

Análisis automático de bólidos productores de meteoritos y reentradas atmosféricas.

Nuevo software de la Red de Investigación sobre Bólidos y Meteoritos (SPMN)

Eloy Peña-Asensio, Josep M. Trigo-Rodríguez y Albert Rimola

Nuevas técnicas de procesamiento de vídeo y cálculo de trayectorias permiten la automatización del análisis de meteoros, bolas de fuego, bólidos y reentradas atmosféricas captadas en todo el territorio español por la Red de Investigación sobre Bólidos y Meteoritos.

El flujo incesante de nuevo material proveniente del espacio nos brinda una oportunidad única para estudiar nuestros orígenes cosmogónicos. Gracias a la proliferación de las redes de detección de meteoros y el análisis automático de trayectorias, es posible preparar campañas de búsqueda de meteoritos recién caídos. En este sentido, presentamos el nuevo software de análisis de bólidos y reentradas de la Red de Investigación sobre Bólidos y Meteoritos, operativa desde hace más de 25 años.

Explicando racionalmente el fenómeno meteórico

El espacio interplanetario, lejos de encontrarse vacío, posee una gran diversidad de objetos con un rango de tamaños que varía desde escalas micrométricas hasta megamétricas. La gran mayoría se clasifican como cuerpos pequeños del Sistema Solar: *meteoroides*, si su tamaño oscila desde 30 micras hasta un metro; *asteroides*, si son cuerpos rocosos, metal-rocosos o metálicos de un diámetro máximo de 1.000 km; o bien *cometas*, si son agregados porosos formados por pequeñas partículas minerales, hielos y materia orgánica en proporciones variables [1]. Algunos de estos objetos tienen una importancia científica incalculable desde el punto de vista cosmoquímico, ya que han preservado una composición esencialmente inalterada desde su acreción en el disco protoplanetario formado hace 4.600 millones de años alrededor del Sol.

Los asteroides y cometas están expuestos a fenómenos de disrupción por colisión con otros objetos, pero también por efecto de marea o sublimación debido a encuentros cercanos con nuestra estrella. En estos procesos de fragmentación se producen una gran cantidad de cuerpos, siendo los más abundantes, a excepción de las partículas de polvo, aquellos en el rango de tamaño de los meteoroides. Estos fragmentos pueden sufrir perturbaciones orbitales debido a encuentros cercanos con planetas [2] y otros fenómenos no gravitacionales como la presión de radiación solar o efectos térmicos complejos vinculados con el balance día/noche de radiación e irradiación de la

energía procedente del Sol [3]. Estos procesos modifican las órbitas de los meteoroides llegando, eventualmente, a intersectar la trayectoria de la Tierra. Al impactar contra la atmósfera a hipervelocidad (entre 11,2 km/s y 72,6 km/s), y como consecuencia de la fricción contra los componentes atmosféricos, estas rocas sufren la denominada *ablación*, la cual evapora y pulveriza sus capas exteriores progresivamente. A causa de las energéticas colisiones con las partículas del aire, se forma una columna de ablación compuesta por gases ionizados. Esta traza luminosa es conocida como *meteoro* o, vulgarmente, *estrella fugaz* [4, 5]. Cuando estos eventos son especialmente brillantes y sobrepasan la magnitud del planeta Venus se les denomina *bolas de fuego* o *bólidos*, o, si poseen una magnitud aparente igual o superior a -17 siendo detectables desde el espacio, *superbólidos*. En ocasiones, los bólidos con altas velocidades provocan reacciones quimio-luminiscentes que producen una estela persistente observable tras varios minutos [6]. Aunque depende mucho de la geometría de la trayectoria, la mayoría de estos cuerpos suelen perder más del 95 % de su masa inicial durante el vuelo atmosférico. Sin embargo, como consecuencia de la continua fragmentación del meteoroides, algunas de las rocas desprendidas pierden suficiente velocidad y sobreviven al proceso de ablación para alcanzar finalmente la superficie terrestre, convirtiéndose entonces en *meteoritos*. La recuperación de estas rocas, auténticos fósiles del Sistema Solar, resulta de altísimo valor para la comunidad científica, ya que nos ofrecen la oportunidad de estudiar el pasado de la Tierra y comprender mejor nuestro universo a escala local.

