

El evento del límite Cretácico/Terciario y la navaja de Occam

The Cretaceous/Tertiary boundary event and the Occam's razor

JOSÉ ANTONIO ARZ¹, LAIA ALEGRET¹, IGNACIO ARENILLAS¹ Y FRANCISCO ANGUITA²

¹Departamento de Ciencias de la Tierra e Instituto Universitario de investigación en Ciencias Ambientales de Aragón, Universidad de Zaragoza, E-50009 Zaragoza, España. josearz@unizar.es; laia@unizar.es; ias@unizar.es

²Avenida de Portugal 3, 28011 Madrid. anguita@geo.ucm.es

Resumen Tras revisar las dos principales hipótesis propuestas para explicar las extinciones del límite Cretácico/Terciario (evento de extinción masiva del límite K/T), los autores concluyen que el impacto de un asteroide es la única causa que justifica todos los datos conocidos sobre esta crisis ambiental. Por el contrario, la idea de que el desencadenante del desequilibrio biótico fue el vulcanismo masivo en la región del Decán (India) tiene serios problemas cronológicos y causales.

Palabras clave: Extinción en masa, Límite K/T, Epistemología, Impacto meteorítico, Vulcanismo

Abstract A revision of the hypotheses proposed to explain the Cretaceous/Tertiary boundary extinctions (K/T mass extinction event) led us to conclude that the impact of an asteroid is the only cause that accounts for the environmental crisis and the known data. In contrast, the idea that the flood basalt volcanism in the Deccan area (India) was the main trigger of the biotic crisis still faces basic chronological and causal problems.

Key words: Mass extinction, K/T boundary, Epistemology, Meteoritic impact, Volcanism

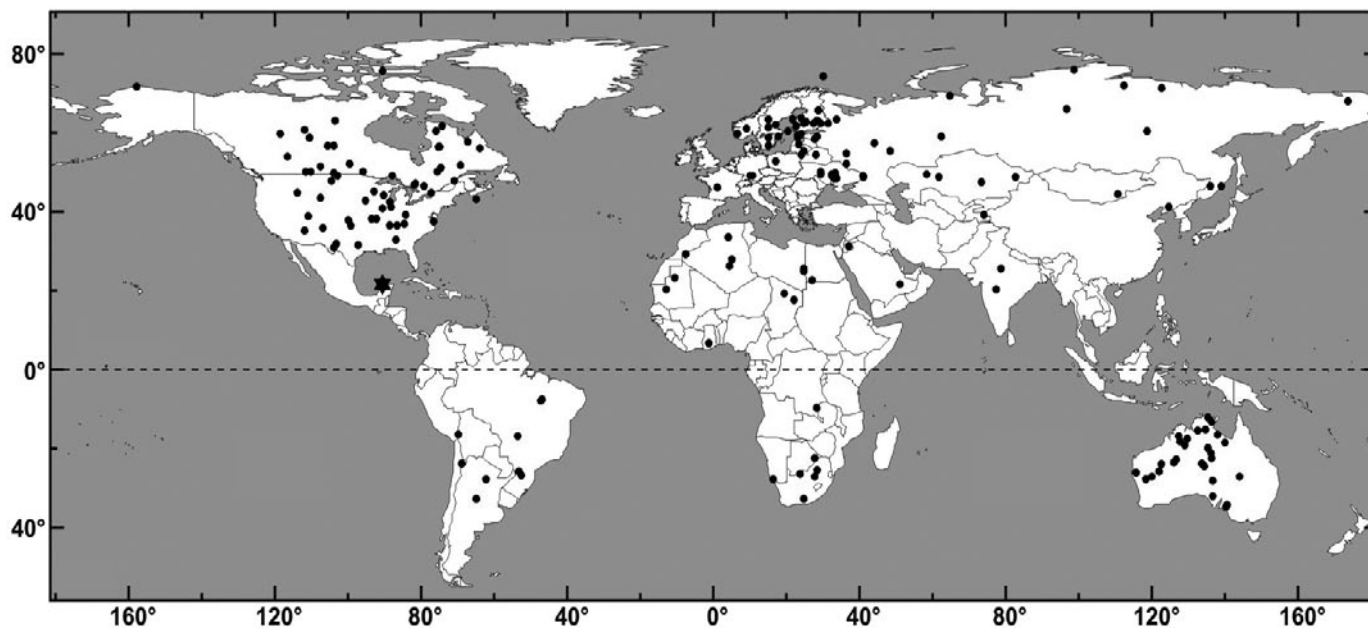
INTRODUCCIÓN

Vivimos en un periodo de importante pérdida de biodiversidad al que los medios de comunicación gustan llamar la “Sexta gran extinción”, aludiendo así a los cinco grandes eventos de extinción masiva del Fanerozoico (Raup y Sepkoski, 1982). De todos ellos, el que cerró el periodo Cretácico (denominado usualmente evento de extinción del límite Cretácico/Terciario, abreviado como K/T) es el que más frecuentemente ha llegado al gran público. Los alumnos se sorprenden al saber que no es el más importante, sino que queda en un modesto tercer lugar, tras las extinciones masivas registradas al final de los periodos Pérmico y Ordovícico. La causa de la popularidad del evento de extinción del límite K/T es bien conocida: entre sus víctimas se cuentan los dinosaurios, los más famosos de los animales del pasado.

Aun así, es muy posible que los lectores de *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra* frunzan el ceño ante el presente artículo, por ser ya el tercero dedi-

cado a este tema en los últimos tres años. El primero (Canudo, 2010) aboga por una *hipótesis híbrida* para explicar la extinción del límite K/T: el impacto del asteroide de Chicxulub, en la Península del Yucatán, sería el golpe de gracia para una biosfera previamente debilitada por los efectos del vulcanismo en la meseta del Decán, en la India. El segundo, titulado “*De México a la India: en busca de las causas del ocaso de los dinosaurios*” (Pardo *et al.*, 2011), apoya aquel vulcanismo como desencadenante exclusivo de la extinción. Esta segunda propuesta no es nueva ya que este equipo, liderado por la Dra. Gerta Keller de la Universidad de Princeton, la defiende desde hace tiempo (Keller, 1989; Keller *et al.*, 1995, 2003, 2004a,b).

Consideramos que ambos artículos representan una opinión minoritaria entre la comunidad científica, y que la visión dada por esta revista quedaría desequilibrada sin mostrar las conclusiones a las que ha llegado la mayoría de los investigadores del límite K/T. Por este motivo, realizamos una exposición de la *hipótesis impactista* (Alvarez *et al.*, 1980) como causa única del colapso biótico del final del Cretácico. La



existencia de cráteres de impacto en nuestro planeta no es un fenómeno raro (Fig. 1), aunque sí lo es que los asteroides tengan el suficiente tamaño como para provocar extinciones masivas.

Dice mucho de la velocidad a la que evoluciona la ciencia que la *hipótesis impactista*, una idea revolucionaria lindando con lo disparatado cuando se propuso, se haya convertido para muchos especialistas y treinta años después en la única hipótesis capaz de explicar *todos* los datos asociados al límite K/T y recopilados por cientos de científicos en todo el mundo (ver Schulte *et al.* 2010a,b). Sin embargo, más de veinte años después del hallazgo del cráter de Chicxulub (Hildebrand *et al.*, 1991) todavía existen algunas voces discrepantes que minusvaloran su importancia como principal agente causante de la extinción, basándose en el papel jugado por gigantescas erupciones volcánicas en otros eventos de extinción masiva [ver p. ej. Archibald *et al.* (2010) y Courtillot y Fluteau (2010)].

En nuestra opinión, si bien es irrefutable que el vulcanismo ha provocado grandes extinciones a lo largo de la historia de la Tierra, no podemos concluir que todas las extinciones hayan sido desencadenadas por el vulcanismo. Queremos reivindicar la base observacional de las Ciencias de la Tierra: cada acontecimiento sucedido en el planeta tiene una personalidad única, definida por el conjunto de datos archivados en el registro geológico. No podemos extrapolar al evento del límite K/T las conclusiones deducidas del registro geológico del límite Pérmico/Triásico, o de cualquier otro periodo de extinción masiva. Ello equivaldría a cerrar los ojos ante las principales fuentes de datos que sustentan nuestra ciencia: la observación de las relaciones en el campo y el análisis de las muestras en el laboratorio.

VOLCANES Y ASTEROIDES

Parece oportuno comenzar describiendo brevemente cómo pudieron actuar los principales sospechosos de haber provocado las extinciones del límite K/T. Como consideraciones generales, plantearemos dos preguntas:

- 1.- ¿Es posible distinguir, en el registro geológico, los efectos de la colisión de un gran asteroide y de una erupción volcánica masiva?

