

Evidencias, causas y patrones de los eventos de extinción en el Cretácico Superior y Terciario Inferior con foraminíferos

E. Molina¹, L. Alegret¹, I. Arenillas¹, J.A. Arz² y C. Gonzalvo¹

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. México.

ABSTRACT

Three major foraminifera extinction events at the Cretaceous/Tertiary boundary, Paleocene/Eocene boundary and Eocene-Oligocene transition reveal different patterns of extinction, which imply different causes. The sudden catastrophic mass extinction pattern of 70% of the planktic foraminifera species at the end of the Cretaceous is very compatible with the catastrophic effect of an asteroid impact, which generated global cooling (impact winter). The extinction of more than 50 % of the small bathyal and abyssal benthic foraminifera at the end of the Paleocene is very consistent with intensive volcanism and changes in oceanic water circulation, generating a greenhouse effect, global warming, deep sea anoxia and rapid eustatic sea-level rise. The gradual extinction of more than 50% of planktic foraminifera during the Eocene-Oligocene transition is compatible with the plate tectonic movement that produced the isolation of Antarctica, generating the development of a circum-Antarctic circulation, global cooling, growth of ice sheet and thermohaline circulation.

Key words: Extinction, foraminifers, Maastrichtian, Paleocene, Eocene.

INTRODUCCIÓN

Los foraminíferos son los microfósiles que, por su excelente registro fósil, mejor evidencian los eventos de extinción acontecidos en el Cretácico Superior y Terciario Inferior. La riqueza y continuidad del registro permiten establecer los patrones de extinción y éstos, junto con los datos aportados por otras disciplinas, permiten deducir las causas de la extinción. Los patrones pueden ser graduales o catastróficos y las causas extraterrestres, geológicas y biológicas. En un evento pueden influir varias causas constituyendo el mecanismo de extinción, pero sólo una es la causa primordial que desencadena el mecanismo.

En el periodo de tiempo estudiado, desde el Campaniense superior al Rupeliense inferior, han acontecido tres importantes eventos de extinción: el del límite Cretácico/Terciario (K/T), que es uno de los mayores eventos de extinción en masa de la historia del planeta, y otros eventos de extinción menores en el límite Paleoceno/Eoceno (P/E) y en el tránsito Eoceno-Oligoceno (E-O). Los patrones de extinción observados en cada evento fueron diferentes para los foraminíferos planctónicos y para los pequeños bentónicos, lo que implica que las causas también lo fueron. El presente trabajo constituye una breve síntesis de las evidencias encontradas en diversos cortes a partir del estudio integrado de los foraminíferos con otros datos de diversas ciencias.

MATERIAL Y MÉTODOS

Se han estudiado numerosos cortes situados en distintas partes del mundo. Los mejores en España son: Agost, Alamedilla, Aspe, Caravaca, El Navazuelo, Fuente Caldera, Molino de Cobo y Torre Cardela (Cordilleras Béticas) y Arguis, Artieda, Berdún, Campo, Iriso, La Peña, Latasa, Músquiz, Tremp, Osinaga, San Sebastián y Zumaya (Pirineo). En Italia: Ceselli, Gubbio, Massignano y Possagno. En Bélgica: Knokke. En Francia: Gave d'Oloron y Tercis. En Dinamarca: Nye Klov. En México: Bochil, Coxquihui, La Ceiba, La Lajilla, El Mimbrol y El Mulato. En Tunicia: Aïn Settara, El Kef y Elles. En Israel: Ben Gurión y Zomet Telalim. En el Océano Atlántico: DSDP 94, 98, 116, 363, 366, 401, 402 y 612. En el Océano Índico: DSDP 214, 216, 219, 223, 242 y 253. En el Océano Pacífico: DSDP 277, 292, 305, 313 y 462.