Los procesos que acontecen durante la deceleración hidrodinámica en la atmósfera nos ofrecen información sobre la capacidad destructiva de estos cuerpos prístinos [7]. Además, el análisis de grandes bólidos permite cuantificar las propiedades físicas de rocas de tamaño métrico que llegan a la Tierra. Este flujo de material entrante representa la mayor fuente de peligro a corto plazo: pequeños asteroides o restos de cometas extintos nos exponen a un



Fig. 1. Estaciones de detección operativas de la red SPMN.

riesgo significativo, no tanto por su capacidad de impacto como por las ondas de choque que pueden generar durante el frenado atmosférico, como ocurrió en 2013 en Cheliábinsk, con más de 1.600 personas heridas [8]. Resulta entonces crucial para la evaluación de posibles riesgos comprender la dinámica y las fuentes de origen de estos proyectiles, así como el estudio de su composición, densidad, consistencia y estructura con el fin de diseñar estrategias de deflexión de objetos potencialmente peligrosos [7]. Estos análisis cobran mayor relevancia si cabe con las misiones espaciales DART y HERA, en las que participamos activamente, gracias a las cuales se realizará el primer ensayo *in situ* de redireccionamiento de un asteroide binario y se medirán los cambios en las propiedades geofísicas y dinámicas tras el impacto.

Redes de observación de meteoros y grandes bólidos

Los primeros registros de caídas de meteoritos datan del año 861, en Nogata (Japón). Incluso durante la Ilustración, era difícil asimilar que algunas rocas pudieran provenir del cielo o que repentinamente se iluminase una noche oscura, permaneciendo cierta áurea mística entorno al fenómeno meteórico. El origen extraterrestre de estos eventos comenzó a aceptarse tras el estudio de algunos sucesos bien documentados a principios del siglo XIX. Con el avance de la tecnología se empezaron a establecer las primeras redes de detección de meteoros con el fin de captar y dar una explicación racional a estos sucesos. Actualmente se han desplegado estas redes a lo largo y ancho de todo el mundo (DFN, FFN, FRIPON, PRISMA, GFO...). En España, la Red de Investigación de Bólidos y Meteoritos (SPMN)¹ opera desde hace más de 25 años registrando

eventos meteóricos y reentradas atmosféricas sobre la península ibérica, Marruecos y el territorio insular [9]. Se trata de un proyecto pro-am² en el que participa un equipo científico diverso especializado en áreas como la astronomía, geología, geofísica y química. Nuestro objetivo principal es la identificación de bólidos productores de meteoritos, potenciando la recuperación, estudio y preservación de las caídas de meteoritos con el fin último de comprender mejor nuestro origen cosmológico. Entre los éxitos más destacados de la red se encuentra la recuperación en 2004 de la condrita ordinaria L6 Villalbeto de la Peña en Palencia y la eucrita Puerto Lápice en 2007. Este primer logro en 2004 supuso la primera recuperación y caracterización de un meteorito en 57 años en España y la novena órbita de un meteorito en todo el mundo [10].

La obtención de la trayectoria de los meteoroides que impactan contra la atmósfera terrestre es crucial tanto para la recuperación de posibles meteoritos como para estudiar su procedencia en el Sistema Solar. Las órbitas heliocéntricas de algunas de estas rocas pueden asociarse dinámicamente a sus cuerpos progenitores, bien sean asteroides, cometas o algún enjambre de meteoroides [11]. Precisamente aquí radica la importancia de monitorizar el firmamento de manera constante y exhaustiva: por un lado, se puede estimar el flujo de meteoroides que cruza el volumen atmosférico subtendido por las cámaras y, por otra parte, es posible inferir el origen y el final de estos meteoroides. Actualmente la red SPMN cuenta con 34 estaciones equipadas con cámaras de cielo entero y lentes de gran angular, así como instrumentos de radiodetección mediante la técnica de *forward-scatter* y cámaras adaptadas con espectrómetros para analizar la composición y abundancias químicas de los meteoroides, incluso cuando no sobreviven meteoritos (Fig. 1) [5].