La respuesta es una rotunda afirmación: un asteroide de varios kilómetros de diámetro se vaporiza tras el impacto, excavando un cráter y emitiendo a la estratosfera una gran columna de residuos que son repartidos por todo el planeta. Parte de este material (grandes bloques, partículas de vidrio fundido, minerales de alta presión) regresa a la superficie de la Tierra en cuestión de minutos u horas, mientras que las partículas de menor tamaño (polvo, aerosoles) tardan meses o años en caer. Se trata por tanto de un evento muy rápido, y la mayor parte del material resultante se deposita en la corteza terrestre en un cortísimo lapso de tiempo en términos no sólo geológicos, sino también humanos.

Por su parte, y fuera del terreno que cubren, las grandes erupciones volcánicas no dejan un registro global instantáneo claramente reconocible. Se extienden a lo largo del tiempo, agrupándose en fases de actividad magmática separadas por periodos de calma. Este ritmo se plasma en el registro geológico, por ejemplo en variaciones en las relaciones isotópicas ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$) en las rocas sedimentarias contemporáneas, que abarcan cientos de miles o incluso millones de años.

Fig. 1. Mapa de todos los cráteres de impacto confirmados hasta la fecha por la NASA, con el cráter de Chicxulub señalado con una estrella (modificado de <http://www.meteorimpactonearth.com/meteorite.html>).

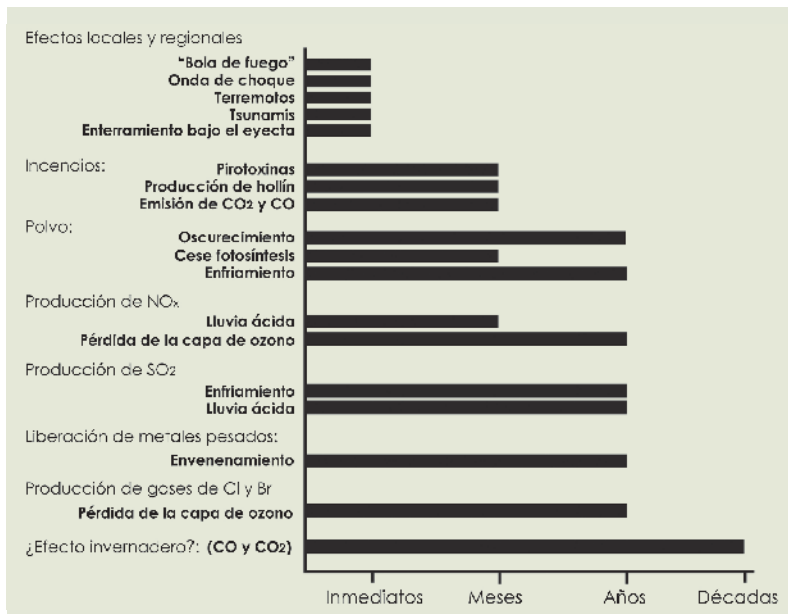


Fig. 2. Escala temporal de las principales perturbaciones ambientales que desencadenaría un impacto similar al de Chicxulub (modificado de Kring, 2000).

2.- ¿Causarían los mismos efectos ambientales una erupción volcánica masiva y la colisión de un gran asteroide?

Sólo en una pequeña parte. Los volcanes son las grandes chimeneas a través de las cuales los planetas se desgasifican. Tras fases volcánicas muy intensas, algunos de los gases emitidos (como CO₂ o metano) pueden causar un importante efecto de invernadero hasta que se disuelven en los océanos. Los océanos también se calientan, lo que puede dar lugar a episodios masivos de anoxia (ausencia de oxígeno disuelto) y de desestabilización de los hidratos de metano que se encuentran congelados en los sedimentos, contribuyendo al aumento de la temperatura media del planeta. Actualmente, esta es la hipótesis más plausible para explicar la extinción del final del Pérmico (Kidder y Worsley, 2004).

Un caso particular son las erupciones de tipo pliniano, que generan columnas eruptivas con capacidad de alcanzar la estratosfera inyectando aerosoles que pueden velar la luz solar, y por tanto contrarrestar en parte el efecto de invernadero. Pardo *et al.* (2011) dan por sentado que las erupciones del Decán inyectaron enormes cantidades de aerosoles de SO₂ en la estratosfera, pero lo cierto es que estas erupciones, como todas las de tipo fisural, son de estilo hawaiano y por lo tanto debieron de tener una capacidad limitada de alcanzar la alta atmósfera. Es por ello que la emisión súbita de una cantidad similar de aerosoles de SO₂ a la atmósfera, justo tras el

impacto de Chicxulub (estimada en unas 50 gigatoneladas), tuvo que ser mucho más perjudicial para la biosfera que las emisiones del Decán, que duraron varios millones de años (Schulte *et al.*, 2010b).

Por su parte, el impacto de un gran asteroide (de unos 10 km de diámetro) sobre nuestro planeta produciría efectos devastadores en cientos de kilómetros a la redonda, pero las perturbaciones más severas para la biosfera serían las derivadas de la emisión de grandes cantidades de microtectitas (gotitas de material fundido resultante del impacto) y de determinados gases y partículas de polvo a la atmósfera. Según los modelos más recientes aplicados al impacto del límite K/T en Chicxulub (Kring, 2007), la lluvia de microtectitas incandescentes por la fricción con la atmósfera provocó una intensa radiación infrarroja y la ignición espontánea de muchos bosques, liberándose grandes cantidades de pirotoxinas y partículas de hollín. Su concentración, junto con el polvo generado por el impacto, oscureció la atmósfera de dos a seis meses, causando un brusco enfriamiento global (Fig. 2).

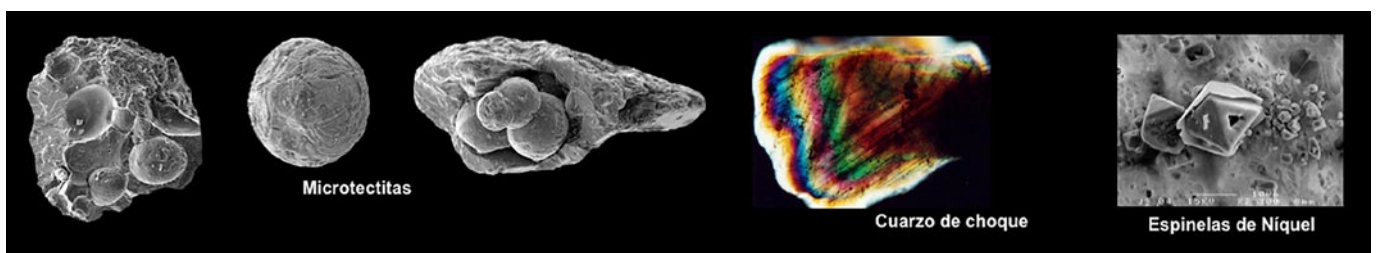
Un efecto secundario de la radiación térmica fue la síntesis de óxidos de nitrógeno, a partir del N₂ y O₂ atmosféricos, disueltos como ácido nítrico y eliminados a lo largo de varios meses como lluvia ácida. Además, el impacto de Chicxulub tuvo lugar sobre un mar somero con abundantes calizas y anhidritas. La vaporización instantánea de estos materiales y del propio bólido liberaría metales pesados e inyectaría a la atmósfera un gran volumen de CO₂ y de aerosoles de ácido sulfúrico. Además de contribuir al enfriamiento, la liberación de todos estos gases provocaría un rápido evento de acidificación de la parte más superficial de los océanos, que afectaría severamente al plancton calcáreo (Alegret *et al.*, 2012).

A continuación, procederemos a examinar las conclusiones que podemos obtener tras el estudio multidisciplinar de los principales afloramientos donde se registra la extinción.

EL REGISTRO SEDIMENTARIO DEL LÍMITE K/T

Actualmente se conocen en todo el mundo más de 350 localidades en las que se ha podido analizar y datar con precisión el límite K/T. Además de una concentración excesivamente elevada de iridio, los geólogos utilizan para reconocer la posición del límite K/T en el campo otras anomalías (Fig. 3) que aparecen concentradas en la frontera entre el Cre-

Fig. 3. Algunos tipos de evidencias petrológicas y mineralógicas distribuidas globalmente en el límite K/T.