Los muestreos han sido detallados y se han realizado a escala métrica, excepto en los tramos donde se localizan los eventos de extinción, los cuales se han muestreado en intervalos que varían entre 10 y 20 cm, llegando en los eventos de límite a tomar muestras continuas cada dos centímetros. Posteriormente, las muestras se han disgregado con agua y se han levigado, estudiando la fracción mayor de 150 µm, 100 µm, o 63 µm dependiendo del tamaño de los foraminíferos en cada corte. En muchos casos se han realizado estudios cuantitativos, separando una fracción re-

presentativa de 300 o más ejemplares de cada muestra, utilizando un microcuarteador tipo Otto, y revisando el resto de la muestra para buscar las especies poco abundantes.

Las referencias bibliográficas, según las normas de publicación, no deben superar la decena, por lo que incluimos nuestras 10 más relevantes, donde se pueden encontrar las referencias completas de los otros autores citados en este artículo.

LÍMITE CRETÁCICO/TERCIARIO

El evento de extinción en masa del límite K/T es el mejor estudiado de los 5 grandes eventos de extinción de la historia geológica. La cantidad de evidencias científicas acumuladas en las últimas dos décadas ha sido enorme desde que el iridio documentara que esta extinción en masa había sido causada por el impacto de un gran asteroide. El grupo de fósiles más emblemático ha sido el de los dinosaurios, los cuales se extinguieron junto con los ammonites, belemnites y rudistas. Otros grupos de fósiles más pequeños, como los foraminíferos, no llegaron a extinguirse totalmente, pero fueron muy afectados por la extinción en masa. Además, los foraminíferos presentan un mejor registro fósil por lo que sus patrones de extinción permiten dilucidar cuál es la causa más plausible que desencadenó el mecanismo de extinción.

Desde que los foraminíferos planctónicos empezaron a ser estudiados, se observó una gran renovación de especies entre el Cretácico y el Terciario (Bolli, 1957; Luterbacher y Premoli-Silva, 1964; Berggren, 1969; Blow, 1969). Estudios de alta resolución con muestreos a escala centimétrica sobre el corte español de Caravaca condujeron a Smit a confirmar la teoría que el grupo de Álvarez acababa de anunciar basándose en el corte de Gubbio. En 1980, Smit y Herttogen y Álvarez *et al.* publicaron casi simultáneamente la teoría del gran impacto meteorítico y se asumió que la extinción había sido catastrófica, eliminando a todas las especies excepto a *Guembelitra cretacea*, considerando como resedimentadas alocrónicamente a algunas otras presentes en la base del Terciario.

Estas interpretaciones fueron cuestionadas por Keller (1988) estudiando el corte de El Kef (Tunisia), donde recientemente se había definido el límite K/T en la base de la arcilla que contiene las evidencias de impacto del asteroide (iridio, microtectitas, cuarzos de choque, espinelas de níquel, etc.). Según Keller el patrón de extinción es gradual y sólo algunas especies se extinguen en coincidencia con el nivel de las evidencias de impacto (Keller *et al.*, 1995). Los estudios de Keller desencadenaron una polémica con Smit, quien aducía que el patrón gradual era consecuencia del efecto Signor-Lipps (1982) y de la resedimentación. Por esta razón, se organizó un test ciego en el que cuatro investigadores trataron de dilucidar si el patrón era gradual o catastrófico. Los resultados no fueron concluyentes, si bien

se evidenció el efecto Signor-Lipps en el Cretácico terminal. En consecuencia, Keller (1997) mantuvo su modelo gradual y Smit y Nederbragt (1997) su modelo catastrófico en coincidencia con las evidencias de impacto.

