

Geminida SPMN141223J registrada desde a) Observatorio Astronómico de Aras de los Olmos de la Universidad de Valencia (OAUV), cortesía de Alicia Lozano y Vicent Peris; b) Sant Mateu captada por Cèsar Guasch; c) Cehegin, Murcia por Sensi Pastor y José A. de los Reyes; d) La Aparecida, Alicante por Vicente Cayuelas.

EXTRAORDINARIO AÑO 2023 DE ACTIVIDAD METEÓRICA CAPTADA POR LA RED DE INVESTIGACIÓN SOBRE BÓLIDOS Y METEORITOS

JOSEP M. TRIGO RODRÍGUEZ^{1,2}, PAU GRÈBOL TOMÀS^{1,2}, ELOY PEÑA ASENSIO³, GERARD MARCET¹, JAIME IZQUIERDO⁴, JAIME ZAMORANO⁴, AZAHARA LÓPEZ^{5,6}, RAMÓN LÓPEZ⁶, ÁNGEL PÉREZ NAVARRO^{5,6}, MIGUEL CHIOARE DÍAZ⁷, RAMÓN IGLESIAS MARZOA⁷, CARLOS ALCARAZ⁶, LINA AGUASCA⁶, MIGUEL AZNAR⁶, VICENTE CAYUELAS⁶, JORDI DONET⁶, GERMÁN EDO⁶, ANTONIO FERNÁNDEZ SÁNCHEZ⁶, MIGUEL A. FURONES⁶, MIGUEL A. GARCÍA⁶, ALEJANDRO GÓMEZ⁶, JUAN GÓMEZ⁶, FRANCISCO GRANDE⁶, CÉSAR GUASCH⁶, VICENT IBÁÑEZ⁶, DAVID MOLNER⁶, SENSI PASTOR⁶, PEP PUJOLS⁶, JOSÉ A. DE LOS REYES⁶, ANTONIO J. ROBLES⁶, DIEGO RODRÍGUEZ⁶, ANTONIO LASALA⁶, JAVIER MILLÁN⁶, QUIM ARREDONDO⁶, AMADO CARBONELL⁶, RUBÉN DOMÉNECH SANZ⁶, GERMÁN EDO⁶, ARMAND OLIVA⁶, ENOL MATILLA⁶, LORENZO MORILLAS⁶, PERIKO MARTORELL⁸, IÑAKI ORDÓÑEZ-ETXEBERRIA⁸, LETO ORDUÑA⁶, CHUS PALOMEQUE⁶, JOSÉ MANUEL PÉREZ REDONDO⁶, JOSEP M. PETIT⁶, JULIO RIBAS⁶, BELÉN SANTAMARÍA⁶, AGUSTÍN NÚÑEZ⁹, MANUEL MORENO-IBÁÑEZ¹⁰, MAR TAPIA¹¹ Y JUAN FABREGAT¹².

Durante el año 2023 la Red Española de Investigación sobre Bólidos y Meteoritos (abreviadamente Red SPMN) ha continuado su labor de monitorización de la actividad meteórica. Surgido en 1997, este proyecto de ciencia ciudadana actualmente coordinado desde el Instituto de Ciencias del Espacio (CSIC) en Barcelona, ha alcanzado el hito de monitorizar toda la península ibérica, Baleares y Canarias desde sesenta estaciones.

¹Institut de Ciències de l'Espai (CSIC). ²Institut d'Estudis Espacials de Catalunya (IEEC). ³Politécnico de Milán. ⁴Universidad Complutense de Madrid (UCM). ⁵Grupo de Astronomía Kepler de Fuenlabrada. ⁶Red de Investigación sobre Bólid

