

# Evidencia del impacto meteorítico del límite Cretácico/Paleógeno e interés de los cenotes de Yucatán

Eustoquio MOLINA

Departamento de Ciencias de la Tierra e IUCA. Universidad de Zaragoza, E-50009 Zaragoza. C/e: emolina@unizar.es

## Introducción

Los cenotes (pozos: *dzonot* en lengua maya) son unas cavidades geomorfológicas, generalmente circulares con un diámetro no mayor de un centenar de metros, que están rellenas de agua hasta el nivel freático de la península de Yucatán. En profundidad conforman una red cavernosa compleja que suele estar inundada. El nivel del agua suele estar a unos 15-20 m bajo la superficie del terreno, pero en algunos lugares, donde el relieve es más bajo, el agua puede llegar a aflorar y fluir hacia lagunas, manglares o incluso al mar en el noroeste de la península de Yucatán.

Gran parte de estos cenotes se disponen en un «anillo», pero en realidad solo se observa una alineación semicircular en el norte de la península

de Yucatán, ya que la parte norte del anillo estaría sumergida en el golfo de México. Este anillo no puede ser explicado por la teoría tradicional de las manifestaciones kársticas comunes, sino que coincide con el quinto y principal círculo concéntrico de un enorme cráter. Este cráter se formó al impactar un gran meteorito hace 66 millones de años, en el límite Cretácico/Paleógeno, causando la extinción en masa de los dinosaurios y otros muchos organismos. Así se formó un cráter de aproximadamente 180 km de diámetro, cuyo centro se encuentra cerca de la localidad de Puerto Chicxulub, por lo que ha recibido el nombre de «cráter de Chicxulub». La historia de la propuesta de la teoría impactista y el hallazgo del cráter de Chicxulub ha sido narrada por ÁLVAREZ (1998). Además, un artículo nuestro de divulgación describe los efectos del impacto de Yucatán (ARZ *et al.*, 2000) y otro actualiza los datos y describe más detalladamente el evento de extinción (MOLINA, 2015).

El objeto de este artículo es poner de manifiesto el interés científico y cultural de este semicírculo de cenotes, que constituye una de las principales evidencias científicas del impacto meteorítico del límite Cretácico/Paleógeno y en torno a ellos se desarrolló la civilización maya.

## Interés científico

El evento de impacto meteorítico que produjo el cráter de Chicxulub y desencadenó la quinta gran extinción en masa, hace 66 millones de años, es uno de los temas que más

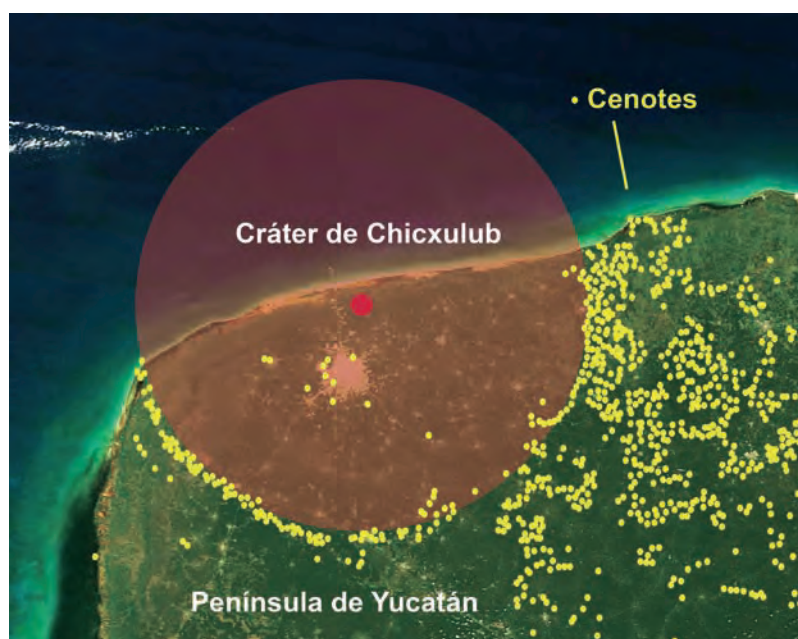


Figura 1. Disposición de los cenotes en el norte de la península de Yucatán. Modificado de POPE et al. (1991).



