

# Modelización de cráteres de impacto



**Autores: Jesús Ordoño y Carlos Tadeo**

**Tutor: Joan Alberich**

**Institut Frederic Mompou**

**Sant Vicenç dels Horts**



## ÍNDICE

|   |    |
|---|----|
| Motivación y agradecimientos  | 2  |
| Proceso de elaboración del Trabajo de Investigación y objetivos científicos alcanzados                | 4  |
| 1. Asteroides, meteoritos, cometas y cráteres de impacto  | 6  |
| 2. Modelización de cráteres de impacto  | 13 |
| 2.1. Introducción   | 13 |
| 2.2. Material utilizado   | 16 |
| 2.2.1. Datos de las canicas   | 17 |
| 2.2.2. Datos de la superficie de impacto  | 22 |
| 2.2.3. Dispositivo de lanzamiento   | 23 |
| 2.3. Procedimiento  | 25 |
| 2.4. Resultados obtenidos   | 28 |
| 2.4.1. Relación de los cráteres con el diámetro de las canicas  | 28 |
| 2.4.2. Relación de los cráteres con la masa y la densidad de las canicas                              | 40 |
| 2.4.3. Relación de los cráteres con la energía cinética de las canicas                                | 42 |
| 2.4.4. Relación de la profundidad de los cráteres con el diámetro de los mismos                       | 45 |
| 3. Aplicación del modelo de cráteres de impacto a cráteres reales de la Tierra                        | 47 |
| 3.1 Aplicación del modelo de cráteres de impacto en meteor Crater de Arizona: parámetro de control    | 48 |
| 3.2. Determinación del diámetro del meteorito en cráteres terrestres                                  | 51 |
| 3.3. Peligros espaciales: medidas de posibles cráteres producidos por asteroides cercanos a la Tierra | 69 |
| 4. Aplicación del modelo de cráteres de impacto en otros cuerpos del Sistema Solar                    | 81 |
| 4.1. Cráteres en planetas interiores  | 81 |
| 4.2. Cráteres en satélites de planetas exteriores   | 85 |
| Conclusiones  | 89 |
| Bibliografía  | 91 |



## Motivación y agradecimientos

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).

Con nuestro trabajo queremos llegar a entender cómo afectan los meteoritos y los asteroides en los diversos planetas, y las catástrofes que pueden originar. Pero para todo eso tenemos que saber e investigar primero su formación y su anatomía para aplicarlo a modelos reales. Éste es un tema que cada vez es más estudiado por la comunidad científica, ya que año tras año se adelanta en la investigación de nuevas tecnologías que facilitan el estudio de estos cuerpos. Eso permite determinar los peligros externos que corre nuestro planeta, ya que no sólo se ve amenazado por el ser humano, sino que somos un mero punto en el espacio que puede ser destruido sin que nadie se entere de nuestra existencia y sin ninguna consecuencia mayor que nuestra extinción.

¿Qué nos impulsa a realizar este trabajo? El simple afán de saber qué hay allí fuera, los peligros que tendrá que afrontar nuestro planeta. Nuestra idea creemos que es original y que se pueden aprender muchas cosas sobre el espacio, un tema apasionante y todavía por descubrir. Es un trabajo que se encuentra a nuestro alcance y que puede servir para aclararnos algunas dudas. Además requiere una cierta dificultad y unos conocimientos previos para desarrollarlo. Quién sabe, quizás alguno de nosotros llega algún día a trabajar en la NASA.

Este trabajo no habría sido posible sin el apoyo de algunas personas. En primer lugar queremos agradecer sinceramente a nuestro tutor del trabajo, Joan Alberich, su colaboración y atención ante la realización de éste. Nos ha ayudado a utilizar nuevas herramientas matemáticas, a organizar nuestros resultados de forma coherente y a orientarnos de manera correcta en todo momento, y también a perfeccionar y a pulir pequeños detalles durante la redacción del trabajo. Además queremos enfatizar su interés por sacar el máximo provecho de nuestros conocimientos alcanzados durante todo el curso, siempre dispuesto a aclararnos cualquier duda en cualquier momento.

## **Modelización de cráteres de impacto**

Jesús Ordoño, Carlos Tadeo



---

También queremos agradecer a Laia Casanovas que nos abriera las puertas del laboratorio de Ciencias Naturales para dejarnos una balanza de precisión, sin la cual no habríamos podido obtener las masas precisas de nuestras canicas.

A nuestros familiares, tanto a nuestros padres como a nuestros abuelos, les queremos agradecer su contribución a la hora de proporcionarnos herramientas para construir nuestro modelo, por el apoyo que nos han dado para poder continuar adelante a pesar de las dificultades que se nos presentaban y por la paciencia que han tenido en todo momento.

Por último queremos dedicar nuestro trabajo no solamente a las personas mencionadas anteriormente, sino a todas aquéllas que con sus palabras de ánimo nos han ayudado a realizar este trabajo con amabilidad y generosidad.



## **Proceso de elaboración del Trabajo de Investigación y Objetivos Científicos alcanzados**

Cuando empezamos nuestro trabajo teníamos una gran variedad de ideas, muy relacionadas con el universo. Poco a poco fuimos definiendo algunos objetivos del trabajo todos relacionados con asteroides, cometas y cráteres de impacto. Algunos de estos objetivos iniciales incluían la fabricación del núcleo de un cometa, crear bolas de hielo y comparar los cráteres obtenidos con los de canicas de vidrio, y como punto final de nuestro trabajo teníamos previsto realizar una recogida de micrometeoritos en Torrellas de Llobregat y compararlos con muestras que tendríamos que recoger in situ de un cráter de impacto cerca de Zaragoza (cráter de Azuara). Todo comportaba hacer un trabajo bastante ambicioso con la gran cantidad de ideas que planteábamos, lo cual no está nada mal porque significaba una muy buena motivación. Más adelante comprendimos que para llevar a cabo algunos de los objetivos del trabajo necesitábamos un tiempo que no teníamos, lo cual nos llevó a focalizar nuestro campo de investigación sobre tres grandes ejes: el estudio general de asteroides y meteoritos, la realización de un modelo de cráteres de impacto con canicas de vidrio (y otros materiales), y las aplicaciones de este modelo en cráteres de la Tierra y a otros cuerpos del Sistema Solar.

Para empezar nuestro trabajo, necesitábamos bibliografía especializada sobre el tema de estudio. Por este motivo, lo primero que hicimos fue 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. Este estudio bibliográfico configuró la primera parte de la investigación.

Después, hicimos la parte principal del trabajo, el estudio de los cráteres utilizando un modelo de cráteres de impacto confeccionado por nosotros. Realizamos 1050 lanzamientos de canicas esféricas de diferentes materiales y sobre una superficie previamente elaborada por capas con el fin de simular con más exactitud la superficie terrestre. En cada lanzamiento que hacíamos recogíamos los datos que el cráter de impacto nos 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 insistente y repetitivo, pero imprescindible. Esta parte nos tuvo ocupados todo el verano de 2009.

Una vez tuvimos 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 nos ayudó a buscar una relación entre las medidas de los cráteres y la velocidad y el diámetro de las canicas. Y cuando finalmente encontramos esta relación tuvimos la sensación de haber llegado al clímax de nuestro trabajo, de haber descubierto una cosa nueva que hasta entonces no habíamos encontrado en ningún libro. Por eso, en un momento de euforia, pusimos a la nueva ley el nombre de



*Ordeo*, a partir de nuestros apellidos (Ordoño y Tadeo). Todo este estudio queda reflejado en la segunda parte de nuestro trabajo.

La siguiente parte consistió en aplicar la nueva ley a cráteres reales de la Tierra. ¡Y cuál fue nuestra satisfacción cuando comprobamos que los resultados que nos daba coincidían con los datos de estos cráteres! Lo cual nos permitía no sólo analizar cráteres del pasado, sino también poder hacer predicciones sobre el efecto catastrófico que tendría la caída de asteroides sobre la Tierra en un futuro. Las dos vertientes de las aplicaciones de nuestro modelo son las que configuraron la tercera parte de nuestro trabajo.

Finalmente, estudiamos otros cráteres de impacto del Sistema Solar aplicándoles nuestro modelo. Esto queda recogido en la última parte del trabajo.

Así pues, con todo, podemos decir que los objetivos científicos que finalmente hemos alcanzado con nuestro trabajo de investigación han sido los siguientes:

1. Estudiar la estructura general de asteroides, meteoritos y cráteres de impacto.
2. Construir un modelo que reproduzca el impacto de un meteorito en una superficie.
3. Extraer datos a partir del modelo anterior que nos permitan:
  - 3.1 Encontrar la relación entre el diámetro de un cráter y el diámetro de un asteroide real.
  - 3.2 Encontrar la relación entre el diámetro de un cráter y la velocidad de impacto de un asteroide real.
4. Comparar los datos obtenidos a partir de nuestro modelo con datos de cráteres reales en la superficie de la Tierra.
5. Extender la comparación anterior de nuestro modelo a superficies de otros cuerpos del Sistema Solar (Luna, Venus, Marte, lunas saturninas...).
6. Estudiar algunos asteroides potencialmente peligrosos para el planeta Tierra, y predecir el impacto que tendrían si cayeran sobre Barcelona.
7. Lectura de bibliografía especializada sobre el tema en diferentes lenguas: búsqueda en bibliotecas universitarias.
8. Tratamiento matemático riguroso de todos los datos.



## 1. Asteroides, meteoritos, cometas y cráteres de impacto

### Introducción: el Sistema Solar

Nuestro Sistema Solar es un sistema planetario de la galaxia Vía Láctea (nombrada así por los antiguos griegos por su color blanquecino al observarla desde la Tierra) y se encuentra en uno de los brazos de ésta, conocido con el nombre de Brazo de Orión, a una distancia aproximada del centro de la galaxia de 28 mil años luz.



La Vía Láctea

El Sistema Solar está formado por una única estrella llamada Sol, que da nombre al sistema, y ocho planetas que orbitan en torno a éste más un conjunto de cuerpos menores así como el espacio comprendido entre ellos.

Los cuerpos que forman el Sistema Solar se pueden clasificar en:

- **Sol.** La estrella central que contiene más del 99% de la masa del sistema y que está formada principalmente por hidrógeno, helio y oxígeno.
- **Planetas.** Se dividen en dos grandes grupos:
  - Interiores o terrestres. De base rocosa y tamaño relativamente pequeño son *Mercurio, Venus, Tierra y Marte*.
  - Exteriores o gigantes. Son planetas gaseosos y gigantes. Además, los más exteriores son prácticamente helados. Son *Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno*.
- **Planetas enanos.** Se trata de cuerpos en órbita en torno al Sol con suficiente masa para que su propia gravedad dé forma esférica al cuerpo. No son satélites de ningún planeta. *Plutón, Caronte, Ceres, Makemake y Eris* son algunos de los planetas enanos del Sistema Solar.
- **Satélites.** Cuerpos grandes que orbitan en torno a planetas, como *la Luna* a la Tierra, *Fobos* en Marte o *Titán* en Saturno.
- **Asteroides.** Cuerpos rocosos carbonáceos o metálicos más pequeños que un planeta que orbitan en torno al Sol normalmente en una órbita interior a la de Neptuno. Entre las órbitas de Marte y de Júpiter encontramos el *Cinturón de asteroides* donde distinguimos una mayor concentración de estos cuerpos.
- **Cinturón de Kuiper.** Objetos helados exteriores en órbitas estables como *Sedna y Quaoar*.
- **Cometas.** Objetos helados y pequeños que provienen de la *Nube de Oort*, más allá de Neptuno.



### Asteroides

En el espacio hay mucha materia que a lo largo de millones de años se ha compactado, normalmente por la acción de la gravedad. Esta materia compactada recibe el nombre de cuerpos celestes, que pueden ser estrellas, asteroides, meteoritos, cometas, planetas y otros.

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 en torno al 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



Cinturón de asteroides. Imagen simulada por ordenador

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 (Gibilisco 1991).

Hay dos teorías que explican el origen de los asteroides. 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 llegó a compactarse en un planeta por la fuerte atracción gravitacional de Júpiter.

Podemos distinguir tres tipos de asteroides según su composición:

- En primer lugar encontramos los asteroides de tipo C, principalmente constituidos por composiciones carbonatadas. Son los más abundantes. En torno al 75% de los asteroides pertenecen a este grupo.
- Los asteroides de tipo S están compuestos por una base de silicio y de magnesio. Son rocas muy parecidas a las de la Tierra pero con un color más rojizo. Cerca del 15% de los asteroides son de este grupo.
- Finalmente encontramos los asteroides de tipo M, con sólo el 5-10% de los asteroides. Son los más luminosos y su composición es básicamente hierro y níquel.

### Meteoritos

Durante millones de años, la Tierra ha recibido muchos impactos, ya sean de cometas, asteroides u otro tipo de materias. Por este motivo se ha tenido que asignar un nombre concreto para describir toda la materia que entra en la atmósfera e impacta contra la superficie terrestre: son los llamados meteoritos.

## Modelización de cráteres de impacto

Jesús Ordoño, Carlos Tadeo



Cuando un cuerpo celeste, como por ejemplo, un asteroide o un cometa, atraviesan la atmósfera, éste aumenta la temperatura hasta miles de grados a causa de la fricción atmosférica (Yeomans 1995). Eso 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**, que normalmente tienen lugar entre los 80 y 100 km de la superficie terrestre. Por otra parte si el objeto no se destruye, a medida que se acerca a la superficie, tarde o temprano impactará produciendo una gran onda expansiva, estos objetos reciben el nombre de **meteoritos**. Por otro lado, la materia que gira en torno al Sol o a cualquier objeto interplanetario, que es demasiado pequeño para ser nombrado asteroide o cometa se llama **meteoroides**.

En la Tierra se han encontrado restos de meteoritos, la gran mayoría provienen de asteroides, pero también hay algunos de origen lunar y marciano. La manera más conocida de clasificar los meteoritos es estudiar su composición química y los cuerpos celestes de donde provienen.

Según su composición química, existen tres tipos de meteoritos:

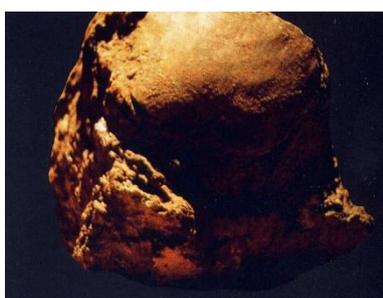
**Meteoritos féreos o holosideritos:** Compuestos mayoritariamente de aleaciones de hierro y níquel. Representan el 6% del total.

**Litosideritos:** formados por una mezcla de silicatos y metales en proporciones casi iguales. Sólo son el 1% de los meteoritos.

**Meteoritos rocosos:** Son los meteoritos formados únicamente por roca, y son los más abundantes. Los meteoritos rocosos se dividen en condritas y acondritas, la diferencia es que las acondritas se han formado mediante procesos de fusión y de recristalización en planetas o asteroides y las condritas no.



Waingaromia, holosiderito



Clovis, meteorito rocoso



Krasnojarsk, litosiderito

## Cometas

Los astrónomos creen que los cometas proceden de la colisión de gas, hielo y roca hace 4600 millones de años y que fueron los portadores de agua a la Tierra (Gibilisco 1991; Yeomans 1995). Los cometas giran en torno al Sol, pero muchos de ellos tienen una órbita muy elíptica e incluso parabólica en algunos casos. Sus trayectorias varían en función de la distancia en que se encuentran del Sol, lo cual quiere decir que a

## Modelización de cráteres de impacto

Jesús Ordoño, Carlos Tadeo

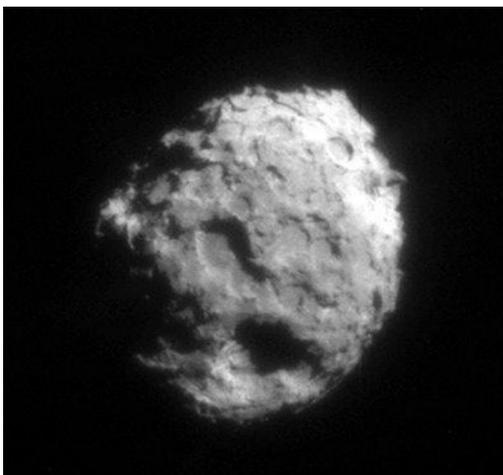


medida que un cometa se aproxima al Sol, éste recibe más cantidad de radiación solar y provoca variaciones en sus órbitas.

Los científicos clasifican los cometas en función del tiempo que tardan en hacer una vuelta al Sol:

- Los cometas de corto periodo son aquéllos que tardan 20 años en dar una vuelta al Sol. La órbita de este tipo de cometas se aproxima con bastante frecuencia al Sol, lo cual quiere decir que están sometidos a mucha radiación solar que disminuye su vida. Los científicos creen que los cometas de corto periodo proceden del cinturón de Kuiper, que como ya hemos dicho anteriormente en este trabajo, se encuentra más allá de la órbita de Plutón. Pero algunos de ellos entran al Sistema Solar por causa de los tirones gravitacionales provocados por los planetas.
- Los cometas de medio periodo, necesitan entre 20 y 200 años para completar su órbita. El más famoso es el Halley, que describe una órbita de 76 años.
- Los cometas de largo periodo son los que tardan en dar una vuelta completa más de 200 años. Estos cometas proceden de la nube de Oort, una región situada en los confines del Sistema Solar.

Generalmente las dimensiones de un cometa se acercan a los 10 km de diámetro, aunque su tamaño disminuye por el efecto de la radiación solar. Normalmente se describe un cometa como un núcleo de hielo con una cola de centenares de kilómetros que se extiende por el cielo. Ésta sería una descripción básica, pero ya incluye la noción de que un cometa se compone de diferentes estructuras.



Núcleo del cometa Wild2 fotografiado por *Stardust*

El **núcleo** de un cometa es una masa compacta formada básicamente de agua helada y de hielo seco de dióxido de carbono  $\text{CO}_2$ . Con una proporción menor hay otras sustancias como amoníaco  $\text{NH}_3$ , metano  $\text{CH}_4$ , hierro, magnesio y silicatos. Está recubierto de una corteza de color negro, que se cree que está formada por arena y pequeños minerales que atrapa el calor generado por el Sol, hecho que provoca la evaporación del hielo. Normalmente en las zonas de hielo más blandas se produce una apertura por donde sale el  $\text{CO}_2$  y el polvo que contiene el cometa, formando una nube a su alrededor nombrada coma.

La **coma** es el envoltorio formado por gases y polvo en torno al cometa. Las dimensiones de la coma pueden tener fácilmente miles de kilómetros de diámetro, pero esta medida es muy variable, depende del diámetro del núcleo del mismo y de la distancia en que se encuentra del Sol. Si el núcleo del cometa es muy grande, entonces tiene más superficie en contacto con la radiación solar, por lo que hay más

## Modelización de cráteres de impacto

Jesús Ordoño, Carlos Tadeo



posibilidades de tener más salidas de gas y como consecuencia la coma se expande mucho más.

La **cola** de los cometas es su parte más visible. Se distinguen dos tipos: la de polvo y la de plasma. La cola de polvo es la más conocida y la que se ve cuando el cometa viaja por el cielo, tiene un color blanquecino y está formada por los sedimentos liberados del núcleo por la evaporación del hielo. La cola de polvo se puede extender unos 150 millones de kilómetros. La cola iónica o de plasma, está formada por material ionizado debido a las radiaciones electromagnéticas y al viento solar. A diferencia de la cola de polvo ésta tiene un color azulado, es estrecha y perfectamente recta y puede tener longitudes de 50 a 300 millones de kilómetros. Esta cola sigue la órbita del cometa, pero tiende a desplazarse suavemente por la radiación solar.

El Halley es uno de los cometas de medio periodo más estudiados por los científicos. Ha sido objeto de cinco vuelos espaciales con el objetivo de encontrar información sobre su composición química. El núcleo con forma de patata hace aproximadamente 15 kilómetros de diámetro, contiene un 80% de agua congelada, un 15% de monóxido de carbono y el resto es polvo. Algunos científicos afirman que el cometa, como muchos otros, está recubierto por una capa de roca y de polvo que cubre gran parte del hielo.



Cometa Halley

## Cráteres de impacto

Los cráteres de impacto se originan por la colisión de un cuerpo celeste (cometa, asteroide o meteorito) en 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.



Cráter Barringer o Meteor Crater de Arizona, EE UU

En cambio, los cuerpos celestes con atmósfera, reducen la magnitud del impacto o incluso destruyen el propio meteorito.



Cuando se produce un impacto de un asteroide, cometa o meteorito, se genera una importante explosión, debido a la gran cantidad de energía cinética que lleva el meteorito al impactar contra la superficie. La gran potencia de los proyectiles caídos del cielo se explica a partir del diámetro y de la velocidad, por ejemplo un meteorito de 300 m de diámetro y que cae una velocidad aproximadamente de 75.000 km/h, libera una energía mayor que la de cualquier terremoto o erupción volcánica que haya podido experimentar el planeta o satélite.

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

- La primera es la **fase de compresión**, en la que el meteorito impacta sobre la superficie generando una presión de 5 GPa hasta 1.000 GPa. Estas presiones pueden alcanzar el límite elástico tanto del meteorito como de la superficie de impacto, es decir la fuerza máxima que puede soportar un material sin experimentar ninguna deformación. Así pues, en esta fase se produce una compresión, seguida de una descompresión del material, tanto del propio objeto que impacta como de la superficie en la que impacta. También en esta fase, una gran cantidad de fragmentos de rocas y minerales son expulsados a mucha distancia del cráter, formando lo que denominamos como **eyecta** del cráter (palabra proveniente del latín).
- La segunda fase es la de **excavación**. Después del impacto, se produce la descompresión y la consiguiente 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, provocando que los eyecta del cráter producidos en la fase de compresión aumenten considerablemente.

Las eyecciones de los alrededores del cráter forman una base más gruesa, y a medida que nos alejamos del centro del impacto hay menos cantidad de minerales y de sedimentos. Eso es debido a la acción de la gravedad: el material más denso (minerales y rocas) se queda cerca del cráter, en cambio el más ligero (polvo y pequeños fragmentos de roca) se va alejando cada vez más. Las eyecciones son los restos del impacto que permanecen menos tiempo, ya que son enterradas por sedimentos posteriores al impacto.



Cráter simple en *Elysium planitia* (Marte)

Los cráteres se pueden agrupar en dos grandes tipos (Melosh 1989): los más abundantes y que todo el mundo conoce 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 otra parte encontramos los cráteres complejos, más difíciles de reproducir en un modelo a pequeña escala. Éstos presentan una elevación situada justo en el centro que se forma cuando el suelo es poco profundo. A diferencia de

## Modelización de cráteres de impacto

Jesús Ordoño, Carlos Tadeo



los cráteres simples, la profundidad de los complejos es aproximadamente la quinta o sexta parte del diámetro del cráter.

Un ejemplo de un cráter simple en la Tierra es el cráter de Arizona. Tiene 1'2 km de diámetro y 200 m de profundidad. Este cráter se formó hace 49.000 años y todavía se conserva relativamente en buen estado.



Cráter complejo. *Dedal crater* en la Luna



## **2. Modelización de cráteres de impacto**

### **2.1. Introducción**

Determinar las medidas de un cráter a partir de las del meteorito que lo causó no es trivial. La mayor dificultad está en que no existen datos experimentales en los que las dimensiones del diámetro del objeto que impacta sean mayores que unas pocas decenas de metros. 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.

La simulación de los cráteres de nuestro modelo se hace a través de una serie de pruebas experimentales con objetos escogidos previamente. De esta manera, con los datos obtenidos, podemos hacer una comparación entre datos de cráteres reales, de la superficie terrestre y otros cuerpos, con los datos que hemos podido extraer de nuestro modelo.

En el modelo de cráteres de impacto que hemos escogido, hemos simulado tanto los meteoritos como la superficie de la Tierra.

Para simular los meteoritos, hemos utilizado canicas de diferentes tamaños y materiales, para así intentar simular una mayor variedad de posibles asteroides y meteoritos. Un aspecto a tener en cuenta es que todas las bolas que hemos utilizado son esféricas, con la consecuente falta de datos de otras formas que eso comporta en un trabajo de investigación de estas características, pero pensamos que con la gran cantidad de canicas que hemos utilizado hemos podido realizar un estudio completo con sus correspondientes gráficos y con diferentes tipos de tablas confeccionadas. Con esto hemos obtenido un resultado que nos ha permitido determinar una expresión matemática del diámetro de un cráter en función del diámetro de la canica y de su velocidad de impacto, que se puede aplicar no sólo en nuestro modelo sino también en cráteres de impacto reales, al menos en una primera aproximación.

Al ser las canicas esféricas, las únicas variables que hemos investigado han sido: radio de la canica, masa de la canica y altura desde la cual lanzábamos cada una. Con estos datos hemos calculado los volúmenes y las densidades de cada una de las bolas, así como su velocidad y energía de impacto con el error correspondiente. Hemos analizado la relación de estas magnitudes con las características de los cráteres respectivos.

Para simular la superficie de impacto de un cuerpo celeste hicimos una serie de pruebas con diferentes materiales: arena, mortero, harina, cacao, café, talco, etc., para poder determinar con más exactitud qué materiales nos ofrecían las mejores características de acuerdo con las que nosotros queríamos. Finalmente, después de

## Modelización de cráteres de impacto

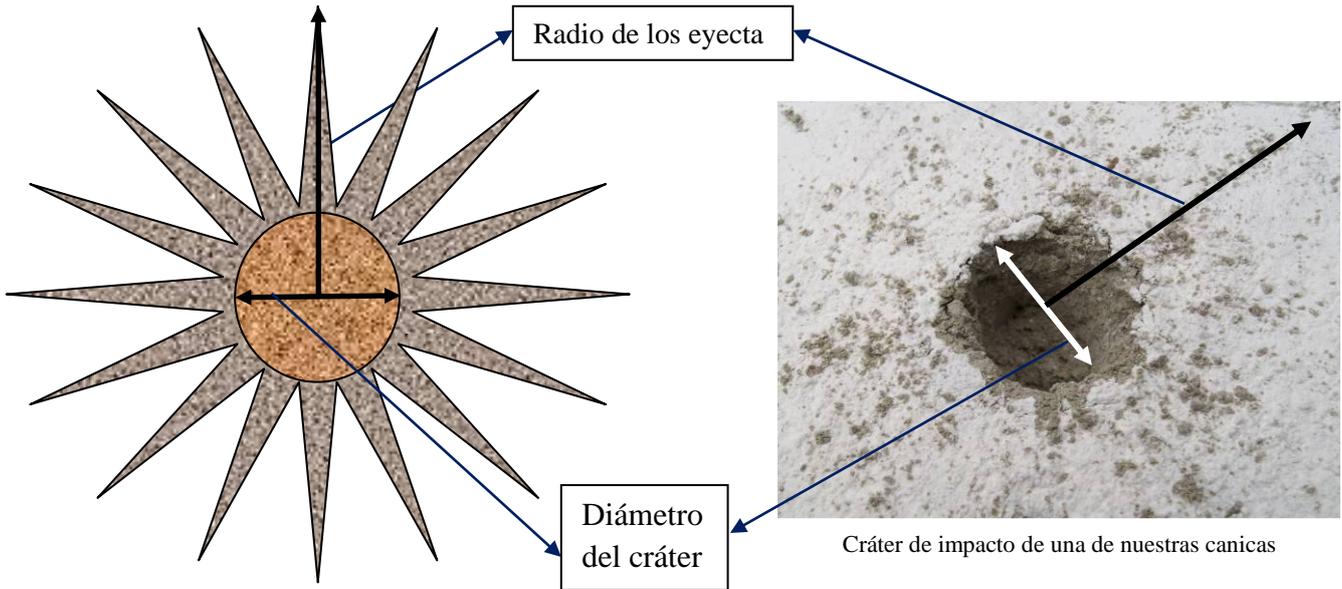
Jesús Ordoño, Carlos Tadeo



hacer lanzamientos con determinadas canicas sobre superficies de diferentes tipos, decidimos que los materiales que nos permitirían hacer medidas con más exactitud eran el mortero, la arena y el talco. Acto seguido dispusimos por capas la estructura de la superficie de la siguiente manera: la capa inferior compuesta únicamente por arena, una segunda capa formada por mortero y finalmente la capa superior de talco, con lo cual podíamos medir el radio del cráter, la profundidad y el radio del eyecta con mucha precisión, ya que el talco, al ser de color blanco, contrasta con el color grisáceo del mortero, hecho que nos proporciona una óptima visión de los pequeños detalles del cráter.

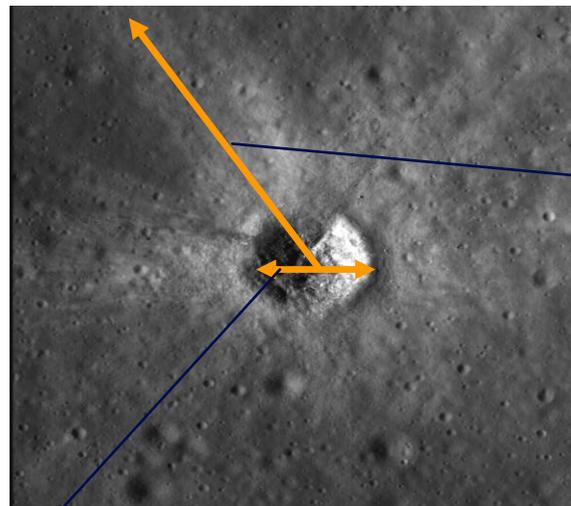
Otro punto a tener en cuenta es el tipo de cráter que simulamos. Los materiales que hemos escogido, la disposición de las capas y los objetos que hemos escogido para realizar nuestro modelo nos han permitido simular cráteres simples y no cráteres compuestos. Los cráteres que hemos obtenido tienen las mismas características que la mayoría de los cráteres de impacto existentes en la Tierra, éste es otro motivo por el cual no hemos hecho cráteres compuestos.

Éstos son esquemas aproximados de los cráteres que hemos obtenido, al lado de una fotografía de un cráter obtenido con nuestro modelo, y de una fotografía de un cráter real en la superficie de la Luna. Se pueden ver las diferentes magnitudes que hemos medido (diámetro, radio de los eyecta y profundidad del cráter), que nos permiten determinar sus dimensiones.

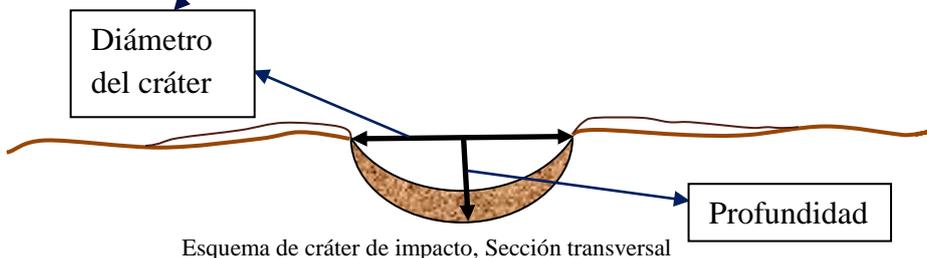


Esquema de cráter de impacto.  
Visión vertical desde arriba

Cráter de impacto de una de nuestras canicas



Cráter de impacto de la superficie de la Luna



Esquema de cráter de impacto, Sección transversal

Las fases de un cráter de impacto, compresión y excavación, no las hemos incluido en el trabajo ya que nuestro objetivo no es realizar un estudio sobre esta parte en concreto. Sin embargo, cuando un objeto impacta sobre cualquier superficie se producen las fases de compresión y excavación. La diferencia con nuestro modelo es el orden de magnitud de las presiones alcanzadas y de la energía liberada, evidentemente mucho menor.



