

Sobre meteoroides, asteroides y cometas como un peligro potencial para la Tierra

MSc. Francisco González-Veitia ^(1*)

(^{1*}) Francisco González Veitia Especialista del Departamento de Astronomía del Instituto de Geofísica y Astronomía, La Habana, Cuba, email: francisco@iga.cu

Resumen

En este artículo se realizó un recuento de la historia de algunos de los impactos de asteroides y meteoroides sobre la Tierra, incluido el caso ocurrido de nuestro país. A través del análisis histórico de estos eventos se pudo hacer notar el peligro que estos cuerpos celestes representan para nuestro planeta. Se estimó, que el flujo de grandes meteoroides sobre la Tierra representa un orden de magnitud del número de impactos mucho mayor que el estimado por las búsquedas de objetos cercanos con telescopios terrestres y de bólidos detectados por satélites.

Se llegó a la conclusión, basados en el consenso actual de los expertos, de que las capacidades actuales basadas en la observación telescópica solo son suficientes para localizar menos de la mitad de todos los objetos de 140 metros para 2033, y las mejoras planificadas en los sistemas de búsqueda todavía se quedarán cortas.

Palabras claves: asteroides, cometas, impactos

About meteoroids, asteroids and comets as a potential danger to Earth

Abstract

This article recounts the history of some asteroid and meteoroid impacts on Earth, including the case that occurred in our country. Through a historical analysis of these events, it was possible to highlight the danger these celestial bodies pose to our planet. It was estimated that the flux of large meteoroids on Earth represents an order of magnitude greater than the number estimated by searches for near-objects with ground-based telescopes and for fireballs detected by satellites.

It was concluded, based on the current expert consensus, that current capabilities based on telescopic observation are only sufficient to locate less than half of all 140-meter objects by 2033, and that planned improvements in search systems will still fall short.

Key words: asteroids, comets, impacts

1. Introducción

Hoy día, la percepción que se tiene del peligro que representa para nuestro planeta el impacto de meteoroides, no es suficiente entre la mayoría de la población y en muchos casos son insuficientes los planes de enfrentamiento frente a este tipo de desastres.

Cada día la Tierra es golpeada por una cantidad de centenares a miles de meteoroides con tamaños del orden de los cm. Objetos con dimensiones del orden de los metros impactan a la Tierra cada año. La mayor parte de estos acontecimientos ocurren a grandes alturas, por lo que sus ondas de choque casi nunca alcanzan la superficie terrestre y frecuentemente tienen lugar sobre terrenos despoblados y el océano, pero son detectables desde satélites (Morrison, 1992) y utilizando detectores de infrasonido (Silber et al., 2011).

Sin embargo, en algunos casos, el impacto de un objeto de dimensiones del orden de los metros (energía equivalente a varios centenares de Kt de TNT) o incluso mayores puede ocurrir encima de áreas pobladas, planteando un riesgo real sobre la infraestructura y la población (Popova et al., 2011); (Rumpf, 2019).

Este trabajo, pretende aportar información que permita concientizar sobre el peligro que representa para la sociedad el posible impacto de meteoroides.

2. Análisis y discusión

En el caso de grandes objetos bien conocidos (varios centenares de metros), como los objetos cercanos a la Tierra (NEOs) cuya probabilidad de impacto no es insignificante, se puede predecir por adelantado dónde y cómo podría impactar el objeto en nuestro planeta (Chapman & Morrison, 1994); (Chesley, 2005); (Rumpf, 2019), pero esto solo es posible cuando el impactor ha sido intensamente observado previamente y los elementos de su órbita están bien determinados.

Ejemplos de impactos conocidos.

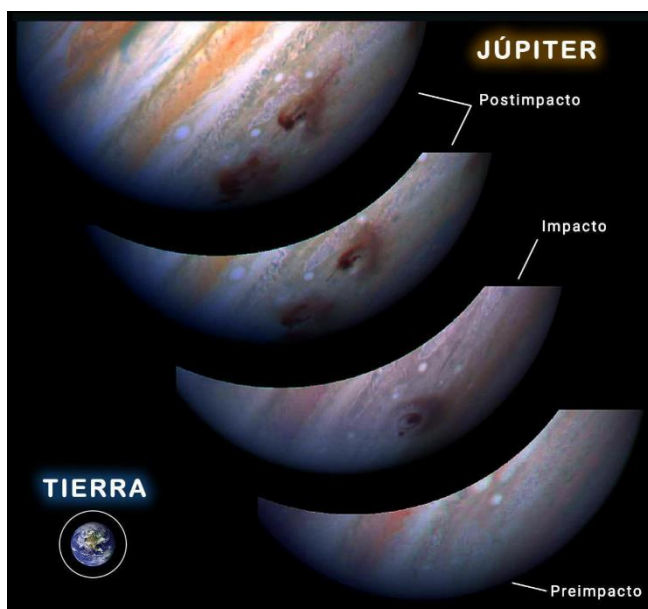
16 DE JULIO DE 1994, IMPACTO DEL COMETA SHOEMAKER-LEVY 9 CON JÚPITER (SL-9).

Shoemaker-Levy 9 fue un cometa que se fragmentó e impactó con Júpiter el 16 de julio de 1994, proporcionando la primera observación directa de una colisión extraterrestre entre objetos del Sistema Solar (fig. 1); esto generó una gran cobertura en los medios de comunicación hasta tal punto que se hizo popular y fue observado por muchos astrónomos alrededor del planeta dada su importancia a nivel científico.



Fig.1: El cometa Shoemaker-Levy 9 tras su desintegración y antes del impacto de los fragmentos con Júpiter (Foto NASA HST)

Según las observaciones del Hubble los once fragmentos mayores tenían tamaños entre 2,5 y 4,3 km de diámetro. La energía del impacto es proporcional a la masa del fragmento y por tanto es proporcional al cubo de su diámetro.



Los impactos, ocurridos en orden alfabético, iniciaron con la colisión del fragmento A con el planeta gigante tal cual estaba previsto. Los impactos finalizaron el 22 de julio, con el choque del fragmento W. El más grande de estos impactos lo generó el fragmento G el 18 de julio a las 07:34 UTC (fig. 2), este originó una mancha oscura gigante de más de 12 000 km de diámetro, y se estimó una explosión de energía equivalente a 6 000 000 de megatones de TNT, seiscientas veces el poder del arsenal nuclear de la Tierra.

Fig 2: Huella de los impactos causados por los fragmentos del cometa Shoemaker-Levy 9 sobre Júpiter (Foto NASA HST)

La secuencia de acontecimientos por el impacto de fragmentos del cometa SL-9 fue la siguiente:

- Entrada del bólido en la atmósfera, causando un fogonazo de 30 segundos por incandescencia del material cometario; similar al que enciende los meteoros en la atmósfera terrestre.
- Destello de uno o dos minutos con una intensidad un millón de veces superior al primero, debido a la onda de choque y la explosión del fragmento.
- A los seis minutos, colosal bola de fuego que alcanza una intensidad cien millones superior al primero y que va decayendo a medida que la temperatura disminuye. Las bolas de gas de masa igual o superior a 100 millones de toneladas alcanzaron los 300 km de altura.
- Como resultado del choque se generaron manchas negras en la atmósfera, que duraron varios meses. La huella causada por el fragmento G tiene un color muy oscuro de 8000 km de diámetro y está rodeada de un halo gris de 25000 km. Se cree que las nubes se contaminaron con material del cometa.
- Las colisiones generaron una enorme onda sísmica que barrió el planeta a la velocidad de 450 km/s y se observó durante más de dos horas después de los impactos más grandes.
- Las cicatrices de los impactos en Júpiter fueron visibles durante muchos meses después del impacto.

Si el cometa Shoemaker-Levy 9 hubiera chocado con la Tierra los efectos habrían sido devastadores.

Se afirma por muchos científicos que la extinción de los dinosaurios a finales del Cretácico fue causada principalmente por un impacto de asteroide que creó el cráter de Chicxulub en la península de Yucatán, lo que demuestra que estas colisiones son una seria amenaza para la vida en la Tierra.

Si Júpiter no estuviera presente, estos cuerpos pequeños podrían chocar con los planetas internos. Los astrónomos han especulado que los acontecimientos de extinción podrían haber sido mucho más frecuentes aquí de no ser por Júpiter; y la vida compleja podría no haberse desarrollado.

¿Han ocurrido impactos semejantes en otros cuerpos de nuestro sistema solar?