Figura 2. Cenote de abertura grande en las proximidades de X'Tut.  
Foto: Eustoquio Molina.

interés científico han despertado. La primera evidencia del impacto meteorítico, la anomalía de iridio, la encontraron en 1979 Louis y Walter ÁLVAREZ en Gubbio, Italia, siendo analizada por Frank ASARO y Helen MICHEL. En 1979 presentaron el hallazgo en un congreso y en 1980 publicaron la teoría impactista en la revista *Science*. Se trataba de un nivel con una gran concentración de iridio, elemento que es más frecuente en el espacio que en la Tierra, por lo que supusieron que era evidencia de un impacto meteorítico de más de 10 km de diámetro. Esto les llevó a proponer que los dinosaurios y otros muchos organismos se habían extinguido a consecuencia de los efectos catastróficos producidos por el impacto. Desde entonces se han descubierto diversas evidencias (cuarzos de choque, microtectitas, espinelas ricas en níquel, entre otras).

Entonces, la cuestión más candente era: ¿dónde se encontraba el enorme cráter de impacto? Hacia 1981 los geólogos de la compañía Petróleos Mexicanos, Antonio Camargo y Glen Penfield, ya habían detectado por medios geofísicos (magnetismo y gravedad) una gran estructura geológica circular al norte de la península de Yucatán, que inicialmente fue interpretada como de tipo ígneo, por lo que se tardó una década para concluir que era una estructura de impacto. En 1990 Alan Hildebrand buscando un candidato para el cráter contactó con Glen Penfield, encontraron muestras de son-

deos con metamorfismo de choque de la brecha de eyecta y pudieron concluir que esta estructura era el cráter del impacto que se estaba buscando (HILDEBRAND *et al.*, 1991).

Simultáneamente, POPE *et al.* (1991), inspeccionando imágenes de satélite de la región de Yucatán, encontraron un anillo de cenotes cuyo centro era también la localidad de Chicxulub (fig. 1). Al cartografiar los cenotes observaron que muchos de ellos se alineaban en un semicírculo, excepto otros que existen en la parte Este de la península de Yucatán y que no tienen relación con el cráter, pero que se habrían formado por similares fenómenos kársticos. La alineación semi-

circular se debe a que el borde del cráter constituye una zona fracturada con múltiples fallas, que es más propicia al desarrollo de los cenotes por su mayor permeabilidad. El gran interés del anillo de cenotes es que constituye la única evidencia en superficie del cráter que se encuentra enterrado en el norte de la península de Yucatán



Figura 3. Cenote de abertura pequeña por la que entran las raíces de la exuberante vegetación circundante. Foto: Marcelo Sola.



Figura 4. Guía impartiendo las instrucciones para explorar el cenote Sac Actún.  
Foto: Marcelo Sola.

y sumergido en el sur del golfo de México.

Los cenotes se disponen en un semicírculo de 160 km de diámetro y una anchura de 5 km. Se formaron preferentemente en las paredes internas del anillo principal del cráter que alcanza unos 180 km de diámetro. Según algunos el cráter podría alcanzar un diámetro máximo cercano a los 300 km, pero las anomalías de gravedad y los cenotes indican que no hay anillos más allá de los 170 km. Solo otro pequeño trozo de anillo de cenotes se encuentra exteriormente aumen-



Figura 5. Turistas explorando las cuevas y galerías del cenote Sac Actún.  
Foto: Marcelo Sola.

tando el radio unos 8 km en el oeste de la península de Yucatán. El cráter habría estado sumergido durante la mayor parte del Paleógeno y Neógeno, depositándose sedimentos principalmente margosos y calizos, con una potencia de aproximadamente 1.000 m. Bajo estos sedimentos casi horizontales se encuentran más de 500 m de vidrios andesíticos y brechas producidos por el impacto. Cuando la parte alta de los sedimentos carbonatados emergieron, el agua de esta cuenca los habría disuelto parcialmente creando cuevas y cenotes bajo la superficie.

El nivel del mar ha oscilado a lo largo de los tiempos geológicos debido al acúmulo de agua en los glaciares y casquetes polares durante los periodos fríos y a la fusión del hielo de estos durante los periodos cálidos. Durante el Cuaternario, desde hace 2,58 millones de años se intensificaron las glaciaciones, la península de Yucatán y consecuentemente el cráter de impacto permanecieron emergidos durante las glaciaciones. En la última glaciación hace unos 20.000 años el nivel del mar estuvo unos 100 m más

bajo que en la actualidad. Durante los periodos de emersión el agua cargada en dióxido de carbono disolvió los sedimentos carbonatados provocando cuevas subterráneas. Posteriormente en estas cavidades el agua rica en carbonatos formó estalactitas y estalagmitas. Finalmente, el techo de las cavidades mayores y más cercanas a la superficie colapsaron y así se formaron los cenotes, unas veces la abertura es grande (fig. 2) y otras pequeña (fig. 3). Este proceso es similar a las dolinas kársticas que se



Figura 6. Turistas bañándose en el cenote Ik Kil.  
Foto: Eustoquio Molina.

han formado en los alrededores de Zaragoza.