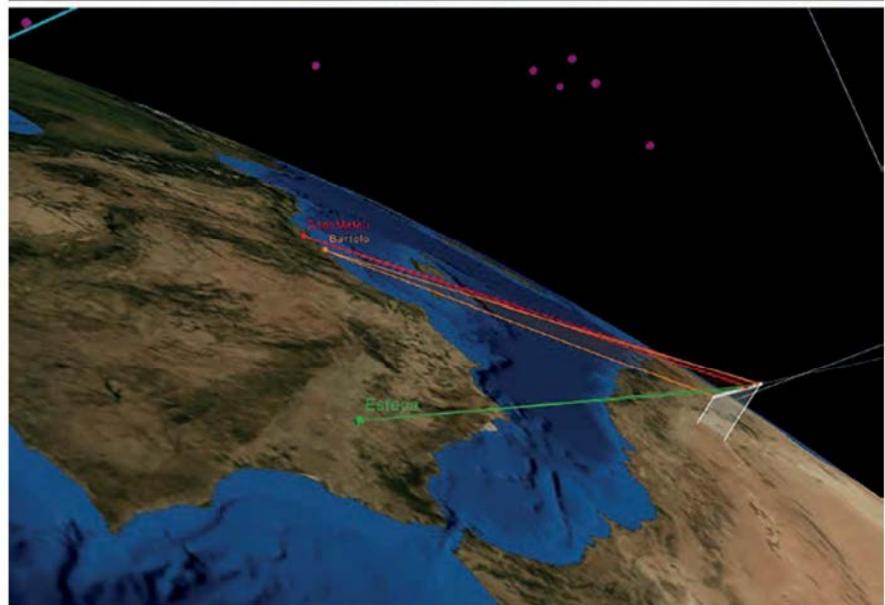
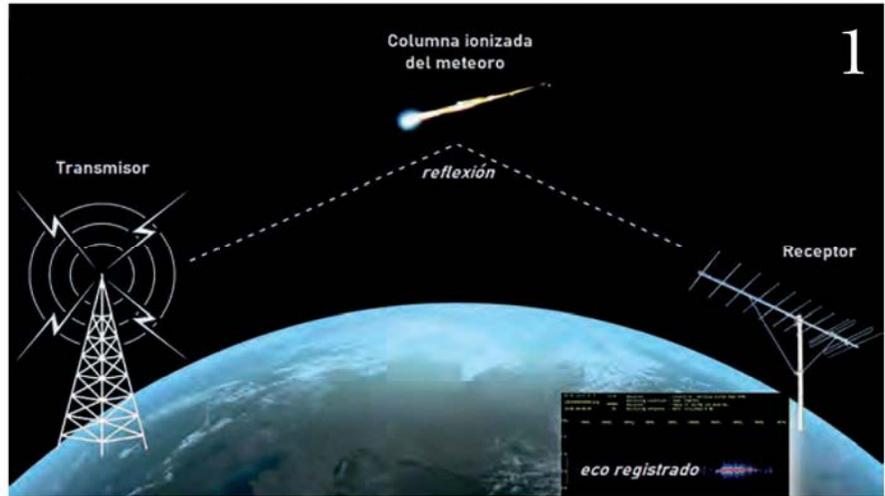
os y Meteoritos (SPMN). ⁷Observatorio Astrofísico de Javalambre (OAJ), CEFCa, Teruel. ⁸Planetario de Pamplona, Navarra. ⁹Gran Telescopio de Canarias. ¹⁰D-Orbit, Italia. ¹¹Laboratori d'Estudis Geofísics Eduard Fontserè, IEC. ¹²Departamento de Astronomía y Astrofísica, Universitat de València.

FIGURA 1. Ejemplo de eco captado mediante la técnica de *forward-scatter*, más detalles en el texto. [Todas las imágenes han sido suministradas por los autores]

FIGURA 2. El superbóldo de Argelia SPMN070523. Arriba) Registrado desde la estación del Pic Bartolo, Benicàssim, Castellón. Abajo) Trayectoria reconstruida empleando nuestro software 3D-FireTOC.

Esto no sería una realidad sin las decenas de observadores que diariamente reportan al ICE-CSIC sus detecciones y las ponen en común para comprender mejor el origen de esos fenómenos tan espectaculares como inesperados. Efectivamente, todavía hoy en día los programas telescópicos de seguimiento de asteroides no detectan rocas de un tamaño inferior al metro (denominadas *meteoroides*) en ruta de colisión con la Tierra y, por ello, ocurren súbitamente (Trigo-Rodríguez, 2022). Con este artículo pretendemos resumir nuestro trabajo de formación y coordinación de este proyecto colaborativo, desempeñado en buena medida en nuestra lista de correo en la Red Iris, que pretende conseguir que en pocos meses auténticos profanos en la materia sean capaces de detectar y asignar sus meteoros a los principales radiantes, contribuyendo también a recuperar meteoritos y a participar en publicaciones científicas de alto nivel.

