

Eventoestratigrafía del límite Cretácico/Terciario en Aïn Settara, Tunicia: ¿disminución de la productividad y/o de la oxigenación oceánicas?

Laia Alegret^{1*}, Ignacio Arenillas¹, José A. Arz² y Eustoquio Molina¹

¹ Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza, 50009 Zaragoza, España.

² Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León, 67700 Linares, N.L., México.

* laia@posta.unizar.es

RESUMEN

El estudio cualitativo y cuantitativo de los foraminíferos bentónicos en el corte de Aïn Settara, Tunicia, ha permitido identificar importantes cambios cuantitativos y cualitativos en coincidencia con el límite Cretácico/Terciario (K/T). La tasa de extinción de los foraminíferos bentónicos en Aïn Settara fue inferior a la de los planctónicos, afectando aproximadamente al 21.5% de las especies. Sin embargo, las asociaciones de foraminíferos bentónicos cambiaron sustancialmente durante este evento, desapareciendo temporalmente más de la mitad de las especies debido a un efecto Lázaro que se inició en el límite K/T. Las especies Lázaro reaparecieron progresivamente a lo largo de las Biozonas de *Guembelitra cretacea* y *Parvularugoglobigerina euubina*.

En el Maastrichtiense terminal, las asociaciones de foraminíferos bentónicos calcáreos de Aïn Settara estaban dominadas por morfogrupos aerobios. Justo por encima del límite K/T, los morfogrupos aerobios aumentaron de un 50% a más del 75%, mientras que los anaerobios disminuyeron un 18%. Los valores del Índice de Oxígeno (IO), calculados a partir de estos morfogrupos, aumentaron desde la Biozona de *Abathomphalus mayaroensis* hasta la parte superior de la Biozona de *Plummerita hantkeninoides*, indicando que las aguas del fondo marino estaban bien oxigenadas al final del Maastrichtiense. La reestructuración de las comunidades infaunales y epifaunales y de las asociaciones de morfogrupos aerobios y anaerobios sugieren un evento brusco y rápido en coincidencia con el límite K/T. Justo por encima del límite K/T se registra una drástica disminución en los grupos infaunales, sugiriendo una disminución de la productividad primaria en coincidencia con el límite. Este gran cambio en las comunidades bentónicas coincide con una extinción en masa catastrófica de los foraminíferos planctónicos y con diversas evidencias de impacto (anomalía de Ir, espinelas de Ni) en Aïn Settara. Todos estos cambios son muy compatibles con la teoría del impacto meteorítico en coincidencia con el límite K/T.

Palabras clave: Estratigrafía, límite K/T, Aïn Settara, Tunicia.

ABSTRACT

The qualitative and quantitative study on benthic foraminifera from Aïn Setara (Tunisia) allows us to recognize qualitative and quantitative changes just at the Cretaceous/Tertiary boundary (K/T). Benthic foraminiferal extinction rate at Aïn Settara (21.5% of the species) is lower than planktic foraminiferal rate. Nevertheless, there is an important turnover in benthic foraminiferal assemblages across the K/T boundary, and more than 50% of the species are Lazarus taxa, which disappeared just at the boundary and reappeared along *Guembelitra cretacea* and *Parvularugoglobigerina euubina* Biozones.

Aerobic morphogroups dominated calcareous benthic foraminiferal assemblages at Aïn Settara during the uppermost Maastrichtian. Just above the K/T boundary, aerobic morphogroups increased from 50% up to 75%, whereas anaerobic morphogroups decreased 18%. These morphogroups allow us to calculate the Oxygen Index (OI), whose values increased from *Abathomphalus*

mayaroensis to upper *Plummerita hantkeninoides* Biozones, and reflect a good oxygenation of the bottom-floor water during the uppermost Maastrichtian.

Changes in epifaunal and infaunal assemblages, as well as in aerobic and anaerobic morphogroups, suggest that a sudden event took place just at the K/T boundary. Just above the K/T boundary infaunal groups drastically decreased, suggesting a decrease in primary productivity. This benthic foraminiferal turnover coincides with a catastrophic mass extinction in planktic foraminifera, and several impact evidences, such as an anomalous content in Ir or Ni-rich spinels. All these changes recorded in Aïn Settara are very compatible with a meteoritic impact in Aïn Settara at the K/T boundary.

Keywords: Stratigraphy, K/T boundary, Aïn Settara, Tunicia.

INTRODUCCIÓN

El estudio paleontológico del tránsito Cretácico-Terciario (K-T) refleja cambios drásticos en las comunidades marinas en coincidencia con el límite K/T. Más del 70% (y probablemente el 90-97%) de las especies de foraminíferos planctónicos se extinguieron en coincidencia con este límite (Molina *et al.*, 1996, 1998; Arz *et al.*, 1999; Arenillas *et al.*, 2000c), mientras que los foraminíferos bentónicos fueron afectados en mayor o en menor grado en función del medio en que habitaban (Hansen *et al.*, 1987). Los organismos que habitaban el medio bentónico batial y abisal fueron menos afectados por este evento (Thomas, 1990). En el caso de los foraminíferos bentónicos, el cambio más significativo se refleja en las variaciones de la abundancia y diversidad de las asociaciones, así como en la desaparición temporal de algunas de sus especies, lo que constituye el denominado “efecto Lázaro” (Arenillas *et al.*, 2000c). Los foraminíferos bentónicos no experimentaron grandes extinciones en masa, como ocurre en el caso de los foraminíferos planctónicos. Actualmente, la mayor parte de los especialistas en micropaleontología atribuyen estos cambios y extinciones a causas extraterrestres (Smit, 1982; Coccioni y Galeotti, 1994; Molina *et al.*, 1996, 1998).

El grupo de los foraminíferos bentónicos permite obtener interpretaciones sobre la oxigenación de las aguas y el aporte alimenticio al fondo marino durante el tránsito K-T (Olsson y Wise, 1987; Speijer y van der Zwaan, 1996; Speijer *et al.*, 1996; Kouwerhoven *et al.*, 1997). Dichas interpretaciones se basan principalmente en semejanzas morfológicas con foraminíferos bentónicos actuales (Corliss, 1985; Jones y Charnock, 1985). Partiendo de la estrecha relación que existe entre la morfología de los foraminíferos bentónicos actuales y los diversos microhábitats ocupados por éstos (Corliss, 1985), Kaiho (1991) distinguió tres morfogrupos: aerobios, que habitan en sedimentos donde la cantidad de oxígeno disuelto en las aguas es mayor que 0.5 mL/L; disaerobios (valores comprendidos entre 0.5 y 0.1 mL/L) y anaerobios, presentes cuando la cantidad de oxígeno

disuelto no supera los 0.1 mL/L. La identificación de ecomorfos en el tránsito K-T de Aïn Settara y la extrapolación de las cantidades relativas de oxígeno disuelto en las aguas del fondo marino a partir de estas morfologías nos ha permitido reconstruir la curva de variación del Índice de Oxígeno disuelto (IO). Este índice es válido principalmente en condiciones normales y estables del medio marino, y pierde fiabilidad cuando el medio es afectado por algún evento brusco que lo desestabiliza.

El objetivo de este estudio es aportar datos sobre la evolución del fondo marino en Aïn Settara (Tunicia) durante el límite K/T. El estudio cualitativo y cuantitativo de los pequeños foraminíferos bentónicos nos permite inferir las condiciones de oxigenación de las aguas en el fondo marino a lo largo de este tránsito, así como aportar nuevos datos sobre la relación causa-efecto entre la crisis biológica del límite K/T y la teoría impactista.

LOCALIZACIÓN, MATERIAL Y MÉTODOS

El corte de Aïn Settara se sitúa en la región de Kalaat Senan (Tunicia central), 50 km al Sur del corte estratotípico de El Kef (Figura 1). En este corte se halla bien expuesto el límite K/T, en la parte inferior de la Formación El Haria, que coincide con la base de un nivel arcilloso de 60 cm de espesor. Arenillas *et al.* (2000c), siguiendo la biozonación de Molina *et al.* (1996), reconocieron las siguientes biozonas con foraminíferos planctónicos: Biozonas de *Abathomphalus mayaroensis* (más de 30 m) y de *Plummerita hantkeninoides* (20 m) para el Maastrichtiense superior, y Biozonas de *Guembelitra cretacea* (60 cm), *Parvularugoglobigerina eugubina* (5 m) y *Parasubbotina pseudobulloides* (más de 10 m) para el Paleoceno inferior (Figuras 2 y 3).

El estudio abarca casi 67 m del tránsito Cretácico-Terciario, incluyendo los 40 m superiores de la Biozona de *A. mayaroensis* y los primeros 8 m de la Biozona de *P. pseudobulloides*, y se han analizado un total de 48 muestras, correspondiendo 23 de ellas al Maastrich-



Figura 1: Situación geográfica del corte de Aïn Settara en Tunicia.

tiense superior y 25 al Daniense. En la parte basal de la capa de arcilla del límite se ha reconocido una lámina roja con evidencias de impacto, tales como una concentración anómala de Iridio y un aumento de espinelas ricas en Níquel, además de un descenso en el $\delta^{13}\text{C}$ (Dupuis *et al.*, 2001).

