

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
CIENCIA Y TECNOLOGÍA ESPACIAL**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

IMPACTOS Y SUPERBÓLIDOS EN JÚPITER

Estudiante *Sánchez Arregui, Mikel*
Director/a *Hueso Alonso, Ricardo*
Departamento *Física Aplicada*
Curso académico *2021/2022*

Bilbao, 15 de septiembre de 2022

Abstract

Desde que en el verano de 1994 se observaran los impactos de los fragmentos del cometa Shoemaker-Levy 9 (SL9) sobre Júpiter, se han registrado impactos de diferentes características en el gigante gaseoso. Un impacto fue observado en 2009 de un objeto de 500 m de tamaño y dos impactos más fueron observados en el verano de 2010. Aunque estos dos no fuesen de tamaños comparables a los anteriores, generaron breves flashes de 1-2 segundos de duración. Posteriormente, se han seguido observando impactos semejantes en Júpiter causados por pequeños objetos de unos 5-20 m de diámetro, creando grandes bolas de fuego en la atmósfera que son detectadas por astrónomos aficionados. El estudio de estos impactos arroja luz sobre las características del propio bólido, como composición, tamaño y masa, y de esa información podremos extraer el origen de estos objetos. Recientemente, se han encontrado tres nuevos flashes de luz en Júpiter causados por impactos: el 11 de agosto de 2020, el 13 de septiembre de 2021 y el 15 de octubre de 2021. El objetivo de este proyecto es dar continuidad a la investigación hasta ahora realizada estudiando las características de estos últimos tres impactos.

1994ko udan Shoemaker-Levy 9 kometaren puskak Jupiter jo zutenetik, ezaugarri desberdineko inpaktuak detektatu dira. 2009an 500 metroko tamaina zuen objektu batek jo zuen planeta eta 2010ean beste bi inpaktu gehiago behatu ziren. Azkenengo hauek tamainan askoz txikiagoak baziren ere, Lurretik detekta zitezkeen 1-2 segunduko flashak sortu zituzten. Ondoren, 5-20 metroko tamaina duten objetuen talkak detektatzen jarraitu dira, sortzen dituzten distira handiak astronomo afizionatuak behaturik. Inpaktu hauen ikerketek objektuen konposaketa, tamaina eta masari buruzko datuak lortzea ahalbidetzen du; horrela, objektuen jatorriari buruzko informazioa erdietsiz. Azken urteotan Jupiterren gertatutako inpaktuen beste hiru argi flash detektatu dira: 2020ko abuztuaren 11an, 2021eko irailaren 13an eta 2021eko urriaren 15ean. Proiektu honen helburua orain arte egindako ikerketari jarraitasuna ematea izango da azken hiru inpaktu hauen ezaugarriak aztertuz.

Since the impacts of the fragments of comet Shoemaker-Levy 9 (SL9) on Jupiter were observed in the summer of 1994, impacts of different characteristics have been recorded in the gas giant. One impact was observed in 2009 from a 500 m object and two more impacts were observed in the summer of 2010. Although these two were not of comparable sizes to the previous ones, they generated large amounts of light observed from Earth as brief flashes of 1-2 seconds. Subsequently, similar impacts have continued to be observed on Jupiter caused by small objects of about 5-20 m in diameter creating large fireballs in the atmosphere that are detected by amateur astronomers. The study of these impacts sheds light on the characteristics of the bolide itself, such as composition, size and mass and from that information we can extract the origin of these objects. Three new flashes of light caused by impacts have recently been found on Jupiter: the 11th of August 2020, the 13th of September 2021 and the 15th of October 2021. The objective of this project is to give continuity to the research carried out so far by studying the characteristics of these last three impacts.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Impactos de gran escala	1
1.2. Bóolidos y superbóolidos en la atmósfera joviana	2
1.3. Objetivos	5
2. Impactos 2020 y 2021	7
2.1. Impacto del 11 de agosto de 2020	7
2.2. Impacto del 13 septiembre de 2021	8
2.3. Impacto del 15 octubre de 2021	11
3. Curvas de luz	14
3.1. Método de análisis	14
3.2. Resultados	17
4. Metodología para la calibración energética	21
4.1. Método general	21
4.2. Resultados	25
5. Energía, masa y tamaño de los impactos	32
5.1. Impacto del 11 de agosto de 2020	33
5.2. Impacto del 13 de septiembre de 2021	34
5.3. Impacto del 15 de octubre de 2021	34
5.4. Discusión	35
6. Frecuencia de impactos en Júpiter	37
7. Conclusiones	41

Capítulo 1

Introducción

El Sistema Solar es un sistema planetario complejo con un gran abanico de objetos y procesos que lo conforman. Más allá de los planetas y el Sol, que suponen el 99.86 % de la masa de todo el sistema, existen objetos más pequeños que han jugado un papel fundamental en el Sistema Solar. Los cuerpos menores del Sistema Solar conforman un grupo de objetos muy amplio con tamaños de entre 1000 km y 1 m y contienen familias dinámicas muy diversas como asteroides, centauros, objetos transneptunianos y cometas. Algunos de los objetos más pequeños de estas clases pueden ser objetos inalterados desde la época de formación del Sistema Solar. Por lo tanto, el estudio de estos será vital para entender los procesos de formación de sistemas planetarios y poder elaborar una teoría sólida.

Debido a la importancia de estudiar estos objetos, observatorios terrestres y espaciales se dedican a observarlos y caracterizarlos. Además, dado que estos objetos vagan por el espacio y pueden ser potencialmente peligrosos si chocasen contra la Tierra, por ejemplo, también se intenta caracterizar sus órbitas. Algunos de estos objetos pueden tener órbitas con pasos cercanos a los planetas del Sistema Solar y los objetos de mayor masa pueden aumentar la sección eficaz con la que pueden recibir impactos de estos pequeños cuerpos.

1.1. Impactos de gran escala

El mayor planeta del sistema es el gigante gaseoso Júpiter. Este se encuentra a unas 5 UA del Sol, tiene un radio medio de 69911 km y una masa de $1898,13 \times 10^{24}$ kg, 318 veces la masa de la Tierra. Debido a su gran tamaño, posee una sección eficaz 125 veces mayor que la de la Tierra. Si a este dato le sumamos que la atracción gravitatoria que ejerce es mucho más intensa, tenemos las condiciones perfectas para que estos impactos ocurran con más frecuencia. En el año 1993, los astrónomos Carolyn S. Shoemaker y David H. Levy descubrieron un cometa que se encontraba en una trayectoria de colisión con el planeta Júpiter. Este cometa, un año antes, había realizado un acercamiento extremo al planeta que había causado su ruptura en una veintena de fragmentos por las fuerzas de marea en su paso cercano. El 16 de julio de 1994, el fragmento A del cometa Shoemaker-Levy 9 (SL9) impactó contra la atmósfera joviana a unos 60 km/s. En total cerca de 21 fragmentos impactaron contra la atmósfera creando explosiones de luz visibles desde la Tierra y desde la misión Galileo en su aproximación al planeta Júpiter [1][2]. Dichos impactos dejaron restos de partículas muy oscuras en la atmósfera superior del planeta que fueron visibles durante días o meses en los fragmentos de mayor tamaño (Figura 1.1).

El 19 de julio de 2009 otro objeto de alrededor de 500-1000 m impactó contra el gigante gaseoso. La huella de este impacto fue descubierta por el astrónomo amateur Anthony Wesley horas después de que se produjera el impacto en el lado nocturno del planeta [3].

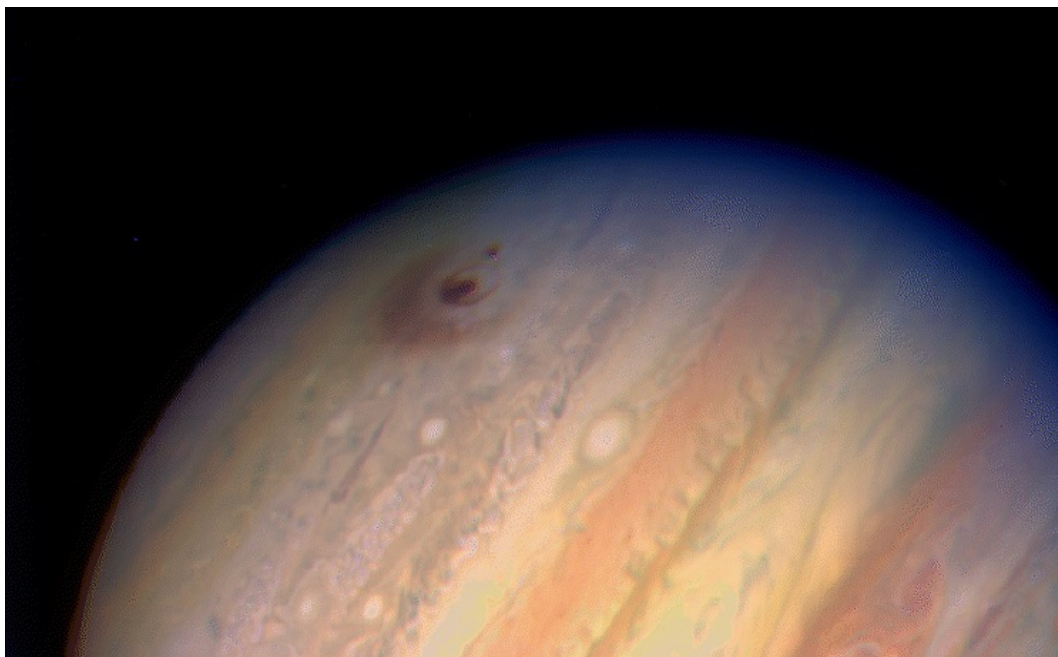


Figura 1.1: Huella de los impactos del SL-9 observados desde la sonda Galileo.

Estos impactos son los únicos de gran escala que se han observado hasta la fecha. Hasta la observación del impacto de 2009 se creía que la frecuencia de impactos de este tipo en Júpiter sería de centenares de años. Después de ese impacto, el periodo de colisiones de tamaños comparables fue reducido a 15 años. Además, teniendo en cuenta que cerca de 4 meses al año la observación de Júpiter es muy difícil por la pequeña separación angular entre Júpiter y el Sol vistos desde la Tierra, se podría ver reducido a un impacto cada década [3].

1.2. Bóolidos y superbóolidos en la atmósfera joviana

En los últimos años objetos de menor tamaño han impactado contra la atmósfera joviana con mayor frecuencia. Los objetos de entre 5 y 20 metros de diámetro son denominados superbóolidos y, hasta la fecha, se han observado ocho impactos de este tipo.

El primer impacto fue detectado el 3 de junio de 2010. Este impacto fue detectado simultáneamente por dos observadores amateur independientes: Anthony Wesley (Australia) y Christopher Go (Filipinas); y fue estudiado por Hueso et al. (2013) [4]. Ambos observadores obtuvieron vídeos de la observación de esa noche. En las observaciones se puede observar un flash de luz de alrededor de 2 s de duración en la región ecuatorial cerca del limbo. Para realizar la observación Anthony Wesley utilizó un telescopio de 37 cm de apertura y Christopher Go uno de 28 cm. Ambos usaron la misma cámara monocroma, Flea3, con el chip ICX618ALA; aunque usaron diferentes filtros: rojo (650nm) y azul (435nm), respectivamente. Dado que las dos detecciones se realizaron a distancias

considerables entre sí, se concluyó que el evento ocurrió en la atmósfera joviana y no en la terrestre. En el análisis de las dos curvas de luz obtenidas para este impacto se concluyó que el diámetro de objeto era de alrededor de 10 m. Observaciones hechas entre 10 y 40 horas después del impacto por telescopios como el IRTF de 3.5m de Hawaii, el Very Large Telescope (VLT) de 8.0 m de Chile y el Hubble desde el espacio no detectaron ninguna huella, como en los casos del SL9 o del objeto de julio de 2009, al ser este de un tamaño mucho menor. La energía total asociada a este bólido fue de $(1,9 - 14) \times 10^{14}$ J, equivalente a 46-350 kilotonnes (ktn), y una masa de 105-780 toneladas (ton).

El 20 de agosto de 2010 fue observado el segundo impacto de estas características. El impacto fue anunciado por el astrónomo amateur Masayuki Tachikawa (Kumamoto, Japón), pero lo detectaron hasta tres observadores más: Kazuo Aoki (Tokio, Japón), Masayuki Ichimaru (Toyama, Japón) y Takanori Wakamatsu (Arita, Japón). Los vídeos tomados por Masayuki Tachikawa y Kazuo Aoki fueron obtenidos por cámaras Philips ToUcam Pro II y el de Masayuki Ichimaru fue grabado de una proyección de un ocular de 7 mm. Todos los telescopios fueron de tipo refractor con apertura de 15 cm (M. Tachikawa), 23.5 cm (K. Aoki) y 12.5 cm (M. Ichimaru). En general, las observaciones fueron de peor calidad comparadas con las del impacto anterior. La energía cinética correspondiente a este impacto fue de $(3,7 - 11) \times 10^{14}$ J, 88-260 ktn, y la masa de entre 205 y 610 ton [5].

Dos años más tarde, el 10 de septiembre de 2012, fue observado el tercer impacto de estas características por dos observadores. Primero, fue observado, pero no grabado, por Dan Petersen (Racine, Wisconsin, USA) y, después de reportar la observación, George Hall (Dallas, Texas, USA) lo detectó en una de sus observaciones. El impacto, aproximadamente de 2 s de duración, fue localizado cerca del limbo este del planeta. G.Hall utilizó un telescopio de apertura de 30.5 cm y una cámara Point Grey Flea3 con un filtro rojo (640 nm). Una vez más, la gran distancia entre observadores, alrededor de 1300 km, confirmaba el origen joviano del impacto. Este impacto fue sustancialmente más brillante, estimando una energía total de $(9,0 - 17) \times 10^{14}$ J, 215-405 ktn, y la masa de 500 - 950 ton [5].

