

Cheliábinsk and other February superfireballs

Sandra Zamora,² Alejandro Sánchez de Miguel,¹ Francisco Ocaña¹
1. Departamento Astrofísica y CC. De la Atmósfera UCM, 2. Asociación de Astrónomos Aficionados. UCM

DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO

Los superbóvidos son un tipo especial de bólido que se caracterizan por tener un brillo de magnitud entre -8 y -12 y un tamaño superior a un metro (en este trabajo en particular se consideran todos aquellos más brillantes que -10). Presentan aspecto de bolas de fuego y crean un rastro luminoso que puede ir acompañado de eventos acústicos, fragmentaciones, explosiones,... Este fascinante fenómeno natural se puede observar en forma de estela desde centenares de kilómetros sobre la superficie terrestre. Por su gran tamaño es incluso probable encontrar fragmentos de aquellos que no se han volatilizado por completo en su paso por la atmósfera. Se han registrado y documentado ampliamente este tipo de sucesos a través de los años. Algunas crónicas e incluso motivos artísticos de diferentes culturas han servido para identificarlos y clasificarlos desde tiempos muy remotos. Sin embargo, se trata de acontecimientos poco usuales por lo que resulta complejo llevar un registro sistemático de detecciones, tanto espacial como temporalmente.

Durante muchos años se han querido crear bases de datos que recojan el mayor número de registros de meteoros posible con el fin de dar alguna explicación consistente a este tipo de fenómenos. No obstante, existen numerosas dificultades para llevar a cabo un registro estadístico de detecciones de superbóvidos. Varios autores han trabajado en catalogar y recuperar informes de los últimos siglos (Denning, 1912; Astapovic y Terentjeva, 1968; Terentjeva, 1989; Haya, 2006; Baggaley, 1977). Sin embargo la mayoría de estos archivos se basan en una única ubicación terrestre y el número de eventos es limitado.

El problema actual reside en buscar las bases de datos adecuadas al tipo de estudio realizado, unificar los formatos de las mismas y conocer los sesgos observacionales de cada una de ellas para intentar tenerlos en cuenta en la interpretación física de resultados. Esta es la idea principal de este proyecto. El fin es el de detectar sobreabundancias de caída de superbóvidos en longitudes solares particulares. Con todo el conjunto se tiene una extensa base de datos que permite reducir las incertidumbres de la estimación de estos eventos a lo largo del año. Se han publicado resultados previos a este trabajo en diferentes presentaciones que se expondrán más adelante. Cabe destacar de ellos que, realizando un análisis estadístico descriptivo de los datos basado en la media, en la dispersión de la muestra y en las propiedades de las lluvias de meteoritos, se encuentran concentraciones anormales de caídas de superbóvidos que no son compatibles con una distribución de Poisson.

BASES DE DATOS UTILIZADAS Y TRATAMIENTO REALIZADO

Este proyecto ha involucrado a muchos colaboradores en el contexto de un proyecto de ciencia ciudadana. Ha sido realizada por estudiantes de doctorado, estudiantes de Máster de Astrofísica y estudiantes de grado en Física de la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Complutense de Madrid. Así mismo han participado miembros de la Asociación de Astrónomos Aficionados de la Universidad Complutense de Madrid (ASAAF-UCM). Pretende ser una versión beta de un proyecto de *crowdsourcing* futuro abierto a más países e idiomas y está pensado también como una introducción al mundo de la ciencia para los estudiantes.

Con el fin de hacer que la elaboración de bases de datos sea sencilla se utilizan formularios específicos que usan plantillas predeterminadas de Google. Con ellas los participantes pueden reportar las características principales de los superbóvidos que se encuentran en las bases de datos usadas (tales como prensa histórica, el registro de la Asociación Británica para el Avance de la Ciencia, registros del llamado *Near Earth Object Program* y artículos del Sistema de SAO / NASA Astrofísica de datos).