Las muestras recogidas fueron disgregadas con ayuda de H_2O_2 , levigadas con tamices de 106 y 63 micras de luz de malla y secadas en una estufa a menos de 50°C . El estudio cuantitativo se ha realizado en la fracción mayor a 106 micras, con una fracción representativa de unos 300 ejemplares de foraminíferos bentónicos obtenida mediante un microcuarteador tipo Otto modificado. La conservación de los foraminíferos bentónicos es muy buena excepto en los primeros centímetros del Daniense, donde existen evidencias de disolución. Los foraminíferos bentónicos de morfología alargada y concha delgada, de menor resistencia mecánica, aparecen fragmentados debido seguramente al proceso de lavado de las muestras. Los ejemplares separados de foraminíferos bentónicos han sido identificados, contados y montados en celdillas; para su identificación se ha adoptado la sistemática de Loeblich y Tappan (1988). Se han calculado las abundancias relativas de los géneros presentes en cada muestra (Tablas 1 y 2), las abundancias relativas entre formas infaunales y epifaunales y entre morfotipos aerobios y anaerobios, así como el Índice de Oxígeno (IO) obtenido a partir de la relación entre dichos morfogrupos.

RESULTADOS

Variación de las asociaciones y patrón de extinción

En el Cretácico terminal de Aïn Settara se han reconocido 100 géneros de foraminíferos bentónicos; dominan los foraminíferos de pared calcárea-hialina, siendo los aglutinados componentes minoritarios. Las asociaciones de foraminíferos bentónicos están dominadas por géneros de los subórdenes Lagenina (*Lenticulina*, *Vaginulina*, *Laevidentalina*, *Pyramidulina* y *Lagena*) y Rotaliina (*Cibicidoides*, *Cibicides*, *Gavelinella*, *Anomalinoidea*, *Sitella*, *Praeglobobulimina*, *Coryphostoma* y *Alabamina*). La biodiversidad de los géneros reconocidos es máxima en el Maastrichtiense superior, donde se han identificado hasta 48 géneros por muestra. Estas asociaciones están compuestas por morfogrupos mixtos infaunales y epifaunales, donde los taxones infaunales constituyen el 40-50% de las asociaciones (Figura 2-1). Los infaunales están dominados por formas alargadas, cilíndricas o aplanadas (ej., *Coryphostoma incrassata*, *Laevidentalina legumen*, *Eouvigerina subsculptura* o *Pyramidulina obscura*), mientras que los epifaunales son generalmente trocospirados (planoconvexos o biconvexos) y planispirados (ej., *Alabamina midwayensis*, *Anomalinoidea affinis*, *Cibicidoides pseudoacutus*, *Gyrogonoides soldani*, *Oridorsalis plummerae*, *Osangularia velascoensis* o *Pullenia coryelli*).

El elevado porcentaje de foraminíferos planctónicos en las asociaciones y la alta diversidad a finales del Cretácico en Aïn Settara sugieren un medio de plataforma externa-talud superior con una profundidad menor de 600 metros (Alegret *et al.*, 1999). Esta profundidad es similar a la estimada para el cercano corte de El Kef (Brinkhuis y Zachariasse, 1988; Keller, 1988; Van der Zwaan y Speijer, 1994). En las Tablas 1 y 2 se muestran los porcentajes de los géneros presentes en Aïn Settara cuya abundancia supera el 2% en al menos una de las muestras. Se han identificado un total de 158 especies cretácicas, de las cuales 51 son extremadamente raras o esporádicas. Estas 51 especies no han sido contabilizadas para calcular las tasas de extinción debido a su gran discontinuidad estratigráfica.

Los foraminíferos bentónicos de Aïn Settara muestran un patrón de extinción muy diferente al de los foraminíferos planctónicos en el tránsito K-T. Los foraminíferos planctónicos sufrieron una extinción casi total (92-97% de las especies cretácicas) en el tránsito K-T, habiéndose reconocido la extinción de alrededor del 70% de las especies en coincidencia con el límite K/T (Arenillas *et al.*, 2000b). Por el contrario, únicamente se extinguió el 21.5% de las especies de foraminíferos bentónicos. De las 107 especies cretácicas de foraminíferos bentónicos utilizadas para el cálculo de las tasas de extinción, 9 (8.4%) desaparecieron antes del límite K/T, 23 (21.5%) se extinguieron en coincidencia con el límite K/T y 81 (75.7%) especies sobrevivieron al evento.

Las especies que desaparecieron justo antes del

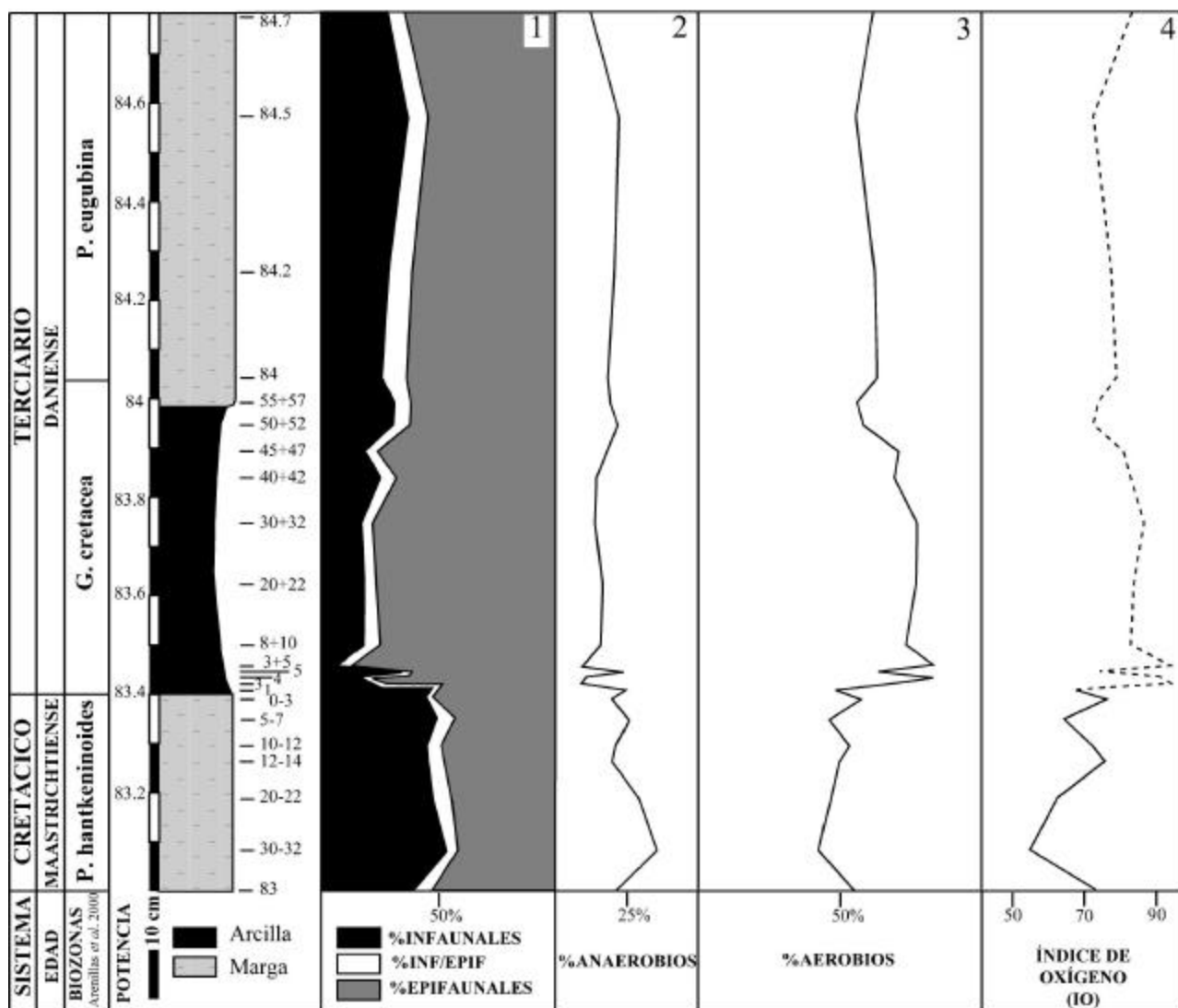


Figura 2: Detalle de la sección estudiada en torno al límite K/T. 1, proporción de morfogrupos infaunales/epifaunales en torno al límite K/T de Aïn Settara; 2, evolución de los morfogrupos anaerobios; 3, *idem* morfogrupos aerobios; 4, evolución del Índice de Oxígeno (OI).

límite son especies poco abundantes, por lo que el estudio de su distribución estratigráfica puede ser atribuible a una extinción de fondo o ser resultado del efecto Signor y Lipps (1982). La tasa de extinción en coincidencia con el límite K/T es muy baja si la comparamos con la de los foraminíferos planctónicos. Sin embargo, esta tasa de extinción en foraminíferos bentónicos es mucho mayor que la acaecida durante el Maastrichtiense.

De las 81 especies supervivientes, 7 (6.5%) se extinguieron en la Biozona de *G. cretacea* y 68 (63.5%) persistieron hasta el final del intervalo estratigráfico estudiado. Esta elevada tasa de supervivencia podría sugerir a algunos investigadores que los foraminíferos bentónicos no fueron afectados por el evento del límite K/T. Sin embargo, aunque la tasa de extinción fue baja, la diversidad descendió bruscamente en el límite

K/T, llegando incluso hasta sólo 16 ó 19 géneros por muestra en la Biozona de *G. cretacea*. Desde la parte superior de esta biozona, el número de géneros aumentó progresivamente en Aïn Settara, aunque en ningún momento volvió a recuperarse la diversidad alcanzada en el Maastrichtiense terminal.

