

# MODELIZACIÓN DE CRÁTERES DE IMPACTO

CARLOS TADEO GÁLVEZ y JESÚS ORDOÑO FERNÁNDEZ

2º Bachillerato (curso 2009-2010)

Tutor: JOAN ALBERICH CARRAMIÑANA

Institut Frederic Mompou, av. Mas Picó 69, 08620, Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

## Breve resumen de la investigación

El objetivo de la investigación llevada a cabo en este trabajo ha sido establecer un modelo matemático sencillo que determine las características de un cráter de impacto (diámetro y profundidad del mismo, y radio de los eyecta) a partir de las del objeto que lo causó (velocidad de impacto y diámetro del meteorito) y viceversa. El trabajo posterior se ha centrado en investigar la validez del modelo en cráteres terrestres reales y, finalmente, en su aplicación para, por un lado, estimar las dimensiones de los meteoritos que causaron distintos cráteres terrestres, y por otro, predecir las consecuencias catastróficas de la caída de asteroides sobre la Tierra.

El método de trabajo empleado ha consistido en simular los cráteres mediante lanzamientos de canicas esféricas de distintas medidas y materiales, lanzadas desde seis alturas distintas para que, de cada canica, hubiese seis velocidades de impacto sobre una superficie dispuesta en capas de arena, mortero y talco, cuyo grosor y características fue establecido previamente para la idoneidad de la formación de los cráteres. En total se han realizado 1050 lanzamientos, y en cada uno se han medido las características del cráter producido y las de la canica que lo causó.

Posteriormente, a partir de los datos obtenidos, se han buscado relaciones entre las características de los cráteres y las de las canicas. Se han utilizado tablas y gráficas. Además, el estudio de herramientas matemáticas como la recta de regresión o el coeficiente de correlación lineal han permitido decidir qué relaciones eran las más ajustadas.

Se han encontrado las siguientes relaciones, bautizadas como *ley de Ordeo*:

El diámetro del cráter y el radio de los eyecta son directamente proporcionales a la velocidad de impacto y al diámetro de la canica según las fórmulas siguientes:

$$D_{\text{cráter}} = (0,19 \cdot v + 0,17) \cdot D_{\text{canica}} \quad R_{\text{eyecta}} = 0,8 \cdot v \cdot D_{\text{canica}}$$

en donde  $v$  es la velocidad de impacto de la canica medida en m/s.

Para verificar la validez del modelo en cráteres reales terrestres se ha usado como parámetro de control Meteor Crater de Arizona. Los resultados confirman que las fórmulas descubiertas en la ley de Ordeo se ajustan a este cráter con un escalado de dos órdenes de magnitud, práctica habitual en este tipo de estudios y coherente si se tiene en cuenta que la superficie de impacto real es roca dura y no materiales sin compactar. Así pues, la ley de Ordeo se reformuló a la luz de estos resultados de la manera siguiente ( $v$  en m/s):

$$D_{\text{cráter}} = \frac{0,19 \cdot v + 0,17}{100} \cdot D_{\text{meteorito}} \quad R_{\text{eyecta}} = \frac{0,8 \cdot v}{100} \cdot D_{\text{meteorito}}$$

El estudio posterior ha consistido en aplicar estas fórmulas a cráteres terrestres reales, de los cuales se ha estimado el diámetro del meteorito que los causó. Las fórmulas también se han aplicado para hacer predicciones de las dimensiones del cráter que originarían asteroides cercanos a la Tierra si cayeran sobre ésta. De los asteroides seleccionados, se ha elaborado un mapa centrado en la ciudad de Barcelona en el que se sobreponen dos círculos,

correspondientes a los cráteres que originarían dichos asteroides y a los eyecta que saldrían despedidos en el impacto.

### **Introducción, motivación, antecedentes e investigaciones previas sobre el tema**

Este estudio de los cráteres de impacto se gestó a raíz de nuestro interés por temas de astrofísica. La lectura del libro de Ricardo Moreno *Actividades sencillas de astrofísica* (Moreno 2003) nos proporcionó una gran variedad de ideas sobre las que empezar a trabajar. El hecho de vivir relativamente cerca del cráter de Azuara, Zaragoza, nos impulsó a focalizar definitivamente el tema sobre los cráteres de impacto.

