

De México a India: en busca de las causas del ocaso de los dinosaurios

From Mexico to India: In Search of the causes of the demise of the dinosaurs

ALFONSO PARDO¹, GERTA KELLER² Y THIERRY ADATTE³

¹ Escuela Politécnica Superior de Huesca, Universidad de Zaragoza, Carretera de Cuarte, s/h, 22071- Huesca, SPAIN, (pardo@unizar.es).

² Department of Geosciences, Princeton University, Princeton, N.J. 08540, USA, (gkeller@princeton.edu)

³ Institut de Géologie et Paléontologie, Université de Lausanne, Anthropôle, 1015 Lausanne, SWITZERLAND, (Thierry.Adatte@unil.ch)

Resumen La extinción en masa del Cretácico Terciario (K/T) que hace 65,5 millones de años acabó con los dinosaurios es la última de cinco grandes crisis biológicas que han jalonado la historia de la vida en la Tierra. Cada una de ellas y la posterior evolución de nuevas formas de vida modificaron profundamente el planeta hasta la actual expansión de la especie humana por todo el planeta.

Tras proponer que la extinción del K/T pudo deberse a un impacto meteorítico, se inició la búsqueda del cráter del impacto. Su descubrimiento en Yucatán hizo que los científicos dirigieran su atención a México. Pero los hallazgos pusieron en entredicho que el impacto coincidiese en el tiempo con el K/T o que causase extinciones.

En cuatro de las cinco grandes extinciones masivas han ocurrido importantes episodios volcánicos, incluyendo la del K/T. Por ello, conforme se hacía evidente que el impacto de Chicxulub no había causado el ocaso de los dinosaurios, algunos científicos han prestado atención en el volcanismo masivo del Decán en la India como causa de la extinción en masa del K/T. En la actualidad, hay una importante base de datos que sugiere que la última gran extinción biológica pudo estar causada por la propia dinámica geológica de nuestro planeta.

Palabras clave: límite K/T, extinción en masa, impacto extraterrestre, volcanismo, Yucatán, México, Decán, India.

Abstract *The Cretaceous-Tertiary (K/T) mass extinction that wiped out dinosaurs 65.5 million years ago is the last of five major biological crises that occurred in the history of life on Earth. Each of them and the subsequent evolution of new life forms profoundly altered the planet up to the current expansion of the human species throughout the planet.*

After proposing that the extinction of the K/T could be due to a bolide impact, the search of its impact crater began. Its discovery in Yucatan led scientists to direct their attention to Mexico in search of evidence. But what they found questioned that the impact would coincide in time with the K/T or caused any extinction.

In four of the five major mass extinctions, major volcanic episodes have taken place, including the K/T mass extinction. Thus, as it was becoming evident that the Chicxulub impact did not cause the demise of the dinosaurs, some scientists have investigated the massive Deccan volcanism in India as a possible cause of the K/T mass extinction. Currently, there is a large database that suggests that the last great biological extinction could have been caused by our planet's own geological dynamics.

Keywords: *K/T boundary, mass extinction, extraterrestrial impact, volcanism, Yucatan, Mexico, Deccan, India.*

EXTINCCIONES: UNA NUEVA OPORTUNIDAD EVOLUTIVA

Algo dramático sucedió hace 65,5 millones de años, a finales del Maastrichtiense, la última edad

del periodo Cretácico. La vida atravesó su última gran crisis. Muchos grupos de organismos se extinguieron, entre los vertebrados dinosaurios, pterosaurios y plesiosaurios, o los ammonites y belemnites entre

los invertebrados. Dos tercios de las 65 especies de foraminíferos planctónicos se extinguieron rápidamente al final del Maastrichtense en un nivel en los estratos que marca esta extinción en todo el mundo. Sin embargo, sus causas siguen debatiéndose con intensidad.

¿Son las extinciones necesarias para el progreso evolutivo? Solemos pensar que las extinciones sólo causan muerte y destrucción, o como mínimo una gran pérdida de diversidad biológica. Pero las extinciones masivas suponen un impulso fundamental para la evolución. Los organismos supervivientes prosperan y se diversifican, a veces hasta convertirse en los dominantes. Las extinciones dejan vacantes *nichos ecológicos*, lo que supone una oportunidad para que otras especies puedan sobrevivir y prosperar. Así, la gran extinción del Pérmico propició el reinado de los dinosaurios, mientras que su extinción al final del Cretácico permitió a los mamíferos evolucionar y diversificarse. Pero este proceso no es sencillo.

Tras una extinción masiva las primeras especies que sobreviven y evolucionan son pequeñas y generalistas, capaces de sobrevivir en un medio hostil y fluctuante. Conforme el entorno mejora, los candidatos a los nichos vacíos inician una dura competencia entre sí, seleccionando aquellas especies que mejor y más rápidamente se ajustan a las condiciones ambientales y funcionales de cada nicho, desplazando a las especies generalistas antecesoras. Este mecanismo de diversificación y adaptación evolutiva impulsa la transformación del ecosistema en una nueva dirección biológica (Keller y Pardo, 2004, Tantawy *et al.*, 2009).

La extinción no es sino el primer paso de un proceso mediante el cual la vida se adecúa una y otra vez a un planeta en permanente transformación. Si la vida no fuese capaz de adaptarse a las fluctuantes condiciones ambientales de la Tierra, nuestro planeta no sería sino otra descomunal roca yerna orbitando alrededor del Sol, como lo son Mercurio, Venus o Marte.

Fig. 1. *Crocodylus niloticus*, un arcosaurio actual (Fotografía: Alfonso Pardo).



LAS GRANDES EXTINCIONES BIOLÓGICAS

En 1982 los investigadores Jack Sepkoski y David M. Raup identificaron cinco grandes extinciones ocurridas al final del Ordovícico, Devónico, Pérmico, Triásico y Cretácico, durante el Fanerozóico (*cf.*, MacLeod, 2003; Keller, 2005).

La primera de las cinco grandes extinciones tuvo lugar en la transición del Ordovícico al Silúrico, hace 440-450 millones de años, en dos fases. Su causa probable fue un período glaciario. La primera ocurrió al quedar el agua atrapada en los casquetes glaciares. El descenso del nivel del mar redujo los hábitats marinos más poblados causando las extinciones. Un millón de años más tarde el clima se caldeó, y la fusión de los hielos elevó el nivel del mar provocando nuevas extinciones debido a la anoxia –falta de oxígeno– en los fondos marinos. En total se perdió el 27% de familias y el 57% de géneros, pero el resultado evolutivo fue que en el Silúrico en los océanos los peces se diversificaron y los corales empezaron a formar arrecifes, y las plantas colonizaron la tierra firme.

Al final del Devónico hace 360 millones de años se produjo la segunda extinción masiva, en la que desapareció el 70% de especies, el 19% de familias y el 55% de géneros. La crisis duró varios millones de años en una serie de entre dos y tres pulsos de extinción. Sus causas son complejas y siguen en estudio, aunque se han propuesto cambios climáticos y fluctuaciones del nivel del mar, volcanismo y eventos de anoxia en los mares. Tras la extinción, el planeta se cubrió de bosques; insectos y anfibios gigantes dominaron los continentes debido al alto contenido de oxígeno – un entre un 25% y un 35% de la atmósfera, y aparecieron los reptiles.

Hace 251 millones de años, al final del Pérmico, tuvo lugar la mayor catástrofe biológica de todos los tiempos que marca el tránsito del Paleozoico al Mesozoico. En los océanos se extinguieron 95% de especies, 53% de familias, y 84% de géneros biológicos, disminuyó la presencia de organismos sésiles desde el 68% hasta un 50%, se produjo la extinción definitiva de trilobites, los escorpiones marinos llamados *eurypteridos* y los tiburones espinosos o *acantodios*. En tierra firme, afectó al 70% de las especies, el 57% de familias y el 83% de géneros de plantas, insectos y vertebrados, acabando con el dominio de los reptiles terápsidos –los ancestros de los mamíferos– proporcionando a los arcosaurios (Figura 1), y en especial a los dinosaurios, la oportunidad de dominar los ecosistemas terrestres. La causa más probable de esta extinción fue el cambio climático global provocado por gigantescas erupciones volcánicas en Siberia, conocidas como los *Traps Siberianos*, el aumento de la aridez en los continentes y disminución de la circulación oceánica.

Hace 205 millones de años, en el tránsito Triásico-Jurásico la menor de las cinco grandes extinciones eliminó el 20% de familias y el 55% de géne-

ros marinos, así como la mayoría de arcosaurios no dinosaurios y de terápsidos, y los últimos grandes anfibios. Ello supuso la extinción del 23% de todas las familias y el 38% de todos los géneros biológicos. Los nichos ecológicos vacantes permitieron a los dinosaurios el dominio total durante el Jurásico y Cretácico. No se conocen con detalle las causas de la extinción pero pudieron estar relacionadas con la fragmentación de Pangea y los cambios ambientales y volcanismo que provocó.