La mayoría de las especies supervivientes tenían un modo de vida infaunal. Sin embargo, en el límite K/T el porcentaje de las formas infaunales decrece drásticamente, alcanzando un valor mínimo del 10% en el Paleoceno basal. Posteriormente, aumenta progresivamente hasta constituir el 20-35% de las asociaciones, muy por debajo de los valores alcanzados durante el Maastrichtiense terminal (Alegret et al., 1999). Cabe destacar que más de la mitad (51.4%) de las especies de foraminíferos bentónicos, muchos de ellos

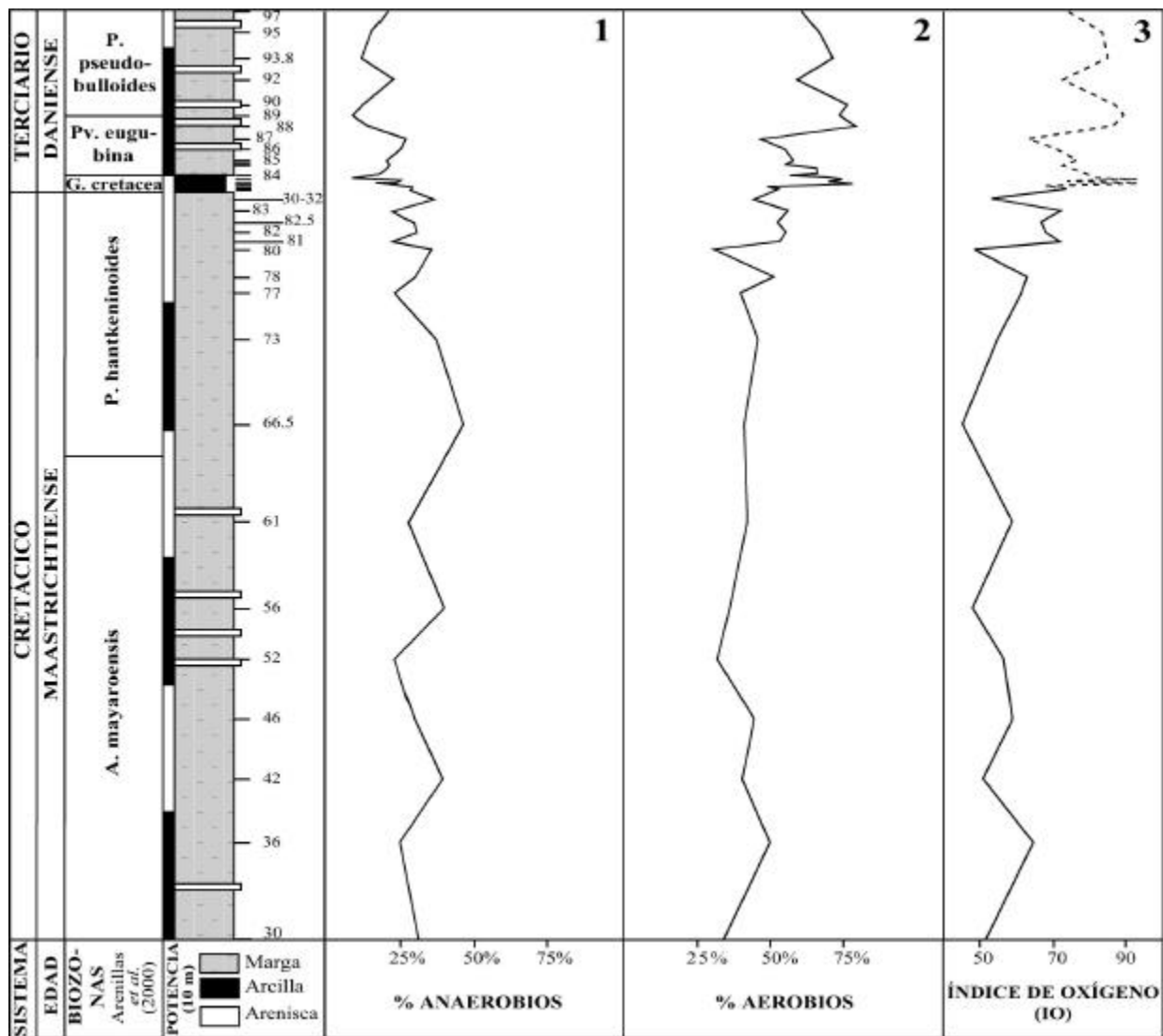


Figura 3: Evolución de los morfogrupos anaerobios (1), aerobios (2) y del Índice de Oxígeno (3) a lo largo de toda la sección estudiada en Ain Settara (biozonas desde *A. mayaroensis* hasta *P. Pseudobulloides*).

pertenecientes a morfogrupos infaunales, experimentaron un efecto Lázaro durante las Biozonas de *G. cretacea* y *Pv. eugubina* (Arenillas *et al.*, 2000b). Se trata de especies que desaparecieron temporalmente mientras duró la inestabilidad del medio (descenso en el aporte de nutrientes), para luego volver a recolonizar el área de Ain Settara.

Índice de Oxígeno (IO) disuelto

El aporte de alimento y oxígeno son parámetros fundamentales en la composición de las asociaciones de foraminíferos y en su abundancia (Van der Zwaan, 1982; Corliss y Chen, 1988; Sen Gupta y Machain-Castillo, 1993; Jorissen *et al.*, 1995). Por esta razón existe una

estrecha relación entre la morfología de la concha de los foraminíferos bentónicos y el contenido de oxígeno disuelto en las aguas (Bernhard, 1986; Kaiho, 1991). La aplicación de los criterios establecidos por Bernhard (1986) y Kaiho (1991) permite diferenciar entre ambientes aerobios y anaerobios en función de las distintas morfologías de los foraminíferos bentónicos.

En condiciones anaerobias, con menos de 0.1mL/L de oxígeno disuelto, predominan las asociaciones de foraminíferos bentónicos de conchas pequeñas, con morfologías alargadas, aplanadas o cilíndrico cónicas no ornamentadas, con abundantes poros y de pared fina. La alta densidad de poros en la concha de los morfogrupos anaerobios está relacionada con un mayor rendimiento en la toma de oxígeno (Leutenegger y Hansen, 1979), lo que les permite sobrevivir en condiciones anaerobias. Ade-

Tabla 1. Continuación.

	STW 81	STW 82	STW 82.5	STW 83	S-30-32	S-20-22	S-12-14	S-10-12	-5-7	-0-3	STWA 1
<i>Aglutinados spp.</i>	1.0	1.3	2.0	0.6	0.3	0.4	0.0	1.4	0.0	0.0	0.0
<i>Alabamina</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>Ammodiscus</i>	0.0	0.7	1.0	0.3	0.7	0.7	0.3	0.0	1.0	0.0	0.4
<i>Angulogavelinella</i>	0.0	0.0	0.3	0.0	0.3	0.7	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0
<i>Anomalinoides</i>	4.0	4.0	7.5	8.0	5.6	3.9	6.4	4.4	5.5	3.2	4.8
<i>Bifarina</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0
<i>Bolivinoides</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.2	6.7	5.8	2.4	1.1	4.8
<i>Bulimina</i>	0.0	0.0	0.3	0.0	0.3	0.0	0.3	0.3	1.0	1.1	1.5
<i>Cibicides</i>	2.6	9.6	9.2	10.6	10.9	8.8	14.3	15.7	10.3	10.0	4.8
<i>Cibicidoides</i>	27.1	14.2	8.2	15.4	7.3	10.6	16.2	13.7	16.5	24.4	15.9
<i>Clavulinoides</i>	1.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	1.8	0.0
<i>Coryphostoma</i>	0.0	2.6	4.6	0.6	1.3	2.5	2.9	3.4	2.4	3.6	4.4
<i>Eouvigerina</i>	0.0	0.3	1.0	0.0	0.0	0.0	1.6	1.7	1.0	0.7	0.4
<i>Gaudryina</i>	0.0	0.3	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	0.3	0.0	1.8
<i>Gaudryina/Verneuillina</i>	7.6	4.3	3.6	2.9	3.0	1.4	2.2	0.7	3.1	0.7	1.8
<i>Gavelinella</i>	0.0	0.7	1.6	0.0	0.0	2.1	0.0	0.7	0.3	1.1	1.8
<i>Globobulimina</i>	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.7
<i>Globulina</i>	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0
<i>Guttulina</i>	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0
<i>Gyroidinoides</i>	2.0	0.3	2.6	6.8	5.6	6.4	5.7	4.4	4.8	9.0	7.0
<i>Haplofragmoides</i>	2.3	1.3	0.3	0.6	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>Heterostomella</i>	0.0	4.6	1.0	1.0	1.0	4.2	4.5	2.0	1.7	0.0	1.1
<i>Laevidentalina</i>	3.0	5.3	6.2	8.4	5.6	5.3	2.9	5.5	12.0	3.2	5.5
<i>Lagena</i>	0.3	1.3	2.0	1.3	1.0	1.4	1.6	1.0	1.4	2.2	0.7
<i>Lenticulina</i>	8.9	5.3	6.6	10.6	4.6	8.5	4.1	3.4	6.9	1.8	4.8
<i>Marssonella</i>	0.0	1.0	0.7	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>Neoflabellina</i>	5.0	1.0	1.0	2.6	2.3	1.4	0.6	1.0	2.1	0.4	1.5
<i>Nodosaria</i>	2.0	3.3	0.0	0.0	0.3	3.5	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0
<i>Oolina</i>	0.7	2.0	0.3	0.0	0.0	0.4	0.6	0.0	1.0	1.1	1.1
<i>Oridorsalis</i>	1.0	8.3	9.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>Osangularia</i>	0.3	0.3	1.3	0.0	1.0	0.0	0.0	0.7	1.0	0.4	1.5
<i>Praebulimina</i>	0.0	0.0	2.6	2.3	2.3	0.0	1.9	0.7	0.7	0.7	1.8
<i>Praeglobobulimina</i>	4.6	0.0	3.9	5.1	7.6	4.2	1.3	2.7	0.3	2.9	3.3
<i>Pseudonodosaria</i>	1.3	0.7	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>Pullenia</i>	0.0	0.3	0.3	0.6	0.7	1.4	0.3	0.7	0.7	1.4	0.7
<i>Quinqueloculina</i>	1.3	2.6	0.3	0.3	1.3	1.4	1.3	0.7	0.0	0.4	0.0
<i>Ramulina</i>	1.0	1.0	1.0	1.9	2.6	1.4	1.6	0.7	1.7	1.8	1.5
<i>Recurvoides</i>	4.6	0.0	1.0	1.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>Reophax</i>	0.7	0.3	0.0	1.0	1.7	0.4	0.0	0.7	0.3	0.0	0.0
<i>Rhizammina</i>	0.7	1.0	0.3	0.0	0.0	1.4	0.3	1.0	0.3	0.0	0.0
<i>Saracenaria</i>	0.0	1.7	0.7	0.3	1.3	1.1	0.3	1.4	0.3	1.4	0.0
<i>Siphonodosaria</i>	2.3	0.0	2.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	0.7	3.0
<i>Sitella</i>	0.7	0.0	1.3	3.5	5.3	4.9	8.9	4.4	5.8	11.8	5.5
<i>Sliteria</i>	1.0	2.0	0.7	1.3	0.0	1.1	0.6	1.7	0.0	1.1	4.1
<i>Spiroplectammina</i>	0.3	2.0	1.3	1.0	2.3	2.1	1.9	0.7	1.4	1.1	1.8
<i>Spiroplectinella</i>	0.3	0.3	0.0	0.3	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4
<i>Stensioeina</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>Tritaxia</i>	7.3	2.3	2.3	1.9	3.0	4.2	0.0	2.7	2.4	1.4	2.2
<i>Trochammina</i>	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>Vaginulina</i>	1.0	1.0	0.0	0.3	10.6	0.0	2.2	0.3	1.0	1.8	0.4
<i>Valvalabamina</i>	0.0	6.0	2.6	4.5	4.6	5.3	2.9	2.7	2.4	2.9	4.1
<i>Verneuillina</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	3.1	0.0	0.0	0.4
Especies<2%	3.6	6.3	7.2	3.9	3.3	3.9	5.4	5.5	4.5	4.7	4.4
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Tabla 2. Continuación.