El siguiente impacto ocurrió el 17 de marzo de 2016. Este fue anunciado por Gerrit Kernbauer (Austria) horas más tarde del evento debido al bajo *seeing* que retrasó el análisis del video. Después del anuncio, John McKeon (Irlanda) revisó la grabación del planeta tomada esa misma noche y confirmó dicho impacto con un vídeo de mayor calidad. Las cámaras utilizadas fueron una QHY5LII para el video de G. Kernbauer y una ASI120MM con un filtro IR742 para J. McKeon. Dichas cámaras fueron acopladas a telescopios de 20 y 28 cm de apertura, respectivamente. De este impacto se extrajeron unos valores de energía cinética y masa muy parecidos al último detectado hasta esa fecha, 2012-09-10. Concretamente, valores de energía cinética de $(7,3 - 14) \times 10^{14}$ J y de masa de 403-805 ton.

Un año más tarde, el 26 de mayo de 2017, un nuevo impacto fue anunciado por un astrónomo aficionado, Sauveur Pedranghelu (Córcega, Francia). Una vez más, debido al anuncio, los astrónomos alemanes Thomas Riessler y André Fleckstein revisaron sus observaciones y confirmaron el impacto. En estas observaciones fueron utilizados telescopios de 20.3 cm de apertura para los dos primeros casos y de 28 cm para el último. Los dos primeros observadores, T. Riessler y A. Fleckstein, utilizaron una cámara ASI224MC y una ASI120MC respectivamente, y obtuvieron vídeos de muy alta calidad. En el caso de

A. Fleckestein el vídeo obtenido con la cámara ASII120MM fue de peor calidad debido al *seeing* atmosférico. De los cinco impactos analizados hasta el momento y mencionados aquí, este fue el menos energético de todos. Se le asocia una energía cinética de $(1,3 - 2,3) \times 10^{14}$ J, 32-55 ktn, y una masa de 75-130 toneladas. En la siguiente figura se puede observar una composición de imágenes correspondientes a los cinco impactos mencionados anteriormente.

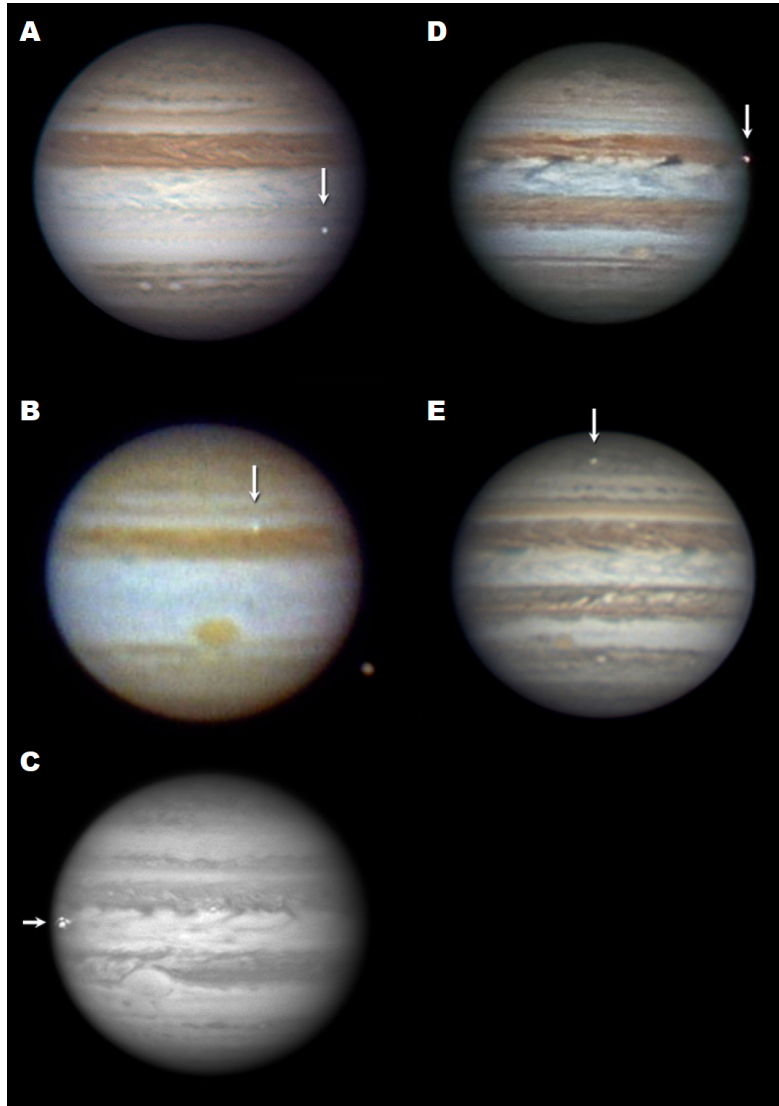


Figura 1.2: Composición de imágenes tomadas de los impactos. A: 3 de junio de 2010. B: 20 de agosto de 2010. C: 10 de septiembre de 2012. D: 17 de marzo de 2016. E: 26 de mayo de 2017. Imágenes extraídas del artículo de Hueso et al. (2018) [6].

Se han observado también impactos de objetos aún más pequeños. En el año 2020, el espectrógrafo Juno UVS de la nave Juno capturó la emisión de una fuente puntual brillante en la atmósfera de Júpiter, concretamente, 225 km por encima del nivel de presión de 1 bar [7]. Se calculó que el objeto que causó esa emisión de alrededor de 17 ms tenía una masa de entre 250 y 5000 kg, es decir, un objeto de 1-4 m de diámetro.

Los impactos de objetos de 5-20 m de diámetro tienen una duración aproximada de entre 1 y 2 segundos y los destellos de luz generados al impactar contra la atmósfera son de baja intensidad al ser de tamaños pequeños. Por lo tanto, ser capaces de observar este

tipo de fenómenos de manera directa tiene una probabilidad muy baja. A partir de la estadística inferida de los cinco impactos ocurridos entre 2010 y 2017, Hueso et al. (2018) estimó una tasa de 4-25 impactos detectables por año [6]. La tasa aumenta a 10-65 si tenemos en cuenta las correcciones debidas a las dificultades en la observación del planeta a lo largo del año. Por ese motivo, es crucial acumular muchas horas de observación que hagan aumentar esa probabilidad. Conseguir muchas horas de observación en grandes observatorios para detectar estos eventos es muy difícil. Por este motivo, los observadores aficionados juegan un papel imprescindible a la hora de acumular horas de observación. La probabilidad aumenta al existir una gran cantidad de observadores que se dedican a observar de manera regular Júpiter.

El método más factible de poder detectar estos impactos será el de analizar los vídeos obtenidos de cada noche de observación. Igualmente, esta solución tiene el inconveniente de que estaremos buscando un destello de unos pocos segundos en vídeos de horas de duración. Con el objetivo de facilitar y sistematizar esa búsqueda, en el año 2011 fue desarrollado un software libre de detección, DeTeCt. Este software fue creado por Luis Calderón y Ricardo Hueso como parte del trabajo de fin de máster del primero de ellos [8]. El software opera generando una imagen de referencia que va a ser comparada con el *frame* que se este analizando en cada momento mediante fotometría diferencial [9]. Una vez se aplique la fotometría diferencial se registrará la localización del pixel más brillante y se actualizará la imagen de referencia para analizar el siguiente *frame*. Finalmente, el programa estudiará los valores y localización del pixel más brillante en cada *frame*, si el valor de brillo supera un límite establecido y esos pixels se ubican a una distancia máxima de 10 pixels entre sí, se generará un mensaje de alerta de detección. A lo largo de los años se han publicado versiones actualizadas del software por Marc Delcroix, disponibles en http://www.astrosurf.com/planetessaf/doc/project_detect.php.

1.3. Objetivos

En la actualidad, más de 165 observadores colaboran en la detección de impactos en Júpiter utilizando el software DeTeCt. Esto ha permitido analizar más de 225,000 vídeos de Júpiter, equivalentes a más de 200 días de observación acumulada. Gracias a ello, se han detectado tres impactos más entre los años 2020 y 2021. El primero de ellos fue detectado 11 de agosto de 2020. El segundo fue detectado el 13 de septiembre de 2021 por hasta seis observadores diferentes y el último fue detectado el 15 de octubre de ese mismo año por tres observadores.

El objetivo de este proyecto es dar continuidad a los trabajos realizados hasta el momento y catalogar y analizar estos tres últimos impactos. Con este fin, vamos a analizar las curvas de luz obtenidas de las observaciones hechas de estos impactos. Después, transformaremos esas curvas de luz en datos de energía asociada al impacto y estimaremos las masas y tamaños de los objetos impactantes para compararlos con los resultados publicados por Hueso et al. (2018) de los eventos dados entre 2010 y 2017 [6] y con el estudio hecho por Arimatsu et al. (2022) del impacto del 15 de octubre de 2021 [10].

De esta manera, en el capítulo 2 se presentarán los datos correspondientes a estos impactos junto a los datos de los telescopios, cámaras, sensores y filtros utilizados. En el capítulo 3 se presentará el método de análisis de las curvas de luz y las propias curvas

obtenidas de los vídeos. En el capítulo 4 se expondrá el método de calibración utilizado sobre las curvas de luz, para exponer los resultados de dicha calibración en el siguiente capítulo. Para acabar, actualizaremos la estimación de la frecuencia de impactos en Júpiter y se expondrán las conclusiones.

Capítulo 2

Impactos 2020 y 2021

2.1. Impacto del 11 de agosto de 2020

El primer impacto a analizar en este trabajo fue capturado por el observador Victor PS Ang (Singapur)(Figura 2.1). Este bólido impactó con la atmósfera joviana el 11 de agosto de 2020, pero no fue descubierto hasta un año más tarde, concretamente, hasta el 3 de noviembre de 2021. Esto se debe a que el mismo Victor PS Ang observó el impacto del 15 de octubre de 2021 (Sección 2.3.), y después de encontrar dicho impacto decidió analizar vídeos anteriores en busca de algún impacto que hubiese podido pasar inadvertido. Así, gracias al software DeTeCt, pudo identificar este impacto de 1.5 s de duración aproximada.

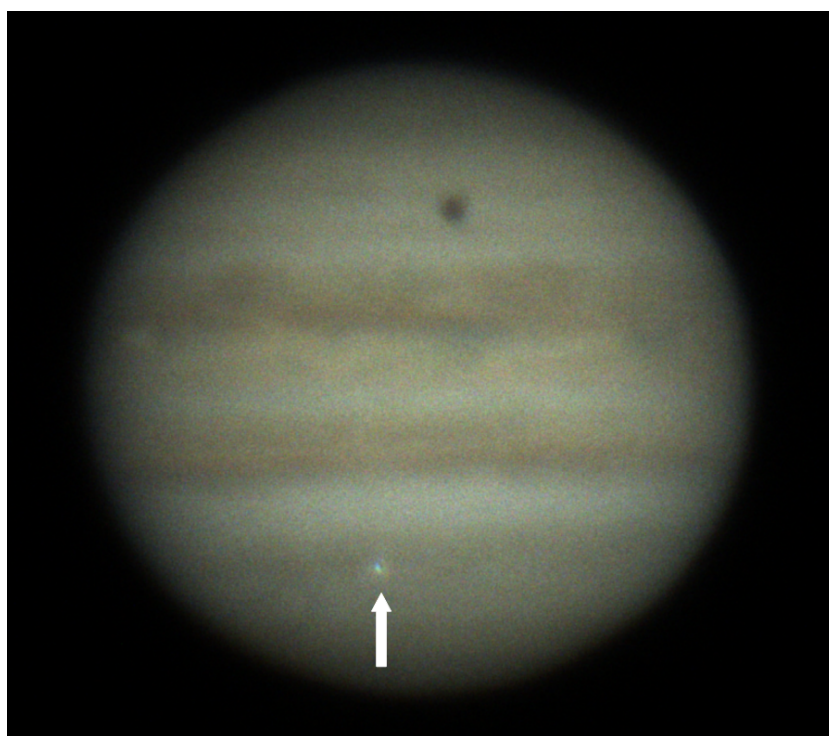


Figura 2.1: Impacto del 11 de agosto de 2020 observado por Victor PS Ang. La flecha indica la posición del impacto.

El telescopio utilizado para la observación fue un Celestron C14 de tipo Schmidt-Cassegrain con una apertura de 354 mm junto a una lente Barlow que proporcionaba un aumento de 2.5X. La cámara utilizada fue una ZWO ASI290MC con un detector

IMX291LQR tipo CMOS. Al final del capítulo, en la [Tabla 2.1](#), se recogen las características principales de las observaciones que se van a analizar en este trabajo.

En la [Figura 2.2](#) se presenta la respuesta espectral de dicho sensor. Este tipo de curvas serán de gran utilidad más adelante cuando presentemos la metodología para la calibración energética ([Capítulo 4](#)).

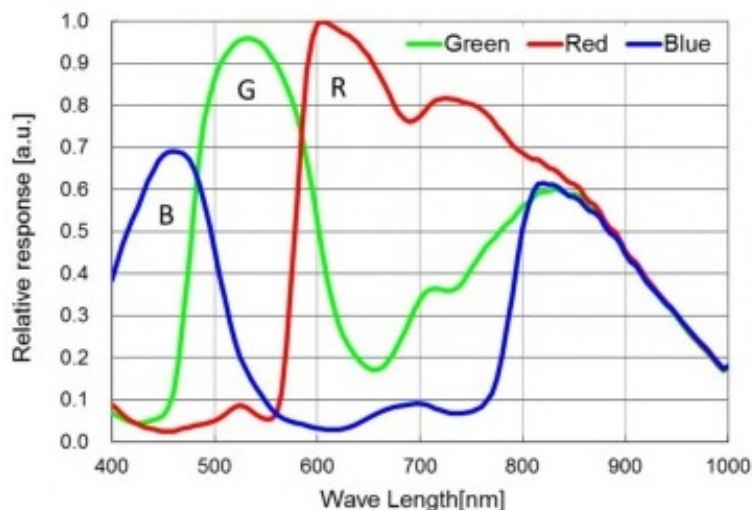


Figura 2.2: Respuesta espectral del sensor IMX291LQR utilizado por Victor PS Ang.