La cuenca de **Caloris** en Mercurio es uno de los cráteres de impacto más grandes del sistema solar. Se extiende 1500 kilómetros sobre la superficie en este mosaico con color realizado (fig. 3). Se muestra a la derecha la vista topográfica de cuerpos planetarios resaltando muchos de los acontecimientos de impactos grandes, estos han dejado una cicatriz en sus superficies y posiblemente ha alterado sus interiores (fig. 4). Los mapas están codificados en color azul para los puntos bajos y rojo para puntos altos.

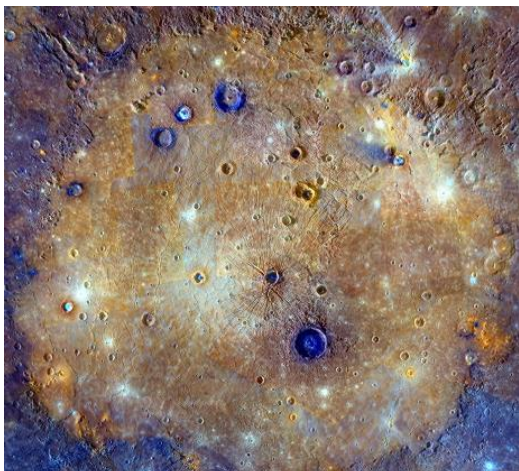


Fig. 3: La cuenca de Caloris en Mercurio (Foto X.com)

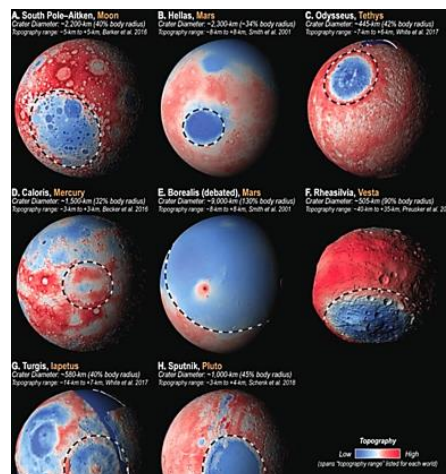


Fig.4: Impactos en el Sistema Solar (Foto National Academic)

La imagen siguiente en color realzado pertenece al cráter Haulani en el planeta enano Ceres, tomado de la misión Dawn en 2017. El cráter tiene un diámetro de 34 kilómetros (fig. 5). A la derecha se muestran cráteres de impacto sobre el asteroide Vesta (fig. 6)



Fig.5: Impacto sobre el planeta enano Ceres (Foto Blogger.com)

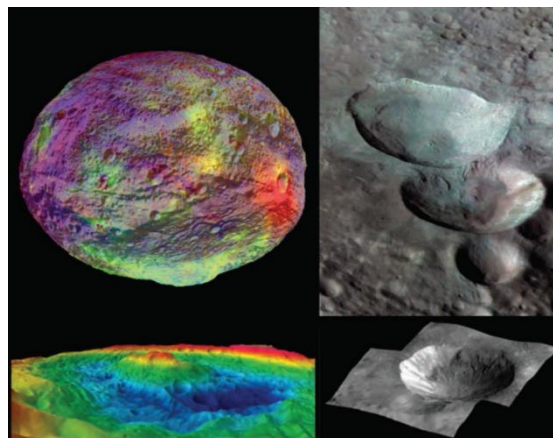


Fig. 6: Derecha, el mosaico de cráteres sobre el asteroide Vesta (Arriba Izquierda): Marcia (58 km de diámetro), Calpurnia, y Minucia. Abajo, La vista en perspectiva del impacto gigante Rheasilvia (500 km de diámetro) El pico central en Rheasilvia es la segunda montaña más alta en el sistema solar tras Olympus Mons en Marte. Derecha abajo: El cráter Cornelia (15 km de diámetro) Fotos UCLA

Impactos semejantes ocurridos en la tierra.

• Impacto en Chicxulub México

Existe un antiguo cráter de impacto de hace unos 65.5 millones de años cuyo centro aproximado está ubicado al noroeste de la península de Yucatán, en México. El cráter mide más de 180 kilómetros de diámetro, formando una de las zonas de impacto más grandes del mundo. Pruebas más recientes sugieren que el cráter real mide 300 kilómetros de diámetro, y que el anillo de 180 kilómetros es una pared interior, se estima que el asteroide que formó el cráter medía al menos diez kilómetros de diámetro (fig. 7).

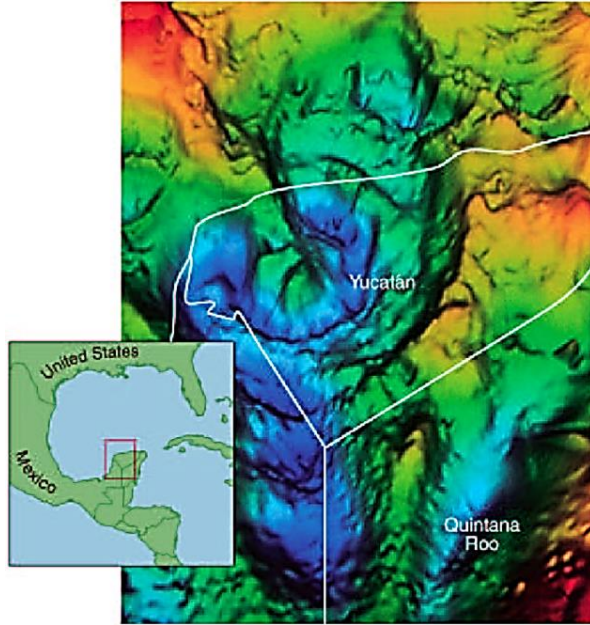


Fig. 7: Cráter de Impacto en Chicxulub México Foto New York University.

• Impacto en Arizona.

El cráter Barringer, fue nombrado así por el geólogo Daniel Barringer, quien fue el primero en sugerir, en el año 1903, que el cráter era producto del impacto de un meteorito y es el resultado de una gran colisión con la Tierra de un asteroide metálico de unos 42 metros de tamaño, hace unos 50.000 años. El cráter se localiza a 55 km al este de la ciudad de Flagstaff, en el norte de Arizona, Estados Unidos (figuras 8 y 9).



Fig. 8: El cráter Barringer en el desierto de Arizona. Foto Instagram



Fig. 9: Comparación de tamaños entre el cráter de impacto en Arizona (también conocido como cráter Barringer), con las grandes pirámides de Giza y la esfinge. NASA

• **Evento Tunguska 30 de junio de 1908**

Equivalente a la explosión de una bomba nuclear de 100 Mt (Hiroshima = 12.5 kt) dañó 80 millones de árboles derribados en 2150 km cuadrados de bosques (fig. 10).



Fig. 10: Árboles derribados por la explosión del bólido de Tunguska. Foto expedición de 1927 de la Academia Soviética de Ciencias dirigida por Leonid Kulik

• **Evento de Chelyabinsk 15 de febrero de 2013 a las 03h 20m 20s**

El más grande y más documentado en las recientes décadas. Un objeto natural entra en la atmósfera de la Tierra con rastro característico de ionización y detonación sobre la ciudad rusa de Chelyabinsk (fig. 11), su tamaño entre 17-19 m de diámetro, $\sim 1.2 \times 10^7$ kg de masa asumiendo la densidad del objeto 3300 kg/m^3 , la energía calculada de la explosión a 23 km de altura fue de aproximadamente 440 kilotones (casi 30 bombas atómicas como la de Hiroshima). 1613 ciudadanos lesionados, casi todos ellos por cortes debido a las ventanas rotas, que explosionaron dentro de los edificios.

La estructura más grande dañada fue una fábrica de zinc, cuyo techo colapsó por completo. Los daños causados se calculan en 30 millones de dólares.