	STW 84	STW 84.2	STW 84.5	STW 84.7	STW 85	STW 86	STW 87	STW 88	STW 89	STW 90	STW 92
<i>Aglutinados spp.</i>	0.0	0.2	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0
<i>Alabamina</i>	4.9	6.9	3.4	6.5	4.6	1.9	5.5	0.0	0.9	0.0	0.9
<i>Ammodiscus</i>	0.2	0.7	0.0	0.5	1.0	0.0	0.0	0.6	0.3	1.9	0.3
<i>Angulogavelinella</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.5	2.9	4.8	4.4	3.2	1.2
<i>Anomalinoidea</i>	4.5	4.0	9.6	10.2	6.9	11.6	7.0	24.3	27.3	27.6	13.6
<i>Bifarina</i>	1.0	2.0	6.5	1.7	1.5	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>Bulimina</i>	0.4	1.0	0.3	2.7	1.3	0.9	4.6	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>Cibicides</i>	0.8	0.2	1.0	0.0	0.3	0.0	0.0	8.0	4.7	0.3	1.4
<i>Cibicoides</i>	47.4	44.3	33.1	34.7	29.3	20.0	13.9	14.7	8.2	10.1	9.0
<i>Clavulinoides</i>	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.9	2.6	4.4	2.3	2.0
<i>Coryphostoma</i>	1.2	1.2	0.7	0.8	0.8	0.9	1.2	3.5	2.3	1.6	2.0
<i>Gaudryina</i>	0.0	0.0	0.3	0.3	0.5	0.0	0.0	0.0	3.5	4.2	3.8
<i>Gaudryina/Verneuillina</i>	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	1.6	0.0	1.3	1.4
<i>Gaudryinopsis</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7
<i>Gavelinella</i>	0.0	0.7	1.0	0.5	0.8	4.9	1.4	3.8	3.2	9.4	8.1
<i>Globobulimina</i>	1.8	4.0	3.4	3.2	7.6	6.0	8.7	0.0	0.9	1.9	3.8
<i>Globulina</i>	2.3	1.2	0.3	0.9	0.5	1.2	1.4	0.3	1.5	0.0	0.3
<i>Glommospirella</i>	0.2	0.0	0.0	0.0	0.5	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9
<i>Guttulina</i>	1.0	0.7	0.0	0.6	1.0	0.0	0.0	0.3	0.0	1.0	0.6
<i>Gyroidinoides</i>	0.0	0.0	0.7	1.7	1.5	1.9	0.6	3.8	4.7	4.5	4.3
<i>Haplofragmoides</i>	0.0	0.2	0.0	0.0	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>Heterostomella</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>Laevidentalina</i>	3.5	4.2	2.7	1.2	0.8	3.2	4.6	4.2	0.9	3.9	4.6
<i>Lagena</i>	0.6	1.2	2.7	3.7	4.1	6.0	4.9	1.9	2.9	1.6	4.0
<i>Lenticulina</i>	10.5	7.7	7.5	7.5	5.3	7.7	4.6	2.6	5.0	3.2	1.7
<i>Loxostomoides</i>	0.4	1.0	3.1	2.6	2.5	0.9	3.2	1.0	0.9	2.3	3.2
<i>Marssonella</i>	0.6	1.0	3.8	0.2	1.8	0.5	0.3	0.0	0.3	0.0	0.0
<i>Neoflabellina</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.3
<i>Nodosaria</i>	0.0	0.7	1.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	0.3
<i>Oolina</i>	0.8	2.0	2.4	2.1	1.5	1.6	5.8	1.9	1.2	2.6	0.6
<i>Oridorsalis</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.3	1.3	0.0
<i>Osangularia</i>	3.9	4.0	1.4	2.3	4.6	1.6	9.0	4.2	4.1	4.5	3.2
<i>Praebulimina</i>	1.8	2.7	2.4	0.9	3.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>Praeglobobulimina</i>	5.7	3.5	3.8	4.3	2.0	7.9	6.4	0.6	0.6	1.3	0.0
<i>Pseudonodosaria</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>Pullenia</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	1.6	0.3	0.3	0.3
<i>Quinqueloculina</i>	0.0	0.2	0.0	0.2	1.8	0.0	1.7	1.0	1.2	1.9	2.0
<i>Ramulina</i>	0.0	0.2	0.7	0.3	1.5	1.2	0.0	1.3	1.5	0.3	0.9
<i>Recurvoides</i>	0.4	0.0	0.3	0.9	0.3	2.1	0.9	0.0	0.3	0.3	0.0
<i>Reophax</i>	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.2	0.0	0.3	0.0	0.3	0.6
<i>Rhizammina</i>	0.6	0.0	0.0	0.2	0.8	0.5	0.0	0.0	0.3	0.0	1.4
<i>Saracenaria</i>	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.5	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>Siphonodosaria</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	1.0	1.2	0.0	4.9
<i>Sitella</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>Sliteria</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>Spiroplectammina</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>Spiroplectinella</i>	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	2.9
<i>Stensioeina</i>	0.0	0.0	2.4	4.0	1.8	3.9	1.2	3.2	2.6	2.6	4.9
<i>Tritaxia</i>	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.9	0.9	0.3	3.8	0.0	0.3
<i>Trochammina</i>	0.6	0.7	0.0	0.3	0.0	0.9	0.3	0.0	0.0	0.6	0.0
<i>Vaginulina</i>	1.4	1.2	1.4	0.8	2.5	2.1	1.2	0.0	0.6	1.3	1.4
<i>Valvalabamina</i>	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	1.4	1.2	1.9	0.3	1.0	2.3
<i>Verneuillina</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Species<2%	3.1	1.7	1.7	4.1	4.3	4.4	4.1	3.5	3.5	1.0	4.9
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Tabla 2. Continuación.