Otros autores han estudiado éste y otros cortes tratando de dilucidar la controversia. Entre nuestros estudios más detallados se pueden citar: Molina *et al.* (1996, 1998), Arz *et al.* (1999a,b), Arenillas *et al.* (2000a,b). Nuestros datos sobre el corte de El Kef (Arenillas *et al.*, 2000a) no confirman el patrón gradual. Por el contrario, muestran que un 70% los foraminíferos planctónicos se extinguen catastróficamente en coincidencia con el nivel de impacto. En realidad, a lo largo del tránsito K-T, se extinguen todas las especies menos *Guembelitra trifolia* y *Guembelitra cretacea*, constituyendo la mayor extinción en masa (>95%) de toda la historia evolutiva de los foraminíferos planctónicos. En otros cortes de latitudes subtropicales y templadas, como los de Agost, Caravaca, Aïn Settara y Zumaya (Molina *et al.*, 1996, 1998), el patrón de extinción es similar. Sólo un 5% de las especies desaparecen antes del límite y un 25% desaparecen en el Daniense inferior. Este 30% de especies podría considerarse como un patrón gradual al que se superpone el catastrófico, pero es más plausible que las que desaparecen en el Cretácico sean consecuencia de la extinción de fondo o del efecto Signor-Lipps remanente, y las que desaparecen en la base del Daniense sean consecuencia de los efectos a largo plazo del impacto meteorítico o estén resedimentadas alocrónicamente.

Los pequeños foraminíferos bentónicos del corte de Aïn Settara, La Ceiba y El Tecolote han sido estudiados recientemente por Alegret, y confirman que, aunque la tasa de extinción de especies aumentó coincidiendo con el límite, no experimentaron una extinción en masa. Sin embargo, se observa un cambio drástico en los hábitos alimenticios y en los porcentajes de morfogrupos infaunales y epifaunales. Durante el Cretácico terminal los porcentajes de ambos morfogrupos son similares y reflejan condiciones de oxigenación de las aguas y aporte de nutrientes al fondo marino óptimas para el desarrollo de las comunidades infaunales y epifaunales. Coincidiendo con el límite K/T, el drástico descenso en la cantidad de especies infaunales indica un colapso en la productividad primaria, evidenciando así una crisis en la fotosíntesis a escala global coherente con la teoría del impacto meteorítico.

LÍMITE PALEOCENO/EOCENO

El grupo más afectado durante este evento fue el de los pequeños foraminíferos bentónicos batiales y abisales. Según Thomas (1990), el evento del límite P/E produjo la extinción del 50% de las especies, siendo la mayor de este grupo en todo el Cenozoico. Nuestros datos (Molina *et al.*, 1994; Canudo *et al.*, 1994, Schmitz *et al.*, 1997) indican que se extinguieron de forma rápida y catastrófica, pero no

de manera tan brusca como en el límite K/T. Por el contrario, los foraminíferos planctónicos no sufrieron extinción en masa. Estas evidencias micropaleontológicas indican que, al contrario que en el evento del K/T, los ambientes más afectados fueron los fondos batiales y abisales.

El evento de extinción coincide con grandes cambios negativos en los valores de los isótopos del carbono y del oxígeno, los cuales indican un descenso acusado de la productividad y un aumento de la temperatura en toda la columna de agua oceánica. En cortes continuos, como Alamedilla y Zumaya, se encuentra bien desarrollado un nivel de arcilla gris oscura o roja en cuya base se produce la extinción de los pequeños bentónicos y una excursión extratropical de los foraminíferos planctónicos del género *Acarinina* (Molina *et al.*, 1994; Canudo *et al.* 1995; Arenillas y Molina, 1996; Arenillas *et al.*, 1999). La evolución de nuevas especies de foraminíferos planctónicos, la migración de especies tropicales-subtropicales hacia latitudes frías y el incremento en abundancia de las mismas indican un ascenso de la temperatura superficial marina que, quizás, es reflejo de un calentamiento climático global. Estos cambios revelan por tanto variaciones importantes en la circulación oceánica, así como anoxia en los fondos marinos, una subida del nivel de compensación de la calcita y un ascenso del nivel del mar.