La observación de meteoros ejemplifica a la perfección el trabajo colectivo para comprender



mejor el firmamento. De hecho, las trayectorias que siguen los meteoros en la bóveda celeste no son sino proyecciones del camino recorrido por el meteoróide

durante su ablación en la atmósfera. Por ello, es preciso identificar los meteoros desde dos o más estaciones para reconstruir la posición real del bólido y propagar

su origen en la bóveda celeste, obteniendo el llamado radiante. Para ello empleamos el método de intersección de planos desarrollado por Znedek Cepelcha en 1987. En primer lugar, realizamos la astrometría de las imágenes en base a las estrellas que captan. Los fotogramas se superponen y se procesan reduciendo el ruido y resaltando las estrellas de referencia. Utilizando un catálogo estelar se identifican las estrellas del campo y se mide su posición en el cielo. Después, mediante métodos iterativos, se ajusta una matriz de transformación que convertirá la posición de cada estrella y del meteoro en píxeles en las coordenadas celestes reales, considerando también la distorsión producida por la lente. De esta manera se obtiene para cada punto de observación una trayectoria aparente sobre el cielo tal y cómo fue vista desde esa localización. Una vez completada la astrometría desde cada estación se traza un plano que contiene la estación y la trayectoria aparente del meteoro. La intersección de cada uno de los planos generados permite obtener la trayectoria del meteoro. Esa fase luminosa se produce debido a la ablación del meteoróide, al pulverizar, evaporar e ionizar sus elementos químicos durante la entrada a hipervelocidad en la atmósfera terrestre. En un paso final, conocida la velocidad y radiante del meteoro, se pueden calcular los parámetros orbitales para trazar la órbita heliocéntrica del meteoróide que originó ese meteoro. Es necesario además tener en cuenta el movimiento de rotación de la Tierra y la atracción gravitatoria que esta produce sobre el me-

TABLA 1

Año de paso del 55P	Fecha (TU)	α (°)	δ (°)	Vg (km/s)
1069	Nov. 21, 8:24	155,37	20,76	70,70
1135	Nov. 10, 14:51	149,19	23,88	70,30
1201	Nov. 21, 10:33	155,61	20,31	70,78
1800	Nov. 20, 6:53	154,96	20,94	70,74
1866	Nov. 18, 1:06	153,55	21,71	70,67

Los encuentros de la Tierra con las cortinas de polvo 55P dejadas en diversos pasos por el perihelio del cometa produjeron bólidos luminosos durante 2023. Ubicación del radiante en ascensión recta (α) y declinación (δ), y velocidad geocéntrica media (Vg). Extraído de Trigo-Rodríguez *et al.* (2024) en base a los cálculos de Jérémie Vaubaillon.

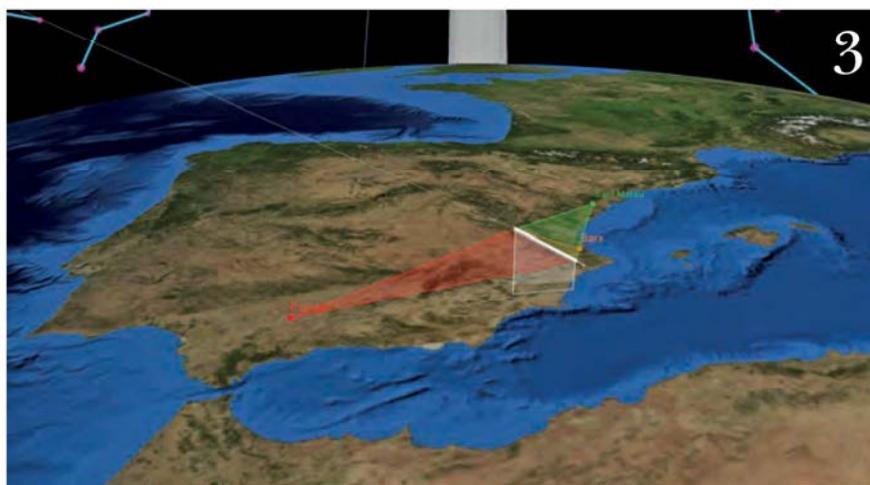


FIGURA 3. Reconstrucción de la trayectoria atmosférica del bólido SPMN080723.

teoroide. Una vez realizadas estas consideraciones, se obtiene la órbita en el Sistema Solar de esa partícula. Comparando las órbitas encontradas con las de asteroides y cometas es posible conocer en un número significativo de ocasiones su cuerpo progenitor.