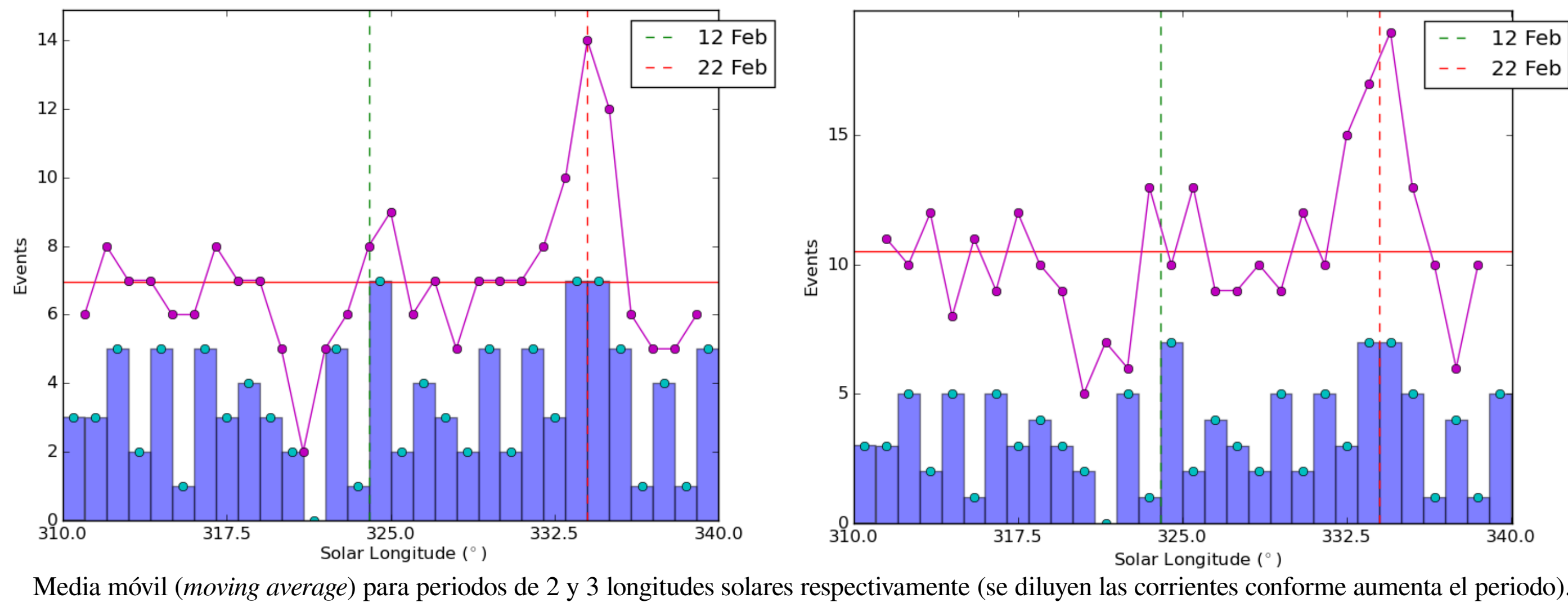
Aunque no todos se usan en esta presentación, se tiene más de 2500 registros de caídas del fenómeno de estudio. Se ha realizado un análisis estadístico descriptivo de los datos, basado en la media y la dispersión de la muestra. En principio se ha asumido una distribución normal, teniendo en cuenta una desviación significativa de 1σ y 2σ de las tasas a lo largo del año. La búsqueda de corrientes se basa en las propiedades de las lluvias de meteoros. Se ha desarrollado un software específico para el tratamiento de los datos catalogados por los voluntarios del proyecto de ciencia ciudadana.

Se sabe que puede existir una fuente extra de ruido, debida a posibles falsos positivos. La presencia cierta de dicho ruido no hace más que disminuir cuanto destacan los eventos reales (cualquier exceso estadístico puede ser más notable de lo que se muestra). Es importante volver a señalar que existen algunas muestras que presentan sesgos bastante claros que podrían ocasionar pérdida de insignificancia. Sin embargo, no existen muestras no sesgadas. La base de datos que parece más controlada en este aspecto, teniendo en cuenta las usadas en el trabajo, podría ser la del proyecto *Near Earth Object Program*. Incluso en ésta existen algunos parámetros meteorológicos y de sensibilidad de los instrumentos que no permiten obtener todos los datos de forma precisa. También es necesario recordar el intervalo anual estudiado en cada conjunto de registros y ponerlo en el contexto de la duración que podrían tener estas lluvias de bólidos a lo largo de los años.

