



1 de junio de 2015 | Vol. 16 | Núm. 6 | ISSN 1607 - 6079

# ARTÍCULO

## EL CRÁTER DE IMPACTO CHICXULUB Y EL LÍMITE CRETÁCICO/PALEÓGENO

<http://www.revista.unam.mx/vol.16/num6/art46/>

*Jaime Urrutia Fucugauchi*

*(Investigador Titular en el Instituto de Geofísica, UNAM),*

*Ligia Pérez Cruz*

*(Investigador Titular y Jefa del Departamento de Exploración Geofísica y Geomagnetismo en el Instituto de Geofísica, UNAM)*

## EL CRÁTER DE IMPACTO CHICXULUB Y EL LÍMITE CRETÁCICO/PALEÓGENO

### Resumen

En el origen y evolución temprana del Sistema Solar, las colisiones, fragmentación y agregación de cuerpos de diferentes tamaños fueron el proceso que permitió la formación de planetesimales, satélites y planetas. Los impactos y formación de cráteres constituyen el proceso más importante que controla la evolución de las superficies planetarias en el Sistema Solar. En esta nota nos enfocamos en el cráter Chicxulub y el límite Cretácico/Paleógeno y en las implicaciones de impactos de asteroides y cometas que forman cráteres, así como en los efectos en la evolución del planeta y de la vida.

**Palabras clave:** Chicxulub, cráteres de impacto, asteroides, cometas, Sistema Solar, límite Cretácico/Paleógeno.

“  
Los impactos y formación  
de cráteres constituyen el  
proceso más importante que  
controla la evolución de las  
superficies planetarias en el  
Sistema Solar.  
”

### THE IMPACT CRATER CHICXULUB AND THE CRETACEOUS/PALEOGENE LIMIT

#### Abstract

*In the origin and early evolution of the Solar System, collisions, fragmentation and aggregation of different sized bodies were the process that allowed the formation of planetesimals, satellites and planets. Impacts and crater formation constitute major processes controlling the evolution of planetary surfaces in the Solar System. In this note we focus on the Chicxulub crater and the Cretaceous/Paleogene boundary, and the implications on crater forming impacts of asteroids and comets and the evolution of the planet and life.*

**Keywords:** Chicxulub, impact craters, asteroids, comets, Solar System, Cretaceous/Paleogene boundary.

## EL CRÁTER DE IMPACTO CHICXULUB Y EL LÍMITE CRETÁCICO/PALEÓGENO

### Introducción

Los impactos y formación de cráteres constituyen uno de los procesos fundamentales que controlan la evolución de las superficies planetarias en el Sistema Solar (Fig. 1). En el origen y evolución temprana de éste, los procesos que permitieron la formación de **planetesimales**, satélites y planetas, incluyen: la formación de **cóndrulos** e inclusiones de calcio-aluminio, las colisiones, y la fragmentación y agregación de cuerpos de diferentes tamaños.

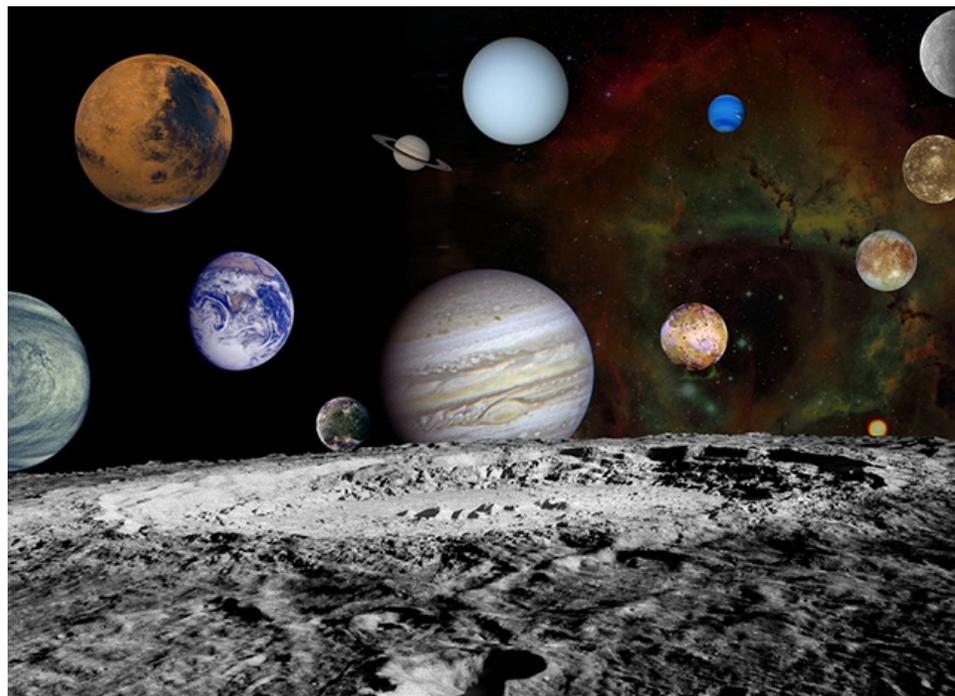
Parte de los estudios del origen del sistema planetario se basan en los **meteoritos** que caen en la Tierra, los cuales fueron formados en las etapas iniciales. En México tenemos uno de los **meteoritos** más estudiados, el Allende, que cayó en febrero de 1969 en Chihuahua y del que se recuperaron varias toneladas de material. Éste es parte de las **condritas carbonáceas** que son relativamente raras en comparación con las **condritas ordinarias**. Sus fragmentos fueron estudiados en diferentes laboratorios del mundo y en poco tiempo se convirtió en punto de referencia ya que aportó

#### Glosario

**Columna estratigráfica:** conjunto de capas diferentes de materiales, bajo la superficie de una zona en estudio, detectadas mediante señales de radar u otros métodos de penetración.