La última de las cinco grandes extinciones ocurrió en el tránsito del Cretácico al Terciario (o K/T¹) hace 65,5 millones de años, marcando el fin del Mesozoico y el inicio del Cenozoico. Terminó con todos los dinosaurios –salvo las aves– y con el 17% de otras familias y el 45% de géneros. En el océano se extinguió más del 60% de corales, y moluscos, así como dos tercios de los foraminíferos planctónicos. Sin embargo, la crisis biológica del K/T fue selectiva y, salvo para los foraminíferos, ocurrió a lo largo de cientos de miles de años. Afectó a organismos demasiado especializados para adaptarse a los rápidos cambios ambientales. Las especies generalistas sí lo hicieron y sobrevivieron (Keller, 2008a; Pardo y Keller, 2008).

Las aves, únicos descendientes de los dinosaurios, sobrevivieron la crisis del K/T y poblaron los cielos; mientras que los mamíferos, del tamaño de musarañas y de hábitos nocturnos, se diversificaron y han llegado a dominar los ecosistemas terrestres, dando lugar al hombre.

EN BUSCA DE LAS CAUSAS DE LA EXTINCIÓN DEL K/T

Las grandes extinciones han despertado un enorme interés en los científicos y el ciudadano medio al tratar de entender sus causas con la esperanza de prevenir las próximas extinciones que nos aguardan en el futuro. Pero en ocasiones las hipótesis y las evidencias colisionan entre sí provocando importantes debates científicos.

La extinción del K/T es una de las más controvertidas tanto entre los científicos como para los ciudadanos. En parte porque entre sus víctimas están los dinosaurios, las criaturas más espectaculares que han poblado mares y continentes. Pero, sobre todo, porque fue la primera en la que se propuso que la causa de la extinción proviniese del espacio exterior y no del propio planeta.

1 La K es la notación que emplean los geólogos para referirse al Cretácico y proviene del alemán *Kreidezeit* –Cretácico– donde *Kreide* –creta– es una roca muy común en las formaciones sedimentarias de este periodo (la C se reserva para el Carbonífero), y la T hace referencia a la era Terciaria. En ocasiones se denomina también como K/P, de Cretácico/Paleógeno, por ser el Paleógeno el primer periodo de la era Terciaria.

Los fósiles de dinosaurio son conocidos desde la Antigüedad. Durante siglos se pensó que eran restos de criaturas gigantes que habían perecido en el *diluvio universal*. En el siglo XIX comenzó el estudio científico de los dinosaurios y con él pronto vendrían las diversas hipótesis que pretendían explicar su repentina extinción (cf., Canudo, 2010). Entre ellas, además de las catástrofes bíblicas estaban las que aludían a pandemias, malformaciones generalizadas, cambios en la vegetación e intoxicaciones masivas por mohos, problemas con la dureza de las cáscaras de sus huevos, o de exceso de depredadores de huevos de dinosaurio, deshidrataciones y diarreas fatales, o sobrecalentamiento corporal que impedía a las hembras ovular.

Otras hipótesis científicamente contrastables han propuesto cambios ambientales drásticos – desde sequías a glaciaciones–, fluctuaciones del nivel del mar, procesos de volcanismo masivo que lanzaron enormes cantidades de gases de efecto invernadero a la atmósfera con cenizas, generando lluvia ácida y enfriando globalmente el planeta.

MIRANDO AL ESPACIO EXTERIOR

En 1953 Allan O. Kelly y Frank Datchille publicaron *Target: Earth-The Role of Large Meteors in Earth Science* y, en 1956, el paleontólogo del *Oregon State College* M. W. De Laubenfels, escribió el artículo “*Dinosaur Extinction: One More Hypothesis*” en *Journal of Paleontology* en el que mencionaba la posibilidad de un impacto meteorítico como causa de la extinción del K/T.

Abierta la puerta del espacio exterior, varias han sido las hipótesis propuestas. Así, en 1971 Dale Russell y Wallace Tucker propusieron que la explosión de una supernova a menos de 33 años luz de la Tierra produciría suficiente radiación *gamma* para destruir la capa de ozono durante varios años. La radiación ultravioleta no filtrada produciría una enorme mortandad directa y mutaciones genéticas que podrían ser la causa de la extinción del K/T, y causar una extinción en el futuro.

En 1984, la hipótesis *Némesis* o de “*la estrella de la muerte*” fue propuesta en *Nature* por Marc Davis, Piet Hut y Richard Muller para explicar extinciones masivas con una periodicidad de unos 26 millones de años de acuerdo a cálculos de David Raup y Jack Sepkoski. Según ésta, el sol forma un sistema binario con una estrella oscura y pequeña con una órbita lejana y excéntrica. Némesis –la supuesta compañera del Sol no descubierta– produciría efectos catastróficos en la Tierra al perturbar periódicamente la Nube de Oort, y lanzando cometas en dirección a la Tierra y que serían la causa de la extinción del K/T. Nunca se han encontrado datos que apoyen esta idea.

Cuatro años antes, en un artículo publicado en *Science*, Luis Álvarez, su hijo Walter y los químicos

cos Frank Asaro y Helen Michel habían propuesto que la extinción en masa del límite entre el Cretácico y el Terciario (o límite K/T) había sido causada por el impacto de un gigantesco meteorito. Lo que diferenciaba esta hipótesis de las anteriores era que el equipo de Álvarez aportaba por vez primera observaciones y datos geológicos que podían ser contrastados, algo fundamental en todo proceso científico para conocer la validez de una hipótesis.

A diferencia de las demás extinciones masivas que han sido atribuidas a crisis climáticas y ambientales, la teoría del impacto absolvía al planeta Tierra y culpaba a una roca del espacio exterior del ocaso de los dinosaurios.

LA HIPÓTESIS IMPACTISTA: LA MUERTE QUE VINO DE LAS ESTRELLAS

Los geólogos suelen utilizar *eventos* para marcar los límites cronoestratigráficos, que sirven de frontera entre series de rocas y los periodos de tiempo geológico que representan. Un evento es un fenómeno geológico raro y episódico que queda registrado en la secuencia de rocas. La ciencia que estudia los eventos y su relación con la escala del tiempo geológico se llama *eventostratigrafía*.

En la década de 1970, Walter Álvarez descubrió en el desfiladero de Bottaccione, cerca de Gubbio, Italia, que las calizas cretácicas se interrumpen de forma abrupta con una lámina de arcilla de apenas 1 cm de espesor y con un alto contenido en iridio -30 veces más del que hay en las rocas cretácicas y terciarias que encajan la arcilla- que marca el nivel de extinción masiva del K/T. Sobre la arcilla, se asientan las rocas del Terciario con ningún o muy pocos fósiles (Figura 2).

Poco después se comprobó que la arcilla con iridio aparece por todo el planeta, en afloramientos donde la secuencia del tránsito K/T está completa, lo que sugiere un evento que afectó a todo el ecosistema terrestre (Figura 3). El iridio se convirtió en la piedra angular de la teoría del impacto meteorítico como causa de la extinción masiva del K/T propuesta por los Álvarez.

El iridio es un metal más escaso que el oro en la corteza terrestre. La Tierra primitiva era una descomunal bola de magma en la que los minerales más densos, entre ellos el iridio, se hundieron hacia su centro formando el núcleo y el campo magnético terrestre. Los minerales de densidades medias formaron el manto alrededor del núcleo, y los más ligeros ascendieron a la corteza terrestre. Por último, los gases del magma produjeron los mares

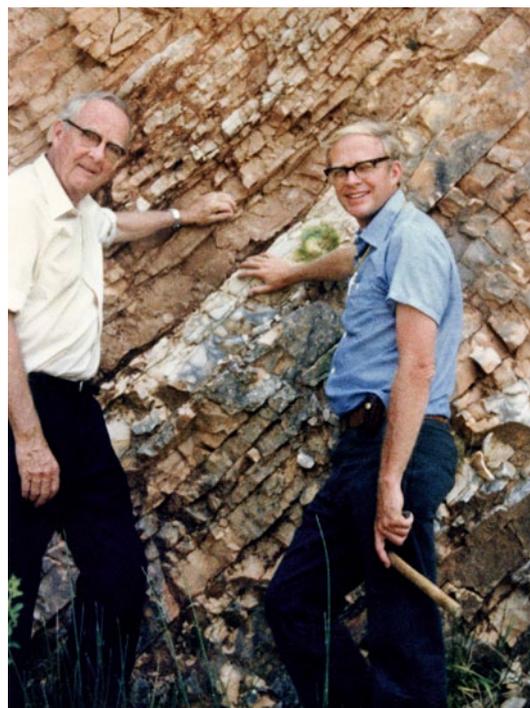


Fig. 2. Luis (izda.) y Walter Alvarez en el afloramiento de Gubbio, Italia. Walter apoya su mano en la última capa de caliza maastrichtense, y Luis lo hace en los primeros estratos del Paleoceno (Fotografía: Lawrence Berkeley National Laboratory)