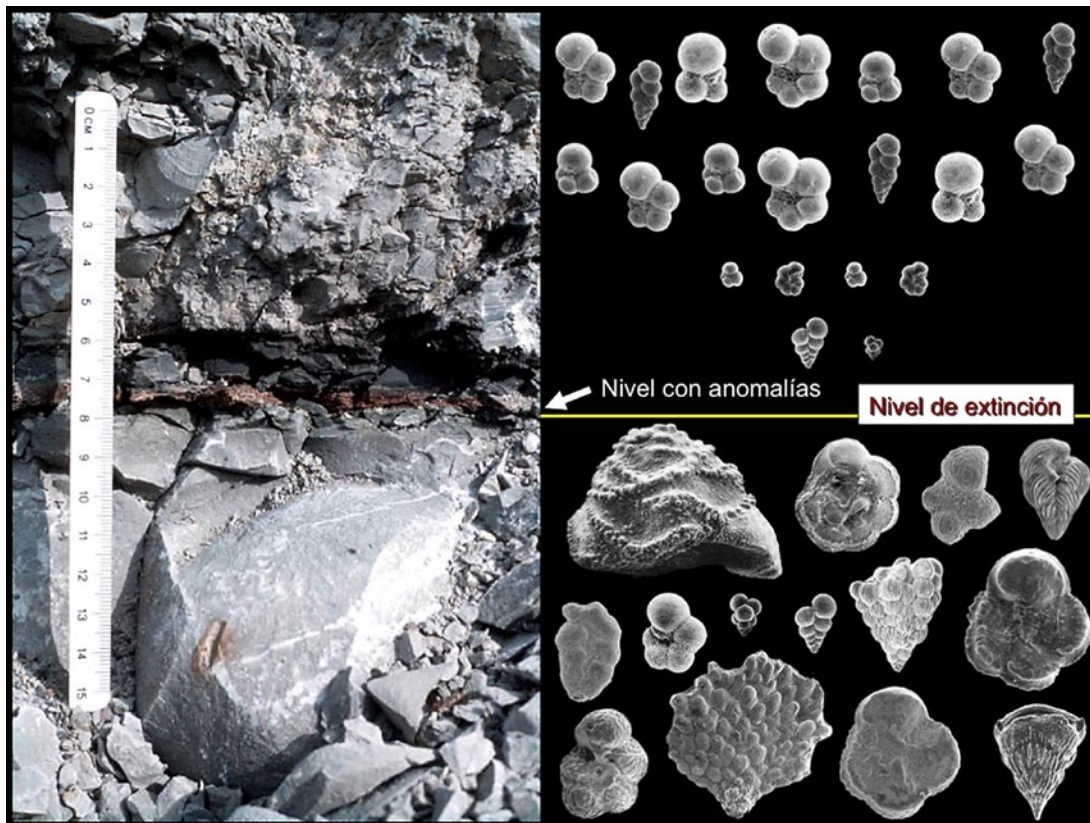


Fig. 4. Nivel con acumulación de microtectitas y minerales de choque en Caravaca (Murcia) y comparación entre las asociaciones de foraminíferos planctónicos del Cretácico y del Paleógeno (nótese el diferente tamaño y complejidad de las conchas).

tácico y el Paleógeno, o parte inferior del Terciario: esférulas vítreas (microtectitas), minerales exóticos sintetizados a partir de los metales del asteroide (como espinelas ricas en níquel), y minerales con huellas de metamorfismo de impacto (cuarzos de choque), entre otros.

El registro en regiones distales

En lugares alejados de la Península del Yucatán donde hoy afloran antiguos sedimentos depositados en el fondo marino durante el límite K/T, como en España, Italia o Túnez, dichas anomalías se concentran en un nivel milimétrico situado justo bajo una capa de arcilla oscura conocida como “la arcilla del límite”, que se interpreta como resultado del descenso en la productividad de carbonato en las capas superiores del océano. Suele presentar un tono rojizo y señala exactamente el nivel donde se registra la extinción masiva de diversos grupos de microorganismos de concha carbonatada, como los foraminíferos planctónicos o el nanoplancton calcáreo; estos grupos forman una parte importante del volumen de las rocas sedimentarias del Cretácico (Fig. 4).

El registro en áreas cercanas al impacto

Una de las predicciones que emanan de la hipótesis impactista es que el nivel milimétrico con anomalías aumentará su espesor a medida que nos aproximemos al cráter, tal y como sucede con los campos de tectitas que rodean los grandes cráteres de impacto de la Luna, Marte o Mercurio. Esta pista fue clave para encontrar el cráter de Chicxulub,

ya que era conocido que en el Golfo de México y el Caribe las rocas con microfósiles cretácicos están separadas de las del Paleógeno por una unidad estratigráfica de varios metros de potencia: la “Unidad clástica” (en adelante UC, Fig. 5). Se trata de una de las unidades más estudiadas en la última década, y detrás de su descubrimiento e interpretación hay una historia muy interesante que el lector puede encontrar en Alvarez (1998).

En 1994, la Sociedad Americana de Geología Sedimentaria organizó una excursión internacional a algunos afloramientos de la UC en el estado de Tamaulipas, en el interior de México. Este experimento, en el que el campo sustituía al laboratorio, fue codirigido por un partidario (el Dr. Jan Smit de la Universidad Libre de Amsterdam) y un detractor de la hipótesis impactista (el Dr. Wolfgang Stinnesbeck de la Univer-

Fig. 5. Unidad clástica en El Mulato (Tamaulipas). Se trata del afloramiento del noreste de México que presenta una mejor exposición. La Unidad clástica genera un resalte muy aparente entre las margas del Cretácico y las del Paleógeno.





Fig. 6. Unidad clástica en El Mimbral (Tamaulipas). Sobre las margas cretácicas (A) se depositó la Unidad clástica (B) que comienza con un paleocanal relleno con lechos enriquecidos en microtectitas y otros enriquecidos en margas (B1), al que siguen las areniscas depositadas por la acción de los tsunamis (B2); finalmente aparecen depósitos de conglomerados cuaternarios (C).

sidad Autónoma de Nuevo León, en México). Como era de esperar, ninguno de los dos contendientes convenció al otro, y por eso era importante el parecer de los científicos no implicados en el tema. Su dictamen fue claro: el impacto había ganado la batalla (“...the impact won the day.” [Kerr, 1994]).

A pesar de la importancia de la UC, Pardo *et al.* (2011, p. 154) sólo dedican seis líneas a describirla. Afirman que en el noreste de México esta unidad está formada por una capa de microtectitas sobre la que aparecen, de abajo hacia arriba, una capa de caliza, una gruesa capa de arenisca laminada y la lámina de arcilla con iridio que marca la extinción. Esta descripción es inexacta. En el noreste de México, y debido a la existencia de un hiato erosivo, no se ha preservado la arcilla del límite (Keller *et al.*, 2003; Arenillas *et al.*, 2006). La UC comienza con una capa de microtectitas, sobre la que se depositaron capas arenosas que presentan una débil concentración de iridio hacia el techo (Bohor, 1996). En realidad la capa de caliza mencionada por Pardo *et al.* (2011) no es tal, sino que consta de cuñas esporádicas de areniscas calcáreas que aparecen en los tramos más bajos de las capas arenosas (Smit, 1999) y que son compatibles con el depósito geológicamente instantáneo de la UC.

Localmente, los sedimentos enriquecidos en microtectitas no se concentran en una única capa, sino formando parte de pliegues gravitacionales

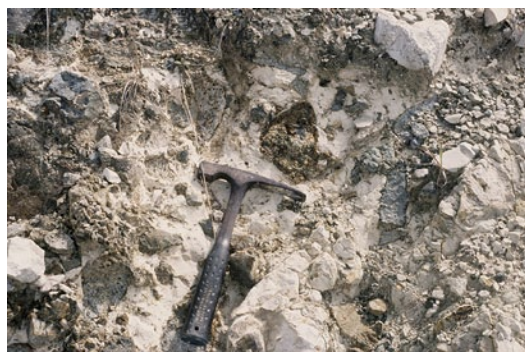


Fig. 7. Detalle de la Unidad clástica en Santa Clara (Cuba). En este caso se trata de unos 10 metros de brecha polimíctica enriquecida a techo en cuarzos de choque, microtectitas y otras evidencias de impacto.

(*slumps*) producidos mientras la lluvia de microtectitas se depositaba a lo largo de planos inclinados en el fondo oceánico, o bien alternan con lechos más margosos (Figs. 6 y 8). Estos procesos sedimentarios se han relacionado con los violentos terremotos y el paso de olas de tsunami, desencadenados por el impacto del asteroide de Chicxulub en el mar somero del Yucatán (Smit *et al.*, 1996; Soria *et al.*, 2001). Quizá alguno de los lectores de esta revista recuerde la excursión que ochenta miembros de la AEPECT realizaron en julio de 2003 a la UC de El Mimbral, en el estado de Tamaulipas (Fig. 6), y en la que pudieron comprobar de primera mano tanto la enorme energía del depósito como el doble sentido de ida y vuelta de las corrientes de tsunami, que además transportaron y acumularon niveles con restos de plantas terrestres.

