

## El corte de Zumaya (España): registro de los foraminíferos bentónicos del Paleógeno inferior

Laia Alegret<sup>1,\*</sup> y Silvia Ortiz<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ciencias de la Tierra e Instituto Universitario de Investigación en Ciencias Ambientales de Aragón, Universidad de Zaragoza, 50009 Zaragoza, España.

<sup>2</sup>Departamento de Estratigrafía y Paleontología. Universidad del País Vasco, España.

\*laia@unizar.es

### RESUMEN

*El corte de Zumaya (Norte de España, cuenca Vasco-Cantábrica) se ha convertido en un referente a nivel mundial para el estudio de sedimentos marinos del Cretácico y del Paleógeno. Con el fin de analizar la evolución paleoambiental a lo largo del Paleógeno inferior, en el presente trabajo se muestra el estudio cuantitativo de las asociaciones de foraminíferos bentónicos del corte de Zumaya desde el límite Cretácico/Paleógeno hasta el Eoceno inicial. Para realizar dicho estudio se han seleccionado los taxones más representativos de todo el corte, y se ha calculado la abundancia relativa de cada uno de ellos, así como la diversidad y heterogeneidad de las asociaciones, en 72 muestras.*

*Las asociaciones de foraminíferos bentónicos indican un medio de depósito de unos 1000 m para el Paleógeno inicial, probablemente algo más somero durante el Daniense terminal. Se sugiere que, además de la profundidad del medio, otros factores como la perturbación del fondo marino, las corrientes de turbidez o la composición del sedimento, pudieron determinar la distribución y composición de las asociaciones. Así, la abundancia de foraminíferos aglutinados de cemento orgánico (tipo Flysch) se relaciona con un elevado aporte de material clástico terrígeno al fondo marino, que fue especialmente intenso durante el Selandiense y Thanetiense.*

*Este estudio ha permitido analizar en detalle diversos eventos de carácter global, como el límite Cretácico/Paleógeno, el Evento Biótico del Paleoceno Medio, o el Máximo Térmico del Paleoceno-Eoceno, donde se producen los cambios más significativos en las asociaciones de foraminíferos bentónicos. Los foraminíferos bentónicos se vieron afectados por el impacto meteorítico del límite Cretácico/Paleógeno, disminuyendo la diversidad de las asociaciones y fluctuando el porcentaje de las especies. Estos cambios se interpretan como reflejo de variaciones en las condiciones tróficas. Durante el Daniense se recuperan las condiciones tróficas, y en el límite Daniense/Selandiense proliferan las especies aglutinadas oportunistas, aunque su relación con un posible evento hipertermal de carácter global está sin confirmar. Durante el Evento Biótico del Paleoceno Medio se observa un descenso en la heterogeneidad de las asociaciones y un aumento de especies oligotróficas y aglutinadas oportunistas. Estos cambios son similares pero de menor magnitud que los que caracterizan el Máximo Térmico del Paleoceno-Eoceno, donde se produce la mayor extinción en masa de los foraminíferos bentónicos (tanto aglutinados como calcáreos) de todo el Cenozoico. Tras el evento de extinción, se muestra la recuperación de las asociaciones durante el Eoceno inicial.*

*Palabras clave: foraminíferos bentónicos, eventos, Paleógeno inferior, Zumaya, España.*

## ABSTRACT

*The Zumaya section (Northern Spain, Basque-Cantabrian basin) has become a reference section for the study of Cretaceous and Paleogene marine sediments. In order to analyze the paleoenvironmental evolution across the lower Paleogene, we carried out a quantitative study of early Paleogene (Cretaceous/Paleogene boundary) to early Eocene benthic foraminiferal assemblages in the Zumaya section. The relative abundance of the most representative calcareous and agglutinated taxa, as well as the diversity and heterogeneity of the assemblages, were calculated in 72 samples.*

*Benthic foraminiferal assemblages indicate a depth of deposition of about 1000 m during the early Paleogene, and probably slightly shallower paleodepths during the late Danian. We suggest that, in addition to the paleodepth of deposition, other parameters (perturbation of the seafloor, turbidity currents, composition of the sediment) may have controlled the distribution and composition of the benthic assemblages. Hence, the abundance of Fylsch-type agglutinated foraminifera (with organic cement) indicates a high flux of terrigenous, clastic material to the seafloor. This flux was particularly high during the Selandian and Thanetian.*

*This study allowed us to analyze in detail several global events, such as the Cretaceous/Paleogene boundary event, the Mid-Paleocene Biotic Event, or the Paleocene-Eocene Thermal Maximum, where the most significant benthic foraminiferal turnover has been recorded. Benthic foraminifera were affected by the Cretaceous/Paleogene impact event: the drop in diversity of the assemblages and in the percentage of the species reflects variations in the trophic conditions after the boundary. Trophic conditions recovered during the Danian. Agglutinated opportunistic species proliferate during the Danian/Selandian boundary, although the relation of these changes with a possible global hyperthermal event remains to be confirmed. A decrease in the heterogeneity of the assemblages and an increase in oligotrophic and opportunistic species are recorded during the Mid-Paleocene Biotic Event. These assemblage changes are similar to but of lesser magnitude than those recorded during the Paleocene-Eocene Thermal Maximum, when the largest mass extinction of benthic foraminifera (both agglutinated and calcareous) of the Cenozoic is recorded. After the extinction event, we show the recovery of the assemblages during the early Eocene.*

*Key words: agglutinated, calcareous, benthic foraminifera, events, lower Paleogene, Zumaya, España.*

## INTRODUCCIÓN

Desde hace casi medio siglo el corte de Zumaya (Norte de España, cuenca Vasco-Cantábrica) constituye un punto de referencia para la comunidad científica, principalmente debido a que en sus imponentes acantilados aparecen expuestas una serie de formaciones geológicas que se depositaron de forma continua desde el Albiense (Cretácico Inferior) hasta el Ypresiense (Eoceno inferior). Zumaya se considera, por tanto, uno de los afloramientos más completos y representativos de las sucesiones hemipelágicas depositadas en la cuenca Pirenaica desde el Cretácico hasta el Paleógeno (Baceta, 1996). Además de la continuidad del registro geológico, el excelente afloramiento de las distintas formaciones y la buena accesibilidad han convertido a Zumaya en una sección de referencia para varios límites geocronológicos, como los límites Cretácico/Paleógeno, Daniense/Selandiense, Selandiense/Thanetiense y Paleoceno/Eoceno, siendo probablemente el afloramiento con mayor densidad de límites geocronológicos del mundo. En Septiembre de 2008, la Comisión Internacional de Estratigrafía y la Unión Internacional de Ciencias Geológicas aprobaron la propuesta de la Subcomisión Internacional de Estratigrafía del Paleógeno para definir formalmente los límites Daniense/Selandiense y Selandiense/Thanetiense en el corte de Zumaya. En Mayo de 2010 se colocaron oficialmente los clavos dorados (*golden spikes*) de los GSSP

(*Global Stratotype Section and Point*) de ambos límites, correspondientes a la base del Selandiense y la base del Thanetiense, en el corte de Zumaya. No es de extrañar, por tanto, que el gran interés geológico que ha despertado esta sección haya conducido a la publicación de numerosos estudios estratigráficos, sedimentológicos, paleontológicos, geoquímicos, etc. (ver referencias en Bernaola *et al.*, 2006, y Orue-Etxebarria *et al.*, 2009).

Sin embargo, y a pesar de que los foraminíferos bentónicos son unos excelentes marcadores de las condiciones paleoambientales (ej., Murray, 2006), hasta el momento no se ha analizado la evolución de las asociaciones completas de foraminíferos bentónicos (incluyendo tanto los de conchas aglutinadas como los de conchas calcáreas) a lo largo del Paleógeno en Zumaya. Kuhnt y Kaminski (1997) analizaron la distribución bioestratigráfica de los foraminíferos bentónicos de pared aglutinada desde el Turoniense hasta el Eoceno inferior. Sin embargo, los foraminíferos bentónicos de pared calcárea constituyen una fracción mayoritaria de las asociaciones desde el Cretácico terminal hasta el Eoceno inicial en Zumaya, exceptuando determinados intervalos concretos (ej., Eoceno inicial). De estos datos se desprende la necesidad de analizar la evolución de las asociaciones totales. En esta línea de investigación, hasta el momento únicamente se han publicado estudios sobre los foraminíferos bentónicos de intervalos concretos, como el Evento Biótico del Paleoceno Medio (Bernaola *et al.*, 2007),

el límite Daniense/Selandiense (Arenillas *et al.*, 2008), el límite Paleoceno-Eoceno (Ortiz, 1995; Alegret *et al.*, 2009a) o el límite Cretácico/Paleógeno (Kuhnt y Kaminski, 1993), basándose este último trabajo exclusivamente en los foraminíferos aglutinados.

En el presente trabajo se muestra la evolución de los taxones de foraminíferos bentónicos más abundantes desde la base del Paleoceno (límite Cretácico/Paleógeno) hasta el Eoceno inicial en el corte de Zumaya. Se incluye el estudio tanto de taxones aglutinados como de pared calcárea. Además, la resolución temporal del presente estudio se ha incrementado notablemente con respecto a la empleada por Kuhnt y Kaminski (1997) para el intervalo comprendido entre el Daniense terminal y el Ypresiense inferior. Los resultados obtenidos han permitido conocer la evolución de determinados taxones o grupos de foraminíferos bentónicos durante el Paleógeno inicial, y realizar interpretaciones paleoambientales más detalladas a lo largo de este intervalo de tiempo, prestando especial atención a diversos eventos globales que han quedado registrados en Zumaya.