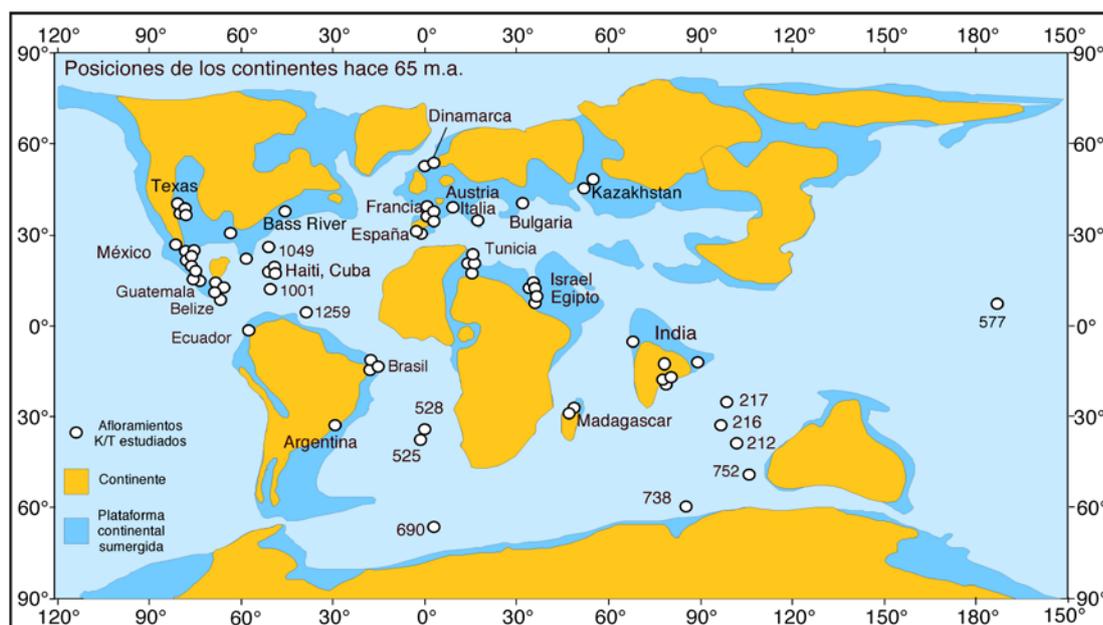


Fig 3. Mapa mundial de localización de afloramientos K/T (Fuente: elaboración propia).

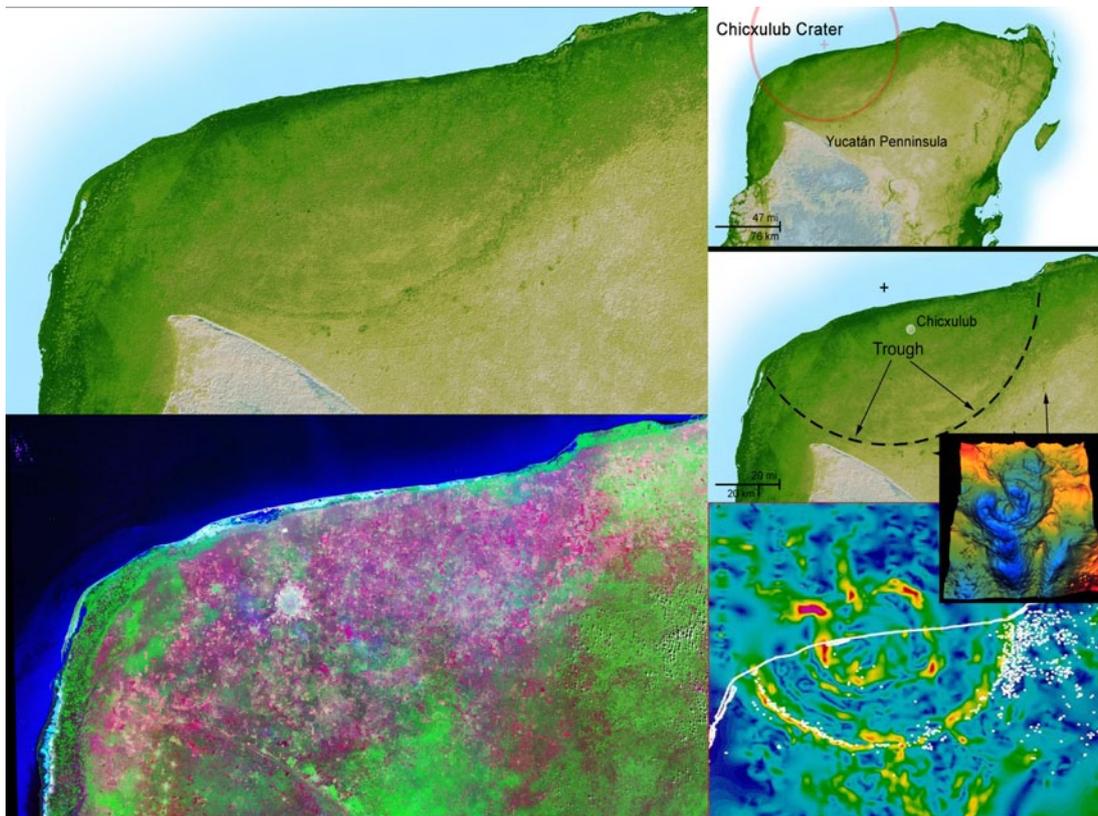


Figura 4. Mapa de anomalías gravimétricas y ortofotos de la estructura de Chicxulub y que ha sido interpretada como el impacto meteóritico del K/T (Fuentes: NASA, USGS, Virgil L. Sharpton, University of Alaska, Fairbanks).

y la atmósfera. Este proceso se denomina *diferenciación planetaria*. Por eso, resultaba tan intrigante encontrar en la superficie esa lámina con iridio, que debería estar en lo profundo del manto o del núcleo terrestre.

Sin embargo, los *meteoritos condriticos* tienen los componentes originales de la nebulosa que originó el sistema solar y sus abundancias apenas han sufrido alteraciones. Su concentración en iridio es similar a la que debió de tener la Tierra primitiva antes de que este metal migrase al núcleo, y muy superior al que tiene de promedio la corteza terrestre.

Que un metal muy escaso en la corteza terrestre, pero abundante en algunos asteroides, apareciese concentrado en un nivel de unos pocos milímetros de espesor por todo el planeta sugería que lo que sucedió debió ocurrir en muy poco tiempo, si no el espesor del sedimento depositado hubiera sido mucho mayor. Ello indujo a los Álvarez a proponer que un asteroide condritico de unos 10 km de diámetro contendría suficiente iridio para producir el enriquecimiento en la lámina de arcilla que marca el límite K/T en todo el mundo. Los efectos ambientales de su colisión contra la Tierra serían los causantes de la extinción en masa.

Según esta teoría, el impacto provocaría una onda termo-explosiva que generaría devastadores incendios, lanzando a la atmósfera una gigantesca nube de ceniza que impediría el paso de la luz solar a la superficie terrestre. Sin luz y con bajas temperaturas, el planeta se sumiría en una gélida noche que duraría varios meses o años y acabaría con la vida

vegetal. La red trófica planetaria se colapsaría, salvo en los ecosistemas del océano profundo que no dependen de la luz solar. El resultado fue la más reciente de las cinco grandes extinciones en masa de la historia terrestre, que acabó con los dinosaurios y las demás formas de vida típicas del Mesozoico.

CHICXULUB Y EL MEGATSUNAMI

Un impacto semejante debería haber dejado una enorme cicatriz en la superficie terrestre, y durante años los geólogos buscaron en vano un cráter que apoyase la teoría del impacto.

En 1978, el geofísico Glen Penfield descubrió una estructura circular con un diámetro de unos 170 km en un mapa de *anomalías gravimétricas* realizado por *PeMex* en la Península del Yucatán y el Golfo de México. Pero no fue hasta 1991 cuando esta estructura “que hasta entonces se pensaba que era de origen volcánico” fue identificada como un cráter de impacto por Allan Hildebrand, geólogo del *Geological Survey of Canada*, el propio Penfield y otros colaboradores (Figura 4). El cráter de Chicxulub² fue relacionado con la extinción en masa del límite K/T debido a dos observaciones hechas en los sedimentos de los afloramientos del noreste de México.

La primera es la presencia de *microtectitas*, esférulas microscópicas de vidrio provenientes del

² Se le llamó así debido a que la localidad Chicxulub se encuentra en su centro.