En el sureste de México y el Caribe, la UC alcanza hasta varios centenares de metros, acorde con la mayor cercanía al punto de impacto. Se trata de potentes acumulaciones de brechas de muy alta energía que incluyen clastos ígneos mezclados con otros sedimentarios (Fig. 7). Se interpretan como el reflejo del colapso gravitatorio de las plataformas, momentos antes de la llegada de las microtectitas y minerales de impacto que se concentran a techo de esta unidad (Grajales *et al.*, 2000; Alegret *et al.*, 2005; Arenillas *et al.*, 2006). Para que el lector se haga una mejor idea del heterogéneo registro de los sedimentos asociados al evento K/T, en la Figura 8 se muestra una correlación estratigráfica de afloramientos de áreas proximales y distales al cráter de Chicxulub. Como demuestran Schulte *et al.* (2010a), la variación en la potencia de las unidades con evidencias de impacto, la complejidad de los procesos sedimentarios y la energía implicada señalan directamente al impacto de Chicxulub como la causa de su depósito y de las extinciones del límite K/T.

¿Uno o varios campos de tectitas en el Golfo de México?

En un intento de exculpar al impacto de Chicxulub como el responsable del evento de extinción masiva del límite K/T, Keller *et al.* (2003) publicaron un artículo de revisión de sus principales resultados en México, Guatemala, Belice y Haití. Estos autores proponían que el tránsito entre el Cretácico y el Paleógeno fue un tiempo de múltiples impactos meteoríticos sobre nuestro planeta: (1) el impacto de Chicxulub, que habría tenido lugar 300.000 años antes del límite K/T; (2) un impacto de un asteroide mucho mayor, de edad K/T y cuyo cráter todavía no se habría descubierto; y (3) un tercer impacto a comienzos del Paleógeno.

Llevaría demasiado espacio rebatir *in extenso* cada una de estas afirmaciones. Resumiremos diciendo que la asignación de una edad anterior al límite K/T para el impacto de Chicxulub se basa en pasar por alto la multiplicación artificial de capas de

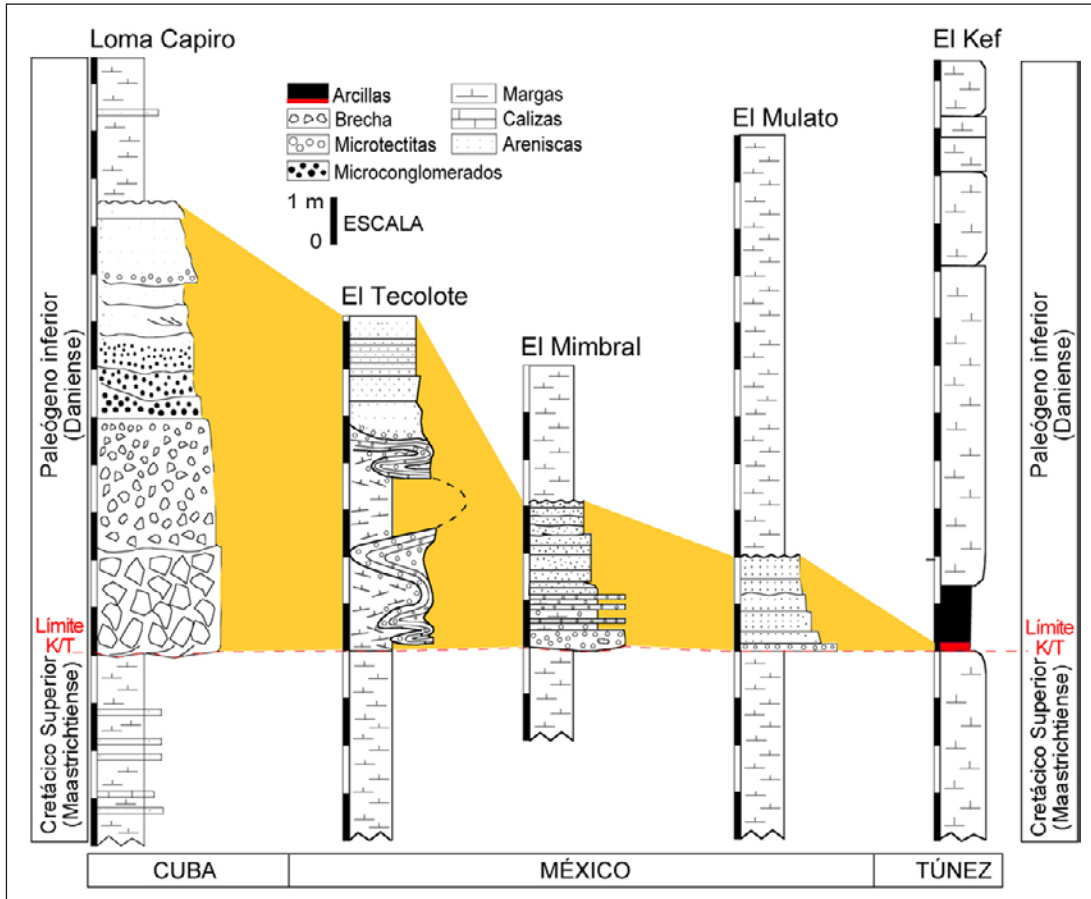


Fig. 8. Correlación estratigráfica de afloramientos con unidades clásticas enriquecidas en evidencias de impacto. Se observa una disminución de la potencia de estas unidades al alejarnos del cráter, hasta convertirse en un nivel milimétrico en áreas distales (ej. Túnez).

microtectitas debido a la influencia de los procesos gravitacionales en la sedimentación local, tal y como se ilustra en las Figs. 6 y 8 (Soria *et al.*, 2001; Schulte, *et al.*, 2010a).

Pero, más allá de los datos de campo, planteamos al lector que reflexione sobre las probabilidades que hay de que nuestro planeta fuera asolado por el impacto de tres grandes asteroides (>10 km de diámetro), cuya probabilidad de colisionar con la Tierra es de 1 cada cien millones de años (Chapman y Morrison, 1994), y además lo hicieran en tan solo 400.000 años y en lugares tan cercanos como para dejar campos de tectitas y otras evidencias de impacto en el Golfo de México. Baste con decir que de los 182 cráteres de impacto reconocidos hasta la fecha en la base de datos de la NASA, tan sólo cinco poseen más de 100 km de diámetro, siendo el cráter de Chicxulub (170 Km) el de mayor tamaño de todo el Fanerozoico (cuya duración es de unos 542 millones de años).

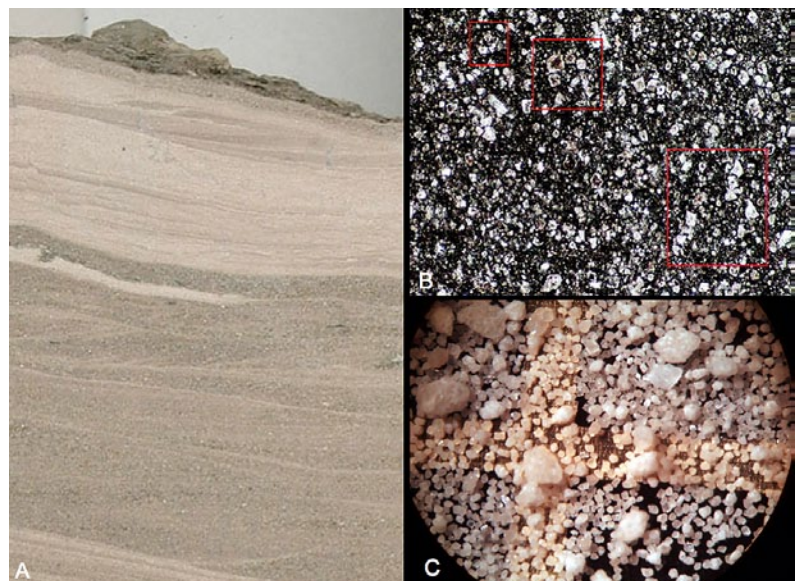
¿SE TAMBALEA LA EDAD DE CHICXULUB? EL SONDEO YAXCOPOIL-1

Para evaluar el papel del impacto de Chicxulub en la crisis del límite K/T, el *International Continental Scientific Drilling Program* y la Universidad Nacional Autónoma de México perforaron en el 2001 el pozo Yaxcopoil-1, localizado en el cuadrante sureste

del cráter. Tras un proceso de selección de propuestas, se repartieron muestras a más de 20 equipos internacionales que publicaron sus resultados en dos números monográficos de la revista *Meteoritics and Planetary Science*.