Procedimientos analíticos para el estudio de bolas de fuego

La proliferación de nuevas estaciones de detección en la red SPMN ha incrementado la cantidad de datos registrados, forzando la necesidad de automatizar el proceso de análisis. A este respecto, hemos desarrollado el *software* 3D-FireTOC, un código escrito en Python que automatiza la detección de meteoros mediante todo tipo de sensores, permitiendo la reconstrucción de las trayectorias luminosas, la determinación del radiante y la velocidad de entrada, la estimación de la masa terminal y el cálculo de órbitas heliocéntricas a partir de grabaciones [12].

¹ <http://www.spmn.uji.es/>

² Proyectos científicos en los cuales colaboran profesionales y *amateurs*.

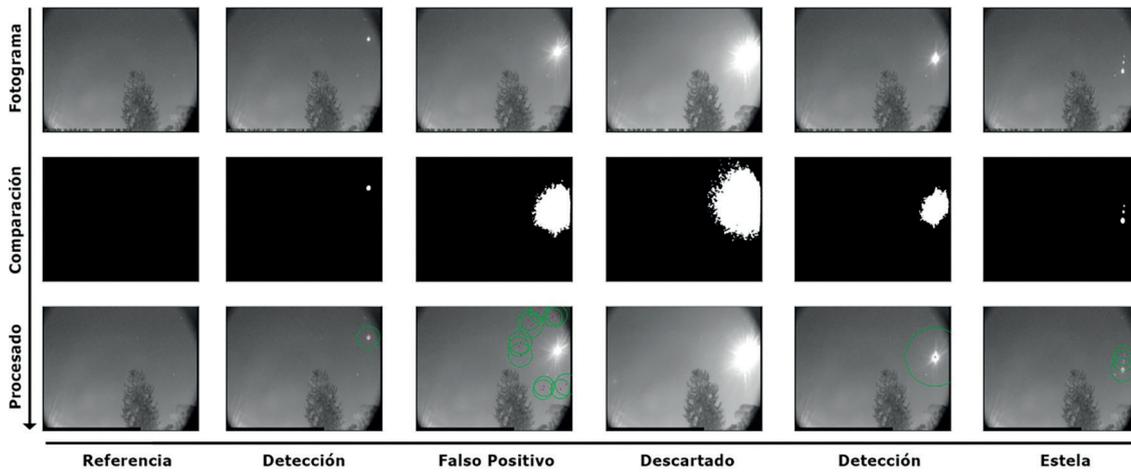


Fig. 2. Detección y procesamiento del bólido SPMN300319B, detectado desde el Observatorio Astronómico Ramón María Aller (USC).

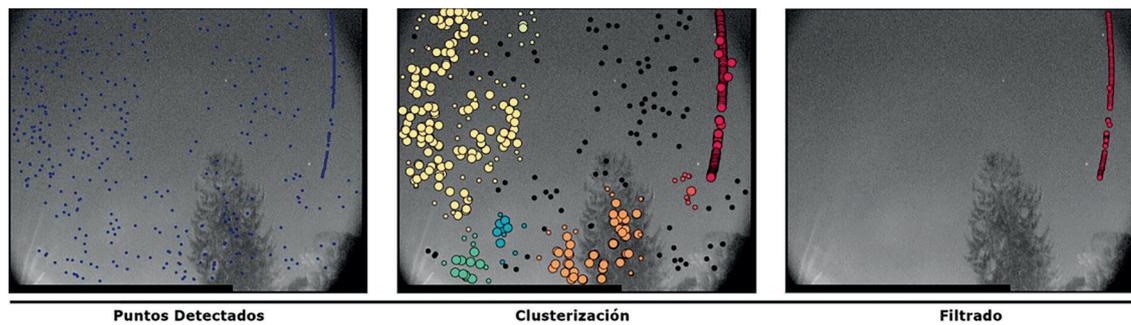


Fig. 3. Método para evitar falsos positivos utilizando algoritmos de agrupamiento o clusterización.