## MATERIAL Y MÉTODOS

La pequeña localidad costera de Zumaya está situada a 35 km de San Sebastián, al Norte de España, en la Bahía de Vizcaya. Zumaya se sitúa al Oeste de los Pirineos, en la cuenca Vasco-Cantábrica (Figura 1). Los sedimentos del Paleógeno inferior en el corte de Zumaya están representados por alternancias rítmicas de calizas hemipelágicas y margocalizas, con intercalaciones de niveles de turbiditas calcáreas, siliciclásticas y mixtas. A esta ciclicidad litológica

se le ha atribuido un origen orbital (Ten Kate y Sprenger, 1993; Dinarès-Turell *et al.*, 2002, 2003). Los sedimentos del Cretácico terminal al Eoceno inicial estudiados en el presente trabajo están distribuidos en cuatro formaciones que son fácilmente reconocibles en el campo: la Fm. Zumaya-Algorri, la Fm. Calizas de Aitzgorri, la Fm. Itzurun, y el Flysch Eoceno (Figura 2).

La Formación Zumaya-Algorri (Maastrichtiense) está constituida por alternancias de marga púrpura y caliza margosa gris con intercalaciones de finos niveles de turbiditas siliciclásticas; la Formación Calizas de Aitzgorri (Daniense) consiste en alternancias de caliza rosácea-gris y marga, con escasas intercalaciones de finos niveles de turbiditas calcáreas; la Formación Itzurun (Selandiense y Thanetiense) consiste en alternancias de caliza gris y marga con intercalaciones de finos niveles de turbiditas calcáreas y siliciclásticas; y el Flysch Eoceno (Ypresiense), del que se han estudiado los siete metros inferiores, corresponde a una unidad predominantemente margosa con abundantes intercalaciones de turbiditas siliciclásticas y en cuya base se observan las características arcilla y marga roja que se depositaron durante el Máximo Térmico del Paleoceno-Eoceno, denominadas informalmente como “Unidad Siliciclástica” por Schmitz *et al.* (2000). En cuanto al control bioestratigráfico, en las Figuras 3 y 4 se muestran las biozonas reconocidas por Kuhnt y Kaminski (1993), Arenillas y Molina (2000), Orue-Etxebarria *et al.* (2004), Bernaola *et al.* (2007) y Arenillas *et al.* (2008) para los intervalos de tiempo estudiados.

Los foraminíferos bentónicos son buenos indicadores en reconstrucciones paleobatimétricas (Van Morkhoven *et al.*, 1986; Murray, 2006). La comparación entre asociaciones fósiles y actuales, la presencia y abundancia de especies relacionadas con la profundidad, y sus límites superiores (ej., Van Morkhoven *et al.*, 1986; Alegret *et al.*, 2003) han permitido inferir la paleobatimetría de los sedimentos estudiados. Todos los ejemplares de foraminíferos bentónicos han sido asignados a morfogrupos siguiendo los criterios de Corliss (1985), Jones y Charnock (1985) y Corliss y Chen (1988). La comparación de asociaciones fósiles y actuales, y el análisis morfotípico, permiten inferir sus microhábitats y los parámetros ambientales como el aporte de materia orgánica al fondo marino o la oxigenación en las aguas del fondo (ej., Bernhard, 1986; Jorissen *et al.*, 1995, 2007; Fontanier *et al.*, 2002). No obstante, hay que tener cierta cautela con la interpretación de estas comparaciones, porque no sabemos hasta qué punto las asociaciones del Cretácico y Paleógeno inferior eran análogas a las actuales (ej., Thomas *et al.*, 2000). De hecho, no se conoce con certeza el microhábitat de muchas especies actuales de medios profundos (ej., Buzas *et al.*, 1993).

Se han estudiado un total de 72 muestras distribuidas desde la base del Daniense (Paleoceno) hasta el Ypresiense (Eoceno), en comparación con las 16 analizadas por Kuhnt y Kaminski (1997) en su revisión bioestratigráfica del Paleoceno. Además, se han tenido en cuenta no sólo los

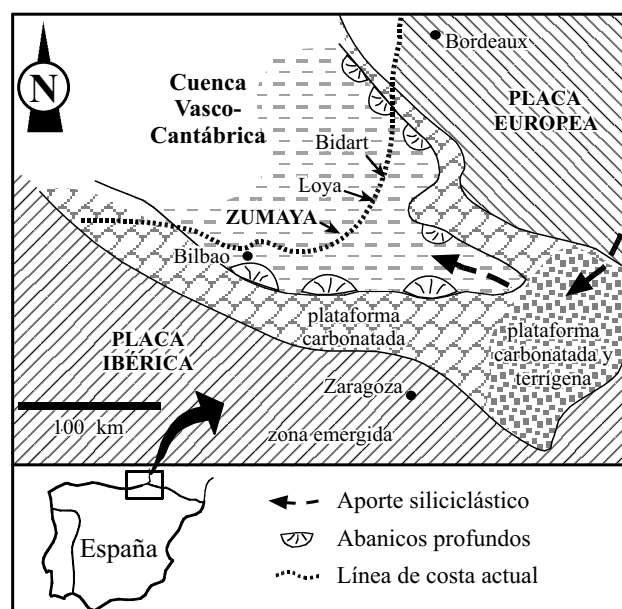


Figura 1. Reconstrucción paleogeográfica de la Cuenca Vasco-Cantábrica durante el Paleoceno. Modificada de Alegret (2007).

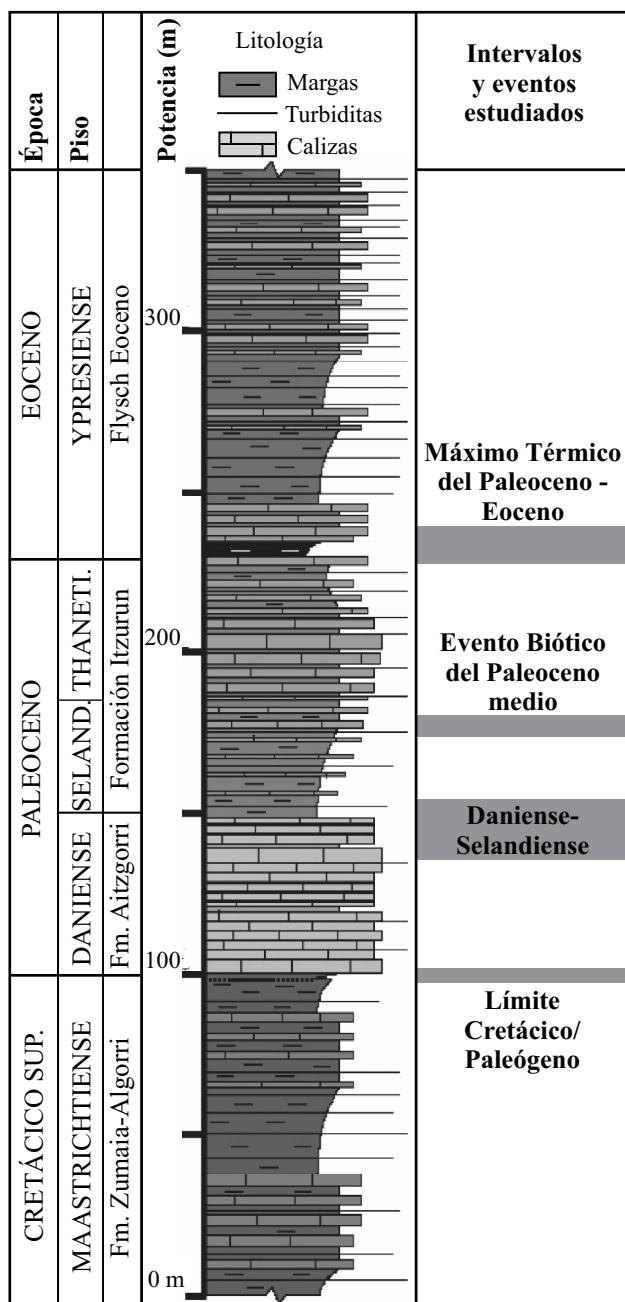


Figura 2. Columna estratigráfica general del corte de Zumaya desde el Cretácico Superior hasta el Eoceno inferior, e intervalos estudiados. Seland.: Selandiense; Thaneti.: Thanetiense. Modificado de Baceta *et al.* (2006).

foraminíferos aglutinados sino también los de conchas de pared calcárea. La resolución de los muestreos analizados varía desde intervalos centimétricos (5–10 cm) en torno a intervalos críticos como el tránsito Cretácico-Paleógeno, el Daniense-Selandiense, el Paleoceno-Eoceno, o el Evento Biótico del Paleoceno Medio (Selandiense), hasta intervalos métricos a lo largo del Daniense (Figuras 3 y 4).

Las muestras fueron disgregadas en agua con H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (concentrada al 15–20 %) y lavadas a través de un tamiz con una apertura de malla de 100 µm para la obtención de

los microfósiles. Para realizar los estudios cuantitativos de las asociaciones se separaron unos 300 ejemplares de foraminíferos bentónicos de cada muestra. Todos los ejemplares fueron montados en celdillas para su conservación e identificación. La clasificación de los foraminíferos a nivel genérico sigue los criterios de Loeblich y Tappan (1987). Además de calcular la abundancia relativa de los distintos taxones, para analizar la diversidad de las asociaciones se calcularon el índice de diversidad Fisher- $\alpha$  y el de heterogeneidad H(S) Shannon-Weaver (Murray, 1991) (Figuras 3 y 4).