En su artículo, Pardo *et al.* (2011) subrayan la importancia del hallazgo en Yaxcopoil-1 de una capa de caliza finamente laminada con abundantes foraminíferos planctónicos de los últimos 300.000 años del Cretácico (reproducidos en la Fig. 9b). Esta capa estaría situada entre las últi-

Fig. 9. A. Fotografía del testigo de sondeo correspondiente a los primeros sedimentos situados sobre la suevita de Yaxcopoil-1; B. Imagen en lámina delgada de la muestra 794.55 mostrando presuntas secciones de foraminíferos planctónicos (Keller *et al.*, 2004b); C. Residuo de la misma muestra, donde puede observarse que está compuesto exclusivamente por granos de dolomita amalgamados. Significativamente, no se ha identificado ningún foraminífero en esta muestra, señalada por Keller *et al.* (2004a,b) como la de mayor biodiversidad.



mas suevitas (brechas de impacto con material fundido) y las primeras rocas del Paleógeno, y sería una importante prueba que confirmaría que el impacto de Chicxulub precede al límite K/T (Keller *et al.*, 2004a).

Exceptuando este último grupo, el resto de los equipos de investigación que hemos estudiado este intervalo desde el punto de vista micropaleontológico y sedimentológico (Arz *et al.*, 2004; Goto *et al.*, 2004; Smit *et al.*, 2004) coincidimos en interpretarlo no como calizas, sino como arenas calcáreas dolomitizadas (Fig. 9a), transportadas por las masas de agua que invadieron el cráter recién formado. Por definición, cualquier microfósil acumulado en una arenisca ha de considerarse como reelaborado en el espacio y en el tiempo, pero además los supuestos y abundantes ejemplares de foraminíferos identificados en Keller *et al.* (2004a) resultaron ser pseudofósiles, y en concreto, agrupamientos de secciones de cristales de dolomita que en lámina delgada se asemejan groseramente a secciones de foraminíferos (Arz *et al.*, 2004; Smit *et al.*, 2004). Cuando las muestras se disgregan y se estudian con un estereomicroscopio binocular (Fig. 9c), es fácil comprobar que los residuos no están compuestos por asociaciones diversificadas y autóctonas de foraminíferos, sino por cristales de dolomita amalgamados, por lo que no pueden utilizarse para datar la extinción en relación con la edad del impacto.

LA IMPORTANCIA DE LAS EDADES ABSOLUTAS

En 2004, la Comisión Internacional de Estratigrafía asignó una edad de 65.5 ± 0.3 millones de años (Ma) al límite K/T. Utilizando una nueva ca-

libración de los métodos isotópicos, Kuiper *et al.* (2008) recalcularon de forma más precisa esta edad en 65.95 Ma. Este dato numérico entra cómodamente en el rango de error de las edades corregidas a partir de análisis de la relación $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en microtectitas de Beloc, en Haití (65.84 ± 0.16 y 65.98 ± 0.10 Ma) y en el fundido de la brecha de impacto del cráter de Chicxulub (65.81 ± 0.14). Considerando el rango de variación de los ciclos orbitales, los últimos análisis proporcionan dos posibilidades de edad más probable para el límite K/T: 65.59 ± 0.07 y 66 ± 0.07 Ma (Husson *et al.*, 2011). Estas edades, sin embargo, aún no han sido adoptadas por la citada Comisión.

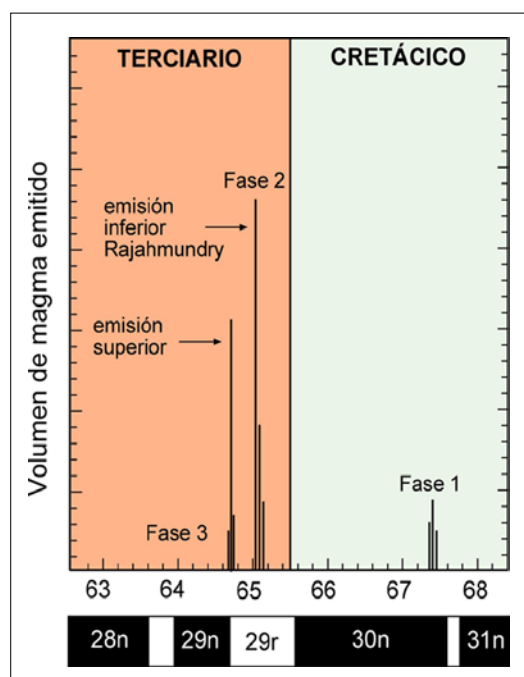
Las dataciones más recientes del vulcanismo del Decán (Chenet *et al.*, 2007; Widdowson y Kelley, 2008) muestran un panorama complejo de erupciones: un primer episodio de poca importancia entre hace 68 y 67 Ma (66.7 ± 0.5 Ma para los segundos autores) al que sigue un periodo de reposo de 2 a 3 millones de años, previo a la emisión rápida de cerca del 80% del volumen total de basaltos; y una tercera fase menor ya iniciado el Paleógeno.

La edad de la fase principal ha sido determinada por Chenet *et al.* (2007) en 64.7 ± 0.6 Ma (63.7 ± 0.3 Ma para Widdowson y Kelley, 2008). Ya hemos señalado que, aunque podría ser hasta medio millón de años más antigua, la edad numérica oficial del límite K/T es 65.5 ± 0.3 Ma. Esto implica que los únicos basaltos de la meseta del Decán lo bastante voluminosos para haber podido causar una gran crisis ambiental se emitieron en el Paleógeno, entre 0,8 y 1,8 millones de años después del impacto del límite K/T. Dicho de otro modo, esta emisión estaría desconectada del evento de extinción, que habría tenido lugar durante el citado periodo de reposo previo a la fase volcánica masiva.

El fracaso cronológico de la hipótesis volcánica está ilustrado en la Fig. 10, basada en la Figura 16 de Pardo *et al.* (2011). En ella, la fase principal del vulcanismo aparece datada (gráficamente) entre 65,2 y 65,0 Ma. Es interesante comparar estas cifras con el dato radiométrico más favorable a esta hipótesis ($64,7 \pm 0,6$). Los citados autores han elegido (contra el uso científico normal de los márgenes de error de un dato) el rango del intervalo de error que encaja mejor con su hipótesis, pero sin éxito: el vulcanismo masivo del Decán insiste en ser paleógeno y no cretácico. En relación a este tema, en el trabajo de Pardo *et al.* (2011) hay una incongruencia que nos parece significativa. En varias ocasiones estos autores mencionan en el texto una edad de 65,5 Ma para el límite K/T; sin embargo, en su Figura 16, que resulta decisiva para establecer una relación de causa-efecto entre el vulcanismo del Decán y el evento de extinción, cambian caprichosamente ese dato a 65,0 Ma. Esta incongruencia es decisiva: con la edad real la causa sería posterior al efecto.

Fig. 10. Fases volcánicas del Decán. El gráfico reproduce la Figura 16 de Pardo *et al.* (2011), situando la edad oficial del límite K/T correctamente, medio millón de años antes de la situada en aquel trabajo.

En la parte inferior de la figura se incluyen una escala con edades absolutas en millones de años y los cronos de polaridad. Se trata de intervalos temporales en los que el campo magnético terrestre permaneció constante o predominantemente con una misma polaridad, bien sea normal "n" o inversa "r".



¿ESTABA LA BIOSFERA EN DECADENCIA AL FINAL DEL CRETÁCICO?

La colisión de Chicxulub duraría unos instantes, y podría provocar un evento de extinción catastrófico y geológicamente instantáneo que tendría lugar en tan sólo meses o unos pocos años. Por el contrario, los basaltos del Decán, emitidos a lo largo de varios millones de años y en varias fases de actividad y calma, serían causantes de una extinción dilatada en el tiempo. ¿Qué dice sobre esto el registro fósil?

En este tema es fundamental considerar las condiciones de fosilización de los diversos grupos de organismos. La fosilización de los animales terrestres es un proceso mucho menos habitual que la conservación de los seres marinos; y, dentro de éstos, tienen más probabilidades de fosilizar los invertebrados (ammonites, belemnites, bivalvos...) que los vertebrados, normalmente tanto mejor cuanto menor es su tamaño. Los grupos que tienen un mejor y más abundante registro fósil son los microfósiles y, por tanto, son los que deben utilizarse para definir el ritmo de la extinción. Los dinosaurios seguirán siendo los protagonistas de la extinción fincretácica, pero su registro fósil, bastante incompleto y discontinuo, hace que no sean los indicadores idóneos para caracterizarla en detalle. Un excelente ejemplo de ello es que se calcula que, de todos los géneros de dinosaurios que existieron, el ~70% aún no ha sido descubierto (Wang y Dodson, 2006). Construir hipótesis de detalle sobre la extinción tomando como base a un grupo tan desconocido y con un registro tan escaso e incompleto es científicamente insostenible.