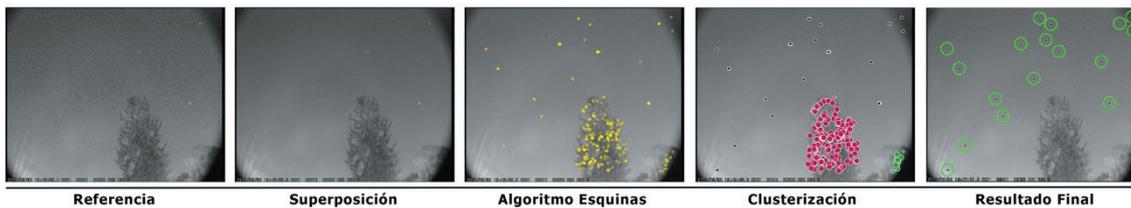


Fig. 4. Proceso de identificación de estrellas.

Como hemos mencionado, un paso clave para lograr este objetivo es el desarrollo de una astrometría precisa y automatizada que asegure la medida de los meteoros que aparecen en el campo visual de los sistemas de videodetección. Para ello, utilizamos técnicas de visión artificial para obtener las coordenadas de los píxeles correspondientes al meteorito en movimiento en cada fotograma. Cada imagen es procesada y comparada con una de referencia (sin detección) permitiendo extraer los píxeles que han sido activados por el meteorito. De esta manera, el centroide del área de píxeles detectada corresponde a la posición en la imagen del meteorito.

La Figura 2 muestra una selección de fotogramas del evento SPMN300319B, donde las detecciones aparecen en orden cronológico de izquierda a derecha y el procesamiento de arriba abajo. El primer fotograma mostrado precede a la aparición del meteorito. Los siguientes fotogramas muestran la detección del meteorito, un falso positivo debido al resplandor, un fotograma rechazado cuando el brillo satura la imagen, otra detección del meteorito y la detección de la estela.

Debido a la naturaleza cambiante de este tipo de grabaciones, los posibles reflejos de luz y obstáculos en el campo visual, hemos implementado tres métodos para evitar falsos positivos: 1) discriminando por el tamaño del área detectada excluyendo los contornos excesivamente pequeños y grandes, 2) prediciendo el área de avance del meteorito con un filtro Kalman, y 3) postprocesando los puntos detectados y aplicando algoritmos de agrupamiento para comprobar si la trayectoria es consistente con una línea más o menos recta (Fig. 3).

Para transformar los píxeles en coordenadas reales es necesario identificar estrellas en la imagen con el fin de obtener su posición en el cielo para la fecha del evento. Para ello hacemos uso de algoritmos de detección de esquina, dado que las estrellas aparecen distribuidas de manera aleatoria en el cielo y alejadas entre sí. Nuevamente hacemos uso de algoritmos de agrupamiento, pero, esta vez, para conservar los puntos identificados como ruido (Fig. 4).

Una vez identificadas las estrellas, gracias a las efemérides del *JPL's Horizons*, podemos mo-