**Condritas:** meteoritos caracterizados por la abundancia relativa de cóndrulos e inclusiones de calcio-aluminio, dentro de una matriz de silicatos. Estos meteoritos no fueron afectados por fusión y se consideran materiales primitivos formados en las etapas iniciales de evolución del Sistema Solar. Se caracterizan por fechas radiométricas antiguas, determinadas en los cóndrulos e inclusiones de calcio-aluminio.

Figura 1. Imagen compuesta del cráter Schrödinger en la Luna y de planetas y satélites en el Sistema Solar. El cráter Schrödinger presenta un anillo anular de montañas en el sector central, similar al anillo del cráter Chicxulub [imagen cortesía de NASA y Jet Propulsion Laboratory].



nuevas evidencias sobre la composición de la nebulosa solar, nuevos minerales, la explosión de una supernova en la formación del Sol y nuevos datos sobre la conformación de **planetesimales** y el sistema planetario. La condrita Allende continúa siendo intensamente investigada, aportando novedosos datos sobre el origen del Sistema Solar (p. ej. CARPORZEN *et al.*, 2010; FLORES *et al.*, 2010; URRUTIA *et al.*, 2014).

## Cráteres de impacto

**Figura 2.** Imagen de la superficie de la Luna, caracterizada por cráteres de impacto de diferentes tamaños y morfologías. En la imagen se observa el cráter Ticho en el hemisferio sur que preserva las capas asimétricas de eyecta en forma de franjas o rayos asociadas a la dirección de impacto [tomada de archivo NASA].

Los cráteres de impacto caracterizan las superficies de los cuerpos sólidos en el sistema, son muy numerosos y tienen un amplio rango de tamaños, morfologías y distribución (MELOSH, 1989; PIERAZZO y MELOSH, 2000; HEAD *et al.*, 2010). En la superficie de la Luna se pueden observar algunos con fondo plano, picos centrales, simples y sobre-posición de cráteres, que permiten establecer la secuencia de colisiones proporcionando una cronología y edad relativa de las superficies (Fig. 2). El estudio de estos fenómenos, así como sus morfologías y distribución, permite investigar también las características del interior, espesores de la corteza y los procesos tectónicos (URRUTIA y PÉREZ CRUZ, 2009).



Las imágenes de la topografía de Marte obtenidas en las misiones planetarias recientes han documentado numerosos cráteres de impacto (HARTMANN y NEUKUM, 2001; WATTERS *et al.*, 2007). Las representaciones tridimensionales indican una distribución asimétrica con mayor abundancia de impactos en el hemisferio sur, incluyendo los cráteres grandes.

En las etapas tempranas de evolución del Sistema Solar, las colisiones fueron más frecuentes. El sistema Tierra-Luna es producto de una colisión con un cuerpo del tamaño de Marte, que permite que el satélite de la Tierra sea comparativamente más grande que en otros planetas en el sistema (CANUP y ASPHAUG, 2001). En las etapas iniciales de evolución, los impactos controlaron la formación de las primeras cortezas terrestres y la evolución temprana del planeta y de la vida.

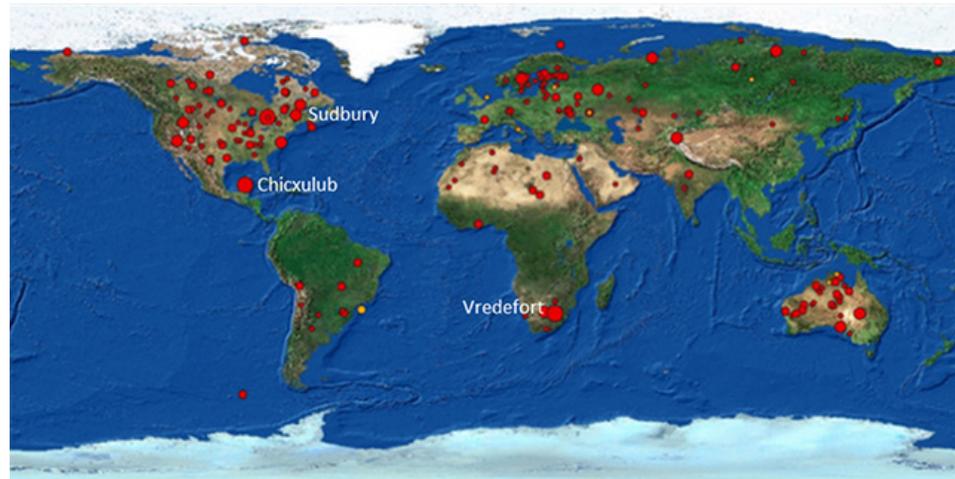
En la Tierra, el número documentado de cráteres es reducido, siendo alrededor de 180 (Fig. 3) debido a los procesos que modifican la superficie, como la erosión y actividad volcánica y tectónica. Los cráteres terrestres han sido estudiados a partir de la identificación de algunas de las estructuras desde la década de los sesenta (MELOSH, 1989).

En el registro terrestre se han documentado tres cráteres complejos del tipo multianillos (Fig. 3). Sudbury en Canadá y Vredefort en África del Sur se formaron hace unos 2000 Ma (millones de años) y están significativamente erosionados y modificados. Chicxulub se formó hace 66 Ma en la plataforma de Yucatán.

La propuesta de ALVAREZ *et al.* (1980) de un impacto de grandes dimensiones para explicar las extinciones masivas de finales de la era Mesozoica constituyó un factor

importante para incrementar el interés en estudiar los impactos y los cráteres. En ese tiempo, el número de cráteres documentados era reducido y no se conocían cráteres con las características y edades de formación que pudieran relacionarse. Ello abrió la búsqueda del posible sitio de impacto, lo que motivó las exploraciones sobre estructuras aún no reconocidas.

**Figura 3.** Cráteres de impacto en el registro terrestre. En él se tienen documentados tres cráteres complejos multianillo: Sudbury en Canadá, Vredefort en África del Sur y Chicxulub en México.