TRABAJOS PREVIOS

El primer trabajo presentado sobre tasas de caídas de superbóvidos tuvo lugar en Mayo de 2014 [1]. Con un total de 289 eventos se encontraron en Febrero excesos significativos en torno al día 12 (longitud solar 322°) con una desviación significativa de 1σ y alrededor del día 19 (longitud solar 329°) para una desviación significativa de 2σ (fechas en época de 2014). Entre las referencias se expusieron algunas menciones de gran relevancia internacional como pueden ser la caída del meteorito de Iowa el 12 de Febrero de 1875, el caído en Chicago el 3 de Enero de 1883, el gran bólido caído en 1860 y el meteorito de Madrid el 10 de Febrero del año 1896. Desde ese momento se tuvo constancia de que algo ocurría en este periodo. Con un mayor número de registros y un análisis más detallado de los mismos se realizan trabajos posteriores donde se precisan las fechas de estas corrientes ([2] y [3]). Incluso se participa en una noticia en el periódico El País titulada "Bolas de fuego por San Valentín" (Javier Salas, 15 de Diciembre de 2014). Menciona, a parte de nuestros resultados, comentarios trabajos y opiniones similares de otros autores.

El último trabajo, y quizás el más exhaustivo y detallado, fue presentado por Francisco Ocaña en el IMC (Mistelbach, 2015 [4]). La fuente principal es prensa escrita (*New York Times*, Biblioteca Nacional, ...) entre los años 1850-1900. También se usan el SAO / NASA (*Astrophysical Data System*) entre 1900 y 2000 y la BAAS. Se encontraron sobreabundancias el día 12 (longitud solar 323°) para bin-3 y alrededor del día 22 (longitud solar 333°) para bin-2 (fechas en época de 2015). Se encuentran evidencias de determinadas lluvias de meteoros conocidos (Perseidas, Leónidas y las Gemínidas) y de otras fuentes que pueden estar relacionados con lluvias menores o desconocidos, probablemente de origen asteroidal.



COMPARACIÓN CON BIBLIOGRAFÍA

Como ya se ha destacado con anterioridad, una gran motivación para este trabajo es que desde el siglo XX se han registrado este tipo de eventos y se han observado abundancias significativas en el mes de Febrero. El trabajo de Denning W. F., 1879 [5] es destacable para nuestro propósito. En él se comienza mencionando la importancia del registro de este tipo de eventos para poder detectar abundancias inusuales en diferentes periodos anuales. Juntando algunos registros, el autor consigue más de 3600 eventos distribuidos a lo largo de los años. Señala la cantidad de 174 caídas en Febrero, destacando tres fechas con sobreabundancia en la primera mitad de este mismo mes (días 3, 7 y 10). Resalta del mismo modo algunos eventos de especial relevancia como un gran meteorito visto el 13 de Febrero de 1871. En Denning W. F., 1922 [6] se enumeran una serie de eventos tenidos lugar a lo largo de los años en el mes tratado. Presenta las características más importantes de los mismos y, en algunos casos, hasta el radiante exacto (el periodo anual de los registros es 1894-1922). Se obtienen de la base B.A. "*Luminous Meteor*" y de otras publicaciones destacables. Literalmente se cita: "... *it is possible to find a number of fireballs for any epoch of the year, but the very exceptional objects seen in February appear to deserve special notice. The list might be greatly extended if it were carried back some years ... There were but two showers, represented by 3 or 4 paths each, namely 73+42 and 147-11 (February 7-17 and 11-13).*"

Jamey R. Szalay, Mihály Horányi, 2016 [7] es el artículo actual encontrado más destacado a la hora de validar nuestros resultados. Trata el designado *Lunar Dust Experiment* (LDEX), un experimento del instrumento denominado NASA's *Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer* (LADEE). Fue una misión espacial lanzada el 7 de septiembre de 2013 que se encuentra en órbita alrededor de la Luna. Estanave puede detectar polvo generado por impactos de micro-meteoritos de cometas y asteroides en la superficie lunar. En el trabajo se analizan los datos y se determinan algunos parámetros de corriente de meteoroides extraídos como su ascensión recta y declinación (error calculado asumiendo que LDEX podría no resolver un máximo en la tasa de impacto dentro de tres órbitas LADEE, 0,3° en longitud solar).