Otro aspecto a tener en cuenta es que todos los lanzamientos que hemos hecho han sido perpendiculares a la superficie, y por lo tanto no hemos tenido en cuenta la variación de los datos según el ángulo con que las bolas son lanzadas. Por lo tanto, tenemos que considerar nuestro modelo como una primera aproximación a cráteres reales.

No obstante, los resultados que hemos obtenido nos ofrecen una relación entre los datos de las canicas y los datos de los cráteres, lo cual nos permite extrapolar los resultados a cráteres reales de la Tierra y de otros cuerpos celestes.

### 2.2. *Material utilizado*

Para modelizar el impacto de meteoritos en la superficie de un cuerpo celeste y la posterior formación de cráteres, utilizamos los materiales y las sustancias siguientes:

- **Listones de madera** para elaborar un sistema para lanzar las canicas del modelo con precisión. Escogemos la madera porque es un material accesible y fácil de trabajar. Nos hace falta:
  - 2 listones de 2,5 x 130 x 4 cm que servirán de guía
  - 20 piezas de 4 x 2,5 x 1 cm
  - 1 base de 11 x 43,5 x 1,5 cm
  - 1 listón de 7 x 43,5 x 1,5 cm para unir los dos listones-guía por arriba
  - 2 listones de 1,5 x 31,5 x 2,5 cm para ampliar la superficie con el suelo y estabilizar la estructura.
  - 1 listón de 6,5 x 38,5 x 1,5 cm desde donde se lanzarán las canicas.
  - 2 triángulos de 4 x 4 x 2 cm para reforzar la estructura.
  - Clavos y cola blanca para madera para unir las piezas.
  - Utensilios para trabajar la madera: tornillo de banco, escuadra, serrucho, lima, papel de lija, lápiz, nivel, sargento, martillo, metro...
- Una **preparación de mortero** que actúe como superficie de un planeta, donde caerán las canicas. Escogemos el mortero porque es una sustancia fácil de encontrar y suficientemente consistente para observar con precisión el cráter formado y poder medir los diámetros. Para realizar un modelo con base de mortero necesitamos:
  - Arena o tierra, si puede ser de grano fino, para atenuar el impacto de la bola y simular un interior más denso y duro.
  - Mortero para simular una superficie más blanda y donde quedará marcado el cráter de impacto.
  - Talco en polvo para sacudir en la superficie con el objetivo de poder observar el eyecta con más precisión y facilidad.
- Una **caja o recipiente** para poner la preparación de mortero. Esta caja tiene que ser suficientemente profunda para meter la preparación suficiente para que las canicas no lleguen a tocar el fondo de ésta (unos 5-5,5 cm), y suficientemente ancha para poder observar bien el eyecta expulsado por el impacto (mínimo unos 50 cm).



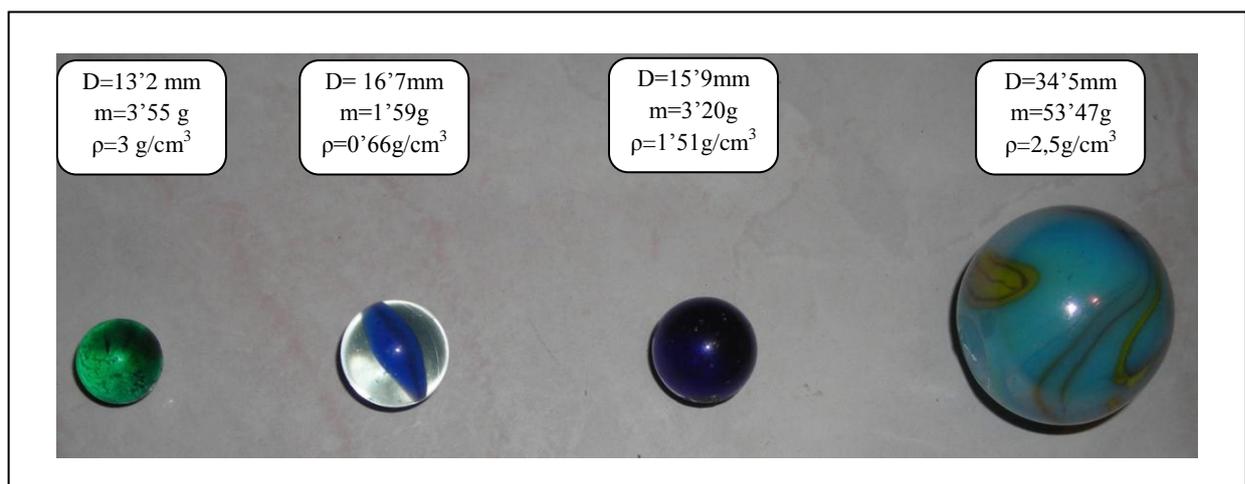
- **Canicas** para simular los meteoritos. Nos hacen falta aproximadamente unas 60 bolas de diferentes medidas y materiales. Previamente estas canicas tienen que estar medidas con un pie de rey y pesadas en una **balanza de precisión**.
- Un **pie de rey** o regla para medir el radio y diámetro de los cráteres y de los eyectas de los impactos. También nos hace falta un **lápiz o bolígrafo** para anotar estas medidas en nuestra **tabla de datos** previamente realizada.

### 2.2.1. Datos de las canicas

Para llevar a cabo la modelización de cráteres de impacto seleccionamos 58 canicas, cada una de ellas con características diferentes. Esta cantidad de bolas nos ha permitido hacer un tratamiento estadístico de los datos para obtener resultados genéricos.

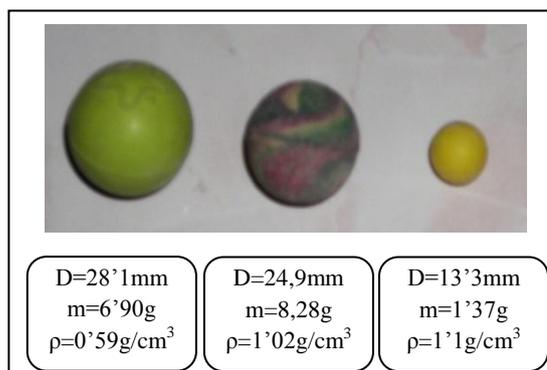
La característica más importante de las canicas que hemos utilizado es que son todas esféricas. Esto comporta ventajas, como por ejemplo la ausencia de variables diferentes del diámetro, ya que como todas las canicas son esféricas no tenemos en cuenta la forma del objeto que impacta contra la superficie, con que el resultado y tratamiento de datos resulta mucho menos dificultoso.

A la hora de seleccionar las canicas tuvimos en cuenta diferentes aspectos que creemos que pueden influir en el resultado final. Estos aspectos son: tipo de material, diámetro, masa y densidad. Cada una de las 58 canicas tiene una característica diferente al resto con el fin de obtener más variedad de resultados. De estas 58, 36 están hechas de vidrio ya que es el material más abundante en canicas y por lo tanto hemos podido encontrar de diferentes tamaños y masas. Aquí exponemos algunas de las canicas que hemos utilizado para nuestro modelo.

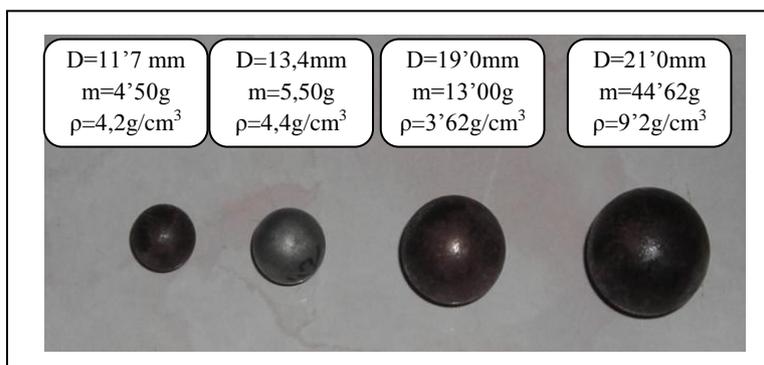




También seleccionamos 12 canicas de plástico y/o goma porque en general tienen una densidad más baja que las de vidrio. En esta imagen podemos ver tres de estas canicas:



Por otra parte tenemos 8 canicas metálicas. Son las bolas con una masa mayor y las que pensábamos que nos tenían que proporcionar unos resultados distintos en relación con otros tipos de canicas. En la fotografía hay cuatro de estas ocho:



Por último, tenemos dos canicas de arcilla, con características muy semejantes a las de vidrio.

La obtención de datos de las canicas escogidas incluyó únicamente dos medidas directas: medida de su diámetro y medida de su masa.

Cuando medimos cualquier objeto con un aparato, aunque sea de mucha precisión, siempre se genera un error (Taylor 1997). En el caso de las medidas directas del diámetro y de la masa, tuvimos que mirar hasta qué unidades podía medir el pie de rey en el caso del diámetro, y la balanza en el caso de la masa. Eso se denomina precisión del aparato, y se ha de incluir siempre en cada medida.

La medida del diámetro de las canicas se hizo con un pie de rey, tal como hemos dicho más arriba, la precisión máxima del cual era de  $\pm 0,1$  mm. Debido a las pequeñas imperfecciones que genera la medida a mano, ya que no siempre se coloca el pie de rey en la misma posición, se cogieron tres medidas del diámetro de cada bola. Posteriormente se hizo la media. Decidimos tomar como error de la medida final la diferencia entre la medida mayor y la más pequeña de entre las tres que tomamos.



Una medida muy importante a la hora de establecer relaciones entre los cráteres del modelo y los cráteres reales es la masa. Esta medida es muy fácil de tomar, ya que únicamente se tiene que colocar el objeto que queremos medir sobre una balanza de precisión y apuntar el resultado que indique. En este caso decidimos tomar una única medida, y como error de la masa de cada bola cogimos la precisión de la balanza, que es de 0,01 gr.

El resto de datos de las canicas no fueron obtenidos a partir de una medida directa, sino a partir de los datos del diámetro y de la masa. Incluyen:

- Radio
- Volumen
- Densidad

Para llevar a cabo estas medidas se confeccionó una tabla con el programa Microsoft Excel donde se incluía el diámetro, el radio, el volumen, la masa y la densidad de cada una de las canicas, así como el error de las medidas directas del diámetro y de la masa, y la propagación de errores producida en el caso del cálculo del radio, del volumen y de la densidad.

Cuando las medidas son indirectas, el cálculo de errores se tiene que hacer a partir de los errores de las medidas directas (Taylor 1997). Se trata de la llamada *propagación de errores*, que consiste en un conjunto de reglas que permiten asignar errores en medidas indirectas. Así pues, se utiliza la propagación de errores cuando queremos obtener incertidumbres de magnitudes indirectas a partir de valores que hemos obtenido experimentalmente, y por lo tanto tienen una incertidumbre debido a la limitada precisión del aparato en que se ha medido.

El cálculo del **radio** es muy sencillo, a partir del diámetro lo podemos calcular haciendo una única división:

$$R = \frac{D}{2}$$

Como hemos hecho tres medidas para saber el diámetro de cada canica con el fin de hacer una mejor aproximación, el error del diámetro se calcula restando el valor máximo del valor más pequeño entre estas tres medidas. El error del radio se calcula dividiendo el error del diámetro entre dos:

$$\delta R = \frac{\delta D}{2}$$

Para calcular el **volumen** de las canicas, al ser todas de forma esférica, aplicamos la fórmula del volumen de una esfera:

$$V = \frac{4}{3} \pi R^3$$



donde  $R$  es el radio de la esfera. El error del volumen se calcula utilizando la propagación de errores en funciones de una variable:

$$\delta V = \left| \frac{dV}{dR} \right| \cdot \delta R = \frac{3 \cdot 4 \cdot \pi \cdot R^2}{3} \cdot \delta R = 4\pi R^2 \cdot \delta R$$

donde  $R$  es el radio de la esfera.

Finalmente, la **densidad** de cada bola se obtiene a partir de la fórmula:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

donde  $m$  es la masa de cada canica, y  $V$  es su volumen.

Su error se calcula a partir de la fórmula:

$$\delta \rho = \rho \left( \frac{\delta m}{m} + \frac{\delta V}{V} \right)$$

donde  $\delta m = \pm 0.01g$  para todas las canicas ya que es la precisión de la balanza.

En la tabla siguiente están los datos de radio, volumen, masa y densidad de cada canica, con su correspondiente error. Para ver la información completa consultad el anexo 2. Puede sorprender la disparidad de densidades en bolas de un mismo material. Eso puede ser debido al hecho que el aspecto externo de las canicas nos hace pensar en un material y en cambio tienen un núcleo de un material diferente, lo cual altera su densidad final.

| Tipo de material | Radio (mm) | Volumen (cm <sup>3</sup> ) | Masa (g)<br>±0,01 g | $\rho$ = densidad (g/cm <sup>3</sup> ) |
|------------------|------------|----------------------------|---------------------|--|
| Vidrio           | 5,6±0,2    | 0,73±0,06                  | 5,50                | 7,5±0,8                                |
|                  | 6,1±0,3    | 0,95±0,15                  | 2,35                | 1,4±0,3                                |
|                  | 6,3±0,2    | 1,06±0,08                  | 5,81                | 5,5±0,5                                |
|                  | 6,3±0,5    | 1,1±0,3                    | 3,44                | 3±1                                    |
|                  | 6,5±0,1    | 1,17±0,06                  | 14,90               | 12,7±0,8                               |
|                  | 6,5±1,5    | 1,2±0,8                    | 3,04                | 4,3±0,8                                |
|                  | 6,6±0,1    | 1,22±0,03                  | 2,93                | 2,38±0,15                              |
|                  | 6,6±0,1    | 1,20±0,06                  | 3,55                | 3,0±0,3                                |
|                  | 6,8±0,4    | 1,3±0,3                    | 16,38               | 13±3                                   |
|                  | 6,9±0,2    | 1,37±0,09                  | 3,54                | 2,6±0,3                                |
|                  | 6,9±0,1    | 1,37±0,06                  | 7,57                | 5,5±0,3                                |
|                  | 7,0±0,2    | 1,4±0,1                    | 6,20                | 4,4±0,4                                |
|                  | 7,0±0,1    | 1,45±0,04                  | 3,08                | 2,14±0,15                              |
|                  | 7,2±0,2    | 1,54±0,07                  | 4,91                | 3,2±0,2                                |
|                  | 7,6±0,2    | 1,82±0,15                  | 1,38                | 0,77±0,15                              |
|                  | 7,6±0,2    | 1,9±0,15                   | 4,80                | 2,6±0,3                                |
| 7,7±0,3          | 1,9±0,2    | 8,28                       | 4,4±0,5             |  |

## Modelización de cráteres de impacto

Jesús Ordoño, Carlos Tadeo



|                          |          |             |       |             |
|--------------------------|----------|-------------|-------|-------------|
|                          | 7,7±0,4  | 1,9±0,3     | 12,20 | 6,3±0,9     |
|                          | 7,7±0,4  | 1,9±0,3     | 5,15  | 2,6±0,4     |
|                          | 7,8±0,3  | 2,0±0,3     | 0,70  | 0,4±0,1     |
|                          | 7,8±0,1  | 1,98±0,08   | 28,15 | 14,3±0,6    |
|                          | 7,9±0,1  | 2,09±0,08   | 5,17  | 2,44±0,15   |
|                          | 8,0±0,4  | 2,1±0,3     | 5,90  | 2,8±0,4     |
|                          | 8,0±0,1  | 2,12±0,8    | 3,24  | 1,51±0,15   |
|                          | 8,0±0,2  | 2,13±0,15   | 6,21  | 2,9±0,3     |
|                          | 8,0±0,1  | 2,15±0,04   | 6,20  | 2,9±0,1     |
|                          | 8,0±0,1  | 2,17±0,9    | 1,34  | 0,60±0,07   |
|                          | 8,2±0,1  | 2,30±0,05   | 1,07  | 0,44±0,06   |
|                          | 8,3±0,3  | 2,4±0,3     | 6,15  | 12±2        |
|                          | 8,4±0,2  | 2,44±0,15   | 1,59  | 0,66±0,08   |
|                          | 9,0±0,1  | 3,07±0,06   | 7,70  | 2,48±0,08   |
|                          | 10,1±0,1 | 4,27±0,15   | 2,90  | 0,68±0,05   |
|                          | 10,6±0,3 | 5,0±0,4     | 12,08 | 2,5±0,2     |
|                          | 10,6±0,1 | 5,05±0,15   | 1,89  | 0,38±0,03   |
|                          | 11,2±0,2 | 5,9±0,3     | 3,00  | 0,51±0,05   |
|                          | 17,2±0,3 | 21±1,0      | 53,47 | 2,5±0,12    |
| <b>Plástico y/o goma</b> | 6,0±0,1  | 0,91±0,03   | 3,70  | 4,1±0,3     |
|                          | 6,2±0,3  | 0,99±0,15   | 4,94  | 4,9±0,9     |
|                          | 6,2±0,3  | 1,01±0,15   | 1,10  | 1,1±0,3     |
|                          | 6,7±0,1  | 1,24±0,03   | 1,37  | 1,1±0,1     |
|                          | 6,7±0,1  | 1,26±0,06   | 10,15 | 8,1±0,5     |
|                          | 6,7±0,1  | 1,26±0,07   | 4,90  | 3,9±0,3     |
|                          | 7,2±0,1  | 1,53±0,3    | 5,57  | 3,7±0,3     |
|                          | 11,1±0,1 | 5,7±0,2     | 5,08  | 0,90±0,04   |
|                          | 12,2±0,2 | 7,6±0,3     | 7,00  | 0,92±0,05   |
|                          | 12,5±0,1 | 8,1±0,2     | 8,28  | 1,00±0,04   |
|                          | 14,0±0,1 | 11,6±0,3    | 6,90  | 0,59±0,03   |
|                          | 19,9±0,2 | 33±1        | 1,11  | 0,034±0,004 |
| <b>Metálicas</b>         | 3,1±0,1  | 0,121±0,006 | 0,40  | 3±1         |
|                          | 4,7±0,3  | 0,42±0,07   | 3,50  | 8±2         |
|                          | 5,8±0,1  | 0,83±0,05   | 6,87  | 8,3±0,6     |
|                          | 6,7±0,1  | 1,26±0,06   | 5,50  | 4,4±0,3     |
|                          | 7,8±0,2  | 2,02±0,15   | 16,31 | 8,0±0,7     |
|                          | 7,9±0,3  | 2,0±0,2     | 3,53  | 1,8±0,2     |
|                          | 9,5±0,1  | 3,59±0,06   | 13,00 | 3,62±0,09   |
|                          | 10,5±0,1 | 4,87±0,07   | 44,62 | 9,2±0,2     |
| <b>Arcilla</b>           | 9,6±0,2  | 2,75±0,3    | 4,76  | 3,6±0,3     |
|                          | 8,7±0,2  | 3,7±0,15    | 13,60 | 1,71±0,15   |



### 2.2.2. Datos de la superficie de impacto

Para llevar a cabo este trabajo tuvimos que simular una superficie en la cual impactaran los objetos escogidos, en este caso canicas. A la hora de preparar la superficie hicimos una serie de pruebas con diferentes materiales: arena, mortero, harina, cacao, café, talco, etc. Para limitar la superficie cogimos una caja de cartón y acto seguido introdujimos diferentes materiales dispuestos por capas para poder observar qué componentes y qué estructuración tenían que tener con el fin de obtener el máximo provecho.

Finalmente, después de hacer lanzamientos sobre diferentes superficies con las mismas canicas, pudimos decidir cuál nos proporcionaba unas mejores características para la recogida de datos. Según este criterio, los materiales que escogimos son los siguientes: arena, mortero y talco. Acto seguido estructuramos la superficie en diferentes capas:

1. La capa inferior de 4 cm de grosor compuesta únicamente por arena. Este material sirve para atenuar el impacto de la bola con el fin de que no llegue hasta el fondo de la caja, simulando el centro terrestre mucho más denso.
2. La segunda capa está hecha de mortero. Primeramente decidimos hacerla con arena tamizada y portland, pero este material es demasiado fino y eso hace que las canicas a una cierta altura puedan producir un cráter demasiado profundo y por lo tanto el resultado final no sería el idóneo. Por este motivo, utilizamos mortero, un material con una densidad de  $1,5 \text{ gr/cm}^3$  formado por arcilla y materiales calcáreos que sí que cumple con nuestros requisitos. Esta capa tiene un grosor de 4 cm.
3. La capa superior está compuesta por talco. Esta capa se caracteriza porque es la más fina de todas, tiene un grosor de 2 mm y es de un único material, el talco, con una densidad de  $0,49 \text{ gr/cm}^3$ . Este material lo hemos escogido porque es de color blanco y muy fino, con lo cual contrasta con la capa inferior y nos permite medir el radio del cráter, la profundidad y especialmente los eyecta con mucha más precisión.

Capa superior compuesta por talco, nos proporciona una mejor recogida de datos.

Segunda capa formada por mortero. Es donde se quedará grabado gran parte del impacto.

Capa inferior de arena con el objetivo de amortiguar el impacto de la canica.



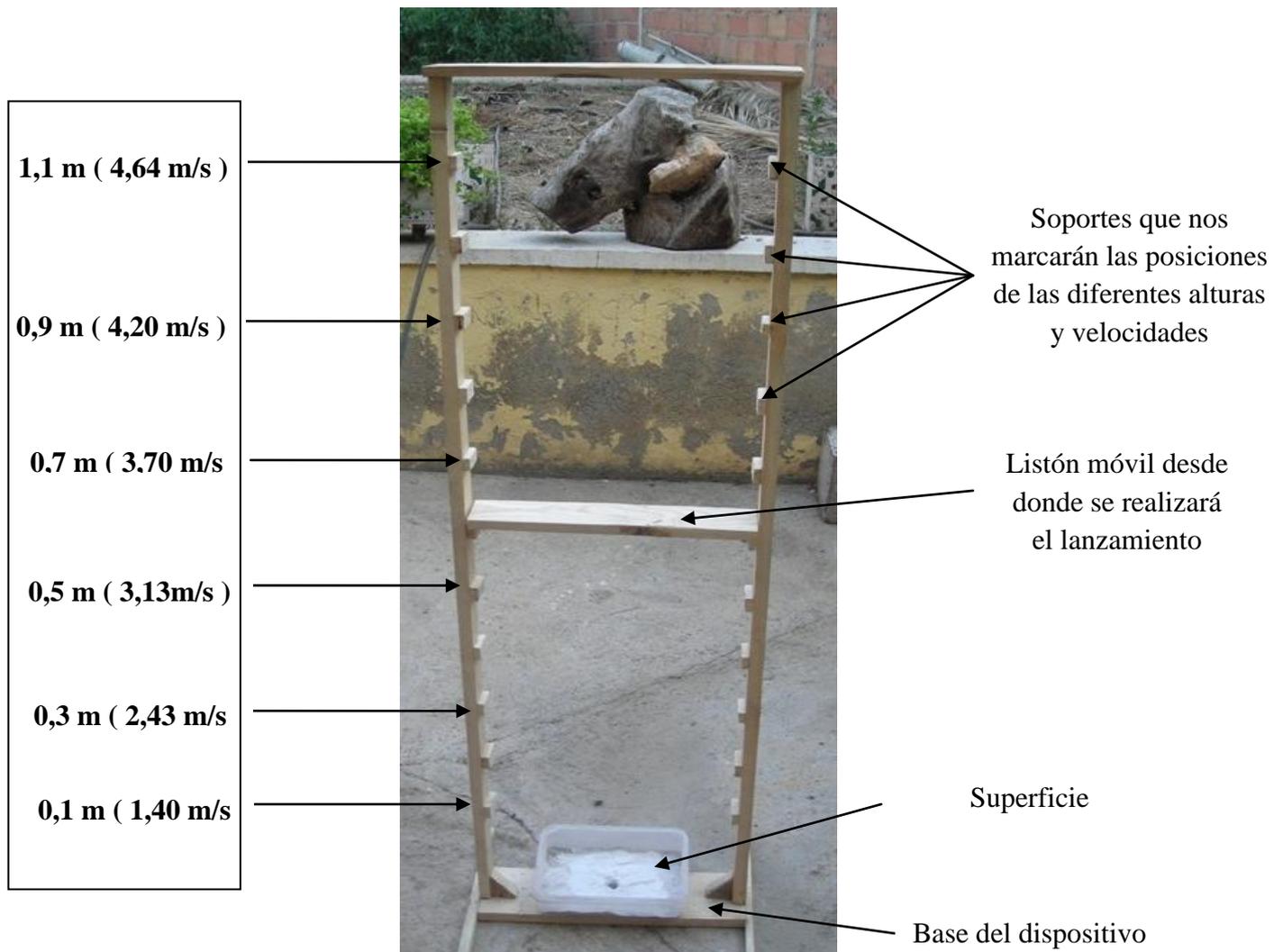
*Superficie de impacto de las canicas de nuestro modelo y desde donde cogeremos los datos posteriores al impacto.*



### 2.2.3. Dispositivo de lanzamiento

En nuestro modelo de cráteres de impacto, uno de los factores que teníamos que controlar era la velocidad a la cual llegaban al suelo las canicas. Por eso decidimos realizar un dispositivo desde donde nosotros pudiéramos establecer con precisión la altura de lanzamiento de las bolas ya que a partir de esta altura se puede calcular su velocidad de impacto. Por esta razón, después de muchas ideas, decidimos hacerlo como muestra la imagen de más abajo. El proceso de construcción del dispositivo que seguimos fue el siguiente (la lista de materiales está en el punto 2.2):

Una vez cortados y pulidos los listones de madera necesarios para construir el dispositivo de lanzamiento de nuestro modelo, los encolamos y los unimos con cola blanca y clavos. Primero de todo colocamos las 20 piezas de 4 x 2,5 x 1 cm en los listones-guía, de manera que quedaron diez piezas en cada listón a una distancia de 10 cm entre cada una de ellas. Estas piezas nos marcan las diferentes alturas desde donde lanzaremos las canicas. A continuación unimos los dos listones-guía a la base a una distancia de separación de unos 40 cm aproximadamente y totalmente perpendiculares a la base. Como refuerzo de la estructura, colocamos dos pequeños triángulos en la unión como contrafuertes y dos listones largos en los lados de la base para ampliar la superficie. Finalmente unimos el listón de 7 x 43,5 x 1,5 cm en la parte superior de los listones-guía.



*Dispositivo de lanzamiento con las alturas desde donde haremos los lanzamientos de las canicas. Entre paréntesis la velocidad de impacto calculada a partir de la conservación de la energía mecánica*



Es importante hacer notar que con este dispositivo hemos obtenido cráteres con seis velocidades de impacto diferentes: 1'40 m/s, 2'43 m/s, 3'13 m/s, 3'70 m/s, 4'20 m/s y de 4'64 m/s.

### Cálculo de la velocidad de impacto en nuestro modelo

Como ya hemos dicho, se puede calcular la velocidad de impacto de las canicas a partir de la altura desde la cual son lanzadas. La fórmula final que relaciona la velocidad  $v$  y la altura  $h$  es:

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

donde  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  es la aceleración de la gravedad en la superficie terrestre. Esta fórmula se obtiene a partir de la conservación de la energía mecánica de la manera siguiente:

- A partir de la fórmula de la conservación de la energía mecánica obtenemos la expresión:

$$E. \text{ cinética inicial} + E. \text{ potencial inicial} = E. \text{ cinética final} + E. \text{ potencial final}$$

en que se considera la situación inicial aquélla en que la bola se encuentra a una altura  $h$ , y la situación final aquélla en que la canica está en la superficie de impacto. La fórmula anterior se puede reescribir

$$-\Delta E_p = \Delta E_c$$

donde  $\Delta$  es la diferencia de energías final menos inicial, es decir, la energía en el suelo menos la energía a una altura  $h$ .

- Si consideramos un cuerpo que está situado a una altura  $h$  sobre la superficie de la Tierra y después cae sobre la superficie terrestre, la diferencia de energía potencial entre los dos puntos es:

$$\begin{aligned} \Delta E_p &= E_{p_{\text{suelo}}} - E_{p_h} = \frac{-G \cdot M_T \cdot m}{R_T} - \frac{-G \cdot M_T \cdot m}{R_T + h} = -G \cdot M_T \cdot m \cdot \left( \frac{R_T + h - R_T}{R_T \cdot (R_T + h)} \right) = \\ &= -G \cdot M_T \cdot m \cdot \frac{h}{R_T \cdot (R_T + h)} \end{aligned}$$

donde  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/(\text{kg} \cdot \text{s}^2)$  es la constante de gravitación universal,  $M_T$  y  $R_T$  son la masa y el radio de la Tierra, y  $m$  es la masa de la bola que impacta.

- Si consideramos que el punto está cerca de la superficie de la Tierra tenemos que

$$h \ll R_T$$

y podemos aproximar a la fórmula anterior

$$R_T + h \approx R_T$$



Entonces la expresión de la diferencia de energía potencial se convierte en:

$$\Delta E_p = \frac{-G \cdot M_T \cdot m \cdot h}{R_T^2}$$

- Si consideramos  $g = G \cdot \frac{M_T}{R_T^2}$  simplificamos la expresión anterior:

$$\Delta E_p = -g \cdot m \cdot h$$

- Por otra parte, tenemos que la expresión de la diferencia de energía cinética es

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

ya que la velocidad inicial es 0 (las canicas se dejan caer en reposo desde una altura  $h$ ), mientras la velocidad final es la velocidad de impacto  $v$ , la expresión de la cual estamos buscando.

- Por lo tanto, si sustituimos en la fórmula inicial:

$$g \cdot m \cdot h = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

- Simplificamos  $m$  en la expresión anterior:

$$g \cdot h = \frac{1}{2} v^2$$

siendo  $m$  la masa de la bola lanzada,  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  el valor de la gravedad en la superficie de la Tierra,  $h$  la altura en la cual se quiere determinar la velocidad de impacto y  $v$  la velocidad buscada.

- Con eso deducimos:

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

que es la fórmula que hemos utilizado para calcular las diferentes velocidades de impacto de las canicas a partir de las alturas desde las cuales las lanzábamos.

Para hacer el desarrollo de este cálculo hemos menospreciado el efecto de la fricción de la bola con el aire. Por otra parte, es conveniente hacer notar que la velocidad de impacto **no depende de la masa** de las canicas

### **2.3. Procedimiento**

Una vez preparado todo el material (superficie de impacto, canicas y dispositivo de lanzamiento), lo colocamos todo en el lugar de trabajo.

El procedimiento para realizar los lanzamientos de cada bola fue el siguiente:





1. Colocamos el listón de madera desde donde se lanzan las canicas en el lugar correspondiente (empezando a 10 cm de la superficie).
2. A continuación cogemos una canica, previamente numerada, y la colocamos justo en la base inferior del listón. La soltamos.
3. Cogemos el pie de rey y con la máxima precisión posible medimos el diámetro del cráter y el radio de los eyecta.
4. Después, se tiene que extraer la bola de la base con mucha precaución, con unas pinzas por ejemplo, para no destruir el cráter.
5. A continuación, utilizando un listón de madera y el pie de rey, medimos la profundidad con exactitud.
6. Seguidamente realizaremos el mismo lanzamiento tres veces y volveremos a medir y a anotar los datos.



Medida de la profundidad del cráter.



Medida del diámetro del cráter y del radio de los eyecta.

7. Continuaremos con la misma canica realizando los lanzamientos desde las diferentes alturas (tres lanzamientos a cada altura). Lo haremos de esta manera para minimizar la alteración de los resultados que podrían provocar las variaciones de la superficie, como por ejemplo, la compactación.
8. Al acabar con esta canica continuaremos con otra con el mismo procedimiento.