Los impactos de asteroides y cometas han jugado un papel importante en la historia geológica y biológica de la Tierra. Hoy en día es ampliamente aceptado que uno de estos impactos, hace 65 millones de años, causó una catástrofe global en la cual se produjo la extinción de los dinosaurios y de muchas otras formas biológicas (Álvarez 1980, Bottke 2007). La consecuencia de estos estudios ha sido el creciente interés sobre los impactos de meteoritos por parte de la comunidad científica y de la opinión pública en general, atrayendo incluso el interés de los cineastas de Hollywood (*Armageddon*, dirigida por Michael Bay 1998; *Deep impact*, dirigida por Mimi Leder 1998).

Los asteroides son cuerpos celestes rocosos y metálicos que se formaron en los inicios del Sistema Solar, aproximadamente hace 4600 millones de años y que orbitan alrededor del Sol. La gran mayoría se encuentran en el *Cinturón de Asteroides*, zona comprendida entre las órbitas de Marte y Júpiter. Esta zona recoge más de 2.000 asteroides con dimensiones muy diferentes. Las dimensiones de un asteroide son muy variables, puede tener unas dimensiones como las de un grano de polvo o puede ser tan grande como un planeta menor, como el asteroide Ceres, de 914 km de diámetro. Hay dos teorías que explican el origen de los asteroides (Gibilisco 1991). La primera nos dice que los asteroides son el resultado de la materia que se dispersó a causa de un choque entre un planeta con otro cuerpo celeste. La otra teoría dice que los asteroides provienen de la materia que originó el Sistema Solar y que no se llegó a compactar en un planeta por culpa de la fuerte atracción gravitacional de Júpiter.

Cuando un asteroide o un cometa atraviesan la atmósfera terrestre, éste aumenta la temperatura hasta miles de grados debido a la fricción atmosférica (Yeomans 1995). Esto hace que el material se vuelva incandescente hasta producir un destello. Estos objetos que no llegan a impactar contra la Tierra porque se desintegran son llamados **meteoros**. Normalmente los meteoros tienen lugar a una altura de entre 80 y 100 km sobre la superficie terrestre. Por otro lado, si el objeto no se destruye a medida que se acerca a la superficie, tarde o temprano impactará produciendo una gran onda expansiva y un cráter. Estos objetos reciben el nombre de **meteoritos**. Así mismo, la materia que gira alrededor del Sol o cualquier objeto interplanetario que es demasiado pequeño para ser llamado asteroide o cometa se llama **meteoroides**.

Los cráteres de impacto se originan por la colisión de un cuerpo celeste (cometa o meteorito) sobre la superficie de otro cuerpo celeste. A lo largo de los años han caído miles de meteoritos en los planetas del sistema solar, pero sólo en algunos se pueden ver los restos del impacto. En todos los cuerpos celestes con falta de atmósfera y de actividad geológica se pueden apreciar claramente los restos de los cráteres que se formaron hace millones de años. Es el caso de la Luna. En cambio los cuerpos celestes con atmósfera reducen la magnitud del impacto o incluso destruyen el propio meteorito.

Los cráteres de impacto se pueden explicar en dos fases (Melosh 1989, Carr 2006):

- La primera es la **fase de compresión** en la cual el meteorito impacta sobre la superficie generando una presión de 5 GPA hasta 1000 GPA. En esta fase, una gran cantidad de fragmentos de rocas y minerales son expulsadas a mucha distancia del cráter, formando lo que se denomina los **eyecta** del cráter.

- La segunda fase se denomina **fase de excavación**. Al cabo de uno o dos segundos después del impacto, se produce la descompresión y finalmente la excavación que puede durar hasta dos minutos. En esta fase la energía cinética del meteorito se convierte en energía mecánica que utiliza para excavar la superficie y que hará que una gran cantidad de material sea expulsado en forma de rocas y polvo, lo que provoca que los eyecta del cráter producidos en la fase de compresión aumenten considerablemente.

Actualmente los cráteres se clasifican en dos tipos (Melosh 1989). Los más abundantes son los llamados **cráteres simples**. Estos cráteres presentan un anillo circular que puede variar de diámetro en función de las dimensiones del cuerpo celeste que impacte. La profundidad de este tipo de cráter normalmente es la tercera parte del diámetro del cráter. Por otro lado encontramos los **cráteres complejos**. Éstos presentan una elevación situada en el centro que se forma cuando el suelo es poco profundo. A diferencia de los cráteres simples, la profundidad de los complejos es aproximadamente la quinta o sexta parte del diámetro del cráter.