## La capa de iridio

El impacto y la extinción están marcados en el registro geológico por una delgada capa de unos cuantos centímetros o milímetros de espesor, depositada en los sedimentos marinos y continentales (ALVAREZ *et al.*, 1980; SCHULTE *et al.*, 2010). Ésta está formada por una capa basal de esferitas submilimétricas (**esferulitas**) y por una capa de arcilla que marca la transición entre las eras Mesozoica y Cenozoica (Figura 4).

En las rocas debajo de la capa se encuentran restos de organismos de la era Mesozoica, conocida informalmente como la “Era de los dinosaurios”, por ser este grupo el que predominó en ese tiempo, y por arriba de la capa, en la era Cenozoica, se encuentran restos de fósiles de los primeros mamíferos.

La capa está formada por la sedimentación del polvo y material fragmentado en el impacto y es la única capa que representa un marcador global en la Tierra. Otra capa, que tiene una distribución similar, es la generada por elementos radioactivos como el plutonio, producidos en las detonaciones de bombas nucleares en superficie en la década de los cuarenta.

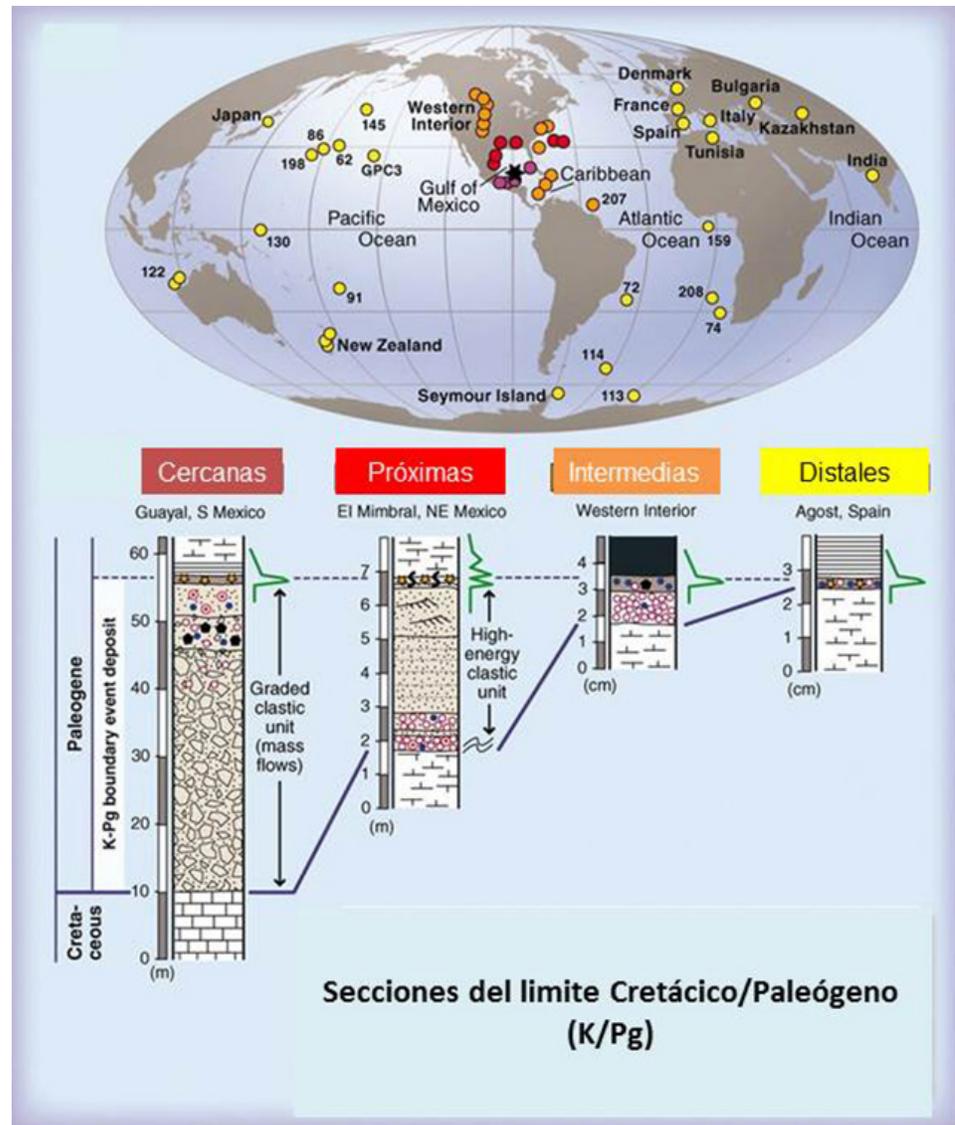
El impacto marca un evento súbito en escalas de segundos a horas y meses, con efectos a largo plazo. La capa de **esferulitas** representa material eyectado en

**Condritas carbonáceas o carbonosas:** meteoritos rocosos primitivos con gran abundancia de carbón.

**Condritas ordinarias:** meteoritos caracterizados por la abundancia de cóndrulos y que constituyen la clase más abundante de meteoritos caídos o recolectados. Se subdividen de acuerdo con los contenidos relativos de elementos metálicos (proporción relativa de hierro).

tiros parabólicos del punto de impacto y presenta una anomalía característica de iridio y elementos del grupo del platino que son la evidencia del impacto. Una buena parte del material escavado y fragmentado es eyectado a velocidades mayores que la de escape, saliendo del planeta. La eyecta de grano fino fue distribuida globalmente y bloqueó la radiación solar en el planeta interrumpiendo los procesos de fotosíntesis y causando un enfriamiento global. El material fino se depositó, formando la capa de arcilla que marca el límite Cretácico/Paleógeno (en adelante referido como K/Pg) (ALVAREZ *et al.*, 1980; SCHULTE *et al.*, 2010).