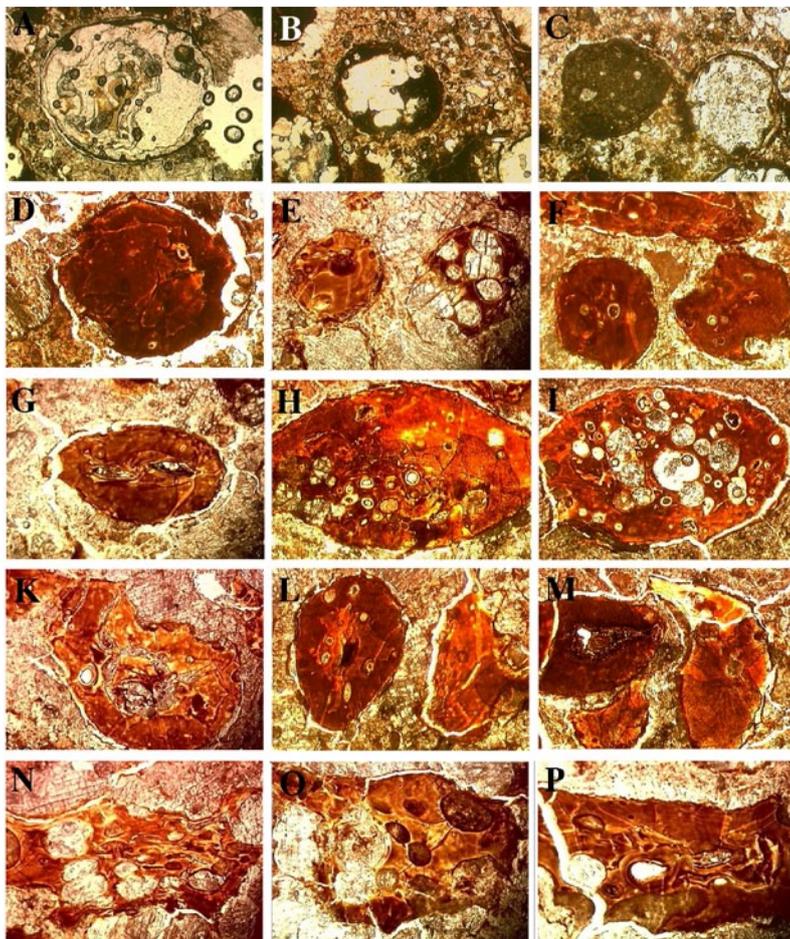


Fig. 5. Fotomicrografías de microtectitas de Chicxulub (Fotografía: Gerta Keller, Thierry Adatte)

impacto (Figura 5). El choque fundió las rocas del Yucatán, lanzando a la atmósfera un aerosol de gotas microscópicas de roca fundida que se solidificaron en su trayectoria, cayendo y sedimentando posteriormente en toda el área circundante al impacto. Las microtectitas aparecen por toda Amé-

rica Central y Norteamérica, lo que sugiere que el impacto tuvo lugar en esa región. Las dataciones radiométricas dieron edades entre 65.0 y 65.4 millones de años de antigüedad, dentro del entorno temporal de la extinción del K/T.

La segunda es que en los afloramientos del NE de México por encima de las microtectitas aparece una capa de caliza sobre la que se deposita una gruesa capa de arenisca laminada y por encima de ésta la lamina de arcilla con iridio que marca la extinción del K/T (Keller *et al.*, 2009a; Figura 6).

Jan Smit y sus colaboradores, propusieron en 1992 la hipótesis del megatsunami para explicar estas dos observaciones a partir de la teoría del impacto meteorítico. Según Smit la arenisca laminada se depositó en un periodo de horas o días debido a un gigantesco tsunami generado por el impacto de Chicxulub en el Golfo de México. Después, por encima de la arenisca del tsunami, se depositaría el iridio marcando el límite temporal de la extinción del K/T en todo el mundo.

Jan Smit ha sido durante las dos últimas décadas el líder de la teoría *impactista-megatsunami*. Sostiene que la extinción del límite K/T fue prácticamente instantánea y global, y debida únicamente al impacto meteorítico de Chicxulub. Afirma que el registro fósil del tránsito K/T no sugiere que hubiese otros procesos ambientales responsables de la alteración de los ecosistemas terrestres con anterioridad al impacto.

Las teorías del impacto meteorítico y del megatsunami reabrieron el eterno debate entre el *catastrofismo* de Georges Cuvier y el *gradualismo* de James Hutton, los dos extremos entre los que siempre han oscilado las ciencias de la Tierra. El debate sobre las causas de la crisis del K/T ha sido especialmente intenso entre los micropaleontólogos debido a que la arcilla con iridio coincide con la extinción masiva de foraminíferos planctónicos.

Los dinosaurios no pueden contar mucho sobre su propia extinción. Sus fósiles son muy escasos y dispersos, y no aportan datos precisos sobre las causas de su extinción. Por ello, aunque se observa una disminución del número de especies de dinosaurio durante el Maastrichtiense al final del Cretácico, los paleontólogos han usado foraminíferos, fósiles marinos microscópicos, para investigar las causas y el patrón de extinción del K/T.

FORAMINÍFEROS PLANCTÓNICOS E ISÓTOPOS ESTABLES

Los foraminíferos son microfósiles con una gran diversidad de especies de evolución muy rápida que los hace muy útiles en los estudios bioestratigráficos. Su gran abundancia permite analizar sus poblaciones en el tiempo con un detalle impensable con otros grupos de fósiles (Figura 7). El análisis del carbono de sus conchas permite obtener información

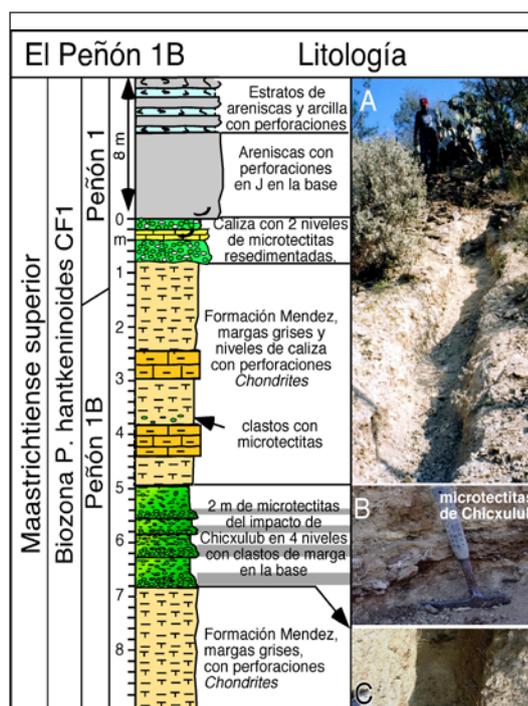


Fig. 6. Columna estratigráfica donde se observa la complejidad sedimentaria de los afloramientos del tránsito K/T en el Golfo de México (Fuente: elaboración propia)

sobre la productividad de los mares que habitaron los foraminíferos.

El carbono tiene tres isótopos naturales. Mientras el ^{14}C es radiactivo, el ^{12}C y el ^{13}C son estables. Debido a la fotosíntesis la materia viva presenta una mayor concentración de ^{12}C a la esperable por la abundancia relativa de ^{12}C y ^{13}C en la naturaleza. Por eso, cuando aumenta la productividad de fitoplancton el agua marina se empobrece en ^{12}C , mientras que en periodos de baja productividad la relación entre ^{13}C y ^{12}C es menos extrema. La proporción $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ queda preservada en la calcita de las conchas de los foraminíferos, registrando la composición isotópica del CO_2 disuelto en el agua marina que indica la productividad oceánica.

Los fósiles de foraminíferos planctónicos del tránsito K-T muestran una señal isotópica del carbono que sugiere que durante un tiempo los mares tuvieron poca vida. Esta señal isotópica, junto a la propia extinción de los foraminíferos y al nivel de arcilla con iridio constituye la *firma* de la extinción del límite K/T.

LA EDAD DE CHICXULUB SE TAMBALEA: EL SONDEO YAXCOPOIL 1

Cuando Smit, Hildebrand y el resto de *impactistas* mostraron el cráter de Chicxulub como la prueba inequívoca del origen extraterrestre e instantáneo de este episodio, el equipo liderado por Gerta Keller y Thierry Adatte comenzó a investigar el registro geológico del Golfo de México, del Caribe y otros muchos lugares del mundo para tratar de responder a las siguientes cuestiones: ¿Tiene el cráter de Chicxulub la edad adecuada? ¿El impacto meteorítico es la única causa de esa extinción? ¿El proceso de extinción fue instantáneo y global o gradual y selectivo?

Durante los últimos quince años el equipo de Keller ha acumulado una formidable base de datos paleontológicos, sedimentológicos y geoquímicos, que no respalda la teoría impactista ni la del megatsunami.

Para resolver las diferencias entre las investigaciones de los equipos de Smit y Keller, entre diciembre de 2001 y febrero de 2002, el *Chicxulub Scientific Drilling Project* (CSDP) realizó una campaña internacional de sondeo en la hacienda de Yaxcopoil, a unos 60 km del centro del cráter de Chicxulub. El pozo Yaxcopoil-1 se localiza a unos 40 km al suroeste de Mérida, en el interior del flanco meridional del cráter. El testigo de sondeo que incluye el límite K/T comprende una unidad suevitas³ de 100 m de potencia, entre los 894 m y 794 m de profundidad, entre calizas anteriores al impacto, y

³ Fragmentos de roca en una matriz de vidrio producida por la energía del impacto meteorítico contra la superficie terrestre.

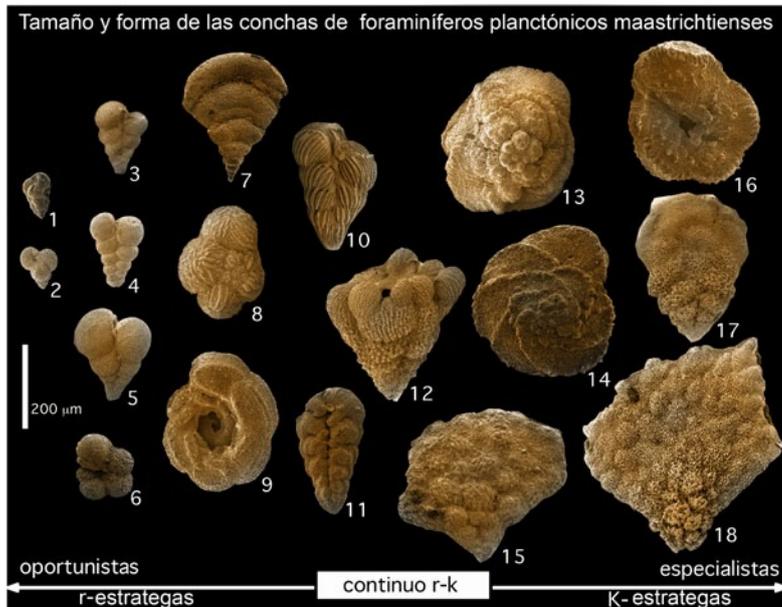


Fig. 7. Variabilidad morfológica de los foraminíferos planctónicos del Maastrichtiense en función de sus nichos ecológicos y grado de especialización (Modificado de Keller y Abramovich, 2009)

las calizas y margas calcáreas con las que se rellenó del cráter (Figura 8).