Determinar las medidas de un cráter a partir de las del meteorito que lo causó no es trivial. La mayor dificultad radica en que no existen datos experimentales en los que las dimensiones del diámetro del objeto que impacta sean mayores que unas pocas decenas de metro. Los estudios que proporcionan información sobre las dimensiones de un cráter a partir de las del meteorito que lo causó y viceversa (Collins 2005) utilizan un conjunto de leyes de escalado que extrapolan los resultados de datos experimentales a pequeña escala. Estos estudios se basan en nociones geológicas y físicas fuera del alcance de nuestro trabajo, pero sí nos proporcionan una buena herramienta para comparar nuestros resultados a través de simuladores como el que encontramos en [www.lpl.arizona.edu/tekton/crater.html](http://www.lpl.arizona.edu/tekton/crater.html), elaborado por Melosh y Beyer en el año 2000.

### **Objetivo de la investigación**

El objetivo de la investigación de nuestro trabajo se centró en tres grandes ejes: el estudio general de asteroides y meteoritos, la realización de un modelo de cráteres de impacto con canicas de distintos tamaños y materiales, y las aplicaciones de este modelo a cráteres de la Tierra y de otros cuerpos del Sistema Solar.

Para llevar a término el **primer objetivo** de la investigación, el **estudio general de asteroides y meteoritos**, necesitábamos bibliografía especializada sobre el tema de estudio. Por este motivo, decidimos ir a dos bibliotecas universitarias, de las facultades de Física y de Geología de la Universidad de Barcelona, a buscar libros relacionados con la astronomía y especializados en el Sistema Solar y la formación de cráteres de impacto. Eso nos sirvió para crear los cimientos de nuestro trabajo y para tener una base desde donde empezar.

El **segundo objetivo** de la investigación, la **realización de un modelo de cráteres de impacto con canicas de distintos tamaños y materiales**, se llevó a cabo mediante 1050 lanzamientos de dichas canicas sobre una superficie dispuesta en tres capas, de arena, mortero y talco, cuyo grosor y características fue establecido previamente para la idoneidad de la formación de los cráteres. En cada lanzamiento se recogían los datos que el cráter de impacto proporcionaba (diámetro y profundidad del cráter y radio de los eyecta). Como se puede intuir, esta parte del trabajo resultó ser una tarea muy larga y costosa, a veces pesada ya que era un trabajo constante y repetitivo, pero imprescindible.

Una vez simulados los lanzamientos, hacía falta analizar y ordenar la gran cantidad de datos obtenidos. Al principio no sabíamos por dónde empezar, e hicimos muchos intentos de organizar los datos en gráficas que después vimos que no nos ofrecían ninguna relación satisfactoria. El estudio de herramientas matemáticas como la recta de regresión, a partir de nuestro libro de matemáticas de primero de Bachillerato (Antonio 2008) y de otro más especializado en tratamiento de datos (Taylor 1997), nos ayudó a buscar una relación entre las medidas de los cráteres (diámetro y radio de los eyecta) y la velocidad y el diámetro de las

canicas. Cuando finalmente encontramos esta relación tuvimos la sensación de haber llegado a la cúspide de nuestro trabajo, de haber descubierto una cosa nueva que hasta entonces no habíamos encontrado en ningún libro. Por eso bautizamos la nueva ley con el nombre de *Ordeo*, a partir de nuestros apellidos (Ordoño y Tadeo).

El **tercer objetivo** de la investigación, las **aplicaciones del modelo anterior (ley de Ordeo) a cráteres de la Tierra y de otros cuerpos del Sistema Solar**, se llevó a cabo en 4 fases:

1. La verificación de la validez de las fórmulas encontradas en la ley de Ordeo con un cráter terrestre real, Meteor Crater, que hizo las funciones de parámetro de control. A raíz de esta verificación se reescalaron las fórmulas para ajustarlas a cráteres terrestres reales.
2. La estimación del diámetro del meteorito que causó los distintos cráteres terrestres mediante la ley de Ordeo reescalada. En primer lugar se seleccionaron 9 cráteres de impacto bien conservados en la superficie terrestre, y se les aplicaron las fórmulas para encontrar el diámetro del meteorito que los causó. Se compararon estos datos con los de un simulador elaborado por Melosh y Beyer en la universidad de Arizona ([www.lpl.arizona.edu/tekton/crater.html](http://www.lpl.arizona.edu/tekton/crater.html)), que tenía en cuenta muchos más factores físicos y geológicos fuera del alcance de nuestros conocimientos, y sorprendentemente los resultados eran coincidentes. Posteriormente se estimaron las dimensiones de los meteoritos que causaron todos y cada uno de los cráteres de impacto terrestres de los que se tiene conocimiento hasta la fecha.
3. La predicción del tamaño del cráter y del radio de los eyecta que producirían asteroides cercanos a la Tierra si cayeran sobre la Tierra. Se seleccionaron seis de estos asteroides, relevantes por algún motivo, se les aplicaron las fórmulas de nuestro modelo, y a modo comparativo se realizaron 6 mapas de la región de Barcelona en donde se superponían los cráteres producidos, para tener una idea más precisa de la magnitud de la catástrofe que produciría una colisión de estas características.
4. La estimación del diámetro del meteorito que causó distintos cráteres en otros planetas y satélites del Sistema Solar mediante nuestro modelo. Los resultados de esta investigación no fueron concluyentes, y ello llevó a pensar que la ley de Ordeo es principalmente aplicable a cráteres terrestres.

Como síntesis de lo dicho en este apartado, podemos decir que los objetivos finalmente alcanzados en este trabajo han sido:

- a. Estudiar la estructura general asteroides, meteoritos y cráteres de impacto.
- b. Construir un modelo que reproduzca el impacto de un meteorito sobre una superficie.
- c. Extraer datos a partir del modelo anterior que permitan:
  - Encontrar la relación del diámetro de un cráter y el radio de sus eyecta con el diámetro de un meteorito.
  - Encontrar la relación del diámetro de un cráter y el radio de sus eyecta con la velocidad de impacto de un meteorito.
- d. Comparar los datos obtenidos a partir de este modelo con datos de cráteres reales en la superficie de la Tierra y con simuladores elaborados a nivel universitario.
- e. Extender la comparación anterior de este modelo a superficies de otros cuerpos del Sistema Solar (Luna, Venus, Marte, lunas saturninas...).
- f. Estudiar algunos asteroides potencialmente peligrosos para el planeta Tierra, y predecir el impacto que tendrían si cayeran sobre Barcelona.
- g. Lectura de bibliografía especializada sobre el tema en diferentes lenguas: búsqueda en bibliotecas universitarias.
- h. Tratamiento matemático riguroso de todos los datos.

## **Metodología empleada**

La simulación de los cráteres ha consistido en hacer lanzamientos a velocidad controlada de canicas esféricas de diferentes materiales sobre una superficie. Todos los lanzamientos se han hecho perpendicularmente a la superficie. Se ha tenido que hacer un estudio exhaustivo previo de las características de las canicas (masa, diámetro, volumen, densidad, con sus correspondientes errores). La superficie de impacto se ha diseñado en tres capas de materiales distintos para optimizar la observación de los cráteres producidos. Se han realizado tres repeticiones de cada lanzamiento, en las que se han medido el diámetro y la profundidad del cráter producido y el radio de los eyecta expulsados (fig. 1). Como resultado de la medida, se ha tomado la media aritmética de los tres lanzamientos.

### *Materiales*

- Construcción de una estructura de madera que permite controlar la velocidad de impacto en cada lanzamiento a partir de la altura. Esta estructura admite seis alturas diferentes, con lo que se han considerado seis velocidades de impacto diferentes para cada canica.
- La superficie de impacto se ha dispuesto en tres capas, la inferior de 3,5 cm compuesta de arena para amortiguar el impacto (simulando la roca madre terrestre), la capa intermedia de 4,5 cm compuesta de mortero donde quedará gravado el impacto (simulando el suelo terrestre), y la capa superior de 2 mm compuesta de talco que contrasta con el color del mortero para una mejor observación de los cráteres, en especial de los eyecta, y para la mejor toma de datos.
- Los objetos impactados han sido canicas esféricas de diferentes tamaños y materiales (como vidrio, plástico, metal o barro) para obtener más variabilidad de resultados.