Para esta presentación cabe destacar la siguiente lluvia del radiante oCe (Period E. Omicron Centaurids), $\lambda(\text{degree})=325.1$, $\alpha(\text{degree})=175$, $\delta(\text{degree})=-55$. Con el método predicho se encuentran unos valores de: $\lambda(\text{degree})=325.4 \pm 0.3$, $\alpha(\text{degree})=273 \pm 13$, $\delta(\text{degree})=-7 \pm 40$. A primera vista se ve que la ascensión recta calculada no es compatible con la de la lluvia propuesta. Sin embargo, comparando estos datos con los nuestros, se ve que lo que se ha detectado esta muy cercano a la corriente que se ha postulado en este trabajo y en los posteriores publicados ([3] y [4]). Con un método de detección completamente diferente, y junto a todas las diferencias restantes no mencionadas, el producto tiene relación con lo que se ha obtenido y comentado anteriormente. En la corriente de meteoros del día 12 de Febrero se encuentra el famoso bólido de Cheliábinsk, cuyo radiante se ha calculado con mucha exactitud (Popova, 2013). Se ha realizado un gráfico incluyendo el cielo visible en la detección del mismo, su gradiente ($\alpha(\text{degree})=332.2$, $\delta(\text{degree})=0.3$), las coordenadas celestes de la lluvia oCe y las calculadas con el satélite LDEX. Se ve que la lluvia con la que se asocian los datos cae en la zona no visible del cielo y, además, es incompatible con los cálculos de los autores. Es importante añadir que estos datos son difíciles de obtener y tienen mucho error. Sin olvidar esto, cabría pensar que en principio que la detección lunar no se corresponde con oCe, pudiendo entonces tener un origen diferente.

[1] Sánchez de Miguel A., Ocaña F., Tapia C., Santamaría A., de Burgos A., Zamora S. and Lorenzo C. (2014). "Superbóvidos históricos". XXI Congreso Estatal de Astronomía. ISBN 978-84-15814-89-4. pages 281–283.
[2] Zamora S., Romero J. C., Sánchez de Miguel A., Ocaña F. (2015). "Superbóvidos no tan casuales". red.escubre Boletín de Noticias Científicas y Culturales, 42, 2–5.
[3] Sánchez de Miguel A., Zamora S., Ocaña F., Tapia C., de Burgos A., Herráiz G. and Petrova M. (2015). "Historical Superbolides". XI Scientific Meeting of the Spanish Astronomical Society, held on September 8-12, 2014, in Teruel, Spain. Pages 658–658.

[4] Sandra Zamora, Francisco Ocaña, Alejandro Sánchez de Miguel and Maruška Mole (2015). "On the frequency of the superfireballs: more than 150 years of reports". The IMC, held on August 29th, 2015, in Mistelbach, Austria.
[5] Denning W. F. (1879). "The real paths of 429 fireballs and shooting stars observed in the British Isles during the 15 years 1897 to 1911 inclusive". Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 72, 423–451.
[6] Denning W. F. (1922). "Meteoric Phenomena, February 7-22". Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 82, 307.
[7] Jamey R. Szalay, Mihály Horányi (2016). "Detecting meteoroid streams with an in-situ dust detector above an airless body". Icarus 275 221–231.

¿POR QUÉ FEBRERO?

En el año 2013 coincidió la caída del meteorito de Cheliábinsk con el paso del asteroide 2012 DA14 (actualmente 367943 Duedne). La aparente independencia entre ambos sucesos y los posibles indicios que este tipo de eventos podrían ser más usuales que lo que en un principio se supone, motivó la revisión de la tasa de caída de superbóvidos en la Tierra.

Observando los resultados que se tenían hasta el momento, y teniendo en cuenta que la fecha de caída se sitúa el 15 de Febrero de 2013, se encontraron sobreabundancias especialmente interesantes en este mismo mes. Ya se habían señalado desde la primera publicación realizada en la que se analizaron datos del *New York Times* (Sánchez de Miguel et al, 2014), pero se comenzó un análisis más particular para obtener información adicional de esta cantidad anormal de eventos en este periodo anual concreto.

Lo que puede resultar más destacable es que, revisando la bibliografía (Denning W. F., 1922), se encuentra que **incluso en el siglo XX ya existen autores que señalan que algo ocurre en el mes de Febrero**. Esto significa que no somos los primeros en darnos cuenta de este hecho y que realmente es importante un estudio exhaustivo de los registros existentes para poder obtener una explicación correcta de los resultados.