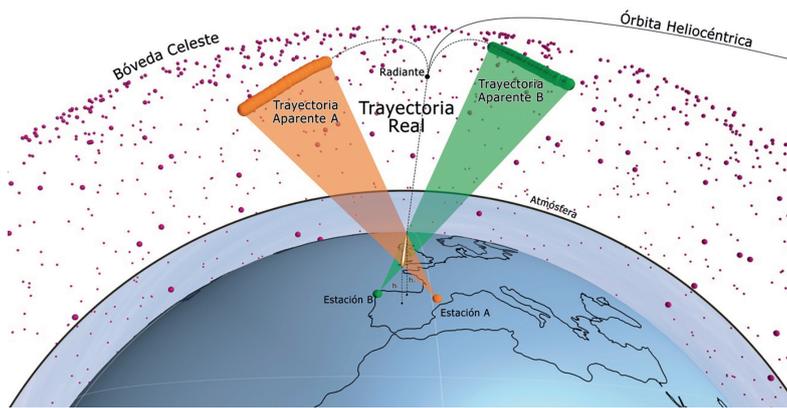
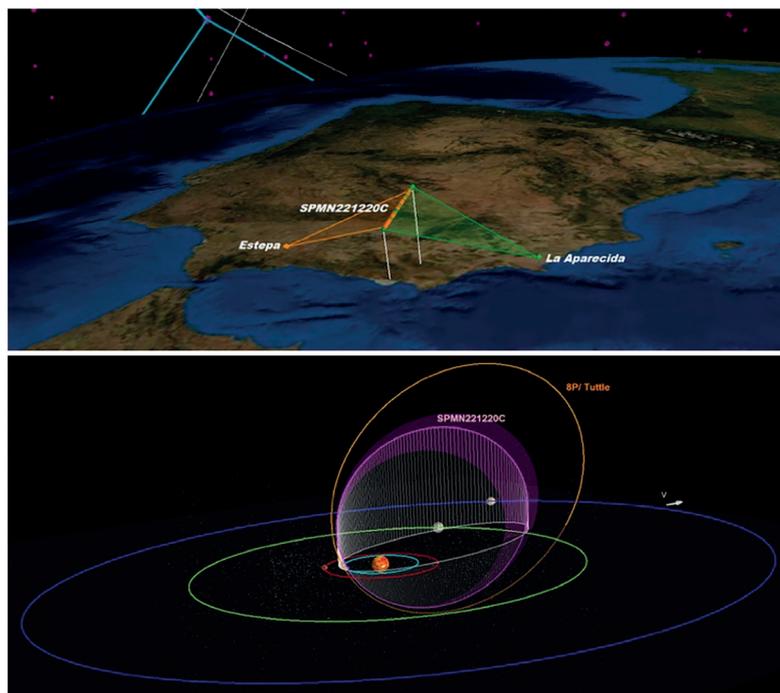


Fig. 5. Representación gráfica de la reconstrucción de trayectorias de meteoros por medio del método de intersección de planos.

delizar la deformación producida por la lente encontrando la correspondencia entre píxel y posición real.

El resultado que obtenemos de cada observación es una trayectoria aparente proyectada sobre la bóveda celeste. Como es natural, para realizar cálculos estereoscópicos (Fig. 5), se requiere de dos o más registros del meteoro suficientemente separados entre sí (>20 km) que permitan triangular la posición real del meteoróide. Gracias a que estos fragmentos llegan a la Tierra a velocidades hipersónicas, la resistencia del aire prácticamente no curva sus trayectorias, por lo que se pueden aproximar a una línea recta. Esto permite aplicar el método de intersección de planos para reconstruir el vuelo atmosférico [13]. En ocasiones, algunos meteoroides impactan contra la atmósfera prácticamente paralelos al horizonte local, presentando fases luminosas de larga duración. Estos eventos se denominan rozadores, y algunos, incluso, regresan al espacio después de atravesar la atmósfera y solidificar su corteza de fusión, ya que el proceso de ablación que experimentan no

Fig. 6. Reconstrucción de la trayectoria atmosférica y órbita heliocéntrica del evento SPM-N221220C, asociado al cometa 8P/Tuttle.



es excesivamente pronunciado. Típicamente estos cuerpos poseen trayectorias ligeramente curvadas, siendo necesario incluir movimientos keplerianos para estudiarlos con precisión. Finalmente, la trayectoria atmosférica se proyecta en el sentido contrario de avance hasta su intersección con la esfera celeste para obtener el radiante, es decir, la posición de procedencia en el cielo, tal y como muestra la Fig. 5.