En la [Figura 2.1](#) se puede observar que el flash de luz de 1.5 s de duración generado por el impacto no es muy intenso. Si lo comparamos con las imágenes de los impactos anteriores, [Figura 1.2](#), vemos que el destello es parecido al del impacto del 26 de mayo de 2017 (Imagen E), impacto menos energético observado hasta la fecha [6]. El hecho de que sea poco brillante nos lleva a pensar que la energía liberada con este impacto no es muy alta y que, por lo tanto, este objeto no es de gran tamaño ni masa. En el [Capítulo 5](#) presentaremos los resultados obtenidos para las energías, masas y tamaños y comprobaremos los órdenes de magnitud relacionados con este impacto.

2.2. Impacto del 13 septiembre de 2021

El siguiente impacto detectado ocurrió el 13 de septiembre de 2021 a las 22:39:30 UT. Este evento fue detectado por hasta seis observadores diferentes, convirtiéndose así en el impacto más observado hasta la fecha. El primer observador fue el astrónomo amateur José Luis Pereira (Sao Paulo, Brasil). Las condiciones de observación esa noche no eran óptimas, pero revisando el vídeo obtenido de esa noche creyó observar un destello de luz. Pese a creer que ese destello se debía a efectos de *seeing*, utilizó el software DeTeCt para asegurarse de ello. A la mañana siguiente el software alertó que había encontrado un impacto en dicho vídeo. Cuatro observadores más detectaron el impacto esa misma noche de manera independiente y sin recibir noticias previas de la existencia del impacto. Simone Galelli (Villachiarra, Italia) y Maciej Libert (Bremerhaven, Alemania) lo detectaron, pero no guardaron ningún vídeo. El primero de ellos lo observó a través de su telescopio Dobson de 300 mm de apertura y el segundo lo observó con un telescopio de tipo Schmidt-Cassegrain de 350 mm de apertura, pero no lo grabó. Por último, dos observadores más capturaron el impacto: Harald Paleske (Langendorg, Alemania) y Jean-Paul

Arnould (Villey-le-sec, Francia). La duración del impacto varía dependiendo del vídeo que se estudie (2-3.7) s.

Una vez fue detectado este evento se alertó a la comunidad y se recuperaron cuatro observaciones más. Cuatro observadores amateurs franceses recibieron la alerta a través de redes sociales y decidieron revisar las observaciones hechas el día anterior desde el observatorio de AstroQueyras. Didier Walliang, Thibault Humbert, Stéphane Barré, Alexis Desmougin (Saint-Véran observatory, Francia) usaron el software DeTeCt y confirmaron el evento. Michel Jacquesson (Sévigny-Wallepe, Francia), gran colaborador del programa DeTeCt, también confirmó el impacto gracias al software. Sandu Val Cosmin (Rumania) creyó observar un destello la misma noche pero hasta que no se alertó a la comunidad no decidió revisar los vídeos. Una vez revisados confirmó la observación del impacto. Finalmente, Jean-Christophe Griveau (Mothern, Francia) también consiguió observar el impacto a través de su Schmidt-Cassegrain de 280 mm. En este trabajo se analizarán en detalle los vídeos de J.L. Pereira, H. Paleske, J.P. Arnould, M. Jacquesson y S. Val Cosmin. En la [Figura 2.3](#) se muestra una composición de las imágenes extraídas de los vídeos a analizar.

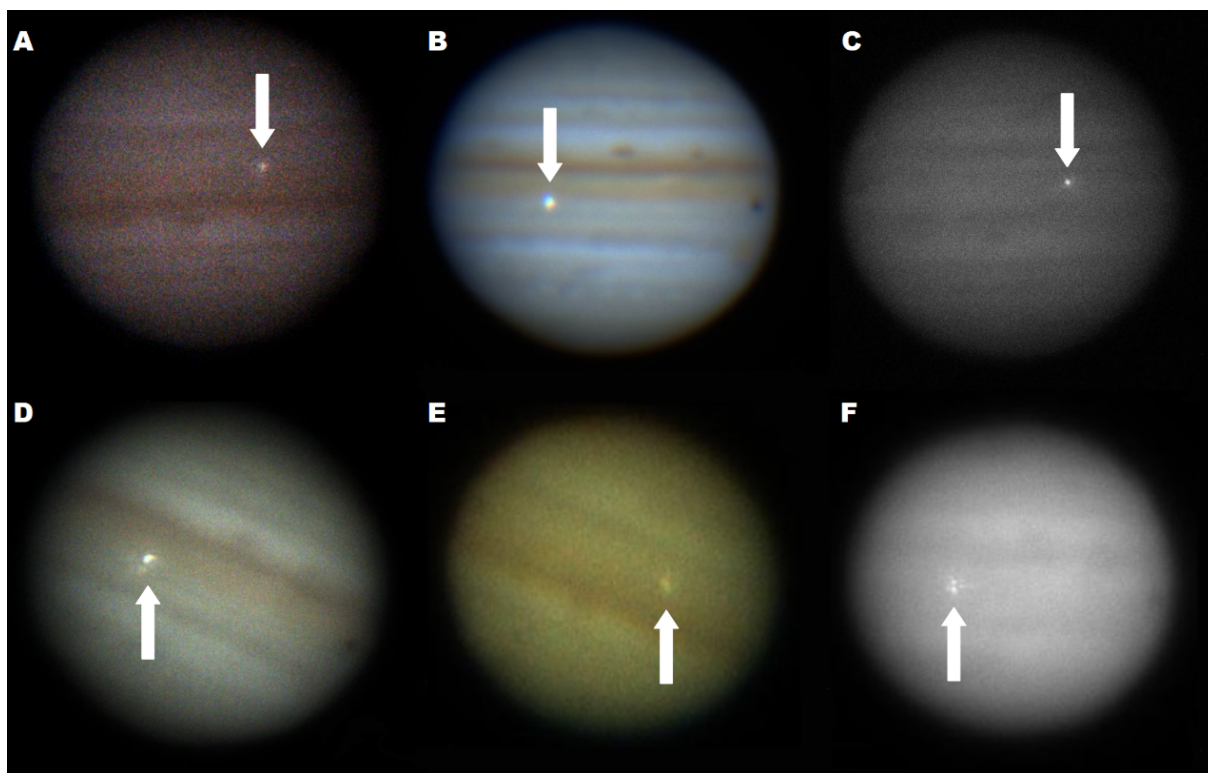
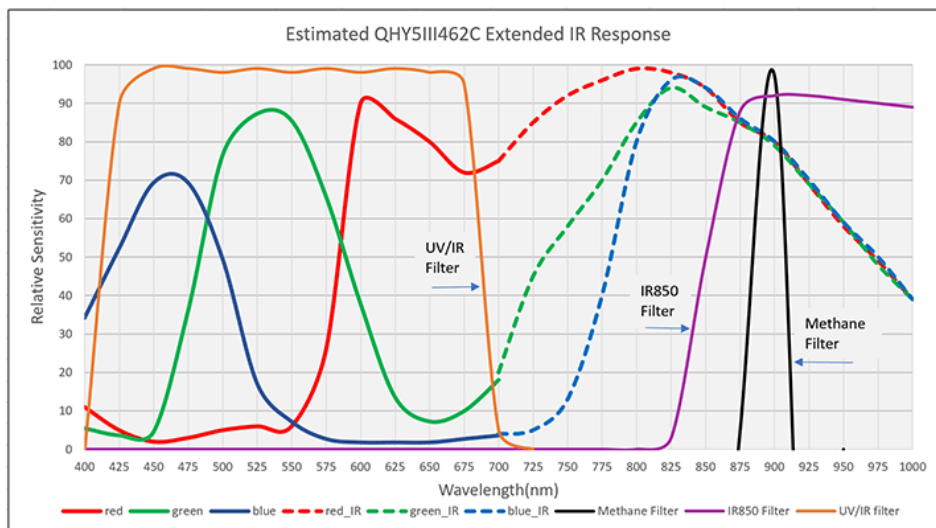


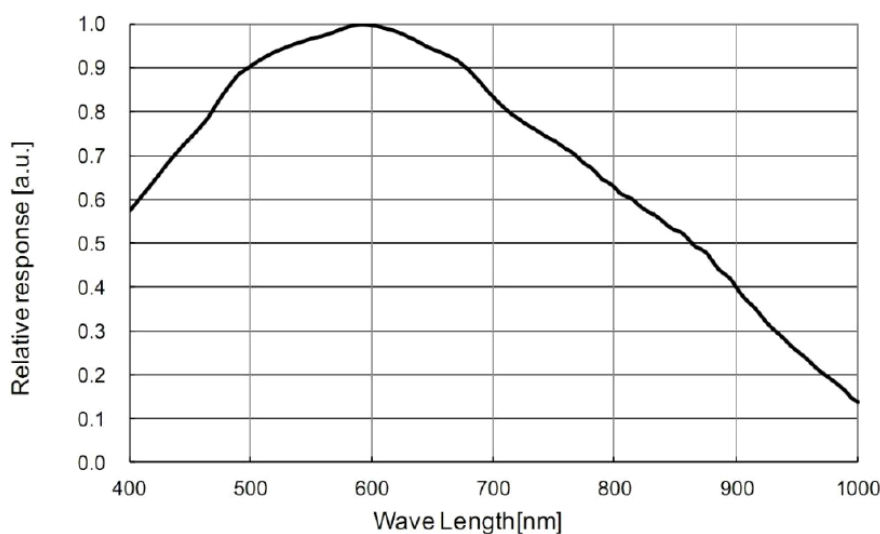
Figura 2.3: Composición de imágenes de el impacto del 13 de septiembre de 2021. Las flechas indican las posiciones de los impactos en cada imagen. A: José Luis Pereira. B: Didier Walliang, Thibault Humbert, Stéphane Barré, Alexis Desmougin. C: Harald Paleske. D: Jean-Paul Arnould. E: Michel Jacquesson. F: Sandu Val Cosmin. Nótese que algunos de estos telescopios tienen una inversión lateral (A, C, E).

Al tener un total de seis vídeos a analizar, tendremos que tener en cuenta las diferentes configuraciones utilizadas por cada observador en lo que se refiere a telescopios, cámaras y sensores. En los anteriores párrafos se han mencionado los telescopios utilizados por los observadores que no capturaron el impacto en vídeo (S. Galelli y M. Libert) o cuyo vídeo no se va a analizar en este trabajo (J.C. Griveau). El telescopio que utilizó el primer observador en detectar el impacto, José Luis Pereira, fue uno de tipo Newtoniano de 275 mm

de apertura. Utilizó la cámara planetaria QHY 5III 462C con un sensor IMX462. Además, este observador utilizó un filtro UV/IR que bloquea las contribuciones en el ultravioleta e infrarrojo cercano. Los observadores franceses del observatorio de AstroQueyras utilizaron un telescopio Cassegrain de 600 mm de apertura. La cámara utilizada fue una Svbonny SV305 con el sensor IMX290 tipo CMOS. Harald Paleske observó Júpiter con un telescopio Newtoniano de 408 mm. En este caso, el sensor fue un IMX178 monocromático. J.P.A. y M.J. utilizaron ambos un telescopio de tipo Schmidt-Cassegrain de 280 mm y 200 mm de apertura, respectivamente. El primero utilizó una cámara ZWO ASI120MC-S con un sensor AR0130CS y el segundo una ZWO ASI224MC con un sensor IMX224/IMX225 de tipo CMOS. Finalmente, S. Val Cosmin utilizó un Schmidt-Cassegrain de 280 mm de apertura. Y, al igual que Paleske., el detector era de tipo monocromático, concretamente un IMX290 LQR. En la [Tabla 2.1](#) se recogen las principales características observacionales mencionadas anteriormente y en la figura [Figura 2.4](#) están recogidas las gráficas de las respuestas espectrales de los sensores utilizados por Pereira y Cosmin.



(a)



(b)

Figura 2.4: Respuestas espectrales de los sensores. (a) José Luis Pereira: IMX462. (b) Sandu Val Cosmin: IMX290LQR.

Por lo general, si estudiamos la **Figura 2.3** podemos observar que el impacto es aparentemente más brillante, si lo comparamos con el del 11 de agosto de 2020. Más adelante comprobaremos si los órdenes de magnitud relacionados con este impacto son mayores, como se puede intuir a simple vista. De todos modos, será importante comprobar que los vídeos no saturan por exceso de brillo, ya que eso nos llevaría a trabajar con valores de energía, masa y tamaño inferiores, y que solo nos proporcionaría una cota mínima de estos parámetros.

Finalmente, como se ha podido comprobar con todos los vídeos, este impacto no dejó ninguna huella en la atmósfera que pudiese ser observada desde Tierra. El observador Maciej Libert, que no capturó el impacto, pero que si capturo el planeta justo después del impacto, examinó el planeta con un filtro de absorción de la banda del metano, pero tampoco observó ningún tipo de huella o traza.

2.3. Impacto del 15 octubre de 2021

Tan solo un mes después de la última detección, se observó otro impacto el 15 de octubre de 2021 a las 13:24:13 UTC de una duración aproximada de 5.5 s [10]. Por primera vez, el evento fue descubierto dentro de una búsqueda profesional hecha por el astrónomo Ko Arimatsu (Universidad de Kyoto, Japón). El descubrimiento se dio gracias al sistema de observación PONCOTS (Planetary ObservatioN Camera for Optical Transient Surveys) que tiene como objetivo investigar eventos transitorios de corta duración del Sistema Solar dentro del proyecto OASES (Organized Autotelescopes for Serendipitous Event Survey) [11].



Figura 2.5: Impacto del 11 de octubre de 2021 observado por Victor PS Ang. La flecha indica la posición del impacto.