Con el fin de conocer la evolución de determinados grupos o especies de foraminíferos bentónicos desde la base del Paleoceno (límite Cretácico/Paleógeno) hasta el Eoceno inicial, se han seleccionado aquellos taxones que son comunes a lo largo de todo el corte (Figuras 4 y 5). Para ello se han revisado las bases de datos de foraminíferos bentónicos publicadas por Alegret *et al.* (2009a) para el tránsito Paleoceno-Eoceno, por Bernaola *et al.* (2007) para el Selandiense terminal y por Arenillas *et al.* (2008) para el Daniense-Selandiense, y se han analizado nuevas muestras del Maastrichtiense terminal, Daniense y Selandiense.

Las micrografías de la Figura 5 se tomaron con un microscopio electrónico de barrido JEOL JSM 6400 a 20 kV de aceleración.

### ANÁLISIS PALEOBATIMÉTRICO

Los foraminíferos bentónicos son unos excelentes marcadores paleobatimétricos porque su distribución en los océanos está controlada por una serie de parámetros relacionados con la profundidad (ej., Van Morkhoven *et al.*, 1986; Kaminski y Gradstein, 2005). La relación de los foraminíferos planctónicos con respecto a los bentónicos es muy elevada (90 %–95 %) a lo largo de toda la sección (excepto en las muestras del Eoceno basal afectadas por disolución), y refleja un medio de depósito de océano abierto. En cuanto a los foraminíferos bentónicos la presencia tanto de especies de pared calcárea como de pared aglutinada indica un depósito por encima del nivel de compensación de la calcita a lo largo de casi toda la sección estudiada, salvo en el Eoceno inicial (Figura 3).

Entre los foraminíferos de pared aglutinada se observan abundantes especies de cemento calcáreo (ej., *Clavulinoides amorphus*, *C. globulifera*, *C. trilatera*, *Dorothia crassa*, *D. cylindracea*, *Gaudryina pyramidata*, *Marssonella floridana*, *Arenobulimina truncata*) y taxones de cemento orgánico (tipo Flysch), como trochamminidos, *Haplophragmoides*, *Karrerulina*, *Recurvoides* y *Repmanina charoides*. Estas asociaciones son típicas de las biofacies de foraminíferos aglutinados de medios profundos (deep-water agglutinated foraminifera, DWAF; Kaminski y Gradstein, 2005) tipotitud de latitudes medias y bajas descrita por Kuhnt *et al.* (1989). Entre los foraminíferos de pared calcárea, abundan los representantes de la fauna tipo-Velasco, característica de medios batiales y abisales (Berggren y Aubert, 1975),

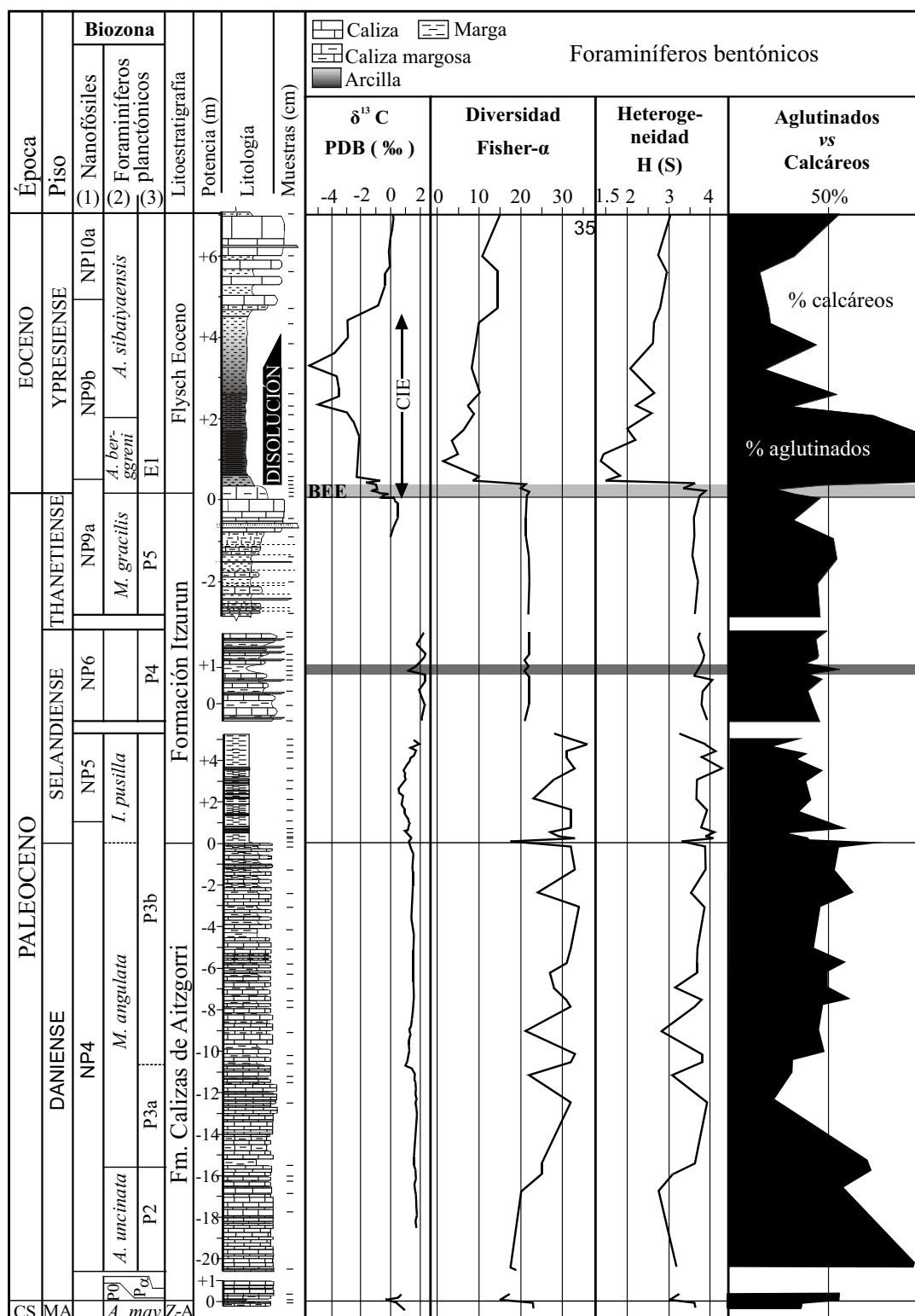


Figura 3. Variaciones en los índices de diversidad Fisher- $\alpha$  y de heterogeneidad H(S) Shannon-Weaver de las asociaciones de foraminíferos bentónicos, y variación de los porcentajes de foraminíferos bentónicos de paredes calcáreas o aglutinadas desde el límite Cretácico/Paleógeno hasta el Eoceno inicial en Zumaya. Valores de los isótopos del  $\delta^{13}\text{C}$  tomados de Mount *et al.* (1986), Schmitz *et al.* (1997), Bernaola *et al.* (2007) y Arenillas *et al.* (2008). Biozonaciones de nanofósiles calcáreos (1) y foraminíferos planctónicos (2) reconocidas por Kuhnt y Kaminski (1993), Arenillas y Molina (2000), Orue-Etxebarria *et al.* (2004), Bernaola *et al.* (2007) y Arenillas *et al.* (2008), y su correlación con la biozonación de foraminíferos planctónicos (3) propuesta por Berggren y Pearson (2005). Con una banda de color gris claro se muestra el intervalo en el que se registran las extinciones de los foraminíferos bentónicos (BEE) en el Eoceno basal. Con una banda de color gris oscuro se señala el Evento Biótico del Paleoceno Medio. Z-A: Fm. Zumaya-Algorri; Plan.: Planispiralada; Troc.: Trocoespiralada; Bicon: Biconvexa; MA: Maastrichtiense; CS: Cretácico Superior; *A. may.*: *Abatophalus mayaroensis*; CIE: Excursión Isotópica del Carbono (*Carbon Isotope Excursion*).