	STW 93.8	STW 95	STW 97
<i>Aglutinados spp.</i>	0.0	0.0	0.3
<i>Alabamina</i>	4.7	2.5	0.7
<i>Ammodiscus</i>	0.3	0.0	0.3
<i>Angulogavelinella</i>	1.6	3.2	6.4
<i>Anomalinoidea</i>	17.4	12.1	6.7
<i>Bifarina</i>	0.0	0.0	0.0
<i>Bulimina</i>	0.0	0.0	0.7
<i>Cibicides</i>	6.3	4.5	6.1
<i>Cibicidoides</i>	7.3	8.6	6.4
<i>Clavulinoides</i>	4.1	5.1	4.0
<i>Coryphostoma</i>	1.6	1.6	1.0
<i>Gaudryina</i>	0.0	0.0	6.1
<i>Gaudryina/Verneuillina</i>	0.0	1.0	2.4
<i>Gaudryinopsis</i>	0.0	2.2	0.3
<i>Gavelinella</i>	7.0	7.6	0.3
<i>Globobulimina</i>	0.0	1.3	2.0
<i>Globulina</i>	3.8	1.0	0.0
<i>Glommospirella</i>	0.0	0.0	0.0
<i>Guttulina</i>	0.3	0.0	0.0
<i>Gyroidinoides</i>	2.8	7.6	4.4
<i>Haplofragmoides</i>	0.0	0.0	0.0
<i>Heterostomella</i>	0.0	0.0	0.0
<i>Laevidentalina</i>	3.5	3.8	5.1
<i>Lagena</i>	3.5	6.4	1.3
<i>Lenticulina</i>	5.7	7.3	7.1
<i>Loxostomoides</i>	0.6	0.0	0.0
<i>Marssonella</i>	0.0	0.0	0.0
<i>Neoflabellina</i>	0.0	0.6	0.7
<i>Nodosaria</i>	0.0	0.0	0.0
<i>Oolina</i>	0.3	1.0	0.0
<i>Oridorsalis</i>	0.0	0.0	0.0
<i>Osangularia</i>	5.7	2.9	2.0
<i>Praebulimina</i>	0.0	0.0	0.0
<i>Praeglobobulimina</i>	0.0	0.6	1.0
<i>Pseudonodosaria</i>	0.0	0.3	0.0
<i>Pullenia</i>	1.9	1.6	1.0
<i>Quinqueloculina</i>	2.8	1.6	6.4
<i>Ramulina</i>	0.6	1.0	1.3
<i>Recurvoides</i>	0.0	0.0	0.3
<i>Reophax</i>	0.0	0.0	0.3
<i>Rhizammina</i>	0.0	0.3	0.3
<i>Saracenaria</i>	2.2	0.3	0.3
<i>Siphonodosaria</i>	0.9	1.6	2.7
<i>Sitella</i>	0.0	0.0	0.0
<i>Sliteria</i>	0.0	0.0	0.0
<i>Spiroplectammina</i>	0.0	0.0	0.0
<i>Spiroplectinella</i>	1.3	2.9	2.7
<i>Stensioeina</i>	4.4	1.0	7.1
<i>Tritaxia</i>	2.2	2.2	0.0
<i>Trochammina</i>	0.0	0.0	0.0
<i>Vaginulina</i>	0.3	0.0	1.0
<i>Valvalabamina</i>	1.9	2.2	0.3
<i>Verneuillina</i>	0.0	0.0	0.0
Especies <2%	4.7	4.1	10.8
TOTAL	100	100	100

más, presentan una mayor relación superficie-volumen que las formas aerobias. Otra característica típica de las asociaciones de foraminíferos bentónicos en medios anaerobios son el pequeño tamaño de las conchas, así como la presencia de cámaras infladas y desenrolladas o alargadas. En Aïn Settara, las formas anaerobias aparecen representadas por especies tales como *Coryphostoma plaitum*, *C. incrassata*, *Laevidentalina catenula*, *L. legumen*, *L. plummerae*, formas pequeñas y de pared delgada del género *Nodosaria* (ej., *Nodosaria limbata*), *Pleurostomella*, *Pseudonodosaria manifesta* o *Tappanina selmensis* (Figura 4).

Por el contrario, las asociaciones típicas de medios aerobios, donde la cantidad de oxígeno disuelto en las aguas es mayor que 0.5 mL/L, se caracterizan por morfologías esféricas, planoconvexas, lenticulares y biumbilicadas (Bernhard, 1986). Algunas de las especies aerobias halladas en Aïn Settara son: *Alabamina midwayensis*, *Anomalinoidea affinis*, *A. praeacutus*, *Cibicidoides pseudoacutus*, *Anomalinoidea rubiginosus*, *Gyroidinoides soldani*, *G. nitidus*, *Nuttalides truempyi*, *Oridorsalis plummerae*, *Osangularia velascoensis*, *Pullenia coryelli*, *P. cretacea* y *Stensioeina beccariiiformis* (Figura 5). Por otro lado, existe un grupo de formas intermedias, de morfología similar a las formas aerobias, pero que presentan paredes más gruesas y con una ornamentación distintiva, como *Bulimina midwayensis*, *Pyramidulina obscura* y *Eouvigerina subsculptura* (Figura 4), o bien una morfología lenticular, con conchas finas planispiraladas y con una relación superficie-volumen media, como *Lenticulina muensteri*.

Las formas aerobias habitan los sedimentos superficiales, en los dos primeros centímetros, mientras que las formas anaerobias viven enterradas a mayor profundidad, entre los 7 y 15 cm superiores del fondo marino. Es importante recalcar que, aunque las formas anaerobias dominan las asociaciones de foraminíferos bentónicos en medios con escasez de oxígeno disuelto, los sedimentos depositados bajo unas buenas condiciones de oxigenación de las aguas pueden contener asociaciones con elementos aerobios y anaerobios. Esta situación se da en Aïn Settara durante el Cretácico terminal, donde las comunidades de foraminíferos bentónicos están constituidas por morfogrupos mixtos aerobios y anaerobios. En la Tabla 3 se citan algunos de los géneros presentes en Aïn Settara que han sido agrupados dentro de los morfogrupos aerobio, anaerobio e intermedio. En las Figuras 2 y 3 se muestran los porcentajes de cada uno de los morfogrupos diferenciados, en cuyo cálculo se han considerado todos los géneros, incluyendo a aquellos que aparecen en proporciones menores al 2%.

La diferenciación de morfogrupos aerobios y anaerobios nos ha permitido calcular el Índice de Oxígeno (IO), que se define como la relación $(A/(A+N) \times 100)$, siendo A el número de foraminíferos bentónicos aerobios y N el número de anaerobios presentes en una muestra (Kaiho, 1991). El IO es una medida de la cantidad de oxígeno disuelto en las aguas del fondo oceánico,

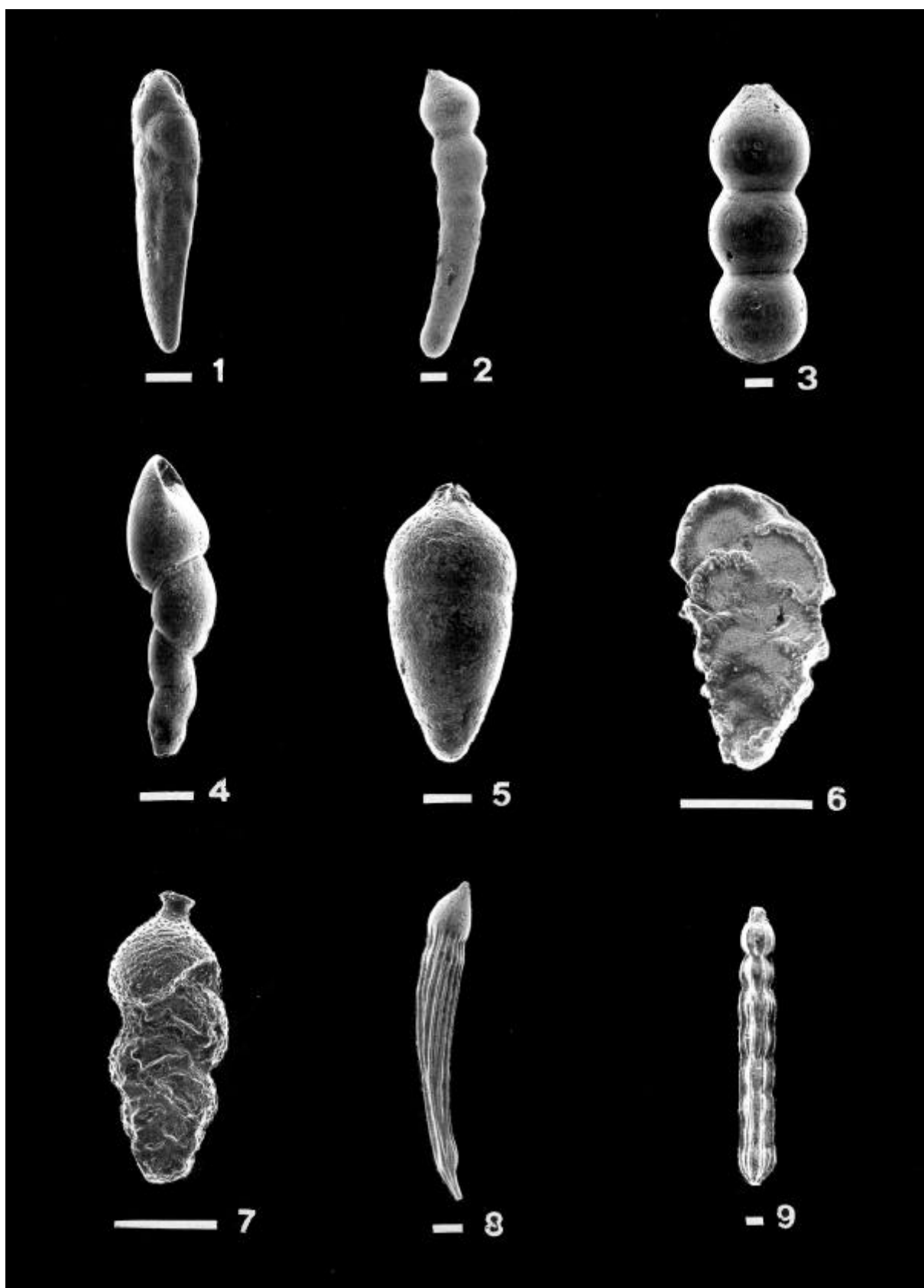


Figura 4: Foraminíferos bentónicos representativos de los morfogrupos anaerobios, y número de muestra a la que pertenecen: 1, *Coryphostoma plaitum* (80); 2, *Laevidentalina* (+8+10); 3, *Nodosaria limbata* (80); 4, *Pleurostomella* (82,5); 5, *Pseudonodosaria* (52); 6, *Tappanina selmensis* (66,5); y de los morfogrupos intermedios: 7, *Eouvigerina subsculptura* (-10-12); 8, *Dentalina* (+20+22); 9, *Pyramidulina obscura* (36). Las barras equivalen a 100 micras.