Para recoger los datos, elaboramos una tabla como la siguiente:



**Bola**

Masa:  
 Diámetro:  
 densidad:

| Altura<br>(m) | Velocidad<br>(m/s) | Diámetro cráter<br>(mm) |    |    |                   | Radio eyecta<br>(mm) |    |    |                   | Profundidad<br>(mm) |    |    |                   |
|---------------|--------------------|-------------------------|----|----|-------------------|----------------------|----|----|-------------------|---------------------|----|----|-------------------|
|               |                    | M1                      | M2 | M3 | Medida<br>(Media) | M1                   | M2 | M3 | Medida<br>(Media) | M1                  | M2 | M3 | Medida<br>(Media) |
| 0.1           |                    |                         |    |    |                   |                      |    |    |                   |                     |    |    |                   |
| 0.2           |                    |                         |    |    |                   |                      |    |    |                   |                     |    |    |                   |
| 0.3           |                    |                         |    |    |                   |                      |    |    |                   |                     |    |    |                   |
| 0.4           |                    |                         |    |    |                   |                      |    |    |                   |                     |    |    |                   |
| 0.5           |                    |                         |    |    |                   |                      |    |    |                   |                     |    |    |                   |
| 0.6           |                    |                         |    |    |                   |                      |    |    |                   |                     |    |    |                   |
| 0.7           |                    |                         |    |    |                   |                      |    |    |                   |                     |    |    |                   |
| 0.8           |                    |                         |    |    |                   |                      |    |    |                   |                     |    |    |                   |
| 0.9           |                    |                         |    |    |                   |                      |    |    |                   |                     |    |    |                   |
| 1             |                    |                         |    |    |                   |                      |    |    |                   |                     |    |    |                   |
| 1.10          |                    |                         |    |    |                   |                      |    |    |                   |                     |    |    |                   |

Todos los datos están recogidos en el anexo 1.



## **2.4. Resultados obtenidos**

En este apartado expondremos nuestros resultados extraídos a partir de nuestro modelo y después de haber recopilado y reordenado todos los datos obtenidos. Dividiremos estos resultados en cuatro grupos según el tipo de relaciones que hemos obtenido:

- **2.4.1. Relación de los cráteres con el diámetro de las canicas.** En este punto expondremos las relaciones que podamos establecer entre las magnitudes del cráter medidas en nuestro modelo (diámetro del cráter y radio de los eyecta) con el diámetro de las canicas correspondientes.
- **2.4.2. Relación de los cráteres con la masa y la densidad de las canicas.** En este punto intentaremos encontrar relaciones entre el diámetro del cráter producido y el radio de sus eyecta, con la masa o la densidad de la canica impactada sobre nuestra superficie.
- **2.4.3. Relación de los cráteres con la energía cinética de las canicas.** Relacionaremos el diámetro del cráter y el radio de los eyecta con la energía cinética de las canicas al impactar (esta energía es directamente proporcional a la masa de la bola y a su velocidad de impacto al cuadrado).
- **2.4.4. Relación de la profundidad de los cráteres con el diámetro de los mismos.** En este apartado comprobaremos, con los datos de nuestro modelo, si, tal como hemos dicho en el apartado 1, la profundidad de un cráter es una tercera parte de su diámetro.

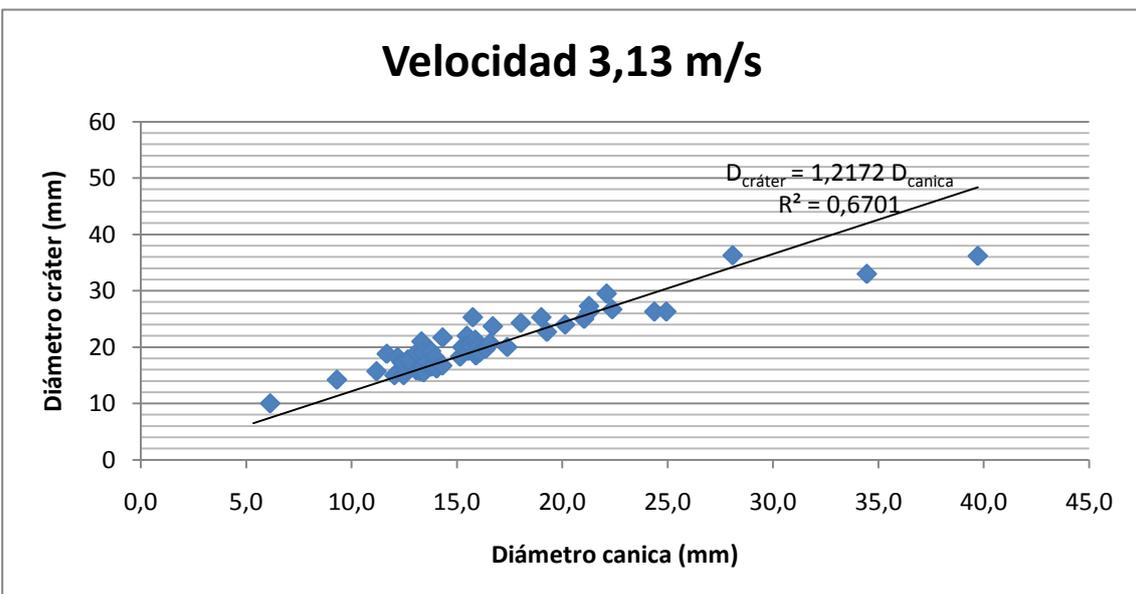
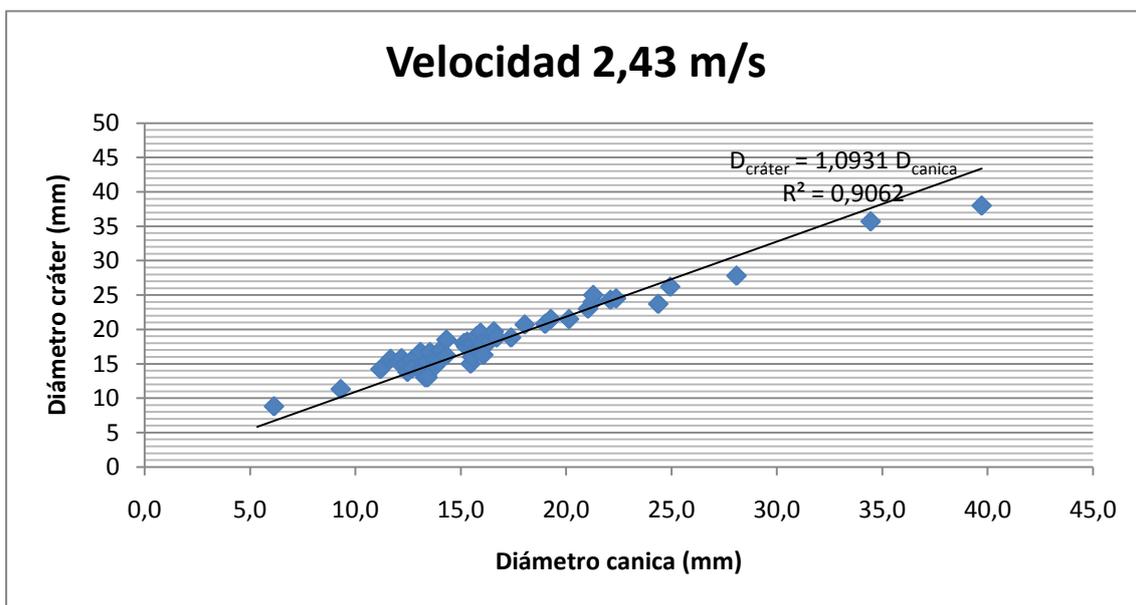
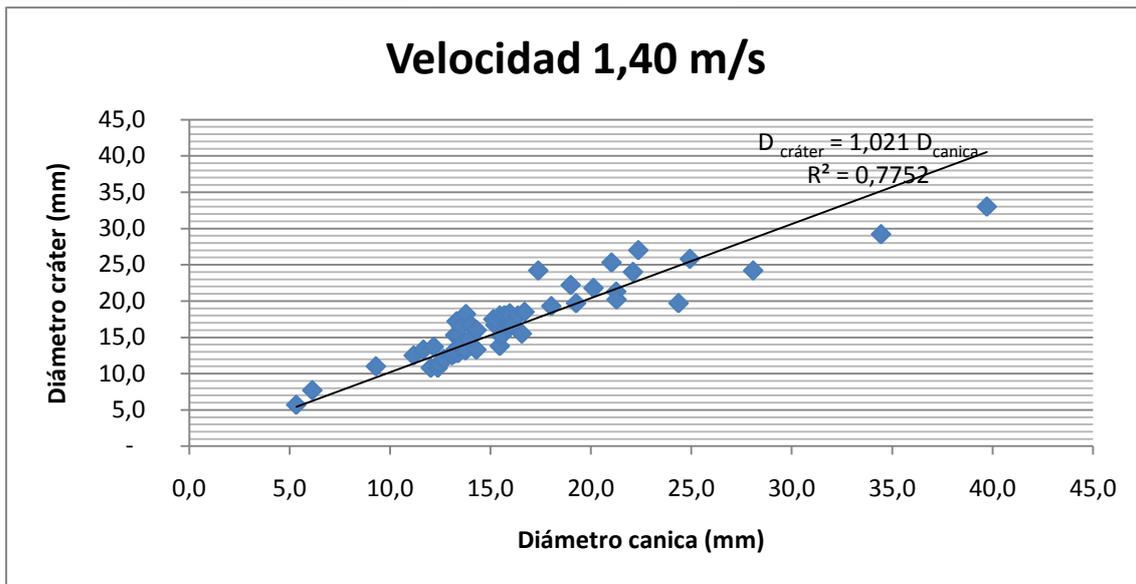
De esta manera podremos organizar mejor los resultados y obtener una (o diversas) relaciones con mucha más facilidad.

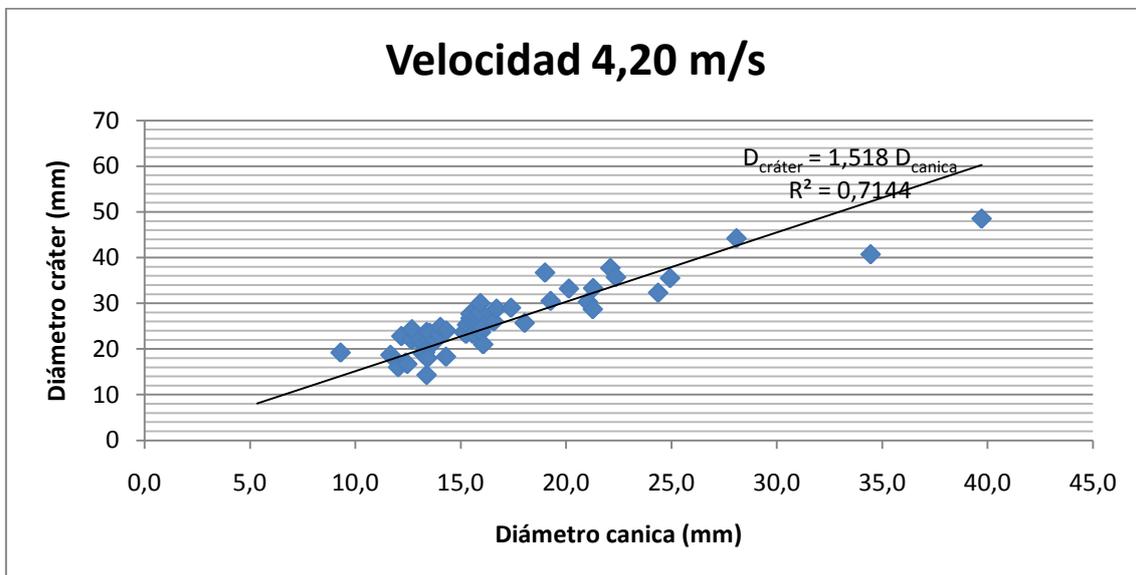
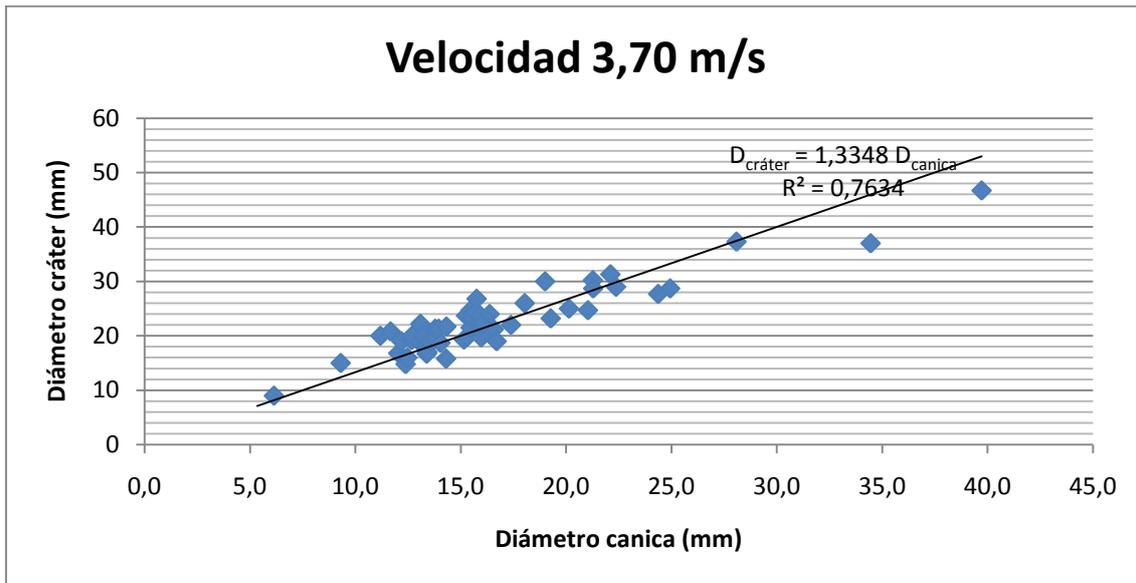
### **2.4.1. Relación de los cráteres con el diámetro de las canicas**

#### **Diámetro de los cráteres - diámetro de las canicas**

Una vez cogidas todas las medidas de las bolas en nuestro modelo, las introducimos en un documento de Excel de la siguiente manera: colocaremos el número de la canica, su diámetro y el diámetro del cráter correspondiente. Tenemos que separar, sin embargo, las medidas por velocidades de impacto, es decir, realizar una tabla para cada valor de la velocidad a la que llegan las canicas al suelo (o altura desde la cual son lanzadas) de manera que nos quede una tabla con número de canica, diámetro y diámetro del cráter a la velocidad de impacto de 1,4 m/s (o altura de lanzamiento de 0,1 m), otra tabla con número de canica, diámetro y diámetro del cráter a la velocidad 2,43 m/s (o 0,3 m de altura) y así con las seis velocidades de impacto que hemos considerado.

Éstos son los resultados que hemos obtenido, que relacionan el diámetro de las canicas con los de los cráteres, a las diferentes velocidades de impacto de las mismas. Hemos añadido en cada gráfico la línea de tendencia y el coeficiente de regresión lineal  $R^2$  (Antonio 2008; Taylor 1997), que nos indica el grado de dispersión de los datos respecto de la línea de tendencia, y que se acerca a 1 cuando esta dispersión es mínima (resultados muy ajustados a la línea de tendencia) y a 0 cuando es máxima (resultados que se ajustan muy poco a la línea de tendencia dada).





En las seis gráficas podemos observar que los puntos definen una línea de tendencia bastante marcada con relativamente poca dispersión. El gráfico con menos dispersión es el correspondiente a la velocidad  $v = 2,43$  m/s, tal como muestra el coeficiente de regresión ( $R^2$ ) de 0,9062; en cambio el gráfico que presenta más dispersión es el correspondiente a la velocidad  $v = 4,64$  m/s con un coeficiente de regresión de 0,603. Por lo tanto, podemos afirmar que existe una relación entre el diámetro de la canica y el diámetro del cráter para cada velocidad:

- Para la  $v = 1,40$  m/s →  $D_{\text{cráter}} = 1,021 D_{\text{canica}}$
- Para la  $v = 2,43$  m/s →  $D_{\text{cráter}} = 1,0931 D_{\text{canica}}$
- Para la  $v = 3,13$  m/s →  $D_{\text{cráter}} = 1,2172 D_{\text{canica}}$
- Para la  $v = 3,70$  m/s →  $D_{\text{cráter}} = 1,3348 D_{\text{canica}}$
- Para la  $v = 4,20$  m/s →  $D_{\text{cráter}} = 1,518 D_{\text{canica}}$
- Para la  $v = 4,64$  m/s →  $D_{\text{cráter}} = 1,6322 D_{\text{canica}}$



Vemos que en los seis casos, la relación entre los diámetros de la canica y del cráter es de proporcionalidad directa:

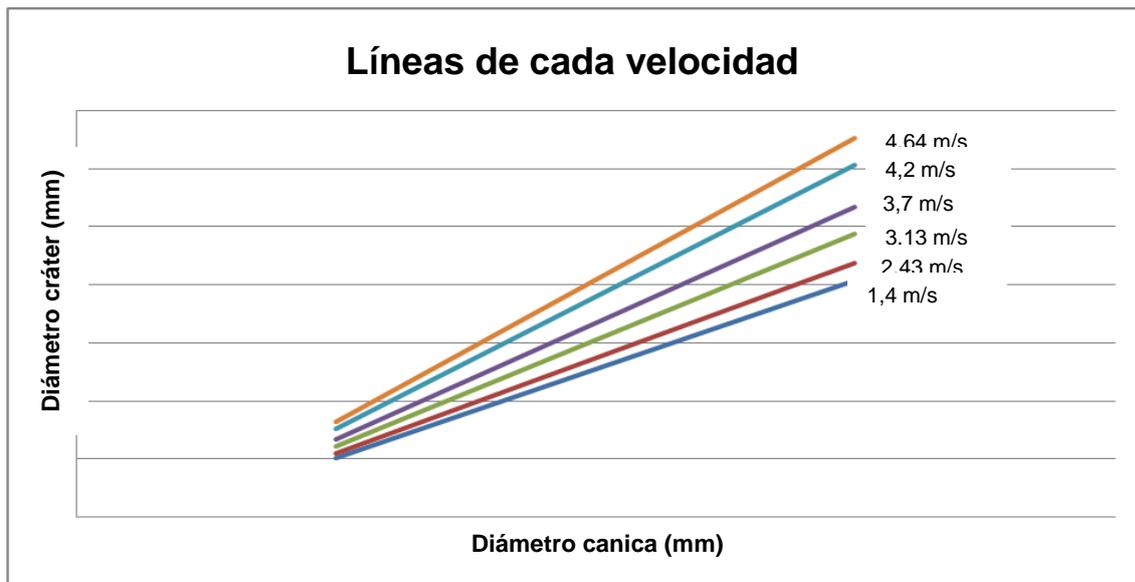
### Fórmula del coeficiente

$$D_{\text{cráter}} = k \cdot D_{\text{canica}}$$

De esta manera podemos extraer un primer e importante resultado de nuestro trabajo al afirmar que:

### El diámetro del cráter es directamente proporcional al diámetro de la canica

Acto seguido intentaremos encontrar alguna relación entre los coeficientes de proporcionalidad (k) de cada gráfica y la velocidad, ya que observamos que a diferentes velocidades el cráter producido varía. En primer lugar realizaremos una gráfica en que introduciremos las diferentes rectas de regresión "diámetro canica-diámetro cráter" correspondientes a cada velocidad:

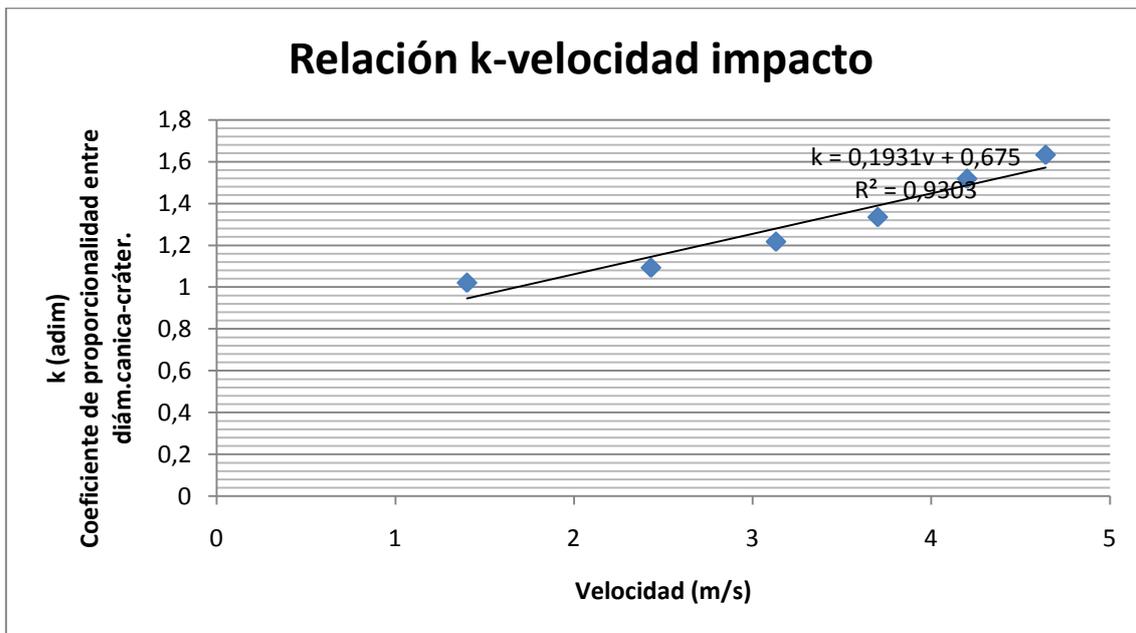


Vemos cómo la pendiente de cada recta es cada vez un poco mayor que la anterior a medida que aumenta la velocidad. Eso quiere decir que, a más velocidad, el coeficiente de proporcionalidad entre los diámetros de cráter y canica se hace cada vez mayor. Además observamos que lo hace de manera prácticamente regular. En segundo lugar, realizaremos una tabla que relacione los coeficientes de proporcionalidad entre diámetros (que notaremos con la letra k y que es adimensional) con la velocidad de impacto de las canicas.



| v impacto (m/s) | k (coef. de proporcionalidad entre diám. canica – diám. cráter, adim.) |
|-----------------|--|
| 1,40            | 1,021  |
| 2,43            | 1,0931   |
| 3,13            | 1,2172   |
| 3,70            | 1,3348   |
| 4,20            | 1,518  |
| 4,64            | 1,6322   |

De acuerdo con estos datos realizaremos una gráfica que nos relacione la velocidad de impacto con  $k$  para extraer una relación:



La dispersión de la gráfica es prácticamente nula (ya que el valor de  $R^2$  es 1 cuando la dispersión es nula y cero cuando es máxima) y la línea de tendencia es ascendente como ya preveíamos. Vemos que  $k$  mantiene una relación de proporcionalidad a medida que aumenta la velocidad.

Aplicamos ahora unas fórmulas estadísticas para calcular la propagación de errores en los coeficientes de una recta de regresión (Taylor 1997). Si tenemos una recta de regresión  $y = A + Bx$ , tenemos que las incertidumbres de  $A$  y  $B$  se calculan

$$\sigma_A = \sigma_y \sqrt{\frac{\sum x^2}{\Delta}}$$

$$\sigma_B = \sigma_y \sqrt{\frac{N}{\Delta}}$$



donde  $\Delta = N\sum x^2 - (\sum x)^2$  y  $\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{N-2} \sum (y_i - A - Bx_i)^2}$ . En nuestro caso,  $N = 6$  (ya que tenemos 6 puntos), y haciendo los cálculos correspondientes tenemos que

$$A = 0,7 \pm 0,1 \text{ (adimensional)}$$

$$B = 0,19 \pm 0,03 \text{ s/m}$$

Así pues podemos concluir que el diámetro de un cráter es directamente proporcional al valor del diámetro de la canica u objeto impactado, y que el coeficiente de proporcionalidad  $k$  varía con la velocidad de impacto. De la misma manera,  $k$  viene determinado por la fórmula  $k = 0,19v + 0,7$  ( $v$  en m/s) extraída en la gráfica anterior, donde  $v$  es la velocidad de impacto. Por lo tanto con estos datos podemos extraer un segundo resultado donde afirmamos que:

### **El coeficiente de proporcionalidad depende de manera lineal de la velocidad de impacto**

De esta manera, si sustituimos en la fórmula del coeficiente, podremos afirmar que:

#### **Ley de Ordeo<sup>1</sup>**

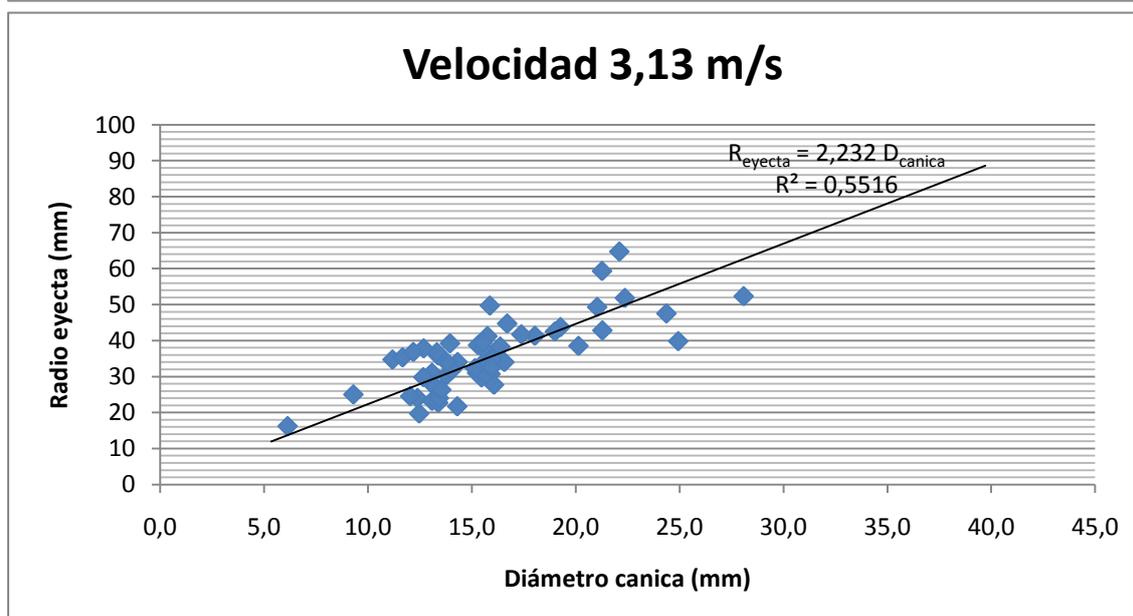
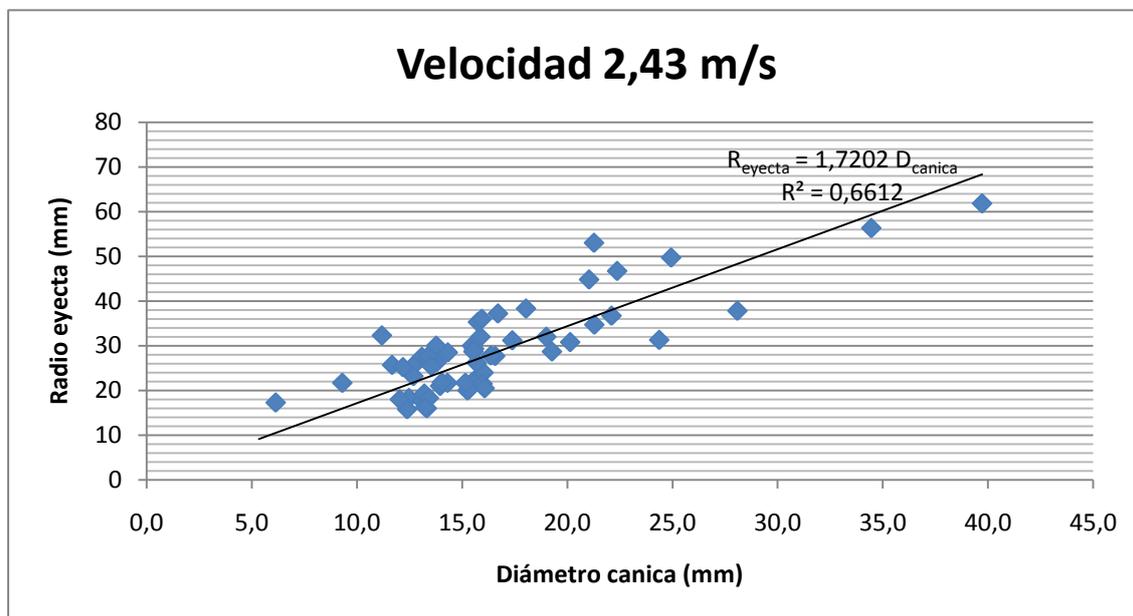
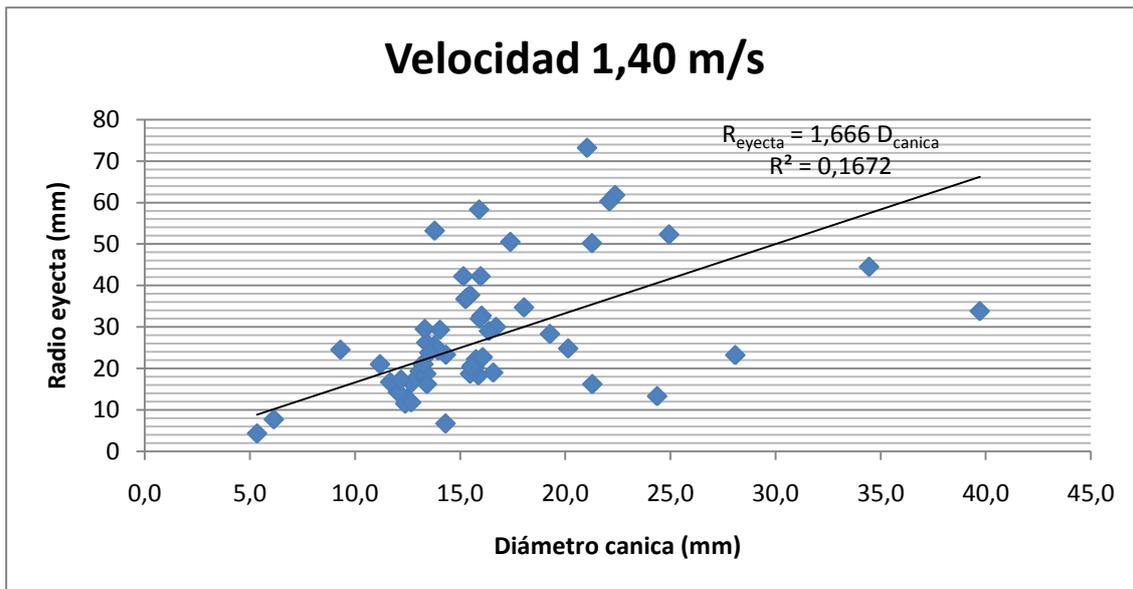
$$D_{\text{cráter}} = (0,19 \cdot v + 0,7) \cdot D_{\text{canica}}$$