Prensa Histórica:

Con la difusión de la alfabetización de la población y la aparición de los periódicos de masas, durante años se han publicado numerosas noticias de observaciones de bólidos y meteoros en prensa de distintas partes del mundo. Por ello resulta este ámbito idóneo para realizar un estudio estadístico de observaciones de superbóvidos a lo largo de la historia. Además, los habitantes anteriores a la conquista del aire, residían en áreas más rurales y no tenían el problema en confundir las caídas de superbóvidos con fenómenos que nada tienen que ver con ellos. Esto permite no solo la observación de aquellos que se presenten cercanos a poblaciones o con una gran intensidad. Esta es una de las principales ventajas de utilizar este tipo de fuentes. Además, los registros que aparecen en cualquier medio de comunicación deben tener un tamaño importante, por lo que facilita la selección de superbóvidos y no de cuerpos menores que podrían tener características distintas a las estudiadas. Se han analizado más de 500 artículos de prensa histórica buscando noticias relacionadas con meteoros importantes y caídas de meteoritos. Se ha utilizado como referencia el periódico *New York Times* y registros de la Biblioteca Nacional (Biblioteca Nacional Española). Con más de 100 revistas españolas se tienen 797 eventos susceptibles de ser considerados como bólidos, mayoritariamente entre los años 1850 y 2000.

Fireball and Bolide Reports (NASA):

Hay una serie de equipos de la NASA que se dedica a estudiar los tránsitos de objetos cercanos a la Tierra (NEO, Near-Earth Object). En la actualidad utiliza una técnica de búsqueda basada en los registrados mediante sensores militares. Su fundamento es el de localizar impactos de este tipo de cuerpos mediante detecciones de una red de infrasonido (con una nave de seguimiento aéreo cedida por la Fuerza Aérea de EE.UU.). Estos datos gubernamentales del Jet Propulsion Laboratory (JPL) se hicieron públicos a modo de registro desde el año 2013. En el proyecto denominado *Near Earth Object Program* la NASA publica datos de bolas de fuego lo suficiente brillantes como para ser visto en un área muy amplia de cielo, señalando características como fecha, latitud, longitud, altitud, energía total radiada e incluso las componentes cartesianas de la velocidad en algunos de los casos. Los datos se extienden desde el año 2005 hasta la actualidad, generando hasta la realización del trabajo un total de 330 eventos registrados.

SAO / NASA Sistema Astrofísico de dato:

Muchas caídas de bólidos de gran tamaño son estudiados en profundidad por numerosos investigadores. Por este motivo se encuentra un número elevado de sucesos en documentos registrados en el Sistema de SAO / NASA Astrofísica de datos (ADS). A partir de los trabajos de este portal se han recopilado 2052 eventos en el rango de 1800 hasta la actualidad. Cabe tener en cuenta que estos datos son principalmente de superbóvidos porque las observaciones y la toma de datos se realiza sobre ellos y no sobre meteoros de menor tamaño.