TRÁNSITO EOCENO-OLIGOCENO

Este evento era conocido desde antiguo en los medios continentales como la "gran coupure" y produjo la extinción de muchos mamíferos y otros organismos. En los medios marinos se observa una extinción gradual de los foraminíferos planctónicos que comienza al final del Eoceno medio y termina a final del Eoceno superior. Primero se extinguieron las especies de los géneros *Morozovella*, *Acarinina* y *Truncorotaloides*, después *Globigerinatheca* y *Globigerapsis* y finalmente *Turborotalia*, *Hankenina* y *Cribohankenina*. (Molina, 1986, 1995; Molina *et al.* 1986, 1988; Premoli Silva *et al.*, 1988; Gonzalvo y Molina, 1992). Las especies que se fueron extinguiendo gradualmente eran las más especializadas de medios tropicales y subtropicales, sobreviviendo en el Oligoceno inferior formas cosmopolitas de aguas templadas y frías (Molina, 1979). En el tránsito Eoceno medio-superior la extinción afectó a más del 50% de las especies y durante el tránsito Eoceno-Oligoceno se extinguieron casi otro 50%. La causa directa que mejor explica este evento de extinción es el enfriamiento climático global inducido por cambios en la circulación de las corrientes oceánicas como consecuencia de la separación de la Antártida de Australia. La presencia de varios niveles de microtectitas en el Eoceno superior condujo a Hut *et al.* (1987) a proponer un modelo de extinción escalonada cuya causa sería el impacto de cometas, pero este modelo fue falsado por Molina *et al.* (1993), ya que se demostró que

los niveles con las evidencias de impacto no coinciden con los de extinción.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los tres eventos estudiados muestran diferentes patrones de extinción, lo cual implica que las causas que los desencadenaron fueron distintas.

En el límite K/T, los foraminíferos más afectados fueron los planctónicos de latitudes cálidas. El patrón catastrófico de extinción del 70% de los foraminíferos planctónicos coincide exactamente con el nivel que contiene las evidencias de impacto extraterrestre. Por tanto, puede establecerse la relación causa-efecto entre el impacto y la extinción del límite K/T. El mecanismo de extinción en el límite K/T incluye un enfriamiento climático brusco como consecuencia del oscurecimiento global durante el invierno de impacto. La ruptura de la cadena trófica y el brusco enfriamiento climático provocó la extinción en masa catastrófica de los foraminíferos planctónicos. El patrón de extinción de foraminíferos identificado es muy compatible con la teoría del impacto meteorítico, la cual está actualmente muy bien documentada. A este evento le siguió un efecto invernadero debido a la destrucción de los grandes consumidores de CO₂ (como el fitoplancton marino), contribuyendo a una fuerte radiación evolutiva del plancton.

En el límite P/E, los foraminíferos más afectados fueron los pequeños bentónicos de los fondos oceánicos. El incremento de la actividad geotectónica y volcánica y cambios paleogeográficos importantes, como el cierre del Mar del Tetis y la apertura del Atlántico norte, pudieron ser la causa primordial del evento. Esta actividad desencadenó un fuerte aumento del dióxido de carbono y metano y, consiguientemente, efecto invernadero y calentamiento climático. Las corrientes oceánicas superficiales y profundas se hicieron más cálidas, implantándose una circulación halothermal cuya fuente de aguas profundas era el Tetis, dominado por aguas extremadamente cálidas y salinas. También se produjo un ascenso del nivel del mar, además de anoxia y una fuerte subida de la lisoclina en los fondos oceánicos. Esto hizo que los medios batiales y abisales se hicieran inhabitables para los foraminíferos calcáreos, pero produjo una fuerte radiación evolutiva en el plancton y en los medios continentales.