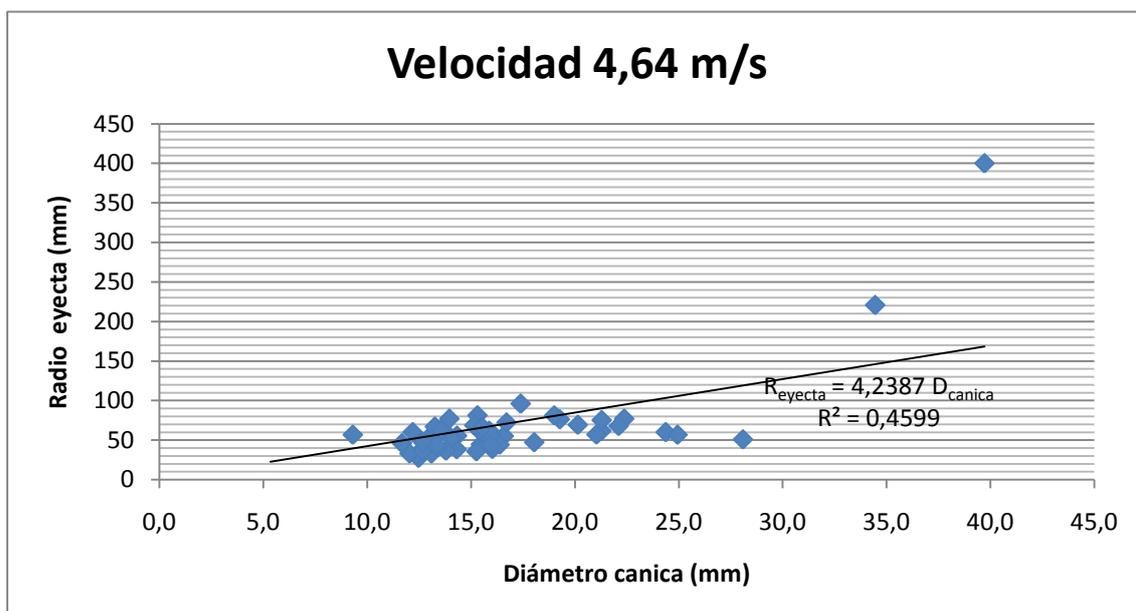
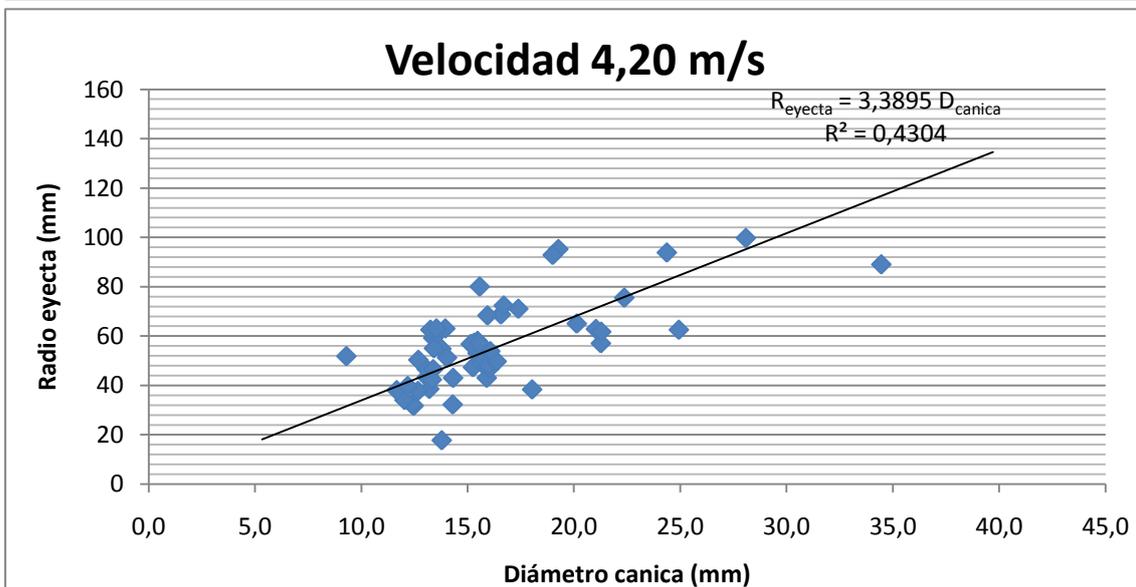
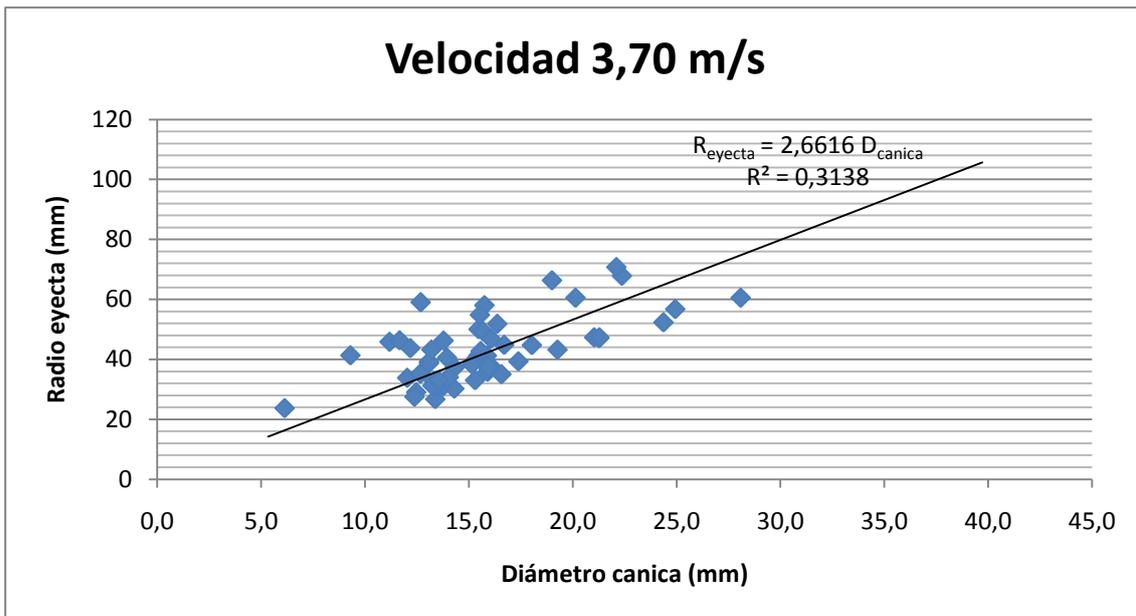
Donde  $D$  es diámetro y  $v$  es la velocidad de impacto medida en m/s.

### **Eyecta - diámetro de las canicas**

Con los datos extraídos en nuestro modelo podemos realizar una tabla en un Excel, como antes hemos hecho con del diámetro de los cráteres, en la cual introduciremos el número de las canicas, el diámetro de éstas y el valor del radio de los eyecta en vez del diámetro del cráter. Tendremos que hacer una tabla para cada velocidad de la misma manera que hemos hecho en el apartado anterior. Con estas tablas realizaremos las gráficas pertinentes (con línea de tendencia y coeficiente de regresión lineal). Éstos son los resultados:

<sup>1</sup> Ordeo es una palabra formada a partir de los apellidos Ordoño y Tadeo.







Vemos en las seis gráficas que los puntos son dispersos, pero aun así observamos una tendencia ascendente de los radios de los eyecta con los diámetros de las canicas para cada velocidad, y una cierta proporcionalidad entre estos radios y los respectivos diámetros. El gráfico con más dispersión es el correspondiente a la velocidad  $v = 1,40$  m/s que presenta un coeficiente de regresión ( $R^2$ ) de 0,1672; en cambio el gráfico que presenta menos dispersión es el correspondiente a  $v = 2,43$  m/s con una  $R^2 = 0,6612$ . Hay que remarcar que en el apartado anterior, en el que se relacionaban los diámetros de los cráteres con los de las canicas, también el gráfico con menos dispersión era el correspondiente a  $v = 2,43$  m/s.

Podemos observar, pues, que no existe una línea de tendencia tan marcada como nos sucedía con el diámetro del cráter pero aun así podemos afirmar, con todas las precauciones, que existe una relación entre el radio de los eyecta y el diámetro de la canica para cada velocidad:

|                        |        |  |
|------------------------|--------|--|
| Para la $v = 1,40$ m/s | —————> | $R_{\text{eyecta}} = 1,666 D_{\text{canica}}$  |
| Para la $v = 2,43$ m/s | —————> | $R_{\text{eyecta}} = 1,7202 D_{\text{canica}}$ |
| Para la $v = 3,13$ m/s | —————> | $R_{\text{eyecta}} = 2,232 D_{\text{canica}}$  |
| Para la $v = 3,70$ m/s | —————> | $R_{\text{eyecta}} = 2,6616 D_{\text{canica}}$ |
| Para la $v = 4,20$ m/s | —————> | $R_{\text{eyecta}} = 3,3895 D_{\text{canica}}$ |
| Para la $v = 4,64$ m/s | —————> | $R_{\text{eyecta}} = 4,2387 D_{\text{canica}}$ |

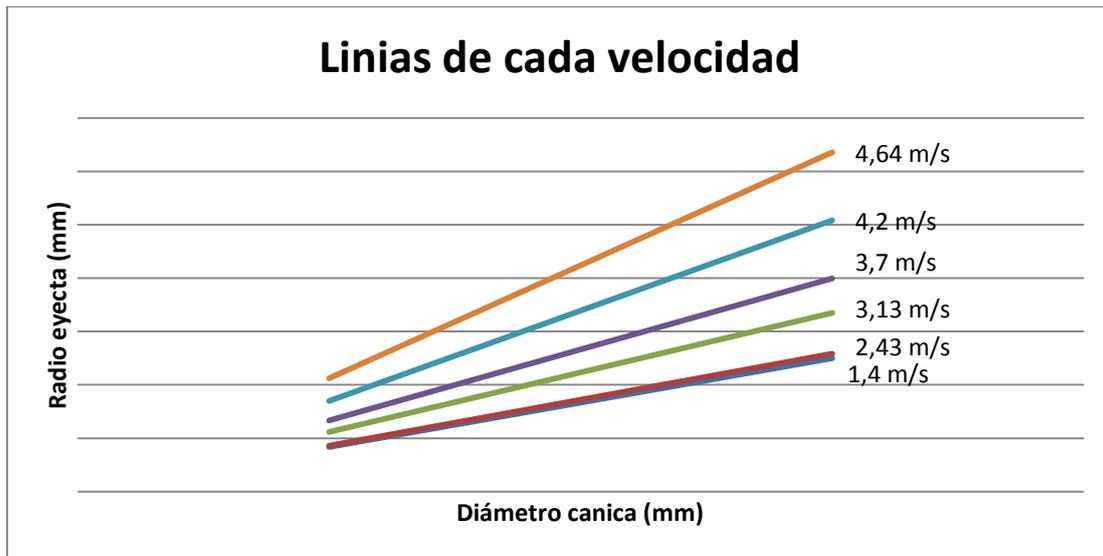
Vemos que en los seis casos, la relación entre los radios de los eyecta y los diámetros del cráter es de proporcionalidad directa:

$$R_{\text{eyecta}} = k_{\text{eyec}} \cdot D_{\text{canica}}$$

De esta manera podemos extraer un primer resultado:

### **El radio de los eyecta es directamente proporcional al diámetro de la canica**

A continuación intentaremos establecer una relación entre los coeficientes de proporcionalidad ( $k_{\text{eyec}}$ ) de cada gráfica y la velocidad, ya que observamos que a medida que la velocidad aumenta,  $k_{\text{eyec}}$  también lo hace. En primer lugar realizaremos una gráfica en la que pondremos todas juntas las diferentes rectas de regresión "radio eyecta-diámetro canica" de cada velocidad:

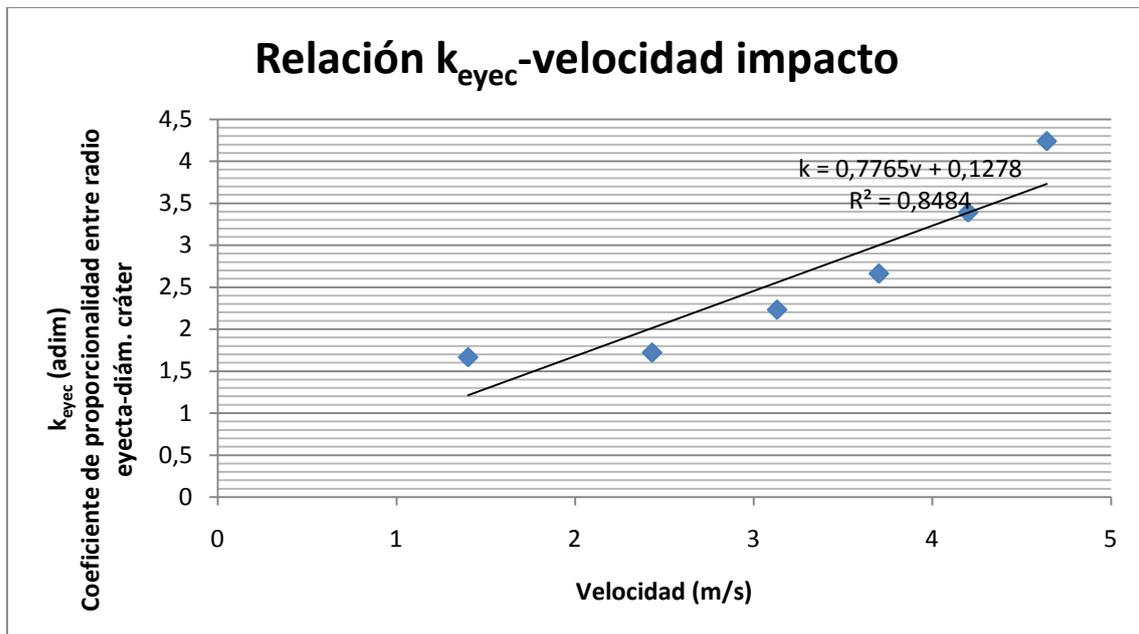


Es notable el aumento de la pendiente de las rectas a medida que lo hace la velocidad. Por lo tanto, a mayor velocidad, el coeficiente de proporcionalidad o  $k_{eyec}$  se hace cada vez mayor. De acuerdo con ello haremos la tabla que relacione estos coeficientes de proporcionalidad (notado con la letra  $k_{eyec}$  y adimensional) con las diferentes velocidades:

| <b>v impacto (m/s)</b> | <b><math>k_{eyec}</math> (coef. de proporcionalidad entre radio eyecta-diám. canica, adim.)</b> |
|------------------------|---|
| <b>1,40</b>            | 1,666   |
| <b>2,43</b>            | 1,7202  |
| <b>3,13</b>            | 2,232   |
| <b>3,70</b>            | 2,6616  |
| <b>4,20</b>            | 3,3895  |
| <b>4,64</b>            | 4,2387  |



Siguiendo esta tabla realizaremos la gráfica  $k_{eyec}$ -velocidad de impacto para establecer una relación:



La línea es ascendente y la dispersión de la gráfica no es demasiado grande, lo cual nos permite afirmar la existencia de una relación de proporcionalidad en  $k_{eyec}$  a medida que aumenta la velocidad.

Aplicamos ahora las fórmulas estadísticas para calcular la propagación de errores en los coeficientes de una recta de regresión (Taylor 1997). Si tenemos una recta de regresión  $y = A + Bx$ , tenemos que las incertidumbres de A y B se calculan

$$\sigma_A = \sigma_y \sqrt{\frac{\sum x^2}{\Delta}} \qquad \sigma_B = \sigma_y \sqrt{\frac{N}{\Delta}}$$

donde  $\Delta = N\sum x^2 - (\sum x)^2$  y  $\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{N-2} \sum (y_i - A - Bx_i)^2}$

En nuestro caso,  $N = 6$  (ya que tenemos 6 puntos), y haciendo los cálculos correspondientes tenemos que

$A = 0,1 \pm 0,5$  (adimensional, y despreciable al ser el error superior al valor)

$B = 0,8 \pm 0,2$  s / m

Vemos como, en este caso, las incertidumbres son mucho mayores que en las relaciones del diámetro del cráter, lo cual es un indicador más de la dispersión de los datos.

A partir de estas conclusiones podemos deducir que el radio de los eyecta formados es directamente proporcional al diámetro de la canica impactada y que  $k_{eyec}$  aumenta según la velocidad. Así pues,  $k_{eyec}$  viene determinado por la fórmula  $k_{eyec} = 0,8 v$  (v en



m/s) extraída en la gráfica anterior, donde  $v$  es la velocidad de impacto. Por lo tanto el segundo resultado, análogo al subapartado anterior:

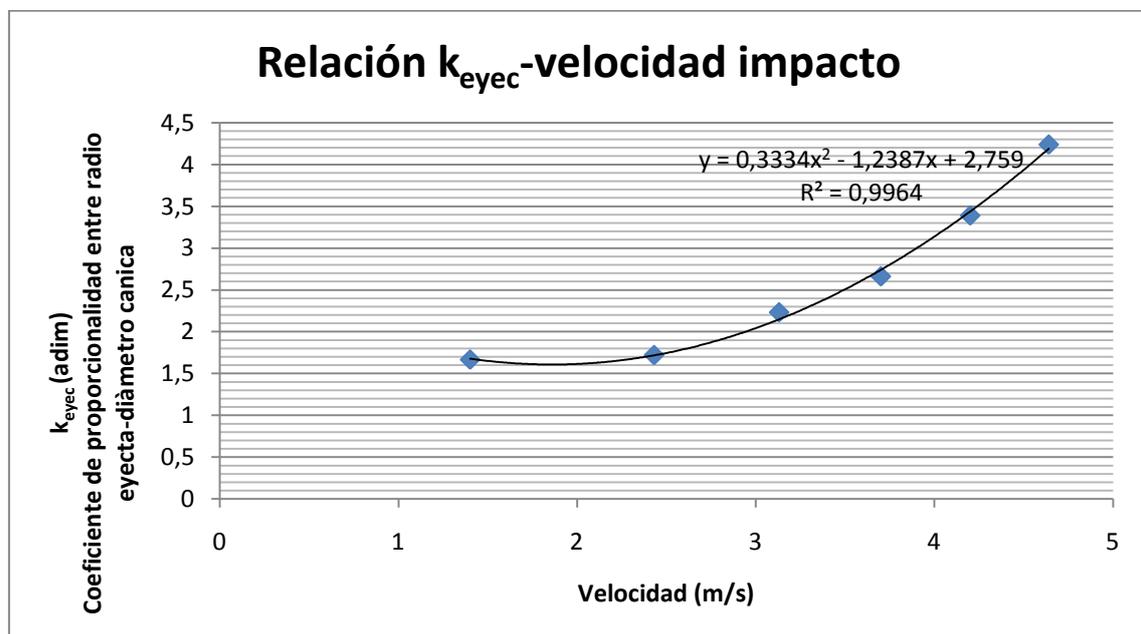
## El coeficiente de proporcionalidad depende de forma lineal de la velocidad de impacto

Si sustituimos en la primera fórmula:

$$R_{eyecta} = 0,8 \cdot v \cdot D_{canica}$$

donde  $R$  es radio y  $v$  es velocidad de impacto medida en m/s.

Aunque la relación anterior parece bastante satisfactoria, decidimos comprobar si podríamos obtener un resultado mejor ajustando una línea de tendencia diferente. Por tanto, sustituimos la línea recta de tendencia por una línea polinómica de grado 2. El resultado sorprendente es que la gráfica se acopla perfectamente a una parábola de fórmula  $0,3334 x^2 - 1,2387 x + 2,759$  y que el coeficiente de correlación es muy cercano a 1, lo que significa que la dispersión es mínima:



De acuerdo con esto deducimos otra fórmula análoga a la anterior en la que:

$$R_{eyecta} = (0,33 \cdot v^2 - 1,24 \cdot v + 2,76) \cdot D_{canica}$$

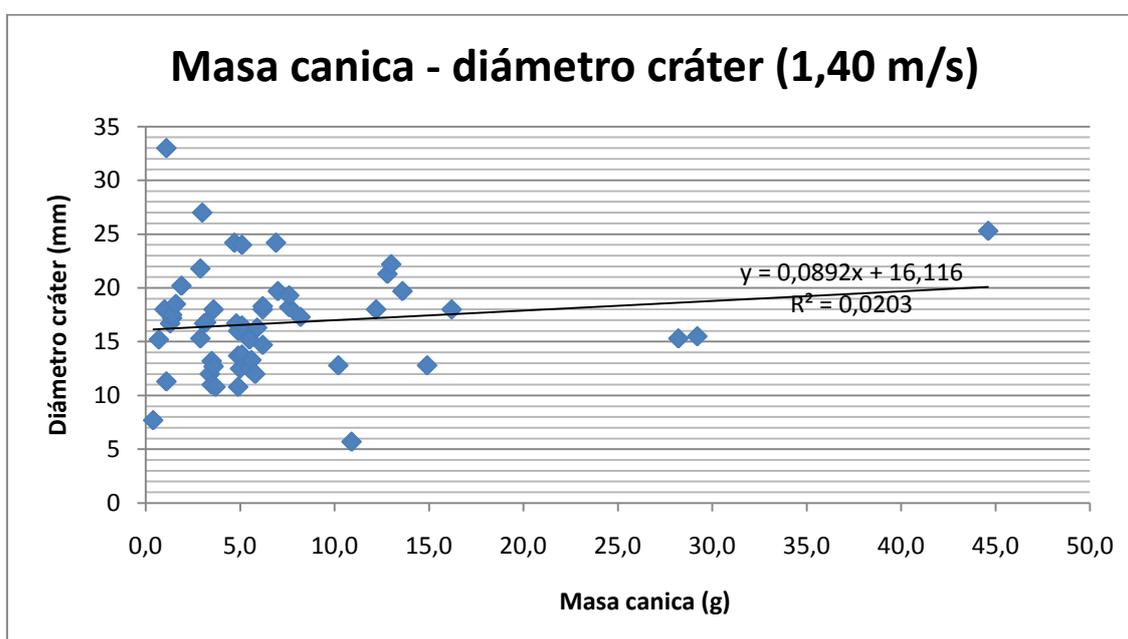


Donde  $R$  es radio y  $v$  es velocidad de impacto medida en m/s.

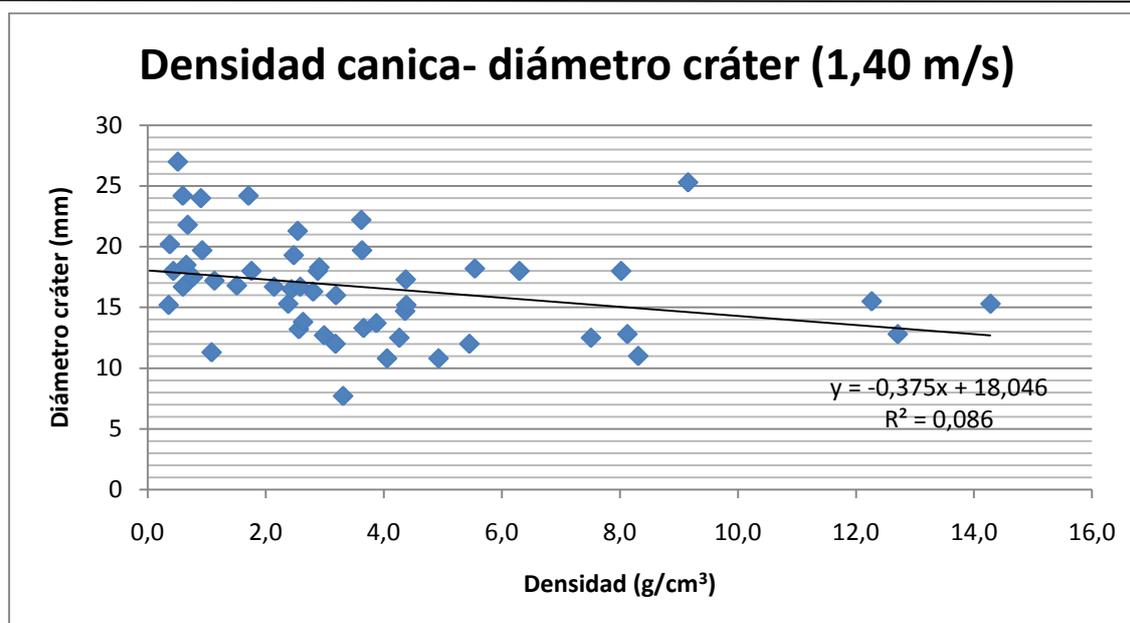
En este caso, no disponemos de fórmulas para encontrar los errores de los coeficientes.

### 2.4.2. Relación de los cráteres con la masa y la densidad de las canicas

Para comprobar si existe alguna relación del diámetro de los cráteres con la masa de las canicas realizaremos la gráfica masa canica - diámetro cráter para cada velocidad:



Comprobamos que, por esta velocidad, hay mucha dispersión en los datos y no se observa ningún tipo de patrón ni proporcionalidad, ya que el coeficiente de correlación  $R^2$  da unos valores bajísimos. La falta de relación entre la masa de las canicas y el diámetro de los cráteres se repite para todas las velocidades estudiadas, las gráficas de las cuales ya no hemos incluido. Por lo tanto, con nuestro modelo, no hemos podido encontrar ni afirmar ninguna relación entre la masa de las canicas y el diámetro de los cráteres en ninguna velocidad. Igualmente, intentaremos encontrar una relación entre la densidad de las canicas y el diámetro de los cráteres y realizaremos la gráfica densidad canica - diámetro cráter para cada velocidad:



Por esta velocidad, podemos concluir que, al igual que con la masa, la dispersión es muy grande (coeficiente de correlación  $R^2$  con valores bajísimos) y no podemos establecer ningún tipo de relación según nuestro modelo de canicas. Como en la masa, obtenemos el mismo resultado para todas las velocidades, las gráficas de las cuales no hemos incluido.

Los resultados son los mismos si en lugar de considerar el diámetro de los cráteres consideramos el radio de los eyecta.

Para acabar de comprobar una posible relación entre estas magnitudes calcularemos una nueva variable: **diámetro real - diámetro teórico**. Hacemos esta resta para intentar minimizar la dependencia de los datos con el diámetro de las canicas. Definiremos el diámetro real como el diámetro del cráter formado en nuestro modelo con una canica determinada, y el diámetro teórico como el diámetro de la sección de la canica hundida, es decir, si la canica no se ha hundido completamente, cuando el valor de la profundidad es menor que el radio de la bola, tomaremos el valor máximo de diámetro de la parte hundida, en caso contrario, si la canica se ha hundido por encima de su mitad y por tanto la profundidad es mayor que el radio de la canica, tomaremos como valor el diámetro de la misma.

Sin embargo, con esta nueva variable no encontramos ningún tipo de relación con la masa o la densidad, además de la gran dispersión de valores que obtenemos.

Por lo tanto, el resultado que hemos obtenido es:

**Según nuestro modelo, los cráteres de impacto NO dependen ni 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.

Por lo tanto en los próximos cálculos (apartados 3 y 4 de nuestro trabajo) obviaremos la masa y la densidad de los objetos impactados ya que según nuestro modelo no influyen de ninguna manera en los cráteres que originan.

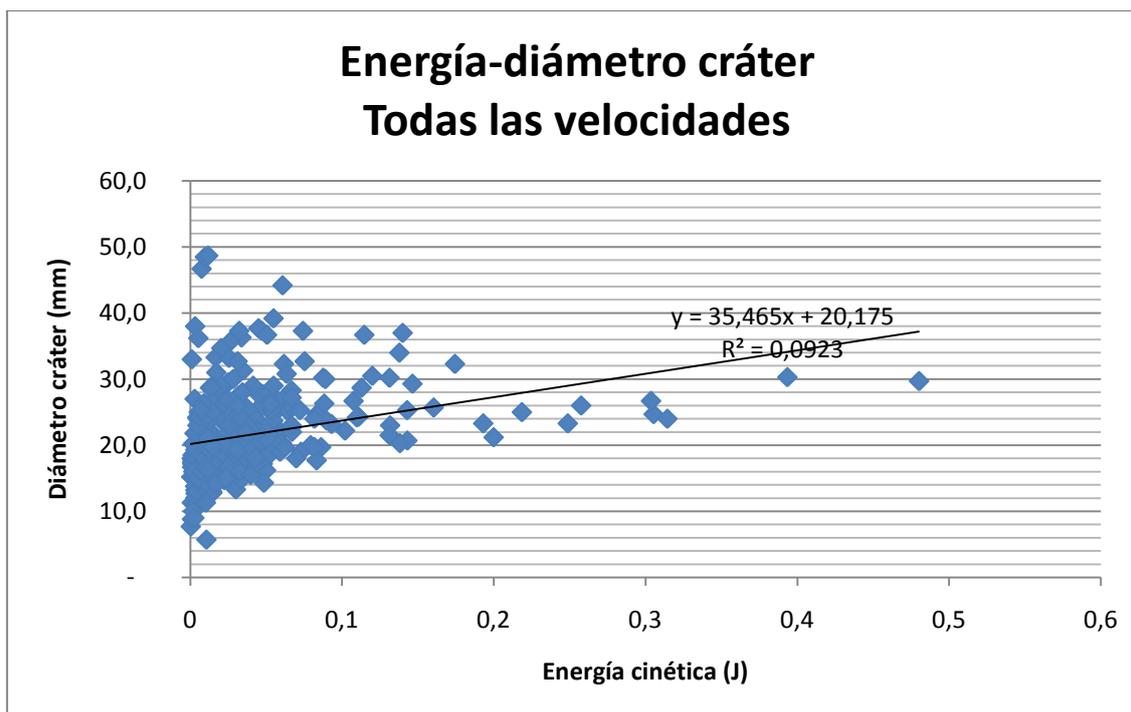
### **2.4.3. Relación de los cráteres con la energía cinética de las canicas**

Comprobaremos ahora si existe alguna relación entre el cráter producido y la energía que tienen las canicas al impactar contra la superficie. Esta energía es energía cinética que alcanzan durante la caída. Por el principio de conservación de la energía mecánica pues, podemos afirmar que antes del lanzamiento la canica estaba cargada de energía potencial y que al impactar, ésta se ha transformado en energía cinética. De esta manera tendremos que calcular la velocidad de impacto a cada altura a partir de la energía potencial (que previamente ya calculamos para otros apartados) y sustituir en la formula:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

donde  $E_c$  es el valor de la energía cinética,  $m$  es la masa de la canica y  $v$  la velocidad de impacto.

Así pues realizaremos la gráfica energía canica - diámetro cráter, en la que tendremos que asignar a cada valor de la energía de una canica el correspondiente valor del diámetro del cráter producido por la misma canica:

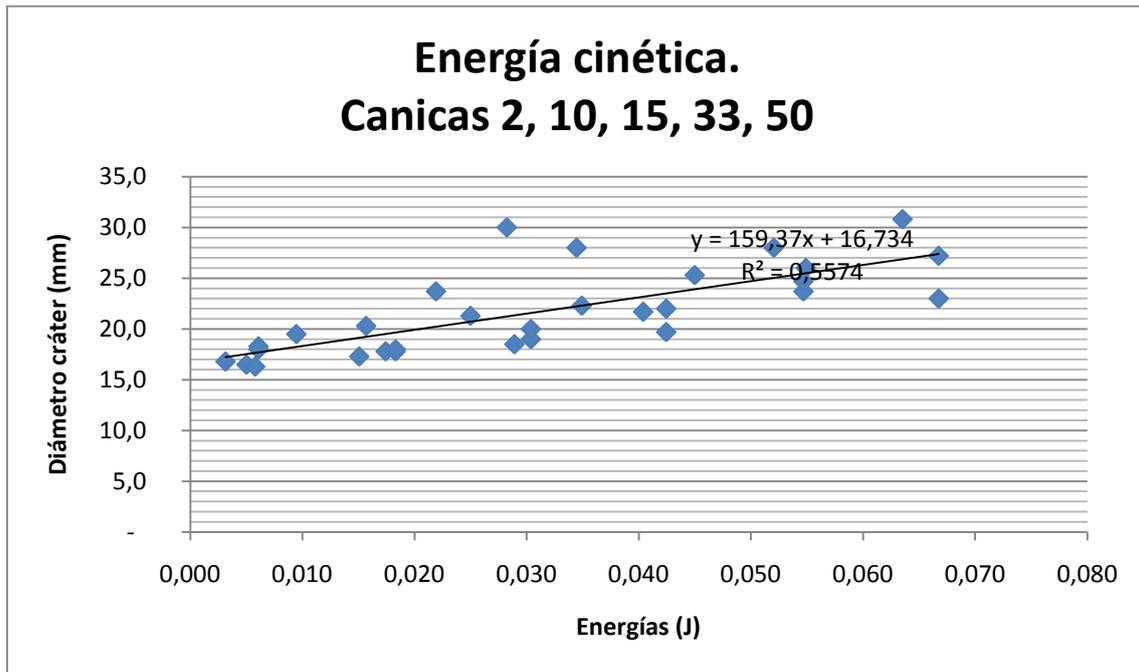


Vemos como la dispersión es muy alta y no podemos apreciar ninguna relación entre los datos. Es posible que el resultado no sea relevante debido a que las canicas son muy variadas y estamos mezclando muchas variables (masa, diámetro, velocidad...)