El descubrimiento de Arimatsu se dio a través del observatorio ubicado en el techo del Campus Norte Yoshida de la Universidad de Kyoto. Ahí está ubicado el telescopio Celestron C11 de tipo Schmidt-Cassegrain de 279 mm de apertura. Este sistema está

equipado con dos cámaras: una QHY5III-290M con sensor SONY IMX290 y una Planetary one Neptune-CII con un sensor SONY IMX464. La primera de las cámaras está dirigida a observar en las bandas V (505-650 nm) y Gh (680-840 nm). La segunda se centra en observar en la banda del CH₄ (880-900 nm) [10]. Esta última banda es de gran utilidad en este tipo de observaciones, ya que las nubes de metano del planeta aparecen oscuras y sólo las nubes que se encuentren más altas y cuya luz haya sido menos absorbida aparecen brillantes, como es el caso de estos impactos que ocurren en la alta atmósfera. Esto permite que en el caso de registrarse un flash de luz proveniente de un impacto, este tenga un alto grado de contraste con el fondo oscuro del planeta. Además, al observarse a una longitud de onda larga (890 nm) es posible mediante la comparación con observaciones en el visible estimar la temperatura de brillo del flash de luz.

PONCOTS monitoreo el planeta durante los siguientes 16 minutos después del impacto. No se observó ninguna huella o rastro en la atmósfera en ese rango de tiempo. 28 horas después del impacto, la cámara JunoCam de la sonda Juno tomó imágenes de la región del impacto. Cerca de la región del impacto se pudo ver una ligera estructura oscura (Figura 2.6). De todas formas, no existen evidencias de que estén relacionadas con el impacto.

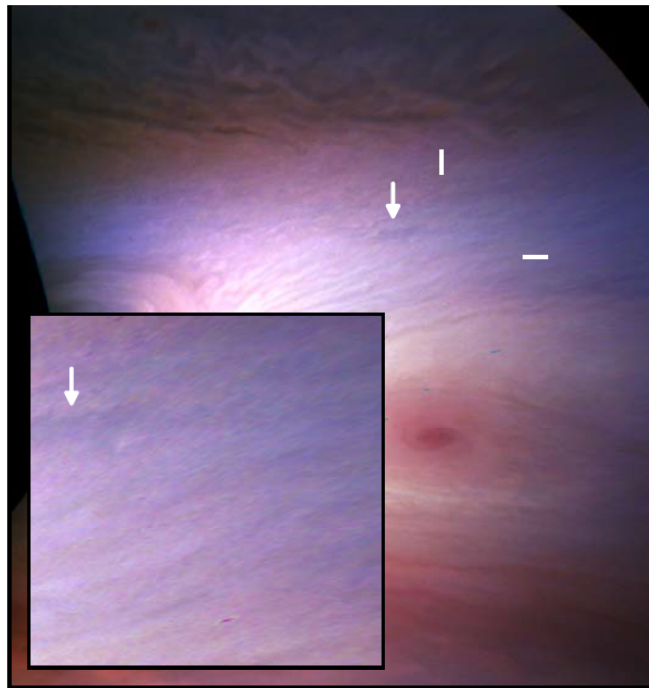


Figura 2.6: Imagen tomada por la cámara JunoCam en los tres canales de color 28 horas después del impacto. Zoom hecho en la región del impacto. Las líneas blancas indican la localización del impacto y la flecha indica la ligera estructura oscura. Imagen extraída del artículo de Arimatsu et al. (2022) [10].

Una vez más, se dio la alerta del descubrimiento y dos observadores amateur corroboraron el descubrimiento dentro de sus observaciones: Victor PS Ang (Singapur) y “yotsu” (Aichi, Japón). En la Figura 2.5 podemos observar una imagen del impacto extraído del vídeo de Victor PS Ang. El observador captó un flash de luz de aproximadamente 5 s de duración con el mismo telescopio que usó para la observación del 11 de agosto de 2020: C14 Schmidt-Cassegrain 354 mm. De la misma manera, la cámara y sensor fueron las mismas que se han nombrado en la Sección 2.1.

Dado que la dinámica hasta ahora ha sido la de estudiar los datos obtenidos mediante observaciones amateur, el objetivo con este impacto será analizar los datos obtenidos de la observación de Victor PS Ang y compararlos con el estudio hecho por Arimatsu et al. (2022) [10]. En este trabajo no se estudiarán los datos extraídos de la observación de “yotsu” al carecer de los detalles suficientes para llevar dicho estudio.

La **Tabla 2.1** resume los aspectos observaciones esenciales de las diferentes observaciones de los tres impactos que serán analizados en este trabajo.

Fecha (Hora UTC)	Observador (localización)	Diámetro del telescopio	Cámara	Filtro	Fps	Durac. flash
2020-08-11 (14:41:48)	V. PS Ang (Singapur)	35.4 cm	ASI290MC	-	58.14	1.52 s
2021-09-13 (22:39:30)	J.L. Pereira (Brasil)	27.5 cm	QHY5III462C	UV/IR	63.90	3.6 s
	AstroQueyras ^(a) (Francia)	60 cm	Svbony SV305	-	50	3.6 s
	H. Paleske (Alemania)	40.8 cm	ASI178MM	-	46.19	-
	J.P. Arnould (Francia)	28 cm	ASI120MC-S	-	44.73	2.7 s
	M. Jacquesson (Francia)	20 cm	ASI224MC	-	50	2 s
	S.V. Cosmin (Rumania)	28 cm	ASI290MM	-	33.44	-
2021-10-15 (13:24:10)	K. Arimatsu (Japón)	27.9 cm	P.O. Neptune-CII	CH ₄	10	5.5 s
	V. PS Ang (Singapur)	35.4 cm	ASI290MC	-	64.10	5 s

Tabla 2.1: Resumen de datos relevantes de los observadores e instrumentación. ^(a)Reducido al nombre del observatorio por simplicidad.

Capítulo 3

Curvas de luz

El primer paso a seguir en el estudio de estos impactos será convertir los vídeos de cada observación en curvas de luz. Para ello, debemos transformar los archivos de vídeo de cada observación en frames con valores numéricos asignados para cada pixel. Estos valores carecerán de sentido físico hasta que los calibremos y, entonces, podremos hablar de valores de energía o masa asociados a cada impacto. En la primera sección de este capítulo se describirá el método y software utilizado para traducir los archivos de vídeo en curvas de luz para cada impacto y observador, y, en la segunda sección, se expondrán los resultados.

3.1. Método de análisis

Para llevar a cabo el proceso de transformación descrito se ha utilizado un código escrito en IDL (*Interactive Data Language*) desarrollado en el Grupo de Ciencias Planetarias de la UPV/EHU y que ya fue utilizado en anteriores impactos, *Light Flash Detector*. Los vídeos de las observaciones han sido almacenados en formato SER, es decir, fotogramas individuales que en su conjunto forman un vídeo. Dado que el código no trabaja con vídeos, sino que analiza imágenes, el primer paso será transformar el vídeo en frames individuales. Muchos vídeos están formados por más de 1000 frames y nosotros sólo queremos analizar los fotogramas que incluyan el impacto y los cercanos, por lo que identificaremos los frames asociados al impacto y los extraeremos junto a algunos previos y posteriores haciendo uso del programa *SER Player*. Una vez tengamos las imágenes extraídas (entre 200-300), pasaremos a aplicar el código sobre estas. El programa coregistrará todos los fotogramas y creará una imagen de referencia. Será importante haber escogido suficientes fotogramas previos al impacto, ya que la imagen referencia se obtendrá haciendo un promedio de los 20 primeros. El coregistro de esas imágenes se lleva a cabo usando un algoritmo de correlación de imágenes aplicado al centro del planeta. Ese algoritmo está basado en el código PLAYLIST (*PLANetary Y Lucky Images STACKer*) para *lucky imaging* de planetas [12]. La imagen de referencia creada estará normalizada al número de fotogramas a analizar.

El primer paso será localizar el impacto. Para ello se crearán dos imágenes que serán objeto de estudio para cada fotograma a analizar. La primera imagen, [Figura 3.1C](#), se calcula restando la imagen referencia obtenida de los 20 primeros frames ([Figura 3.1A](#)) y el fotograma en curso ([Figura 3.1B](#)) coregistrado con la referencia. La segunda imagen, [Figura 3.1D](#), se calcula coregistrando todos los fotogramas analizados hasta ese momento y restando para una posición el valor del brillo de la imagen de referencia y el máximo

de brillo de todos los fotogramas coregistrados hasta el momento. El programa localizará y registrará el máximo de brillo para las dos imágenes diferenciales creadas para cada fotograma. Así, al final obtendremos dos vectores de posiciones (X,Y) extraídos de los dos estudios. Al final, el valor máximo de brillo de los dos vectores nos dará dos posiciones y el valor medio será la localización del impacto. De todos modos, no será del todo relevante ubicar con exactitud el impacto, ya que el mismo no está reducido a un único pixel y, además, en el siguiente paso aplicaremos un análisis fotométrico basado en una región mayor utilizando fotometría de apertura.

Sin embargo, algunas veces no será tan fácil. Habrá vídeos cuya calidad no sea buena o el nivel de ruido sea muy alto. En esos casos puede que el programa no localice bien el impacto y tengamos que indicar nosotros la posición aproximada del impacto, siempre teniendo en cuenta el sistema de coordenadas que utiliza el lenguaje IDL. El código también tendrá en cuenta los movimientos relativos causados por el *seeing*, ya que este efecto no sólo moverá el planeta, sino que también distorsionará su forma, causando que el flash se mueva de fotograma en fotograma.

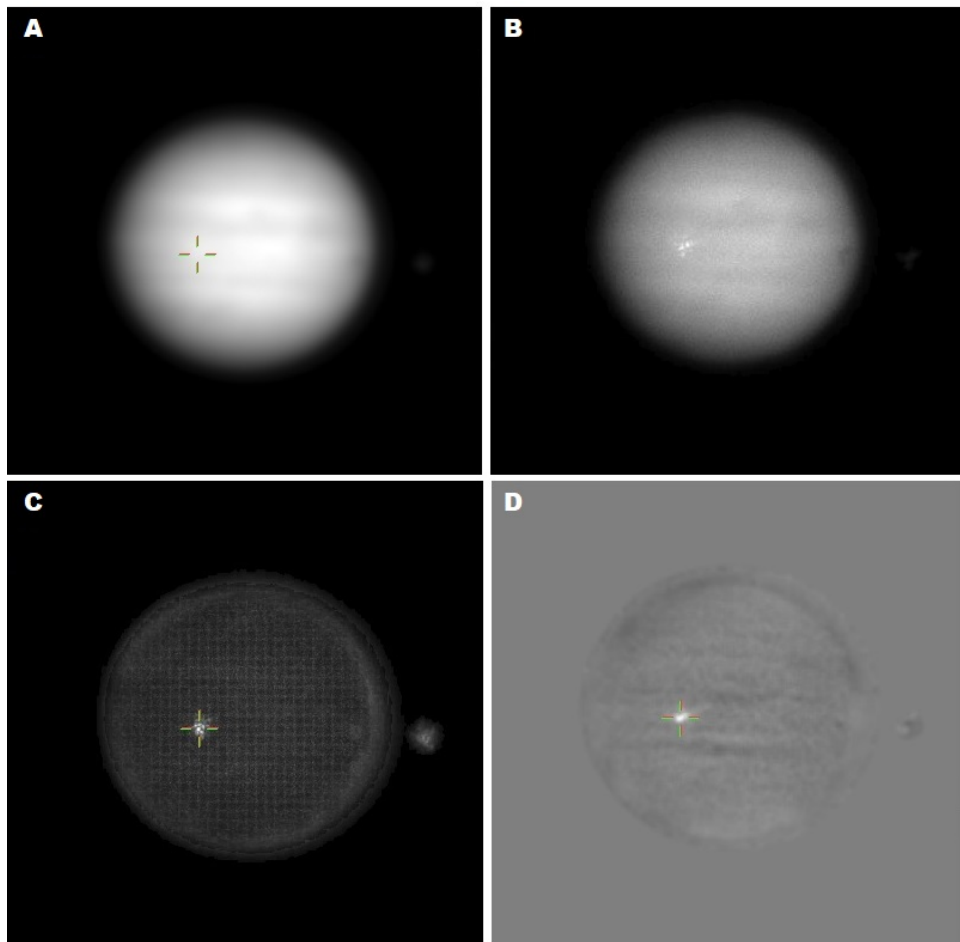


Figura 3.1: Imágenes generadas por el programa en el proceso de localización del impacto para el vídeo de S.V. Cosmin (2021-09-13). A: Imagen de referencia. Esta imagen se calcula coregistrando y promediando las 20 primeras imágenes de la secuencia. B: Fotograma individual en el pico de brillo del impacto. C: Imagen diferencial instantánea: Esta imagen se calcula coregistrando el fotograma en curso con la referencia y restando ambas imágenes. D: Imagen diferencial total. Esta imagen se obtiene coregistrando cada fotograma y considerando en cada posición la diferencia entre el valor máximo de brillo que adquiere esa posición en la secuencia entera y el valor de brillo de esa posición en la imagen de referencia.

Después de ubicar el impacto, el programa pasará a aplicar la fotometría diferencial para lograr las curvas de luz. El software calculará la diferencia entre cada fotograma y la imagen referencia y a esas imágenes se les aplicará la fotometría de apertura. La fotometría de apertura consiste en usar una máscara circular alrededor de la localización impacto en la cual haremos el estudio fotométrico. Alrededor de esa máscara se examinará un anillo cuya luz se utilizará para calcular las contribuciones del fondo teniendo en cuenta las áreas del círculo central y el anillo exterior. En este proceso tendremos que determinar los valores de cuatro parámetros: el radio de la caja en la que el impacto queda ubicado (HRadius), el radio de la región donde se calcula la fotometría (PHOT_Radius) y el radio interior (IN_Radius) y exterior (OUT_Radius) del anillo exterior. Los valores de estos parámetros serán determinantes y diferentes para cada vídeo e influyen directamente en que cantidad de luz se tiene en cuenta o no y el área a la que vamos a restringir el estudio.