Tras analizar las muestras de Yaxcopoil-1, el equipo de Keller llegó a una sorprendente conclusión que publicaron en *PNAS* (*Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*).

En el artículo, describían que la brecha del impacto, y el límite de extinción K/T están separados por una capa de caliza finamente laminada con cinco niveles del mineral glauconita junto con microfósiles que no se extinguieron hasta alcanzar el límite K/T. Cada lámina de glauconita necesita aguas marinas muy tranquilas a menos de 100 m de profundidad y decenas de miles de años para formarse. Nunca podría formarse en unos pocos días en medio de un tsunami.

El análisis bioestratigráfico de los foraminíferos planctónicos, indican que las calizas se depositaron durante unos 300.000 años antes de producirse la

Fig. 8. Uno de los testigos de sondeo de Yax 1 (Fotografía: Gerta Keller)



Fig. 9. Foraminíferos planctónicos en lámina delgada procedentes del sondeo Yax 1, y sus equivalentes en fotomicrografía (Fuente: Keller et al., 2004)

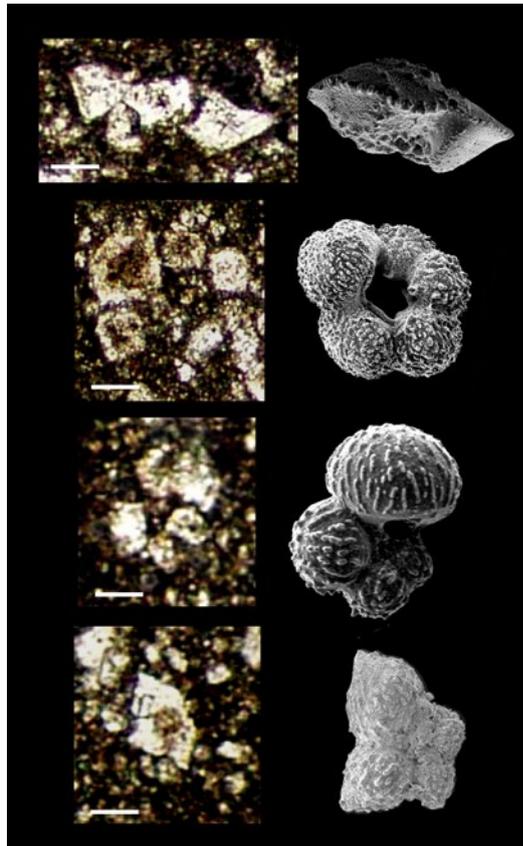
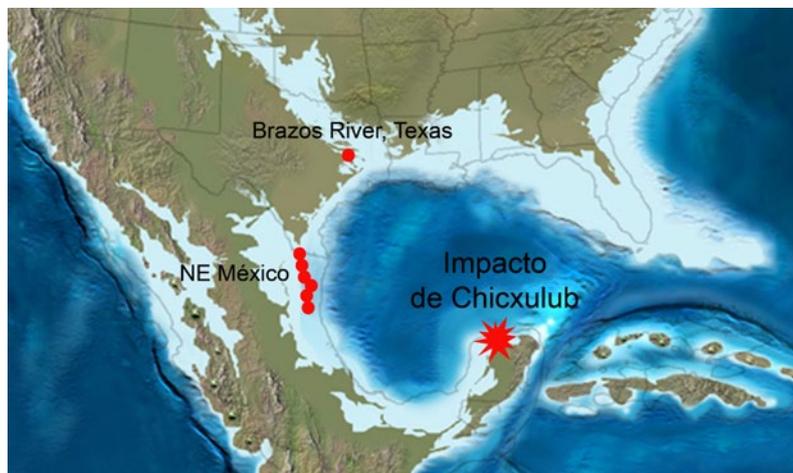
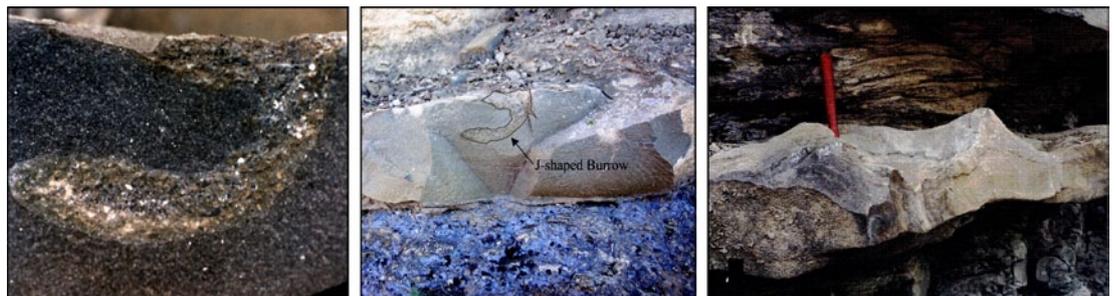


Fig. 10. Mapa de localización de los cortes del área del Golfo de México, con detalle de los cortes mexicanos de la Sierra Madre Oriental (Modificado de Blakey, 2011)



extinción del límite K/T (Figura 9). Estos indicios sugieren que durante varios cientos de miles de años se produjo una sedimentación lenta en unos mares con abundante vida planctónica, y que por tanto el meteorito de Chicxulub no causó la extinción masiva que acabó con los dinosaurios.

Fig. 11. Icnofósiles de perforaciones realizadas en el sustrato marino por organismos bentónicos en los estratos del afloramiento de El Peñón (Fotografías: Thierry Adatte).



LOS CORTES DE SIERRA MADRE ORIENTAL: LA CONFIRMACIÓN

Recientemente, en abril de 2009, un nuevo artículo publicado en *Journal of the Geological Society* el equipo de Keller confirmaba los resultados de Yaxcooil con datos procedentes de afloramientos del K/T en la Sierra Madre Oriental⁴ (Figura 10). Las campañas de muestro se realizaron entre 1996 y 2002.

El estudio revela que los niveles de microtectitas se depositaron rápidamente sin sufrir ningún tipo de transporte por efecto de un tsunami. En afloramientos como El Peñón o el Mimbrial las calizas por encima del nivel de microtectitas presentan fósiles de foraminíferos planctónicos y perforaciones realizadas por organismos que habitaban el fondo marino (Figura 11). Esto indica que tras el impacto la sedimentación fue lenta y permitió la vida en el fondo mar. Los foraminíferos planctónicos no sufrieron extinciones y confirman que el impacto se produjo 300.000 años antes del límite K/T, identificado en afloramientos como La Sierrita y La Parida con el nivel de arcilla con iridio, la extinción de 2/3 de los foraminíferos cretácicos y la aparición los primeros foraminíferos terciarios, y el cambio en los valores de $^{13}C/^{12}C$. Todo ello confirma que el impacto de Chicxulub no pudo ser el causante de la extinción del límite K/T.

Keller y su equipo han observado esta misma secuencia de acontecimientos en el afloramiento del K/T del río Brazos, en Texas. Con lo que se tiene la confirmación en tres lugares diferentes: el cráter en Yucatán, La Sierra Madre Oriental, y Texas.

Pero si el impacto de Chicxulub no causó la extinción, ¿cuál fue su causa?

VOLCANISMO: UNA PODEROSA FUERZA DEL PLANETA TIERRA

El volcanismo es una de las grandes fuerzas modeladoras tanto de la superficie terrestre como de la vida a lo largo de la historia geológica. La mayor de todas las extinciones masivas, ocurrida a finales del Pérmico hace 251 millones de años, estuvo

⁴ Estos afloramientos estudiados han recibido los siguientes nombres: Mesa Juan Pérez, La Sierrita, Loma Cerca, La Parida, El Peñón, El Mulato, La Lajilla, El Mimbrial.