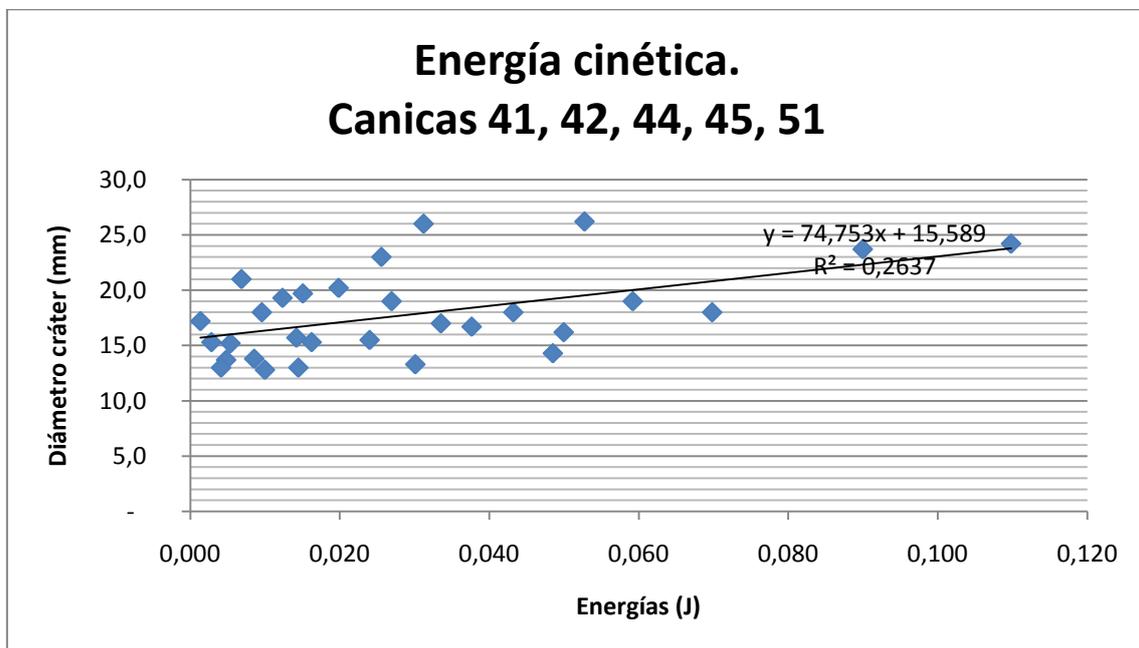
Pensamos sobre todo que los resultados pueden estar influidos por el diámetro de las bolas, que ya hemos probado que sí tiene una incidencia directa con el diámetro del cráter.

Para controlar pues el diámetro de las canicas, y evitar que la relación entre la energía de las canicas y el diámetro de los cráteres se vea influido por el diámetro de las canicas, probaremos a coger unas cinco bolas con diámetros similares y diferente masa y realizaremos una gráfica con las energías de estas canicas y los diámetros de los cráteres de manera que sólo tengamos dos variables: la masa (incluida en la energía) y el cráter.

Realizaremos la gráfica energía-diámetro cráter para cinco canicas con el mismo (o muy similar) diámetro, que es de 15,9 a 16,0 mm:



Ahora hacemos la misma gráfica energía - diámetro cráter para otras cinco bolas con el mismo (o muy similar) diámetro, que es de 13.3 a 13.4 mm:





Observamos una relación en las gráficas, sobre todo en la primera ya que el coeficiente de regresión lineal es mayor, pero NO es la misma por los dos conjuntos de canicas. Por tanto, no podemos determinar si hay una relación válida para todas las canicas que relacione su energía cinética con el diámetro del cráter que generan, que nos permita avanzar en nuestro trabajo.

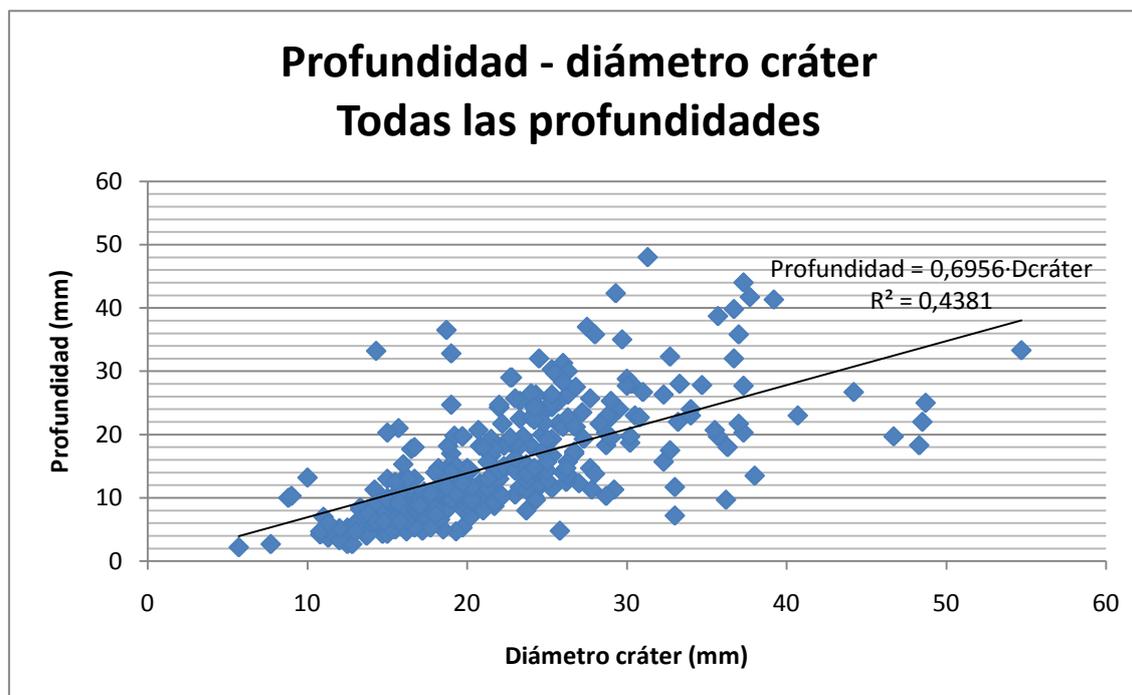
Al igual que en las relaciones con la masa y la densidad intentamos también establecer una relación de la energía cinética de las canicas al impactar con la nueva variable diámetro real-diámetro teórico, pero al igual que en el apartado anterior, sin éxito.

Por lo tanto los resultados de las relaciones entre las energías de las canicas y el diámetro de los cráteres que generan no son concluyentes y no los utilizaremos en apartados posteriores de nuestro trabajo.

### 2.4.4. Relación de la profundidad de los cráteres con el diámetro de los mismos

En anteriores apartados (apartado 1) hemos mencionado que la profundidad de un cráter real es, normalmente, una tercera parte de su diámetro (Carr 2006 para cráteres marcianos; Melosh 1989 para cráteres terrestres). Así pues, comprobaremos si nuestra relación profundidad - diámetro cráter se corresponde con lo que hemos dicho con anterioridad, es decir,  $Profundidad = \frac{D_{cráter}}{3}$ .

$$Profundidad = \frac{D_{cráter}}{3}$$



## Modelización de cráteres de impacto

Jesús Ordoño, Carlos Tadeo



Observamos que, en la gráfica, la relación profundidad-diámetro cráter se aproxima mucho más a dos tercios (0,67), el doble de lo que habíamos previsto. Esto es, probablemente, debido a que nuestra superficie de impacto es muy blanda y mucho menos compacta que la roca dura donde realmente impactan los meteoritos. Además la diferencia entre las densidades de nuestra superficie y el objeto de impacto (canicas) es mayor que la diferencia entre las densidades de un asteroide y la superficie terrestre. Así pues podemos deducir que nuestras canicas realizarán un cráter más profundo que en la realidad, y que, por tanto, nuestro resultado de  $2/3$  no se aleja de nuestras expectativas.



### 3. Aplicación del modelo de cráteres de impacto a cráteres reales de la Tierra

En este apartado aplicaremos las fórmulas extraídas en el punto 2.4 a cráteres de nuestro planeta: la Tierra. En primer lugar comprobaremos si nuestras fórmulas se adaptan a la realidad y, por ello, estableceremos un parámetro de control, un cráter real terrestre del que se conozcan con exactitud todos los datos necesarios para poder aplicar nuestra fórmula, el cráter Barringer o Meteor Cráter de Arizona. De esta manera realizaremos el punto:

- **3.1. Aplicación del modelo de cráteres de impacto en Meteor Crater de Arizona: parámetro de control**, donde se realizará esta comprobación y podremos validar nuestros resultados.

Una vez hecha la comprobación y después de dar por válida nuestra fórmula, dividiremos el siguiente apartado en dos partes:

- **3.2. Determinación del diámetro del meteorito en cráteres terrestres.** En este punto estudiaremos algunos cráteres meteoríticos de la Tierra. En nuestro planeta, como hemos dicho en el apartado 1.1, no encontramos muchos cráteres de impacto, aunque hay algunos indicios que prueban el impacto de meteoritos. Esto es debido al continuo cambio que sufre la superficie terrestre. El viento, la lluvia, la erosión, la atmósfera y la acción de las placas tectónicas entre otros son algunos de los factores que destruyen y forman nuevo relieve continuamente. Por lo tanto, hemos tenido que hacer una selección de algunos cráteres bien conservados y definidos que encontramos en la superficie terrestre. Son: Aorounga, Azuara, Bosuntwi, Chicxulub, Kara-Kul, Mistastin Lake, Roter Kamm, Tenoumer y Wolfe Creek por orden alfabético. Así pues aplicaremos nuestro modelo de cráteres de impacto a estos cráteres meteoríticos terrestres. En primer lugar calcularemos el diámetro del meteorito que originó el cráter en la Tierra a partir de nuestra fórmula. Por otra parte, en la Tierra no se conservan los eyecta de los cráteres por los mismos motivos de erosión que antes hemos mencionado, pero aún así, calcularemos, a partir de nuestro modelo, el radio de los eyecta de los mismos cráteres cuando se originaron. Después aplicaremos nuestros resultados a todos los cráteres terrestres conocidos.
- **3.3. Peligros espaciales: medidas de posibles cráteres producidos por asteroides cercanos a la Tierra.** Alrededor de la Tierra orbita una gran cantidad de materia, la gran mayoría no es peligrosa ya que debido a sus pequeñas dimensiones no llega a impactar contra la superficie terrestre sino que se desintegra debido a la fuerza de rozamiento que ejercen los gases de la atmósfera. Sin embargo, hay un número elevado de asteroides que hacen peligrar la vida en la Tierra, estos son los llamados asteroides potencialmente peligrosos y son los que nosotros estudiaremos en este apartado para determinar qué consecuencias provocaría si uno de estos asteroides impactara.



Hemos elegido 6 asteroides potencialmente peligrosos, estos son: Apofis-2004 MN4, 2007 VK184, 2001 CA21, 2009 ST19, 101.955 1999 RQ36 y 1979 XB. Hemos elegido estos asteroides porque se diferencian del resto, ya sea por su tamaño, por la alta velocidad o por las probabilidades de impacto con la Tierra. Los datos que hemos necesitado para poder calcular tanto los diámetros de los cráteres como los de los eyecta han sido la velocidad de impacto y el diámetro aproximado de cada uno de los asteroides.

Uno de los asteroides potencialmente peligrosos que hemos escogido ha sido Apofis-2004 MN4. Se le considera uno de los más peligrosos ya que el año 2068 la órbita de este asteroide cruzará la órbita de la Tierra a una distancia de 32.600 km, más cerca que la mayor parte de nuestros satélites artificiales.

### 3.1. Aplicación del modelo de cráteres de impacto en Meteor Crater de Arizona: parámetro de control

Antes de aplicar nuestro modelo a cráteres reales, tenemos que comprobar si efectivamente el modelo se adapta a estos. Necesitamos por tanto un cráter del que se conozca toda la información posible, no sólo sus datos básicos (diámetro, profundidad), sino también datos sobre el **objeto impactado** (diámetro del meteorito, velocidad de impacto del meteorito).

El cráter terrestre que reúne todas estas características es el Meteor Crater de Arizona. Además de ser un cráter muy estudiado y del que se conocen muchos datos, es uno de los pocos cráteres de los que hay información sobre el objeto impactado, en especial sobre su velocidad de impacto, tema que sigue abierto y del que recientemente se han publicado resultados nuevos (Melosh 2005). Además es un cráter muy bien definido y no hay prácticamente variaciones de las medidas respecto a las diferentes fuentes. Por eso decimos que será nuestro control, porque nos permitirá corroborar nuestro modelo para cráteres reales.





*Cráter Barringer (o Meteor Crater d'Arizona)*

| Datos del cráter                          | Datos del meteorito generador          |
|---|--|
| <b>Diámetro del cráter:</b> 1186 m        | <b>Velocidad de impacto:</b> 12800 m/s |
| <b>Profundidad:</b> 170 m                 | <b>Diámetro meteorito:</b> 50 m        |
| <b>Edad del cráter:</b> 49000 ± 3000 anys | <b>Composición:</b> ferroníquel        |

Meteor Crater es un cráter de impacto meteorítico situado aproximadamente a 69 km al este de Flagstaff, en el desierto de Arizona en Estados Unidos (Shoemaker 1987). El diámetro del cráter es de aproximadamente 1.200m y tiene unos 170m de profundidad. Además está rodeado por un anillo que se eleva unos 45 m por encima del nivel del suelo circundante. El centro del cráter contiene aún escombros de roca sobre el suelo sólido. Este fue el primer cráter terrestre en ser reconocido como cráter de impacto.

Se cree que el cráter fue producido hace unos 50.000 años, durante el Pleistoceno, cuando el clima del Colorado era mucho más frío y húmedo, por un objeto de ferroníquel de unos 50 metros de diámetro. El impacto que creó el cráter produjo una explosión equivalente a 150 bombas atómicas como la de Hiroshima y llegó a fundir la roca e incluso transformar el carbono en diamante debido a las grandes presiones.

De este modo, utilizaremos los datos del cráter Barringer en nuestro modelo. Comprobaremos si los datos se adaptan a nuestras fórmulas. Así pues sustituiremos en la fórmula desarrollada en el apartado 2.4.1 (ley de Ordeo):

$$D_{\text{cráter}} = (0,19 \cdot v + 0,7) \cdot D_{\text{canica}}$$

para ver si, con los datos bibliográficos del objeto impactado, obtenemos el diámetro del cráter de Arizona. Para ello debemos asegurarnos de que los datos están en las unidades correctas (velocidad en m/s y diámetro en metros). Éste es el resultado:

$$D_{\text{cráter}} = (0,19 \cdot 12.800 + 0,7) \cdot 50 = 114.035 \text{ m}$$

Podemos observar que si dividimos el resultado por 100, el resultado es de 1140'35 metros, con un error sobre el cráter real sólo de 46 metros sobre más de un kilómetro, un error prácticamente irrelevante del 4%. El motivo de esta división es probablemente la gran diferencia entre las superficies de impacto de nuestro modelo con las reales: en nuestro modelo hemos utilizado materiales nada compactados (arena, talco, cemento), mientras que en la realidad la superficie es roca dura. Por lo tanto, es lógico que con nuestro modelo salga un cráter de tamaño mucho mayor que el real. El escalado en estudios que tratan en identificar las dimensiones del cráter a partir del meteorito que lo originó es una práctica habitual (Melosh 1989; Colins 2005), ya que se dispone únicamente de datos experimentales a pequeña escala que deben ajustarse a dimensiones reales.



Asumimos pues que para cráteres reales nuestro modelo se adapta en una escala de dos órdenes de magnitud, y que esto lo tenemos que hacer para contrarrestar el hecho de que la superficie de impacto de un cráter real es roca y no materiales sin compactar. La fórmula final que utilizaremos para cráteres reales a partir de nuestro modelo es pues (velocidad  $v$  en m/s):

$$D_{cráter} = \frac{0,19 \cdot v + 0,7}{100} \cdot D_{meteorito}$$

Por lo tanto podemos concluir que nuestra fórmula es válida y que nuestro modelo sirve para calcular el diámetro de un cráter producido por un objeto de diámetro determinado a una velocidad de impacto determinada.

Aplicaremos ahora el mismo modelo a la fórmula de los eyecta. Desgraciadamente no se ha conservado ningún eyecta de un cráter de impacto debido a la erosión y por tanto no hemos obtenido datos sobre los eyecta del cráter Barringer. Así pues no podemos aplicar nuestro modelo a este cráter de manera directa. Pero como el método que utilizamos para extraer las fórmulas del diámetro y de los eyecta fue exactamente el mismo, podemos imaginar que, por los mismos motivos que en el diámetro del cráter, los eyecta de nuestro modelo se adaptarían a la realidad con un escalado de dos órdenes de magnitud a cráteres reales. Con esta afirmación podemos concluir pues que:

$$R_{eyecta} = \frac{0,8 \cdot v}{100} \cdot D_{meteorito}$$

o bien:

$$R_{eyecta} = \frac{0,33 \cdot v^2 - 1,24 \cdot v + 2,76}{100} \cdot D_{meteorito}$$

Utilizaremos las dos ecuaciones que hemos obtenido, y analizaremos qué nos proporciona unos resultados más razonables.

Así pues calcularemos, con estas nuevas fórmulas, los eyecta producidos por el meteorito de Meteor Crater de Arizona en el momento de impactar. Sustituiremos los datos en las fórmulas:

- En la primera fórmula

$$R_{eyecta} = \frac{0,8 \cdot 12800}{100} \cdot 50 = 5120 \text{ m} = 5,12 \text{ km}$$

- En la segunda fórmula



$$R_{eyecta} = \frac{0,33 \cdot 12800^2 - 1,24 \cdot 12800 + 2,76}{100} \cdot 50 = 27.025.665 \text{ m} = 27.025 \text{ km}$$

La primera fórmula nos da unos resultados más razonables, ya que es improbable que los efectos de un impacto meteorítico se puedan sentir a una distancia de 27.000 km. Esto puede ser debido a que el término cuadrático de la segunda fórmula domina sobre el resultado, y a grandes velocidades no nos da resultados correctos a pesar del escalado. La fórmula que finalmente haremos servir para calcular eyecta de cráteres será:

$$R_{eyecta} = \frac{0,8 \cdot v}{100} \cdot D_{meteorito}$$

Por lo tanto, el radio de destrucción (o de materiales expulsados) causado por el impacto del meteorito que formó el cráter Barringer fue de unos 5,12 km.

### 3.2. Determinación del diámetro del meteorito en cráteres terrestres

En el planeta Tierra no encontramos muchos cráteres de impacto como ocurre en la Luna o en cualquier otro planeta rocoso. El motivo de esta falta de cráteres es la acción de unos agentes medioambientales y tectónicos que hacen cambiar continuamente el relieve terrestre, como puede ser el viento, la lluvia, los terremotos e incluso el ser humano.

En este apartado, en primer lugar hemos seleccionado algunos de los cráteres más representativos y mejor conservados de la superficie de nuestro planeta, y hemos hecho una descripción de sus características más relevantes (Hodge 1994). También hemos calculado los datos referentes al meteorito que los causó aplicando las fórmulas de nuestro modelo, desarrolladas en el apartado 2.4.1. del trabajo. Los cráteres que hemos escogido se encuentran en buen estado y están poco erosionados por diversas circunstancias lo que nos permite afirmar que las medidas de los valores de sus diámetros han sido hechas con precisión y poco error. 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.

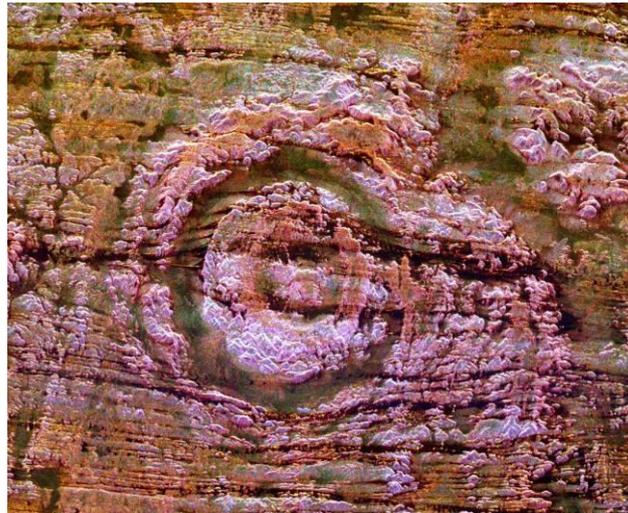
En la segunda parte de este apartado hemos querido aplicar nuestro modelo a todos los cráteres de impacto conocidos de la superficie terrestre, calculando las dimensiones del meteorito que los causó y el radio de los eyecta de estos cráteres en



ser formados, siempre partiendo de las fórmulas desarrolladas en el apartado 2.4.1 de este trabajo. Creemos que estos datos pueden ser una buena aproximación de los meteoritos reales que causaron estos cráteres en la Tierra, ya que nuestras fórmulas han sido contrastadas tanto con Meteor Crater de Arizona como con algunos otros cráteres terrestres.

Esta es la selección de cráteres terrestres que hemos elegido para nuestro estudio:

### 1. Cráter Aorounga



*Cráter Aorounga*

Aorounga es un cráter de impacto meteorítico erosionado que se encuentra en Chad, África. El diámetro del cráter es de 12,6 km y se estima que su edad es menor a 345 millones de años. El cráter está acompañado por dos estructuras circulares que podrían formar parte de cráteres de impacto. Si esto es cierto, Aorounga formaría parte de una cadena de cráteres.

### 2. Cráter Tenoumer



*Cráter Tenoumer*



El cráter se encuentra en el desierto occidental del Sáhara, en Mauritania. Se trata de un cráter de 1,9 kilómetros de diámetro y con una edad aproximada de  $21.400 \pm 9.700$  años (Pleistoceno). El cráter se expone en la superficie y es prácticamente circular. Se encuentra recubierto de una fina capa de sedimentos del Plioceno.

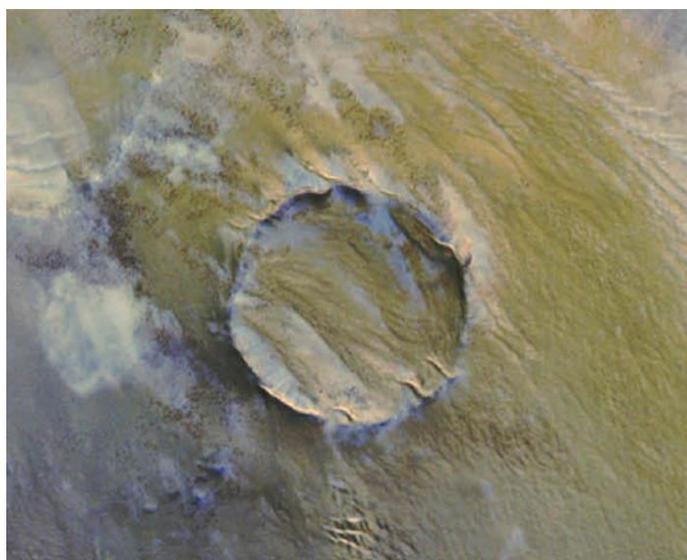
### 3. Cráter Wolfe Creek



*Cráter Wolfe Creek*

El cráter Wolfe Creek es un cráter de impacto meteorítico que se encuentra al este de Australia, en el Parque Nacional del cráter meteorítico Wolfe Creek. El cráter mide alrededor de unos 870 metros de diámetro y se eleva unos 60 metros sobre la superficie donde se encuentra. Se estima que el meteorito que formó tenía una masa de unas 50.000 toneladas y la edad del cráter es inferior a 300.000 años. Pequeños meteoritos férricos han sido encontrados en los alrededores del cráter, algunos de los cuales llegaban a pesar hasta 250 kg.

### 4. Cráter Roter Kamm



*Cráter Roter Kamm*



Este es un cráter meteorítico localizado en el desierto de Namibia que hace unos 2,5 km de diámetro y unos 130 m de profundidad. La edad estimada del cráter es de unos  $3,7 \pm 0,3$  millones de años. El cráter está cubierto habitualmente por unos depósitos de arena de hasta 100 metros de espesor.

### 5. Cráter Mistastin Lake



*Cráter Mistastin Lake*

El cráter Mistastin es un impacto meteorítico que se encuentra en Labrador, Canadá y que contiene el lago Mistastin. El lago presenta una pequeña isla en el centro que podría corresponderse con el pico central del cráter de estructura compleja. El lago hace unos 16 km de diámetro mientras que el cráter se estima que hace unos 28 km de diámetro. La edad de este cráter es de  $36.4 \pm 4$  millones de años aproximadamente.

### 6. Cráter Bosumtwi



*Cráter Bosumtwi*

## Modelización de cráteres de impacto

Jesús Ordoño, Carlos Tadeo



El lago Bosumtwi, situado sobre un antiguo cráter de impacto, es de aproximadamente 8 km de diámetro y es el único lago natural de Ghana. Se encuentra unos 30 km al sureste de Kumasi. El cráter de impacto meteorítico hace unos 10,5 km de diámetro, ligeramente más grande que el lago que contiene, y se estima que tiene una edad de unos 1,07 millones de años. El cráter está parcialmente erosionado y se encuentra en un denso bosque que dificulta el estudio. Las estructuras que causó el impacto son en gran parte cubiertas por la vegetación o el lago. De todos modos, se han encontrado tectitas, un mineral habitual en impactos meteoríticos, en el país vecino Costa de Marfil.

### 7. Cráter Kara-Kul

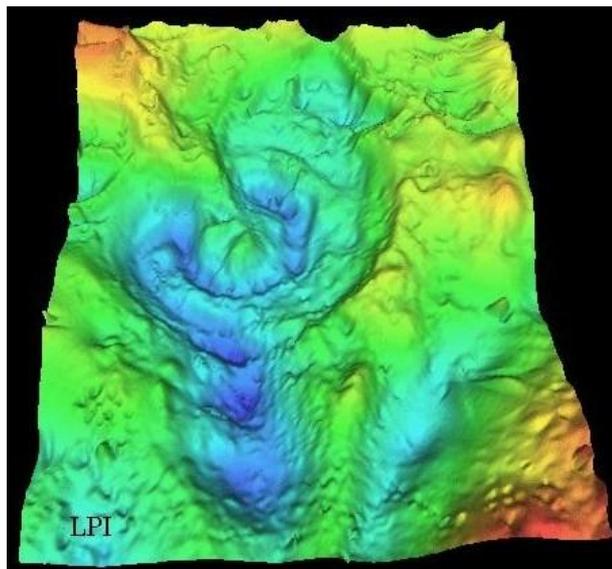


*Cráter Kara-Kul*

Este cráter fue formado hace menos de 5 millones de años y se encuentra en Tayikistán, cerca de la frontera afgana. En total el cráter hace unos 52 km de diámetro y está parcialmente cubierto por un lago de 25 kilómetros de diámetro. El espectacular cráter se eleva cerca de 3.600 metros por encima del nivel del mar (ya que se encuentra sobre las montañas Pamir). El cráter Kara-Kul es probablemente el cráter de impacto más grande después del cráter Chicxulub. En el impacto que formó este último cráter se cree que se extinguieron los dinosaurios.



## 8. Cráter Chicxulub



*Cráter Chicxulub*

Este cráter se cree que fue el resultado de la colisión con un gran asteroide. Los efectos medioambientales que le acompañaron se piensa que fueron los responsables de la extinción masiva al final del período Cretácico, hace unos 65 millones de años, en que desaparecieron los dinosaurios así como muchas otras especies. Se estima que el meteorito que lo causó era de unos 10 km de diámetro y que, al impactar, creó un cráter de unos 170 km de diámetro liberando una energía inmensa. Está situado en el mar Caribe, el golfo de México, cerca de la península del Yucatán.

## 9. Cráter de Azuara



*Cráter Azuara*

Este cráter lo hemos incluido porque se trata del único cráter de impacto existente en la Península Ibérica. La estructura o cráter de impacto de Azuara hace unos 37 km de diámetro y se encuentra situado en el noreste de España, a 50 km de Zaragoza. Los datos geológicos muestran una deformación del suelo que podría haber sido formada por el impacto de un meteorito. Sin embargo, muchos geólogos no aceptan el impacto

## Modelización de cráteres de impacto

Jesús Ordoño, Carlos Tadeo



de un objeto como causa de la formación de la estructura, sino que interpretan que los efectos de choque son producidos por causas tectónicas: que los eyecta (Formación Pelarda) son en realidad depósitos fluviales cuaternarios, que la estructura circular se debe a la presencia de masa granítica, y que las grietas se pueden explicar mediante fenómenos cársticos (meteorización química de determinadas rocas). Sin embargo, los partidarios de la teoría del meteorito estiman que este debía ser de unos dos kilómetros de diámetro.

De acuerdo con estas informaciones realizaremos una tabla-resumen con los cráteres que queremos estudiar y su diámetro:

| Nombre         | País       | Diámetro (m) |
|----------------|------------|--------------|
| Aorounga       | Chad       | 12.600       |
| Tenoumer       | Mauritania | 1.900        |
| Wolfe Creek    | Australia  | 870          |
| Roter Kamm     | Namibia    | 2.500        |
| Mistastin Lake | Canadá     | 28.000       |
| Bosumtwi       | Ghana      | 10.500       |
| Kara-Kul       | Tayikistán | 52.000       |
| Chicxulub      | Méjico     | 170.000      |
| Azuara         | España     | 37.000       |

A partir de la fórmula ya comprobada extraída de nuestro modelo podemos calcular ahora el diámetro de los cuerpos que crearon estos cráteres en la superficie de la Tierra. Por ello aislamos en la fórmula

$$D_{cráter} = \frac{0,19 \cdot v + 0,7}{100} \cdot D_{meteorito}$$

el diámetro del meteorito u objeto impactado:

$$D_{meteorito} = \frac{100}{0,19 \cdot v + 0,7} \cdot D_{cráter}$$

Además, para realizar los cálculos de los eyecta de los impactos utilizaremos nuestra fórmula también extraída en el mismo apartado:

$$R_{eyecta} = \frac{0,8 \cdot v}{100} \cdot D_{meteorito}$$

## Modelización de cráteres de impacto

Jesús Ordoño, Carlos Tadeo



Así pues para calcular el diámetro del objeto impactado necesitamos: el diámetro del cráter, obtenido a partir de datos bibliográficos, y la velocidad de impacto del meteorito en el momento de impactar sobre la superficie terrestre. Esta velocidad la tendremos que calcular, ya que no existen datos de velocidades de impacto y no hemos encontrado en ningún lugar en la bibliografía cuál es esa velocidad. Además, la única velocidad de impacto conocida, la del Meteor Cráter de Arizona, se parece mucho a la velocidad de escape de la Tierra. Por ello consideraremos esta velocidad de escape, que corresponde a la de meteoritos que provienen de una distancia infinita respecto a la Tierra y despreciar la acción gravitatoria de otros cuerpos del espacio (ya que es prácticamente imposible considerar la atracción de los cuerpos que se encontraban en la trayectoria de este objeto hace unos 50.000 años). Para calcular esta velocidad hemos rechazado también la velocidad inicial que debía llevar el objeto antes de ser atraído por la gravitación terrestre, y tampoco tendremos en cuenta el efecto de la atmósfera terrestre. Probablemente estos dos factores se anulan entre sí, ya que la atmósfera produce una desaceleración del objeto en entrar en esta. Esta aproximación que hacemos podría ser razonable ya que tenemos como referencia el parecido de la velocidad de impacto del Meteor Cráter de Arizona con la velocidad de escape del planeta Tierra (Melosh 2005).