Figura 4. Distribución y representación esquemática de las secciones estratigráficas del límite Cretácico/Paleógeno con la capa del impacto (SCHULTE *et al.*, 2010). Se observan las diferencias entre las secciones distales e intermedias y las secciones próximas y cercanas en el Golfo de México.



## El límite K/Pg, impacto y extinciones

La anomalía geoquímica que caracteriza el límite K/Pg en las secciones distales inicialmente estudiadas está relacionada a la capa basal de **esferulitas**. En las secciones en el Golfo de México y Mar Caribe, la anomalía de iridio está asociada a la capa de grano fino que representa el reingreso del material fragmentado y eyectado. Los fragmentos en reingreso calientan la parte superior de la atmósfera generando un pulso térmico que alcanza la superficie y que ha sido referida como *la bola de fuego*. Ello generó incendios globales, afectó la vegetación y causó la muerte de organismos que habitaban la superficie del planeta.

En la zona del Golfo de México y Mar Caribe las secuencias del límite tienen espesores de varios metros y una estructura más compleja, con una capa basal con **esferulitas** y una superior de arcilla. Intermedio se encuentran depósitos de arenas de alta energía que representan depósitos de tsunamis y una capa de grano fino con características de calentamiento a temperaturas arriba de unos 300 °C (Figura 4).

El impacto ocurrió cuando el Golfo de México estaba en formación, en una plataforma sumergida que permitió la generación de tsunamis de grandes proporciones. En años recientes, estos fenómenos en los océanos Índico y Pacífico provocaron grandes daños y pérdidas de vidas, con olas de unos 10 a 15 m que afectaron costa adentro cientos de metros. El tsunami de Chicxulub generó olas con alturas del orden de unos 150 a 300 m y penetró costa adentro cientos de kilómetros.

Los efectos en la zona cercana fueron de grandes proporciones, lo cual ha quedado registrado en los sedimentos en las zonas próximas y distales, que permiten la investigación de la evolución de ecosistemas total o parcialmente afectados y los procesos en los distintos ambientes costeros, plataformas y mar profundo, así como en el interior de los continentes. Los registros sedimentarios marinos en la costa atlántica muestran los sedimentos cretácicos en la base y los del Paleógeno en la cima, caracterizados por distintos grupos faunísticos. Intermedio están los depósitos de material fragmentado que constituyen la eyecta y, sobre ellos, una capa conocida como *capa de los océanos vacíos*, caracterizada por la ausencia de restos de organismos, misma que había sido estudiada anteriormente sin encontrar causas aparentes. Los estudios para cuantificar el tiempo representado por la capa de los océanos vacíos permitirán estimar el tiempo que le tomó a la vida recobrase en los océanos en las zonas cercanas al sitio de impacto.

Los estudios iniciales a partir de la propuesta de ALVAREZ *et al.* (1980) se enfocaron en los organismos extintos y los mecanismos que generaron los cambios, mientras

**Cóndrulos:** objetos de composición silícea de forma esférica o de gota de tamaños sub-milimétricos encontrados en las condritas. Se forman a partir de polvo rico en sílice que es fundido y enfriado en corto tiempo, durante las fases iniciales de evolución de la nebulosa solar.

**Esferulitas:** pequeños objetos de forma cuasi esférica o elipsoidal que llegan a formarse en rocas ígneas vítreas. En fenómenos de impactos meteoríticos, pequeñas esferas submilimétricas formadas durante el vuelo parabólico del material eyectado surgido de la compresión del terreno por el impacto.

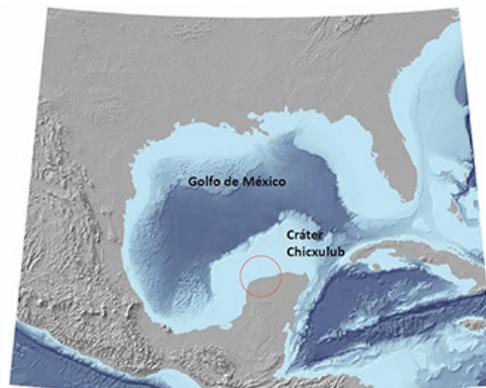
**Firma gravimétrica:** conjunto de datos del campo gravitatorio que caracterizan alguna región en estudio, que pueden desplegarse en grupos de gráficos para mostrar su estructura.

**Imagen de interferometría de radar:** imagen formada por la interferencia constructiva y destructiva de señales de radar de dos o más frentes de onda.

que, en los últimos años, se ha manifestado un interés creciente en los que sobrevivieron, en aquéllos que se extinguen tiempos cortos después del impacto y en los mecanismos de diversificación, con un conjunto nuevo de interrogantes y posibilidades. Los mamíferos coexistieron con los dinosaurios buena parte del tiempo, ocupando nichos ecológicos marginales y tamaños pequeños. En unos 10 Ma, especies de mamíferos desarrollaron tamaños mayores alcanzando masas corporales de varias toneladas. Estos estudios han abierto nuevas interrogantes, como cuántas generaciones y tiempo toman estos procesos, cuáles son los tamaños corporales máximos, o cómo son las relaciones con la extensión de las áreas continentales, entre otras.

## El cráter Chicxulub

**Figura 5.** Localización del cráter Chicxulub en la plataforma carbonatada de Yucatán, Golfo de México (URRUTIA *et al.*, 2011).



El cráter Chicxulub está localizado en la plataforma carbonatada de Yucatán, en el sur del Golfo de México (Fig. 5). El cráter fue inicialmente identificado a partir de los trabajos de exploración por parte de Petróleos Mexicanos en el sur de México (PENFIELD y CAMARGO ZANOQUERA, 1981). Las estructuras del cráter no están expuestas en superficie, se encuentran cubiertas por unos 800-1000 m de sedimentos carbonatados. Su estudio requiere de métodos geofísicos y de perforaciones.