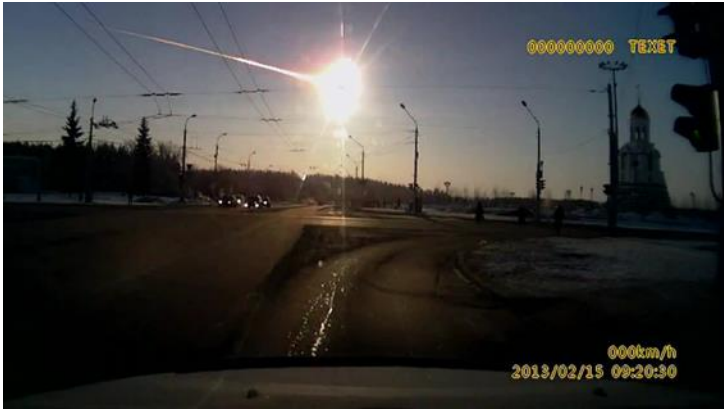


Fig. 11: Impacto sobre Chelyabinsk Rusia 15 de febrero de 2013
captura de Video youtube

• Evento de Viñales Cuba (tabla1)

El 1 de febrero de 2019 alrededor de las 13h:17m:10s hora del meridiano 75 Oeste de Greenwich, un hecho semejante aunque en menor escala, con energía calculada de la explosión de 1.4 kT, correspondiente a un cuerpo de 330 toneladas de masa, ocurrió a 22 km de altura, sobre la provincia de Pinar del Río en nuestro país con rastro de humo y estampido sónico provocando una lluvia de meteoritos sobre el valle de Viñales, fallos en la comunicación telefónica y la vibración de los edificios, suceso presenciado por miles de personas en la isla y varios observadores casuales en el Sur de la Florida (EEUU), afortunadamente casi sin daños materiales de importancia y sin víctimas fatales (fig. 12).

Tabla 1: Datos del evento Viñales del 1 de febrero de 2019.

Pico de Brillo Fecha/Hora	Latitud (°)	Longitud (°)	Altura (km)	Velocidad (km/s)	V _x	V _y	V _z	Total de Energía Radiada (J)	Energía Total del Impacto (KT)
01-02-2019 13h 17m 10s	22.5N	83.8W	23.7	16.3	-2.4	13.6	8.7	57.9 e10	1.4

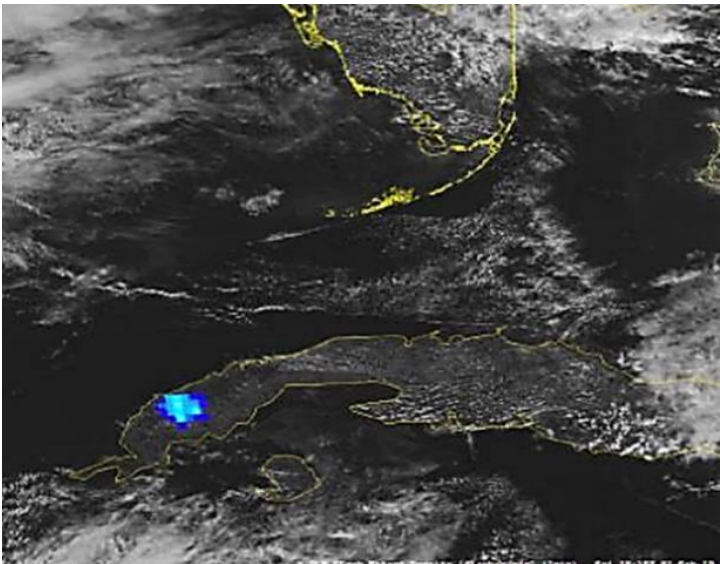


Fig.12: Explosión de bólido sobre Viñales Pinar del Río, Cuba (Foto GOES 16)

Asteroides, meteoroides y cometas ¿Qué son y de dónde vienen?

Los asteroides, son cuerpos menores del sistema solar conformados irregularmente, presentan tamaños relativamente pequeños, desde 1 m hasta 1000 km de diámetro según la definición establecida por la Unión Astronómica Internacional (IAU por sus siglas en inglés). La mayoría de ellos órbita el Sol dentro del cinturón principal de asteroides, entre las órbitas de Marte y Júpiter. Sin embargo, perturbaciones gravitacionales causadas por los planetas mayores, así como también perturbaciones no gravitacionales, producen una migración continua de asteroides del cinturón principal hacia el Sol, cruzando las órbitas de Marte, la Tierra, Venus y Mercurio. Estos cuerpos son restos de la fase primigenia de nuestro sistema solar iniciada hace unos 4600 millones de años, bloques de formación que no fueron acretados ni por los planetas ni por el Sol.

Los meteoroides son cuerpos menores del Sistema Solar que orbitan el Sol, con tamaño aproximado, entre 100 μm y 1 m (diámetro máximo) (fig. 13).



Fig. 13: Lluvia de meteoros. NASA

El espacio exterior cercano a la Tierra contiene un gran número de objetos sólidos de distintos tamaños. Los más pequeños (partículas de polvo interplanetario de escala micrométrica), son los más abundantes, chocan continuamente con nuestro planeta.

Nuestra vecindad cósmica está repleta de pequeños objetos moviéndose a grandísimas velocidades. La muestra más evidente son los meteoros, conocidos vulgarmente como estrellas fugaces, un fenómeno luminoso producido por la ablación de material extraterrestre al impactar contra la atmósfera a hipervelocidad (entre 40.000 y 260.000 km/h)

Los cometas son conglomerados de gases congelados (principalmente agua, CO y CO₂), rocas y polvo sobrantes de la formación de nuestro sistema planetario. La mayor parte se encuentra en las afueras del sistema solar donde la radiación del Sol no es tan agresiva y el agua puede permanecer en estado sólido. Sin embargo, estos cometas pueden sufrir perturbaciones en su movimiento y ver reducidas sus órbitas acercándose al interior del sistema solar, pasando a denominarse cometas de la familia de Júpiter (o JFC por sus siglas en inglés) y suelen tener periodos orbitales de menos de 20 años. Otros cometas, conocidos como de periodo largo (superior a 200 años), provienen de la Nube de Oort, una estructura de cuerpos helados en el borde exterior del sistema solar que está miles de veces más lejos del Sol que el Cinturón de Edgeworth-Kuiper.

Finalmente, existen cometas procedentes de la región externa de la Nube de Oort que tardan millones de años para completar una sola revolución a nuestra estrella.

Un asteroide o cometa se clasifica como **Objeto Potencialmente Peligroso** (PHO, por sus siglas en inglés: Potentially Hazardous Object) para la Tierra cuando cumple con dos criterios principales:

1. Distancia mínima de intersección orbital con la Tierra (MOID):
 - El objeto tiene una distancia mínima de intersección orbital (MOID) con la Tierra de 0.05 unidades astronómicas (UA) o menos. Esto equivale a aproximadamente 7.5 millones de kilómetros. Esta distancia se considera lo suficientemente cercana como para que exista una posibilidad de colisión en el futuro.
2. Magnitud absoluta (H):
 - El objeto tiene una magnitud absoluta (H) de 22.0 o menos. La magnitud absoluta es una medida del brillo intrínseco del objeto, y un valor de 22.0 o menos indica que el objeto tiene un tamaño lo suficientemente grande como para causar daños significativos si impactara la Tierra. Generalmente, esto corresponde a un diámetro de al menos 140 metros, aunque el tamaño exacto depende del albedo (reflectividad) del objeto.

Importancia de la clasificación

La clasificación de un objeto como PHO no significa que vaya a impactar la Tierra, sino que existe una posibilidad no nula de que lo haga en el futuro. Por ello, estos objetos son monitoreados de cerca por agencias espaciales y observatorios para refinar sus órbitas y evaluar cualquier riesgo potencial. Ejemplos de programas de monitoreo incluyen el Centro de Estudios de Objetos Cercanos a la Tierra (CNEOS) de la NASA y el Sistema de Alerta de Impacto de Asteroides (Sentry).

Ejemplos de PHOs

- Apophis (99942 Apophis): Un asteroide que inicialmente causó preocupación debido a su aproximación cercana a la Tierra en 2029, aunque ahora se sabe que no impactará en el futuro previsible.
- Bennu (101955 Bennu): Un asteroide estudiado por la misión OSIRIS-REx de la NASA, con una pequeña probabilidad de impacto en el siglo XXII.

En resumen, un objeto se clasifica como potencialmente peligroso si está lo suficientemente cerca de la Tierra y es lo suficientemente grande como para causar daños significativos en caso de impacto. Sin embargo, la mayoría de estos objetos no representan una amenaza inmediata.

Por regla general, una familia de asteroides se forma cuando una colisión rompe un cuerpo matriz de gran tamaño en fragmentos menores. Algunas colisiones dejan sobre la superficie del cuerpo mayor cráteres gigantes. Por ejemplo, el hemisferio Sur del asteroide Vesta fue excavado por dos grandes impactos. Otras colisiones son catastróficas, rompiéndose el objeto o los objetos progenitores en numerosos fragmentos. Los fragmentos resultantes se mueven juntos en una agrupación, viajando en la misma órbita alrededor del Sol, pero con el tiempo dichos fragmentos se dispersan. Asteroides de la misma familia suelen tener una composición mineral similar y reflejan cantidades similares de luz (fig. 14).