El análisis de las asociaciones de microfósiles proporciona pruebas claras de que la extinción del límite K/T fue brusca. Los más afectados fueron los microorganismos de conchas carbonatadas que vivían flotando en la superficie de mares y océanos (Alegret *et al.*, 2012). Así, en el caso de los foraminíferos planctónicos las extinciones se concentran en un nivel que puede señalarse en el campo con una cuchilla de afeitar (ver Figs. 4 y 11). En este nivel, que justamente contiene las anomalías de impacto, se ha identificado la extinción de más del 70 % de especies de estos foraminíferos (Molina *et al.*, 2006). Este porcentaje podría ser incluso superior si se considera que muchos ejemplares de especies de foraminíferos planctónicos cretácicas identificados en la base del Paleógeno son reelaborados, es decir, que vivieron en el Cretácico terminal pero sus conchas han sido removilizadas a los sedimentos de la base del Cenozoico (ver Fig. 11). La brusquedad de la extinción no sólo se observa en este grupo, sino también en los nanofósiles calcáreos (algas unicelulares) y en grupos de invertebrados como los ammonites y los rudistas, cuyos modelos de extinción son compatibles con el impacto de Chicxulub (Marshall y Ward, 1996; Steuber *et al.*, 2002; Schulte *et al.*, 2010a).

Un segundo aspecto se refiere al estado de salud de la biosfera a finales del Cretácico. Si se confirmara la existencia de un evento de extinción gradual antes del límite K/T, la hipótesis volcánica o la hipótesis del golpe de gracia (es decir, el asteroide de Chicxulub rematando a una biosfera enferma) ganarían fuerza; si, por el contrario, se confirma que la abundancia y diversidad de especies se mantuvieron más o menos

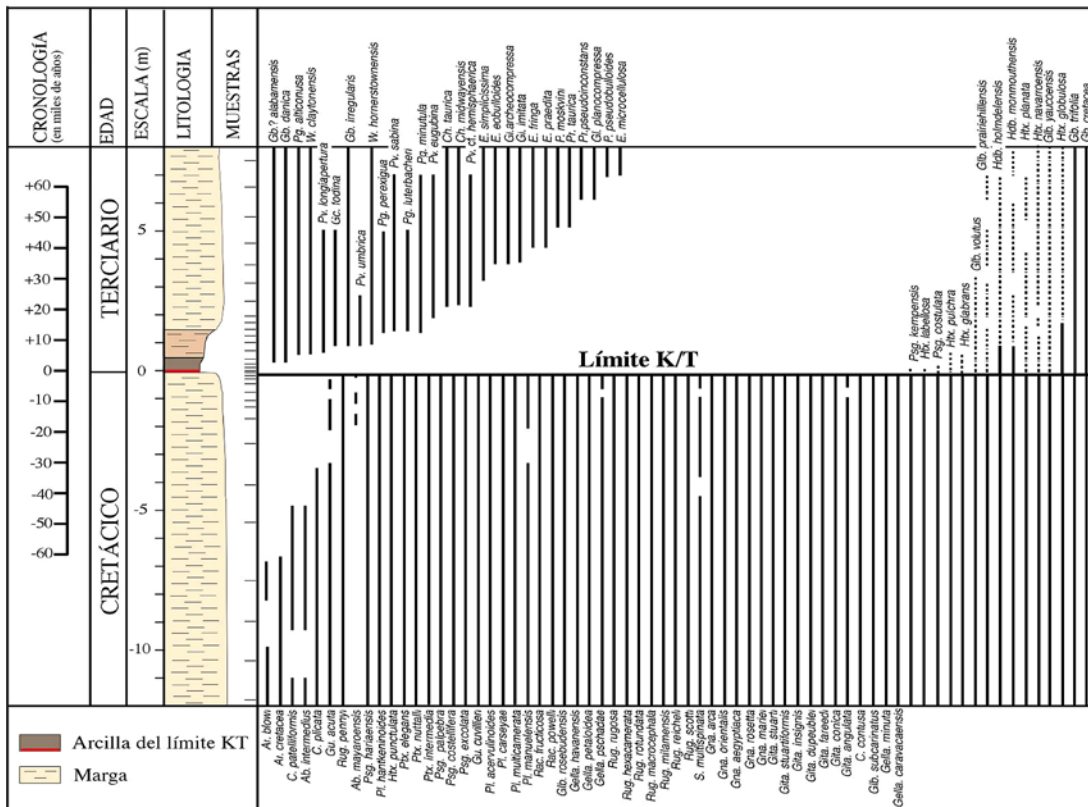


Fig. 11. Patrón de extinción de los foraminíferos planctónicos en el estratotipo del límite K/T de El Kef (Túnez). De las siete especies cretácicas que no están presentes hasta el límite K/T, tan solo dos se extinguen previamente, mientras que el resto se trata de desapariciones locales (su extinción coincide con el límite K/T en otros afloramientos). En el Paleógeno aparecen algunos ejemplares reelaborados (trazos discontinuos) y unas pocas especies supervivientes, que fueron el origen de una rápida radiación evolutiva de nuevas especies cenozoicas (ver escala a la izquierda en miles de años).

estables en los últimos millones de años del Cretácico, la hipótesis del impacto de un asteroide sería la más adecuada. El estudio de microfósiles marinos como los foraminíferos planctónicos o los nanofósiles calcáreos, que son muy sensibles a los cambios de temperatura, ha corroborado la escasa influencia climática de las emisiones del Decán: sus asociaciones permanecen estables y diversas en los últimos cientos de miles de años del Cretácico (Molina *et al.*, 1998; Arenillas *et al.*, 2000; Bown, 2005).

También se ha hablado mucho sobre la decadencia de los dinosaurios antes del límite K/T. Sin olvidar la precaución que se ha de tener con la calidad del registro fósil de este grupo, existen recopilaciones que ofrecen una visión novedosa. Por ejemplo, Fastovsky *et al.* (2004) analizaron estadísticamente la base de datos más completa que existe sobre la diversidad de restos óseos, huevos, coprolitos y huellas de dinosaurios encontrados en los cinco continentes. Dichos autores concluyen que en los últimos 18 Ma del Cretácico, lejos de descender, la diversidad de géneros de dinosaurios alcanzó un máximo justamente durante los 2 Ma previos al límite K/T, contradiciendo el declive gradual que algunos autores defienden. Wang y Dodson (2006), usando sólo los géneros bien caracterizados, hallan incluso un ligero aumento de diversidad en los dos últimos pisos del Cretácico: 209 géneros en el Campaniense y 213 en el Maastrichtiense.

No podemos dejar de mencionar en este apartado el reciente trabajo de Schulte *et al.* (2012), donde se presenta un detallado análisis sedimentológico de una unidad clástica enriquecida en microtectitas que aflora en el noreste mexicano (Cuenca de La Popa), con evidencias de haber sido depositada en un mar somero por la acción de terremotos y tsunamis relacionados con el impacto de Chicxulub. Hasta aquí nada nuevo, de no ser porque contiene huesos y dientes de dinosaurios y mosasaurios, lo que demuestra que los dinosaurios habitaban esa zona cuando el impacto asteroidal tuvo lugar.

PERO, ¿QUEDABAN DINOSAURIOS EN EL PALEÓGENO?

Desde casi el principio del debate sobre la causa de esta extinción masiva han aparecido alegatos a favor de la persistencia de los dinosaurios en el Paleoceno (primera época del Paleógeno). Muchos hallazgos fueron calificados, en un segundo examen, como ejemplares cretácicos reelaborados en sedimentos del Paleoceno. Canudo (2010) cita ejemplos de restos de dinosaurios paleocenos en Norteamérica y China, pero lo cierto es que también se ha puesto en entredicho que pertenecieran realmente a supervivientes al Cretácico (Buck *et al.*, 2004; Lucas *et al.*, 2009). A raíz de la datación radiométrica con el método U-Pb de algunos huesos de dinosaurio como más recientes que 65,5 Ma (Fassett *et al.*, 2011), un año después continúa la

polémica sobre el control estricto de este procedimiento de datación (Ludwig, 2012; Renne y Goodwin, 2012; Koenig *et al.*, 2012). Sea cual sea el final de este debate, los autores opinamos que, aunque se confirmara en un futuro que algunos ejemplares de dinosaurios no avianos sobrevivieron unos meses o años al impacto, éste es un asunto totalmente irrelevante respecto al tema de las causas de la extinción del K/T.