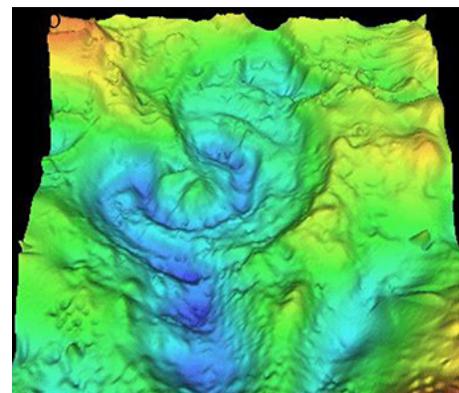
El cráter está caracterizado por una firma gravimétrica con patrones concéntricos semi-circulares, con su estructura de multianillos (Figura 6).

La morfología de anillos puede observarse en la anomalía de gradiente horizontal de gravimetría (Fig. 7). En superficie la estructura sepultada por alrededor de un kilómetro de rocas carbonatadas se contempla en la imagen de interferometría de radar de la península, donde se aprecian los rasgos semicirculares, marcados por una ligera depresión y el anillo de cenotes (Figura 8).

La depresión y anillo representan la proyección en superficie del borde del cráter, formado por compactación diferencial de las brechas de fragmentos en el centro comparada con las rocas más compactas alrededor. El tamaño del cráter se aprecia en la imagen (Fig. 8), con la mayor parte del estado de Yucatán dentro de la mitad del cráter, que tiene su centro geométrico en Chicxulub Puerto en la línea de costa.

La anomalía gravimétrica positiva en la zona central del cráter está asociada a anomalías magnéticas (PILKINGTON y HILDEBRAND, 2000; URRUTIA *et al.*, 2011; Figura 9). El levantamiento central produce una anomalía magnética de alta amplitud, que pre-

**Figura 6.** Anomalía gravimétrica del cráter Chicxulub, mostrando su estructura de multi-anillo (tomada de SHARPTON *et al.*, 1993).



senta polaridad inversa y que está relacionada a magnetizaciones remanentes de polaridad reversa (ORTIZ ALEMÁN y URRUTIA, 2010). La ocurrencia de magnetizaciones remanentes de polaridad reversa es consistente con la edad determinada por métodos radiométricos en las unidades de brechas y roca fundida de 66 Ma (SHARPTON *et al.*, 1992), que corresponde al periodo reverso 29r en la escala de inversiones de polaridad del campo geomagnético.

Figura 7. Gradiente horizontal de la anomalía gravimétrica, mostrando la distribución de los anillos y la correlación con el anillo de cenotes (CONNORS *et al.*, 1996).

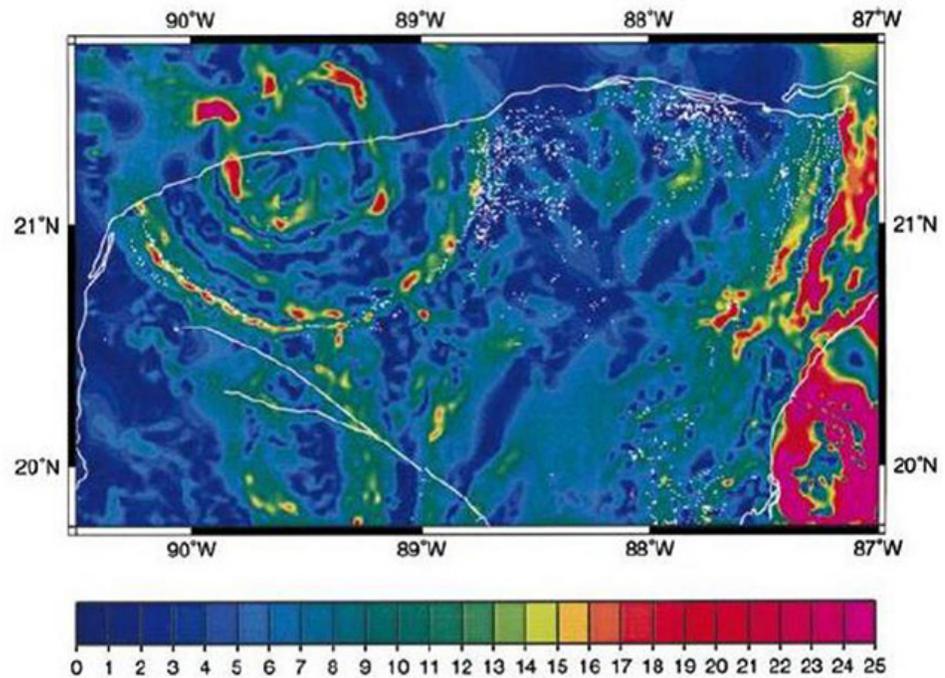
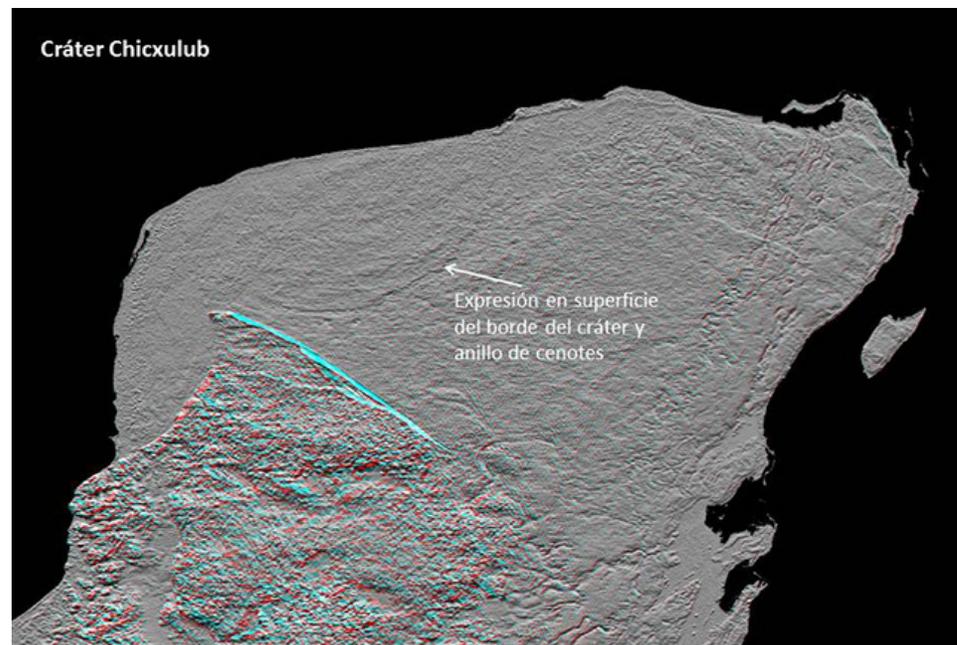