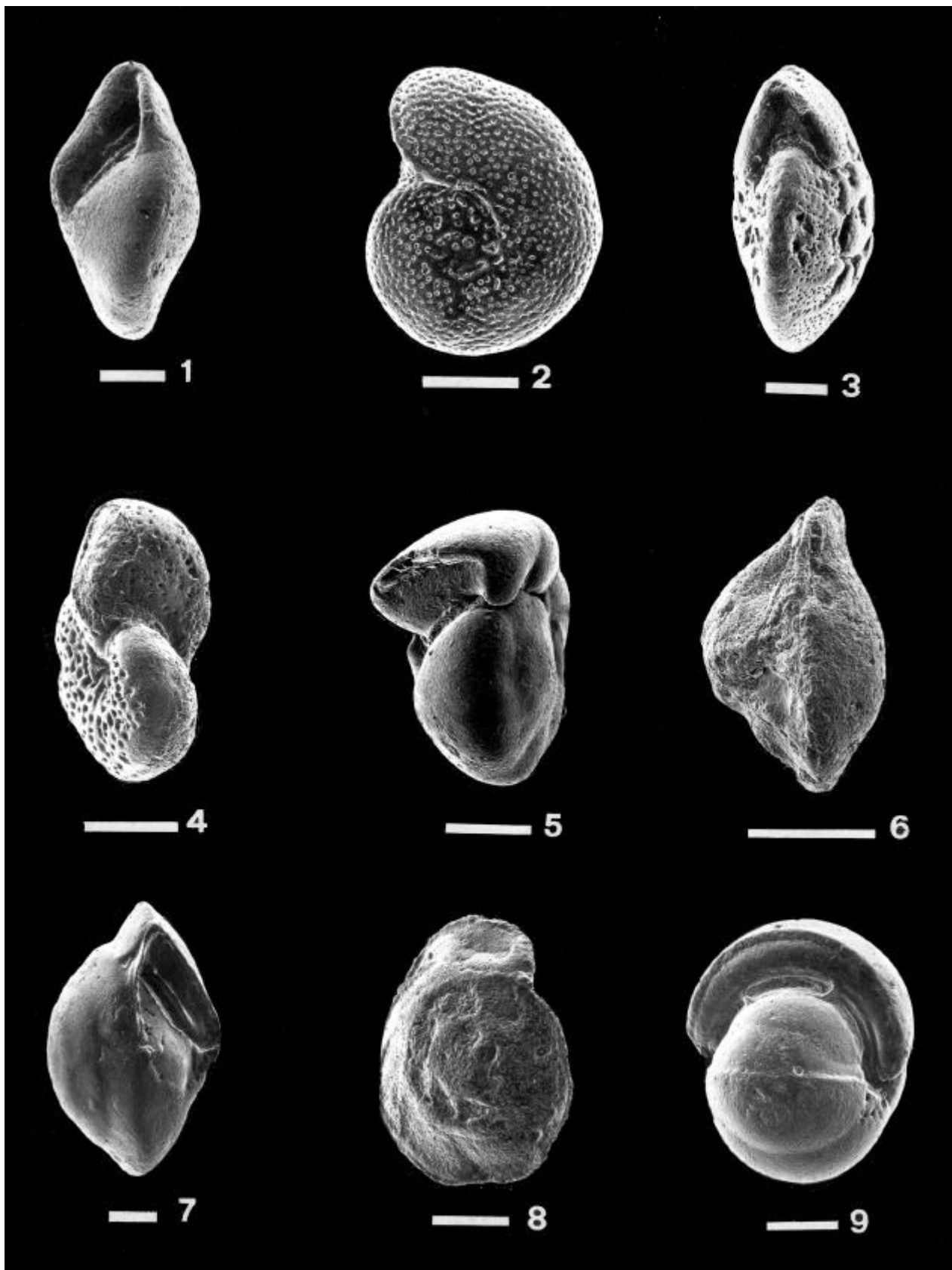


Figura 5: Foraminíferos bentónicos representativos de los morfogrupos aerobios, y número de muestra a la que pertenecen: 1, *Alabamina midwayensis* (+45+47); 2, *Anomalinoidea affinis* (46); 3, *Cibicoides pseudoacutus* (46); 4, *Anomalinoidea rubiginosus* (84,2); 5, *Gyroidinoides soldani* (81); 6, *Nuttallides truempyi* (+3+5); 7, *Oridorsalis plummerae* (82); 8, *Osangularia velascoensis* (+40+42); 9, *Pullenia coryelli* (36). Las barras equivalen a 100 micras.

y nos ha permitido reconstruir una curva que muestra su evolución a lo largo del tiempo. Los valores de IO pueden aparecer distorsionados por la disolución diferencial de algunos foraminíferos. Sin embargo, las muestras de Aïn Settara contienen foraminíferos cuya conservación es excepcional, y no se han encontrado indicios claros de disolución diferencial, salvo en las primeras muestras del Paleoceno. Por esta razón se ha considerado que las proporciones entre las formas aerobias y las anaerobias son muy similares a las de las asociaciones originales, hecho que confiere fiabilidad a los valores obtenidos del IO para el Cretácico superior.

El estudio cuantitativo de las formas aerobias, anaerobias e intermedias y del IO sugiere importantes cambios en el límite K/T (Figuras 2 y 3). La evolución que muestran estos morfogrupos refleja una significativa disminución de las formas anaerobias, pasando del 25% a menos del 6% del total, y un aumento de las aerobias en el Paleoceno, fundamentalmente en la Biozona de *G. cretacea*, pasando de un 50% a más del 85%. Estos datos indican que la disminución de los morfotipos anaerobios fue de casi un 20%, mientras que los morfogrupos aerobios aumentaron hasta un 35%. En la primera muestra del Daniense, estas variaciones representan solamente el 18% y el 24% respectivamente, aunque estos valores pueden haberse alterado debido a la reelaboración de los foraminíferos y a la disolución de los mismos.

La evolución de la curva IO (Figuras 2-4 y 3-3) a lo largo de la sección de Aïn Settara refleja también cambios bruscos en el límite K/T. Los valores del IO durante el Cretácico Superior (Biozonas de *A. mayaroensis* y parte de *P. hantkeninoides*) son bajos-medios, y están comprendidos entre 45 y 63. Sin embargo, la existencia de asociaciones mixtas con morfogrupos aerobios y anaerobios sugiere que la cantidad de oxígeno disuelto en las aguas, aun sin ser demasiado elevada, superaría los 0.5 mL/L. En el Cretácico terminal (últimos 4 metros de la Biozona de *P. hantkeninoides*) estos valores au-

mentan y el IO alcanza valores de hasta 75.7, indicando unas condiciones bien oxigenadas del fondo marino. Coincidiendo con el límite K/T, el IO cambia drásticamente de 67.4 a 93.8 indicando un aparente incremento de la oxigenación de las aguas. Estos valores se mantienen elevados durante la parte inferior del Daniense, aunque descienden lentamente hasta alcanzar valores en torno a 80.

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN

La gran diversidad de las comunidades de foraminíferos bentónicos y la presencia de asociaciones mixtas infaunales y epifaunales indican una generalizada estabilidad ambiental durante el Maastrichtiense superior. El IO muestra una oxigenación de las aguas suficiente para el desarrollo de asociaciones mixtas de foraminíferos bentónicos aerobios y anaerobios. El valor máximo alcanzado en el Cretácico terminal (parte superior de la Biozona de *P. hantkeninoides*) indica un notable aumento en la oxigenación y unas condiciones óptimas para el desarrollo de las comunidades en Aïn Settara. Esta estabilidad ambiental del Maastrichtiense superior contrasta con el brusco descenso de los morfogrupos infaunales coincidiendo con la extinción de más del 22% de las especies de foraminíferos bentónicos y alrededor del 95% de planctónicos, así como la desaparición temporal del 51.5% de "especies Lázaros" de foraminíferos bentónicos que reaparecieron a lo largo del Daniense inferior (Arenillas *et al.*, 2000b). Keller (1988) y van der Zwaan y Speijer (1994) obtuvieron resultados similares en el cercano corte de El Kef. Según Keller (1988), este cambio faunístico fue causado por variaciones relativas del nivel del mar, aunque Van der Zwaan y Speijer (1994) descartaron dicha posibilidad. En el corte de Aïn Settara las asociaciones de foraminíferos bentónicos indican un medio de plataforma externa-talud superior, y no se han registrado variaciones del nivel del mar a lo largo de la sección estudiada.

Coincidiendo con el límite K/T se produce un significativo incremento de los morfogrupos aerobios y, en consecuencia, del índice IO. Sin embargo este índice no puede ser empleado como un indicador fiable de las oxigenación de las aguas en el fondo oceánico, debido a que el evento del límite K/T sugiere una completa desestabilización de los medios planctónico y bentónico. Los estudios de isótopos estables realizados por Keller (1988) y Van der Zwaan y Speijer (1994) en El Kef indican un brusco descenso del oxígeno disuelto en coincidencia con el límite K/T, al contrario de lo que indican los valores obtenidos para el IO en el Paleoceno inferior.