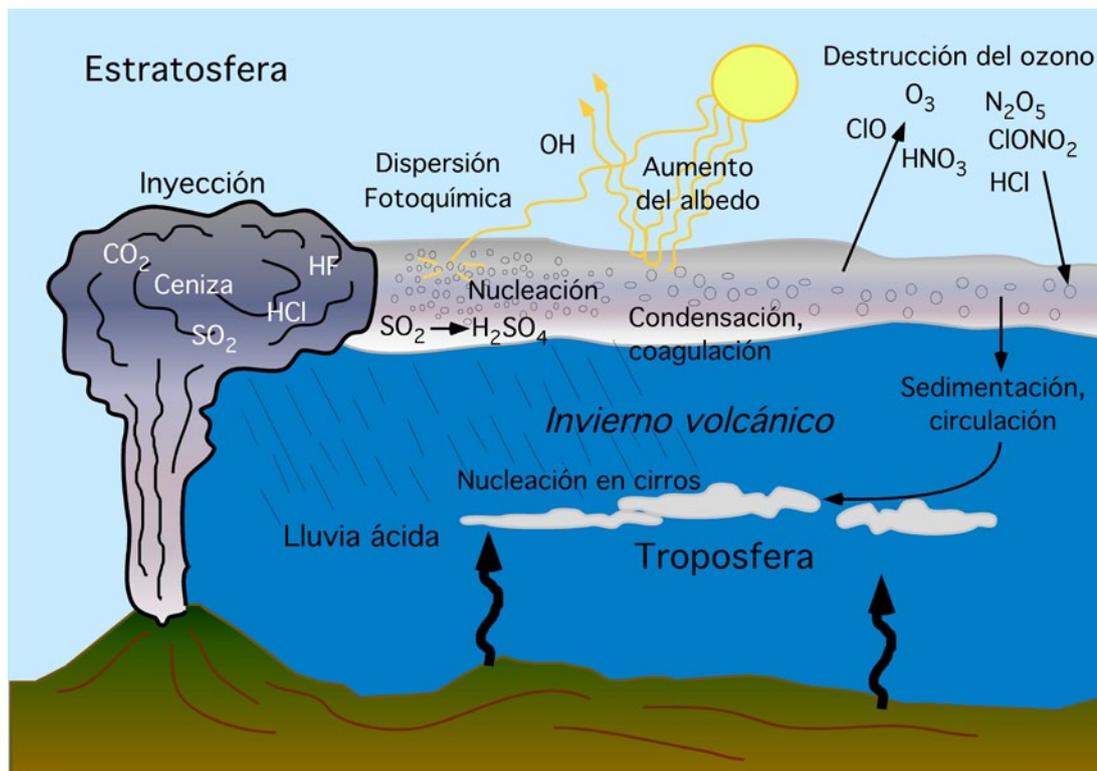


Fig. 12. Esquema de la acción en la atmósfera de una gran erupción volcánica (Fuente: elaboración propia).

provocada por las grandes erupciones masivas de Siberia que llegaron a cubrir de lava un territorio de entre 2.000.000 km² y 7.000.000 km² –unas doce veces la superficie de la Península Ibérica - con un volumen de lava emitido de entre 1.000.000 km³ y 4.000.000 km³.

Por muy destructiva que sea, no es la lava la que causa el proceso de extinción biológica. Los culpables son los gases y cenizas que son inyectados en la atmósfera durante la erupción. Pero no todas las erupciones producen extinciones. Para que un evento volcánico pueda causar una extinción masiva, además de su intensidad y magnitud, es fundamental que se trate de un volcanismo que lance una gran cantidad de gases como dióxido de carbono (CO_2), dióxido de sulfuro (SO_2), ácido clorhídrico (HCl) y ácido fluorhídrico (HF), junto con cenizas hasta la estratosfera. Desde esa altura, unos 15 km, las corrientes de chorro pueden distribuirlas en poco tiempo por todo el planeta.

El CO_2 es un conocido gas de efecto invernadero capaz de alterar el clima del planeta, mientras que SO_2 , HCl y HF atacan la capa de ozono que nos protege de las radiaciones ultravioleta, producen lluvia ácida, y en combinación con las cenizas aumentan el albedo, disminuyendo la radiación solar que llega a la superficie. Si todos estos elementos son inyectados en la atmósfera en grandes cantidades y a suficiente altura causan un enfriamiento global denominado *invierno volcánico*, similar al *invierno nuclear* que el equipo de Álvarez describió para el impacto meteorítico (Figura 12). Los efectos combinados de la caída de temperatura, falta de radiación solar, gases tóxicos en la atmósfera y océanos

y lluvia ácida, entre otros, causarían enormes daños a la red trófica planetaria, provocando la extinción masiva de especies.

En épocas históricas varias han sido las catástrofes volcánicas de las que la humanidad ha sido a la vez testigo y víctima. Entre 1628 y 1627 a. C., la erupción del volcán de la isla de Thera en el mar Egeo terminó con una gigantesca explosión de su *caldera* en la que la isla perdió buena parte de su superficie, y provocó un maremoto que asoló el Mediterráneo Oriental, provocando la desaparición de la civilización minoica de Creta.

Quizá la erupción volcánica más famosa de todos los tiempos sea la del Vesubio, el 24 de agosto del año 79 d.C., en la que fueron sepultadas en ceniza las ciudades de Pompeya y Herculano. Observada por Plinio “el Viejo” –que murió asfixiado al tratar de rescatar con su barco a víctimas de la erupción- y descrita por su sobrino Plinio “el Joven”, fue una erupción explosiva que arrasó ambas ciudades matando a gran parte de sus habitantes.

Durante ocho meses entre 1783 y 1784 la erupción de fisura volcánica de Laki de unos 100 km de longitud y con unos 130 volcanes activos al sur de Islandia emitió unos 14 km³ de lava y nubes tóxicas de FH y SO_2 a la troposfera y baja estratosfera. Los efectos fueron descritos por Jon Steingrimsson:

“Esta pasada semana, y las dos anteriores, ha caído del cielo más veneno del que las palabras pueden describir: ceniza, piedra volcánica, lluvia de azufre, salitre, todo ello mezclado con arena. Los hocicos y patas del ganado que pastaba o andaba por los prados se pusieron amarillos y en carne viva.

Toda el agua se volvió turbia y de color azul claro, y las avalanchas de grava se volvieron grises. Todas las plantas del suelo ardieron, se marchitaron y se volvieron grises una tras otra, conforme el fuego aumentaba y se acercaba a los asentamientos.”

Las consecuencias en Islandia fueron devastadoras. Entre el 20% y el 25% de la población murió de envenenamiento por flúor y hambruna tras las erupciones, un 80% de los rebaños de ovejas y el 50% de vacas y caballos murieron de fluorosis esquelética⁵. La mortandad se extendió por Europa a causa de las enfermedades y la hambruna conforme la nube tóxica se dispersó, la temperatura aumentó y posteriormente disminuyó, produciendo veranos muy fríos en todo el planeta. Su última consecuencia fue, probablemente, la revolución francesa.

En 1883 el volcán de la isla de Krakatoa estalló, desapareciendo dos tercios de la isla y creando enormes tsunamis en el océano Índico. La explosión produjo enormes tsunamis en el Océano Índico que llegaron hasta el Atlántico Norte. Las cenizas en la atmósfera alteraron el clima del planeta durante tres años.

Catástrofes volcánicas menos destructivas ocurrieron en 1912 en el Monte Katmai, en 1980 en el Monte Saint Helens, o en 1991 en el monte Pinatubo en 1991 (Figura 13).

VOLCANISMO EN LA INDIA Y LA EXTINCIÓN MASIVA DEL K/T

En la década de 1980, investigadores como Dewey McLean, Charles Officer y Charles Drake o Vincent Courtillot, propusieron que el volcanismo masivo del Decán en la India, había jugado un pa-

⁵ *Es una enfermedad de los huesos debida a un exceso de flúor. En casos severos causa dolor y daños en los huesos y articulaciones, como limitación en la movilidad, calcificación de los ligamentos del cuello, deformaciones de la columna vertebral y de las articulaciones, defectos neurológicos y compresión de la espina dorsal.*

Fig. 13. Erupción y penacho de cenizas del volcán Pinatubo (Fuente: USGS)



pel crucial en la extinción del Cretácico/Terciario (Figura 14).

En 1985, McLean publicó en *Cretaceous Research*



Fig. 14. Aspecto de los Traps del Decán en la región de Bombay (Fotografía: Steven Self)

un artículo en el que concluía que el volcanismo mantélico del Decán -cuyo magma procedía de las zonas más interiores del manto terrestre, y tenía una composición mineral típica de esta región del planeta, con materiales más pesados que los habituales en la corteza terrestre, entre ellos iridio- habría incrementado el nivel de CO₂ liberado a la atmósfera entre un 10% y un 25%, acidificando e incrementando la temperatura de los océanos. Ello causó la extinción de la fauna marina, entre ella los foraminíferos planctónicos. Hoy día se sabe que no fue el calentamiento sino el enfriamiento global lo que produjo la extinción masiva del K/T, pero MacLean acertó al relacionar el volcanismo del Decán con una catástrofe climática y ambiental capaz de desencadenar una extinción masiva. Así mismo sugirió que la fuente del iridio del K/T sería volcánica y no extraterrestre.