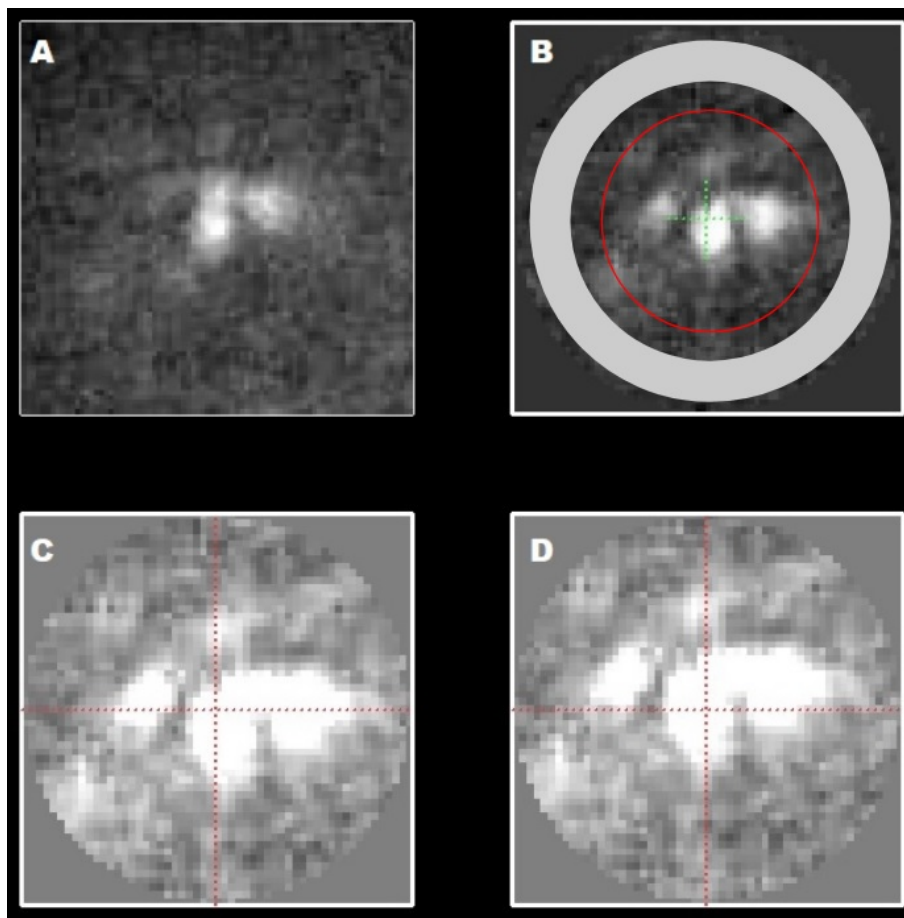


Figura 3.2: Imágenes generadas por el programa del impacto para el vídeo de J.P. Arnould (2021-09-13). A: Sección cuadrada a estudiar. B: Máscara de la apertura circular en rojo y anillo exterior en gris. C: Fotometría de apertura centrada en la posición promedio del impacto. D: Fotometría de apertura centrada en la posición instantánea del flash que varía fotograma a fotograma por la distorsión de la forma del planeta introducida por el *seeing* durante la observación.

Una vez asignados los valores de esos parámetros, el programa hará diferentes estudios fotométricos. El programa generará al momento cuatro imágenes diferentes para cada frame, **Figura 3.2 A-D**. La primera imagen, Figura 3.2A, será la definida por el parámetro HRadius y se genera con el único objetivo de controlar fotograma a fotograma que la región de búsqueda del impacto no salta fuera del rectángulo debido al *seeing* y la Figura

3.2B muestra la máscara a utilizar sobre la anterior en rojo y el área del anillo exterior para las contribuciones exteriores en gris. Las dos últimas imágenes generadas, Figura 3.2C y Figura 3.2D, son de las que extraeremos las curvas de luz a estudiar. La primera es la fotometría de apertura centrada en la localización del impacto obtenida del primer paso y la segunda es la fotometría de apertura centrada en la posición del flash fotograma a fotograma. Los valores de luz que nosotros utilizaremos para obtener las curvas de luz serán los valores medios de estos dos casos corregidos con las contribuciones del fondo. Aparte se calculará la fotometría total y diferencial de estas regiones y, finalmente, se calculará la fotometría total de Júpiter para poder normalizarlas al brillo medio de este.

Todo el proceso explicado en esta sección se tendrá que llevar a cabo para cada canal de color (rojo, verde y azul) para los vídeos a color y una única vez para los vídeos en blanco y negro. Para eso, al principio del código habrá que especificar que canal de color se quiere estudiar: “Red”, “Green”, “Blue” o “BW”.

3.2. Resultados

A continuación, se presentarán las curvas de luz sin calibrar obtenidas con el método explicado para los impactos 2021-2022.

Impacto del 11 de agosto de 2020

La curva de luz obtenida para el único vídeo del impacto de 2020 es la mostrada en la [Figura 3.3](#). En la figura podemos observar claramente la huella del impacto de alrededor de 1.5 s de duración. La estructura del impacto es clara. Primero, observamos un rápido crecimiento en la cantidad de luz recibida relacionada con el momento del impacto del objeto y, después, una decaída menos abrupta. En el momento del impacto la luz crece de manera exponencial hasta el máximo de brillo y no se observa ningún tipo de doble pico como los que si se observaron con el impacto del 26 de mayo de 2017 [6]. Esos dobles picos están relacionados con la posible fragmentación del objeto en el momento de impactar. Si hubiese ocurrido así con este impacto se debería haber podido capturar al superar un mínimo de frames por segundo, 30 [6].

Por otro lado, se comprueba lo que a simple vista se predecía: el impacto no es muy brillante en comparación a los dos siguientes estudiados en este trabajo. De todas formas, la calidad de la observación es indudable al quedar muy por encima del ruido medio estimado. También se observa como es más brillante en el verde y azul que en el rojo dando así pistas sobre que la temperatura de brillo no será de valores mínimos que se estudiarán (2000 – 5000 K). Sin embargo, este aspecto será estudiado en detalle en el siguiente capítulo al realizar la calibración fotométrica filtro a filtro.

Impacto del 13 de septiembre de 2021

En el caso del impacto de septiembre de 2021 se ha hecho un estudio más complejo al poseer un total de seis vídeos a analizar. En esta sección se presentan las curvas de luz de tres de esos vídeos. Primero, se presenta las curvas de luz obtenidas para el vídeo de Jean Paul Arnould ([Figura 3.4](#)). Debido a que la calidad del vídeo es buena, que la cantidad de FPS es adecuada y que tenemos información en los tres canales de color, se destacan estos resultados por encima de los de José Luis Pereira, por ejemplo. Después, se presentan los

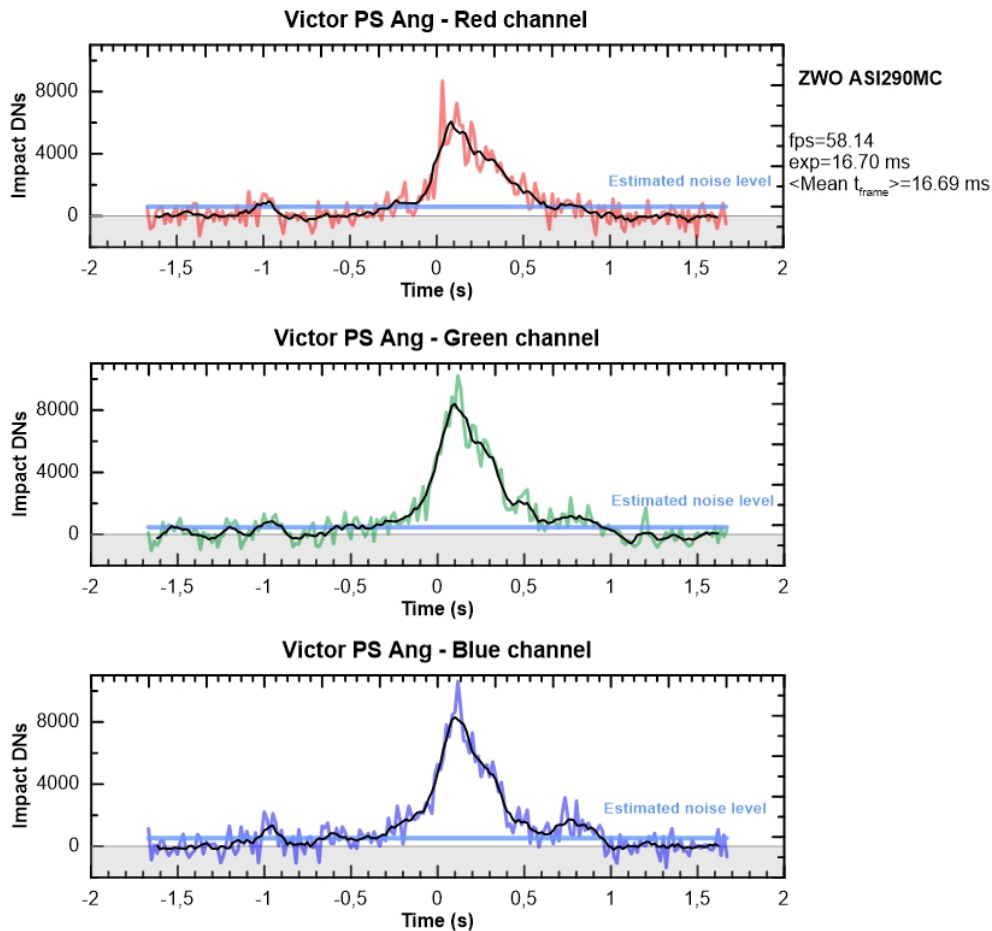


Figura 3.3: Curvas de luz obtenidas para el impacto del 11 de agosto de 2020. Vídeo de Victor PS. Ang.

resultados de Harold Paleske y Sandu Val Cosmin al ser los únicos obtenidos en blanco y negro y a modo comparativo (Figura 3.5). Por otro lado, se ha comprobado que en la observación proporcionada por los astrónomos del observatorio de AstroQueyras existen pixels saturados en algunos fotogramas, lo que nos lleva a trabajar con valores inferiores en los resultados de los que obtendríamos sólo unas cotas mínimas. De todas maneras, se ha trabajado con estos resultados y se han tenido en cuenta en este estudio.

En todas las curvas de luz se puede observar un prominente impacto de alrededor de 1.5 s de duración. De las seis curvas de luz se puede comprobar que los valores para los DN (*Digital numbers*) son muy superiores al compararlos con los del 2020. De lo que deducimos que de este impacto obtendremos valores superiores de energía, masa y tamaño.

En las curvas de J.P. Arnould no observamos grandes diferencias entre los diferentes canales de color, como si lo hacíamos con el de 2020. Lo que si observamos en estos resultados son dobles flashes o picos en el momento del impacto, como en mayo de 2017 [6]. Los picos son muy fáciles de identificar en los casos de Arnould y Paleske. Esto nos lleva a pensar que el objeto se fragmentó a la hora de impactar con la atmósfera joviana produciendo diferentes flashes relacionados con los diferentes fragmentos. En el caso de Cosmin se puede apreciar un pico en la subida, pero no es tan evidente. No es tan evidente en ese caso al estar el valor de FPS muy cerca del mínimo que se cree necesario.

Finalmente, observamos que la caída de brillo es mucho más violenta que en el impacto

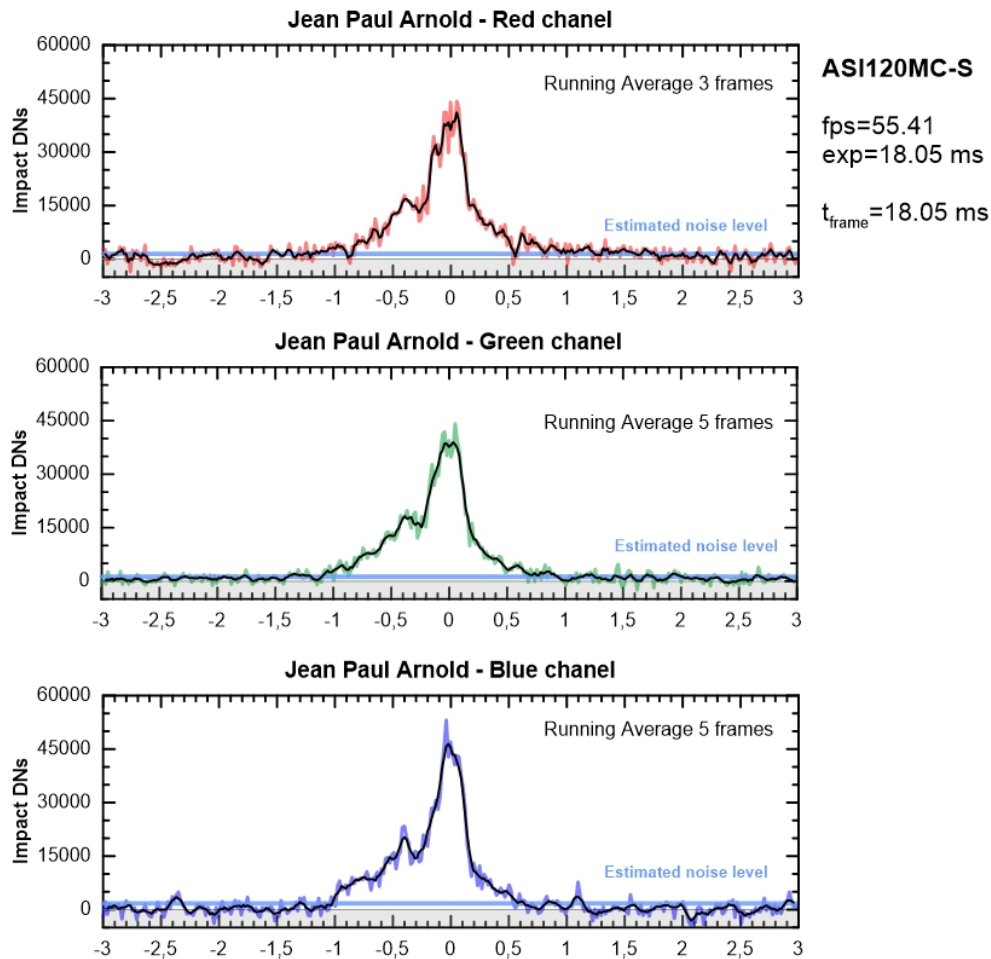


Figura 3.4: Curvas de luz obtenidas para el impacto del 13 de septiembre de 2021. Vídeo de Jean Paul Arnould.

del año anterior. En ese caso observamos una cola mucho más extensa que para este impacto se reduce a no más de 0.3 s.