Los cenotes forman parte de un espectacular acuífero kárstico, que se extiende por 165.000 km<sup>2</sup> en la península de Yucatán, formando parte de México, Guatemala y Belice. Los cenotes son abundantes hacia el este fuera del anillo, pero el tipo grande de paredes verticales es más raro. Muchos carbonatos de Yucatán están fuertemente karstificados y muestran muchas galerías que constituyen el mayor sistema de cuevas sumergido del mundo. Se trata de una antigua plataforma carbonatada en el norte de la cual se encuentra el cráter de Chicxulub bordeado por los cenotes. El anillo de cenotes tiene una gran permeabilidad debido a fallas, permitiendo la circulación subterránea del agua más eficientemente que en los alrededores y por esto se produjo una mayor disolución de carbonatos. Este acuífero alberga grandes cantidades de recursos acuáticos, los cuales mantienen ecosistemas diversificados. Las partes del acuífero más cercanas al golfo de México y al mar Caribe están afectadas

por intrusiones de agua salada. La contaminación antropogénica del acuífero ha ido aumentando en las últimas décadas debido al crecimiento de la población y al desarrollo económico.

### Interés cultural

El gobierno de Yucatán desde 1995 ha realizado un inventario habiendo registrado 2.242 cenotes, de los cuales 900 serían representativos del anillo de cenotes. Según otro el semicírculo consta de 211 cenotes, que además de ser la evidencia visible en superficie del cráter de impacto de Chicxulub, tiene un interés cultural como patrón de distribución de yacimientos arqueológicos y poblaciones recientes. Los cenotes han generado condiciones favorables para el establecimiento de asentamientos humanos en una región donde el agua es relativamente escasa. De los 1.152 yacimientos arqueológicos conocidos el 65,45% están localizados sobre el cráter enterrado. El acuífero poco profundo y los cenotes permitieron a los antiguos habitantes mayas acceder al agua, con una tecnología

de la edad de piedra, sin necesidad de excavar muchos pozos, si bien realizaron túneles, pozos poco profundos y cisternas para almacenar agua. La relativamente alta densidad de población dentro del área del cráter de Chicxulub sugiere que el acceso al agua ha sido menos problemático, lo cual permitió a los mayas asentarse preferentemente en esta región desde hace aproximadamente 2.400 años, pero prosperaron sobre todo entre los siglos III y X. Sin embargo los hoy famosos yacimientos mayas no fueron conocidos prácticamente hasta que J. L. Stephens realizó un viaje por Yucatán en 1843, los publicó y los dio a conocer a la comunidad académica internacional (WINEMILLER, 2007).

La península de Yucatán está cubierta por selva de la que emergen yacimientos arqueológicos, que son las ruinas de la antigua civilización maya, la cual desarrolló una escritura, un sistema matemático y calendarios astronómicos. Además una compleja arquitectura de templos en pirámide, que construyeron sin herramientas



Figura 7. Inscripciones conmemorativas de los campeonatos mundiales de Clavados de Altura en el cenote Ik Kil. Foto: Eustoquio Molina.

de metal. Era una sociedad profundamente espiritual, que rendía culto a muchos dioses. Estas divinidades representaban las fuerzas de la naturaleza, los ciclos de la Tierra y el Cosmos. Realizaban ceremonias religiosas de sacrificios humanos para aplacar a los dioses. Desde el año 900 se conoce poco de los Mayas, los registros

escritos se interrumpieron y se cree que las grandes ciudades quedaron desiertas. La razón de este dramático declive sigue siendo un misterio y se especula que pudo deberse a guerras, hambrunas, enfermedades o desastres naturales. Cuando los descubridores españoles conquistaron esta región no encontraron la avanzada civilización, sino restos arqueológicos y personas muy atrasadas culturalmente. Los mayas actuales son de talla pequeña a mediana, de pelo negro y piel oscura, que aún se mantienen poco mestizados con la población inmigrante y mantienen vivas varias lenguas antiguas.

Los cenotes albergan restos de la civilización maya, las cuevas y galería con estalactitas y estalagmitas ahora están anegadas al haber subido el nivel del mar y consecuentemente el nivel freático. Aparte de servir para suministrarles agua, los cenotes han tenido un papel relevante en la cultura de esta civilización, al parecer los mayas creían que las cuevas constituían la entrada al inframundo del miedo gobernado por dioses y demonios, que controlaban las enfermedades y la muerte. También suponían que Chaac el dios de la lluvia habitaba en las profundidades. Los mayas creían que podían comunicarse con los dioses y apaciguarlos arrojando valiosos objetos



Figura 8. Guía maya explicando las características de las ruinas de Chichen Itzá. Foto: Eustoquio Molina.

a los cenotes, incluyendo piezas de oro, jade y cobre, y otras posesiones menos valiosas como cerámica y conchas. Además, se han encontrado huesos humanos, que algunos creen podrían proceder de sacrificios, la mayoría son de niños con collares de jade, aunque también habrían podido morir accidentalmente.