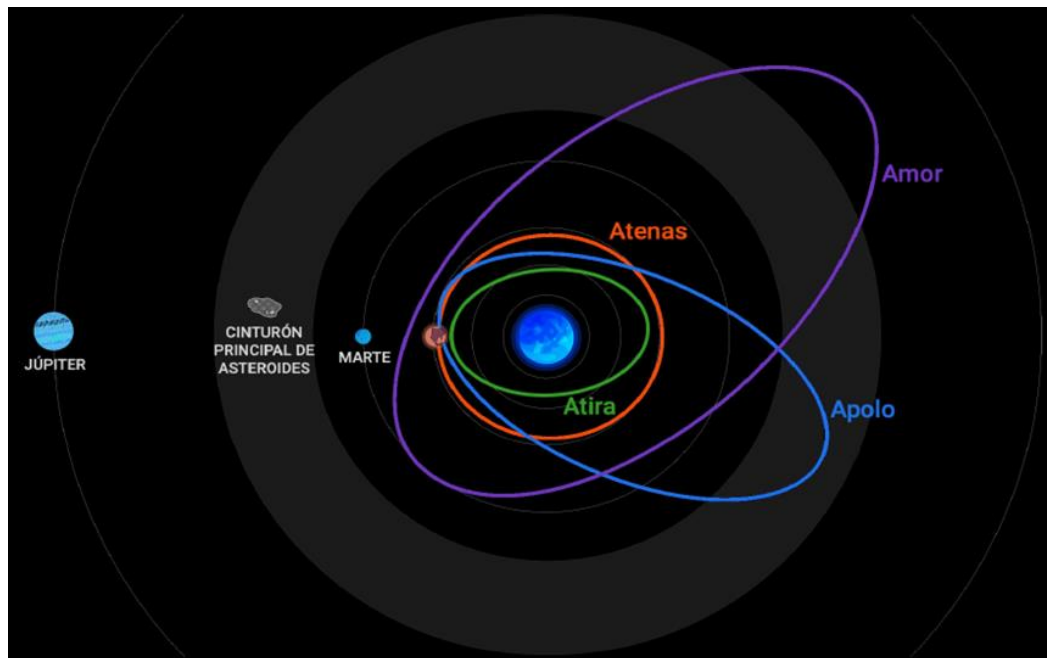


Fig. 14: Órbitas de las familias de asteroides cercanos a la Tierra (NEAs) Figura adaptada de la Sociedad Astronómica de Lahore.

La inmensa mayoría de los NEOs son asteroides y meteoroides. Según se puede apreciar en la figura 15, vivimos en un gran campo de tiro cósmico.

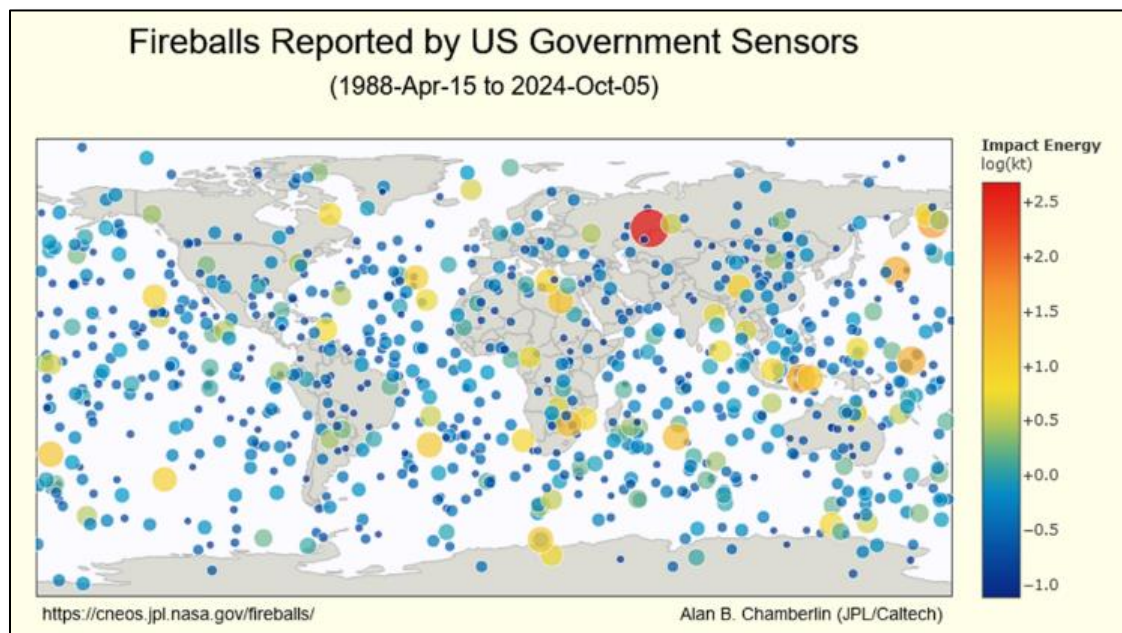


Fig. 15: Bóolidos reportados por los sensores del gobierno de Estados Unidos desde el 15 de abril de 1988 Hasta el 5 de octubre de 2024 (CNEOS)

Es un hecho contrastado que actualmente el interés por los asteroides se ha acrecentado. Y no solo por acontecimientos como el ocurrido el 15 de febrero de 2013 en el centro de Rusia (bólide de Cheliabinsk) o el paso del asteroide 2012 DA14, demostrando la existencia de una posible amenaza por parte de asteroides no identificados hasta la fecha, sino también por el elevado interés comercial que pueden tener los asteroides como fuente potencial de minerales de alto valor (fig. 16).

CRECIENTE INTERÉS DE LAS POTENCIAS MUNDIALES POR EL PELIGRO DE COLISIÓN CON ASTEROIDES

"Las amenazas del espacio: Una revisión de esfuerzos del gobierno de los Estados Unidos para rastrear y mitigar los efectos de colisiones con asteroides y meteoroides Parte 1"

Audición en el Congreso del Comité de la Cámara de Representantes de los Estados Unidos para la Ciencia, el Espacio, y la Tecnología, acontecimiento postChelyabinsk (19 de marzo del 2013)

"El Gobierno concede una alta prioridad al rastreo de asteroides y resguardar nuestro planeta de ellos, evidenciado por el incremento en cinco veces el presupuesto para programa NEOS de la NASA desde 2009. Los Estados Unidos tienen un programa efectivo para descubrir los NEOs más grandes, pero necesitamos mejorar nuestras capacidades para la identificación y la caracterización de NEOs más pequeños."

General William Shelton, Entonces jefe del comando de las Fuerzas Aeroespaciales de los Estados Unidos

John Holdren, Director, de la Oficina para la política de Ciencia y Tecnología, cosejero del expresidente Barack Obama

MARCADO INTERÉS DE RUSIA EN EL MONITOREO DE NEOs

A WIDE FIELD SURVEY OF NEAR-EARTH OBJECTS

V.V.Emel'yanenko⁽¹⁾, S.A.Naroenkov⁽¹⁾, I.S.Savanov⁽¹⁾, M.A.Nalivkin⁽¹⁾, A.S.Shugarov⁽¹⁾, B.M.Shustov⁽¹⁾, and Terebizh V.Y.⁽¹⁾

⁽¹⁾Institute of Astronomy, RAS, 48 Pyatnitskaya, Moscow, 119017, Russia, +7-495-9515461,

Keywords: asteroids, meteoroids, detection, space hazard

ABSTRACT

After the Chelyabinsk event it is evident that not only large asteroids but also ~10 m size meteoroids pose a substantial hazard to the Earth civilization. Although the number of near-Earth objects has been growing rapidly in this century due to special surveys such as Spacewatch, LINEAR, LONEOS, NEAT, Catalina Sky Survey, Pan-STARRS and space-based NEOWISE there are large uncertainties in the population count, physical properties and dynamical characteristics of small asteroids. In particular, recent studies of bolide events indicate that the number of impactors with diameters of ~10 m may be an order of magnitude higher than estimates based on telescopic surveys.

Fig. 16: Interés de las potencias mundiales por el peligro de colisión con asteroides y cometas. Fotomontaje del autor

En 1992 en un informe para la NASA se recomendó la creación de una Guardia Espacial Coordinada, para proporcionar observaciones que permitieran descubrir, verificar y seguir asteroides que cruzan la órbita de la Tierra. En esta búsqueda se esperaba descubrir en un plazo de 25 años el 90% de los objetos con tamaño mayor de un kilómetro (Morrison, 1992).