Impacto del 15 de octubre 2021

El último impacto es el más largo observado hasta la fecha. La duración aproximada dada por los astrónomos japoneses es de alrededor de 5.5 s [10], duración que podemos corroborar en la [Figura 3.6](#) con las curvas de luz obtenidas para el mismo impacto por Victor PS Ang.

Se puede observar también que la estructura del impacto es muy diferente a las analizadas anteriormente en este trabajo. Hasta ahora, los aumentos en los valores de los DNs por los impactos eran mucho más bruscos, dejando una curva casi vertical en esos instantes. Sin embargo, en este impacto observamos que el aumento de luz es mucho más prolongado. Puede pensarse que esto se debe a un evento de fragmentación como el planteado para los otros impactos. De echo, aunque no sean tan evidentes como los de las [Figura 3.4](#) o [Figura 3.5](#), se pueden observar sobre todo en el canal verde dos picos o caídas de luz en el instante de aumento de la misma. El primer pico también es visible en el canal azul y el segundo en el canal rojo.

En cuanto a energía asociada, la cantidad de energía óptica liberada en el impacto es considerable por lo prolongado que es. Aunque en cuanto a valores máximos es bastante parecido a los estudiados en trabajos anteriores.

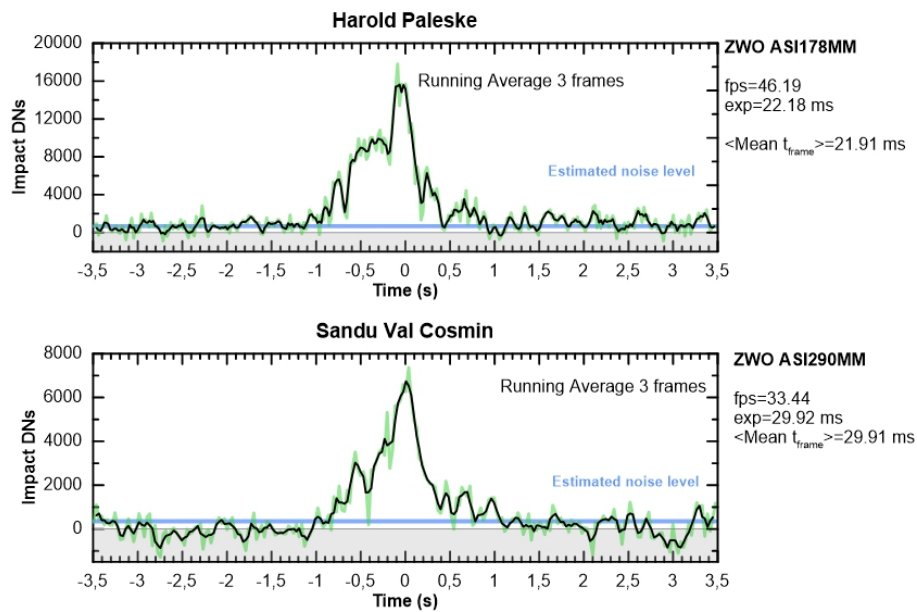


Figura 3.5: Curvas de luz obtenidas para el impacto del 11 de agosto de 2020. Vídeos de Harold Paleske y Sandu Val Cosmin.

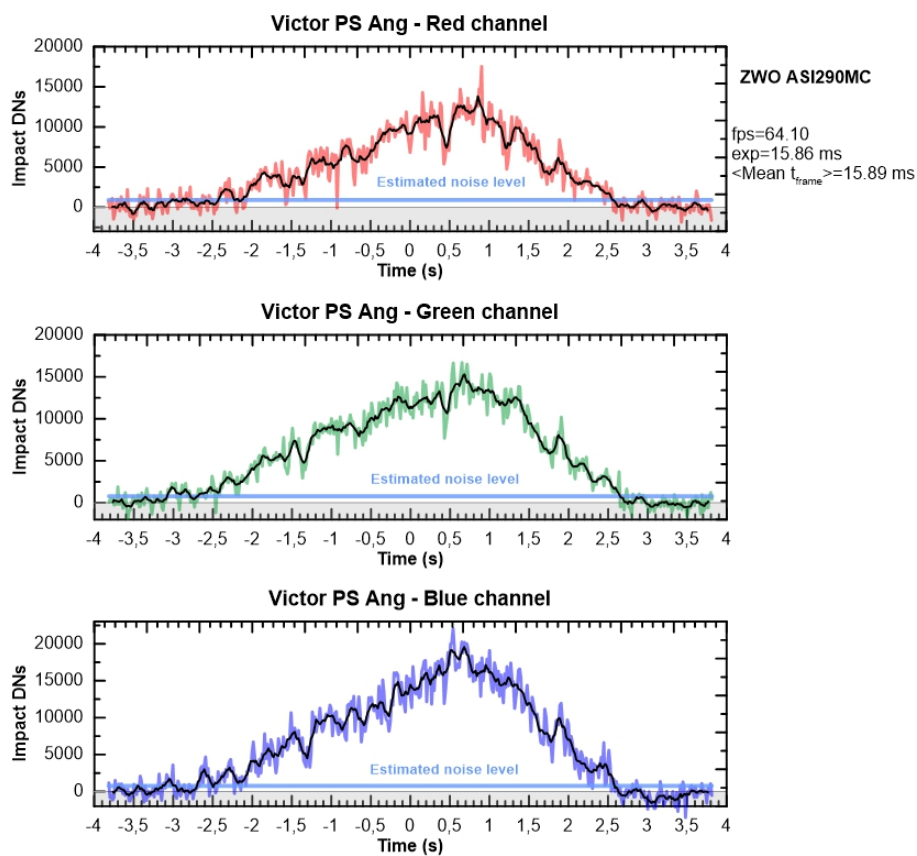


Figura 3.6: Curvas de luz obtenidas para el impacto del 15 de octubre de 2021. Vídeo de Victor PS. Ang.

Capítulo 4

Metodología para la calibración energética

Una vez hemos transformado los vídeos de las observaciones en curvas de luz, tenemos que convertir esas curvas de luz en valores de energía asociados a cada impacto. Para ello vamos a llevar a cabo una calibración energética que utiliza los mismos procedimientos que los explicados en Hueso et al. (2018) [6]. En la primera sección de este capítulo se expone el método y software utilizado para lograr dicha conversión y, en la segunda sección, se recogerán los valores de energía luminosa asociada a cada impacto y observador.

4.1. Método general

Partimos de los valores de DNs asociados a cada curva de luz de cada impacto, I_* . El objetivo es comparar o referenciar esos DNs con la media de DNs recibidos del disco del Júpiter extraídos de la imagen de referencia, I_J , y transformarlos en energía luminosa. Nos interesa comparar los valores de DNs asociados exclusivamente al impacto. De todos modos, las contribuciones de luz anteriores y posteriores al impacto son en valor absoluto mucho más pequeños que los del impacto. Además, hay contribuciones positivas y negativas relacionadas con el ruido, consiguiendo así que esas contribuciones se minimicen aún más. Por lo que integraremos la curva entera para obtener la intensidad asociada al impacto. Esos valores los extraeremos de los archivos Excel creados por el programa presentado en la [Sección 3.1](#) a la hora de obtener las curvas de luz.

Para transformar la intensidad en energía luminosa se introducirá un factor de conversión, K , reduciendo el problema a la siguiente expresión,

$$L_* = K \cdot \left(\frac{I_*}{I_J} \right). \quad (4.1)$$

El factor de conversión está dividido en dos cálculos independientes. El primero nos proporciona la energía solar interceptada por el planeta el día de cada impacto. Este valor será igual para todos las observaciones que se estudien de un mismo impacto. Para ello utilizamos el valor de la energía solar recibida a la distancia de Júpiter por unidad de tiempo y superficie, es decir, la constante solar S_J , y multiplicamos ese valor por el área o sección eficaz que intercepte dicha energía. Debido a la rápida rotación del gigante gaseoso, la geometría del planeta no es perfectamente esférica y sufre achatamiento por los polos. Por

ese motivo, existe diferencia entre el radio ecuatorial y polar del planeta ($R_{eq} = 71492$ km y $R_p = 66854$ km) y su sección eficaz será una elipse ($\pi R_{eq}R_p$).

El segundo término es de cálculo más complejo. El objetivo en este caso es calcular qué fracción de energía solar reflejada en el planeta es finalmente recibida en los detectores en la Tierra. Para este procedimiento se ha utilizado un programa escrito en IDL, *Calibration*, que nos devuelve simplemente el valor final de esa proporción. Por un lado, utilizaremos los datos de espectro solar y reflectividad de Júpiter publicados por Colina et al. (1996) [13] y Karkoschka et al. (1994) [14], respectivamente. Y, por otro lado, las respuestas de los detectores de las cámaras y los correspondientes filtros utilizados. Estos últimos no son tan fáciles de conseguir, ya que comúnmente los fabricantes de estos detectores y filtros sólo proporcionan las gráficas de las respuestas espectrales, como por ejemplo las presentadas en las Figuras 2.2 y 2.4. Entonces, el procedimiento que se ha seguido ha sido partir de estas gráficas y transformar las imágenes en archivos de datos que recojan los valores de respuesta relativa y longitud de onda. Este paso se ha realizado de manera directa gracias al programa *WebPlotDigitalizer*.

Cuando tengamos todos los datos necesarios podremos ejecutar el código. Primero, el código pedirá los archivos relacionados con la respuesta espectral de la cámara y preguntará si se ha utilizado un filtro especial o no. En este estudio sólo será necesario responder afirmativamente en la observación de José Luis Pereira, ya que, como hemos indicado anteriormente, no haremos el estudio sobre la observación de Ko Arimatsu. En ese caso, el programa convolucionará la respuesta del detector y la del filtro. Los datos de los detectores y filtros tendrán diferente resolución y diferente cantidad de datos. Para facilitar el trabajo, el programa interpolará los datos para tener la misma resolución y la misma distancia entre ellos. Además, todo el análisis se hará en el rango espectral entre 100 y 2500 nm, ya que los datos del espectro solar se extiende en todo ese rango. De modo que en los casos en los que los datos no sean tan extensos se asignarán valores nulos donde no existan.

En el siguiente paso, el programa leerá los archivos de espectro solar y de reflectividad de Júpiter, y volverá a interpolar los datos en el rango en el que existan valores y extrapolar valores nulos donde no existan. De esta manera, tendremos todos los datos necesarios con la misma resolución listos para ser convolucionados. El código multiplicará los datos de respuesta espectral de detector y filtro con el espectro solar y la reflectividad, obteniendo así un vector. Seguido, calculará la suma total de los resultados y se dividirá con la suma de los valores del espectro solar para obtener finalmente la fracción de energía solar detectada tras ser reflejada en el planeta. Este procedimiento se repetirá para cada canal de color en los vídeos a color y se obtendrán valores diferentes en función de la respuesta del detector y filtro. Junto al valor final, el programa generará un gráfico como el de la Figura 4.1.

En la ecuación 4.2 se recoge la expresión matemática de todo el procedimiento explicado anteriormente,

$$K = (S_J \cdot \pi R_{eq}R_p) \cdot \left(\frac{\int_0^\infty F_\odot(\lambda) \cdot I/F(\lambda) \cdot C(\lambda)d\lambda}{\int_0^\infty F_\odot(\lambda)d\lambda} \right), \quad (4.2)$$

donde $F_\odot(\lambda)$ es la radiancia espectral solar, $I/F(\lambda)$ la reflectividad de Júpiter como

función de la longitud de onda y $C(\lambda)$ la respuesta espectral de la cámara y filtro en su conjunto.

Así, sólo nos quedará multiplicar el primer valor relacionado con la energía solar interceptada por el planeta y el segundo valor que nos proporciona el código para obtener el valor del factor de conversión K . Cabe destacar que este factor no es adimensional y que tiene unidad de potencia, W.

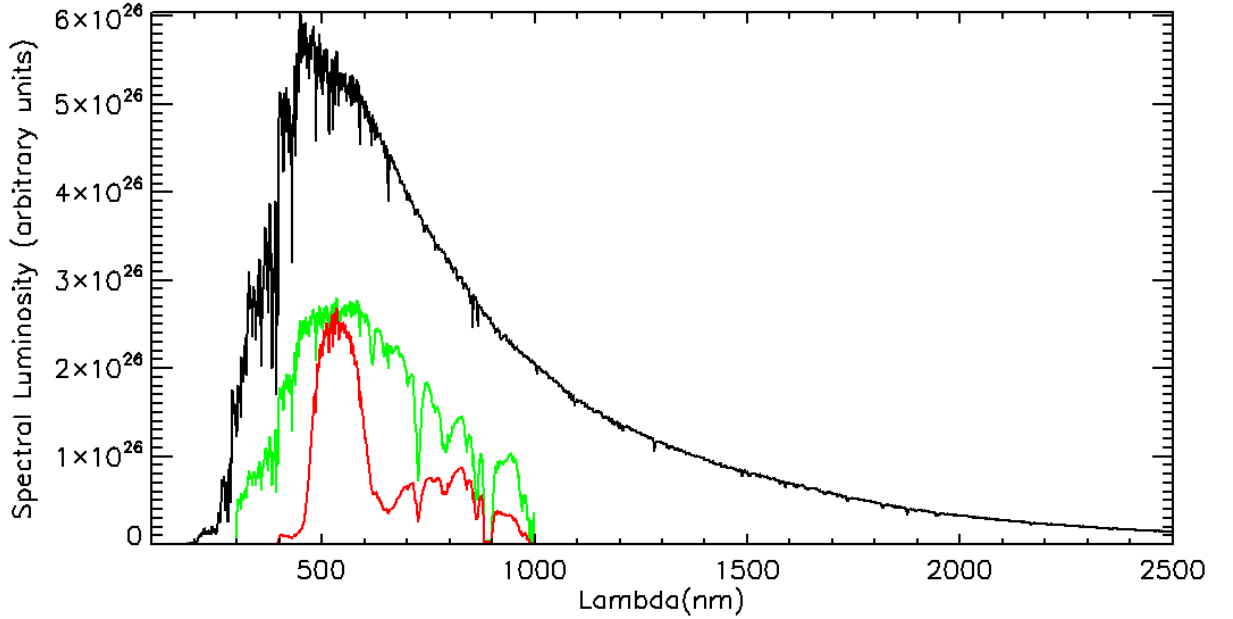


Figura 4.1: Gráfica generada por el programa de la observación de Victor PS Ang. del impacto del 11 de agosto de 2020 para el canal verde. La curva negra describe el espectro solar, la verde la convolución entre el espectro solar y la reflectividad de Júpiter y la roja la convolución entre espectro, reflectividad y respuesta del sistema.