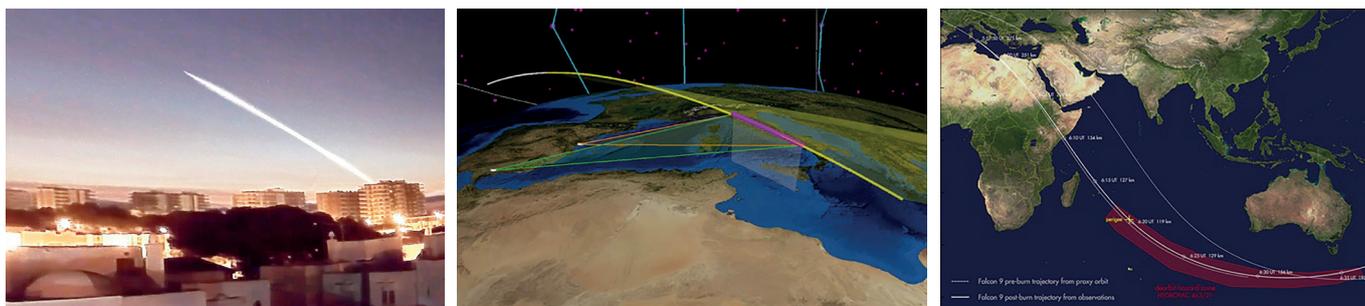
Tras corregir la influencia de la atracción gravitatoria de la Tierra sobre el meteoróide, lo que se conoce como *atracción cenital*, y teniendo en cuenta el efecto de rotación de la Tierra, conocido como *aberración diurna*, se puede calcular la órbita heliocéntrica del objeto. De este modo es posible determinar si el meteoróide está asociado a alguna lluvia de meteoros o si procede del cinturón de asteroides o, incluso, de la Luna u otro planeta fruto de algún gran impacto.

De manera análoga, se puede estimar la posible área de caída teniendo en cuenta el perfil de vientos y calculando el coeficiente balístico (que determina cuán profundo puede penetrar en la atmósfera) y el parámetro de pérdida de masa (que relaciona la energía cinética y la eficiencia térmica de la ablación). Este análisis permite aplicar el llamado *criterio α - β* aproximando las posibilidades de que el evento haya producido meteoritos [14]. Normalmente, los superbólidos con ángulos de vuelo casi horizontales, bajas velocidades y fases luminosas que perduren hasta 20 km de altura son candidatos a generar meteoritos. Un buen ejemplo fue el bólido de Cheliábinsk, del que se pudo recuperar 640 kg de material [8].

En la Figura 6 se puede observar un ejemplo de aplicación del *software* 3D-FireTOC, en concreto, el análisis del bólido SPMN221220C, que sobrevoló Andalucía en diciembre de 2020 [15]. Este evento meteorítico no produjo meteoritos y el estudio preciso de su trayectoria, radiante y órbita permitió asociarlo al complejo de las Úrsidas, un enjambre de meteoroides originado por el cometa 8P/Tuttle.

Uno de los objetivos de nuestro proyecto a corto plazo es desarrollar una base de datos de grandes bólidos registrados por la red SPMN a lo largo de las últimas décadas. De esta manera, podremos asociarlos con sus cuerpos progenitores, identificar posibles zonas de caída que puedan explicar futuros hallazgos inesperados, cuantificar el flujo de meteoroides de tamaño métrico que suponen un riesgo y clasificar enjambres de meteoroides potencialmente peligrosos.

Fruto del avance de la exploración espacial, las redes de detección de meteoros cada vez están más expuestas a eventos luminosos celestes de origen artificial, aquellos producidos por las llamadas reentradas atmosféricas. A este respecto, hemos desarrollado una extensión del *software* para reconstruir trayectorias de bólidos producidos por



reentradas de fases de cohete, desintegración de basura espacial en la atmósfera o reflejos de luz solar sobre satélites [16]. Este hito representa la primera adaptación de una red de detección de meteoros con el fin de registrar y analizar bólidos artificiales. Los eventos de este tipo serán cada vez más comunes y nuestros resultados ejemplifican cómo las estaciones de detección de meteoros podrán desempeñar un papel importante en la monitorización de objetos artificiales en el firmamento. El 16 de febrero de 2021 varias estaciones de la red SPMN captaron la reentrada de la etapa superior del cohete *Falcon 9*, pudiendo obtener su trayectoria y estimando la zona de desintegración. Recientemente también hemos captado, identificado en menos de una hora y reconstruido la trayectoria del bólido SPMN230122ART, que sobrevoló toda la península española fruto de la reentrada del satélite Starlink 2200 (NORAD #47414).

Conclusiones

Con la implementación de este nuevo *software* (3D-FireTOC), la Red de Investigación de Bólidos y Meteoritos (SPMN) aumenta su capacidad para generar rápidamente nuevo conocimiento sobre los peligros asociados a los grandes meteoroides, sus propiedades y su asociación dinámica con cometas, asteroides o, incluso, cuerpos planetarios. Asimismo, la red SPMN incorpora una nueva herramienta para reconstruir reentradas de objetos artificiales estimando su posible área de impacto. Además, la automatización del proceso de detección y análisis de meteoros mediante técnicas innovadoras permite la preparación inmediata de campañas de búsqueda de meteoritos.