Figura 8. Imagen satelital de interferometría de radar de la península de Yucatán [cortesía de NASA Jet Propulsion Laboratory], mostrando la proyección en superficie del borde del anillo del cráter (URRUTIA *et al.*, 2008).

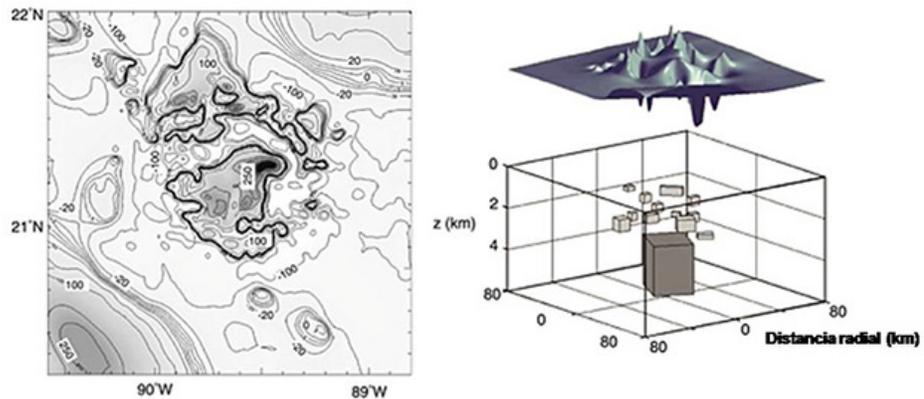


Las rocas de impacto y las secuencias carbonatadas post y preimpacto han sido investigadas en los programas de perforaciones (Figura 10). De ellos, los que hemos desarrollado han incluido recuperación continua de núcleos, lo cual permite investigar la columna estratigráfica y obtener muestras para los análisis de laboratorio. Como parte de estos estudios se tienen alrededor de seis mil metros de núcleos de perforación (URRUTIA *et al.*, 2008; 2011). Éstos permiten analizar los acuíferos subterráneos y la evolución de la península con los cambios del nivel del mar.

## Importancia del estudio del cráter Chicxulub

El impacto Chicxulub es el de mayores dimensiones documentado en los últimos 600 Ma. Los efectos del impacto produjeron efectos en el sistema climático y ambiente a nivel global que afectaron los sistemas de soporte de vida en el planeta, mismos que ocasionaron la extinción de organismos, de alrededor del 75% de las especies, marcando el final de la era Mesozoica. Éste es uno de los eventos mayores de la evolución de la vida en el planeta, que permitió la diversificación de los mamíferos y eventualmente de los primates y los humanos.

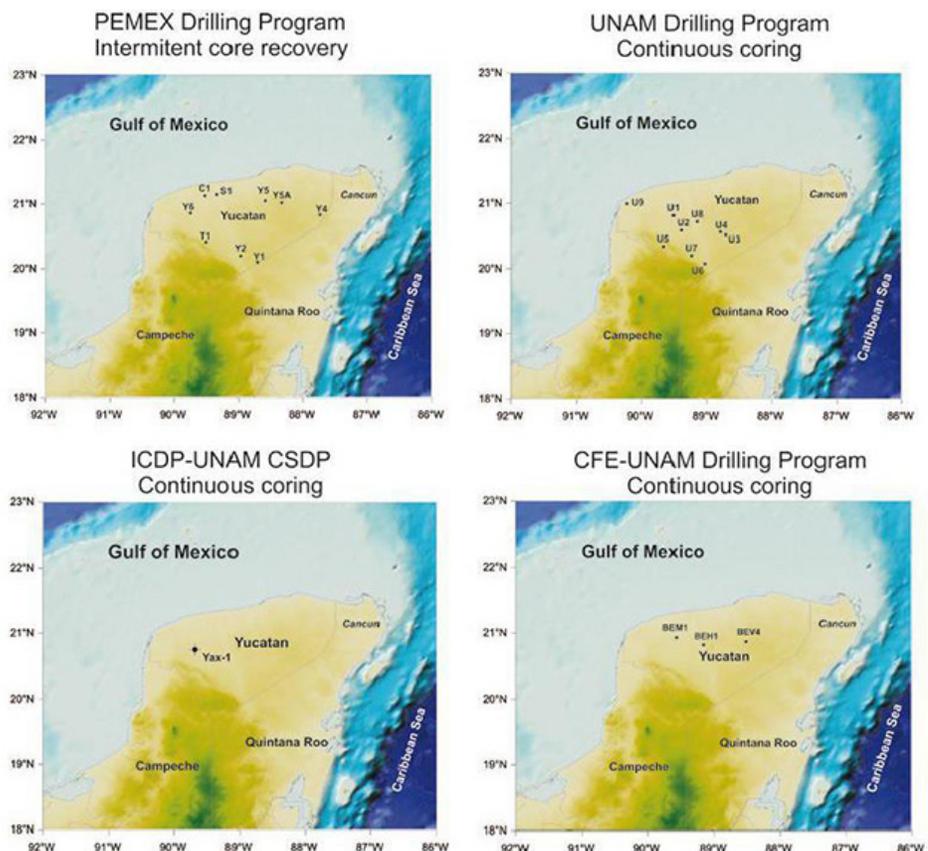
**Figura 9.** Anomalia aeromagnética del sector central del cráter Chicxulub y modelo magnético tridimensional (ORTIZ-ALEMÁN y URRUTIA, 2010). La respuesta magnética está asociada al levantamiento central formado por rocas del basamento y unidades de brechas y roca fundida en la zona arriba del levantamiento central.