Por lo tanto, para calcular la velocidad de escape de la Tierra, por el principio de conservación de la energía mecánica podemos afirmar que la energía mecánica inicial es nula y la energía mecánica final es la suma de la energía potencial en la superficie terrestre y la energía cinética en el momento del impacto. Así pues:

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{G \cdot M_T \cdot m}{R_T}$$

Si simplificamos m:

$$\frac{1}{2} \cdot v^2 = \frac{G \cdot M_T}{R_T}$$

Por lo tanto si despejamos v en la fórmula anterior:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot G \cdot M_T}{R_T}}$$

donde  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$ ,  $M_T$  y  $R_T$  son la masa y el radio de la Tierra. Como todas estas variables las conocemos, podemos calcular el valor de v:

$$v = 11.190,74 \text{ m/s}$$

## Modelización de cráteres de impacto

Jesús Ordoño, Carlos Tadeo



Es importante remarcar que la velocidad de impacto no depende de la masa ni del diámetro, ni forma del objeto que impacta y por lo tanto consideraremos la misma velocidad para todos los impactos.

Con estos datos calcularemos, mediante la ley de Ordeo, el diámetro aproximado del objeto que impactó y produjo los cráteres estudiados anteriormente. Sustituiremos en la fórmula la velocidad por la de escape de la Tierra calculada anteriormente en m / s, y el diámetro del cráter en metros:

$$D_{\text{meteorito}} = \frac{100}{0,19 \cdot 11190,74 + 0,7} \cdot D_{\text{cráter}}$$

A partir de los resultados obtenidos, sustituiremos en la fórmula de los eyecta para calcular el radio aproximado que provocaron estos impactos:

$$R_{\text{eyecta}} = \frac{0,8 \cdot 11190,74}{100} \cdot D_{\text{meteorito}}$$

Estos son los resultados obtenidos:

| Nombre cráter  | Diámetro meteorito (m) | Radio eyecta (m) |
|----------------|------------------------|------------------|
| Aorounga       | <b>592</b>             | <b>53.035</b>    |
| Tenoumer       | <b>89</b>              | <b>7.997</b>     |
| Wolfe Creek    | <b>41</b>              | <b>3.662</b>     |
| Roter Kamm     | <b>118</b>             | <b>10.523</b>    |
| Mistastin Lake | <b>1.316</b>           | <b>117.856</b>   |
| Bosumtwi       | <b>494</b>             | <b>44.196</b>    |
| Kara-Kul       | <b>2.445</b>           | <b>218.875</b>   |
| Chicxulub      | <b>7.993</b>           | <b>715.554</b>   |
| Azuara         | <b>1.740</b>           | <b>155.738</b>   |

Comparamos ahora estos resultados con los del simulador de Melosh y Beyer:



| Nombre         | País       | Diámetro cráter (m) | Diámetro meteorito (m)<br>Ley de Ordeo | Diámetro meteorito (m)<br>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>1.316</b>                           | <b>972 - 1.170</b>                       |
| Bosumtwi       | Ghana      | 10.500              | <b>494</b>                             | <b>379 - 743</b>                         |
| Kara-Kul       | Tayikistán | 52.000              | <b>2.445</b>                           | <b>1.760 - 3.730</b>                     |
| Chicxulub      | México     | 170.000             | <b>7.993</b>                           | <b>5.500 - 12.300</b>                    |
| Azuara         | España     | 37.000              | <b>1.740</b>                           | <b>1.270 - 2.650</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, procedemos 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 (<http://www.unb.ca/passc/ImpactDatabase/>, *Earth Impact Database*).

### 1. Cráteres en Europa



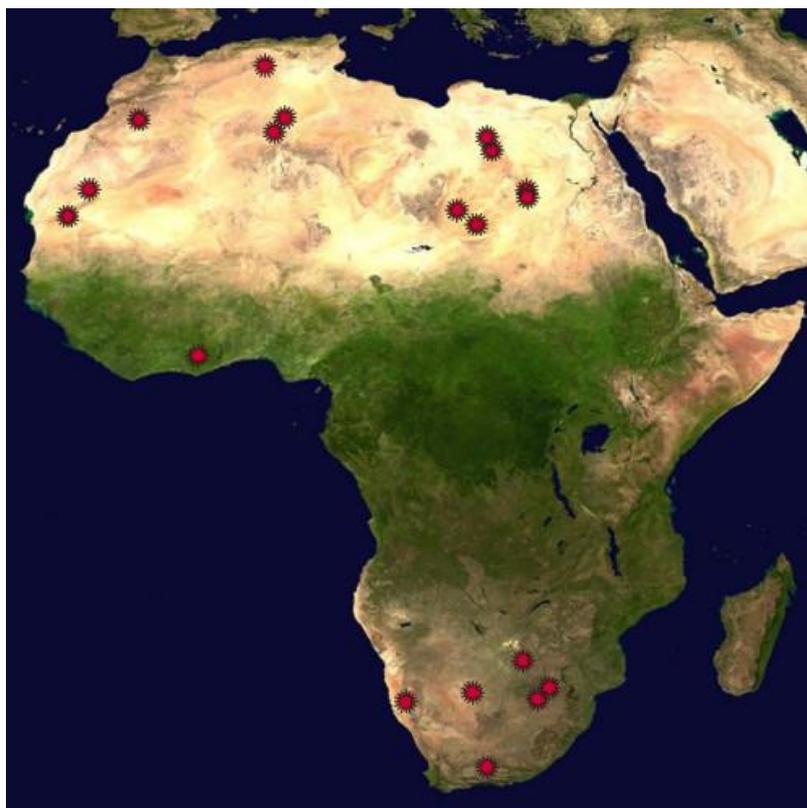


| Nombre cráter       | País        | Diámetro cráter (m) | Diámetro meteorito (m) | Radio eyecta (m) |
|---------------------|-------------|---------------------|------------------------|------------------|
| <b>Boltysch</b>     | Ucrania     | 24.000              | <b>1.128</b>           | <b>101.019</b>   |
| <b>Dellen</b>       | Suecia      | 19.000              | <b>893</b>             | <b>79.974</b>    |
| <b>Dobele</b>       | Letonia     | 4.500               | <b>212</b>             | <b>18.941</b>    |
| <b>Gardnos</b>      | Noruega     | 5.000               | <b>235</b>             | <b>21.046</b>    |
| <b>Granby</b>       | Suecia      | 3.000               | <b>141</b>             | <b>12.627</b>    |
| <b>Ilumetsä</b>     | Estonia     | 80                  | <b>4</b>               | <b>337</b>       |
| <b>Ilyinets</b>     | Ucrania     | 8.500               | <b>400</b>             | <b>35.778</b>    |
| <b>Iso-Naakkima</b> | Finlandia   | 3.000               | <b>141</b>             | <b>12.627</b>    |
| <b>Kaalijärv</b>    | Estonia     | 110                 | <b>5</b>               | <b>463</b>       |
| <b>Kärdla</b>       | Estonia     | 7.000               | <b>329</b>             | <b>29.464</b>    |
| <b>Karikkoselkä</b> | Finlandia   | 1.500               | <b>71</b>              | <b>6.314</b>     |
| <b>Keuruselkä</b>   | Finlandia   | 30.000              | <b>1.410</b>           | <b>126.274</b>   |
| <b>Lappajärvi</b>   | Finlandia   | 23.000              | <b>1.081</b>           | <b>96.810</b>    |
| <b>Lockne</b>       | Suecia      | 7.500               | <b>353</b>             | <b>31.569</b>    |
| <b>Logoisk</b>      | Bielorrusia | 15.000              | <b>705</b>             | <b>63.137</b>    |
| <b>Lumparn</b>      | Finlandia   | 9.000               | <b>423</b>             | <b>37.882</b>    |
| <b>Mien</b>         | Suecia      | 9.000               | <b>423</b>             | <b>37.882</b>    |
| <b>Mizarai</b>      | Lituania    | 5.000               | <b>235</b>             | <b>21.046</b>    |
| <b>Mjølnir</b>      | Noruega     | 40.000              | <b>1.881</b>           | <b>168.366</b>   |
| <b>Morasko</b>      | Polonia     | 100                 | <b>5</b>               | <b>421</b>       |
| <b>Neugrund</b>     | Estonia     | 8.000               | <b>376</b>             | <b>33.673</b>    |
| <b>Obolon'</b>      | Ucrania     | 20.000              | <b>940</b>             | <b>84.183</b>    |
| <b>Paasselkä</b>    | Finlandia   | 10.000              | <b>470</b>             | <b>42.091</b>    |
| <b>Ries</b>         | Alemania    | 24.000              | <b>1.128</b>           | <b>101.019</b>   |
| <b>Rochechouart</b> | Francia     | 23.000              | <b>1.081</b>           | <b>96.810</b>    |
| <b>Rotmistrovka</b> | Ucrania     | 2.700               | <b>127</b>             | <b>11.365</b>    |
| <b>Sääksjärvi</b>   | Finlandia   | 6.000               | <b>282</b>             | <b>25.255</b>    |
| <b>Saarijärvi</b>   | Finlandia   | 1.500               | <b>71</b>              | <b>6.314</b>     |
| <b>Siljan</b>       | Suecia      | 52.000              | <b>2.445</b>           | <b>218.875</b>   |
| <b>Söderfjärden</b> | Finlandia   | 6.600               | <b>310</b>             | <b>27.780</b>    |
| <b>Steinheim</b>    | Alemania    | 3.800               | <b>179</b>             | <b>15.995</b>    |
| <b>Suvasvesi N</b>  | Finlandia   | 4.000               | <b>188</b>             | <b>16.837</b>    |
| <b>Ternovka</b>     | Ucrania     | 11.000              | <b>517</b>             | <b>46.301</b>    |
| <b>Tvären</b>       | Suecia      | 2.000               | <b>94</b>              | <b>8.418</b>     |
| <b>Vepriai</b>      | Lituania    | 8.000               | <b>376</b>             | <b>33.673</b>    |
| <b>Zapadnaya</b>    | Ucrania     | 3.200               | <b>150</b>             | <b>13.469</b>    |
| <b>Zeleny Gai</b>   | Ucrania     | 3.500               | <b>165</b>             | <b>14.732</b>    |

\* No encontramos datos de Azuara porque no es considerado oficialmente un cráter.



## 2. Cráteres en África



| Nombre cráter                             | País       | Diámetro cráter (m) | Diámetro meteorito (m) | Radio eyecta (m) |
|---|------------|---------------------|------------------------|------------------|
| Amguid                                    | Argelia    | 450                 | 21                     | 1.894            |
| Aorounga                                  | Chad       | 12.600              | 592                    | 53.035           |
| Aouelloul                                 | Mauritania | 390                 | 18                     | 1.642            |
| B.P. Structure                            | Libia      | 2.000               | 94                     | 8.418            |
| Bosumtwi                                  | Ghana      | 10.500              | 494                    | 44.196           |
| Gweni-Fada                                | Chad       | 14.000              | 658                    | 58.928           |
| Kalkkop                                   | Sudáfrica  | 640                 | 30                     | 2.694            |
| Kgagodi                                   | Botsuana   | 3.500               | 165                    | 14.732           |
| Morokweng                                 | Sudáfrica  | 70.000              | 3.291                  | 294.640          |
| Oasis                                     | Libia      | 18.000              | 846                    | 75.765           |
| Ouarkziz                                  | Argelia    | 3.500               | 165                    | 14.732           |
| Roter Kamm                                | Namibia    | 2.500               | 118                    | 10.523           |
| Talemzane                                 | Argelia    | 1.750               | 82                     | 7.366            |
| Tenoumer                                  | Mauritania | 1.900               | 89                     | 7.997            |
| Tin Bider                                 | Argelia    | 6.000               | 282                    | 25.255           |
| Tswaing<br>(formerly<br>Pretoria Saltpan) | Sudáfrica  | 1.130               | 53                     | 4.756            |
| Vredefort                                 | Sudáfrica  | 300.000             | 14.105                 | 1.262.742        |



### 3. Cráteres en Asia



| Nombre cráter               | País       | Diámetro cráter (m) | Diámetro meteorito (m) | Radio eyecta (m) |
|-----------------------------|------------|---------------------|------------------------|------------------|
| <b>Beyenchime-Salaatin</b>  | Rusia      | 8.000               | <b>376</b>             | <b>33.673</b>    |
| <b>Bigach</b>               | Kazakstán  | 8.000               | <b>376</b>             | <b>33.673</b>    |
| <b>Chiyli</b>               | Kazakstán  | 5.500               | <b>259</b>             | <b>23.150</b>    |
| <b>Chukcha</b>              | Rusia      | 6.000               | <b>282</b>             | <b>25.255</b>    |
| <b>Dhala</b>                | India      | 11.000              | <b>517</b>             | <b>46.301</b>    |
| <b>El'gygytgyn</b>          | Rusia      | 18.000              | <b>846</b>             | <b>75.765</b>    |
| <b>Gusev</b>                | Rusia      | 3.000               | <b>141</b>             | <b>12.627</b>    |
| <b>Jänisjärvi</b>           | Rusia      | 14.000              | <b>658</b>             | <b>58.928</b>    |
| <b>Jebel Waqf as Suwwan</b> | Jordania   | 5.500               | <b>259</b>             | <b>23.150</b>    |
| <b>Kaluga</b>               | Rusia      | 15.000              | <b>705</b>             | <b>63.137</b>    |
| <b>Kamensk</b>              | Rusia      | 25.000              | <b>1.175</b>           | <b>105.229</b>   |
| <b>Kara</b>                 | Rusia      | 65.000              | <b>3.056</b>           | <b>273.594</b>   |
| <b>Kara-Kul</b>             | Tayikistán | 52.000              | <b>2.445</b>           | <b>218.875</b>   |
| <b>Karla</b>                | Rusia      | 10.000              | <b>470</b>             | <b>42.091</b>    |
| <b>Kursk</b>                | Rusia      | 6.000               | <b>282</b>             | <b>25.255</b>    |
| <b>Logancha</b>             | Rusia      | 20.000              | <b>940</b>             | <b>84.183</b>    |
| <b>Lonar</b>                | India      | 1.830               | <b>86</b>              | <b>7.703</b>     |
| <b>Macha</b>                | Rusia      | 300                 | <b>14</b>              | <b>1.263</b>     |
| <b>Mishina Gora</b>         | Rusia      | 2.500               | <b>118</b>             | <b>10.523</b>    |



|                        |                |         |              |                |
|------------------------|----------------|---------|--------------|----------------|
| <b>Popigai</b>         | Rusia          | 100.000 | <b>4.702</b> | <b>420.914</b> |
| <b>Puchezh-Katunki</b> | Rusia          | 80.000  | <b>3.761</b> | <b>336.731</b> |
| <b>Ragozinka</b>       | Rusia          | 9.000   | <b>423</b>   | <b>37.882</b>  |
| <b>Shunak</b>          | Kazakstán      | 2.800   | <b>132</b>   | <b>11.786</b>  |
| <b>Sikhote Alin</b>    | Rusia          | 20      | <b>1</b>     | <b>84</b>      |
| <b>Sobolev</b>         | Rusia          | 50      | <b>2</b>     | <b>210</b>     |
| <b>Suavjärvi</b>       | Rusia          | 16.000  | <b>752</b>   | <b>67.346</b>  |
| <b>Tabun-Khara-Obo</b> | Mongolia       | 1.300   | <b>61</b>    | <b>5.472</b>   |
| <b>Wabar</b>           | Arabia Saudita | 110     | <b>5</b>     | <b>463</b>     |
| <b>Zhamanshin</b>      | Kazakstán      | 14.000  | <b>658</b>   | <b>58.928</b>  |

#### 4. Cráteres en América del Norte





| <b>Nombre cráter</b>   | <b>País</b>          | <b>Diámetro cráter (m)</b> | <b>Diámetro meteorito (m)</b> | <b>Radio eyecta (m)</b> |
|------------------------|----------------------|----------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| <b>Ames</b>            | Oklahoma, EUA.       | 16.000                     | <b>752</b>                    | <b>67.346</b>           |
| <b>Avak</b>            | Alaska, EUA.         | 12.000                     | <b>564</b>                    | <b>50.510</b>           |
| <b>Barringer</b>       | Arizona, EUA         | 1.180                      | <b>55</b>                     | <b>4.967</b>            |
| <b>Beaverhead</b>      | Montana, EUA         | 60.000                     | <b>2.821</b>                  | <b>252.548</b>          |
| <b>Brent</b>           | Ontario, Canadá      | 3.800                      | <b>179</b>                    | <b>15.995</b>           |
| <b>Calvin</b>          | Michigan, EUA        | 8.500                      | <b>400</b>                    | <b>35.778</b>           |
| <b>Carswell</b>        | Saskatchewan, Canadá | 39.000                     | <b>1.834</b>                  | <b>164.156</b>          |
| <b>Charlevoix</b>      | Quebec, Canadá       | 54.000                     | <b>2.539</b>                  | <b>227.294</b>          |
| <b>Chesapeake Bay</b>  | Virginia, EUA        | 90.000                     | <b>4.231</b>                  | <b>378.823</b>          |
| <b>Chicxulub</b>       | Yucatán, México      | 170.000                    | <b>7.993</b>                  | <b>715.554</b>          |
| <b>Clearwater East</b> | Quebec, Canadá       | 26.000                     | <b>1.222</b>                  | <b>109.438</b>          |
| <b>Clearwater West</b> | Quebec, Canadá       | 36.000                     | <b>1.693</b>                  | <b>151.529</b>          |
| <b>Cloud Creek</b>     | Wyoming, EUA         | 7.000                      | <b>329</b>                    | <b>29.464</b>           |
| <b>Couture</b>         | Quebec, Canadá       | 8.000                      | <b>376</b>                    | <b>33.673</b>           |
| <b>Crooked Creek</b>   | Missouri, EUA        | 7.000                      | <b>329</b>                    | <b>29.464</b>           |
| <b>Decaturville</b>    | Missouri, EUA        | 6.000                      | <b>282</b>                    | <b>25.255</b>           |
| <b>Deep Bay</b>        | Saskatchewan, Canadá | 13.000                     | <b>611</b>                    | <b>54.719</b>           |
| <b>Des Plaines</b>     | Illinois, EUA        | 8.000                      | <b>376</b>                    | <b>33.673</b>           |
| <b>Eagle Butte</b>     | Alberta, Canadá      | 10.000                     | <b>470</b>                    | <b>42.091</b>           |
| <b>Elbow</b>           | Saskatchewan, Canadá | 8.000                      | <b>376</b>                    | <b>33.673</b>           |
| <b>Flynn Creek</b>     | Tennessee, EUA       | 3.800                      | <b>179</b>                    | <b>15.995</b>           |
| <b>Glasford</b>        | Illinois, EUA        | 4.000                      | <b>188</b>                    | <b>16.837</b>           |
| <b>Glover Bluff</b>    | Wisconsin, EUA       | 8.000                      | <b>376</b>                    | <b>33.673</b>           |
| <b>Gow</b>             | Saskatchewan, Canadá | 4.000                      | <b>188</b>                    | <b>16.837</b>           |
| <b>Haughton</b>        | Nunavut, Canadá      | 23.000                     | <b>1.081</b>                  | <b>96.810</b>           |
| <b>Haviland</b>        | Kansas, EUA          | 10                         | <b>0,5</b>                    | <b>42</b>               |
| <b>Holleford</b>       | Ontario, Canadá      | 2.350                      | <b>110</b>                    | <b>9.891</b>            |
| <b>Ile Rouleau</b>     | Quebec, Canadá       | 4.000                      | <b>188</b>                    | <b>16.837</b>           |
| <b>Kentland</b>        | Indiana, EUA         | 13.000                     | <b>611</b>                    | <b>54.719</b>           |
| <b>La Moinerie</b>     | Quebec, Canadá       | 8.000                      | <b>376</b>                    | <b>33.673</b>           |
| <b>Manicouagan</b>     | Quebec, Canadá       | 100.000                    | <b>4.702</b>                  | <b>420.914</b>          |
| <b>Manson</b>          | Iowa, EUA            | 35.000                     | <b>1.646</b>                  | <b>147.320</b>          |
| <b>Maple Creek</b>     | Saskatchewan, Canadá | 6.000                      | <b>282</b>                    | <b>25.255</b>           |

**Modelización de cráteres de impacto**  
 Jesús Ordoño, Carlos Tadeo



|                      |                               |         |               |                  |
|----------------------|-------------------------------|---------|---------------|------------------|
| <b>Marquez</b>       | Texas, EUA                    | 12.700  | <b>597</b>    | <b>53.456</b>    |
| <b>Middlesboro</b>   | Kentucky, EUA                 | 6.000   | <b>282</b>    | <b>25.255</b>    |
| <b>Mistastin</b>     | Newfoundland/Labrador, Canadá | 28.000  | <b>1.316</b>  | <b>117.856</b>   |
| <b>Montagnais</b>    | Nova Scotia, Canadá           | 45.000  | <b>2.116</b>  | <b>189.411</b>   |
| <b>New Quebec</b>    | Quebec, Canadá                | 3.440   | <b>162</b>    | <b>14.479</b>    |
| <b>Newporte</b>      | North Dakota, EUA             | 3.200   | <b>150</b>    | <b>13.469</b>    |
| <b>Nicholson</b>     | Northwest Territories, Canadá | 12.500  | <b>588</b>    | <b>52.614</b>    |
| <b>Odessa</b>        | Texas, EUA                    | 160     | <b>8</b>      | <b>673</b>       |
| <b>Pilot</b>         | Northwest Territories, Canadá | 6.000   | <b>282</b>    | <b>25.255</b>    |
| <b>Presqu'ile</b>    | Quebec, Canadá                | 24.000  | <b>1.128</b>  | <b>101.019</b>   |
| <b>Red Wing</b>      | North Dakota, EUA             | 9.000   | <b>423</b>    | <b>37.882</b>    |
| <b>Rock Elm</b>      | Wisconsin, EUA.               | 6.000   | <b>282</b>    | <b>25.255</b>    |
| <b>Santa Fe</b>      | New México , EUA              | 6.130   | <b>288</b>    | <b>25.802</b>    |
| <b>Saint Martin</b>  | Manitoba, Canadá              | 40.000  | <b>1.881</b>  | <b>168.366</b>   |
| <b>Serpent Mound</b> | Ohio, U.S.A.                  | 8.000   | <b>376</b>    | <b>33.673</b>    |
| <b>Sierra Madera</b> | Texas, U.S.A.                 | 13.000  | <b>611</b>    | <b>54.719</b>    |
| <b>Slate Islands</b> | Ontario, Canadá               | 30.000  | <b>1.410</b>  | <b>126.274</b>   |
| <b>Steen River</b>   | Alberta, Canadá               | 25.000  | <b>1.175</b>  | <b>105.229</b>   |
| <b>Sudbury</b>       | Ontario, Canadá               | 250.000 | <b>11.754</b> | <b>1.052.285</b> |
| <b>Upheaval Dome</b> | Utah, U.S.A.                  | 10.000  | <b>470</b>    | <b>42.091</b>    |
| <b>Viewfield</b>     | Saskatchewan, Canadá          | 2.500   | <b>118</b>    | <b>10.523</b>    |
| <b>Wanapitei</b>     | Ontario, Canadá               | 7.500   | <b>353</b>    | <b>31.569</b>    |
| <b>Wells Creek</b>   | Tennessee, U.S.A.             | 12.000  | <b>564</b>    | <b>50.510</b>    |
| <b>West Hawk</b>     | Manitoba, Canadá              | 2.440   | <b>115</b>    | <b>10.270</b>    |
| <b>Wetumpka</b>      | Alabama, U.S.A.               | 6.500   | <b>306</b>    | <b>27.359</b>    |
| <b>Whitecourt</b>    | Alberta, Canadá               | 360     | <b>17</b>     | <b>1.515</b>     |



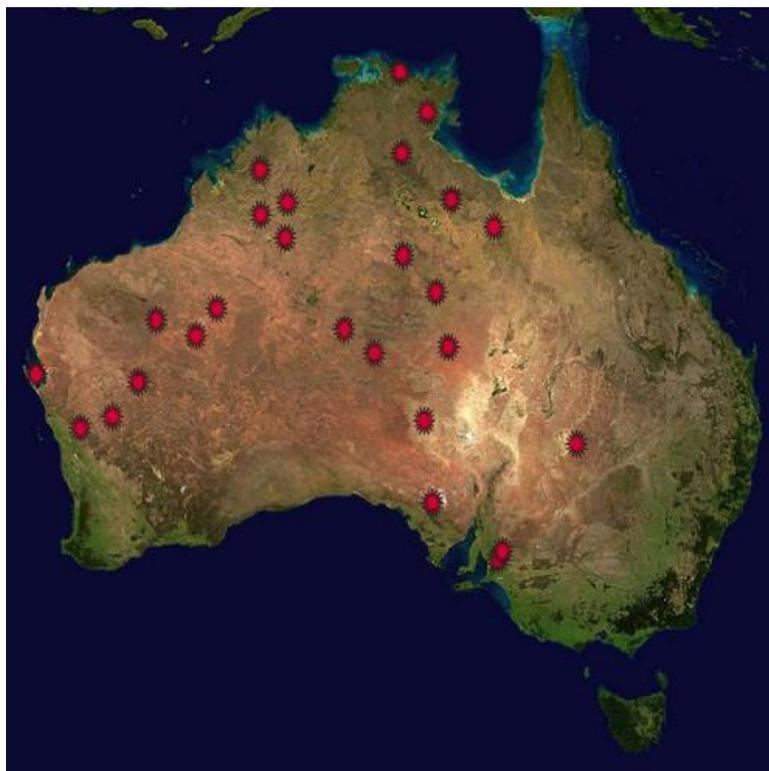
## 5. Cráteres en América del sur



| Nombre cráter            | País      | Diámetro cráter (m) | Diámetro meteorito (m) | Radio eyecta (m) |
|--------------------------|-----------|---------------------|------------------------|------------------|
| <b>Araguainha</b>        | Brasil    | 40.000              | <b>1.881</b>           | <b>168.366</b>   |
| <b>Campo Del Cielo</b>   | Argentina | 50                  | <b>2</b>               | <b>210</b>       |
| <b>Monturaqui</b>        | Chile     | 460                 | <b>22</b>              | <b>1.936</b>     |
| <b>Riachao Ring</b>      | Brasil    | 4.500               | <b>212</b>             | <b>18.941</b>    |
| <b>Rio Cuarto</b>        | Argentina | 4.500               | <b>212</b>             | <b>18.941</b>    |
| <b>Serra da Cangalha</b> | Brasil    | 12.000              | <b>564</b>             | <b>50.510</b>    |
| <b>Vargeao Dome</b>      | Brasil    | 12.000              | <b>564</b>             | <b>50.510</b>    |
| <b>Vista Alegre</b>      | Brasil    | 9.500               | <b>447</b>             | <b>39.987</b>    |



## 6. Cráteres en Australia



| Nombre cráter         | Localización         | Diámetro cráter (m) | Diámetro meteorito (m) | Radio eyecta (m) |
|-----------------------|----------------------|---------------------|------------------------|------------------|
| <b>Acraman</b>        | Australia Meridional | 90.000              | <b>4.231</b>           | <b>378.823</b>   |
| <b>Amelia Creek</b>   | Australia            | 20.000              | <b>940</b>             | <b>84.183</b>    |
| <b>Boxhole</b>        | Territorio del norte | 170                 | <b>8</b>               | <b>716</b>       |
| <b>Connolly Basin</b> | Australia occidental | 9.000               | <b>423</b>             | <b>37.882</b>    |
| <b>Crawford</b>       | Australia            | 8.500               | <b>400</b>             | <b>35.778</b>    |
| <b>Dalgaranga</b>     | Australia occidental | 20                  | <b>1</b>               | <b>84</b>        |
| <b>Flaxman</b>        | Australia            | 10                  | <b>0,5</b>             | <b>42</b>        |
| <b>Foelsche</b>       | Territorio del norte | 6                   | <b>0,3</b>             | <b>25</b>        |
| <b>Glikson</b>        | Australia            | 19.000              | <b>893</b>             | <b>79.974</b>    |
| <b>Goat Paddock</b>   | Australia occidental | 5.100               | <b>240</b>             | <b>21.467</b>    |
| <b>Gosses Bluff</b>   | Territorio del norte | 22.000              | <b>1.034</b>           | <b>92.601</b>    |
| <b>Goyder</b>         | Territorio del norte | 3.000               | <b>141</b>             | <b>12.627</b>    |
| <b>Henbury</b>        | Territorio del norte | 150                 | <b>7</b>               | <b>631</b>       |
| <b>Kelly West</b>     | Territorio del norte | 10.000              | <b>470</b>             | <b>42.091</b>    |
| <b>Lawn Hill</b>      | Queensland           | 18.000              | <b>846</b>             | <b>75.765</b>    |
| <b>Liverpool</b>      | Territorio del norte | 1.600               | <b>75</b>              | <b>6.735</b>     |



|                                    |                      |        |              |                |
|------------------------------------|----------------------|--------|--------------|----------------|
| <b>Mount Toondina</b>              | Australia meridional | 4.000  | <b>188</b>   | <b>16.837</b>  |
| <b>Piccaninny</b>                  | Australia occidental | 7.000  | <b>329</b>   | <b>29.464</b>  |
| <b>Shoemaker (formerly Teague)</b> | Australia occidental | 30.000 | <b>1.410</b> | <b>126.274</b> |
| <b>Spider</b>                      | Australia occidental | 13.000 | <b>611</b>   | <b>54.719</b>  |
| <b>Strangways</b>                  | Territorio del norte | 25.000 | <b>1.175</b> | <b>105.229</b> |
| <b>Tookoonooka</b>                 | Queensland           | 55.000 | <b>2.586</b> | <b>231.503</b> |
| <b>Veevers</b>                     | Australia occidental | 80     | <b>4</b>     | <b>337</b>     |
| <b>Wolfe Creek</b>                 | Australia occidental | 870    | <b>41</b>    | <b>3.662</b>   |
| <b>Woodleigh</b>                   | Australia occidental | 40.000 | <b>1.881</b> | <b>168.366</b> |
| <b>Yarrabubba</b>                  | Australia occidental | 30.000 | <b>1.410</b> | <b>126.274</b> |

### 3.3. Peligros espaciales: medidas de posibles cráteres producidos por asteroides cercanos a la Tierra

La gran mayoría de los asteroides se encuentran en el cinturón de Kuiper. Sin embargo, hay una parte que tienen una órbita que cruza la de la Tierra, y que por tanto son los potencialmente más peligrosos ya que podrían llegar a impactar contra nuestro planeta (Karttunen 1994; Smoluchowski 1986; Guaita 2005). La clasificación científica presenta los asteroides potencialmente peligrosos como aquellos que tienen una órbita que se acerca a la Tierra a una distancia inferior a 7,5 millones de kilómetros y tienen unas dimensiones de unos 150 m. Estos asteroides que se acercan tanto podrían ser atrapados también por el campo gravitatorio terrestre, sin llegar a impactar contra el planeta.