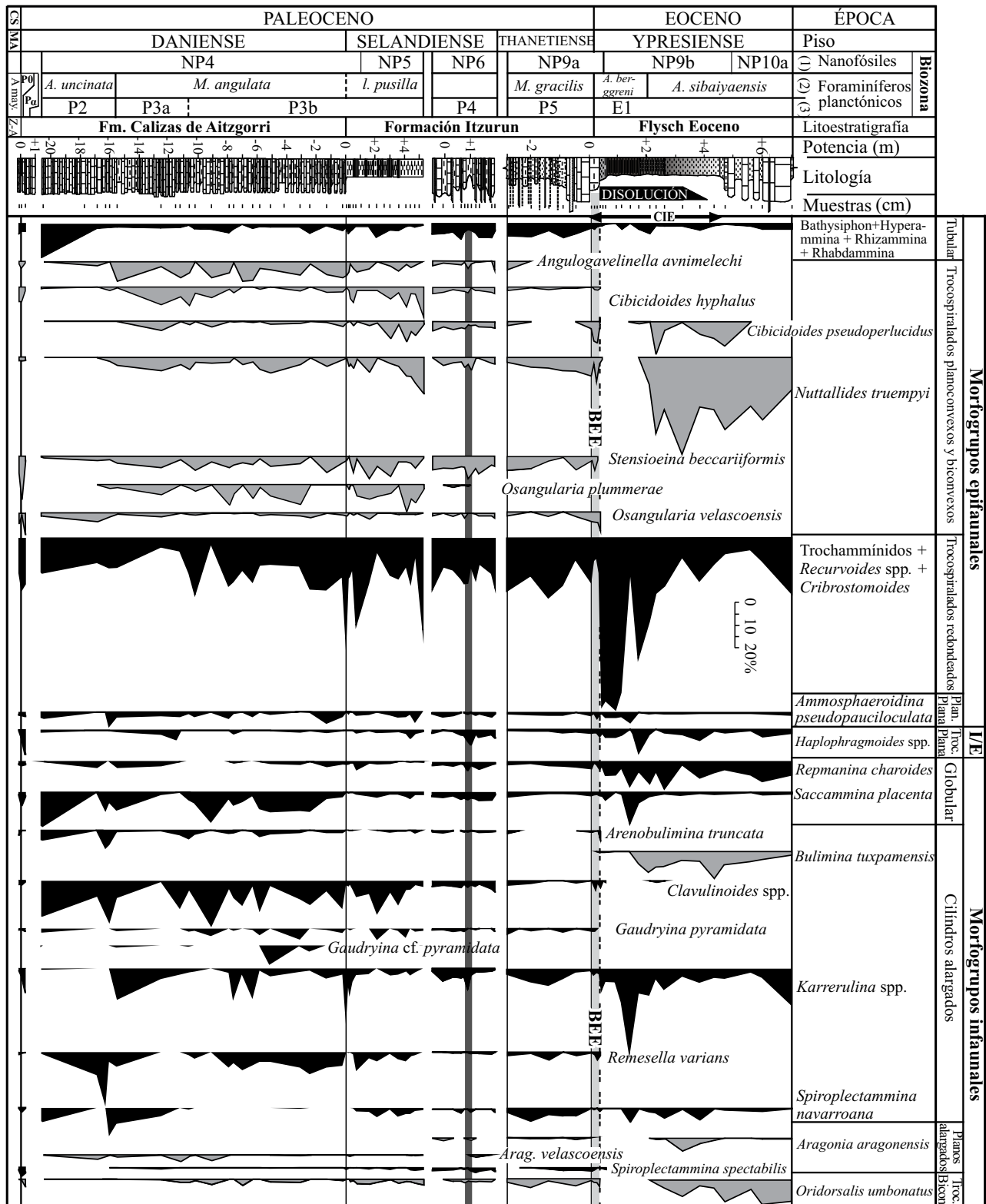


Figura 4. Variaciones en la abundancia relativa de los taxones de foraminíferos bentónicos seleccionados desde el límite Cretácico/Paleógeno hasta el Eoceno inicial en Zumaya. Únicamente se han seleccionado los taxones que son comunes a lo largo de todo el corte. En color gris se muestran los foraminíferos de pared calcárea y en color negro los de pared aglutinada. Con una banda de color gris claro se muestra el intervalo en el que se registran las extinciones de los foraminíferos bentónicos (BEE) en el Eoceno basal. Con una banda de color gris oscuro se señala el Evento Biótico del Paleoceno Medio. Abreviaturas: ver leyenda de la Figura 3.



y que incluye especies como *Cibicidoides velascoensis*, *Gyroidinoides globosus*, *Nuttallides truempyi*, *Nuttallinella florealis* y *Osangularia velascoensis*, entre otras.

Entre las especies identificadas destacan por su abundancia las especies cuyo límite superior se sitúa en el límite entre las zonas batiales superior y media (500–700 m), como *Bulimina trinitatensis*, *B. tuxpamensis*, *Buliminella grata*, *Nuttallides truempyi*, *Spiroplectamina spectabilis* y *Stensioeina beccariiiformis*. Otras especies comunes a lo largo de la sección estudiada, como *Cibicidoides hyphalus*, *Gaudryina pyramidata*, *Gyroidinoides globosus* y *Pullenia coryelli*, predominan en profundidades batiales medias a inferiores (ej., Van Morkhoven *et al.*, 1986; Alegret *et al.*, 2003). Por otro lado, a lo largo del corte se identifican especies que son comunes en medios batiales superiores y medios, como *Angulogavelinella avnimelechi*, *Bolivinooides delicatulus* o *Cibicidoides dayi*.

Los datos expuestos, junto a la elevada diversidad (índice Fisher- $\alpha > 20$  en la mayor parte del corte estudiado) y heterogeneidad (índice H (S)  $> 3$  en la mayor parte del corte) de las asociaciones de foraminíferos bentónicos (Figura 3) sugieren que los sedimentos estudiados se depositaron en la zona batial media a inferior, a unos 1000 m de profundidad. Estos resultados son coherentes con el rango paleobatimétrico (600–1500 m) sugerido por Ortiz (1995) basado en los foraminíferos bentónicos, y con la profundidad deducida por Pujalte *et al.* (1998) a partir de las facies sedimentarias y la paleogeografía de la zona para el Paleoceno terminal y el Eoceno inicial.

Durante el Daniense terminal (Biozonas P3a y P3b), especies típicas de profundidades batiales superiores o medias tales como *Angulogavelinella avnimelechi* y *Osangularia plummerae* son más abundantes que durante el resto del Paleógeno inicial en Zumaya (Figura 4). Esta distribución puede indicar una profundidad de depósito ligeramente más somera durante el Daniense terminal.

## FORAMINÍFEROS BENTÓNICOS DEL PALEÓGENO INICIAL

Los estudios llevados a cabo desde la base del Paleoceno (límite Cretácico/Paleógeno) hasta el Eoceno inicial muestran que la composición de las asociaciones de foraminíferos bentónicos fue variando a lo largo del tiempo en la sección de Zumaya. Para analizar estas variaciones en detalle, en las Figuras 3 y 4 se muestran los cambios en la abundancia relativa de cada uno de los grupos o taxones seleccionados (en color gris los de pared calcárea, y en color negro los de pared aglutinada), así como los cambios registrados en la diversidad y heterogeneidad de las asociaciones. Únicamente se han seleccionado aquellos taxones que son comunes a lo largo de todo el intervalo estudiado, excluyéndose aquellos que, si bien son abundantes en algún intervalo concreto, no aparecen a lo largo de toda la columna. A cada uno de los taxones seleccionados se le ha asignado un tipo

de microhábitat (infaunal o epifaunal) en función de su morfotipo (Figura 3). En el caso del género *Haplophragmoides*, de concha trocoespiralada plana, no existe un consenso entre los distintos autores en cuanto a su modo de vida: Kuhnt *et al.* (1996), Bak *et al.* (1997) y Kaminski *et al.* (1999) le atribuyen un modo de vida infaunal somero, con movilidad vertical dentro del sedimento en función de los niveles de alimento. Sin embargo, Kaminski y Gradstein (2005) consideran que este género puede presentar un modo de vida infaunal somero o incluso epifaunal.

Las asociaciones de foraminíferos bentónicos desde el límite Cretácico/Paleógeno hasta el Eoceno inicial en Zumaya presentan un elevado porcentaje de especies de conchas calcáreas, salvo en determinados intervalos como el nivel de disolución observado en el Eoceno inicial. En este intervalo las conchas calcáreas son de muy escasas a ausentes (Figuras 3 y 4), y muestran claras evidencias de disolución, lo que indica un alto grado de corrosividad de las aguas. Así, por ejemplo, en el Maastrichtiense terminal los foraminíferos de conchas calcáreas constituyen el 65% de las asociaciones, en el Daniense varían entre un 10–80% de las asociaciones aunque generalmente constituyen alrededor del 50 %, en el Selandiense un 55–60 %, y hasta un 67 %–83 % de las asociaciones en el Thanetiense terminal e Ypresiense inferior (exceptuando el intervalo de disolución que caracteriza la base del Eoceno). Los foraminíferos aglutinados corresponden a las biofacies de talud (*Slope type*) de latitudes bajas a medias de Kuhnt *et al.* (1989). Las biofacies caracterizadas por foraminíferos aglutinados de medios profundos (DWAF) muestran cierta relación con los parámetros del sustrato, de modo que una especie en particular puede estar relacionada con la presencia de determinadas partículas sedimentarias (Kaminski y Gradstein, 2005). En el caso de las asociaciones de cemento orgánico o tipo Flysch, éstas necesitan material clástico terrígeno para construir sus conchas. Así, la presencia de taxones de conchas groseramente aglutinadas con grandes granos de cuarzo, como los trochamminidos, *Saccamina*, *Recurvoides*, y formas tubulares de grandes diámetros (ej., *Bathysiphon*, *Rhabdammina*, *Hyperammina*), que son característicos de márgenes continentales y de las cuencas tipo Flysch, confirma que en el área de Zumaya existió un importante aporte de material clástico terrígeno durante el intervalo estudiado, tal y como lo evidencian las importantes acumulaciones turbidíticas en el área de estudio desde el Albiense medio hasta el Luteciense inferior (Barnolas y Pujalte, 2004).