Para interpretar convenientemente un evento de extinción masiva, además de analizar los patrones de extinción de los diferentes grupos paleontológicos, es necesario tener en cuenta los patrones de evolución de nuevos grupos. Es conocido que a la extinción de los dinosaurios no avianos le siguió la radiación evolutiva de los mamíferos supervivientes, aunque desconocemos muchos detalles ya que la calidad del registro de los mamíferos en el inicio del Paleógeno es tan deficiente como la de los dinosaurios en el Cretácico. Por ello, no es de extrañar que en este caso también se hayan utilizado los foraminíferos planctónicos y los nanofósiles calcáreos para averiguar si los patrones de evolución son compatibles con la hipótesis del impacto (evento súbito) o con la hipótesis volcánica (evento más gradual). El resultado es que tras la extinción en masa, se produjo una importante radiación evolutiva de foraminíferos planctónicos en pocos miles de años (ver Fig. 11), al igual que sucedió con los nanofósiles calcáreos (Bown, 2005). Significativamente, el inicio de estas radiaciones se ha identificado siempre después del límite K/T y nunca antes, por lo que es más compatible con la hipótesis de una extinción en masa catastrófica provocada por el impacto de un asteroide en el último día del Cretácico. Si hubiese existido un evento de extinción masiva gradual propiciado por el vulcanismo del Decán, los relevos ecológicos y la evolución de nuevas especies y géneros de estos grupos hubieran comenzado antes del límite K/T, coincidiendo con el primer pulso del vulcanismo, algo que no se observa en el registro fósil.

EPÍLOGO: LAS ESCUELAS Y LA CONSTRUCCIÓN DE HIPÓTESIS EN LAS CIENCIAS DE LA TIERRA

Pardo *et al.* (2011) comentan que estamos ante una guerra de escuelas: su frase (p. 154): “...el eterno debate entre el catastrofismo de Georges Cuvier y el gradualismo de James Hutton...” lo deja bien claro, al mismo tiempo que nos devuelve a la prehistoria de la Geología. Sin embargo, este debate es cualquier cosa menos eterno; hoy está confinado a los estudios sobre el origen de nuestra ciencia, y nosotros creemos que ya es hora de dejarlo allí. El importante papel de los acontecimientos de alta energía en la modulación de los ambientes terrestres se reconoció en la segunda mitad del pasado siglo. Al definir el “*catastrofismo actualista*”, Hsü (1989) dio carta de naturaleza a este tratado de paz entre las

dos facciones históricas. Y en todo caso, ¿no es también una catástrofe una serie de erupciones volcánicas que, en periodos geológicamente muy cortos, cubren de rocas volcánicas extensiones de cientos de miles de kilómetros cuadrados?

Un segundo aspecto interesante de este debate es el papel de los disidentes de una teoría dominante. La historia de Alfred Wegener y de la revolución científica que el berlinés desencadenó pero no pudo ver realizada (ver p. ej. Wood, 1985) nos previenen sobre los peligros del pensamiento único: una opinión, incluso personal, puede tener razón contra la mayoría. Pero estas opiniones minoritarias deben estar bien fundadas: Wegener hubiese arrasado si hubiese dispuesto de tomografía sísmica, pero, aunque no dispusiese de datos decisivos, la acusación histórica contra las autoridades geológicas de su tiempo es que se negaron a considerar sus pruebas, por muy circunstanciales que éstas fuesen.

Esto no ha sucedido en el caso que nos ocupa. La hipótesis impactista es ampliamente mayoritaria, aunque en un tema tan complejo (y de tan profundas implicaciones históricas, mediáticas e incluso emocionales) como éste, es difícil que se llegue a alcanzar un consenso absoluto. Pero los ejemplos que hemos citado dejan claro que el principal grupo disidente, encabezado por la Dra. Keller desde hace treinta años, ha recibido toda la audiencia que podía desear. Se han discutido, y rebatido, sus pruebas en el campo y al microscopio, y muchos de sus análisis no han podido ser reproducidos por numerosos y experimentados investigadores. La acusación de “ostracismo científico” al que supuestamente fueron sometidos los partidarios de la hipótesis vulcanista (Pardo *et al.*, 2011, p. 158) es, además de injusta, insostenible.

Para concluir, aclararemos que no pretendemos que este apasionante tema esté zanjado: afortunadamente para los estudiosos de la historia de la Tierra, muchos detalles sobre el tránsito Mesozoico-Cenozoico siguen siendo especulativos. Canudo (2010, p. 83) está en lo cierto cuando afirma que es más fácil buscar un conjunto de causas para explicar los acontecimientos con los que concluyó el Cretácico. Los autores pensamos, sin embargo, que la Ciencia (permítanos el editor la mayúscula) no es el arte de lo fácil, sino de lo convincente. Y que, en este camino, la multiplicación de hipótesis debe ser evitada a no ser que se juzgue imprescindible (Occam, c. 1323).

Hasta el momento, teniendo en cuenta todas las pruebas aportadas, los autores no consideran que la hipótesis impactista requiera otras adicionales para explicar la catástrofe biótica que cerró uno de los periodos más fascinantes de la historia de la Tierra.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido subvencionada por el Departamento de Educación y Ciencia de la Comunidad Autónoma de Aragón (Grupo Eo5), y por los

proyectos CGL2007-63724/BTE, CGL2011-22912 y CGL2011-23077 del Ministerio de Educación y Ciencia de España, los tres últimos cofinanciados por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional.

BIBLIOGRAFÍA

Alegret, L., Arenillas, I., Arz, J. A., Díaz, C., Grajales, J. M., Meléndez, A., Molina, E., Rojas, R. y Soria, A. R. (2005). Cretaceous/Paleogene boundary clastic complex at Loma Capiro (Central Cuba): new evidence for their relationship with the Chicxulub impact. *Geology*, 33, 721-724.

Alegret, L., Thomas, E. y Lohmann, K. C. (2012). End-Cretaceous marine mass extinction not caused by productivity collapse. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 109, 728-732.

Alvarez, W. (1998). *Tyrannosaurus rex y el cráter de la muerte*. Editorial Drakontos, Barcelona.

Alvarez, W., Alvarez, L., Asaro, F. y Michel, H. (1980). Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction. *Science*, 208, 1095-1108.

Archibald, J. D., Clemens, W. A., Padian, K., Rowe, T. y otros 25 autores (2010). Cretaceous extinctions: Multiple causes. *Science*, 328, 973.

Arenillas, I., Arz, J. A., Molina, E. y Dupuis, C. (2000). 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*, 46, 31-49.

Arenillas, Arz, J. A., Grajales, J. M., Murillo, G., Álvarez, W., Camargo, A., Molina, E. y Rosales, C. (2006). Chicxulub impact event is Cretaceous/Paleogene boundary in age: new micropaleontological evidence. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 249, 241-257.

Arz, J. A., Alegret, L. y Arenillas, I. (2004). Foraminiferal biostratigraphy and paleoenvironmental reconstruction at Yaxcopoil-1 drill hole (Chicxulub crater, Yucatan Peninsula). *Met. Planet. Sci.*, 39, 1099-1111.

Bohor, B. F. (1996). A sediment gravity flow hypothesis for siliciclastic units at the K/T boundary, northeastern Mexico. *Geol. Soc. Am. Spec. Paper*, 307, 183-195.

Bown, P. (2005). Selective calcareous nannoplankton survivorship at the Cretaceous-Tertiary boundary. *Geology*, 33, 653-656.

Buck, B. J., Hanson, A. D., Hengst, R. A. y Shu-sheng, H. (2004). “Tertiary Dinosaurs” in the Nanxiong basin southern China, are reworked from the Cretaceous. *J. Geol.*, 112, 111-118.

Canudo, J. I. (2010). Qué nos enseña la extinción de los dinosaurios sobre historia de la vida y de la Tierra. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 18, 74-84.

Chapman, C. R. y Morrison, D. (1994). Impact on the Earth by asteroids and comets: assessing the hazards. *Nature*, 367, 33-40.

Chenet, A.-L., Quidelleur, X., Fluteau, F. y Courtillot, V. (2007). $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ dating of the main Deccan Large Igneous Province: Further evidence of KTB age and short duration. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 263, 1-15.

Courtillot, V. y Fluteau, F. (2010). Cretaceous extinctions: The volcanic hypothesis. *Science*, 328, 973-974.