### *Toma de datos y posterior tratamiento*

En total se han realizado alrededor de 1050 lanzamientos. Los datos obtenidos de cada cráter se han anotado en una tabla específica para cada canica, que incluía las características de ésta. A partir de los datos obtenidos del modelo, se ha procedido a hacer un estudio matemático estadístico a base de gráficos y tablas con el objetivo de encontrar alguna relación que permitiera hacer extrapolaciones a cráteres reales de la Tierra. Se ha utilizado la recta de regresión y el coeficiente de correlación lineal ( $R^2$ ) para decidir si los resultados se ajustaban a una recta o no. Las relaciones investigadas con este procedimiento han sido:

- Relación de los cráteres con el diámetro de las canicas, para cada una de las seis velocidades de impacto de las canicas (fig. 2).
- Relación de los cráteres con la masa y la densidad de las canicas, para cada una de las seis velocidades de impacto de las canicas.
- Relación de los cráteres con la energía cinética de las canicas.
- Relación de la profundidad de los cráteres con el diámetro de los mismos.

## **Resultados obtenidos**

Los resultados obtenidos a partir de la metodología expuesta anteriormente son los siguientes:

- Las dimensiones del cráter no dependen de la masa ni de la densidad del objeto impactado. Este resultado, a priori desconcertante si se considera que en la bibliografía especializada (Collins 2005) siempre existe una relación entre las dimensiones del cráter y las densidades tanto de la superficie como del meteorito, puede ser explicado por las bajas velocidades de impacto estudiadas y por el compromiso alcanzado para la observación de cráteres sobre la superficie escogida. Ésta se diseñó poco compacta para que las canicas pudieran producir, a bajas velocidades, cráteres observables, con lo cual las magnitudes dominantes en la formación del cráter debían ser el diámetro y la velocidad de impacto de la canica. Al no

haber destrucción de la canica, la relación con la densidad de ésta o con la de la superficie pasa a ser irrelevante.

- Las dimensiones del cráter tampoco mantienen relación con la energía cinética del objeto impactado. En este caso, los resultados no fueron concluyentes. Se escogieron dos grupos de canicas del mismo diámetro (para minimizar la relación del cráter con dicho diámetro) y distinta masa y velocidad de impacto. Los resultados para cada grupo de canicas sí se ajustaban a una recta, pero ésta era distinta dependiendo del grupo de canicas escogido, con lo cual no se pudo demostrar la existencia de una relación de los cráteres con la energía cinética.
- **El diámetro del cráter y el radio de los eyecta son directamente proporcionales a la velocidad de impacto y al diámetro de la canica** según las fórmulas siguientes:

$$D_{cráter} = (0,19 \cdot v + 0,17) \cdot D_{canica} \quad R_{eyecta} = 0,8 \cdot v \cdot D_{canica}$$

en donde  $v$  es la velocidad de impacto de la canica medida en m/s. Las fórmulas anteriores se han bautizado como ley de Ordeo.

La obtención de las fórmulas de la ley de Ordeo se hizo en dos tiempos:

- ⇒ Para cada una de las velocidades de impacto investigadas, se observó cómo el diámetro del cráter o el radio de los eyecta eran directamente proporcionales al diámetro de la canica (fig. 2). Se llamó  $k$  al coeficiente de proporcionalidad entre ambas magnitudes.
- ⇒ Se observó como el coeficiente de proporcionalidad  $k$  aumentaba con la velocidad de impacto mediante una relación lineal.

La combinación de sendos resultados dio lugar a las ya expuestas fórmulas de la ley de Ordeo.

Para la extrapolación de estos resultados a cráteres reales, se empezó verificando la validez del modelo sobre Meteor Crater de Arizona. Este cráter se escogió porque fue el primero en ser identificado como tal en la Tierra, y por lo tanto es del que se dispone de más datos y más ampliamente contrastados. Además, es de los pocos cráteres de los que se ha estimado la velocidad y el diámetro del meteorito que lo originó, tema que sigue abierto y del que recientemente se han publicado nuevos resultados (Melosh 2005). Los resultados confirman que las fórmulas descubiertas en la ley de Ordeo se ajustan a este cráter con un escalado de dos órdenes de magnitud, práctica habitual en este tipo de estudios (Melosh 1989, Collins 2005), en los cuales se dispone únicamente de datos experimentales a pequeña escala que deben ajustarse a dimensiones reales. Así pues, la ley de Ordeo se reformuló a la luz de estos resultados de la manera siguiente ( $v$  en m/s):

$$D_{cráter} = \frac{0,19 \cdot v + 0,17}{100} \cdot D_{meteorito} \quad R_{eyecta} = \frac{0,8 \cdot v}{100} \cdot D_{meteorito}$$