Los cenotes se comunican por un laberinto de cuevas que están actualmente inundadas por el agua, la cual se mantiene a temperatura de unos 25 °C, ligeramente más frías que las de los mares circundantes, y bajo el agua se encuentran numerosas estalactitas y estalagmitas. En los cenotes cercanos al mar puede haber una capa de agua salada más densa que la dulce de la superficie, en el contacto entre ambas capas se observan pequeños remolinos y tiene un tono más turbio. En algunos lugares hay cuevas cerca de la superficie del terreno que no están inundadas, pero la mayoría están inundadas y algunas pueden llegar a profundidades de 100 m, como ocurre en el sistema de cuevas de Dos Ojos. En la horizontal existen longitudes de túneles y cuevas intercomunicados que podrían llegar a 200 km en Ox Bel Ha.

Con equipos especiales de buceo, para evitar el riesgo de perderse o quedarse atrapado, se puede observar un proceso que ha quedado detenido. Las estalactitas y estalagmitas han detenido su formación al quedar sumergidas. Algunos de los cenotes más espectaculares son de una gran belleza y constituyen un atractivo turístico, organizándose en ellos distintas actividades. En los cenotes que tienen cuevas y galerías, como por ejemplo los de Sac Actún (fig. 4 y fig. 5) y X-Keken, se organizan sesiones de buceo y exploración. En otros como el cenote Ik Kil (fig. 6), se han organizado concursos internacionales de salto de trampolín (fig. 7) y ahora muchos turistas acuden a bañarse ya que está situado cerca de la zona arqueológica de Chichen Itzá (fig. 8). Debido a sus particulares atributos y belleza, los cenotes están protegidos, han sido declarados como patrimonio cultural por la UNESCO y han contribuido al desarrollo económico de la región.

## Conclusiones

El anillo de cenotes de Yucatán, del cual se observan más de 211 cenotes formando un semicírculo en el norte de la península, constituye la única evidencia visible desde satélite del cráter de unos 180 km de diámetro producido por el impacto de un gran meteorito. Esto ocurrió hace

66 millones de años, concretamente en el límite Cretácico/Paleógeno, siendo el causante de la extinción de los dinosaurios y otros grupos de organismos. Además, el interés de los cenotes es también cultural y económico, ya que al permitir el fácil acceso al agua dulce ayudó al desarrollo de la civilización maya y actualmente al turístico.

## Agradecimientos

Este artículo se ha realizado en el marco del proyecto de excelencia CGL2014-58794-P del Ministerio de Economía y Competitividad y del grupo consolidado E05 subvencionado por el Gobierno de Aragón y el Fondo Social Europeo. Asimismo, agradezco a José M. Grajales Nishimura, Instituto de Geología de la UNAM (México), por sus interesantes sugerencias.

## Referencias bibliográficas

- ÁLVAREZ, W. 1998. *Tyrannosaurus rex y el cráter de la muerte*. CRÍTICA (Grijalbo Mondadori, S.A.), Barcelona. 201 págs.
- ARZ, J.A., ARENILLAS, I., MOLINA, E. 2000. El impacto de un asteroide en Yucatán y la gran extinción del límite Cretácico/Terciario. *Ciencia UANL*, **3(2)**, 154-159.
- HILDEBRAND, A., R., PENFIELD, G.T., KRING, D.A., PILKINGTON, M. CAMARGO, A., JACOBSEN, S.B., BOYNTON, W.V. 1991. Chicxulub Crater: A possible Cretaceous/Tertiary boundary impact crater on the Yucatán Peninsula, Mexico. *Geology*, **19**, 867-871.
- MOLINA, E. 2015. Evidence and causes of the main extinction events in the Paleogene based on the extinction and survival patterns of foraminifera. *Earth-Science Reviews*, **140**, 166-181.
- POPE, K.O., OCAMPO, A.C., DULLER, C.E. 1991. Mexican site for K/T impact crater? *Nature*, **351**, 105.
- WINEMILLER, T.L. 2007. The Chicxulub meteor impact and ancient locational decisions of the Yucatán Peninsula, México: The application of remote sensing, GIS, and GPS in settlement pattern studies. ASPRS Annual Conference, Tampa, Florida. <http://www.asprs.org/a/publications/proceedings/tampa2007/0080.pdf>

n