a la otra (otros ejemplos sobre diagramas de coordenadas deformadas se pueden encontrar en Palmqvist *et al.*, 1994). No obstante, son quizás las técnicas para el análisis matemático de la forma orgánica las que reciben, comparativamente, una menor atención en esta obra, aunque existen dos libros del mismo autor en los que se aborda la morfometría desde una perspectiva tradicional, tomando variables convencionales del tipo distancias (Reyment *et al.*, 1984), y siguiendo los enfoques de la moderna Morfometría Geométrica [Reyment, 1991: véase la correspondiente recensión en el vol. 7(1)]. Por otra parte, sólo se incluyen en este estudio las técnicas de ordenación, según indica el título de la obra, quedando sin tratar otras metodologías basadas en el álgebra de los valores y vectores propios de matrices, como el análisis discriminante y de variables canónicas, que sirven para la identificación, o las técnicas de análisis de grupos (*cluster analysis*), que permiten clasificar observaciones mediante la elaboración de dendrogramas de semejanza (Sneath y Sokal, 1973; Davis, 1986).

La obra se completa con un amplio apéndice sobre programas informáticos escritos en lenguaje *MATLAB*, desarrollados por Leslie F. Marcus, y una completa bibliografía en la que abundan tanto las citas de aquellos trabajos en los que se desarrollan los fundamentos puramente matemáticos de las metodologías discutidas como los aplicados a la resolución de casos concretos.

En definitiva, se trata de un libro que está destinado, sin lugar a dudas, a convertirse en un nuevo clásico de la Estadística Multivariante aplicada a la Geología, tal y como le ocurrió a su predecesor, por lo que resulta de obligada consulta y referencia para todos aquellos paleontólogos interesados en proporcionar un enfoque cuantitativo y multidimensional a sus investigaciones.

## REFERENCIAS

- Bookstein, L. 1991. *Morphometric tools for landmark data*. Cambridge University Press. New York.
- Davis, J. C. 1986. *Statistics and Data Analysis in Geology*. Second Edition, John Wiley & Sons. New York.
- Palmqvist, P., Gilbert, J. y Pérez Claros, J. A. 1994. Morfometría y Paleontología Humana: carencias y posibles perspectivas. *Revista Española de Paleontología*, **9**, 124-130.
- Reyment, R. A. 1991. *Multidimensional Palaeobiology*. Pergamon Press. Oxford.
- Reyment, R. A., Blackith, R. E. and Campbell, N. A. 1984. *Multivariate Morphometrics*. Second Edition. Academic Press. London.
- Sneath, P. H. A. and Sokal, R. R. 1973. *Numerical Taxonomy*. W. H. Freeman and Company. San Francisco.