Adicionalmente al interés de estudiar los impactos y los efectos en la evolución de las superficies planetarias y los efectos en los sistemas de soporte de vida y relaciones con las extinciones, se tienen otros factores que incluyen aspectos aplicados sobre recursos energéticos y minerales, hidrogeología, entre otros. La deformación en la zona provocó el colapso del borde de la plataforma, produciendo las brechas de carbonatos en el sur del Golfo de México, las cuales contienen acumulaciones de hidrocarburos. La presencia del cráter en el subsuelo de la península es uno de los factores mayores en el flujo de agua subterránea en la península, a través de los patrones de fracturamiento y deformación en las secuencias carbonatadas. En los proyectos en marcha se investigan los procesos de sedimentación, la evolución climática durante el Paleógeno, los acuíferos subterráneos y la evolución de la península con los cambios del nivel del mar (URRUTIA y PEREZ CRUZ, 2008; URRUTIA *et al.*, 2008).

Los estudios sobre los cráteres sepultados han modificado la cartografía geológica-estratigráfica basada en el número y densidad de cráteres. Las observaciones sobre los rasgos en superficie asociados al cráter Chicxulub proporcionan indicaciones para el reconocimiento de patrones en cráteres sin expresión en superficie. Estos rasgos incluyen la depresión topográfica y los patrones de fracturamiento radial generados por el compactamiento diferencial de las brechas dentro del cráter. La correlación entre los modelos geofísicos de la estructura del cráter con las zonas de terrazas, levantamiento central y posición y distribución de las unidades de impacto permite hacer inferencias sobre las estructuras observadas en la Luna, Marte y otros cuerpos.

Figura 10. Programas de perforación y localización de pozos perforados en Chicxulub y la península de Yucatán (URRUTIA FUCUGAUCHI *et al.*, 2011).



## Nuevas interrogantes

Los procesos geológicos como el movimiento de placas, formación de océanos o cadenas montañosas implican tiempos geológicos largos. En contraste, los impactos involucran tiempos cortos y liberación alta de energía. Las simulaciones numéricas de impactos indican una secuencia para los procesos de excavación de la cavidad transitoria, fragmentación y eyección de material de la corteza en periodos de unos cuantos segundos (COLLINS *et al.*, 2008). Estos procesos se inician a partir del contacto con la atmosfera y la excavación en la cavidad transitoria que involucra gran parte de la corteza. En unas decenas de segundos, la excavación ha generado una nube de eyecta con cortinas laterales

y deformación de la zona de impacto y se inician los procesos de rebote en la corteza inferior y manto superior, con la formación de un levantamiento central que alcanza varios km arriba de la superficie que luego colapsa.

La manera en la que actúan las rocas en este tipo de deformación, con comportamientos fluidos y frágiles, así como la forma en que se interrelacionan eventos extremos súbitos en los procesos tectónicos de formación de océanos y continentes, y qué registro dejan en las rocas, han generado nuevos campos de estudio.

Otra de las interrogantes planteadas es la naturaleza y el lugar de procedencia del asteroide que formó Chicxulub, que plantea a su vez otras preguntas: ¿cuál es la frecuencia de impactos de estos tamaños?, ¿el cuerpo impactador era parte de los asteroides que cruzan las órbitas de los planetas interiores o del cinturón de asteroides?

## Agradecimientos

Los estudios del impacto y cráter forman parte de los proyectos del Programa de Investigaciones Chicxulub y del Programa Universitario de Perforaciones en Océanos y Continentes. Agradecemos a Daniel Flores Gutiérrez la invitación para contribuir con esta nota sobre el cráter Chicxulub y los comentarios y sugerencias editoriales en la versión inicial. Resultados de los estudios han sido presentados en las conferencias de El Colegio Nacional, como parte de sus programas de actividades. Apoyo parcial es proporcionado por el proyecto PAPIIT IG-101115. 🌟

**Meteoritos:** cuerpos de origen externo a la Tierra que ingresan a la atmósfera y alcanzan la superficie. Los meteoritos tienen diferentes orígenes a partir de asteroides, núcleos cometarios o fragmentos de cortezas de otros planetas y satélites eyectados en impactos. Se clasifican en pétreos, metálicos y pétreo-metálicos, caracterizados por composiciones químicas y mineralógicas diferentes.

**Planetesimales:** pequeños cuerpos surgidos de la aglomeración de pequeñas partículas en un disco protoplanetario.

**Rebote litostático:** en el caso de impactos de meteoritos, es el fenómeno de reflexión de la onda de compresión al llegar a la litosfera, que induce la formación de una protuberancia central en la superficie impactada.