Fassett, J. E., Heaman, L. M. y Simonetti, A. (2011). Direct U-Pb dating of Cretaceous and Paleocene dinosaur bones, San Juan Basin, New Mexico. *Geology*, 39, 159-162.

Fastovsky, D. E., Huang, Y., Hsu, J., Martin-McNaughton, J., Sheehan, P. M. y Weishampel, D. B. (2004). Shape of Mesozoic dinosaur richness. *Geology*, 32, 877-880.

- Goto, K., Tada, R., Tajika, E., Bralower, T. J., Hasegawa, T. y Matsui, T. (2004). Evidence for ocean water invasion into the Chicxulub crater at the Cretaceous/Tertiary boundary. *Met. Planet. Sci.*, 39, 1233-1247.
- Grajales, J. M., Cedillo, E., Rosales C., Morán, D. J., Alvarez, W., Claeys, P., Ruíz, J., García, J., Padilla, P. y Sánchez J. (2000). Chicxulub impact: The origin of reservoir and seal facies in the southeastern Mexico oil fields. *Geology*, 28, 307-310.
- Hildebrand, A. R., Penfield, G. T., Kring, D. A., Pilkington M., Camargo, A. Jacobsen, S. B. y Boynton, W. V. (1991). Chicxulub crater: A possible Cretaceous/Tertiary boundary impact crater on the Yucatan peninsula, Mexico. *Geology*, 19, 867-871.
- Husson, D., Galbrum, B., Laskar, J., Hinnov, L. A., Thibault, N., Gardin, S. y Locklair, R. E. (2011). Astronomical calibration of the Maastrichtian (Late Cretaceous). *Earth Planet. Sci. Lett.*, 305, 328-340.
- Hsü, K. J. (1989). Catastrophic extinctions and the inevitability of the improbable. *J. Geol. Soc. London*, 146, 749-754.
- Keller, G. (1989). Extended period of extinctions across the Cretaceous/Tertiary boundary in planktonic foraminifera of continental-shelf sections: Implications for impact and volcanism theories. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 101, 1408-1419.
- Keller, G., Li, L. y MacLeod, 1995. The Cretaceous/Tertiary boundary stratotype sections at El Kef, Tunisia: How catastrophic was the mass extinction?. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 119, 221-254.
- Keller, G., Stinnesbeck, W., Adatte, T., y Stüben, D. (2003). Multiple impacts across the Cretaceous-Tertiary boundary. *Earth-Science Reviews*, 62, 327-363.
- Keller, G., Adatte, T., Stinnesbeck, W., Stüben, D., Berner, Z., Kramar, U. y Harting, M. (2004a). Chicxulub impact predates the K-T boundary mass extinction. *PNAS*, 101, 3753-3758.
- Keller, G., Adatte, T., Stinnesbeck, W., Stüben, D., Berner, Z., Kramar, U. y Harting, M. (2004b). More evidence that the Chicxulub impact predates the K/T mass extinction. *Met. Planet. Sci.*, 39, 1127-1144. Kerr, R. A. (1994). Searching for the tracks of impact in Mexican sand. *Science*, 263, 1372.
- Kidder, D. L. y Worsley, T. R. (2004). Causes and consequences of extreme Permo-Triassic warming to globally equable climate and relation to the Permian-Triassic extinction and recovery. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 203, 207-237.
- Koenig, A. E., Lucas, S. G., Neymark L. A., Heckert, A. B., Sullivan, R. M., Jasinsky S. E. y Fowler, D. W. (2012). Direct U-Pb dating of Cretaceous and Paleocene dinosaur bones, San Juan Basin, New Mexico: Comment. *Geology Forum*, Abril 2012, e262.
- Kring, D. A. (2007). The Chicxulub impact event and its environmental consequences at the Cretaceous/Tertiary boundary. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 255, 4-21.
- Kuiper, K. F., Deino, A., Hilgen, F. J., Krijgsman, W., Renne, P. R. y Wijbrans, J. R. (2008). Synchronizing rock clocks of Earth history. *Science*, 320, 500-505.
- Lucas, S. G., Sullivan, R. M., Cather, S. M., Jasinski, S. E., Fowler, D. W., Heckert, A. B., Spielmann, J. A. y Hunt, A. P. (2009). No definitive evidence of Paleocene Dinosaurs in the San Juan Basin. *Paleontologia electronica*, 12, Issue2; 8A:10p; http://palaeo-electronica.org/2009_2/199/index.html [Acceso: 28/04/2012].
- Ludwig, K. R. (2012). Direct U-Pb dating of Cretaceous and Paleocene dinosaur bones, San Juan Basin, New Mexico: Comment. *Geology Forum*, Abril 2012, e258.
- Marshall, Ch. R. y Ward, P. D. (1996). Sudden and gradual molluscan extinction in the latest Cretaceous of Western Europa. *Science*, 274, 1360-1363.
- Molina, E., Arenillas, I. y Arz, J.A. (1998). Mass extinction in planktic foraminifera at the Cretaceous/Tertiary boundary in subtropical and temperate latitudes. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 169, 351-363.
- Molina, E., Alegret, L., Arenillas, I., Arz, J. A. y 6 autores más (2006). The Global Boundary Stratotype Section and Point for the base of the Danian Stage (Paleocene, Paleogene, "Tertiary", Cenozoic) at El Kef, Tunisia: Original definition and revision. *Episodes*, 29, 263-273.
- Occam, W. (c. 1323). *Summa Logicae*. París, 1448.
- Pardo, A., Keller, G. y Adatte, T. (2011). De México a la India: en busca de las causas del ocaso de los dinosaurios. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 19, 149-161.
- Raup, D. M. y Sepkoski, J. J. (1982). Mass extinctions in the marine fossil record. *Science*, 215, 1501-1503.
- Renne, P. R. y Goodwin, M. B. (2012). Direct U-Pb dating of Cretaceous and Paleocene dinosaur bones, San Juan Basin, New Mexico: Comment. *Geology Forum*, Abril 2012, e259.
- Schulte, P., Alegret, L., Arenillas, I., Arz, J. A. y 37 autores más (2010a). The Chicxulub asteroid impact and mass extinction at the Cretaceous-Paleogene boundary. *Science*, 327, 1214-1218.
- Schulte, P., Alegret, L., Arenillas, I., Arz, J. A. y 36 autores más (2010b). Response – Cretaceous extinctions. *Science*, 328, 975-976.
- Schulte, P. Smit, J., Deustch, A., Salge, T., Friese, A. y Beichel, K. (2012). Tsunami backwash deposits with Chicxulub impact ejecta and dinosaur remains from the Cretaceous/Paleogene boundary in the La Popa Basin, México. *Sedimentology*, 59, 737-765.
- Smit J. (1999). The global stratigraphy of the Cretaceous-Tertiary boundary impact ejecta. *Ann. Rev. Earth & Plan. Sci.*, 27, 75-113.
- Smit, J., Roep, T. B., Alvarez, W., Montanari, A., Claeys, P., Grajales-Nishimura, J. M. y Bermudez, J. (1996). Coarse-grained, clastic sandstone complex at the K/T boundary around the Gulf of Mexico: Deposition by tsunami waves induced by the Chicxulub impact?. *Geol. Soc. Am. Spec. Paper* 307, 151-182.
- Smit, J., van der Gaast, S. y Lustenhouwer, W. (2004). Is the transition impact to post-impact rock complete? Some remarks based on XFR scanning, electron microprobe, and thin section analyses of the Yaxcopoil-1 core in the Chicxulub crater. *Met. Planet. Sci.*, 39, 1113-1126.
- Soria, A. R., Liesa, C. L., Mata, M. P., Arz, J. A., Alegret, L., Arenillas, I. y Meléndez, A. (2001). Slumping and a sandbar deposit at the K/T boundary in the El Tecolote sector (northeastern Mexico): An impact-induced sediment gravity flow. *Geology*, 29, 231-234.
- Steuber, T., Mitchell, S. F., Buhl, D., Gunter, G. y Kasper, H. U. (2002). Catastrophic extinction of Caribbean rudist bivalves at the Cretaceous-Tertiary boundary. *Geology*, 30, 999-1002.
- Wang, S. C. y Dodson, P. (2006). Estimating the diversity of dinosaurs. *PNAS*, 103, 13601-13605.
- Widdowson, M. y Kelley, S. (2008). Dating the Deccan: Determining the timing and duration of the Indian KTB-spanning CFB eruptions. *AGU Fall Meeting V23H-04W*.
- Wood, R. M. (1985). *The dark side of the Earth*. Allen & Unwin, Londres, 246 pp. ■

Fecha de recepción del original: 11/05/2012
 Fecha de aceptación definitiva: 28/09/2012