Jorissen *et al.* (1995) indicaron que la distribución de los foraminíferos bentónicos depende tanto del oxígeno disuelto como del aporte de nutrientes al fondo marino. En Aïn Settara, el cambio faunístico en las comunidades bentónicas fue causado fundamentalmente por un

Tabla 3: Representantes de los géneros más abundantes de foraminíferos bentónicos presentes en Aïn Settara incluidos en este trabajo dentro de los morfogrupos aerobio, anaerobio e intermedio.

F. B. AEROBIOS	F. B. INTERMEDIOS	F. B. ANAEROBIOS
Alabama	Bolivinoidea	Bifarina
Angulogavelinella	Bulimina	Coryphostoma
Anomalinoidea	Eouvigerina	Globobulimina
Cibicides	Globulina	Heterostomella
Cibicidoides	Guttulina	Laevidentalina
Gavelinella	Lagena	Nodosaria
Gyroidinoidea	Lenticulina	Praeglobobulimina
Oridorsalis	Loxostomoides	Pseudonodosaria
Osangularia	Neoflabellina	Saracenaria
Pullenia	Oolina	Siphonodosaria
Sliteria	Praebulimina	Spiroplectammina
Stensioeina	Sitella	Vaginulina
Valvalabamina	Spiroplectinella	

importante descenso en el aporte alimenticio a los fondos (Alegret *et al.*, 1999; Arenillas *et al.*, 2000b). La propia reestructuración de las comunidades bentónicas indica un importante descenso de la productividad primaria en coincidencia con el límite K/T. Esta escasez de nutrientes provocó la desaparición temporal de la mayoría de las especies infaunales y la proliferación de especies epifaunales, debido a que éstas tenían un acceso preferente a las partículas alimenticias. La proliferación de especies epifaunales, muchas de las cuales son consideradas aerobias según los criterios de Kaiho (1991), refleja un aumento ficticio del IO.

El aumento del IO en Aïn Settara coincide con un incremento en el carbono orgánico (TOC) y un descenso del $\delta^{13}\text{C}$ (Dupuis *et al.*, 2001). Estos cambios geoquímicos e isotópicos se producen en coincidencia con el límite K/T y se mantienen a lo largo de la arcilla del límite en la parte basal del Daniense, fundamentalmente durante la Biozona de *G. cretacea*. Posteriormente, estos valores se recuperan en el Daniense hasta alcanzar valores similares a los del Maastrichtiense terminal. El incremento del TOC indica una disminución en la oxigenación que queda representada por la arcilla del límite y explica el color oscuro de la misma.

Un descenso del $\delta^{13}\text{C}$ y, por tanto, de la productividad, han sido identificados en cortes y sondeos del límite K/T de todo el mundo (Boersma y Shackleton, 1981; Hsü *et al.*, 1982; Zachos y Arthur, 1986) y constituyen la denominada perturbación “*Strangelove*” (Hsü y McKenzie, 1985). Generalmente se ha relacionado la expansión de la zona de mínima oxigenación con aumentos del $\delta^{13}\text{C}$ y la productividad, debido a que la oxidación de la materia orgánica y la descomposición bacteriana ocasiona una disminución de la oxigenación. Sin embargo, en el límite K/T ambos indicadores (TOC y $\delta^{13}\text{C}$) parecen mostrar escenarios opuestos, con un descenso en la oxigenación y un descenso en la productividad, respectivamente. Este hecho sugiere que la disminución de la oxigenación en el medio tras el límite K/T no estuvo relacionada con un incremento en la productividad, sino con cambios químicos en la atmósfera e hidrosfera que incluyen un aumento del CO_2 y un descenso del O_2 (efecto invernadero).

Los indicadores de oxigenación dentro del grupo de los foraminíferos planctónicos también indican esta aparente contradicción. Tras la extinción en masa catastrófica del límite K/T, se produce un incremento en abundancia de *Guembelitra*, *Parvularugoglobigerina* y *Chiloguembelina* en tres episodios diferentes (Arenillas *et al.*, 1998, 2000a,b). La proliferación de guembelítridos, chiloguembelínidos y pequeños globigerínidos ha sido relacionada generalmente con eventos eutróficos y anóxicos (Boersma y Premoli-Silva, 1988, 1989; Hallock *et al.*, 1991). Sin embargo, aunque el evento del límite K/T se caracteriza por la baja oxigenación de las aguas, las condiciones fueron oligotróficas debido al fuerte descenso de la productividad

marina superficial.

Todos estos indicadores paleoecológicos sugieren que los cambios faunísticos en el medio bentónico, al igual que en el planctónico, se deben principalmente al descenso de la productividad y los nutrientes, y en consecuencia con la ruptura de la cadena trófica, siendo la oxigenación de las aguas un factor menos determinante. Aunque el incremento del TOC parece indicar una disminución en la oxigenación, el contenido en oxígeno tuvo que ser al menos suficiente para permitir el desarrollo de las comunidades de foraminíferos bentónicos epifaunales. Las especies planctónicas que sobrevivieron y las que evolucionaron rápidamente eran especies oportunistas de estrategia-r y euríticas. Estas especies oportunistas proliferan en condiciones eutróficas y disóxicas, como los chiloguembelínidos, pero también proliferan en condiciones medioambientales inestables, por ejemplo tras una crisis biológica importante como la del límite K/T (Li *et al.*, 1995). Son especies desastre y generalistas con grandes tolerancias medioambientales y proliferan tanto en condiciones eutróficas como oligotróficas tras la desaparición o extinción de las especies de estrategia-K.

El cambio faunístico y medioambiental en Aïn Settara coincide con las evidencias de impacto identificadas en el mismo corte, tales como la anomalía de Ir y espinelas ricas en Ni (Dupuis *et al.*, 2001). Estos datos apoyan la hipótesis del impacto de un asteroide (Alvarez *et al.*, 1980) y permiten establecer una relación causa-efecto entre todos los eventos identificados. Según esta teoría, el impacto de este asteroide y la dispersión a nivel mundial de una nube de polvo de material expulsado y evaporado provocó el oscurecimiento de la atmósfera (invierno de impacto), el cese de la fotosíntesis global y un brusco descenso de la productividad primaria. Estos cambios medioambientales bruscos y rápidos permiten explicar la drástica modificación de la estructura de las comunidades de foraminíferos bentónicos y la extinción en masa catastrófica del 95% de los foraminíferos planctónicos (Arenillas *et al.*, 2000b).

CONCLUSIONES

El análisis cuantitativo y cualitativo de los foraminíferos bentónicos de Aïn Settara (Tunicia) muestra importantes variaciones en coincidencia con el límite Cretácico/Terciario. La relación existente entre las morfologías de las conchas de los foraminíferos bentónicos y la oxigenación de las aguas en el fondo marino permite diferenciar entre morfogrupos aerobios, anaerobios e intermedios, y observar su variación a lo largo del tiempo. Las asociaciones de foraminíferos bentónicos están compuestas por morfogrupos mixtos infaunales y epifaunales, dominando las formas aerobias sobre las anaerobias en todo el intervalo estudiado.

El Índice de Oxígeno disuelto (IO) obtenido para este sector meridional del Tetis muestra una tendencia

creciente en el Cretácico terminal, reflejando un aumento en la oxigenación de las aguas del fondo marino, y unas condiciones del medio marino propicias para el desarrollo de las comunidades de foraminíferos bentónicos infaunales y epifaunales. Coincidiendo con el límite K/T, la diversidad de los foraminíferos bentónicos decae bruscamente, así como la abundancia de morfogrupos infaunales y anaerobios. El aporte de nutrientes al fondo marino disminuye, favoreciendo el desarrollo de especies oportunistas epifaunales capaces de aprovechar las escasas partículas alimenticias que llegan al fondo. Las evidencias encontradas reflejan un importante descenso en la productividad primaria coincidiendo con el límite K/T, y apoyan la teoría de un impacto meteorítico sobre la superficie terrestre como la causa desencadenante de la extinción en masa catastrófica del límite K/T.