## Bibliografía

- [1] ALVAREZ, L. W., W. Álvarez, F. Asaro y H. V. Michel, "Extraterrestrial cause for the Cretaceous–Tertiary extinction", *Science*, 1980, vol. 208, Núm. 4448, pp.1095-1108.
- [2] CANUP, R.M. y E. Asphaug, "Origin of the Moon in a giant impact near the end of the Earth's formation", *Nature*, 2001, Núm.412, 708-712.
- [3] COLLINS, G.S. *et al.*, "Dynamic modeling suggests terrace zone asymmetry in the Chicxulub crater is caused by target heterogeneity", *Earth Planetary Science Letters*, 2008, vol. 270, 221-230.
- [4] CONNORS, M., *et al.*, "Yucatan karst features and the size of Chicxulub crater", *Geophys. J. Int.*, 1996, vol. 127, Núm. 3, pp. F11-F14.
- [5] DELGADO, O. *et al.*, "1-D inversion of magnetotelluric soundings in the Chicxulub impact crater, Yucatan, Mexico", *Geofis.Int.*, 2001, vol. 40, Núm. 4, pp. 271-283.
- [6] FLORES-GUTIERREZ, D. *et al.*, "Scanning electron microscopy characterization of iron, nickel and sulfur in chondrules from the Allende meteorite - Further evidence for between-chondrules major compositional differences", *Rev. Mex. Ciencias Geol.*, 2010, vol. 27, Núm. 2, pp. 338-346.
- [7] GULICK, S. P. S., *et al.*, "Importance of pre-impact crustal structure for the asymmetry of the Chicxulub impact crater", *Nat. Geosci.*, 2008, Núm.1, pp. 131–135, doi:10.1038/ngeo103.
- [8] HARTMANN, W.K. y G. Neukum, "Cratering chronology and the evolution of Mars", *Space Science Reviews*, 2001, vol. 96, pp.165-194.
- [9] HEAD, J.W. *et al.*, "Global distribution of large Lunar craters: Implications for resurfacing and impactor populations", *Science*, 2010, vol. 329, pp. 1504-1507.
- [10] HILDEBRAND, A. R. *et al.*, "Chicxulub crater: A possible Cretaceous/Tertiary boundary impact crater on the Yucatán Peninsula, Mexico", *Geology*, 1991, vol. 19, Núm. 9, pp. 867-871.
- [11] HILDEBRAND, A. *et al.*, "Mapping Chicxulub crater structure with gravity and seismic data", en Grady, R. *et al.* (Eds.) *Meteorites: Flux with Time and Impact Effects*, London: Geological Society Special Publication, Núm. 140, 1998, pp. 155-176.
- [12] KRING, D.A., L. Horz, L. Zurcher, y J. Urrutia Fucugauchi, "Impact lithologies and their emplacement in the Chicxulub impact crater: Initial results from the Chicxulub scientific drilling project, Yaxcopoil, Mexico", *Meteoritics and Planetary Science*, 2004, vol. 39, pp. 879-897.

- [13] MELOSH, H.J., "Impact Cratering: A Geologic Process", New York: Oxford University Press, 1989, 245 pp.
- [14] MORGAN, J. *et al.*, "Chicxulub crater seismic survey prepares way for future drilling", *Eos Trans. AGU*, 2005, vol. 86, Núm. 36, p. 325, doi:10.1029/2005EO360001.
- [15] ORTIZ-ALEMAN, C. y J. Urrutia Fucugauchi, "Central zone structure and magnetic sources in the Chicxulub crater, as derived from three-dimensional modeling of aeromagnetic anomalies", *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2010, vol. 179, p. 127-138.
- [16] PENFIELD, G. T., y Z. A. Camargo, "Definition of a major igneous zone in the central Yucatán platform with aeromagnetism and gravity", *SEG Tech. Program Abstr.*, 1981, Núm.51, pp. 37.
- [17] PIERAZZO, E. y H.J. Melosh, "Understanding oblique impacts from experiments, observations, and modeling", *Annual Reviews of Earth and Planetary Science*, 2000, vol. 28, 141-167.
- [18] PILKINGTON, M. y A.R. Hildebrand, "Three-dimensional magnetic imaging of the Chicxulub crater", *Journal of Geophysical Research*, 2000, vol. 105, pp. 23479-23491.
- [19] SHARPTON, V.L. *et al.*, "New links between the Chicxulub impact structure and the Cretaceous/Tertiary boundary", *Nature*, 1992, vol. 359, pp. 819-821.
- [20] SHARPTON, V. L. *et al.*, "Chicxulub multiring impact basin: Size and other characteristics derived from gravity analysis", *Science*, 1993, vol. 261, Núm. 5128, pp.1564–1567, doi:10.1126/science.261.5128.1564.
- [21] SCHULTE, P. *et al.*, "The Chicxulub asteroid impact and mass extinction at the Cretaceous-Paleogene boundary", *Science*, 2010, vol.327, pp.1214-1218.
- [22] URRUTIA FUCUGAUCHI, J. y L. Pérez Cruz, "Post-impact carbonate deposition in the Chicxulub impact crater region, Yucatan platform, Mexico", *Current Science*, 2008, vol. 95, pp. 241-252.
- [23] ————— "Multiring-forming large bolide impacts and evolution of planetary surfaces", *International Geology Review*, 2009, vol. 51, pp. 1079-1102.
- [24] URRUTIA FUCUGAUCHI, J., J. M. Chavez-Aguirre, L. Pérez-Cruz, J. L. de la Rosa, "Impact ejecta and carbonate sequence in the eastern sector of Chicxulub crater", *C. R. Geosci.*, 2008, vol. 340, Núm. 12, pp. 801–810, doi:10.1016 /j.crte.2008.09.001.
- [25] URRUTIA FUCUGAUCHI, J., A. Camargo-Zanoguera y L. Pérez-Cruz, "Discovery and focused study of the Chicxulub impact crater", *EOS (Trans. Am. Geophys. Union)*, 2011, vol.92, pp.209–216.

- [26] URRUTIA FUCUGAUCHI, J., A. Camargo, L. Pérez-Cruz y G. Pérez-Cruz, "The Chicxulub multi-ring impact crater, Yucatan carbonate platform, Gulf of Mexico", *Geofis. Int.*, 2011, vol. 50, Núm.1, pp. 99–127.
- [27] URRUTIA FUCUGAUCHI, J., L. Pérez Cruz, y D. Flores Gutiérrez, "Meteorite paleomagnetism – From magnetic domains to planetary fields and core dynamos", *Geofis. Int.*, 2014, vol. 53, pp. 343-363.
- [28] WATTERS, T.R., P.J. McGovern y R.P. Irving III, "Hemispheres apart: The crustal dichotomy of Mars", *Annual Reviews Earth Planetary Science*, 2007, vol. 35, pp.621-652.