Tres años más tarde, otro informe para la NASA (Shoemaker et al., 1995) recomendó exploraciones de búsqueda con el objetivo de descubrir entre el 60% y el 70% de los objetos cercanos a la Tierra de corto período y de dimensiones mayores de un kilómetro en diez años, hasta obtener un 90% de completamiento en cinco años más. En 1998, la NASA abrazó formalmente el objetivo de encontrar y catalogar, para 2008, el 90% de todos los objetos cercanos a la Tierra (NEO) con diámetros de 1 km o más grandes que pudieran representar un riesgo de impacto con la Tierra. La dimensión

de 1 kilómetro de diámetro fue elegida después que un considerable estudio indicó que el impacto de un objeto menor de 1 kilómetro podría causar daños locales o regionales importantes, pero era poco probable que pudiera causar una catástrofe mundial. (Morrison 1992).

El impacto de un objeto mayor de 1 kilómetro de diámetro bien podría resultar en daños en todo el planeta, y potencialmente podría incluir, la extinción de la especie humana. El compromiso de la NASA resultó en la financiación de una serie de esfuerzos de búsqueda de NEOs que lograron el objetivo de descubrir al menos el 90% de los NEO de 1 kilómetro o más grandes para 2011 (Mainzer et al., 2011); (Harris & D'Abramo, 2015); (Granvik et al., 2016).

En 2002, cuando se hizo evidente que el objetivo de encontrar el 90% de los objetos cercanos a la Tierra de gran tamaño estaba en buen camino, la NASA contrató un Equipo de Definición Científica (SDT) para estudiar la posibilidad de descubrir los objetos de menos de 1 kilómetro de diámetro que aún representan una amenaza sustancial a la población de la Tierra en caso de impacto.

Este estudio diferencia los NEO de una amplia clase de cuerpos menores, la mayoría con cero probabilidades de impactar la Tierra, y el subconjunto más pequeño (~ 20% de la población NEO) llamados objetos potencialmente peligrosos (PHO) que pueden acercarse mucho a la órbita de la Tierra y, por lo tanto, representan un potencial peligro de impacto. En junio de 2015, la NASA formó de un nuevo equipo de científicos (Equipo de Definición Científica SDT) con estatutos para desarrollar una comprensión más moderna y una actualización de la amenaza planteada por los objetos cercanos a la Tierra de menos de un kilómetro de tamaño y para evaluar métodos que proporcionarían advertencias de posibles impactos.

El equipo recibió instrucciones de aportar hallazgos a la NASA y delinear un enfoque ejecutable para abordar cualquier descubrimiento concreto. En enero de 2016 se crea la Oficina de Coordinación de la Defensa Planetaria. Esta nueva oficina fue establecida por la NASA para coordinar la defensa planetaria se dedica a coordinar esfuerzos entre Estados Unidos y otras agencias internacionales a fin de crear proyectos de dirección y planes de respuesta a peligros de choque con asteroides peligrosos.

La Declaración de Objetivos de la Oficina de Coordinación de Defensa Planetaria incluye conducir esfuerzos nacionales e internacionales para:

- Detectar cualquier potencial de impacto significativo del planeta Tierra por objetos naturales.
- Estimar el alcance de los efectos potenciales por cualquier impacto posible.
- Desarrollar estrategias para mitigar los efectos del impacto en el bienestar humano.

Se trata de la detección y rastreo de objetos naturales – asteroides y cometas – que se acercan dentro de 28 millones de millas de la órbita de Tierra.

La Red Internacional de advertencia sobre Asteroides ha procesado el 98% de nuevas detecciones de NEOs desde 1998.

Comenzó con el compromiso de la NASA con el Comité de la Cámara para la Ciencia en mayo de 1998 a fin de encontrar al menos el 90% de los NEOs de 1 kilómetro y más grandes.

En 2005 se aumentó el alcance de los objetivos con un plan, para desarrollar, e implementar un programa de búsqueda de Objetos Cercanos a la Tierra y para detectar, rastrear, catalogar y caracterizar las propiedades físicas de objetos iguales o mayores de 140 metros de diámetro para evaluar la amenaza sobre el planeta. La meta del programa era rastrear en unos 15 años (para 2020) el 90 % de estos objetos cercanos a la Tierra.

Específicamente, el equipo de 2015 recibió instrucciones de abordar las siguientes preguntas:

1. ¿Cuáles son los objetos más pequeños para los que se debe optimizar la búsqueda?
2. ¿Deberían incluirse los cometas de alguna manera en las búsquedas?
3. ¿Qué es lo técnicamente posible?
4. ¿Cómo se haría la búsqueda ampliada?
5. ¿Cuánto costaría?
6. ¿Cuánto tiempo tomaría la búsqueda?
7. ¿Existe un tamaño de transición por encima del cual se catalogan todos los objetos y por debajo del cual el diseño del sistema simplemente puede dar una advertencia?

El enfoque del estudio fue proporcionar respuestas autorizadas a las preguntas planteadas al equipo, lo que requiere una comprensión de las relaciones entre los costos de implementar un esfuerzo de búsqueda de objetos cercanos a la Tierra más pequeños y los beneficios acumulados.

Por lo tanto, el proceso de estudio se construyó a lo largo de las líneas de un análisis costo / beneficio (fig. 17).

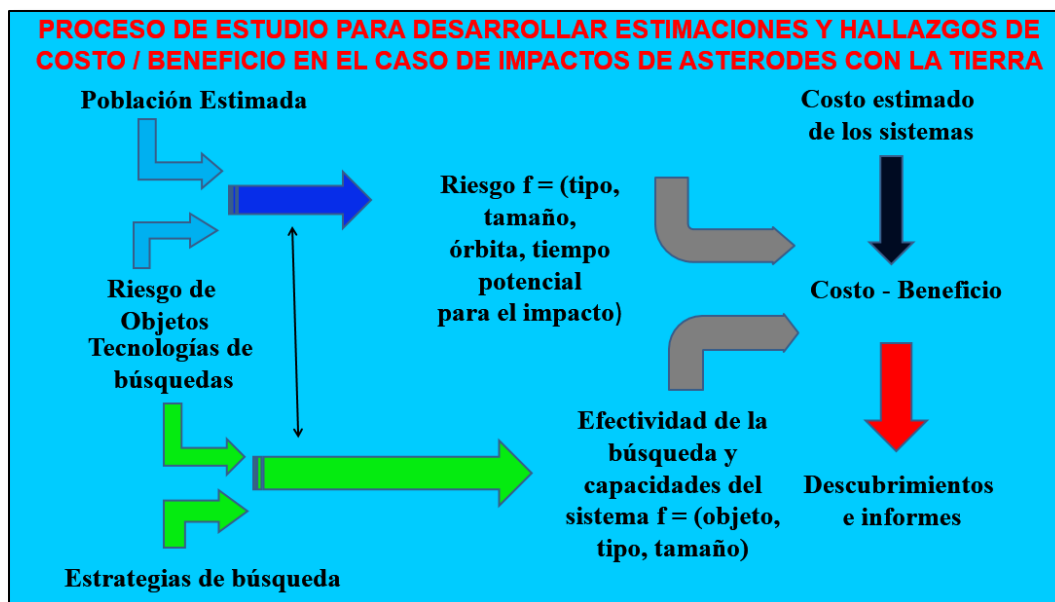


Fig. 17: Estudio del equipo de definición científica para desarrollar estimaciones de costo beneficio sobre el impacto de asteroides y cometas. NASA

Seis áreas se exploraron para producir el análisis de costo / beneficio:

1. **Estimación de la población:** se estimó la población de asteroides en función del tamaño, la distribución orbital, y el albedo, con el objetivo de evaluar la tasa de impacto de los asteroides con la Tierra en función del tamaño y los parámetros orbitales, para proporcionar la base de un estimado de las capacidades de búsqueda en los sistemas potenciales.
2. **Riesgo del objeto:** se cuantificó el daño por impacto asociado con el choque de un asteroide en función del tamaño del impactor, el daño, incluye los efectos tanto del impacto en tierra como en el agua, que se puede combinar con una tasa de impacto para producir un daño esperado por año en función de tamaño del asteroide.
3. **Tecnologías de búsqueda:** se analizaron las capacidades de las posibles tecnologías de búsqueda o combinaciones de tecnologías, para ejecutar los trabajos de búsqueda en función del tamaño, albedo y parámetros orbitales de la población de asteroides. Suponiendo que la advertencia anticipada permita la ocurrencia de una fracción del daño y evite las pérdidas de vidas, representa una estimación o límite superior para el beneficio que puede lograrse a cambio del costo de realizar la propia búsqueda.
4. **Estrategias de búsqueda:** se valoró el método de funcionamiento de un sistema de búsqueda en particular que debe definirse para determinar la efectividad del rastreo. Las capacidades de un sistema de búsqueda para encontrar cualquier población de asteroides dependerán no solo de las capacidades inherentes del sistema, sino también de cómo se emplea con respecto al patrón de escaneo, el tiempo de integración, etc.
5. **Costos del sistema:** se cuantificaron los costos de desarrollar y operar el (los) sistema(s) de búsqueda. Los fondos necesarios para construir y operar el sistema de búsqueda forman el elemento de costo del análisis costo-beneficio.
6. **Beneficios de la búsqueda:** se valoraron y cuantificaron los beneficios, en términos de prevención de impactos la pérdida de vidas y propiedades.