AGRADECIMIENTOS

Trabajo financiado por el proyecto DGES de España, número PB97-1016. Los autores agradecen a C. Dupuis de la *Faculté Polytechnique de Mons* (Bélgica) su colaboración en los muestreos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alegret, L., Molina, E., Peryt, D., 1999, Evolución de las asociaciones de foraminíferos bentónicos en el límite Cretácico/Terciario de Ain Settara, Tunicia, en Rabano, I. (ed.), *Actas XV Jornadas de Paleontología*: Madrid, Instituto Tecnológico y Geominero Español, Temas Geológico-Mineros, 26, 142-146.
- Alvarez, L.W., Alvarez, W., Asaro, F., Michel, H.V., 1980, Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction: *Science*, 208, 1,095-1,108.
- Arenillas, I., Arz, J.A., Molina, E., 1998, El límite Cretácico/Terciario de Zumaya, Osinaga y Músquiz (Pirineos); control bioestratigráfico y cuantitativo de hiatos con foraminíferos planctónicos: *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 11, 127-138.
- Arenillas, I., Arz, J.A., Molina, E., 2000a, Spanish and Tunisian Cretaceous-Tertiary boundary sections; a planktic foraminiferal biostratigraphic comparison and evolutive events, in Schmitz, B., Sundquist, B., Andreasson, F.P. (eds.), *Early Paleogene warm climates and biosphere dynamics; short papers and extended abstracts*: Stockholm, Geologiska Föreningens i Stockholm Föreläsningar - GFF, 122(1), 11-12.
- Arenillas, I., Alegret, L., Arz, J.A., Molina, A.E., 2000b, Los foraminíferos planctónicos y bentónicos de Ain Settara, Tunicia; dos patrones de extinción diferentes y una misma causa?: *Geotemas*, 1(2), 331-334.
- Arenillas, I., Arz, J.A., Molina, E., Dupuis, C., 2000c, The Cretaceous/Paleogene (K/P) boundary of Ain Settara, Tunisia, sudden catastrophic mass extinction in planktic foraminifera: *Journal of Foraminiferal Research*, 30(3), 202-218.
- Arz, J.A., Arenillas, I., Molina, A.E., Dupuis, Ch., 1999, Los efectos tafonómico y "Signor-Lipps" sobre la extinción en masa de foraminíferos planctónicos en el límite K/T de Elles (Tunicia): *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 12, 251-267.
- Bernhard, J.M., 1986, Characteristic assemblages and morphologies of benthic foraminifera from anoxic, organic-rich deposits; Jurassic through Holocene: *Journal of Foraminiferal Research*, 16, 207-215.
- Boersma, A., Premoli-Silva, I., 1988, Boundary conditions of Atlantic Eocene oxygen minimum zones: *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*, 93, 479-506.
- Boersma, A., Premoli-Silva, I., 1989, Atlantic Paleogene biserial heterohelcid foraminifera and oxygen minima: *Paleoceanography*, 4, 271-286.
- Boersma, A., Shackleton, N.J., 1981, Oxygen-and carbon-isotope variations and planktonic foraminiferal depth habitats, late Cretaceous to Paleocene, central Pacific, Deep Sea Drilling Project, sites 463 and 465 (DSDP): *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, 62, 513-526.
- Brinkhuis, H., Zachariasse, W.J., 1988, Dinoflagellate cysts, sea level changes and planktonic foraminifera across the Cretaceous-Tertiary boundary at El Haria, northwest Tunisia: *Marine Micropaleontology*, 13, 153-191.
- Coccioni, R., Galeotti, S., 1994, K-T boundary extinction: geologically instantaneous or gradual event? Evidence from deep sea benthic foraminifera: *Geology*, 22, 779-782.
- Corliss, B.H., 1985, Microhabitats of benthic foraminifera within deep-sea sediments: *Nature*, 314, 435-438.
- Corliss, B.H., Chen, C., 1988, Morphotype patterns of Norwegian sea deep-sea benthic foraminifera and ecological implications: *Geology*, 16, 716-719.
- Dupuis, C., Tribouillard, N., Arenillas, I., Arz, J.A., Robaszynski, F., Caron, M., Robin, E., Rocchia, R., Lefevre, I., Steurbaut, E., Molina, E., Rauscher, R., 2001, The Cretaceous-Paleogene (K/P) boundary in the Ain Settara section (Kalaat senan, Central Tunisia): lithological, micropaleontological and geochemical evidence: *Bulletin de l' Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique, Sciences de la Terre*, 71, 169-190.
- Dupuis, C., Steurbaut, E., Molina, E., Rauscher, T., Tribouillard, N.P., Arenillas, I., Arz, J.A., Robaszynski, F., Caron, M., Robin, E., Rocchia, R., Lefevre, I., Schuler, M., Larque, P., en prensa, Biotic evolution and events across the Cretaceous/Tertiary (K/T) boundary in the Ain Settara section (Kalaat-Senan area, Central Tunisia): *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*.
- Hallock, P., Premoli-Silva, I., Boersma, A., 1991, Similarities between planktonic and larger foraminiferal evolutionary trends through Paleogene paleoceanography changes: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 83, 49-64.
- Hansen, T., Blechschmidt, G., Farrand, R., Montgomery, H.A., Billman, H.G., 1987, Sedimentology and extinction patterns across the Cretaceous-Tertiary boundary interval in east Texas (USA): *Cretaceous Research*, 8, 229-252.
- Hsü, K.J., McKenzie, J., 1985, A "Strangelove" ocean in the earliest Tertiary, in Sundquist, T. (ed.), *The carbon cycle an atmospheric CO₂; natural variation Archean to present*: Washington, D.C., American Geophysical Union, *Geophysical Monographs*, 32, 487-492.
- Hsü, K.J., He, Q., McKenzie, J.A., Weissert, H., Perch-Nielsen, K., Oberhänsli, H., Kelts, K., Labreque, J., Tauxe, L., Krahennbuhl, U., Percival, S.F., Wright, R., Karpoff, A.M., Petersen, N., Tucker, P., Poore, R.Z., Gombos, A.M., Pisciotto, K., Carman, M.F., Schreiber, E., 1982, Mass mortality and its environmental and evolutionary consequences: *Science*, 216, 249-256.
- Jones, R.W., Charnock, M.A., 1985, "Morphogroups" of agglutinating foraminifera; their life positions and feeding habits and potential applicability in (paleo)ecological studies: *Revue de Paléobiologie*, 4, 311-320.
- Jorissen, F.J., De Stigter, H.C., Widmark, J.G.V., 1995, A conceptual model explaining benthic foraminiferal microhabitats: *Marine Micropaleontology*, 26, 3-15.
- Kaiho, K., 1991, Global changes of Paleogene aerobic/anaerobic benthic foraminifera and deep-sea circulation: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 83, 65-85.
- Keller, G., 1988, Biotic turnover in benthic foraminifera across the Cretaceous/Tertiary boundary at El Kef, Tunisia: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 66, 153-172.
- Kouwenhoven, T.J., Speijer, R.P., Van Oosterhout, C.W.M., van der Zwaan, G.J., 1997, Benthic foraminiferal assemblages between two major extinction events; the Paleocene El Kef sec-

- tion, Tunisia: Marine Micropaleontology, 29, 105-127.
- Leutenegger, S., Hansen, H.J., 1979, Ultrastructural and radiotracer studies on pore function in foraminifera: Marine Biology, 54, 11-16.
- Li, Q., McGowran, B., Boersma, A., 1995, Early Palaeocene *Parvulogræoglobigerina* and late Eocene *Praetenuitella*; does evolutionary convergence imply similar habitat?: Journal of Micropaleontology, 14, 119-134.
- Loeblich, A.R. Jr., Tappan, H., 1988, Foraminiferal; genera and their classification: New York, Van Nostrand Reinhold, 970 p.
- Molina, E., Arenillas, I., Arz, J.A., 1996, The Cretaceous/Tertiary boundary mass extinction in planktic foraminifera at Agost, Spain: Revue de Micropaléontologie, 39, 225-243.
- Molina, E., Arenillas, I., Arz, J.A., 1998, Mass extinction in planktic foraminifera at the Cretaceous/Tertiary boundary in subtropical and temperate latitudes: Bulletin de la Société Géologique de France, 169, 351-363.
- Olsson, R.K., Wise, Jr., S.W., 1987, Upper Paleocene to middle Eocene depositional sequences and hiatuses in the New Jersey Atlantic Margin, in Ross, C.A., Haman, D. (eds.), Timing and depositional history of eustatic sequences; constraints on seismic stratigraphy: Cushman Foundation for Foraminiferal Research, Special Publication, 24, p. 99-112.
- Sen Gupta, B.K., Machain-Castillo, M.L., 1993, Benthic foraminifera in oxygen-poor habitats: Marine Micropaleontology, 20, 183-201.
- Signor, P.W., Lipps, J.H., 1982, Sampling bias, gradual extinction patterns and catastrophes in the fossil record, in Silver, L.T., Schulz, P.H. (eds.), Implications of impacts of large asteroids and comet on the earth: Boulder, Colorado, Geological Society of America, Special Paper, 190, 291-296.
- Smit, J., 1982, Extinction and evolution of planktonic foraminifera after a major impact at the Cretaceous/Tertiary boundary, in Silver, L.T., Schulz, P.H. (eds.), Implications of impacts of large asteroids and comet on the earth: Boulder, Colorado, Geological Society of America, Special Paper, 190, 329-352.
- Speijer, R.P., van der Zwaan, G.J., 1996, Extinction and survivorship in southern Tethyan benthic foraminifera across the Cretaceous/Paleogene boundary, in Hart, M.B. (ed.), Biotic recovery from mass extinction events: London, Geological Society, Special Publication, 102, 343-371.
- Speijer, R.P., van der Zwaan, G.J., Schmitz, B., 1996, The impact of Paleocene/Eocene boundary events on middle neritic benthic foraminiferal assemblages from Egypt: Marine Micropaleontology, 28, 99-132.
- Thomas, E., 1990, Late Cretaceous through Neogene deep sea benthic foraminifera (Maude Rise, Weddell Sea, Antarctica): Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results, 113, 571-594.
- Van der Zwaan, G.J., 1982, Paleoecology of late Miocene mediterranean foraminifera: Utrecht Micropaleontological Bulletins, 25, 202 p.
- Van der Zwaan, G.J., Speijer, R., 1994, Extinction and survivorship patterns in southern Tethyan benthic foraminiferal assemblages across the Cretaceous/Paleogene boundary: Geologica Ultraiectina, 124, 19-64.
- Zachos, J.C., Arthur, M.A., 1986, Paleocyanography of the Cretaceous/Tertiary boundary event inferences; from stable isotopic and other data: Paleocyanography, 1, 5-26.

Manuscrito recibido: Mayo 19, 2000

Manuscrito corregido recibido: Octubre 18, 2000

Manuscrito aceptado: Octubre 26, 2000