El estudio posterior consistió en aplicar estas fórmulas a cráteres terrestres reales, de los cuales se estimó el diámetro del meteorito que los causó. En todos los casos se consideró que la velocidad de impacto era de 11190 m/s, que es la velocidad de escape de la Tierra, rechazándose la velocidad inicial del meteorito y también su deceleración al cruzar la atmósfera terrestre, considerando que ambos efectos se contrarrestaban. En cualquier caso, esta velocidad de escape es cercana a la del meteorito que produjo Meteor Crater, único del cual hay estudios sobre esta velocidad (Melosh 2005). Se escogieron 9 cráteres terrestres, representativos por su buen estado de conservación. Los datos obtenidos a partir de nuestras fórmulas se compararon con los de un simulador elaborado por Melosh y Beyer en el año 2000, de la universidad de Arizona ([www.lpl.arizona.edu/tekton/craters.html](http://www.lpl.arizona.edu/tekton/craters.html)), que tenía en cuenta conceptos físicos y geológicos mucho más sofisticados (Collins 2005), fuera del alcance de nuestros conocimientos. Los resultados son los siguientes:

Nombre del cráter	País	Diámetro cráter (m)	Diámetro meteorito (m) Ley de Ordeo	Diámetro meteorito (m) Melosh y Beyer
Aorounga	Chad	12.600	<b>592</b>	<b>451 – 893</b>
Tenoumer	Mauritania	1.900	<b>89</b>	<b>68 – 124</b>
Wolfe Creek	Australia	870	<b>41</b>	<b>28 – 49</b>
Roter Kamm	Namibia	2.500	<b>118</b>	<b>94 – 172</b>
Mistastin Lake	Canadá	28.000	<b>1316</b>	<b>972 – 1170</b>
Bosumtwi	Ghana	10.500	<b>494</b>	<b>379 – 743</b>
Kara-Kul	Tadjikistan	52.000	<b>2445</b>	<b>1760 – 3730</b>
Chicxulub	México	170.000	<b>7993</b>	<b>5500 – 12300</b>
Azuara	España	37.000	<b>1740</b>	<b>1270 - 2650</b>

Vemos como en todos los cráteres salvo uno los resultados de nuestro modelo están dentro de la horquilla de resultados del simulador de Melosh y Beyer. Así pues, y con la seguridad que proporcionaban los datos anteriores, se procedió a estimar el diámetro del meteorito que causó todos y cada uno de los cráteres terrestres de los que se tiene conocimiento hasta la fecha. Para ello se usó el libro de Hodge 1994 como fuente de información de cada cráter, y como base de datos se empleó la elaborada por *Planetary and Space Science Centre* de la universidad de New Brunswick, Canadá ([www.unb.ca/passc/ImpactDatabase/](http://www.unb.ca/passc/ImpactDatabase/), *Earth Impact Database*). También se procedió a calcular el radio de los eyecta de dichos cráteres en el momento de su formación. Estos eyecta no se conservan actualmente en la Tierra a causa de la erosión.

Las fórmulas de nuestro modelo también se aplicaron para hacer predicciones de las dimensiones del cráter que originarían asteroides cercanos a la Tierra si cayeran sobre ésta. En este caso, se utilizó la base de datos de *Near Earth Object Program*, de la NASA, en la cual hay disponibles los diámetros de estos asteroides y la velocidad a la que caerían sobre la superficie terrestre. Se seleccionaron 6 de estos asteroides, relevantes por algún motivo, y a partir de sus datos se calculó el diámetro del cráter y el radio de los eyecta que originarían. Los datos obtenidos sirvieron para elaborar 6 mapas, uno por cada asteroide, centrados en la ciudad de Barcelona, en el que se superpusieron dos círculos, correspondientes a los cráteres que originarían dichos asteroides y a los eyecta que saldrían despedidos en el impacto (fig. 3). De este modo era mucho más comprensible el efecto devastador que causaría un impacto de estas características sobre una zona habitada de la Tierra.

Nuestro modelo también se aplicó a cráteres de otros cuerpos del Sistema Solar, calculando el diámetro del meteorito que los originó. Se utilizó también la velocidad de escape de cada cuerpo como velocidad de impacto de los meteoritos, lo cual puede ser una buena aproximación en cuerpos con atmósfera (Tierra, Venus, Marte), pero que no proporciona resultados en absoluto fiables en cuerpos sin atmósfera (Mercurio, Luna). Por ello se consideró que el modelo de la ley de Ordeo era básicamente aplicable a cráteres terrestres.