Los seis puntos discutidos anteriormente proporcionaron la información básica necesaria para:

- Estimar el peligro para la Tierra por impactos de asteroides en función del tamaño.
- Estimar el rendimiento y el costo / beneficio de una variedad de sistemas de búsqueda destinados a proporcionar notificación de riesgo inminente.

Estimado de la población

El estimado de la población de asteroides se realiza a partir de modelos que son comparados con las observaciones (fig. 18).

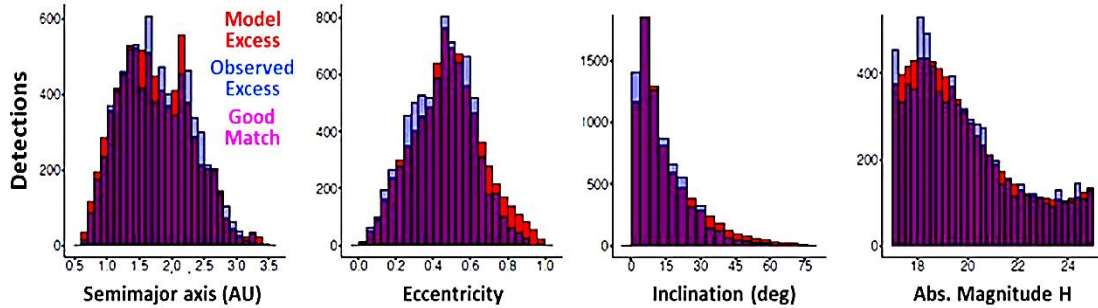


Fig. 18: Comparación entre el Modelo de población NEO Granvik et al. (2016) y el trabajo observacional de Catalina Sky Survey (7952) detecciones de 3.632 NEOs. NASA

Los histogramas rojo y azul muestran desajustes de detección entre el modelo y la observación, mientras que los histogramas violetas muestran coincidencia entre el modelo y los datos.

Este modelo proporciona un ajuste excelente para los NEO con diámetros $\sim 0.1 < D < \text{pocos km}$. Para su mejor ajuste al modelo se encontraron $(7.32 \pm 1.33) \times 10^5$ NEO con $17 < H < 25$ y 1008 ± 45 con $H < 17.75$. Estos valores están razonablemente de acuerdo con las recientes estimaciones independientes de la población de NEO (es decir, 981 ± 19 para la población de NEO con diámetro $D > 1$ km por (Mainzer et al., 2011); ver también (Harris & D'Abramo, 2015) y (Tricarico, 2017).

El modelo Granvik y col. reprodujo las fracciones relativas de los asteroides Amor, Apolo y Aten con $17 \leq H < 17.5$; las fracciones observadas son 47%, 50% y 3%, mientras que el modelo predice $43 \pm 5\%$, $53 \pm 5\%$ y $3.5 \pm 0.6\%$, respectivamente. Los NEOs proceden del cinturón principal de asteroides interior y central; pocos provienen del cinturón principal exterior o de cometas de la familia de Júpiter.

Los cometas de período corto (SPC), definidos como los cometas con períodos de < 200 años, incluyen tanto JFC como las poblaciones de cometas tipo Halley. Se ha demostrado que representan menos del 3% de la amenaza planteada por los NEO a la Tierra.

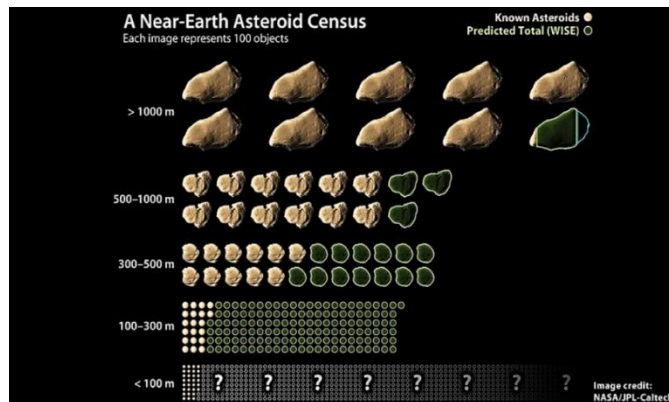


Fig. 19: Censo de asteroides cercanos a la Tierra NASA

La NASA está segura de haber descubierto y catalogado la mayoría los asteroides cercanos a la Tierra bastantes grandes para causar daño global significativo y decidir que no están en cursos de colisión con la Tierra, pero hay todavía una oportunidad para que cometas grandes procedentes del sistema solar exterior, puedan aparecer de forma imprevista y afecten a la Tierra, con advertencia de sólo algunos meses antes del impacto (fig. 19).

Es casi seguro que el número de NEOs se encuentre en el rango de 900 a 1000m, pero no se tiene la certeza de eso. Sin embargo, la fracción que se ha descubierto es cercana al 93% - 94%.

Otros modelos arrojan 955 objetos con $D > 1$ km, y este número es consistente con las estimaciones proporcionadas anteriormente (figuras 20, 21, 22, 23 y 24).

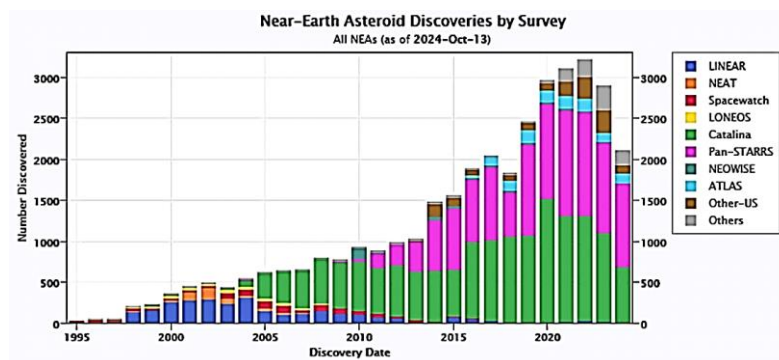


Fig. 20: Número total de NEAs descubiertos al año, por proyecto de búsqueda hasta el 13 de octubre de 2024 CNEOS

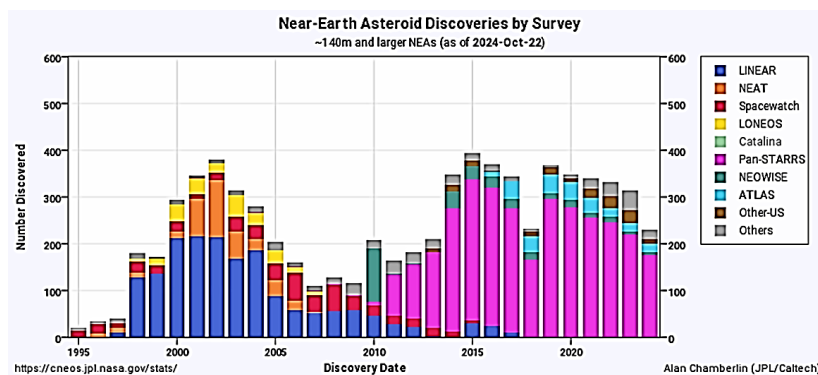


Fig. 21: Número total de NEAs de ~ 140m descubiertos al año, por proyecto de búsqueda hasta el 22 de octubre de 2024 CNEOS