SISTEMAS DE DETECCIÓN DE BÓLIDOS METEÓRICOS

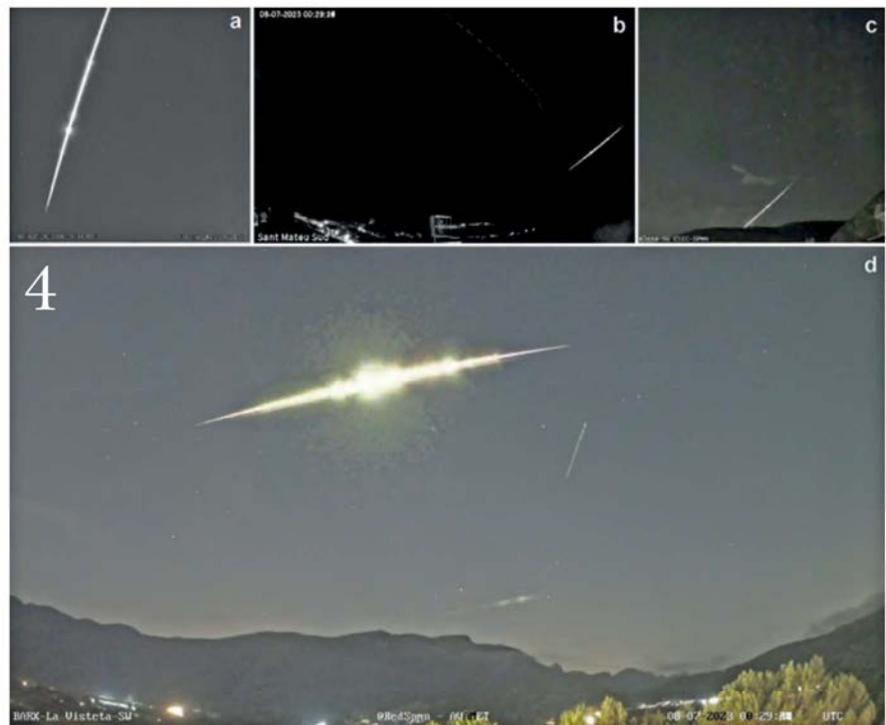
Actualmente las estaciones de grabación de la Red SPMN cuentan con una amplia gama de cámaras de vídeo CCD de alta sensibilidad (Watec 902H Ultimate) y otras cámaras de vídeo que va-

mos probando y adaptando para vídeo detección. Las estaciones detectan cualquier fenómeno luminoso que ocurre en el cielo hasta una magnitud límite próxima a +3, consiguiendo el monitoreo autónomo y continuo de los meteoros que ocurren sobre la península ibérica, Baleares y Canarias. Las estaciones suelen estar dotadas de cámaras de vídeo equipadas con un sensor de imagen CCD de transferencia interlineal Sony de 1/2" con su sensibilidad mínima de lux que oscila entre 0,01 y 0,0001 lux a $f/1,4$. La distancia focal de los objetivos empleados oscila entre 6 y 25 mm y el campo de visión cubierto por cada dispositivo varía entre 90 y 120 grados. Las cámaras de vídeo emplean

TABLA 2

Mes	N	Mes	N
Enero	221	Julio	186
Febrero	143	Agosto	364
Marzo	197	Septiembre	230
Abril	233	Octubre	239
Mayo	175	Noviembre	314
Junio	122	Diciembre	371

Número de bólidos [N] detectados por nuestras estaciones mensualmente en 2023.



objetivos rápidos esféricos con distancias focales que oscilan entre 4 y 12 mm y relaciones focales entre 0,8 y 1,2. Las detecciones se registran en ordenadores sincronizados que proporcionan una precisión mínima de 0,1 segundos en el registro de los eventos meteóricos. Hoy en día ya estamos empleando desde algunas estaciones sistemas de vídeo comerciales, realmente económicos, que incorporan la detección de movimiento automática. Un objetivo futuro podría ser uniformizar los detectores empleados para así automatizar el proceso de reducción como ha hecho la Red FRIPON que representamos en España (Colas *et al.*, 2020).

Además de las estaciones en el óptico, para comprobar el aumento esperado de la actividad de las lluvias de meteoros, empleamos la técnica de *forward-scatter*. Para ello se usan receptores de radio que escuchan a una frecuencia concreta de 143,05

MHz, justo la emitida por el radar Grand Réseau Adapté à la Veille Spatiale (GRAVES) ubicado en Dijon, Francia (www.onera.fr/dcps/graves). El receptor principal está en Fuenlabrada, Madrid (España), y emplea una antena Yagi de cuatro elementos de 10 dBd, un receptor Nooelec Smart V4 RTL-SDR y el software Echoes V.050-1 que se ejecuta en un PC sobre Ubuntu 22.04 LTS (véase Figura 1).

SUPERBÓLIDO SOBRE ARGELIA SPMN070523

El 7 de mayo de 2023 nuestra red consiguió una detección de auténtico récord, un superbólido ocurrido sobre territorio argelino que pudo ser detectado desde tres de nuestras estaciones (Pic Bartolo, Estepa y Sant Mateu) desde más de 820 km de distancia (Figura 2). La calidad de los vídeos nos animó a reconstruir su trayectoria. La trayectoria ionizada del bólido se inició a $35^{\circ} 27' 13,8''$ N y $4^{\circ} 5' 38,3''$ E.