Finalmente, haciendo uso de la [ecuación 4.1](#) obtendremos la energía óptica capturada del impacto. Dividiremos por el ratio de fotogramas por segundo (FPS) del vídeo de la observación para pasar así de unidad de potencia, W, a unidad de energía, J.

En este procedimiento hemos calculado la energía luminosa capturada en la superficie terrestre por los detectores, pero esta energía es únicamente una fracción de toda la energía emitida en el impacto en forma de luz. La energía total emitida por el impacto será mayor o menor en función de la distribución espectral de energía (*Spectral energy distribution*, SED) de la luz. Se va a calcular un factor de eficiencia, E , dependiente de las repuestas espectrales de los detectores que estime qué proporción de la energía óptica total liberada es capaz de detectar nuestra cámara. De esa manera, se obtendrá el valor de la energía total directamente de la siguiente expresión,

$$L_*^T = \frac{L_*}{E}. \quad (4.3)$$

El cálculo del factor de eficiencia se hará mediante un código escrito en IDL, *Calibration_Planck_Efficiency*. Se asume que la luz emitida por el impacto es emitida a cierta temperatura siguiendo la ley de Planck para un cuerpo negro. Así, para una temperatura y longitud de onda concreta obtendremos el valor de la intensidad de la radiación,

$F_{CN}(T, \lambda)$. De nuevo se hará el estudio en el rango entre 100 y 2500 nm para la longitud de onda y para la temperatura se analizará entre los 2000 y 12000 K. Aunque hasta el momento se considera que las temperaturas de brillo asociadas a estos impactos se encuentran en el rango de entre 3500 y 8500 K basándonos en los datos obtenidos de los impactos del SL9 o del análisis hecho del impacto del 2010 [4]. El programa tendrá un primer paso idéntico al anterior en el que obtendrá y analizará las respuestas espectrales de los detectores y filtros. Después, únicamente convolucionará esas respuestas con los valores de F_{CN} para cada T y λ , calculará el sumatorio de dicha multiplicación y lo dividirá con la suma de los valores de F_{CN} para obtener así un valor porcentual de la eficiencia de dicho detector. En la siguiente ecuación se puede observar la expresión matemática de lo descrito,

$$E = \frac{\int_0^{\infty} F_{CN}(T, \lambda) \cdot C(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} F_{CN}(T, \lambda) d\lambda} \quad (4.4)$$

El programa devolverá el valor porcentual de la eficiencia y el valor normalizado que usaremos en la [ecuación 4.3](#) y una gráfica con esos resultados para cada canal de color que se estudie como la que se puede ver en la [Figura 4.2](#).

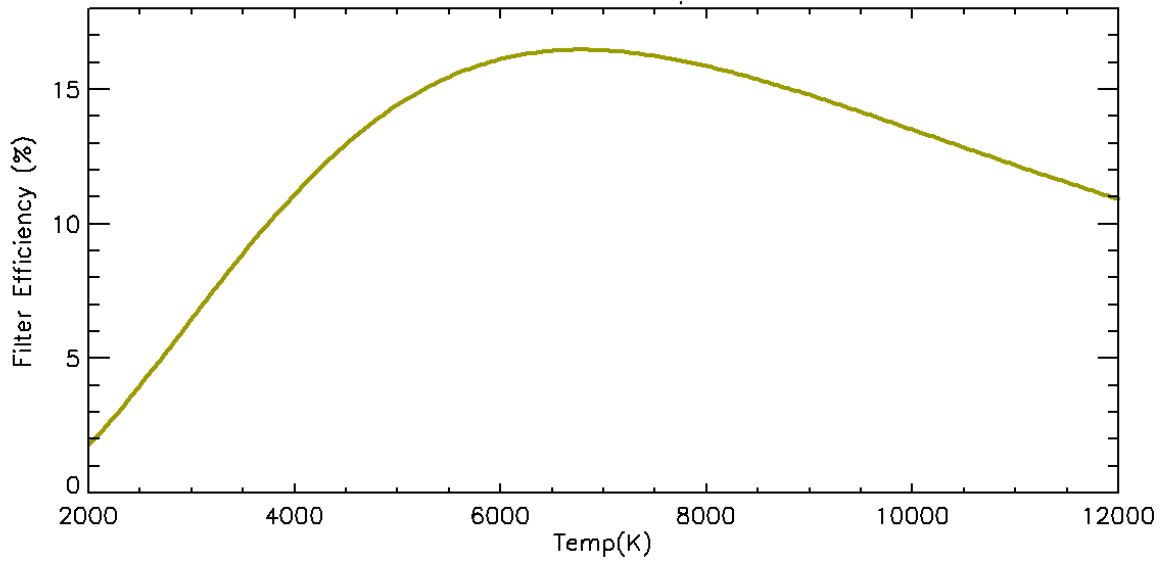


Figura 4.2: Gráfica de la eficiencia de detección de la cámara en función de la temperatura de brillo generada por el programa para la observación de Michel Jacquesson del impacto del 13 de septiembre de 2021 para el canal azul.

Es de destacar que la forma que tiene esta curva hace que la forma en la que calcularemos finalmente la energía será muy sensible a temperaturas de brillo bajas y menos a temperaturas altas, de manera que será difícil discriminar temperaturas de brillo elevadas.

De esta forma, tendremos finalizada la calibración energética y habremos convertido los valores de DN en valores de energía, J.

En este punto se obtiene una gran cantidad de datos que será necesario analizar y estudiar. En primer lugar, tendremos un total de doce valores de energía total liberada, uno para cada valor de temperatura de brillo entre 2000 y 12000 K. Asimismo, para los

vídeos a color tendremos un total de treinta y seis valores, doce por cada temperatura de brillo y cada canal de color. Los valores serán dispares y tendremos que estimar entre que valores de temperatura de brillo se encontrará el impacto para descartar diferentes resultados.

Para ello, de los datos extraídos de una observación a color compararemos los valores de energía luminosa total en función de la temperatura de brillo para los tres canales de color. Si el procedimiento se ha hecho de manera adecuada, deberá existir un intervalo de valores en los que los resultados de energía luminosa total asociados al canal rojo, verde y azul describan resultados semejantes, ya que se presupone que una vez aplicado el factor de corrección debido a la eficiencia de los detectores existirá un rango de valores de temperatura de brillo cuyos valores de energía sean muy parecidos en los tres canales. Por suerte, en los impactos en los que solamente estudiaremos una observación, 11 de agosto de 2020 y 15 de octubre de 2021, los vídeos son en color, dado que si fuesen en blanco y negro tendríamos una incertidumbre total en los valores de temperatura. Para el impacto del 13 de septiembre de 2021 podremos aplicar este paso en cada observación y, además, comparar resultados de las diferentes observaciones para corroborar que el rango de temperaturas es el adecuado.

4.2. Resultados

A continuación se expondrán los resultados obtenidos de la conversión a energía de los siguientes impactos.

Impacto del 11 de agosto de 2020

En este impacto transformaremos los datos obtenidos del vídeo de Victor PS Ang. y podremos reducir el rango de valores para la temperatura de brillo comparando los resultados para los tres canales de color como se ha explicado en el anterior apartado. Primero, debemos calcular el valor de la constante solar, S_J , para el 11 de agosto de 2020. Utilizando la siguiente expresión el cálculo es directo,

$$S_J = \frac{1361}{r^2(\text{UA})}, \quad (4.5)$$

siendo 1361 el valor en W/m^{-2} de la constante solar para la Tierra. Obtenemos para ese día la distancia orbital al Sol del sistema HORIZONS del JPL¹, $r = 5,146$ UA, y el resultado es directo, $S_J = 51,39$ W/m^{-2} . Lo siguiente será obtener mediante el primer código presentado en la sección anterior el valor de la proporción de energía solar reflejada en el planeta y detectada en la Tierra. Los valores para los tres canales de color son los siguientes: 0.12982 (R), 0.13143 (G) y 0.07474 (B). Vemos como la fracción de energía solar reflejada y detectada por el sistema es menor en el canal azul. Eso se debe a que la respuesta relativa del detector en ese canal es inferior como se puede observar en la [Figura 2.2](#). Por este motivo se aplica el segundo paso de corrección debido a la eficiencia del detector, ya que si no lo hiciésemos obtendríamos un resultado inferior en la energía que no se correspondería con la realidad. Utilizando los valores de intensidad extraídos de las curvas de luz y sin aplicar el factor de eficiencia, los resultados de energía luminosa capturada obtenidos de la [ecuación 4.1](#) son los siguientes,

¹<https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons/>

- R: $L_* = 9,035 \cdot 10^{12}$ J.
- G: $L_* = 1,241 \cdot 10^{13}$ J.
- B: $L_* = 9,005 \cdot 10^{12}$ J.

Se puede observar que pese a que el coeficiente de fracción de energía solar reflejada y detectada es menor en el canal azul, al final, la energía luminosa capturada es muy parecida a la del canal rojo. Esto se debe a que el impacto es muy brillante en el canal verde y, sobre todo, en el azul y poco brillante en el rojo. Así, se compensa la inferior capacidad de detección en el azul, teniendo una energía óptica comparable con la del canal rojo. Además, esto nos dice que dentro de las temperaturas de brillo que vayamos a analizar el rango de este impacto será de valores altos, al estar estos asociados con la alta energía en el canal azul.

Una vez aplicado el factor de corrección de la [ecuación 4.4](#), los valores de energía luminosa total son los siguientes para las diferentes temperaturas de brillo,

	R	G	B
5000 K	$3,207 \cdot 10^{13}$ J	$4,740 \cdot 10^{13}$ J	$5,594 \cdot 10^{13}$ J
6000 K	$3,299 \cdot 10^{13}$ J	$4,523 \cdot 10^{13}$ J	$5,129 \cdot 10^{13}$ J
7000 K	$3,643 \cdot 10^{13}$ J	$4,706 \cdot 10^{13}$ J	$5,101 \cdot 10^{13}$ J
8000 K	$4,162 \cdot 10^{13}$ J	$5,131 \cdot 10^{13}$ J	$5,335 \cdot 10^{13}$ J
9000 K	$4,831 \cdot 10^{13}$ J	$5,738 \cdot 10^{13}$ J	$5,756 \cdot 10^{13}$ J
10000 K	$5,641 \cdot 10^{13}$ J	$6,504 \cdot 10^{13}$ J	$6,329 \cdot 10^{13}$ J
11000 K	$6,592 \cdot 10^{13}$ J	$7,418 \cdot 10^{13}$ J	$7,114 \cdot 10^{13}$ J
12000 K	$7,684 \cdot 10^{13}$ J	$8,475 \cdot 10^{13}$ J	$7,867 \cdot 10^{13}$ J

Tabla 4.1: Energía luminosa total liberada en el impacto del 11/08/2020 para las diferentes temperaturas de brillo propuestas y los diferentes canales de color.

Fijándonos en los resultados para la energía óptica total, vemos que se confirma el hecho de que una vez aplicado el factor de corrección, los canales que más energía tienen asociados son el verde y el azul. Eso nos lleva a pensar que dentro del rango de temperaturas presentado en la tabla, los valores más altos serán los que presenten resultados más semejantes en los diferentes canales y que, por lo tanto, serán los asociados al impacto. Reparando a los resultados de la tabla vemos que es así y que el rango de temperaturas de [7000-12000] K es el que presenta resultados acordes entre los tres canales de color. Si presentamos estos resultados en una gráfica de energía óptica en función de la temperatura de brillo obtendremos la [Figura 4.3](#).

En la gráfica se aprecia claramente que dentro del rango aproximado de 7000 a 12000 K las curvas de energía verde y azul describen resultados semejantes. Esto está relacionado con lo indicado respecto a la [Figura 4.2](#). La forma específica de la eficiencia de la cámara en función de la longitud de onda hace que, al estar aplicando el inverso de esta, sea muy sensible en las temperaturas de brillo bajas y menos en las altas. Así, se ve como las energías asociadas a temperaturas altas son menos diferenciadas que las altas.

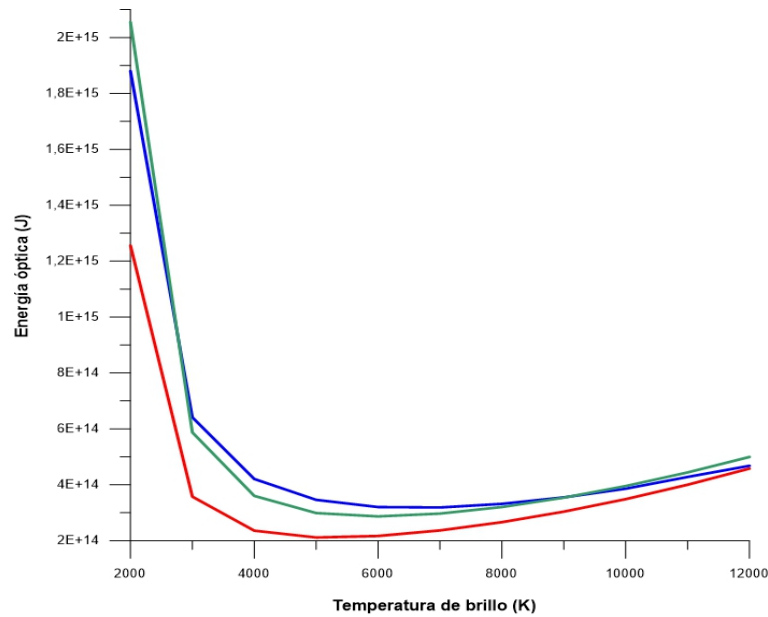


Figura 4.3: Gráfica de la energía óptica total en función de la temperatura de brillo para los datos extraídos del vídeo de Victor PS Ang del impacto del 11 de agosto de 2020.