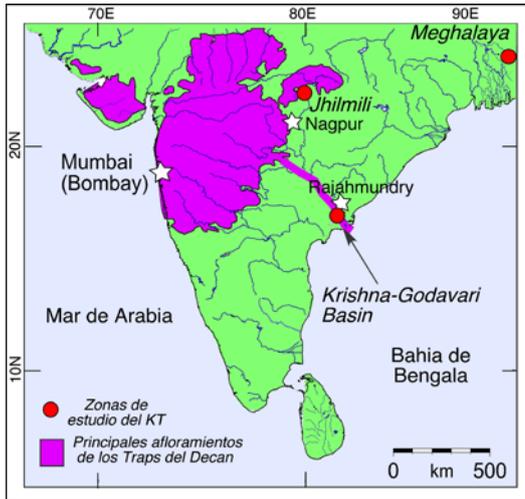
Sin embargo, a mediados de la década de 1980 la popularidad y aceptación general de la teoría impactista, hizo que no se prestase atención al papel del volcanismo del Decán en el K/T. De hecho, McLean y Officer sufrieron un completo ostracismo científico por parte de la jerarquía impactista dominante (Pardo, 2006). En una famosa entrevista para el New York Times Luis Álvarez decía de McLean, incluyendo a todos los paleontólogos:

“No me gusta decir cosas malas de los paleontólogos, pero no son muy buenos científicos. Son más bien como coleccionistas de sellos⁶.”

(New York Times, January 19, 1988).

En la década de 1990 sólo Vincent Courtillot y su equipo de vulcanólogos continuó recopilando evidencias que apoyaban los efectos del volcanismo,

⁶ *Luis Álvarez parafraseaba una famosa cita de Ernest Rutherford: “La ciencia es o bien física o bien coleccionismo de sellos” (Birks, 1963).*



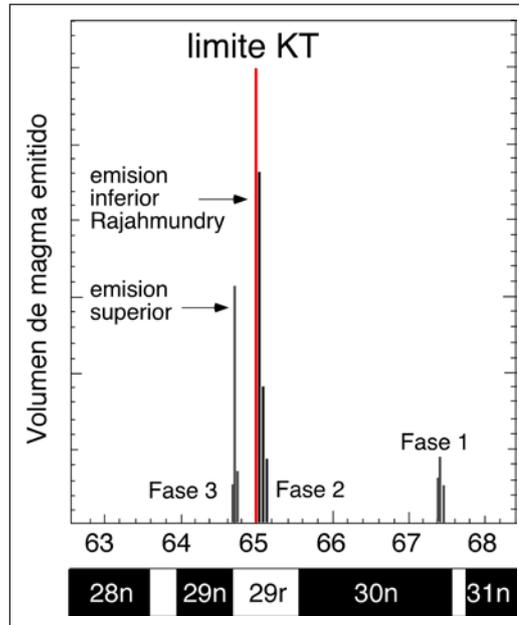
aunque en adición a las del meteorito, en la extinción del K/T. Para entonces ya era obvio que el volcanismo masivo causante de los colosales *traps*⁷ del Decán, que habían cubierto un área de 550,000 km² –similar a la de España- y producido montañas de 3,500 m de altitud, debía haber ocasionado un enorme estrés ambiental capaz de desencadenar una extinción en masa (Figura 15). Lo que faltaba era la prueba de que la extinción del K/T se había producido coincidiendo con el volcanismo del Decán, debido a que las erupciones habían tenido lugar en el continente indio, y su datación era difícil porque no había fósiles marinos que permitiesen establecer su edad.

EL AVANCE DECISIVO

Dos estudios han cambiado el conocimiento del volcanismo del Decán y su importancia en la extinción del K/T. El primero es un estudio del equipo de Courtillot y su doctoranda Anne-Lise Chenet basado en las medidas de las inversiones magnéticas a lo largo de los 3500 m de espesor de las coladas volcánicas. El estudio publicado en *Earth and Planetary Science Letters* en 2007 por Chenet y otros autores determinaba que las erupciones del Decán ocurrieron en tres fases. La primera, relativamente menor, tuvo lugar hace 67,4 millones de años y tras ella hubo dos millones de años de inactividad. La segunda y principal fase volcánica, produjo el 80% del total del magma que forma los *traps*, ocurrió durante la inversión magnética 29r⁸ y terminó cer-

⁷ El término «traps» procede del sueco *trappa* (escalera), y hace referencia al aspecto escalonado de las colinas de coladas volcánicas, los distintos mantos de lava que fluyeron cubriendo el terreno en las diversas fases eruptivas, de esta región de la India.

⁸ La inversión 29r es la 29ª inversión geomagnética ocurrida en la historia de la Tierra, y abarca desde 65,118 hasta 65,861 millones de años, con 360,000 años por debajo del límite K/T situado en 65,5 millones de años, y 382,000 años por encima de él en el Terciario.



ca del límite K/T. Tras un periodo de inactividad de 280,000 años tuvo lugar una tercera fase entre el final intervalo geomagnético 29r y el inicio del normal 29n (Figura 16). Lo que seguía sin saberse era la relación temporal de la extinción masiva respecto a la segunda y principal fase volcánica, y si había una relación causa efecto entre ellas.

En 2005 Gerta Keller, Thierry Adatte y sus colaboradores comenzaron a investigar la costa suroriental de la India en el Golfo de Bengala, siguiendo el trabajo que iniciaron Silvia Gardin, Anachiara Bartolini y Sunil Bajpai en 2004. Hasta allí llegaron los flujos de lava del Decán a través de más de 1000 km de territorio indio, formando el manto de lava más largo conocido en la Tierra que prueba la magnitud y velocidad de la lava del Decán.

Estos larguísimos flujos de lava, de hasta 1500 km de longitud, quedan expuestos en las canteras cercanas a la ciudad de Rajahmundry en el distrito oriental de Godavari en el estado de Andhra Pradesh. Allí entre las dos últimas fases volcánicas afloran unos sedimentos marinos costeros (Figura 17). Los sedimentos inmediatamente por encima de la base de lava contienen fósiles de los primeros foraminíferos planctónicos que evolucionaron tras la extinción en todo el mundo. En un artículo publica-



Fig. 15 (izquierda). Extensión de los traps del Decán, y zonas de estudio del límite K/T en la India (Fuente: elaboración propia).

Fig. 16 (derecha). Fases volcánicas del Decán en el tránsito K/T (modificado de Chenet et al., 2007; Keller et al. 2009b).

Fig. 17. Descripción de los estratos aflorantes en la cantera Gauriputnam, en Rajahmundry (Fotografía: Gerta Keller).

do en 2008 en *Earth and Planetary Science Letters* Keller y su equipo concluían que la extinción masiva tuvo que producirse coincidiendo con el final de la fase principal del volcanismo del Decán.

Posteriormente una búsqueda del límite K/T en el centro de la India proporcionó un descubrimiento sorprendente. En una colina cercana a la población de Jhilmili en el distrito de Chhindwara las últimas dos fases volcánicas del Decán quedan expuestas junto con 14 m de sedimentos entre ellas, que se suponían continentales, pero Keller y sus colaboradores encontraron en ellos foraminíferos planctónicos evolucionados justo tras la extinción en masa. Ello permitía localizar el inicio del Terciario en el centro de la India.

Pero, ¿cómo llegaron esos fósiles marinos a 800 km tierra adentro? Debió existir un largo brazo de mar que penetraba la India por el oeste debido a la colisión de la India con Asia, que rasgaría la corteza continental india formando lo que se conoce como un valle *rift*. Tal vez existió otro brazo de mar que entraba desde el suroeste por el área de Rajahmundry y ambos se vieron afectados por el volcanismo. Las orillas de estos brazos de mar debieron ser zonas fértiles, pobladas por dinosaurios que las aprovechaban como zonas de nidificación, tal y como sugiere la situación de los yacimientos de fósiles de huevos de dinosaurio descubiertos (Srivastava *et al.*, 1986; Bajpai *et al.*, 1993; Mohabey, 2001). La investigación continúa para datar la desaparición de estas zonas de puesta y cría de dinosaurios respecto a la extinción de los microfósiles marinos.

¿Cómo causó el volcanismo la muerte de los dinosaurios? La respuesta la tenemos en las erupciones de Laki que acabó con el 80% del ganado de Islandia. La catástrofe volcánica del Decán debió ser unas 10,000 veces más intensa. Muchos dinosaurios morirían asfixiados con sus pulmones abrasados por el ácido, y los supervivientes morirían de hambre por falta de plantas, o envenenados por las toxinas del aire, las plantas y el suelo, tras una larga época de estrés ambiental.

EL VOLCANISMO DEL DECÁN COMPARADO CON EL IMPACTO DE CHICXULUB

Los efectos ambientales de un gran impacto meteorítico y de un episodio de volcanismo masivo son muy similares. Ambos inyectan polvo o cenizas, gases y aerosoles en la troposfera y estratosfera capaces de provocar cambios ambientales globales.

El impacto de Chicxulub fue un evento instantáneo que lanzó a la atmósfera además de roca vaporizada y otros gases, una cantidad estimada de entre 50 y 500 gigatoneladas de SO₂ (Keller *et al.*, 2009b). El dióxido de azufre se transforma en aerosoles de sulfato, que son minúsculas partículas sólidas o líquidas, o una mezcla de ambas, que en la estra-

tosfera reflejan la radiación solar y al caer alteran la composición de las nubes produciendo enfriamiento climático. En esencia, actúan de forma contraria a los gases de efecto invernadero. Sin embargo, a diferencia de éstos, los aerosoles de sulfato permanecen en suspensión poco tiempo, por lo que su efecto de enfriamiento es localizado y muy temporal.