Hemos escogido seis de estos asteroides para estudiar las consecuencias que tendría sobre la Tierra su impacto, a partir de las fórmulas obtenidas con nuestro modelo. Por tanto, para cada asteroide seleccionado, calcularemos, a partir de nuestro modelo:

- el **diámetro del cráter** que produciría si impactara contra la Tierra
- el **radio** hasta donde llegarían los **eyecta** de este impacto

La selección de los asteroides la hemos hecho partiendo de una relación de asteroides potencialmente peligrosos que la NASA publica periódicamente dentro de su programa "Near Earth Object Program" (<http://neo.jpl.nasa.gov/risk/>). Los datos que nos ofrece esta publicación de la NASA incluyen aquellos que nosotros necesitamos



para encontrar el diámetro del cráter y el radio de los eyecta a partir de nuestro modelo, y que son: el diámetro medio del asteroide y la velocidad de impacto con la Tierra.

Éstas son las fórmulas que usaremos, desarrolladas en el apartado 2.4.1 de este trabajo:

$$D_{\text{cráter}} = \frac{0,19 \cdot v + 0,7}{100} \cdot D_{\text{asteroide}}$$

$$R_{\text{eyecta}} = \frac{0,8 \cdot v}{100} \cdot D_{\text{asteroide}}$$

Los resultados que hemos obtenido no tienen en cuenta la probable disminución del diámetro medio del asteroide durante su entrada a la atmósfera terrestre, lo que haría que el efecto del impacto fuera menor.

Para ofrecer una visión más cercana sobre los efectos que tendría sobre la Tierra el impacto de uno de estos asteroides, hemos adjuntado, por cada impacto, dos mapas de la zona de Barcelona: el primero se puede ver el cráter que produciría el asteroide si cayera en la plaza de Sant Jaume de Barcelona (círculo naranja), y el segundo, además del cráter, hemos añadido los eyecta (círculo blanco). Para ello hemos utilizado el programa Google Earth en el que hemos establecido una línea recta desde la Plaza de Sant Jaume como origen y la hemos alargado, teniendo en cuenta la escala del mapa, una distancia equivalente al radio del cráter del impacto. Posteriormente hemos realizado un círculo con centro en la Plaza de Sant Jaume y de radio la recta establecida. Repetimos el proceso anterior para los eyecta.

Ésta es la relación de asteroides que hemos estudiado:

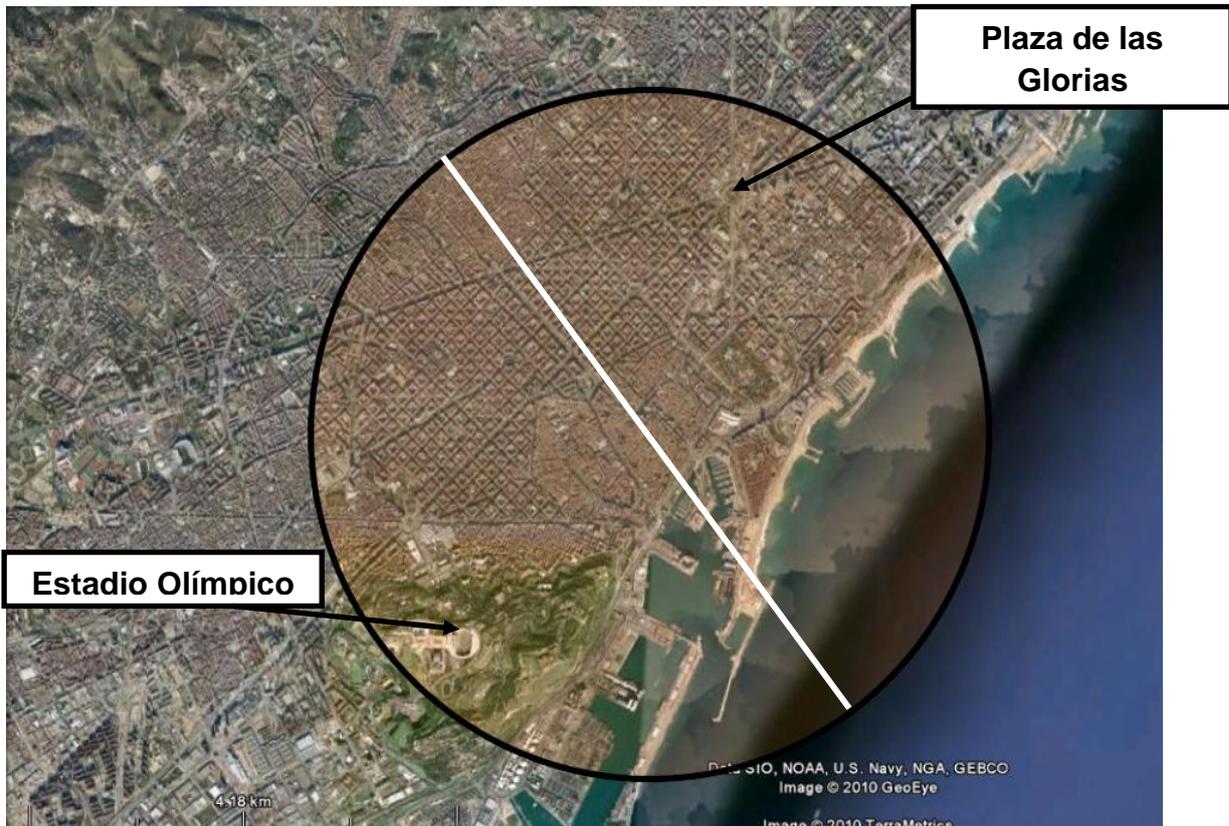
- 1. Apofis-2004 MN4:** las dimensiones aproximadas de este asteroide son de 270 m de diámetro, con una velocidad probable de impacto contra la Tierra de 12,59 km/s, y tiene un período orbital de 323,587 días alrededor de Sol. Las observaciones que la NASA realizó en 2004 sobre la probabilidad de impacto de este asteroide con la Tierra indicaron que en el año 2029 esta probabilidad sería enorme en comparación con la de otros asteroides, del 2,7%, lo que encendió todas las alarmas. Posteriormente, tras un estudio exhaustivo sobre este cuerpo, se redujo la probabilidad de impacto en un imperceptible  $4,3 \cdot 10^{-4}\%$ , el impacto se trasladaba al año 2036. Sin embargo, todavía se están haciendo cálculos cada vez más precisos para determinar la trayectoria exacta de este asteroide y saber con más exactitud las probabilidades de impacto contra nuestro planeta. Con nuestro modelo, las dimensiones del cráter que provocaría si llegara a impactar contra la Tierra son:



$$D_{cràter} = \frac{0,19 \cdot v + 0,7}{100} \cdot D_{asteroide} = \frac{0,19 \cdot 12590 + 0,7}{100} \cdot 270$$

$$D_{cràter} = 6.461 \text{ m}$$

En caso de impacto contra Barcelona, el grado de destrucción llegaría hasta más allá de la plaza de las Glorias en dirección noreste, y hasta aproximadamente el Estadio Olímpico Lluís Companys en dirección suroeste, tal y como se puede apreciar en el mapa.

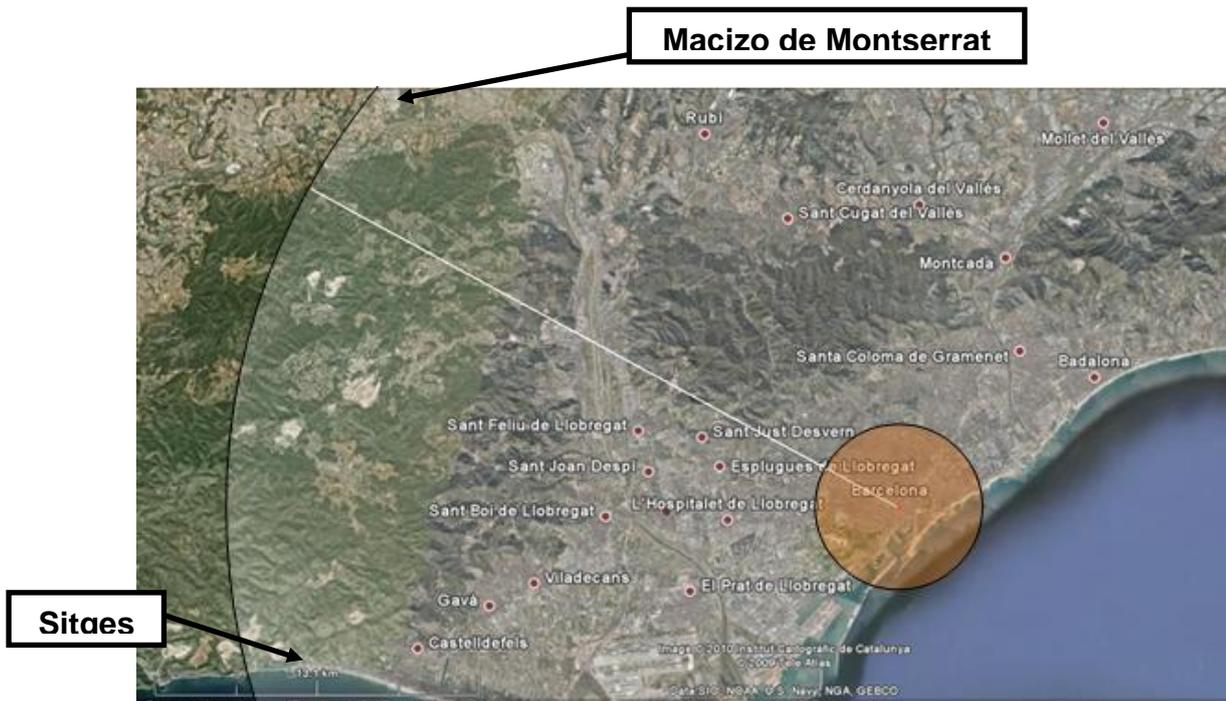


En cuanto a los eyecta, estos son los datos que obtenemos aplicando nuestro modelo:

$$R_{eyecta} = \frac{0,8 \cdot v}{100} \cdot D_{asteroide} = \frac{0,8 \cdot 12590}{100} \cdot 270$$

$$R_{eyecta} = 27.194 \text{ m}$$

En el mapa siguiente podemos ver como los eyecta de este cráter podrían llegar hasta Sitges y el macizo de Montserrat



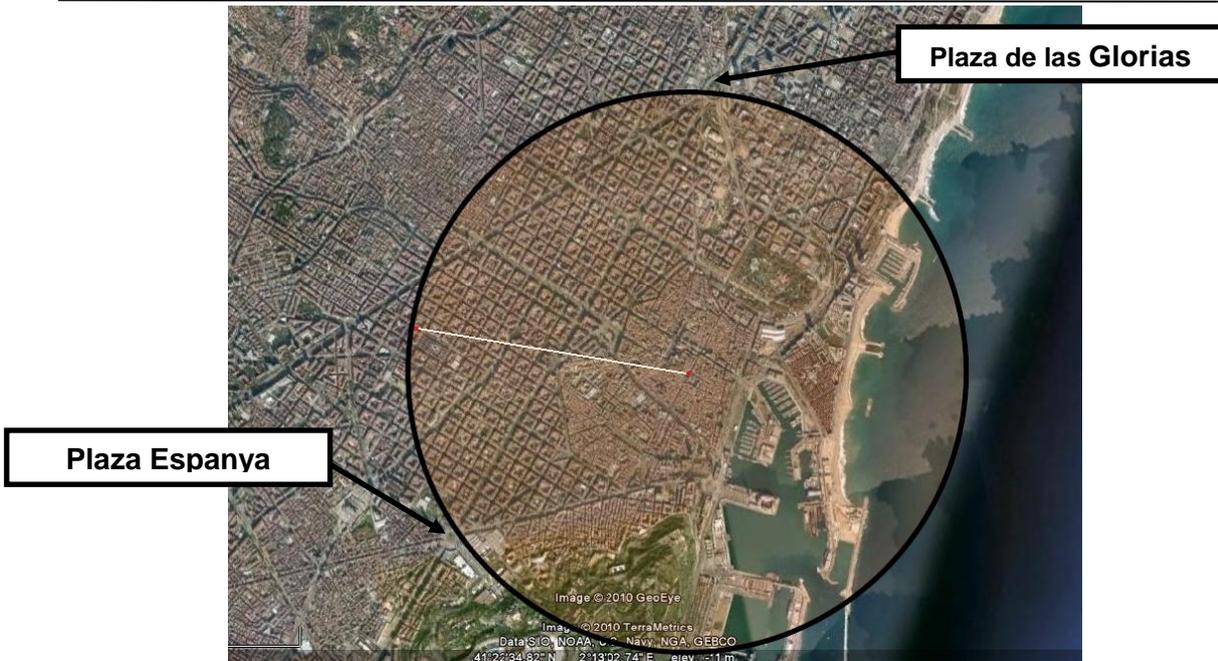
2. **2007 VK184**: este es el asteroide que, con los datos actuales, tiene más probabilidades de impactar contra la Tierra (un 0,033%), lo que podría llegar a pasar el año 2.048. Tiene un diámetro de 130 m y puede llegar a impactar con una velocidad de 19.19 km/s.

Aplicando nuestras fórmulas, las dimensiones del cráter que provocaría si llegara a impactar contra la Tierra son:

$$D_{cràter} = \frac{0,19 \cdot v + 0,7}{100} \cdot D_{asteroide} = \frac{0,19 \cdot 19190 + 0,7}{100} \cdot 130$$

$$D_{cràter} = 4.741 \text{ m}$$

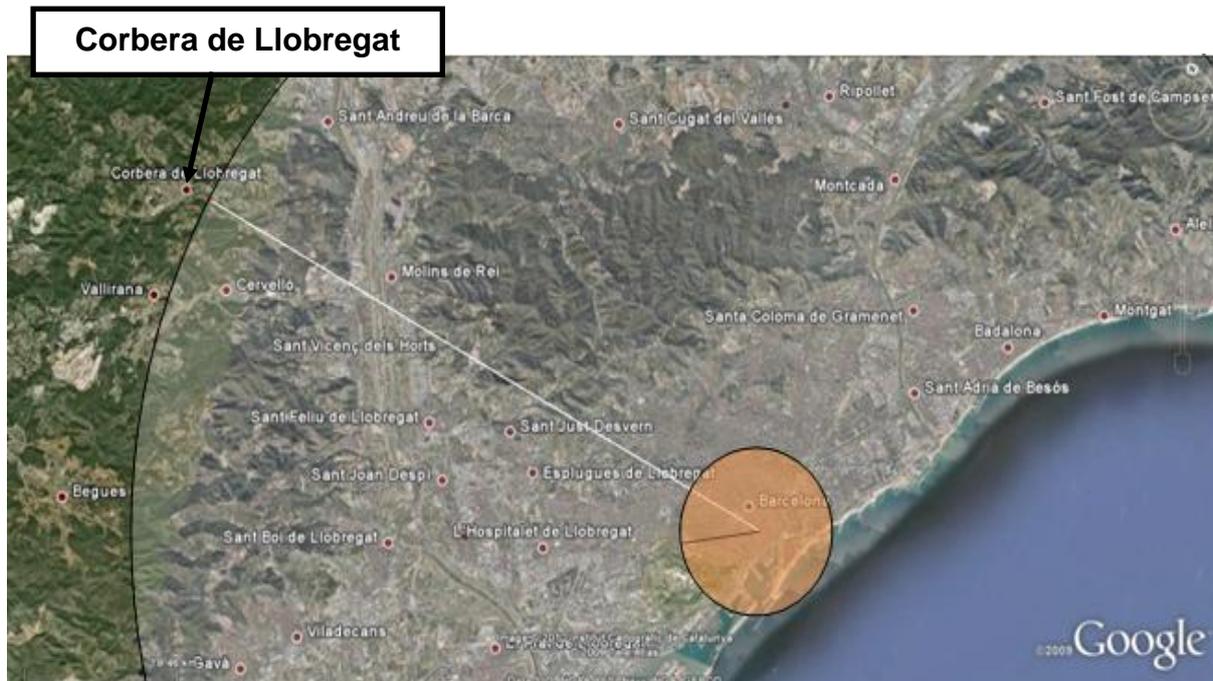
Vemos como las dimensiones del cráter son similares a las del meteorito anterior, aunque el asteroide es de diámetro muy inferior. Esto es debido a que su velocidad de impacto es en cambio más grande que en el caso anterior.



Estos son los datos de los eyecta que produciría este asteroide, que llegarían hasta Corbera de Llobregat si el asteroide cayera en el centro de Barcelona:

$$R_{eyecta} = \frac{0,8 \cdot v}{100} \cdot D_{asteroide} = \frac{0,8 \cdot 19190}{100} \cdot 130$$

$$R_{eyecta} = 19.958 \text{ m}$$





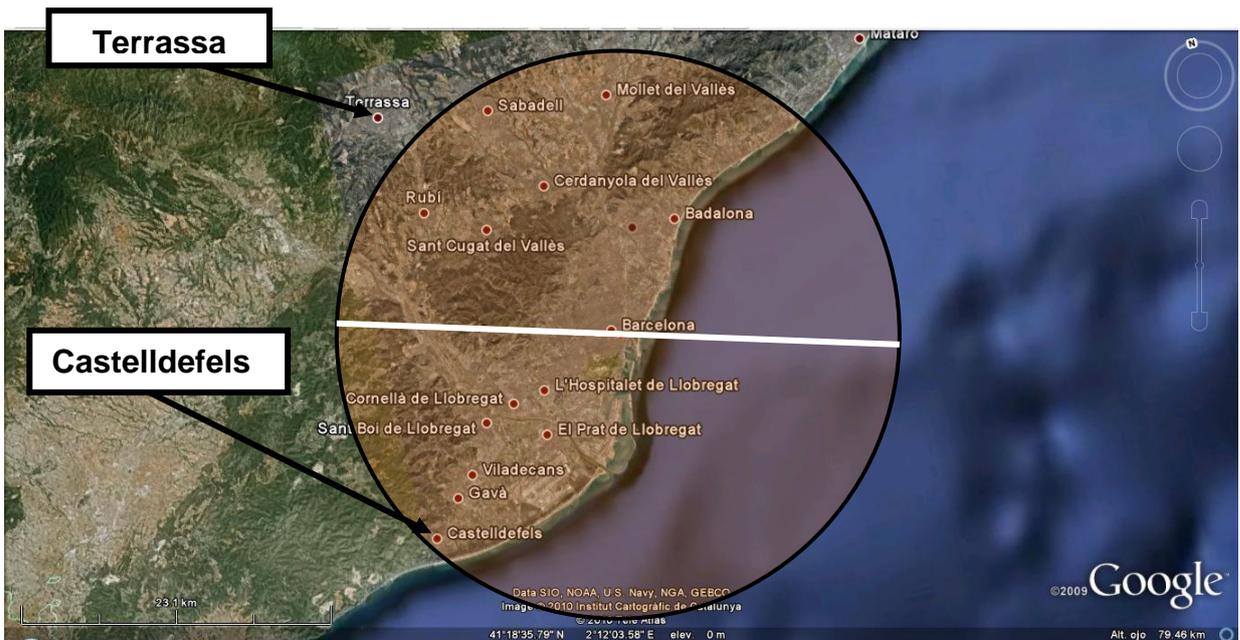
3. **2001 CA21:** es el asteroide con la velocidad (32,60 km / s) más grande de los que hemos escogido para aplicar la ley de Ordeo, lo que hace que el cráter que podría provocar sea el mayor de los que hemos estudiado. El diámetro estimado del asteroide es de unos 677 m. El intervalo de tiempo de impacto se sitúa entre los años 2020-2073, pero la probabilidad de impacto con la Tierra es de una entre cien mil millones.

Las dimensiones del cráter que podría provocar son:

$$D_{cr\grave{a}ter} = \frac{0,19 \cdot v + 0,7}{100} \cdot D_{asteroide} = \frac{0,19 \cdot 32600 + 0,7}{100} \cdot 677$$

$$D_{cr\grave{a}ter} = 41.938 \text{ m}$$

lo que nos permite comprobar que el cráter sería enorme, llegando hasta Castelldefels y Terrassa.



Los datos de los eyecta también son muy grandes, llegando restos del cráter hasta más allá de la frontera con Francia al Norte, y Aragón al oeste:

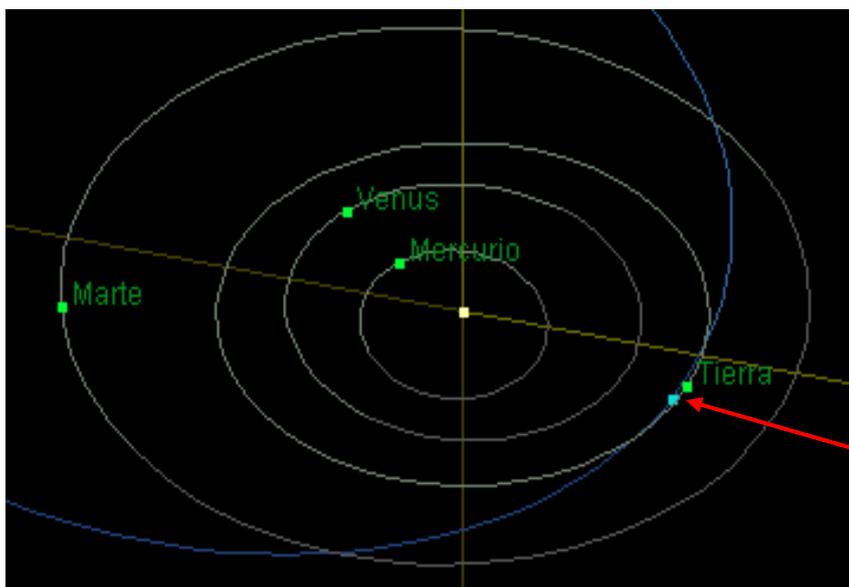
$$R_{eyecta} = \frac{0,8 \cdot v}{100} \cdot D_{asteroide} = \frac{0,8 \cdot 32600}{100} \cdot 677$$

$$R_{eyecta} = 176.562 \text{ m} = 177 \text{ km}$$



- 4. 2009 ST19:** este asteroide de 1 km aproximado de diámetro fue descubierto por el catalán Josep Maria Bosch en el Centro de Observación del Universo de Àger (Lleida), el 16 de septiembre de 2009. Se trata del asteroide más grande que ha pasado más cerca de la Tierra desde 1937, ya que la distancia a la que se encontró en el momento de máxima proximidad fue de 645.000 km.

Según los datos científicos extraídos de diferentes programas y simuladores informáticos de astronomía, este asteroide podría impactar contra la Tierra en el año 2038, con una velocidad de impacto de 11.183 m/s.



Asteroide 2009  
ST19 justo antes  
de impactar contra  
la Tierra el año  
2038

*Simulador informático de astronomía*

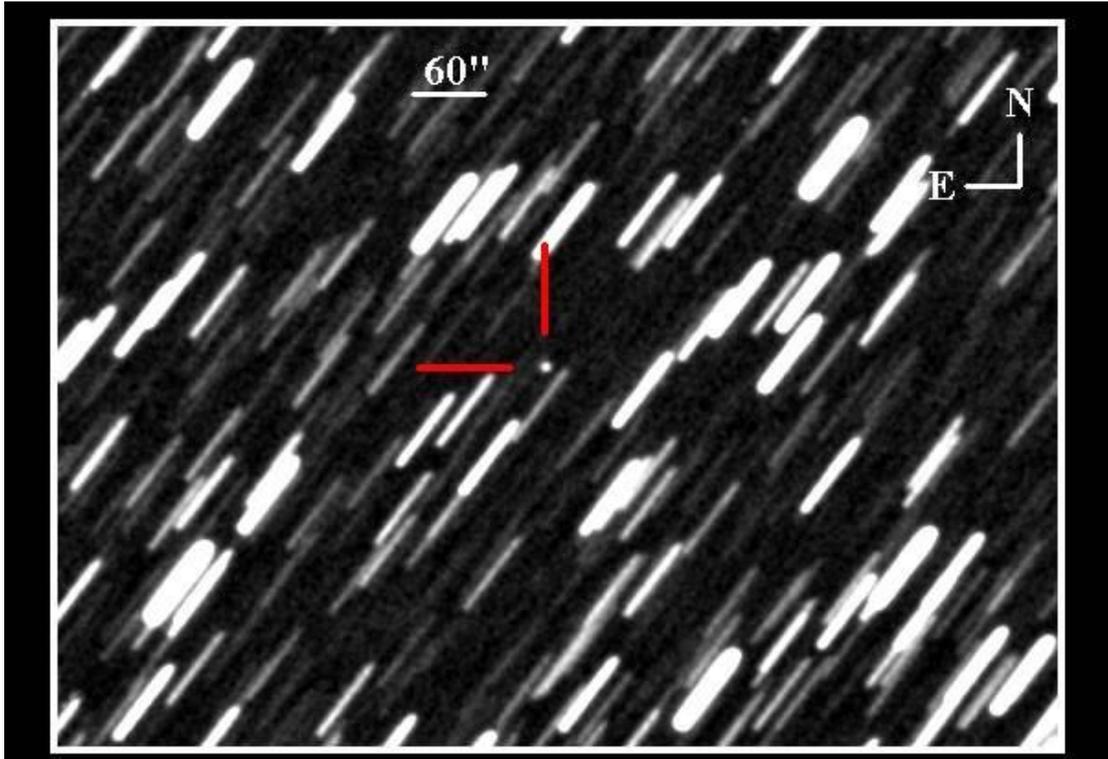
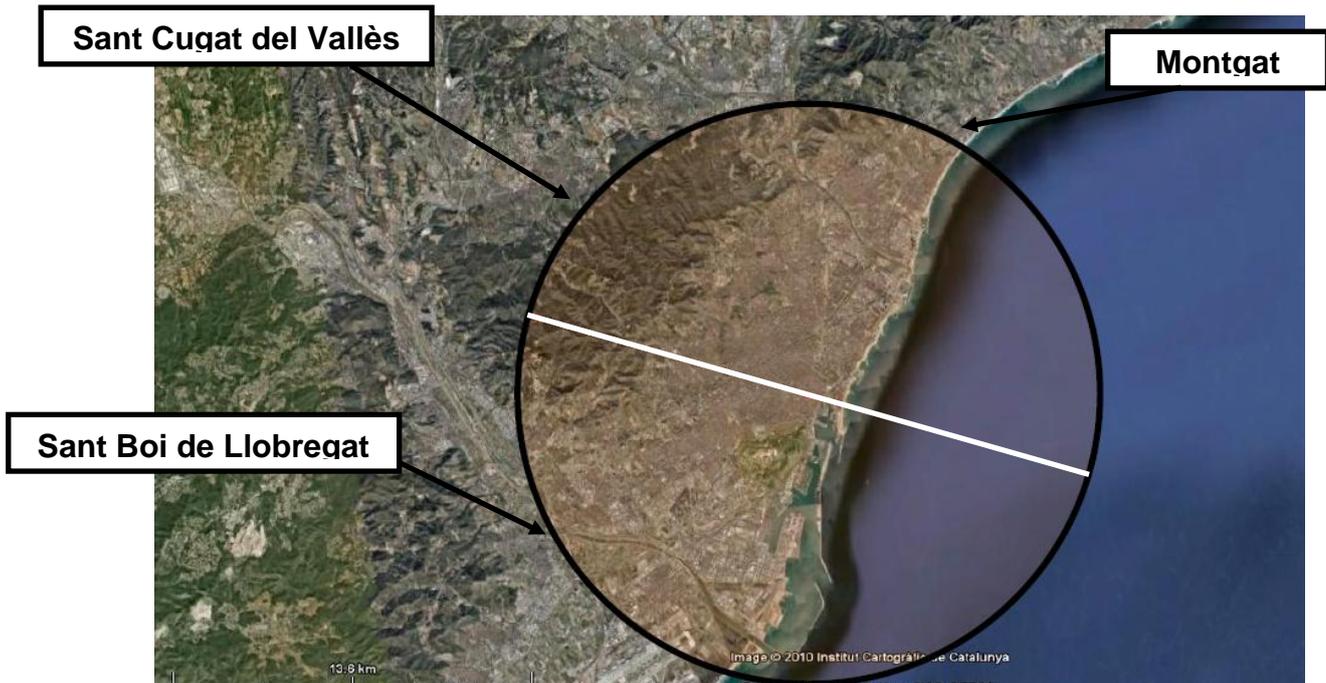


Imagen del cielo captada por un telescopio donde se ve el asteroide 2009 ST19  
 (<http://neo.jpl.nasa.gov/risk/>)

Las dimensiones del cráter que provocaría el asteroide 2009 ST19 si llegara a impactar son considerables según nuestro modelo:

$$D_{cràter} = \frac{0,19 \cdot v + 0,7}{100} \cdot D_{asteroide} = \frac{0,19 \cdot 11183 + 0,7}{100} \cdot 1000$$

$$D_{cràter} = 21.255 \text{ m}$$

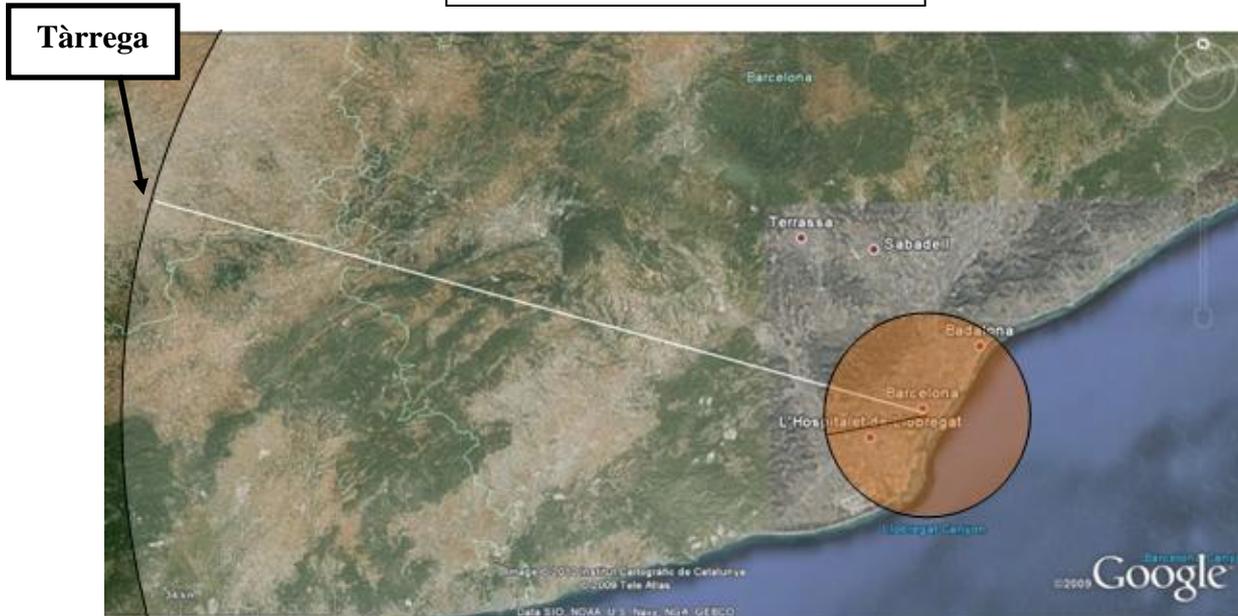




En cuanto a los eyecta, los datos indican que los restos expulsados del cráter llegarían hasta Tàrrega:

$$R_{eyecta} = \frac{0,8 \cdot v}{100} \cdot D_{asteroide} = \frac{0,8 \cdot 11183}{100} \cdot 1000$$

$$R_{eyecta} = 89.464 \text{ m} = 89,5 \text{ km}$$



5. **101955 1999 RQ36:** el posible impacto de este asteroide se ha estimado que no se producirá hasta dentro de 160 años. Se trata de un asteroide de 560 metros de diámetro que puede llegar a impactar contra la Tierra a una velocidad de 12.86 km/s.