Paradójicamente, la observación de estrellas fugaces nos ofrece una experiencia conmovedora, casi mágica y, al mismo tiempo, es fuente del más riguroso y valioso conocimiento científico. Por ello, permaneceremos expectantes ante la llegada de nuevas reliquias del espacio que nos envíe azarosamente el cosmos con el fin último de desvelar nuestros orígenes primigenios.

Agradecimientos

La Red de Investigación sobre Bólidos y Meteoritos viene siendo coordinada y financiada a través de una serie de proyectos de investigación de JMTR. El actual proyecto en curso es el PGC2018-

097374-B-I00 (PI: JMT-R), financiado por fondos FEDER y el Ministerio de Ciencia e Innovación y la Agencia Española de Investigación. EPA y AR agradecen la ayuda por parte del European Research Council (ERC) para desarrollar el proyecto QUANTUMGRAIN (865657).

Bibliografía

- [1] J. M. TRIGO-RODRÍGUEZ, *Meteoritos*, Colección *¿Qué sabemos de...?* (CSIC, Los Libros de la Catarata, Madrid, 2012).
- [2] A. PAULS y B. GLADMAN, "Decoherence Time Scales for 'Meteoroid Streams'", *Meteorit. Planet. Sci.* 40(8), 1241-1256 (2005).
- [3] M. BROŽ, *Yarkovsky Effect and the Dynamics of the Solar System* (Ph. D. Thesis, 2006).
- [4] Z. CEPLECHA, J. BOROVÍČKA, W.G. ELFFORD, D. O. REVELLE, R.L. HAWKES, V. PORUBČAN y M. ŠIMEK, "Meteor Phenomena and Bodies", *Space Sci. Rev.* 84(3), 327-471 (1998).
- [5] J. M. TRIGO-RODRÍGUEZ, "The Flux of Meteoroids over Time: Meteor Emission Spectroscopy and the Delivery of Volatiles and Chondritic Materials to Earth", en *Hypersonic Meteoroid Entry Physics*, G. COLONNA, M. CAPITELLI, A. LARICCHIUTA A. (eds.) (Institute of Physics Publishing, IOP Series in Plasma Physics, 4-1/4-23, 2019).
- [6] J. M. TRIGO-RODRÍGUEZ, "Asteroid Impact Hazard", (Springer-Verlag, 2022 [en imprenta]).
- [7] M. MORENO-IBÁÑEZ, M. GRITSEVICH, J. M. TRIGO-RODRÍGUEZ y E. A. SILBER, "Physically Based Alternative to the PE Criterion for Meteoroids", *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 494, 316-324 (2020).
- [8] P. G. BROWN *et al.*, "A 500-Kiloton Airburst over Chelyabinsk and an Enhanced Hazard from Small Impactors", *Nature* 503, 238-241 (2013).
- [9] J. M. TRIGO-RODRÍGUEZ, A. J. CASTRO-TIRADO, J. LLORCA, J. FABREGAT, V.J. MARTÍNEZ, V. REGLERO, M. JELÍNEK, P. KUBÁNEK, T. MATEO y A. de UGARTE POSTIGO, "The Development of the Spanish Fireball Network Using a New All-sky CCD System", en *Modern Meteor Science an Interdisciplinary View*, R. HAWKES, I. MANN, P. BROWN (eds) (Springer, Dordrecht, pág. 553-567, 2005).
- [10] J. M. TRIGO-RODRÍGUEZ, J. BOROVICKA, P. SPURNY, J. L. ORTIZ, J. A. DOCOBO, A. J. CASTRO-TIRADO y J. LLORCA, "The Villalbeto de la Peña Meteorite Fall: II. Determination of Atmospheric Trajectory and Orbit", *Meteorit. Planet. Sci.* 41, 505-517 (2006).

Fig. 7. Registro y reconstrucción de la reentrada de la etapa superior del *Falcon 9* tras poner en órbita 60 satélites en la misión Starlink v1.0 L19. Evento SPMN160221ART.