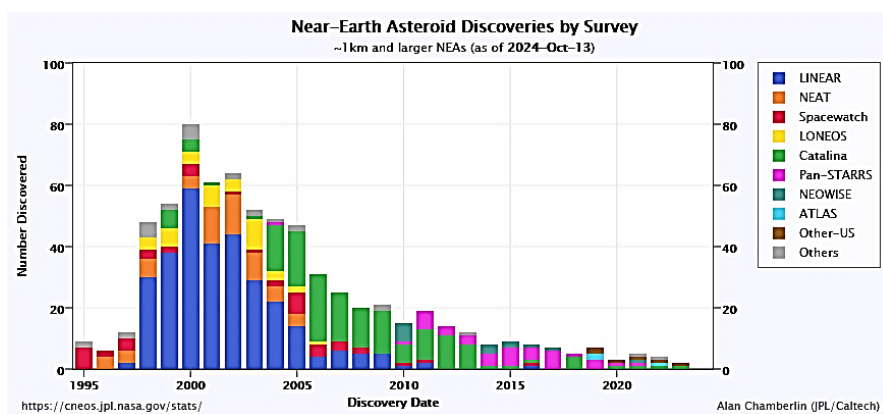


Fig. 22: Número de NEAs de 1km o mayores descubiertos al año, por cada proyecto de búsqueda. CNEOS

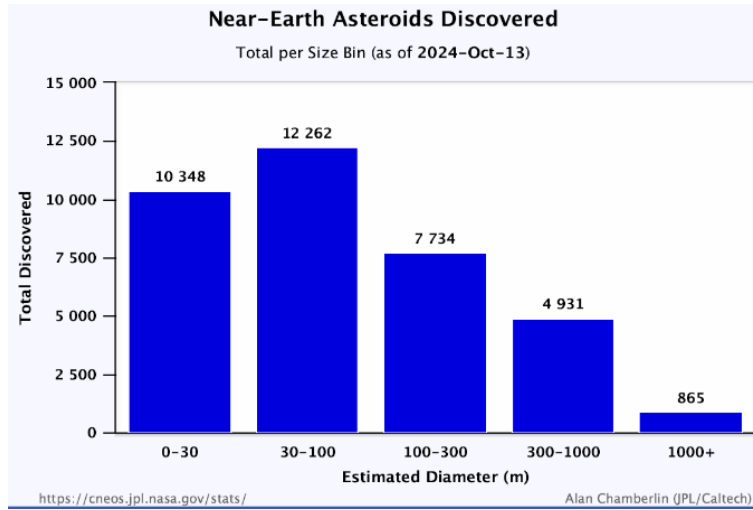


Fig. 23: Número total actual de NEAs conocidos agrupados según sus tamaños estimados hasta el 13 de octubre de 2024. CNEOS

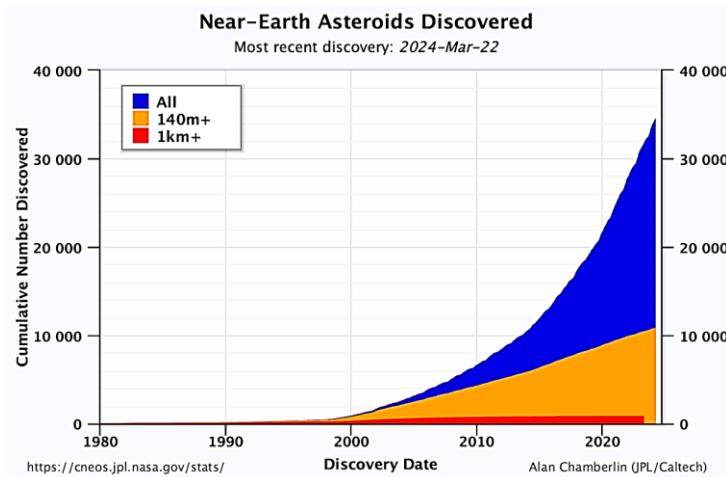


Fig.24: Asteroides cercanos a la Tierra descubiertos hasta el 22 de marzo de 2024 CNEOS

Riesgo de impacto

La frecuencia de impactos de meteoroides en la Tierra varía significativamente en función de su tamaño. Los meteoroides más pequeños son mucho más comunes que los más grandes, y la relación entre el tamaño y la frecuencia de impacto sigue una distribución aproximadamente exponencial. A continuación, se presenta una estimación general de la frecuencia de impactos en función del tamaño (fig. 25):

1. **Micrometeoroides (menos de 1 mm):**
 - **Frecuencia:** Estos impactan la Tierra constantemente, con millones de partículas golpeando la atmósfera cada día.
 - **Efecto:** La mayoría se desintegran en la atmósfera y no alcanzan la superficie.
2. **Meteoroides pequeños (1 mm a 1 cm):**
 - **Frecuencia:** Alrededor de varios miles impactan la atmósfera diariamente.
 - **Efecto:** La mayoría se queman como meteoros (estrellas fugaces) y rara vez llegan a la superficie.
3. **Meteoroides medianos (1 cm a 1 m):**
 - **Frecuencia:** Alrededor de 10 a 100 impactos por año.
 - **Efecto:** Algunos pueden sobrevivir y llegar a la superficie como meteoritos, dependiendo de su composición y velocidad.

4. **Meteoroides grandes (1 m a 10 m):**
 - **Frecuencia:** Alrededor de 1 a 10 impactos por año.
 - **Efecto:** Pueden causar explosiones en la atmósfera (como el evento de Cheliábinsk en 2013) y, en algunos casos, dejar fragmentos en la superficie.
5. **Meteoroides muy grandes (10 m a 100 m):**
 - **Frecuencia:** Alrededor de 1 impacto cada 10 a 100 años.
 - **Efecto:** Pueden causar daños significativos a nivel local, como el evento de Tunguska en 1908.
6. **Meteoroides gigantes (100 m a 1 km):**
 - **Frecuencia:** Alrededor de 1 impacto cada 1,000 a 10,000 años.
 - **Efecto:** Pueden causar destrucción a nivel regional y tener efectos climáticos globales.
7. **Asteroides grandes (más de 1 km):**
 - **Frecuencia:** Alrededor de 1 impacto cada 500,000 a 1 millón de años.
 - **Efecto:** Pueden causar extinciones masivas y cambios climáticos globales, como el impacto que contribuyó a la extinción de los dinosaurios hace 66 millones de años.

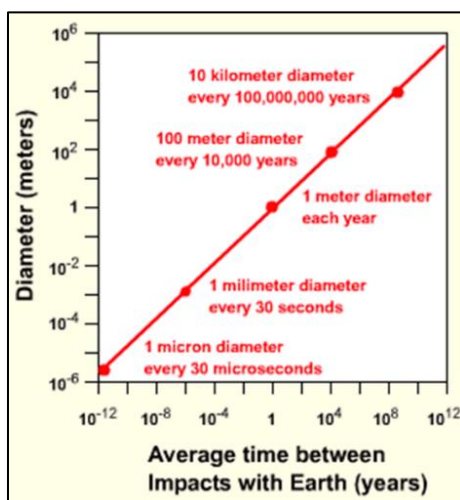


Fig.25: Frecuencia estimada de impactos en función del tamaño del impactor. *Recheard Gate.j*

Estas estimaciones son aproximadas y pueden variar según la fuente y los modelos utilizados. Además, la detección y el seguimiento de objetos cercanos a la Tierra (NEOs, por sus siglas en inglés) han mejorado significativamente en las últimas décadas, lo que permite una mejor comprensión de estos eventos.

Otros estudios para determinar el flujo de grandes meteoroides sobre la Tierra estiman un orden de magnitud del número de impactos mucho mayor que el estimado por las búsquedas de objetos cercanos a la Tierra con telescopios terrestres y de bólidos detectados por satélites impactando la Tierra **«Nuestras relaciones predicen un acontecimiento de 1 MT una vez cada 15 años, Aproximadamente una frecuencia entre 5-10 veces mayor que la que sugieren las búsquedas telescópicas»**. (Silber et al., 2011).

Nuestra habilidad para evaluar los riesgos globales de un impacto de NEO mejora con un mayor nivel de detección y una mejor caracterización de la población total de NEOs (fig. 26).