Estos son los datos del cráter que produciría su impacto en Barcelona, el cual llegaría hasta L'Hospitalet de Llobregat y Santa Coloma de Gramenet:

$$D_{cràter} = \frac{0,19 \cdot v + 0,7}{100} \cdot D_{asteroide} = \frac{0,19 \cdot 12860 + 0,7}{100} \cdot 560$$

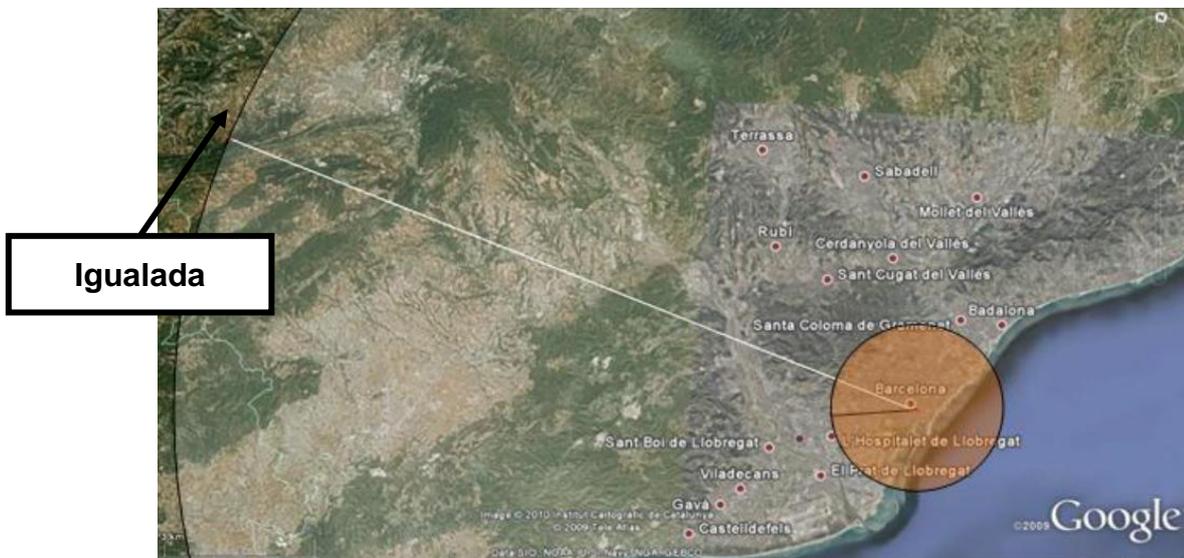
$$D_{cràter} = 13.687 \text{ m}$$



Los datos de los eyecta indican que llegarían restos del cráter hasta Igualada:

$$R_{eyecta} = \frac{0,8 \cdot v}{100} \cdot D_{asteroide} = \frac{0,8 \cdot 12860}{100} \cdot 560$$

$$R_{eyecta} = 57.613 \text{ m} = 57,6 \text{ km}$$



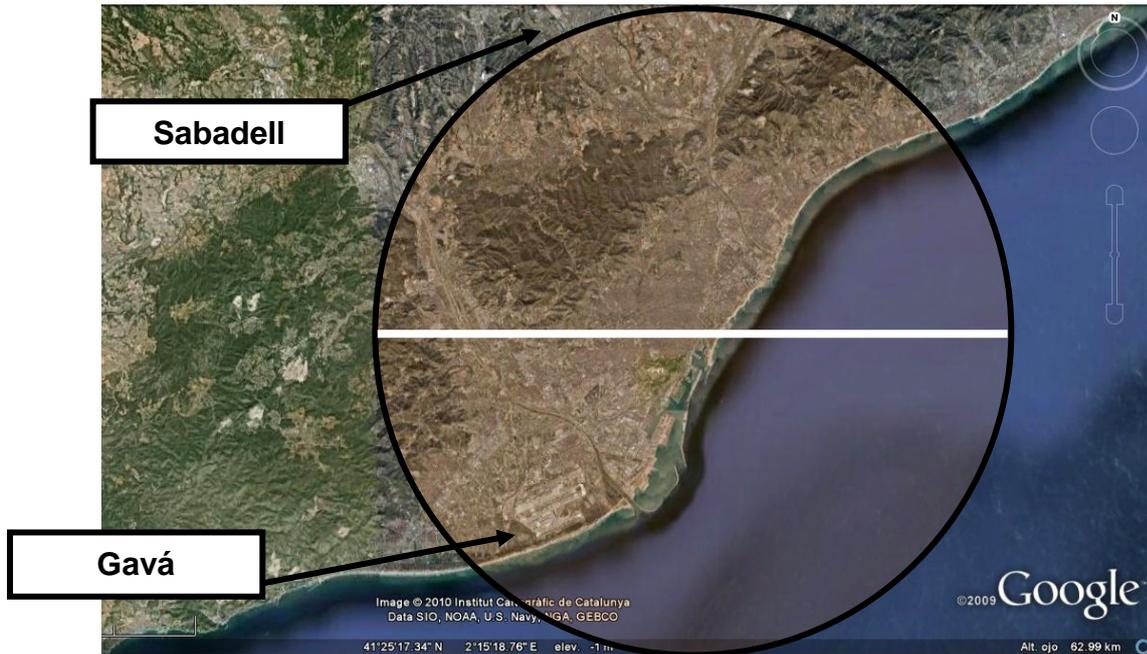
- 1979 XB:** este asteroide tiene un diámetro de 687m y puede llegar a impactar con una velocidad de 27,00 km/s. En relación con la velocidad de otros asteroides es una de las más grandes que en este momento se han descubierto.



El diámetro del cráter producido tendría las siguientes dimensiones, donde podemos comprobar que en el área de destrucción incluiríamos Gavà, mientras que Sabadell lo encontraríamos en el límite:

$$D_{cràter} = \frac{0,19 \cdot v + 0,7}{100} \cdot D_{asteroide} = \frac{0,19 \cdot 27000 + 0,7}{100} \cdot 687$$

$$D_{cràter} = 35.248 \text{ m}$$



El radio de materiales expulsados por el impacto sería el siguiente, donde podemos observar que la destrucción llegaría hasta los límites territoriales de Cataluña:

$$R_{eyecta} = \frac{0,8 \cdot v}{100} \cdot D_{asteroide} = \frac{0,8 \cdot 27000}{100} \cdot 687$$

$$R_{eyecta} = 148.392 \text{ m} = 148,4 \text{ km}$$





## 4. Aplicación del modelo de cráteres de impacto en otros cuerpos del Sistema Solar

### 4.1. Cráteres en planetas interiores

En este último apartado de nuestro trabajo, aplicaremos el modelo de cráteres de impacto que hemos desarrollado a cuerpos extraterrestres, donde, evidentemente, la atracción gravitatoria es diferente que en la Tierra y el efecto de un mismo meteorito puede variar en cada cuerpo o planeta. Por lo tanto tendremos que tener en cuenta todas estas variables a la hora de utilizar nuestras fórmulas.

Del mismo modo que hemos hecho con los cráteres de impacto en la Tierra, intentaremos encontrar el diámetro del meteorito que impactó en cráteres de otros planetas. Empezaremos por los planetas interiores o rocosos y sus satélites (Mercurio, Venus, la Luna, Marte y sus satélites). En estos cuerpos, a excepción de Venus, los cráteres de impacto se conservan en buen estado debido a la inexistencia de agentes externos como los animales, plantas o la acción humana, y la poca relevancia de agentes internos como terremotos, placas tectónicas o fenómenos atmosféricos.

En primer lugar necesitamos, para poder aplicar la fórmula

$$D_{\text{meteorito}} = \frac{100}{0,19 \cdot v + 0,7} \cdot D_{\text{cráter}}$$

la **velocidad de impacto** del meteorito y el **diámetro del cráter** producido. Si disponemos de datos del diámetro de diferentes cráteres, pero en ningún caso hemos encontrado ningún dato de la velocidad de impacto del objeto que produjo estos cráteres. Por lo tanto, tal como hemos establecido en el apartado 2.3., consideraremos que el objeto impactado proviene de una distancia infinita, despreciaremos la acción gravitatoria de otros cuerpos, así como la velocidad inicial del objeto y su posible desaceleración debida a la entrada a la atmósfera del planeta o satélite (si es que tiene). La velocidad que utilizaremos es la de escape de cada uno de los cuerpos que estudiaremos, al igual que hemos hecho con la Tierra en el apartado 3.2 de este trabajo. Por tanto, según el principio de conservación de la energía mecánica (apartado 3.2.):

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot G \cdot M}{R}}$$

donde  $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 / (\text{kg} \cdot \text{s}^2)$  es la constante de gravitación universal, y  $M$  y  $R$  son la masa y el radio del cuerpo donde impacta el meteorito. Así pues, para calcular la **velocidad de escape** necesitamos el radio y la masa del planeta o satélite, que encontraremos en datos bibliográficos (Moore 1983). Estas son las velocidades de escape de los diferentes cuerpos que queremos estudiar:

## Modelización de cráteres de impacto

Jesús Ordoño, Carlos Tadeo



| Planeta o luna        | Masa (kg)            | Radio (m)         | Velocidad escape (m/s) |
|-----------------------|----------------------|-------------------|------------------------|
| <b>Mercurio</b>       | $3,30 \cdot 10^{23}$ | $2,44 \cdot 10^6$ | <b>4.247,83</b>        |
| <b>Venus</b>          | $4,87 \cdot 10^{24}$ | $6,05 \cdot 10^6$ | <b>10.360,79</b>       |
| <b>Marte</b>          | $6,50 \cdot 10^{23}$ | $3,38 \cdot 10^6$ | <b>5.064,96</b>        |
| <b>Luna (Tierra)</b>  | $7,20 \cdot 10^{22}$ | $1,74 \cdot 10^6$ | <b>2.349,47</b>        |
| <b>Fobos (Marte)</b>  | $1,07 \cdot 10^{16}$ | $1,13 \cdot 10^4$ | <b>11,23</b>           |
| <b>Deimos (Marte)</b> | $2,24 \cdot 10^{15}$ | $6,33 \cdot 10^3$ | <b>6,88</b>            |
| <b>*Tierra</b>        | $5,98 \cdot 10^{24}$ | $6,37 \cdot 10^6$ | <b>11.190,74</b>       |

Podemos comprobar que todas estas velocidades son inferiores a la de la Tierra y que por tanto el efecto de un impacto será menor en otros cuerpos ya que la velocidad de impacto (o de escape) es directamente proporcional al diámetro del cráter producido según nuestra fórmula.

Para poder comparar el impacto de un meteorito en otros planetas con el impacto del mismo meteorito en la Tierra, compararemos el cráter producido por el meteorito que, en la Tierra, creó el Meteor Crater de Arizona, de 1186 metros de diámetro, con los cráteres que se producirían en estos cuerpos en impactar el mismo meteorito, siempre aplicando nuestro modelo:

|                 | <b>Diámetro cráter de un meteorito de 50 m (m)</b> |
|-----------------|--|
| <b>Mercurio</b> | 403,89   |
| <b>Venus</b>    | 984,63   |
| <b>Tierra</b>   | 1186   |
| <b>Marte</b>    | 481,52   |
| <b>Luna</b>     | 223,55   |
| <b>Fobos</b>    | 1,42   |
| <b>Deimos</b>   | 1,00   |

Podemos observar que en la Tierra es donde el cráter de impacto es mayor ya que la velocidad de impacto también lo es.

Como vemos en la tabla, en Fobos y Deimos el diámetro del cráter producido por un determinado meteorito, según nuestro modelo, es inferior al diámetro del propio meteorito. Este dato poco razonable lo obtenemos porque únicamente hemos considerado como velocidad del meteorito la velocidad de escape, que en Fobos y Deimos es muy pequeña y por tanto muy poco realista si se compara con la velocidad real que debe llevar un asteroide si impactase contra estos cuerpos. Así pues nuestro modelo no es aplicable a estas dos lunas de Marte, por lo que excluirémos a Fobos y Deimos de nuestros futuros cálculos. Tampoco podemos asegurar que el modelo sea válido para los otros cuerpos que estudiamos, excepto Venus, ya que en ellos no se da la circunstancia que en la Tierra nos permitió no considerar la velocidad inicial del meteorito, que es la desaceleración del meteorito debida a la atmósfera. Es por ello que no daremos un listado exhaustivo de cráteres de impacto, sino tan sólo una pequeña muestra de cráteres en planetas interiores.

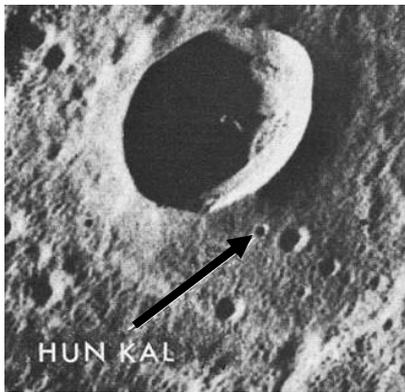


Calculamos ahora, con nuestro modelo, el diámetro del meteorito y el radio de los eyecta que formó este mismo meteorito en el momento del impacto, de la muestra de cráteres siguiente. Para el cálculo del radio de los eyecta aplicaremos la fórmula:

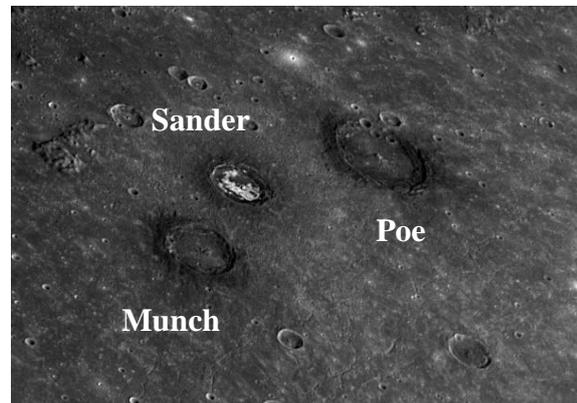
$$R_{eyecta} = \frac{0,8 \cdot v}{100} \cdot D_{meteorito}$$

Los cráteres que hemos escogido para esta aplicación son unos cráteres simples, ya que, como hemos comentado con anterioridad, son estos los tipos de cráteres que modelizamos con nuestro trabajo y a los cuales podemos aplicar la fórmula obteniendo un error más bajo. El dispositivo que construimos no nos permitía reproducir cráteres complejos debido a las bajas velocidades, a la naturaleza de las canicas y la superficie y por tanto los cráteres que utilizaremos en este apartado serán los siguientes:

**Mercurio:**

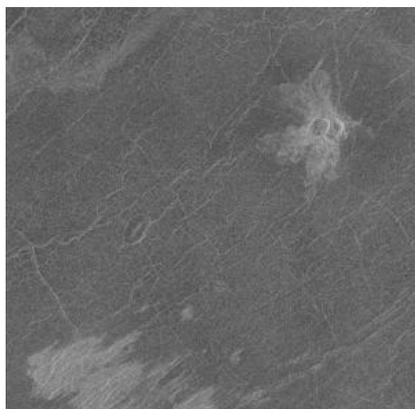


**Hun Kal**

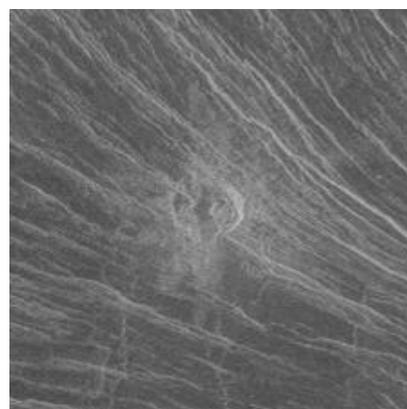


**Munch, Sander i Poe**

**Venus:**



**Seiko**



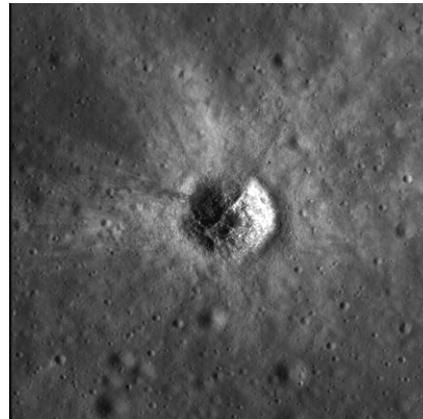
**Nutsa**



**Luna:**



**Moltke**



**Subcráter dentro de Hommel**

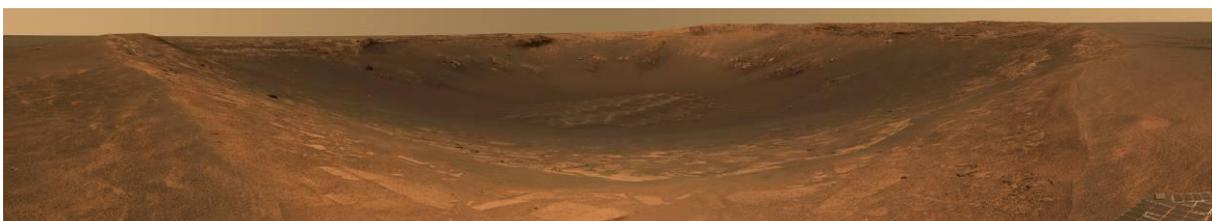
**Marte:**



**Victoria**



**Imagen del cráter Eagle con la lanzadera *Opportunity***



**Vista panorámica del cráter Endurance**

Estos son los resultados que hemos obtenido en calcular los valores del diámetro del meteorito y radio del eyecta producido:



|          | Cráter    | Diámetro cráter (m) | Diámetro meteorito (m) | Radio eyecta (m) |
|----------|-----------|---------------------|------------------------|------------------|
| Mercurio | Hun Kal   | 1.500               | 186                    | 6.310            |
|          | Sander    | 50.000              | 6.190                  | 210.344          |
|          | Munch     | 54.000              | 6.685                  | 227.171          |
|          | Poe       | 75.000              | 9.285                  | 315.516          |
| Venus    | Seiko     | 3.700               | 188                    | 15.573           |
|          | Nutsa     | 4.200               | 213                    | 17.678           |
| Luna     | Hommel    | 140                 | 31                     | 589              |
|          | Moltke    | 6.500               | 1.454                  | 27.326           |
| Marte    | Eagle     | 22                  | 2                      | 93               |
|          | Endurance | 130                 | 13                     | 547              |
|          | Victoria  | 800                 | 83                     | 3.366            |

Ampliaremos ahora nuestros cálculos a cráteres más grandes y complejos con los que, probablemente, obtendremos un error mayor en los valores del diámetro del meteorito y el radio de los eyecta que calculamos debido precisamente a su naturaleza de cráteres complejos (como ya hemos dicho nuestras fórmulas están hechas a partir de la modelización de cráteres simples):

|          | Cráter           | Diámetro cráter (m) | Diámetro meteorito (m) | Radio eyecta (m) |
|----------|------------------|---------------------|------------------------|------------------|
| Mercurio | Caloris Planitia | 1.300.000           | 160.934                | 5.468.941        |
| Venus    | Mead             | 268.700             | 13.645                 | 1.130.966        |
| Marte    | Hellas planitia  | 1.800.000           | 186.908                | 7.573.439        |
|          | Tycho Brahe      | 106.000             | 11.007                 | 445.991          |
| Luna     | Copernicus       | 93.000              | 20.801                 | 390.966          |
|          | Tycho            | 85.000              | 19.011                 | 357.334          |
|          | Plato            | 109.000             | 24.379                 | 458.229          |

## 4.2. Cráteres en satélites de planetas exteriores

En este apartado continuamos el estudio de las dimensiones de los asteroides que impactan contra cuerpos celestes diferentes de la Tierra, en este caso centrándonos en los satélites de planetas exteriores o gaseosos. A diferencia del apartado anterior, no aplicaremos las fórmulas de nuestro modelo directamente sobre los planetas exteriores por la falta de material sólido en estos cuerpos y la consecuente ausencia de cráteres, pero sí que aplicaremos nuestras fórmulas en algunos de sus satélites, los cuales están formados en casi todos los casos de materiales rocosos.

De cada planeta exterior hemos escogido los satélites más conocidos y los que nos ofrecen los datos que nosotros necesitamos para realizar nuestros cálculos. Normalmente, cada satélite tiene una gran variedad de cráteres de impacto, por este motivo hemos hecho una selección de los más relevantes.

## Modelización de cráteres de impacto

Jesús Ordoño, Carlos Tadeo



Al igual que en el apartado anterior, necesitamos encontrar las variables que nos faltan para poder aplicar las fórmulas de nuestro modelo:

$$D_{\text{meteorito}} = \frac{100}{0,19 \cdot v + 0,7} \cdot D_{\text{cráter}}$$

$$R_{\text{eyecta}} = \frac{0,8 \cdot v}{100} \cdot D_{\text{meteorito}}$$

es decir, necesitamos la velocidad de impacto del meteorito, y el diámetro del cráter producido. Como en los planetas interiores, la falta de datos sobre las velocidades de impacto nos obliga a considerar que los meteoritos provenían de una distancia infinita y sin velocidad inicial, y por tanto la velocidad de impacto que utilizaremos se corresponde con la velocidad de escape de cada satélite.

Por tanto, con la fórmula:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot G \cdot M}{R}}$$

calcularemos la velocidad de impacto (de escape) en cada satélite para después introducirla junto con el diámetro del cráter en las fórmulas mencionadas anteriormente.

En las siguientes tablas calculamos, con nuestro modelo, los diámetros de los meteoritos que formaron los cráteres en cada satélite, así como el radio de los eyecta que estos impactos generaron. Para cada planeta exterior hemos confeccionado dos tablas: en la primera se encuentran los datos de los satélites que nos han servido para calcular la velocidad de escape (Moore 1983), y en la segunda hemos calculado el diámetro del meteorito y el radio de los eyecta de algunos de los cráteres de estos satélites. En todas las tablas, hemos destacado los datos que nosotros mismos hemos calculado.

### Satélites de Júpiter:

| Satélites        | Masa (kg)           | Radio (m)         | Velocidad escape (m/s) |
|------------------|---------------------|-------------------|------------------------|
| <b>Io</b>        | $8,9 \cdot 10^{22}$ | $1,82 \cdot 10^6$ | <b>2.554,09</b>        |
| <b>Europa</b>    | $4,8 \cdot 10^{22}$ | $1,57 \cdot 10^6$ | <b>2.019,52</b>        |
| <b>Ganimedes</b> | $1,5 \cdot 10^{23}$ | $2,63 \cdot 10^6$ | <b>2.758,32</b>        |
| <b>Calisto</b>   | $1,1 \cdot 10^{23}$ | $2,4 \cdot 10^6$  | <b>2.472,68</b>        |

| Satélites        | Cráteres        | $D_{\text{cráter}}$ (m) | $D_{\text{meteorito}}$ (m) | $R_{\text{eyecta}}$ (m) |
|------------------|-----------------|-------------------------|----------------------------|-------------------------|
| <b>Europa</b>    | <b>Pwyll</b>    | 39.000                  | <b>10.145</b>              | <b>163.912</b>          |
|                  | <b>Achelous</b> | 40.000                  | <b>7.622</b>               | <b>168.196</b>          |
| <b>Ganimedes</b> | <b>Anubis</b>   | 113.000                 | <b>21.533</b>              | <b>475.155</b>          |
|                  | <b>Zakar</b>    | 170.000                 | <b>32.394</b>              | <b>714.835</b>          |
| <b>Calisto</b>   | <b>Asgard</b>   | 1.600                   | <b>340</b>                 | <b>6.727</b>            |
|                  | <b>Adlinda</b>  | 1.000                   | <b>213</b>                 | <b>4.204</b>            |

## Modelización de cráteres de impacto

Jesús Ordoño, Carlos Tadeo



Del satélite lo no se ha destacado ningún cráter debido a su intensa actividad volcánica que borra cualquier rastro de impacto meteorítico de la superficie (Karttunen 1994).

### Satélites de Saturno:

| Satélites | Masa (kg)            | Radio (m)          | Velocidad escape (m/s) |
|-----------|----------------------|--------------------|------------------------|
| Mimas     | $3,84 \cdot 10^{19}$ | 196.000            | 161,7                  |
| Encélado  | $8 \cdot 10^{13}$    | 250.000            | 0,2                    |
| Tetis     | $6,17 \cdot 10^{20}$ | 530.000            | 394,1                  |
| Dione     | $1,09 \cdot 10^{21}$ | 560.000            | 509,6                  |
| Rea       | $3,32 \cdot 10^{21}$ | 765.000            | 760,9                  |
| Titán     | $1,3 \cdot 10^{23}$  | $2,755 \cdot 10^6$ | 2.509                  |
| Jápeto    | $2,0 \cdot 10^{21}$  | 730.000            | 604,5                  |

| Satélites | Cráteres | $D_{\text{cráter}}$ (m) | $D_{\text{meteorito}}$ (m) | $R_{\text{eyecta}}$ (m) |
|-----------|----------|-------------------------|----------------------------|-------------------------|
| Mimas     | Herschel | 130.000                 | 413.710                    | 535.175                 |
|           | Gallahad | 40.000                  | 127.295                    | 164.669                 |
| Tetis     | Odysseus | 450.000                 | 595.403                    | 1.877.188               |
| Dione     | Eneas    | 160.000                 | 164.062                    | 668.849                 |
| Rea       | Izanagi  | 300.000                 | 206.511                    | 1.257.071               |
| Titán     | Sinlap   | 80.000                  | 16.757                     | 336.348                 |
|           | Ksa      | 30.000                  | 6.284                      | 126.131                 |

Podemos observar que, en los satélites de Saturno, en algunos casos las dimensiones del meteorito que impacta son 3 veces superiores a las dimensiones del cráter, lo cual no es nada razonable. Estos datos se deben a la pequeña dimensión de la mayoría de lunas de Saturno (con la excepción de Titán), lo que conlleva muy bajas velocidades de escape, que son muy poco similares a las reales de los meteoritos. Por lo tanto, como Fobos y Deimos, el hecho de no disponer de datos de las velocidades de impacto no nos permite aplicar con fiabilidad nuestro modelo, ya que la velocidad de impacto de los meteoritos en estos cuerpos tan pequeños es muy diferente a la de escape.

### Satélites de Urano:

| Satélites | Masa (kg)            | Radio (m) | Velocidad escape (m/s) |
|-----------|----------------------|-----------|------------------------|
| Miranda   | $6,33 \cdot 10^{19}$ | 281.000   | 1.733,5                |
| Ariel     | $1,27 \cdot 10^{21}$ | 579.000   | 540,92                 |
| Umbriel   | $1,27 \cdot 10^{21}$ | 586.000   | 537,68                 |
| Titania   | $3,49 \cdot 10^{21}$ | 790.000   | 767,67                 |
| Oberón    | $3,03 \cdot 10^{21}$ | 762.000   | 728,31                 |

| Satélites | Cráteres | $D_{\text{cráter}}$ (m) | $D_{\text{meteorito}}$ (m) | $R_{\text{eyecta}}$ (m) |
|-----------|----------|-------------------------|----------------------------|-------------------------|
| Titania   | Úrsula   | 200.000                 | 136.465                    | 838.083                 |
|           | Gertrude | 326.000                 | 222.439                    | 1.366.075               |
|           | Adriana  | 50.000                  | 34.116                     | 209.521                 |
|           | Iras     | 33.000                  | 22.517                     | 138.284                 |

## Modelización de cráteres de impacto

Jesús Ordoño, Carlos Tadeo



Como en el caso de Saturno, el diámetro del meteorito y el radio de los eyecta de los cráteres que hemos calculado tienen unas dimensiones muy grandes. Otra causa relacionada con la ausencia de datos de velocidades de impacto, podría ser el hecho de que no hemos tenido en cuenta la presencia de otros cuerpos celestes para calcular la velocidad, en este caso el propio planeta Urano, que genera un campo gravitatorio que atrae a los cuerpos celestes del espacio.

Por tanto, podemos afirmar que los meteoritos que han impactado contra las lunas, tanto de Saturno como de Urano, tienen que haber sido acelerados por esta fuerza gravitatoria y a consecuencia de ello han de tener una velocidad mucho mayor de la que nosotros hemos calculado, con lo que el cráter que pueden producir es mucho mayor en comparación con el que podrían crear si estas lunas se encontraran apartadas de cualquier otro cuerpo en el espacio.

### Satélites de Neptuno:

| Satélite | Masa (kg)            | Radio (m)         | Velocidad escape (m/s) |
|----------|----------------------|-------------------|------------------------|
| Tritón   | $2,14 \cdot 10^{22}$ | $1,35 \cdot 10^6$ | 1.454,2                |

| Satélite | Cráteres | $D_{\text{cráter}}$ (m) | $D_{\text{meteorito}}$ (m) | $R_{\text{eyecta}}$ (m) |
|----------|----------|-------------------------|----------------------------|-------------------------|
| Tritón   | Mozamba  | 27.000                  | 9.747                      | 113.397                 |

En este caso los datos del diámetro del meteorito y del radio de los eyecta son más realistas, ya que la velocidad de escape de Triton es lo suficientemente grande para que pueda corresponder realmente a la velocidad de impacto del meteorito que originó el cráter.



## Conclusiones

El modelo de cráteres de impacto desarrollado en este trabajo demuestra cómo, 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 ser la misma.

No fue fácil realizar un modelo de impactos meteoríticos que se aviniera a nuestras necesidades y presupuesto, pero el modelo construido fue bastante satisfactorio para los resultados obtenidos. Con este modelo pudimos realizar nuestro propósito: simular un total de unos 1.050 lanzamientos meteoríticos en los que obtuviéramos valores para las tres variables estudiadas (diámetro y profundidad del cráter y radio de los eyecta). Con todos estos datos experimentalmente obtenidos y tras un minucioso tratamiento de datos hemos podido extraer varias relaciones, entre las que destacan que el diámetro del cráter y el radio de los eyecta son directamente proporcionales a la velocidad y el diámetro del cuerpo impactado, con una constante específica para cada parámetro (diámetro y eyecta). La formulación numérica se plasma en las llamadas fórmulas de la *Ley de Ordeo*:

$$D_{cráter} = \frac{0,19 \cdot v + 0,7}{100} \cdot D_{meteorito}$$

$$R_{eyecta} = \frac{0,8 \cdot v}{100} \cdot D_{meteorito}$$

Las fórmulas de la ley de Ordeo son aplicables a cráteres terrestres, tal y 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 ésta es la primera vez que un estudio de estas características se lleva a cabo usando un método 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.

## Modelización de cráteres de impacto

Jesús Ordoño, Carlos Tadeo



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 contrarrestada por la deceleración causada por la misma, pero es definitivamente poco fiable para cuerpos sin atmósfera.



## Bibliografía

### 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”.
- BOTTKE et al. (2007). *An asteroid breakup 160 Myr ago as the probable source of the K/T impactor*, Nature, Vol 449, pp. 48-53.
- CARR, M. (2006). *The surface of Mars*. Cambridge: Cambridge University Press.
- COLLINS, G. S. et al. (2005). *Earth Impact Effects Program*, “Meteoritics & Planetary Science”, Vol 6, Tucson, pp. 817-840.
- GIBILISCO, S. (1991). *Cometas, meteoros y asteroides: cómo afectan a la Tierra*. Madrid: McGraw-Hill.
- GUAITA, C. (2005). *Alla ricerca della vita nel Sistema Solare*. Milà: Sirio srl.
- HODGE, P. W. (1994). *Meteorite craters and impact structures of the Earth*. Nova York: Cambridge University Press.
- KARTTUNEN H. et al. (1994). *Fundamental astronomy*. Berlín: Springer-Verlag.
- 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
- MOORE, P. (1983). *The atlas of the Solar System*. Londres: Mitchell Beazley.
- 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
- SMOLUCHOWSKI, R. (1986). *El Sistema Solar*. Barcelona: Editorial Labor.
- TAYLOR, J. R. (1997). *An introduction to error analysis*. Sausalito: University Science Books.
- YEOMANS, D. K. (1995). *Cometas, asteroides y meteoritos II*. Barcelona: Time life.



### **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