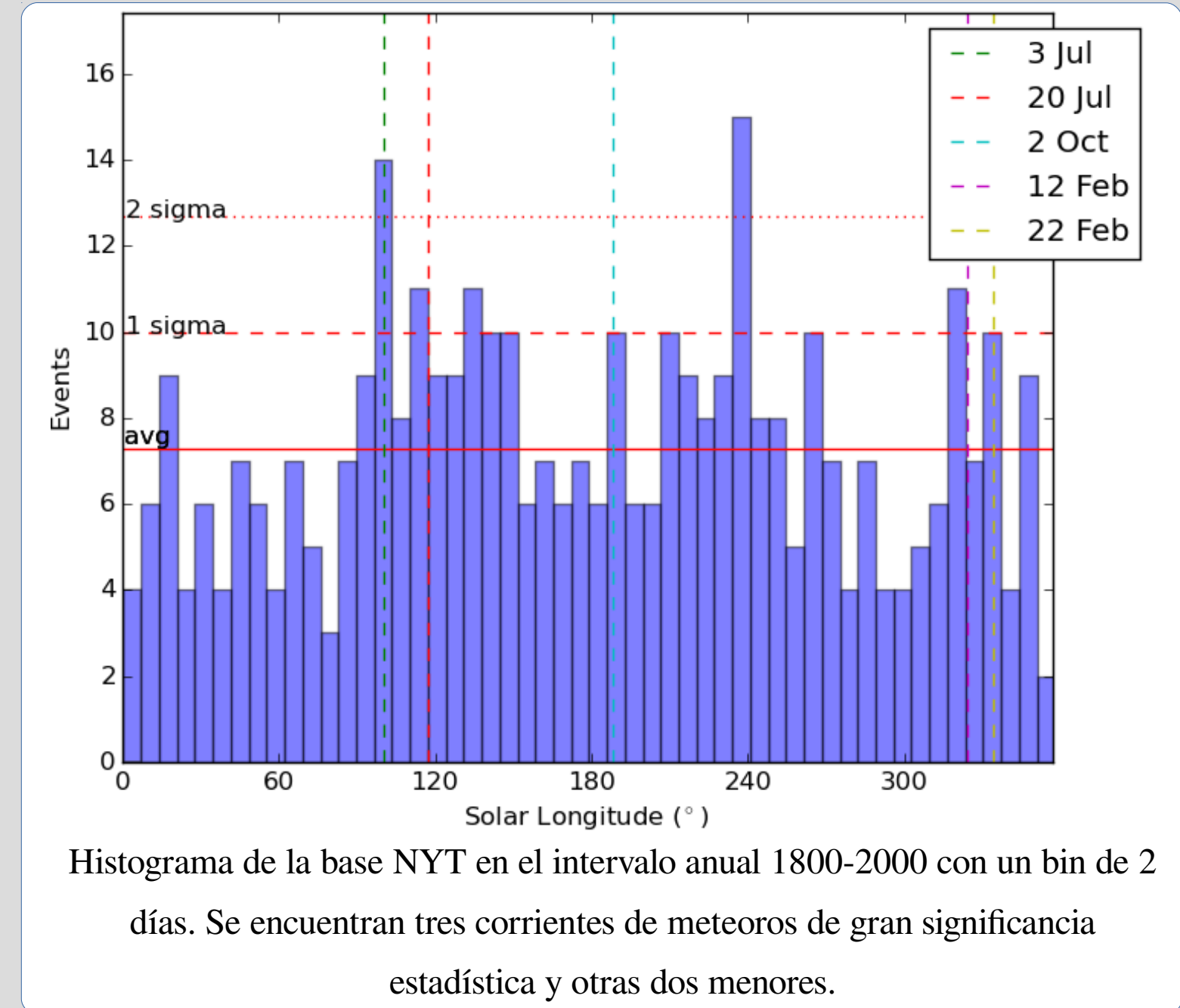
BAAS:

De manera adicional se ha realizado un reanálisis de "*A Catalogue of Meteorites and Fireballs, from A.D. 2 to A.D. 1860*" (R.P. Greg, Esq., F.G.S., BAAS y suplementos, 1860). El propósito de la selección de la misma es comparar el método, el software y el análisis estadístico realizado a todas las mencionadas anteriormente. Tiene numerosas entradas, sin embargo se ha establecido una cota inferior en el año 1000. En total se tienen 1634 entradas con las que se pretenden obtener resultados similares a los de otros estudios.

RESULTADOS ANUALES

Los informes recogidos del *New York Times* los últimos 150 años son los que más resultados han proporcionado hasta el momento. A continuación se muestran picos con sobreabundancias estadísticamente significativas para todo el rango de longitudes solares (fechas en época de 2015). Se ha considerado de importancia mencionarlos aunque el trabajo posterior solo se centra en dos de ellos:

- 3 de julio ($\lambda\odot = 101^\circ$)
- 20 de julio ($\lambda\odot = 117^\circ$)
- 2 de octubre ($\lambda\odot = 188^\circ$)
- 12 de febrero ($\lambda\odot = 323^\circ$)
- 22 de febrero ($\lambda\odot = 333^\circ$)