Kuhnt y Kaminski (1993) pusieron de manifiesto la relación existente entre los foraminíferos aglutinados y la composición del sedimento del Daniense basal en Zumaya. Estos autores describieron abundantes formas aglutinadas de cemento calcáreo (ej., *Arenobulimina*, *Clavulinoides*, *Dorothia*) en sedimentos ricos en carbonatos (calciturbiditas); sobre estos sedimentos se disponen otros con un mayor contenido en material terrígeno, donde las asociaciones aglutinadas están claramente dominadas por la fauna tipo

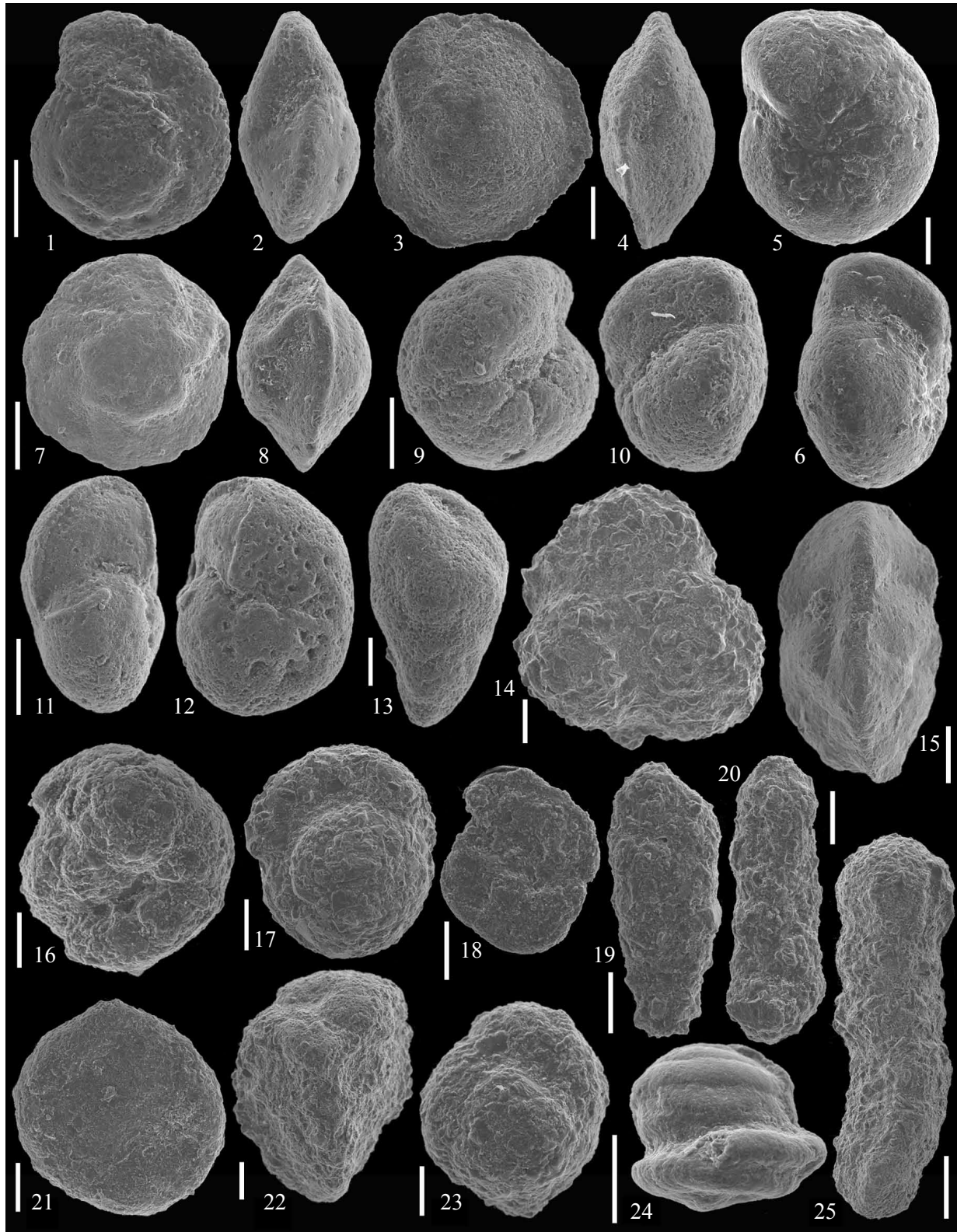


Figura 5. Fotografías de microscopio electrónico de barrido de foraminíferos bentónicos comunes en el corte de Zumaya. 1, 2: *Cibicidoides pseudoperlucidus*, Ypresiense; 3, 4: *Osangularia velascoensis*, Ypresiense; 5: *Stensioeina beccariiiformis*, Selandiense; 7, 8: *Nuttallides truempyi*, Selandiense; 9, 10: *Gyroidinoides globosus*, Thanetiense; 11, 12: *Cibicidoides velascoensis*, Thanetiense; 13: *Bulimina tuxpamensis*, Ypresiense; 14: *Trochammina globigeriniiformis*, Selandiense; 15: *Clavulinoides trilatera*, Daniense; 16: *Recurvoides* sp., Ypresiense; 17: *Cribrostomoides trinitatensis*, Daniense; 18: *Haplophragmoides walteri*, Thanetiense; 19: *Spiroplectammina navarroana*, Ypresiense; 20: *Karrerulina conversa*, Daniense; 21: *Saccamina placenta*, Daniense; 22: *Gaudryina pyramidata*, Thanetiense; 23: *Arenobulimina truncata*, Ypresiense; 24: *Repmanina charoides*, Daniense; 25: *Clavulinoides globulifera*, Thanetiense. Todas las barras de escala corresponden a 100 micras. Las distintas vistas de un mismo ejemplar se muestran a la misma escala.



Flysch, de cemento orgánico. Nuestros datos apoyan esta tendencia, observándose un descenso en el porcentaje de foraminíferos aglutinados de cemento calcáreo, particularmente *Remesella varians* y especies de *Clavulinooides* y *Gaudryina*, en la Fm. Itzurun (Selandiense y Thanetiense) (Figura 4).

Por otro lado, la perturbación del sustrato también juega un papel importante en la estructura ecológica de las asociaciones de foraminíferos bentónicos (ej., Jorissen *et al.*, 2007). De hecho, las secuencias turbidíticas se caracterizan por asociaciones de foraminíferos aglutinados tipo Flysch dominadas por formas tubulares suspensívoras, que representan sucesivos episodios de recolonización del fondo oceánico (Kuhnt y Kaminski, 1989). En medios actuales, tras la perturbación física del sedimento por corrientes, se han hallado especies infaunales de DWAf en la superficie del sedimento recién depositado, interpretándose que se trata de especies oportunistas capaces de sobrevivir en suspensión o de desplazarse verticalmente en el sedimento y colonizar el nuevo sustrato recién depositado (Kaminski y Gradstein, 2005). La abundancia relativa de algunos foraminíferos aglutinados varía notablemente a lo largo de determinados intervalos en Zumaya. Por ejemplo, el elevado porcentaje de foraminíferos aglutinados suspensívoros (*Bathysiphon*, *Hyperammina*, *Rhizammina*, *Rhabdammina*; Figura 4) en la Biozona P2 (Daniense) podría reflejar una gran cantidad de materia orgánica en suspensión, como resultado de la intensa actividad turbidítica en esta parte de la sección (Payros *et al.*, 2006). Hacia el techo de la Biozona P2 (Daniense) se observa un aumento en el porcentaje de *Remesella varians*, *Spiroplectammina navarroana*, *Clavulinooides* spp., *Arenobulimina truncata*, o *Karrerulina* spp., entre otras especies (Figura 4), y a lo largo de la Biozona P3b (Daniense superior y Selandiense inferior) también se registran marcados picos cuantitativos de trochamminidos, *Recurvoides*, *Cribrostomoides*, *Karrerulina*, *Saccammina placenta*, *Gaudryina pyramidata* y *Clavulinooides* (Figura 4). Se sugiere que muchos de estos picos cuantitativos de taxones aglutinados podrían estar relacionados con la perturbación del sustrato debido a la intensa actividad de las corrientes turbidíticas en la zona, o con la composición del sedimento. Por el contrario, en otros casos estas variaciones en la composición de las asociaciones estarían más relacionadas con otros parámetros paleoambientales, como la corrosividad de las aguas y variaciones en el aporte alimenticio o en la temperatura de las aguas, tal y como se detalla a continuación en el análisis de los eventos registrados en Zumaya.

## ANÁLISIS DE EVENTOS

El límite Cretácico/Paleógeno (K/Pg) aparece registrado en la base de la columna estudiada. En coincidencia con el límite K/Pg se observa un descenso en la diversidad y heterogeneidad de las asociaciones y un ligero descenso en el porcentaje de los morfogrupos infaunales. Las asociaciones

del Daniense basal aparecen dominadas por especies epifaunales trocoespíraladas, tanto de pared calcárea (ej., *Stensioeina beccariiformis*, *Cibicoides hyphalus*) como aglutinada de cemento orgánico (trochamminidos, *Recurvoides*, *Cribrostomoides*). Estos cambios en las asociaciones pueden interpretarse como resultantes de variaciones en las condiciones tróficas tras el límite K/Pg, con un aporte variable de materia orgánica al medio bentónico que provocaron un descenso en la diversidad y fluctuaciones en el porcentaje de las especies. Similares condiciones paleoambientales tras el límite K/Pg fueron deducidas por Alegret *et al.* (2004) y Alegret (2007) para los cortes cercanos de Bidart y Bahía de Loya (Suroeste de Francia, cuenca Vasco-Cantábrica).