La altitud de inicio de esa fase luminosa fue a $93,2 \pm 0,5$ km, con una velocidad observada de $28,8 \pm 2,7$ km/s y una masa estimada de $1,5 \pm 0,6$ kg. El bólido mostró tres fulguraciones muy luminosas a lo largo de su trayectoria, siendo la última a $42,2 \pm 0,7$ km. Esos súbitos destellos, asociados a la rotura sucesiva del meteoróide, iluminaron el cielo de Argelia. La altura final observada fue de $39,3 \pm 0,8$ km con una masa terminal de unos 16 g. La densidad estimada del meteoróide (3650 ± 10) kg/m³ es compatible con una condrita ordinaria (Grèbol-Tomàs *et al.* 2023).

GRAN BÓLIDO SOBRE MURCIA Y ALICANTE SPMN080723

En ocasiones captamos o, si somos afortunados, vemos bólidos muy luminosos y al poco de registrarlos nos preguntamos si han producido meteoritos. Esto es lo que ocurrió con un evento espectacular sobre Alicante y Murcia que captamos desde

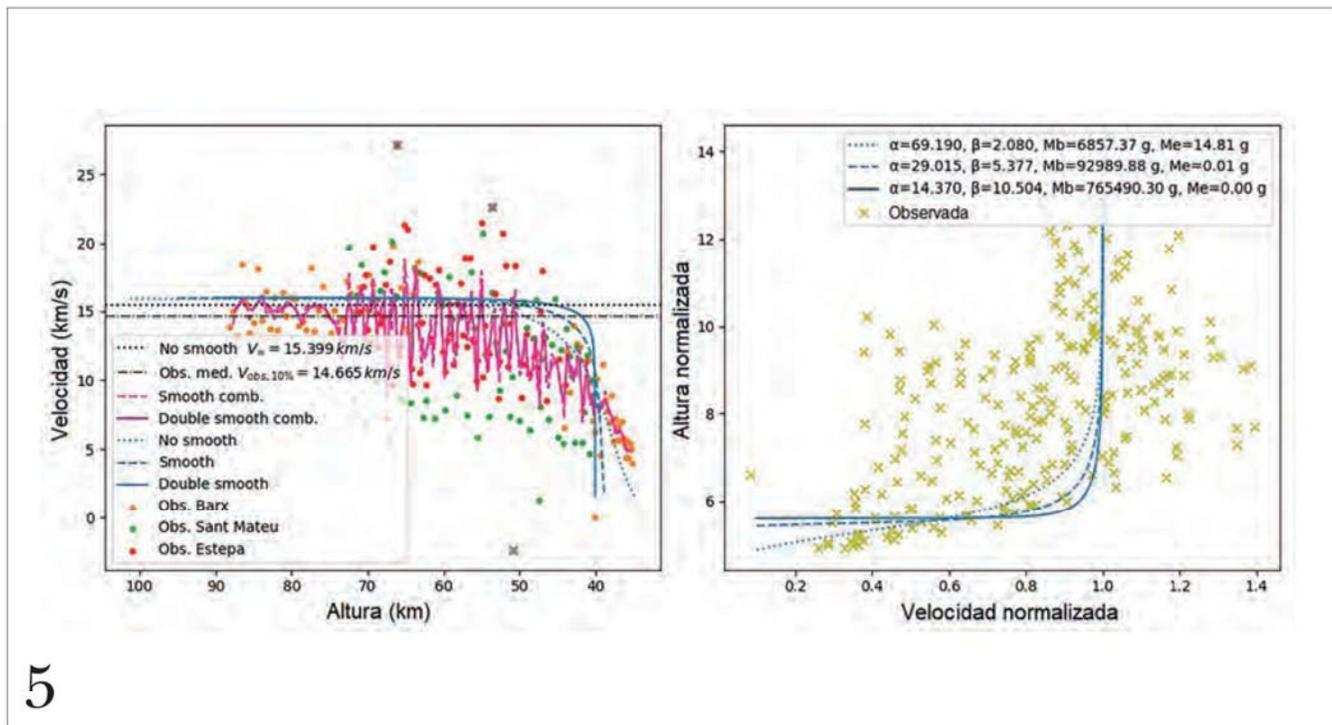


FIGURA 4. Gran bólido SPMN080723 captado desde a) Cehegín, Murcia por Sensi Pastor y José A. de los Reyes; b) Sant Mateu, Castellón por Cèsar Guasch; c) Blesa, Teruel por Miguel Aznar y d) Barx-La Visteta, València por Jordi Donet.