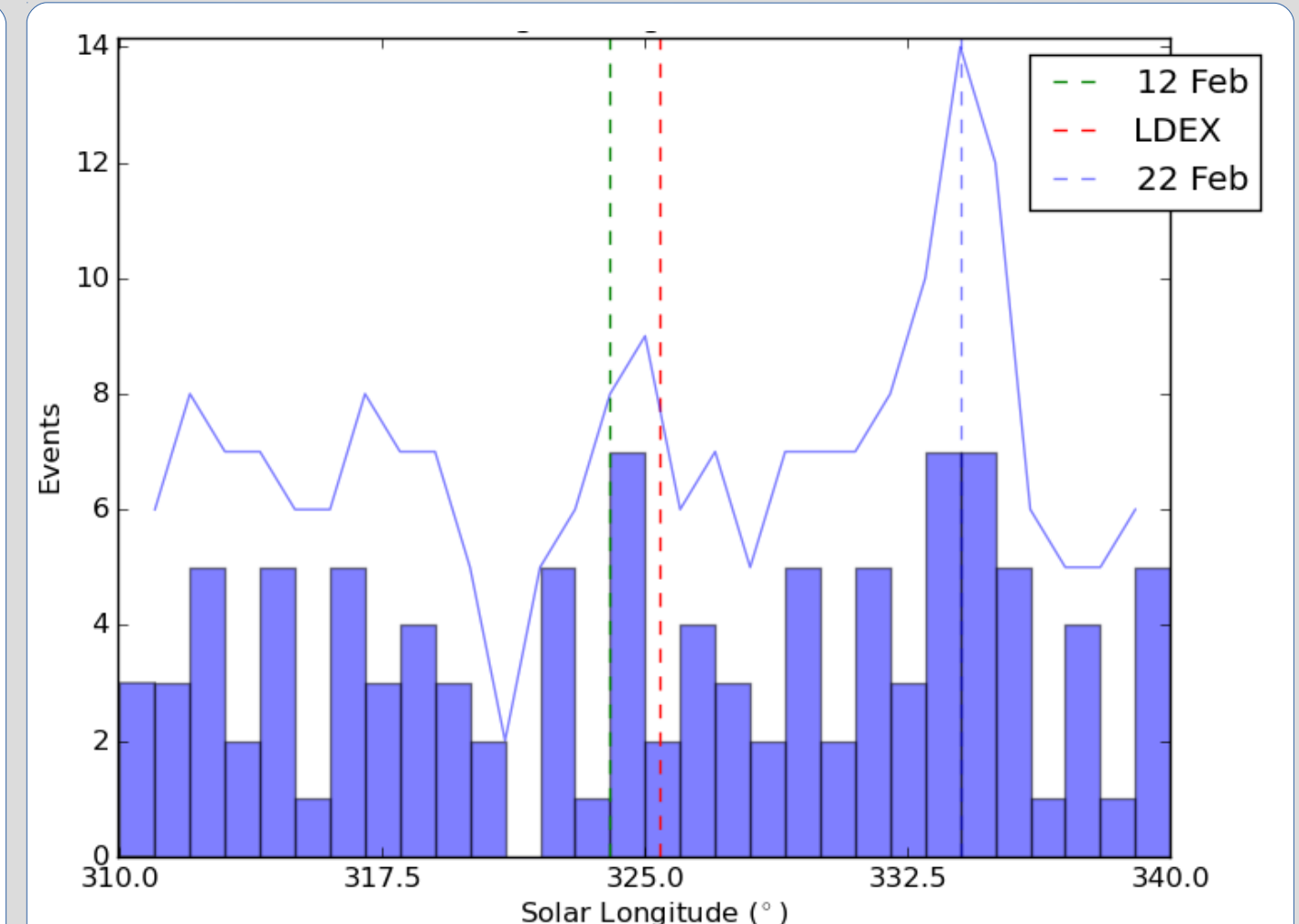
Histograma de la base NYT en el intervalo anual 1800-2000 con un bin de 2 días. Se encuentran tres corrientes de meteoros de gran significancia estadística y otras dos menores.