Kuhnt y Kaminski (1993) documentaron en coincidencia con el límite K/Pg un cambio de asociaciones de foraminíferos aglutinados dominadas por especies con cemento calcáreo (*Spiroplectammina*, *Dorothia*, *Gaudryina* y *Tritaxia*) en el Maastrichtiense, a otras dominadas por taxones de cemento orgánico (ej., *Recurvoides*, *Subreophax*, *Saccammina*, *Bathysiphon*, *Rhizammina*) en la base del Daniense. Estos autores interpretaron los cambios faunísticos registrados en el límite K/Pg de Zumaya como resultado de condiciones oligotróficas, debido a una disminución drástica de la productividad primaria en superficie y el colapso de la cadena alimenticia. La existencia de condiciones oligotróficas durante un corto espacio de tiempo inmediatamente tras el límite K/Pg se ha relacionado con la extinción en masa de los productores primarios calcáreos (D'Hondt *et al.*, 1998) tras el oscurecimiento provocado por un impacto meteorítico (Álvarez *et al.*, 1980). Por otro lado, Alegret (2007) sugirió que los elevados porcentajes de especies oportunistas que se registran en el Daniense basal en diversos cortes pudieron estar relacionados con la proliferación de productores primarios no calcáreos (blooms de *Thoracosphaera operculata*, *Cyclagelosphaera reinhardii* y *Braadurosphaera bigelowii*; Peybernés *et al.*, 1996) en la cuenca Vasco-Cantábrica.

El límite Daniense/Selandiense (D/S) se ha definido en la base de la Formación Itzurun, en el cambio litológico de alternancias de caliza y margas a margas rojas. Este límite coincide con una excursión negativa del 1‰ de los isótopos de carbono (Figura 3), una ligera disolución de los carbonatos y un descenso en la diversidad de los foraminíferos planctónicos (Arenillas *et al.*, 2008). El límite D/S coincide con un descenso en el porcentaje de los foraminíferos bentónicos infaunales debido principalmente al aumento de trochamminidos, si bien el género *Karrerulina* (infaunal profundo) aumenta significativamente. Los trochamminidos y el género *Karrerulina* se consideran oportunistas y se cree que pueden soportar condiciones de baja oxigenación en el fondo oceánico y fluctuaciones en el aporte de materia orgánica (ej., Kuhnt *et al.*, 1996; Kaminski y Gradstein, 2005). Asimismo, la base de la Fm. Itzurun se caracteriza por un descenso del contenido en carbonatos del 75 al 25 % (Baceta *et al.*, 2006) lo que favorecería la proliferación

de foraminíferos aglutinados de cemento orgánico como los trochamminidos y *Karrerulina*. Estudios recientes realizados en sondeos marinos en el Pacífico y en el Atlántico Sur han confirmado la existencia de varios niveles de disolución intercalados entre sedimentos carbonatados a lo largo del Paleoceno superior y del Eoceno inferior (Bralower *et al.*, 2002; Zachos *et al.*, 2004; Lourens *et al.*, 2005). Estos niveles de disolución están relacionados con una serie de eventos de calentamiento global que se han ido sucediendo a lo largo de la historia de la Tierra, siendo el más extremo el del límite Paleoceno/Eoceno (P/E).

El Evento Biótico del Paleoceno Medio (mid-Paleocene Biotic Event, MPBE) es un evento de calentamiento de menor magnitud, que al igual que el límite Paleoceno/Eoceno se caracteriza por un intervalo arcilloso en el que se registran cambios en las asociaciones de microfósiles marinos, así como un descenso en el contenido de carbonatos, un aumento de la susceptibilidad magnética y cambios en la geoquímica de las aguas oceánicas que se han relacionado con un período de calentamiento y efecto invernadero. Hasta el año 2007, este evento había sido reconocido únicamente en sondeos marinos; la sección de Zumaya constituye el primer afloramiento terrestre en el que se ha podido identificar y estudiar en detalle el MPBE, que se registra en coincidencia con un descenso negativo de 1 ‰ en los valores del  $\delta^{13}\text{C}$  (Figura 3), y un descenso del 30% en el contenido de carbonatos (Bernaola *et al.*, 2007). Las asociaciones de microfósiles halladas en Zumaya indican que durante este evento, y en coincidencia con la capa arcillosa, se produjo una reorganización de los ecosistemas marinos. Los foraminíferos bentónicos muestran un descenso en la heterogeneidad de las asociaciones (Figura 3), en el porcentaje de los bulimínidos y laevidentalínidos, así como en el de foraminíferos aglutinados suspensívoros (ej., *Bathysiphon*, *Hyperammina*, *Rhizammina*; Figura 4). Por otro lado, se registra un aumento en el porcentaje de especies epifaunales oligotróficas (ej., *Nuttallides truempyi*, *Stensioeina beccariiiformis*) y oportunistas (*Haplophragmoides*, *Karrerulina*; Figura 4). El descenso en el contenido en carbonato cálcico podría estar relacionado con una somerización de la lisoclina, de modo que las especies aglutinadas (*Haplophragmoides*, *Karrerulina*) sustituirían a las calcáreas (bulimínidos, laevidentalínidos) en el nicho infaunal (Bernaola *et al.*, 2007). El descenso en el porcentaje de laevidentalínidos y bulimínidos, y el aumento en la abundancia relativa de *N. truempyi* y *S. beccariiiformis* refleja condiciones oligotróficas en el fondo marino (Nomura, 1995; Jorissen *et al.*, 1995; Fontanier *et al.*, 2002). Las asociaciones de nanofósiles y foraminíferos planctónicos reflejan un calentamiento y condiciones oligotróficas en las aguas superficiales; posiblemente, la reorganización del ecosistema planctónico conllevó cambios en el flujo alimenticio (tipo y cantidad de nutrientes) al fondo marino, generando a su vez cambios en las comunidades bentónicas (Bernaola *et al.*, 2007).

El evento más reciente que se registra en el intervalo

estudiado corresponde al Máximo Térmico del Paleoceno-Eoceno (*Paleocene-Eocene Thermal Maximum*, PETM), y coincide con un marcado descenso en los isótopos de  $\delta^{13}\text{C}$  (*Carbon Isotope Excursion*, CIE; Figura 3), cuyo comienzo marca formalmente el límite P/E. En coincidencia con este evento de calentamiento global (Zachos *et al.*, 2006) se registran los mayores cambios en las asociaciones de foraminíferos bentónicos de todo el Cenozoico, que incluyen tanto extinciones globales como importantes cambios cuantitativos.

En el corte de Zumaya, en coincidencia con el PETM se registra el mayor descenso en la diversidad y heterogeneidad de las asociaciones (Figura 3), que alcanzan los valores mínimos de toda la sección estudiada. Asimismo, se ha identificado la desaparición del 55 % de las especies; muchas de estas desapariciones corresponden a extinciones globales de especies que fueron comunes durante todo el Paleoceno, como *Angulogavelinella avnimelechi*, *Cibicidoides hyphalus*, *Stensioeina beccariiiformis*, *Osangularia velascoensis* y *Remesella varians* (Figura 4) (Alegret *et al.*, 2009a). Las extinciones se registran en un intervalo durante el cual se interpreta una buena oxigenación de las aguas del fondo (tal y como indica la presencia de grandes *Cibicidoides* de paredes gruesas y numerosas cámaras, como *C. pseudoperlucidus*; Bernhard, 1986), y con un elevado porcentaje de foraminíferos de conchas calcáreas (Figura 3), lo cual descarta la corrosividad de las aguas como la causa principal de las extinciones. Según Thomas (2003) y Alegret *et al.* (2009a, b), el calentamiento de las aguas producido durante el PETM debió de ser la única causa global que se registró en todas las latitudes y en todos los océanos, y que causó las extinciones de los foraminíferos bentónicos. Sin embargo, los mecanismos a través de los cuales un ascenso de la temperatura provocaría las extinciones aún son desconocidos.

Sobre el intervalo en el cual se registran las extinciones, se observa un tramo de hasta 4 metros en el que los efectos de la disolución se hacen patentes en los foraminíferos bentónicos, con asociaciones dominadas por taxones aglutinados de cemento orgánico (trochamminidos, *Recurvoides*, *Cribrostomoides*, *Karrerulina*) en la parte basal del tramo (Figura 4), y con un elevado porcentaje de conchas calcáreas parcialmente disueltas en la parte media y superior del mismo.

Durante el Paleógeno, el nivel de compensación de la calcita se situaba relativamente alto debido al alto nivel del mar y a la gran producción de carbonato en las plataformas, a la circulación oceánica lenta, y a la existencia de aguas profundas infrasaturadas con respecto al carbonato cálcico (Kaminski y Gradstein, 2005). En el Eoceno inicial se produjo un rápido ascenso del nivel de compensación de la calcita (de hasta 2 km en el Océano Pacífico; Zachos *et al.*, 2005), que se ha relacionado con la acidificación de los océanos debido a la inyección de una gran cantidad de isótopos ligeros del carbono al sistema océano-atmósfera (Dickens *et al.*, 1997; Zachos *et al.*, 2005). En la literatura

se ha discutido mucho sobre el origen de estos isótopos, que dió lugar al CIE, siendo la disociación masiva de los hidratos del metano que se encuentran almacenados en los márgenes continentales una de las hipótesis más aceptadas (Dickens *et al.*, 1995).