FIGURA 5. a) Velocidad medida y suavizada del bólido SPMN080723 desde diversas estaciones; b) Valores de α y β en función de la altura y de la velocidad normalizada que indica un mejor ajuste para un meteoroido de masa terminal prácticamente nula. Para más detalles véase Peña Asensio *et al.* [2023].

una decena de estaciones el 8 de julio de 2023 a las 0h 29m 39s TUC, siendo catalogado como SPMN080723.

Tras el estudio astrométrico desde varias estaciones geométricamente favorables obtuvimos la reconstrucción de la trayectoria atmosférica del bólido (Figuras 3 y 4) y también estudiamos su deceleración en la atmósfera (Figura 5). Fruto del estudio obtuvimos que la masa terminal

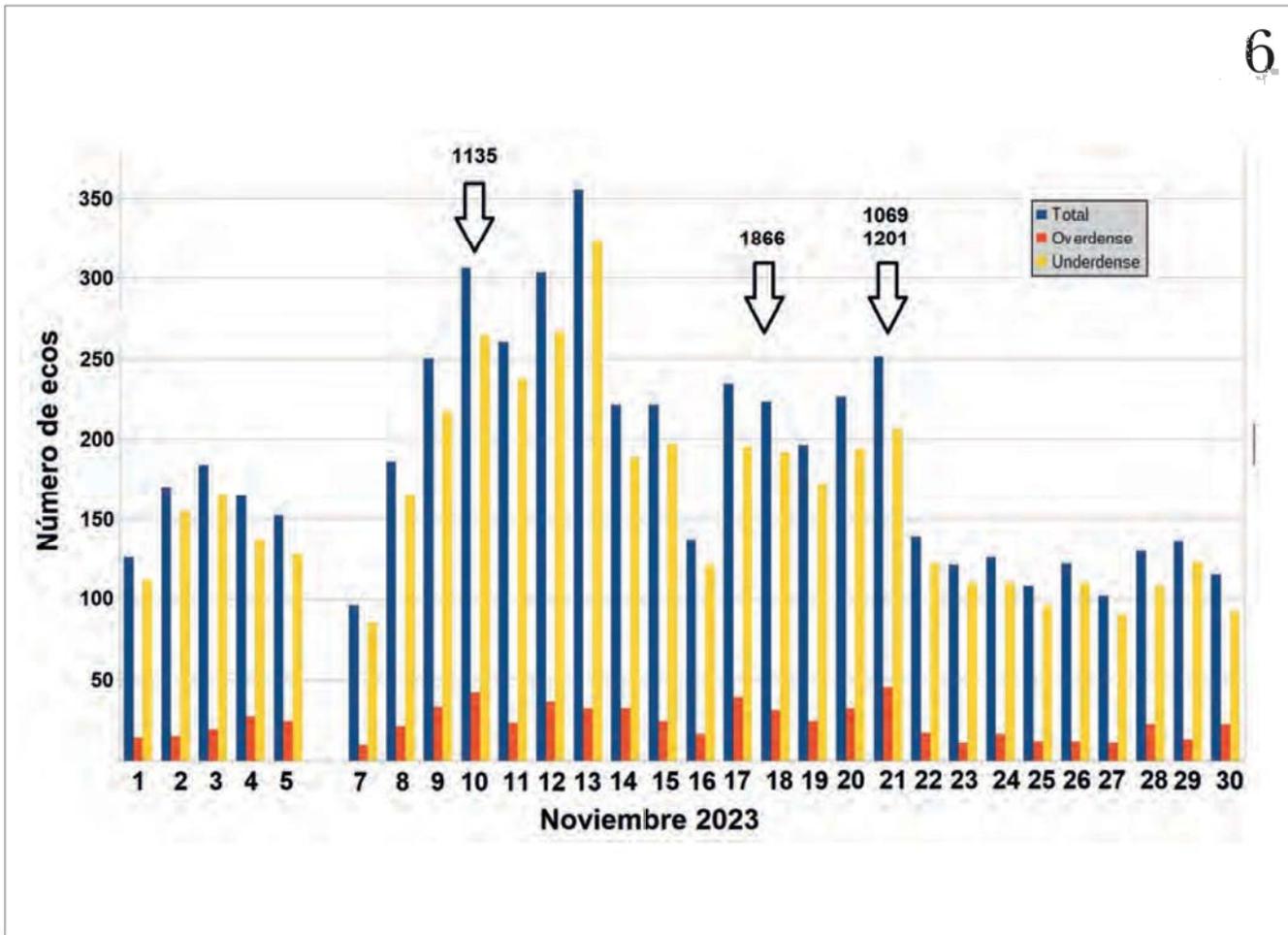
era prácticamente nula y su recuperación inviable. Esto es lo más común. De hecho, estadísticamente sabemos que anualmente se produce solo una caída de un meteorito mayor de un kg en toda la península ibérica.