## Conclusiones

El modelo de cráteres de impacto desarrollado en este trabajo demuestra como, a partir de experiencias relativamente triviales como hacer impactar canicas sobre una superficie, se pueden obtener resultados aplicables a cráteres de dimensiones reales. Estos resultados hacen pensar que la física de unos y otros fenómenos debe basarse en los mismos principios.

Las fórmulas de la ley de Ordeo son aplicables a cráteres terrestres, tal como se ha comprobado comparando los resultados que proporcionaba dicha ley con un simulador de cráteres que incluía conceptos físicos y geológicos mucho más sofisticados, lo cual no deja de

sorprendernos. Creemos, por lo tanto, que hemos desarrollado un modelo valioso para la comunidad científica y la población en general, que permite predecir las consecuencias catastróficas de un impacto meteorítico sobre la superficie terrestre. La gran ventaja de este modelo es su sencillez.

Hemos aplicado nuestro modelo para estimar las dimensiones de los meteoritos que ocasionaron los distintos cráteres terrestres. Creemos que esta es la primera vez que un estudio de estas características se lleva a cabo usando un modelo unificado. Además, hemos estimado el radio de los eyecta de cada cráter, que en la mayoría de casos no se conservan visibles en la superficie de la Tierra a causa de fenómenos de erosión. Estos datos pueden servir para buscar sedimentos correspondientes a dichos episodios catastróficos fuera del interior del cráter.

Por otra parte hemos aplicado nuestro modelo sobre otros cuerpos del Sistema Solar y hemos podido concluir que las fórmulas de la ley de Ordeo no son aplicables a todos los cuerpos porque no podemos determinar con exactitud la velocidad de impacto de un cuerpo celeste cualquiera. El hecho de considerar la velocidad de escape igual a la de colisión puede ser válido en cuerpos con atmósfera, donde la velocidad inicial del meteorito se ve contrarestanda por la deceleración causada por la atmósfera, pero es definitivamente poco fiable para cuerpos sin atmósfera.

### **Referencias bibliográficas y páginas web consultadas más importantes**

#### *Referencias*

- ÁLVAREZ, L. W. et al. (1980). *Extraterrestrial Cause for the Cretaceous-Tertiary Extinction*, Science, Vol 208, N 4448, pp. 1095-1108.
- ANTONIO, M. et al. (2008). *Matemàtiques 1 Batxillerat*. Barcelona: Grup Promotor Santillana, Projecte “La Casa del Saber”.
- CARR, M. (2006). *The surface of Mars*. Cambridge: Cambridge University Press.
- COLLINS, G. S., MELOSH, H. J. et al. (2005). *Earth Impact Effects Program*, Meteoritics & Planetary Science, Vol 6, pp. 817-840.
- GIBILISCO, S. (1991). *Cometas, meteoros y asteroides: cómo afectan a la Tierra*. Madrid: McGraw-Hill.
- HODGE, P. W. (1994). *Meteorite craters and impact structures of the Earth*. Nueva York: Cambridge University Press.
- MELOSH, H.J. (1989). *Impact cratering: a geologic process*. Nueva York: Oxford University Press.
- MELOSH, H.J., COLLINS, G.S. (2005). *Meteor Crater formed by low-velocity impact*. Nature, Vol 434, pp. 157.
- MORENO, R. (2003). *Actividades sencillas de astrofísica*. Barcelona: Publicaciones de ApEA.
- SHOEMAKER, E.M. (1987). *Meteor Crater, Arizona*. Geological Society of America Centennial Field Guide - Rocky Mountain Section, N. 89, pp. 399-404.
- TAYLOR, J. R. (1997). *An introduction to Error Analysis*. Sausalito: University Science Books.

#### *Páginas web consultadas más importantes*

<http://www.lpl.arizona.edu/tekton/craters.html>, simulador de cráteres de H.J. Melosh y R.A. Beyer.

<http://www.unb.ca/passc/ImpactDatabase>, base de datos de cráteres terrestres elaborada por *Planetary and Space Science Centre*, University of New Brunswick, Canadá.