En momentos de ascenso del nivel de compensación de la calcita, como el registrado en el tránsito Paleoceno-Eoceno, se produciría una ampliación del hábitat de las faunas tipo DWAF, que podrían colonizar amplias áreas del fondo marino. Como consecuencia de la somerización del nivel de compensación de la calcita durante el PETM, se produciría una intensa disolución del carbonato, tal y como se observa en Zumaya, y la rápida proliferación de la fauna tipo DWAF (trochamminidos, *Recurvoides*, *Cribrostomoides*, *Karrerulina*, etc.; Figura 4). Sobre el nivel de mayor disolución de la calcita se observa la recuperación del  $\delta^{13}\text{C}$ , la disminución en la diversidad y la abundancia relativa de la fauna tipo DWAF, el aumento en el porcentaje de foraminíferos bentónicos de paredes calcáreas y la recuperación de la diversidad y heterogeneidad de las asociaciones totales (Figuras 3 y 4). No obstante, los foraminíferos que dominan por encima de los niveles de disolución corresponden a especies resistentes a aguas corrosivas, como *Nuttallides truempyi* (Alegret *et al.*, 2009a, b). Estos datos son compatibles con un rápido ascenso inicial del nivel de compensación de la calcita a comienzos del Eoceno, seguido de un descenso gradual.

## CONCLUSIONES

El análisis cuantitativo de las asociaciones de foraminíferos bentónicos del corte de Zumaya (cuenca Vasco-Cantábrica) ha permitido conocer la evolución de los taxones más comunes desde el límite Cretácico/Paleógeno hasta el Eoceno inicial. Se trata del estudio de mayor resolución llevado a cabo hasta el momento en asociaciones completas de foraminíferos bentónicos.

El seguimiento de los taxones seleccionados a lo largo de un intervalo que comprende más de 10 millones de años ha permitido conocer la evolución paleoambiental en el área de estudio y analizar los factores que controlan la distribución y abundancia de los foraminíferos bentónicos. Además, se han examinado en mayor detalle determinados eventos de carácter global: en el límite Cretácico/Paleógeno se observa una reorganización de las asociaciones de foraminíferos bentónicos (pero no extinciones significativas) que se interpreta como indicadora de rápidos cambios en las condiciones tróficas en el fondo marino, relacionados probablemente con el colapso de la productividad primaria tras un impacto meteorítico. Durante el Evento Biótico del Paleoceno Medio, un incremento en la temperatura y la consecuente reorganización del ecosistema planctónico produjeron cambios en las comunidades bentónicas, que reflejan condiciones oligotróficas y una ligera somerización de la lisoclina. Finalmente, en el tránsito Paleoceno-Eoceno

se produjo un evento de extinción de los foraminíferos bentónicos de medios profundos que no tiene precedentes y que se ha relacionado con un evento de calentamiento global.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología (contrato Juan de la Cierva concedido a S.O., y proyecto Consolider CGL 2007-63724), y por el proyecto UZ-221-312 de la Universidad de Zaragoza. Las autoras agradecen las sugerencias realizadas por las revisoras Esmeralda Caus y Geise de Santana dos Anjos Zerfass, que han contribuido a mejorar el manuscrito.

## REFERENCIAS

- Alegret, L., 2007, Recovery of the deep-sea floor after the Cretaceous/Paleogene boundary event: the benthic foraminiferal record in the Basque-Cantabrian basin and in South-eastern Spain: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 255, 181-194.
- Alegret, L., Molina, E., Thomas, E., 2003, Benthic foraminiferal faunal turnover across the Cretaceous/Tertiary Boundary at Agost (Southeastern Spain): *Marine Micropaleontology*, 48(3-4), 251-279.
- Alegret, L., Kaminski, M.A., Molina, E., 2004, Paleoenvironmental recovery after the Cretaceous/Tertiary boundary crisis: evidence from the marine Bidart section (SW France): *Palaios*, 19, 574-586.
- Alegret, L., Ortiz, S., Orue-Etxebarria, X., Bernaola, G., Baceta, J.I., Monechi, S., Apellaniz, E., Pujalte, V., 2009a, The Paleocene-Eocene Thermal Maximum: new data from the microfossil turnover at the Zumaia section, Spain: *Palaios*, 24, 318-328.
- Alegret, L., Ortiz, S., Molina, E., 2009b, Extinction and recovery of benthic foraminifera across the Paleocene-Eocene Thermal Maximum at the Alamedilla section (Southern Spain): *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 279(3-4), 186-200.
- Álvarez, L.W., Álvarez, W., Asaro, F., Michel, H.V., 1980, Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction: *Science*, 208(4448), 1195-1108.
- Arenillas, I., Molina, E., 2000, Reconstrucción paleoambiental con foraminíferos planctónicos y Cronostratigrafía del tránsito Paleoceno-Eoceno de Zumaya (Guipúzcoa): *Revista Española de Micropaleontología*, 32(3), 283-300.
- Arenillas, I., Molina, E., Ortiz, S., Schmitz, B., 2008, Foraminiferal and  $\delta^{13}\text{C}$  isotopic event-stratigraphy across the Danian-Selandian transition at Zumaya (northern Spain): *chronostratigraphic implications: Terra Nova*, 20(1), 38-44.
- Baceta, J.I., 1996, El Maastrichtense superior, Paleoceno e Ilerdiense inferior de la región Vasco-Cantábrica: secuencias deposicionales, facies y evolución paleogeográfica: Bilbao, España, Universidad del País Vasco, Tesis doctoral, 372 pp.
- Baceta, J.I., Pujalte, V., Bernaola, G., Orue-Etxebarria, X., Apellaniz, E., 2006, The Zumaia section, *en* Bernaola, G., Baceta, J.I., Payros, A., Orue-Etxebarria, X., Apellaniz, E. (eds.), *The Paleocene and lower Eocene of the Zumaia section (Basque Basin), Climate and Biota of the Early Paleogene 2006, Post-Conference Field Trip Guidebook: Bilbao*, 14-17.
- Bak, K., Bak, M., Geroch, S., Maneck, M., 1997, Biostratigraphy and Paleoenvironmental analysis of Benthic Foraminifera and Radiolarians in Paleogene variegated shales in the Skole unit, Polish Flysch Carpatians: *Annales Societatis Geologorum Poloniae*, 67, 135-154.