LEÓNIDAS EN 2023: ENCUENTRO CON CORTINAS DE POLVO JÓVENES DEL COMETA 55P/TEMPEL-TUTTLE

Las corrientes de meteoroides producidas por cometas periódicos producen lluvias de meteoros anuales, bonitas exhibiciones que se repiten cada año cuando la Tierra cruza estos enjambres de partículas. El cometa 55P/Tempel-Tuttle produce cada año alrededor del 18 de noviembre una famosa lluvia de meteoros conocida como Leónidas debido a que sus meteoros parecen proceder de la constelación de Leo. Esta corriente de meteoroides tiene una componente anual bien distribuida que asegura la actividad meteórica año tras año. Sin embargo, a esa actividad se

le añade una componente joven asociada a la liberación de nuevos meteoroides en la aproximación al perihelio del cometa padre: 55P/Tempel-Tuttle (Figura 6). Estos meteoroides se distribuyen inicialmente formando cortinas o husos con miríadas de partículas que, de vez en cuando, producen estallidos o tormentas de actividad (Trigo-Rodríguez y Blum, 2022).

En noviembre de 2023 hubo una gran exhibición de bolas de fuego de las Leónidas asociadas a partículas de tamaño centimétrico y relativamente jóvenes (véase Tabla 1), y un pronóstico de un mayor nivel de actividad a medida que la Tierra cruzaba varios rastros de polvo liberados por el cometa 55P en recientes pasos por el perihelio. Como uno de los bólidos más destacados hemos seleccionado el catalogado como SPMN171123F, registrado al norte de las Islas Canarias desde tres estaciones (Figura 7).



LAS GEMÍNIDAS EN 2023

Otra lluvia de meteoros con actividad muy destacable en el pasado año fueron las Gemínidas. Hoy en día sabemos que las produce un asteroide transicional catalogado como 3200 Phaeton que en sus aproximaciones al Sol se calienta lo suficiente como para que ocurra la descomposición térmica de carbonatos, sulfuros de hierro y filosilicatos, desprendiendo gas capaz de impulsar partículas de su superficie con energía suficiente para vencer el débil campo gravitatorio del objeto (MacLennan y Granvik, 2024). La Tierra intercepta este enjambre meteórico entre el 6 y el 16 de diciembre, siendo el más poblado de los que conocemos (Trigo-Rodríguez y Blum,

2022). Durante su periodo de actividad captamos más de un centenar de bólidos del enjambre, entre ellos el precioso evento SPMN141223J frente a la costa de Alicante (ver imagen que abre este artículo).

Esa actividad tan destacada del enjambre meteórico producido por el asteroide Phaeton propició que diciembre fuese el mes con mayor actividad de bólidos.

RESULTADOS TOTALES EN 2023

En los últimos años hemos venido detectando algo menos de dos mil bólidos anualmente. Sin embargo, en 2023 batimos todos los récords alcanzando los 2795 bólidos detectados sobre España peninsular e insular (Tabla 1). Las razones para el incremento

FIGURA 6. Número de ecos meteóricos en noviembre de 2023 desde la estación de *forward-scatter* de Fuenlabrada operada por Ángel Pérez y Azahara López. Las fechas indican el año del paso por el perihelio del cometa 55P/Tempel-Tuttle (véase Tabla 1). Se intuye una actividad extendida e inusual de bólidos de Leónidas durante una semana antes del máximo anual del enjambre.

FIGURA 7. Trayectoria del bólido SPMN171123F. a) Imagen desde Cambalud, Gran Canaria; b) Desde Playa Blanca, Lanzarote con su espectro de emisión y c) Reconstrucción de su trayectoria ionizada sobre el Océano Atlántico.

en ese número de registros son varias. Por un lado, contamos con un mayor número de estaciones que a su vez influye en un mayor volumen atmosférico monitorizado, ahora también des-

de Baleares y Canarias. También 2023 ha sido un año inusual, muy seco y cuyas condiciones atmosféricas favorables han permitido seguir la actividad meteórica de los principales enjambres productores de bólidos.

Una futura automatización del proceso de detección y análisis de bólidos facilitará la identificación de aquellos que producen meteoritos para así organizar la preparación inmediata de campañas de búsqueda (Peña Asensio *et al.*, 2023, 2023b).