El volcanismo del Decán debió producirse a lo largo de una gigantesca fisura volcánica de varios cientos de kilómetros, similar a la de Laki, pero en una escala y volumen mucho mayor. La fisura se generó por el ascenso de un penacho de magma desde la base del manto que rajó la corteza del continente indio. Estas erupciones de fisura alcanzaron la estratosfera donde las corrientes de chorro distribuyeron gran cantidad de gases y algo de ceniza por todo el mundo.

La segunda fase volcánica que produjo más del 80% de la plataforma de los *traps* del Decán, se compuso de alrededor de 30 pulsos volcánicos muy rápidos, de unos pocos meses, años o décadas de duración. Cada una de estas erupciones produjo entre 5,000 km³ y 10,000 km³, liberando 32 y 143 gigatoneladas de SO₂. La suma de todos ellos supuso una cantidad de SO₂ como mínimo 30 veces superior a la de Chicxulub. La repetición de los pulsos volcánicos y la inyección de SO₂ en la alta atmósfera supusieron que su efecto se mantuvo durante un largo tiempo geológico causando un importante enfriamiento climático (Keller *et al.*, 2009b). Sabemos que una erupción mucho menor como fue la de Pinatubo produjo un enfriamiento del clima terrestre de unos 0,3°C. El enfriamiento en la fase principal de Decán pudo llegar a ser hasta 100 veces peor, produciendo un gran enfriamiento climático de larga duración.

La fase principal del vulcanismo en el Decán se interrumpió en el límite K/T, en coincidencia con la anomalía de iridio lo que sugiere la posibilidad de otro gran impacto (Keller *et al.*, 2010). Por otra parte, análisis recientes en los afloramientos de Brazos River, Texas (Fig. 10), muestran múltiples niveles con anomalías de Ir, pero ninguno relacionado con el impacto de Chicxulub, lo que sugiere que las anomalías de Ir y de otros elementos del grupo del platino pueden movilizarse y concentrarse en horizontes redox. Por lo tanto, las pequeñas anomalías de Ir (hasta 1 ppb) no son señales fiables de impacto, sino más bien de removilización post-deposicional. Todo ello está siendo objeto de estudio en la actualidad.

Posteriormente, el volcanismo del Decán se reinició con una tercera fase unos 280,000 años después, en el Terciario. Cuando ésta concluyó los ecosistemas marinos se recuperaron de los efectos de la extinción del K/T. El volcanismo del Decán explica tanto la extinción como el retraso en la recuperación ecológica de los ecosistemas, algo que resultaba muy intrigante y que la teoría impactista nunca pudo explicar.

BIBLIOGRAFÍA

- Alvarez, W., Alvarez, L. W., Asaro, F. y Michel, H. (1980). Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction. *Science*, 208, 1095-1108.
- Bajpai, S, Sahni, A. y Srinivasan, S. (1993). Ornithoid eggshells from Deccan intertrappean beds near Anjar, (Kachchh), western India. *Current Science* 64: 42-45.
- Birks, J. B. (1963). *Rutherford at Manchester*. Benjamin, New York, 364 p.
- Blakey, R. (2011). Paleogeography and Geologic Evolution of North America. On-line Accesible: <http://jan.ucc.nau.edu/~rcb7/nam.html> [Acceso: 30/05/2011].
- Canudo, J. I. (2010). Qué nos enseña la extinción de los dinosaurios sobre la historia de la vida y de la Tierra. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 18 (1): 74-84.
- Chenet, A.-L., Quidelleur, X., Fluteau, F. & Courtillot, V. (2007). ⁴⁰K/⁴⁰Ar dating of the main Deccan Large Igneous Province: Further evidence of KTB age and short duration. *Earth and Planetary Science Letters*, 263, 1-15.
- Courtillot, V., Besse, J., Vandamme, D., Montigny, R., Jaeger, J.J., Cappetta, H. (1986). Deccan flood basalts at the Cretaceous/Tertiary boundary? *Earth and Planetary Science Letters*, 80, 361-374.
- Davis, M.; Hut, P. y Muller, R. A. (1984). Extinction of species by periodic comet showers. *Nature* 308, 715 - 717.
- De Laubenfels, M.W. (1956). Dinosaur extinction: one more hypothesis: *Jour. Paleontology*, 30: 207-218.
- Hildebrand, A. R., Penfield, G. T., Kring, D. A., Pilkington, M., Camargo, Z. A., Jacobsen, S. B. y Boynton, W. V. (1991). Chicxulub Crater: A possible Cretaceous-Tertiary impact crater on the Yucatán Peninsula, Mexico. *Geology*, 19, 867-871.
- Keller, G. (2005). Impacts, volcanism and mass extinctions: random coincidence or cause & effect? *Australian Journal of Earth Sciences*, 52, 725-757.
- Keller, G., (2008a). Cretaceous climate, volcanism, impacts and biotic effects. *Cretaceous Research*, v. 29 (5/6), 754-771.
- Keller, G. y Pardo, A. (2004): Disaster Opportunists Guembeltrinae: Index for Environmental Catastrophes. *Marine Micropaleontology*, 53 (1-2), pp. 83-116.
- Keller, G. and Abramovich, S., 2009. Lilliput Effect in late Maastrichtian planktic Foraminifera: Response to Environmental Stress. *Paleogeogr., Paleoclimatol., Paleoecol.*, 271, 52-68.
- Keller, G., Adatte, T., Stinnesbeck, W., Rebolledo-Vieyra, M., Urrutia Fucugauchi, J., Kramar, U. and Stueben, D., (2004). Chicxulub crater predates K-T boundary mass extinction. *PNAS* 101(11): 3721-3992.
- Keller, G., Adatte, T., Gardin, S., Bartolini, A., Bajpai, S. (2008b). Main Deccan volcanism phase ends at K-T mass extinction: Evidence from the Krishna-Godavari Basin, SE India. *Earth and Planetary Science Letters*, 268: 293-311.
- Keller, G., Adatte, T., Pardo, A., y López-Oliva, J. G. (2009a). New evidence concerning the age and biotic effects of the Chicxulub impact in NE Mexico. *Journal of the Geological Society*, London, 166: 393-411.
- Keller, G., Sahni, A. y Bajpai, S. (2009b). Deccan volcanism, the KT mass extinction and dinosaurs. *J. Biosci.* 34: 709-728.
- Keller, G., Adatte, T., Pardo, A., Bajpai, S., Khosla, A., and Samant, B. (2010). Comment on the "Review" article by Schulte and 40 co-authors: The Chicxulub Asteroid Impact and Mass Extinction at the Cretaceous-Paleogene Boundary. *Geoscientist Online, The Geological Society of London*. Accesible: <https://www.geolsoc.org.uk/gsl/geoscientist/features/keller/page7669.html> [Acceso: 5/05/2010].
- Kelly, A. O. y Dache, F. (1953). *Target: Earth. The Role of Large Meteors in Earth Science*. Publ.: Target: Earth, Carlsbad, CA, 264 p.
- McLean, D. M. (1985). Deccan traps mantle degassing in the terminal Cretaceous marine extinctions. *Cretaceous Research* 6 (3): 235-259.
- MacLeod N. (2003). The causes of Phanerozoic extinctions. In: Rothschild L. J. & Lister A. M. eds. *Evolution on Planet Earth: Impact of the Physical Environment*, Academic Press, Amsterdam, pp. 235 - 252.
- Mohabey, D. M. (2001). Indian dinosaur eggs; A review; *J. Geol. Soc. India*, 58:479-508.
- Officer C. B. y Drake C. L. (1983). The Cretaceous-Tertiary Transition. *Science*, 219: 1383-1390.
- Pardo, A. (2006). Los efectos de la polarización de los medios de comunicación especializados en los grandes paradigmas científicos: el caso de la gran extinción del límite Cretácico/Terciario. In Fernández Sanz, J. J., Sanz Establés, C. y Rubio Moraga, A. L. (coords.): *Prensa y Periodismo especializado* 3, vol. 1, Asociación de la Prensa de Guadalajara, Editores del Henares, Guadalajara, pp. 327-340.
- Pardo, A. y Keller, G. (2008). Biotic effects of environmental catastrophes at the end of the Cretaceous and Early Tertiary: Guembeltria and Heterohelix blooms. *Cretaceous Research*, 29 (5-6), pp. 1058-1073.
- Raup, D. M., y Sepkoski, J. J. (1982). Mass Extinctions in the Marine Fossil Record. *Science* 215, 1501-1503.
- Russell, D. y Tucker, W. (1971). Supernovae and the Extinction of the Dinosaurs. *Nature*, 229, 553 - 554.
- Smit, J., Montanari, A., Swinburne, N. H. M., et al. (1992). Tektite-bearing deepwater clastic unit at the Cretaceous-Tertiary boundary in northeastern Mexico. *Geology*, 20, 99-104.
- Srivastava, S., Mohabey D. M., Sahni, A. y Pant, S. C. (1986). Upper Cretaceous dinosaur egg clutches from Kheda district (Gujarat, India); *Palaeontogr. Abt. A* 193 219-233.
- Tantawy, A. A., Keller, G., y Pardo, A. (2009). Late Maastrichtian Volcanism in the Indian Ocean: Effects on Calcareous Nannofossils and Planktic Foraminifera. *Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 284 (1-2), pp.63-87. ■

Fecha de recepción del original: 03/02/2011

Fecha de aceptación definitiva: 06/06/2011