En el tránsito E-O, los foraminíferos planctónicos muestran un patrón de extinción gradual a lo largo de casi diez millones de años. Este patrón se aceleró en el tránsito Bartonense-Priabonense y en el tránsito Priabonense-Rupeliense. La teoría de un enfriamiento climático es compatible con el patrón gradual de extinción de las especies de latitudes más cálidas y sería la causa directa que desencadenó la extinción. Este enfriamiento se asocia con la separación de la Antártida de Australia, que generó la corriente circumpolar antártica y la formación de casquetes de hielo en los polos. Durante esta época, comienza a im-

plantarse la actual circulación termohalina, dominada por aguas profundas frías y salinas procedentes de los polos. Esta circulación y el efecto albedo del hielo crearon un bucle de retroalimentación positiva que contribuyó a un enfriamiento climático progresivo.

En resumen, los tres eventos de extinción muestran causas primordiales diferentes: una de origen extraterrestre y dos de tipo geológico. El impacto de grandes asteroides es una causa de extinción que actualmente sólo está bien documentada en el límite K/T; por el contrario, las evidencias de impacto del Eoceno superior no coinciden con las extinciones y no puede establecerse la relación causa y efecto. El cambio climático está siempre presente en el mecanismo de extinción. Es siempre consecuencia de otra causa anterior que desencadena el mecanismo y es, a su vez, causa generadora de otros procesos. Entre los procesos más directos de extinción debieron estar los biológicos (competición, endemismo, etc.), los cuales tuvieron mucho tiempo para actuar en el tránsito E-O, pero muy poco en el límite K/T.

AGRADECIMIENTOS

Trabajo financiado por el proyecto DGES de España, número PB97-1016, y los proyectos de México CONACYT, J32473T y PAICYT, CT193-99.

REFERENCIAS

- Arenillas, I., Arz, J.A., Molina, E. y Dupuis, Ch. (2000a): An independent test of planktic foraminiferal turnover across the Cretaceous/Paleogene (K/P) boundary at El Kef, Tunisia: Catastrophic mass extinction and possible survivorship. *Micropaleontology*, (en prensa).
- Arenillas, I., Arz, J.A., Molina, E. y Dupuis, Ch. (2000b): The Cretaceous/Tertiary boundary at Ain Settara, Tunisia: sudden catastrophic mass extinction in planktic foraminifera. *Journal of Foraminiferal Research*, (en prensa).
- Arz, J.A., Arenillas, I. y Molina, E. (1999a): Extinción de foraminíferos planctónicos en el tránsito Cretácico-Terciario de Zumaya (Guipúzcoa): ¿supervivencia o reelaboración? *Revista Española de Micropaleontología*, 31(3): 297-304.
- Arz, J.A., Arenillas, I., Molina, E. y Dupuis, Ch. (1999b): Los efectos tafonómico y «Signor-Lipps» sobre la extinción en masa de foraminíferos planctónicos en el límite Cretácico/Terciario de Elles (Tunisia). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 12(2): 251-267.
- Canudo, J.I., Keller, G., Molina, E. y Ortiz, N. (1994): Planktic foraminiferal turnover and $\delta^{13}\text{C}$ isotopes across the Paleocene-Eocene transition at Caravaca and Zumaya, Spain. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 114: 75-100.
- Molina, E. (1995): Modelos y causas de extinción masiva. *Interciencia*, 20(2): 83-89.
- Molina, E., Arenillas, I. y Arz, J.A. (1996): The Cretaceous/Tertiary boundary mass extinction in planktic foraminifera at Agost, Spain. *Revue de Micropaléontologie*, 39(3): 225-243.
- Molina, E., Arenillas, I. y 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(3): 351-363.
- Molina, E., Canudo, J.I., Martínez-Ruiz, F. y Ortiz, N. (1994): Integrated stratigraphy across the Paleocene/Eocene boundary at Caravaca, Southern Spain. *Eclogae geologicae Helveticae*, 87(1): 47-61.
- Molina, E., Gonzalvo, C. y Keller, G. (1993): The Eocene-Oligocene planktic foraminiferal transition: extinction, impact and hiatuses. *Geological Magazine*, 130(4): 483-499.