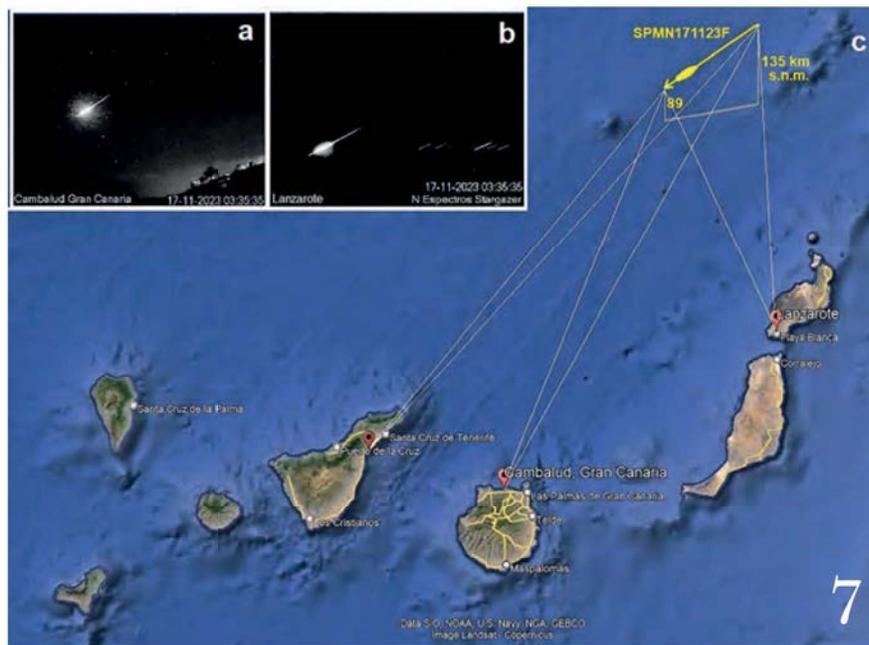
CONCLUSIONES

La red SPMN implica actualmente a una decena de investigadores profesionales y a una cincuentena de aficionados, auténticos entusiastas. Los integrantes de este programa proam deseamos estudiar y dar explicación al fenómeno meteórico. De hecho, nuestro proyecto de ciencia ciudadana del ICE-CSIC es además seguido por cerca de quince mil personas en redes sociales.

Siendo uno de los primeros ejemplos de colaboración proam en el estado español, pensamos que la Red SPMN ejemplifica el papel que los astrónomos amateur pueden realizar trabajando codo a codo con los profesionales, maximizando la cobertura de la red, dando respuesta y explicación a los fenómenos captados y potenciando el estudio de grandes bólidos, al proporcionar vídeos clave que permitan recuperar nuevos meteoritos. (A)

RECURSOS EN LÍNEA:

- Proyectos de ciencia ciudadana del ICE-CSIC: www.ice.csic.es/news/citizen-science
- Listado de bólidos en 2013



de la Red SPMN: www.ice.csic.es/news/citizen-science?view=article&iid=459&catid=14

BIBLIOGRAFÍA:

- Colas, F. *et al.* (2020), «FRIPON: a worldwide network to track incoming meteoroids», *Astronomy & Astrophysics* 644, id. A53.
- Grèbol-Tomàs, P. *et al.* (2024), «Intercontinental Observation and Reconstruction of a Possible Meteorite-Dropper Superbolide», *55th Lunar and Planetary Science Conference*, LPI Contribution No. 3040, id. 1124.
- MacLennan, E. y M. Granvik (2024), «Thermal decomposition as the activity driver of near-Earth asteroid (3200) Phaethon», *Nature Astronomy* 8, 60-68.
- Peña-Asensio, E. *et al.* (2023), «Identifying meteorite droppers among the population of bright «sporadic» bolides imaged by the Spanish Meteor Network during the spring of 2022», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 520, 5173-5182.
- Peña-Asensio, E. *et al.* (2023b),

- «Deep machine learning for meteor monitoring: advances with transfer learning and gradient-weighted class activation mapping», *Planetary & Space Science* 238, doi.org/10.1016/j.pss.2023.105802.
- Trigo-Rodríguez, J. M. (2022), *La Tierra en peligro: el impacto de asteroides y cometas*, Edicions Universitat de Barcelona, ISBN 978-84-9168-787-0.
- Trigo-Rodríguez, J. M. y Blum, J. (2022), «Learning about comets from the study of mass distributions and fluxes of meteoroid streams», *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 512, 2277-2289.

IN MEMORIAM

Este artículo divulgativo deseamos dedicárselo a nuestro entrañable amigo Diego Rodríguez, incansable observador astronómico que nos acompañó con sus capturas desde su estación de Collado-Villaba durante los cerca de treinta años de vida de nuestra red de investigación. D.E.P. compañero.