RESULTADOS DE FEBRERO

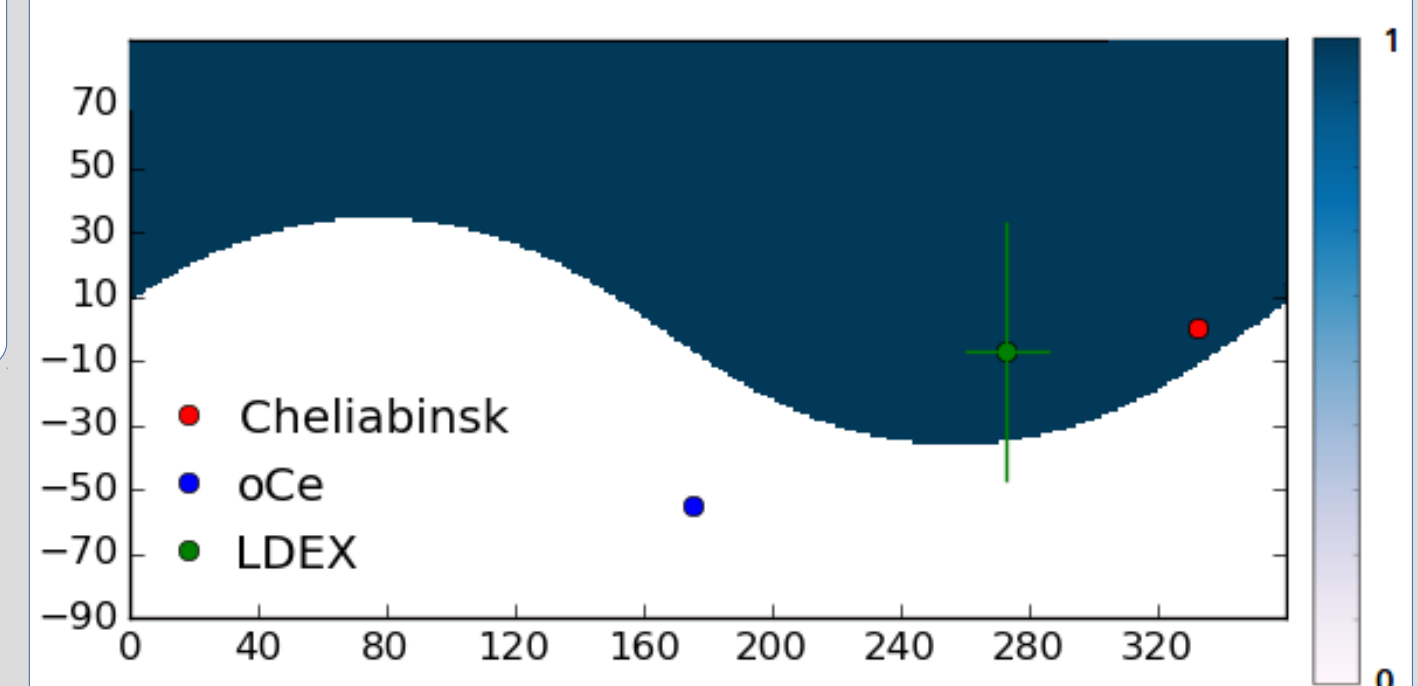
Para realizar un estudio más exhaustivo del mes de Febrero en particular se han considerado longitudes solares desde 310 hasta 340°. Se ha seleccionado un intervalo algo mayor al del periodo de interés para evitar, en la medida de lo posible, la pérdida de datos en los extremos de la muestra al realizar el tratamiento estadístico. Se han utilizado las fechas y las horas de los diferentes registros que componen las bases. Se ha cambiado de hora local a hora universal con las coordenadas oficiales de cada país y se han tomado los errores asumiendo que se han podido producir algunos errores referidos a modificaciones horarias particulares. Como se menciona en [4], para Febrero se encuentran en intervalos de 2 y 3 bins. Con ellos se obtienen los siguientes resultados:

- New York Times.** Para bin-2 se tiene la del día 12 con 1σ y la del día 22 con más de 2σ . En el caso de bin-3 se tienen ambas con una significancia de 1σ .
- Proyecto NASA.** Para bin-2 aparecen dos tendencias de más de 1σ algo desplazadas respecto a los días señalados. Para bin-3 se encuentra la del día 22.
- ADS:** Para bin 2 ocurre lo mismo que en el caso anterior. Para bin-3 aparece la del 22 y parece pronunciarse levemente la del 12 ($<1\sigma$).
- BAAS:** Para bin-2 aparecen ambas sobreabundancias (1σ y 2σ respectivamente para bin-2 y 2σ para bin-3). Aparece en torno a $\lambda\odot = 310^\circ$.

En todo este tratamiento solo se han realizado agrupaciones por intervalos/bins. La forma de reunir los datos puede afectar notablemente a los resultados. Para evitarlo se ha realizado la media móvil (*moving average*) para todas las bases de forma conjunta. Se concluye que los dos picos postulados existen de este modo, el del día 22 de febrero con mayor significancia que el del día 12.



Comparación de la detección de LDEX (Jamey R. Szalay, Mihály Horányi, 2016 [7]) y lo propuesto en este trabajo.



Zona de cielo visible y radiante del meteorito de Cheliábinsk (Popova, 2013), resultados de LDEX (Jamey R. Szalay, 2016 [7]).