- Barnolas, A., Pujalte, V. 2004, La Cordillera Pirenaica, *en* Vera, J.A. (ed.), *Geología de España*: Madrid, Servicio Geológico Español, Instituto Geológico y Minero de España, 233-241.
- Berggren, W.A., Aubert, 1975, Paleocene benthonic foraminiferal biostratigraphy, paleobiogeography and paleoecology of Atlantic-Tethyan regions: Midway-type fauna: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 18, 73-192.
- Berggren, W.A., Pearson, P.N., 2005, A revised tropical to subtropical Paleogene planktonic foraminiferal zonation: *Journal of Foraminiferal Research*, 35(4), 279-298.
- Bernaola, G., Baceta, J.I., Payros, A., Orue-Etxebarria, X., Apellaniz, E. (eds.), 2006, The Paleocene and lower Eocene of the Zumaia section (Basque Basin), *Climate and Biota of the Early Paleogene 2006, Post-Conference Field Trip Guidebook*: Bilbao, Ed. Kowiak, 82 pp.
- Bernaola, G., Baceta, J.I., Orue-Etxebarria, X., Alegret, L., Martín-Rubio, M., Arostegui, J., Dinarès-Turell, J., 2007, Evidence of an abrupt environmental disruption during the mid-Paleocene biotic event (Zumaia section, western Pyrenees): *Geological Society of America Bulletin*, 119(7-8), 785-795.
- Bernhard, J.M., 1986, Characteristic assemblages and morphologies of benthic foraminifera from anoxic, organic-rich deposits: Jurassic through Holocene: *Journal of Foraminiferal Research*, 16(3), 207-215.
- Bralower, T.J., Premoli Silva, I., Malone, M.J., *et al.*, 2002, Extreme Warmth in the Cretaceous and Paleogene: A depth transect on Shatsky Rise, central Pacific [en línea]: *Colege Station, TX, Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports, Leg 198*, <[http://www-odp.tamu.edu/publications/198\\_IR/198ir.htm](http://www-odp.tamu.edu/publications/198_IR/198ir.htm)>.
- Buzas, M.A., Culver, S.J., Jorissen, F.J., 1993, A statistical evaluation of the microhabitats of living (stained) infaunal benthic foraminifera: *Marine Micropaleontology*, 20(3-4), 73-76.
- 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(8), 716-719.
- D'Hondt, S., Donaghay, P., Zachos, J.C., Luttenberg, D., Lindinger, M., 1998, Organic carbon fluxes and ecological recovery from the Cretaceous-Tertiary mass extinction: *Science*, 282(5387), 276-279.
- Dickens, G.R., O'Neil, J.R., Rea, D.K., Owen, R.M., 1995, Dissociation of oceanic methane hydrate as a cause of the carbon isotope excursion at the end of the Paleocene: *Paleoceanography*, 10(6), 965-971.
- Dickens, G.R., Castillo, M.M., Walker, J.C.G., 1997, A blast of gas in the latest Paleocene: Simulating first-order effects of massive dissociation of oceanic methane hydrate: *Geology*, 25(3), 259-262.
- Dinarès-Turell, J., Baceta, J.I., Pujalte, V., Orue-Etxebarria, X., Bernaola, G., 2002, Magnetostratigraphic and cyclostratigraphic calibration of a prospective Palaeocene-Eocene stratotype at Zumaia (Basque Basin, northern Spain): *Terra Nova*, 14(5), 371-378.
- Dinarès-Turell, J., Baceta, J.I., Pujalte, V., Orue-Etxebarria, X., Bernaola, G., Lorito, S., 2003, Untangling the Palaeocene climatic rhythm: an astronomically calibrated Early Paleocene magnetostratigraphy and biostratigraphy at Zumaia (Basque basin, northern Spain): *Earth and Planetary Science Letters*, 216(4), 483-500.
- Fontanier, C., Jorissen, F.J., Licari, L., Alexandre, A., Anschutz, P., Carbonel, P., 2002, Live benthic foraminiferal faunas from the Bay of Biscay: faunal density, composition and microhabitats: *Deep-Sea Research Part I*, 49(4), 751-785.
- Jones, R.W., Charnock, M.A., 1985, "Morphogroups" of agglutinated foraminifera. Their life positions and feeding habits and potential applicability in (Paleo)Ecological studies: *Revue de Paléobiologie*, 4, 311-320.
- Jorissen, F.J., Stigter, H.C., Widmark, J.G.V., 1995, A conceptual model explaining benthic foraminiferal microhabitats: *Marine Micropaleontology*, 26(1-4), 3-15.
- Jorissen, F.J., Fontanier, C., Thomas, E., 2007, Paleooceanographical proxies based on deep-sea benthic foraminiferal assemblage characteristics, *en* Hillaire-Marcel, C., de Vernal, A. (eds.), *Proxies in Late Cenozoic Paleooceanography (Part 2): Biological tracers and biomarkers*: Amsterdam, Elsevier, 263-325.
- Kaminski, M.A., Gradstein, F., 2005, *Atlas of Paleogene Cosmopolitan Deep-Water Agglutinated Foraminifera*: Grzybowski Foundation Special Publication 10, 548 pp.
- Kaminski, M.A., Kuhnt, W., Moullade, M., 1999, The evolution and paleobiogeography of abyssal agglutinated foraminifera since the Early Cretaceous: A tale of four faunas: *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abhandlungen*, 212, 401-439.
- Kuhnt, W., Kaminski, M.A., 1989, Upper Cretaceous deep-water agglutinated foraminiferal assemblages from the western Mediterranean and adjacent areas, *en* Wiedmann, J. (ed.), *Cretaceous of the western Tethys: Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Cretaceous Symposium*, Tübingen, 1987: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 91-120.
- Kuhnt, W., Kaminski, M.A., 1993, Changes in the community structure of deep water agglutinated foraminifera across the K/T boundary in the Basque Basin (Northern Spain): *Revista Española de Micropaleontología*, 25, 57-92.
- Kuhnt, W., Kaminski, M.A., 1997, Cenomanian to Lower Eocene deep-water agglutinated foraminifera from the Zumaya section, northern Spain: *Annales Societatis Geologorum Poloniae*, 67, 257-270.
- Kuhnt, W., Kaminski, M.A., Moullade, M., 1989, Deep-water agglutinated benthic foraminiferal assemblages of the upper Cretaceous North Atlantic and its marginal seas: *Geologische Rundschau*, 78(3), 1121-1140.
- Kuhnt, W., Moullade, M., Kaminski, M.A., 1996, Ecological structuring and evolution of deep sea agglutinated foraminifera - a review: *Revue de Micropaléontologie*, 39(4), 271-281.
- Loeblich, A.R.Jr., Tappan, H., 1987, *Foraminiferal Genera and Their Classification*: New York, Van Nostrand Reinhold Company, 970 pp.
- Lourens, J.L., Sluijs, A., Kroon, D., Zachos, J.C., Thomas, E., Röhl, U., Bowles, J., Raffi, I., 2005, Astronomical pacing of late Paleocene to early Eocene global warming events: *Nature*, 435, 1083-1087.
- Mount, J.J., Margolis, S., Showers, W., Ward, P.W., Doehne, E. 1986, Carbon and oxygen isotope stratigraphy of the Upper Maastrichtian, Zumaya, Spain: a record of oceanographic and biologic changes at the end of the cretaceous period: *Palaos*, 1(1), 87-92.
- Murray, J.W., 1991, *Ecology and palaeoecology of benthic foraminifera*: Amsterdam, Elsevier, 397 pp.
- Murray, J.W., 2006, *Ecology and applications of benthic foraminifera*: Cambridge, Cambridge University Press, 426 pp.
- Nomura, R., 1995, Paleogene to Neogene deep-sea paleoceanography in the eastern Indian Ocean: Benthic foraminifera from ODP Sites 747, 757 and 758: *Micropaleontology*, 41, 251-290.
- Orue-Etxebarria, X., Bernaola, G., Baceta, J.I., Angori, E., Caballero, F., Monechi, S., Pujalte, V., Dinarès-Turell, J., Apellaniz, E., Payros, A., 2004, New constraints on the evolution of planktic foraminifera and calcareous nannofossils across the Paleocene-Eocene boundary interval: the Zumaia section revisited: *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abhandlungen*, 234, 223-259.
- Orue-Etxebarria, X., Payros, A., Caballero, F., Molina, E., Apellaniz, E., Bernaola (eds.), 2009, The Ypresian/Lutetian transition in the Gorrondatxe Beach (Getxo, Western Pyrenees): review, recent advances and future prospects. Compilation and abstract book of the "International Workshop on the Ypresian/Lutetian Boundary Stratotype" (Getxo, 25-27 september 2009): Bilbao, Kowiak S.A., 215 pp.
- Ortiz, N., 1995, Differential patterns of benthic foraminiferal extinctions near the Paleocene/Eocene boundary in the North Atlantic and the western Tethys: *Marine Micropaleontology*, 26(1-4), 341-359.
- Payros, A., Orue-Etxebarria, X., Pujalte, V., 2006, Covarying sedimentary and biotic fluctuations in Lower-Middle Eocene Pyrenean deep-

- sea deposits: Palaeoenvironmental implications: Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 234, 258-276.
- Peybernés, B., Fondecave-Wallez, M.J., Eichène, P., Bost, J., Sibe, B., Marais, M., Quilès, G., 1996, La limite Crétacé-Paléocène: phénomènes biologiques, événements géologiques d'après les sites de la côte basque: Centre Régional de Documentation Pédagogique d'Aquitaine, 91 pp.
- Pujalte, V., Baceta, J.I., Orue-Etxebarria, X., Payros, A., 1998, The Paleocene of the Basque Country, W Pyrenees, Spain: facies and sequence development in a deep-water starved basin, *en* De Graciansky, P.C., Hardenbol, J., Jacquin, T., Vail, P.R. (eds.), Mesozoic and Cenozoic Sequence Stratigraphy of European Basins: Tulsa, USA, Society for Sedimentary Geology, S.E.P.M. Special Publication, 60, 311-325.
- Schmitz, B., Asaro, F., Molina, E., Monechi, S., Von Salis, K., Speijer, R., 1997, High-resolution iridium,  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ , foraminifera and nannofossil profiles across the latest Paleocene benthic extinction event at Zumaya: Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 133(1-2), 49-68.
- Schmitz, B., Pujalte, V., Núñez-Betelu, K., 2000, Climate and sea-level perturbations during the initial Eocene thermal maximum: Evidence from siliciclastic units in the Basque Basin (Ermua, Zumaia and Trabakua Pass), northern Spain: Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 165(3-4), 299-320.
- Ten Kate, W.G.H.Z., Sprenger, A., 1993, Orbital cyclicities above and below the Cretaceous/Paleogene boundary at Zumaya (N Spain), Agost and Relleu (SE Spain): Sedimentary Geology, 87(1-2), 69-101.
- Thomas, E., 2003, Extinction and food at the seafloor: A high-resolution benthic foraminiferal record across the Initial Eocene Thermal Maximum, Southern Ocean Site 690, *en* Wing, S.L., Gingerich, P.D., Schmitz, B., and Thomas, E., (eds.), Causes and Consequences of Globally Warm Climates in the Early Paleogene: Boulder, Colorado, Geological Society of America, Special Paper 369, 319-332.
- Thomas, E., Zachos, J.C., Bralower, T.J., 2000, Deep-Sea Environments on a Warm Earth: latest Paleocene-early Eocene, *en* Huber, B., MacLeod, K., Wing, S. (eds.), Warm Climates in Earth History: Cambridge, Cambridge University Press, 132-160.
- Van Morkhoven, F.P.C.M., Berggren, W.A., Edwards, A.S., 1986, Cenozoic cosmopolitan deep-water benthic foraminifera: Bulletin du Centre des Recherches Exploration-Production Elf-Aquitaine, 11, 421 pp.
- Zachos, J.C., Kroon, D., Blum, P., *et al.*, 2004, Early Cenozoic extreme climates: The Walvis Ridge transect [Online]: Colege Station, TX, Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports, 208, <[http://www-odp.tamu.edu/publications/208\\_IR/208ir.htm](http://www-odp.tamu.edu/publications/208_IR/208ir.htm)>.
- Zachos, J.C., Röhl, U., Schellenberg, S.A., Sluijs, A., Hodell, D.A., Kelly, D.C., Thomas, E., Nicolo, M., Raffi, I., Lourens, L.J., McCarren, H., Kroon, D., 2005, Rapid acidification of the ocean during the Paleocene-Eocene thermal maximum: Science, 308(5728), 1611-1615.
- Zachos, J.C., Schouten, S., Bohaty, S., Sluijs, A., Brinkhuis, H., Gibbs, S., Bralower, T., Quattlebaum, T., 2006, Extreme warming of mid-latitude coastal ocean during the Paleocene-Eocene Thermal Maximum: Inferences from TEX<sub>86</sub> and Isotope Data: Geology, 34(9), 737-740.

Manuscrito recibido: Febrero 12, 2010

Manuscrito corregido recibido: Junio 18, 2010

Manuscrito aceptado: Junio 21, 2010