- [11] J. M. TRIGO-RODRÍGUEZ e I.P. WILLIAMS, "Dynamic Sources of Contemporary Hazard from Meteoroids and Small Asteroids", en *Assessment and Mitigation of Asteroid Impact Hazards* (Springer, Cham, págs. 11-32, 2017).
- [12] E. PEÑA-ASENSIO, J.M. TRIGO-RODRÍGUEZ, M. GRITSEVICH y A. RIMOLA, "Accurate 3D fireball trajectory and orbit calculation using the 3D-FireTOC automatic Python code", *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 504, 4829–4840 (2021).
- [13] Z. CEPLECHA, "Geometric, Dynamic, Orbital and Photometric Data on Meteoroids from Photographic Fireball Networks", *Bull. Astron. Inst. Czechoslov.* 38, 222-234 (1987).
- [14] E. K. SANSOM *et al.*, "Determining Fireball Fates Using the α - β Criterion", *Astrophys. J.* 885 115 (2019).
- [15] E. PEÑA-ASENSIO, J.M. TRIGO-RODRÍGUEZ, A. RIMOLA, J. IZQUIERDO, M. CHIOARE, L. G. MORILLAS y A. OLIVA, "2020 Ursid Meteor Shower Activity from Video Recordings and Forward-Scatter Echo Detections", en *Lunar and Planetary Science Conference*, n.º 2548, pág. 1174 (2021).
- [16] E. PEÑA-ASENSIO, J. M. TRIGO-RODRÍGUEZ, M. LANGBROEK, A. RIMOLA y A. J. ROBLES, "Using Fireball Networks to Track More Frequent Reentries: Falcon 9 Upper-Stage Orbit Determination from Video Recordings", *Astrodynamics* 5, 347-358 (2021).

Eloy Peña-Asensio
 Universitat Autònoma de Barcelona
 (UAB)
 Instituto de Ciencias del Espacio
 (ICE, CSIC)



Josep M. Trigo-Rodríguez
 Instituto de Ciencias del Espacio
 (ICE, CSIC)
 Institut d'Estudis Espacials
 de Catalunya (IEEC)



Albert Rimola
 Universitat Autònoma de Barcelona
 (UAB)



El Grupo Especializado de Didáctica e Historia de la Física y la Química (GEDH), común a las Reales Sociedades Españolas de Física (RSEF) y de Química (RSEQ), convoca la **IX Edición del Premio "SALVADOR SENENT"**, consistente en 1.000 € (mil euros) y un diploma acreditativo. Con el premio se honra la memoria del Prof. Dr. Salvador Senent Pérez, fundador del GEDH en 1986.

Se podrá presentar cualquier trabajo científico especializado, de revisión o de carácter divulgativo, relacionado con la didáctica o la historia de la física o de la química, publicado (o aceptado para publicar) en la Revista Española de Física o en Anales de Química, revistas editadas por la RSEF y RSEQ, respectivamente.

Los objetivos del premio son resaltar los trabajos sobre estas áreas de conocimiento y fomentar el interés para publicar en las citadas revistas. Se valorará su rigurosidad y originalidad.

Los trabajos se enviarán por correo electrónico a la dirección **gedh@rseq.org**, incluyendo:

- Nombre(s) completo(s) y datos (teléfono y correo electrónico) de los autores.
- Un archivo adjunto con el trabajo presentado (en formato pdf) ya publicado (desde abril de 2021) o admitido para publicación si aún no se ha publicado en marzo de 2023 (en este caso, se deberá acompañar el documento de aceptación de publicación), en una de las dos revistas citadas.
- No podrán participar autores premiados en las anteriores convocatorias.

Las propuestas pueden enviarse hasta el 1 de abril de 2023 y se remitirá acuse de recibo.

El jurado del premio estará formado por profesionales de acreditado prestigio designados por la Junta de Gobierno del GEDH.

El premio, que se resolverá antes del 1 de junio de 2023, se entregará en algún evento o jornada antes de la finalización de dicho año. Se actualizará la información al respecto en: <https://gedh.rseq.org/>



Imagen: Freepik.com