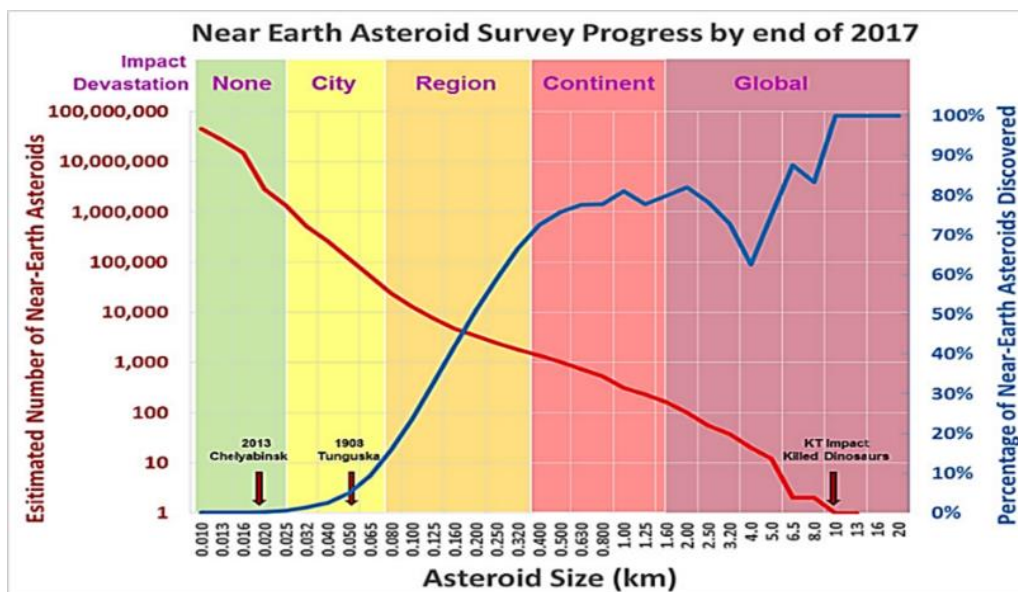


Fig.26: Potencial destructivo de asteroides cercanos a la Tierra NASA

Sin embargo, existe consenso entre los expertos de que las capacidades actuales basadas en la observación telescópica solo son suficientes para localizar menos de la mitad de todos los objetos de 140 metros para 2033, y las mejoras planificadas en los sistemas de búsqueda todavía se quedarán cortas.

3. Conclusiones

Las técnicas y métodos actuales para la búsqueda e identificación de meteoroides antes de su impacto con la Tierra han avanzado significativamente, pero aún existen desafíos importantes. A continuación, se presentan algunas conclusiones clave:

1. Avances en la Detección y Monitoreo:

- **Telescopios y Observatorios:** Se han desarrollado telescopios especializados y observatorios dedicados a la búsqueda de objetos cercanos a la Tierra (NEOs). Programas como el Catalina Sky Survey, Pan-STARRS y el Near-Earth Object Wide-field Infrared Survey Explorer (NEOWISE) han aumentado la capacidad de detección.
- **Tecnología de Imágenes:** El uso de cámaras de alta resolución y sensores infrarrojos ha mejorado la capacidad para detectar meteoroides más pequeños y menos reflectantes.

2. Colaboración Internacional:

- **Redes de Observación:** Existen redes globales de observatorios que colaboran para rastrear y caracterizar NEOs. Organizaciones como la International Astronomical Union (IAU) y la NASA coordinan esfuerzos para compartir datos y mejorar la precisión de las órbitas calculadas.
- **Bases de Datos Compartidas:** Plataformas como el Minor Planet Center (MPC) recopilan y distribuyen datos sobre NEOs, facilitando la investigación y el seguimiento continuo.

3. Técnicas de Predicción y Modelado:

- **Cálculos Orbitales:** Los avances en software y algoritmos permiten calcular con mayor precisión las órbitas de los meteoroides y predecir posibles impactos.
- **Simulaciones y Modelos:** Se utilizan simulaciones por computadora para modelar el comportamiento de los meteoroides en la atmósfera y predecir los efectos de un impacto.

4. Limitaciones y Desafíos:

- **Detección de Objetos Pequeños:** Aunque se han mejorado las técnicas, los meteoroides más pequeños (menos de 10 metros) siguen siendo difíciles de detectar con anticipación.

- **Tiempo de Advertencia:** Para objetos más grandes, el tiempo de advertencia puede variar desde días hasta años, dependiendo de su tamaño y órbita. Para objetos más pequeños, el tiempo de advertencia puede ser mínimo o nulo.
- **Falsos Positivos y Negativos:** La identificación precisa de objetos potencialmente peligrosos sigue siendo un desafío, con riesgos de falsos positivos y negativos.

5. Preparación y Mitigación:

- **Estrategias de Defensa Planetaria:** Se están desarrollando y probando estrategias para desviar o destruir objetos que representen una amenaza significativa. Misiones como la Prueba de Redirección de Doble Asteroide (DART) de la NASA son ejemplos de estos esfuerzos.
- **Educación y Concienciación:** Aumentar la conciencia pública y la educación sobre los riesgos de impactos de meteoroides es crucial para la preparación y respuesta efectiva.

6. Futuras Mejoras:

- **Tecnología Emergente:** El desarrollo de nuevos telescopios espaciales y terrestres, así como la aplicación de inteligencia artificial y machine learning, prometen mejorar aún más la detección y caracterización de NEOs.
- **Misiones Espaciales:** Misiones dedicadas a estudiar asteroides y cometas cercanos proporcionarán datos valiosos para mejorar los modelos de predicción y las estrategias de mitigación.

En resumen, aunque se han logrado avances significativos en la detección y caracterización de meteoroides, aún existen desafíos importantes que requieren investigación continua, desarrollo tecnológico y colaboración internacional. La preparación y la mitigación de impactos potenciales siguen siendo áreas críticas para la defensa planetaria.

Referencias:

- Chapman, C. R., & Morrison, D. (1994). Impacts on the Earth by asteroids and comets: Assessing the hazard. *Nature*, 367(6458), 33-40. <https://doi.org/10.1038/367033a0>
- Chesley, S. R. (2005). Potential impact detection for Near-Earth asteroids: The case of 99942 Apophis (2004 MN4). *Proceedings of the International Astronomical Union*, 1(S229), 215-228. <https://doi.org/10.1017/S1743921305006769>
- Granvik, M., Morbidelli, A., Jedicke, R., Bolin, B., Bottke, W. F., Beshore, E., Vokrouhlický, D., Delbò, M., & Michel, P. (2016). Super-catastrophic disruption of asteroids at small perihelion distances. *Nature*, 530(7590), 303-306. <https://doi.org/10.1038/nature16934>
- Harris, A. W., & D'Abramo, G. (2015). The population of near-Earth asteroids. *Icarus*, 257, 302-312. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.05.004>
- Mainzer, A., Grav, T., Bauer, J., Masiero, J., McMillan, R. S., Cutri, R. M., Walker, R., Wright, E., Eisenhardt, P., Tholen, D. J., Spahr, T., Jedicke, R., Denneau, L., DeBaun, E., Elsbury, D., Gautier, T., Gomillion, S., Hand, E., Mo, W., ... Wasserman, L. H. (2011). NEOWISE OBSERVATIONS OF NEAR-EARTH OBJECTS: PRELIMINARY RESULTS. *The Astrophysical Journal*, 743(2), 156. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/743/2/156>
- Morrison, D. (1992, enero 25). *The Spaceguard survey: Report of the NASA international near-Earth-object detection workshop* [NTRS - NASA Technical Reports Server]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19920025001>. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19920025001/downloads/19920025001.pdf>
- Popova, O., Borovička, J., Hartmann, W. K., Spurný, P., Gnos, E., Nemtchinov, I., & Trigo-Rodríguez, J. M. (2011). Very low strengths of interplanetary meteoroids and small asteroids. *Meteoritics & Planetary Science*, 46(10), 1525-1550. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2011.01247.x>
- Rumpf, C. M. (2019). Asteroid Impact Risk Assessment: Rationalizing the Threat. En N. Schmidt (Ed.), *Planetary Defense* (pp. 181-203). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01000-3_12
- Shoemaker, E. M., Levy, D. H., & Shoemaker, C. S. (1995). Comet Shoemaker-Levy 9 Meets Jupiter. *Scientific American*, 273(2), 84-91. JSTOR. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0895-84>
- Silber, E. A., Le Pichon, A., & Brown, P. G. (2011). Infrasonic detection of a near-Earth object impact over Indonesia on 8 October 2009: THE INDONESIAN BOLIDE. *Geophysical Research Letters*, 38(12), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2011GL047633>
- Tricarico, P. (2017). The near-Earth asteroid population from two decades of observations. *Icarus*, 284, 416-423. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.12.008>

Acerca del autor:

MSc. Francisco González Veitúa: Licenciado en Educación especialidad de Física y Astronomía, Master en Ciencias en la Universidad Pedagógica Enrique José Varona. Especialista del Departamento de Astronomía del Instituto de Geofísica y Astronomía (IGA) y Especialista del Planetario de la Habana. Profesor del curso internacional de Astronomía NASE-IAU y Profesor entrenador para las Olimpiadas internacionales de Astronomía, trabaja como redactor de la Revista Datos Astronómicos para Cuba (Revista Cubana de Astronomía). ORCID 0009-0003-0500-6532.