<http://neo.jpl.nasa.gov/risk/>, base de datos de asteroides cercanos a la Tierra, elaborada por la NASA.

<http://photojournal.jpl.nasa.gov/index.html>, base de datos de fotografías del espacio, elaborada por la NASA.



Fig. 1. Cráter de impacto de una de las canicas

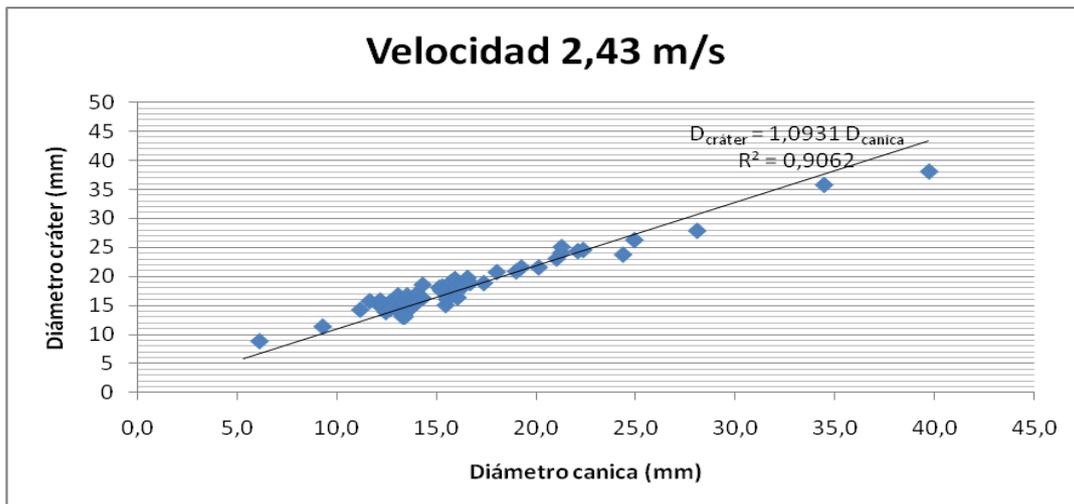


Fig. 2. Gráfica que relaciona el diámetro del cráter con el diámetro de la canica a una velocidad de impacto de 2,43 m/s. Cada valor corresponde al lanzamiento de una canica determinada

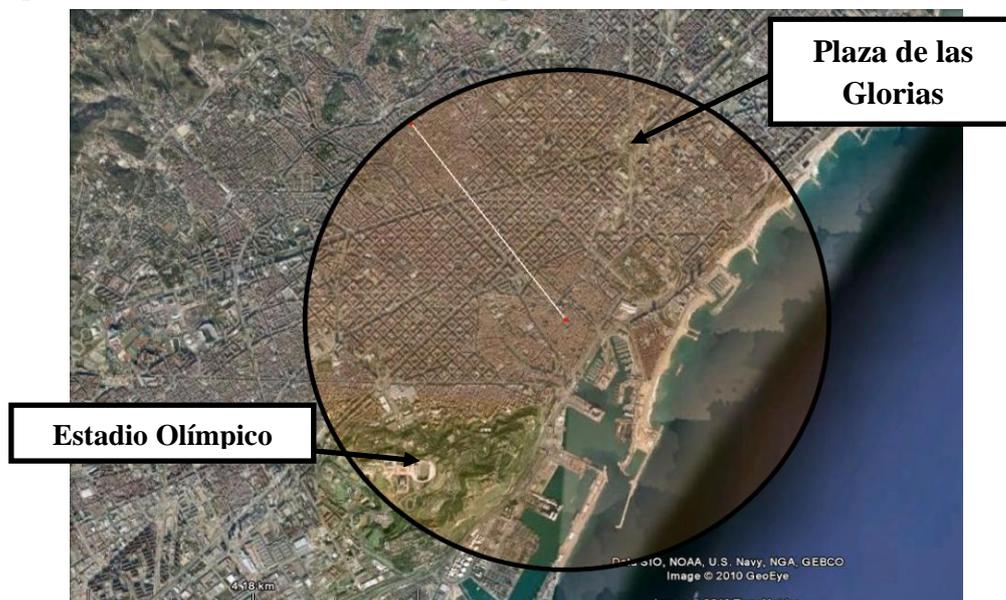


Fig. 3. Predicción de las dimensiones del cráter de impacto del asteroide Apofis-2004 MN4 el año 2036, sobre Barcelona