De todas formas, este rango de temperaturas sugerido por los resultados amateur es demasiado amplio. Compararlo con la bibliografía nos va a permitir reducir el rango de temperaturas. En el estudio de impactos anteriores de características semejantes se han determinado diferentes valores posibles de temperaturas de brillo. En el artículo publicado por Hueso et al. (2013) se concluye un rango de temperaturas de brillo de 6500-8500 K [5], del artículo de Giles et al. (2021) un rango de 9600 ± 600 K [7] y de los flashes de luz de los fragmentos del SL9 observados por la sonda Galileo y estudiados en Chapman (1996) se concluye un rango de 7800 ± 600 K [15]. De esta manera, podemos concluir que el rango de temperatura de brillo de este impacto será [7000-10000] K.

En este caso no se puede reducir con más exactitud el rango de temperatura de brillo al existir una incertidumbre importante ligada al hecho de que sólo poseemos una observación de este impacto. Como veremos con el siguiente impacto, el rango de temperaturas asociado a ese impacto se verá reducido al poseer un total de seis observaciones de las que obtendremos información más detallada.

Impacto del 13 de septiembre de 2021

Este impacto tiene un análisis más complejo al tener un total de seis observaciones diferentes, pero, como hemos explicado, esto nos llevará a reducir la incertidumbre en la elección de la región de temperatura de brillo. Lo primero será obtener el valor de la constante solar el 13 de septiembre de 2021. Siendo la distancia orbital del planeta $r = 5,018$ UA, la constante solar que obtenemos de la ecuación 4.5 es $S_J = 54,05$ W/m⁻².

Lo siguiente será obtener los valores de los coeficientes relacionados con la proporción de energía reflejada en el planeta y detectada por los diferentes detectores. Al ser este parámetro dependiente del tipo de detector o cámara obtendremos tres valores diferentes para los vídeos en color (J.L. Pereira, AstroQueyras, J.P. Arnould y M. Jacquesson) y un único valor para los vídeos en blanco y negro (H. Paleske y S.V. Cosmin). Los valores de esos coeficientes se recogen en la Tabla 4.2.

Observador	Canal de color	Coef. de proporción	Observador	Canal de color	Coef. de proporción
J.L. Pereira	R	0.05806	J.P. Arnould	R	0.07112
	G	0.07326		G	0.06633
	B	0.04266		B	0.05359
AstroQueyras	R	0.13016	M. Jacquesson	R	0.12524
	G	0.13142		G	0.12398
	B	0.07489		B	0.07059
H. Paleske	BW	0.21041	S.V. Cosmin	BW	0.22011

Tabla 4.2: Proporción de energía reflejada en el planeta que es capaz de detectar cada detector de cada observador.

La energía óptica captura obtenida del cálculo de la [ecuación 4.1](#) nos proporciona un valor aproximado del orden de ($10^{13} - 10^{14}$) J para prácticamente todas las observaciones. Esto nos indica claramente lo que hemos concluido en anteriores secciones, este impacto y, como veremos a continuación, el de octubre de este mismo año son impactos más energéticos que el de 2020.

Tras aplicar el segundo código obtendremos los valores de energía total capturada. En la siguiente tabla se presentan los resultados para las observaciones de J.P. Arnould y M. Jacquesson,

	J.P. Arnould			M. Jacquesson		
	R	G	B	R	G	B
5000 K	$3,875 \cdot 10^{14}$ J	$4,017 \cdot 10^{14}$ J	$4,754 \cdot 10^{14}$ J	$4,546 \cdot 10^{14}$ J	$4,980 \cdot 10^{14}$ J	$3,781 \cdot 10^{14}$ J
6000 K	$3,890 \cdot 10^{14}$ J	$3,800 \cdot 10^{14}$ J	$4,091 \cdot 10^{14}$ J	$4,622 \cdot 10^{14}$ J	$4,684 \cdot 10^{14}$ J	$3,384 \cdot 10^{14}$ J
7000 K	$4,213 \cdot 10^{14}$ J	$3,939 \cdot 10^{14}$ J	$3,904 \cdot 10^{14}$ J	$5,062 \cdot 10^{14}$ J	$4,831 \cdot 10^{14}$ J	$3,317 \cdot 10^{14}$ J
8000 K	$4,739 \cdot 10^{14}$ J	$4,287 \cdot 10^{14}$ J	$3,969 \cdot 10^{14}$ J	$5,750 \cdot 10^{14}$ J	$5,237 \cdot 10^{14}$ J	$3,438 \cdot 10^{14}$ J
9000 K	$5,430 \cdot 10^{14}$ J	$4,792 \cdot 10^{14}$ J	$4,197 \cdot 10^{14}$ J	$6,644 \cdot 10^{14}$ J	$5,834 \cdot 10^{14}$ J	$3,688 \cdot 10^{14}$ J
10000 K	$6,273 \cdot 10^{14}$ J	$5,431 \cdot 10^{14}$ J	$4,547 \cdot 10^{14}$ J	$7,731 \cdot 10^{14}$ J	$6,594 \cdot 10^{14}$ J	$4,038 \cdot 10^{14}$ J

Tabla 4.3: Energía luminosa total liberada en el impacto para las diferentes temperaturas de brillo propuestas y los diferentes canales de color.

De los resultados presentados en la tabla anterior podemos observar como los valores de energía del vídeo de J.P. Arnould en el rango de [6000-8000] K presentan unos resultados muy parecidos en los tres canales de color. Si expresamos los resultados correspondientes a la observación de Arnould obtendremos la [Figura 4.4](#). En esta imagen se aprecia aún mejor que en la región de [6000-8000] K las curvas presentan resultados totalmente semejantes. Esto, junto al hecho de que los resultados de M. Jacquesson presentan resultados con la misma tendencia en este rango de temperaturas, nos hace reducir la incertidumbre en cuanto a la temperatura de brillo. Además, podemos utilizar los resultados obtenidos de los vídeos en blanco y negro y comprobar si los resultados demuestran alguna semejanza. En ese rango de temperaturas los resultados para los vídeos de H. Paleske y S.V. Cosmin son del orden de $(3,6 - 3,8) \cdot 10^{14}$ J y $(3,8 - 4,1) \cdot 10^{14}$ J, respectivamente. Es decir, los resultados obtenidos son del mismo orden que los presentados en la [Tabla 4.3](#) y corroboramos entonces que el rango de temperaturas es [6000-8000] K.

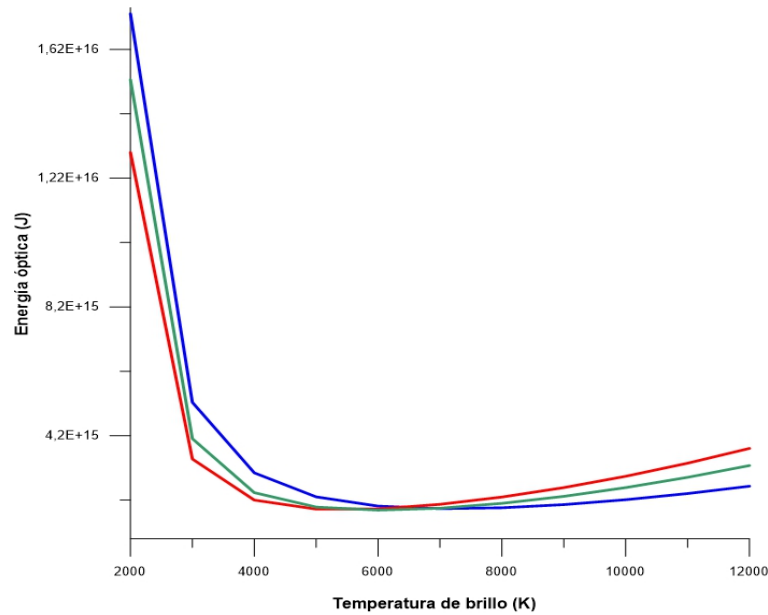


Figura 4.4: Gráfica de la energía óptica total en función de la temperatura de brillo para los datos extraídos del vídeo de J.P. Arnould del impacto del 13 de septiembre de 2021.

De todas las observaciones obtenidas de este impacto no se han discutido los resultados de J.L. Pereira y del observatorio francés de AstroQueyras. Sobre el segundo vídeo ya mencionamos en el tercer capítulo que mostraba pixels saturados y que, por lo tanto, los resultados que íbamos a obtener iban a ser de órdenes inferiores. En el caso de J.L. Pereira, hasta que no se han obtenido los valores de energía finales no se ha podido comprobar que estos también son en valor inferiores. En el rango de temperaturas indicado, los valores de energía obtenidos entre los tres canales se encuentran entre $(2,43 - 3,40) \cdot 10^{14}$ J. Lo que nos lleva a la conclusión de que en este vídeo también encontramos pixels saturados. De todas formas, aunque los resultados demuestren valores inferiores, la tendencia debe ser la misma. Es decir, los valores de energía óptica obtenidos serán inferiores, pero la región en la que las tres curvas describan resultados semejantes debe ser igual o parecida a la indicada anteriormente. Y se ha podido comprobar que así sucede y que el rango de temperaturas de brillo es el adecuado.

Impacto del 15 de octubre 2021

Para este último impacto llevaremos a cabo los mismos pasos que con el del 11 de agosto de 2020, ya que al igual que en ese impacto sólo poseemos una observación. Lo primero, entonces, será calcular la constante solar para el 15 de octubre de 2021 utilizando la [ecuación 4.5](#) y su posición orbital. Siendo $r = 5,010$ UA, la constante solar será: $S_J = 54,22$ W/m².

En cuanto a los valores de la proporción de energía reflejada y detectada, serán los presentados para el impacto del año 2020, ya que el observador es el mismo, Victor PS Ang., y el instrumental utilizado también lo es. De esta manera, obtenemos los siguientes valores de energía óptica capturada,

- R: $L_* = 1,233 \cdot 10^{14}$ J.
- G: $L_* = 1,801 \cdot 10^{14}$ J.

$$\blacksquare \text{ B: } L_* = 1,503 \cdot 10^{14} \text{ J.}$$

De nuevo vemos como pese a que el coeficiente de energía sola reflejada y detectada es menor en el azul, los resultados son muy parecidos a los del canal rojo. Esto nos va a volver a dar una pista sobre los valores de temperatura de brillo. Además, se puede ver como los resultados son prácticamente idénticos en los tres canales de color de un orden de magnitud superior en comparación al impacto del mismo observador del 2020.

Una vez aplicado el segundo paso obtenemos los siguientes valores para la energía óptica total liberada por el impacto,

	R	G	B
5000 K	$4,378 \cdot 10^{14} \text{ J}$	$6,880 \cdot 10^{14} \text{ J}$	$9,335 \cdot 10^{14} \text{ J}$
6000 K	$4,504 \cdot 10^{14} \text{ J}$	$6,566 \cdot 10^{14} \text{ J}$	$8,558 \cdot 10^{14} \text{ J}$
7000 K	$4,973 \cdot 10^{14} \text{ J}$	$6,831 \cdot 10^{14} \text{ J}$	$8,511 \cdot 10^{14} \text{ J}$
8000 K	$5,681 \cdot 10^{14} \text{ J}$	$7,447 \cdot 10^{14} \text{ J}$	$8,902 \cdot 10^{14} \text{ J}$
9000 K	$6,594 \cdot 10^{14} \text{ J}$	$8,329 \cdot 10^{14} \text{ J}$	$9,605 \cdot 10^{14} \text{ J}$
10000 K	$7,700 \cdot 10^{14} \text{ J}$	$9,441 \cdot 10^{14} \text{ J}$	$1,056 \cdot 10^{15} \text{ J}$
11000 K	$8,998 \cdot 10^{14} \text{ J}$	$1,077 \cdot 10^{15} \text{ J}$	$1,187 \cdot 10^{15} \text{ J}$
12000 K	$1,049 \cdot 10^{15} \text{ J}$	$1,230 \cdot 10^{15} \text{ J}$	$1,313 \cdot 10^{15} \text{ J}$

Tabla 4.4: Energía luminosa total liberada en el impacto del 15/10/2021 para las diferentes temperaturas de brillo propuestas y los diferentes canales de color.

Encontramos estos resultados algo diferentes a los obtenidos para el impacto del 2020. En este caso no podemos encontrar temperaturas de brillo que arrojen resultados semejantes para poder identificar el rango de temperaturas para este impacto. Si mostramos estos resultados en una gráfica, el resultado es el de la [Figura 4.5](#). En la imagen no se observa ninguna región clara donde las curvas descritas por los resultados en los tres canales de color converjan o tengan resultados parecidos. Esto puede resultar extraño, ya que uno podría suponer que los resultados fuesen parecidos a los mostrados en la [Figura 4.3](#) pero con diferente orden de magnitud, al ser el mismo observador y mismo telescopio y detector. Por este motivo, no podremos identificar de manera experimental el rango de temperaturas de brillo en la que estará este impacto.

Debido a que no podremos obtener el rango de temperaturas de los datos experimentales, procederemos de la siguiente manera. Primero, debido a que sólo poseemos una observación de este impacto y, además, no podemos obtener el rango de temperaturas de manera experimental, asumimos que la incertidumbre en la temperatura de brillo será alta. Esto mismo ocurriría con el impacto del 2020. Y al igual que con ese impacto, la cantidad de luz capturada en el canal azul es muy superior a la de los otros canales, indicando que la temperatura de brillo será alta.

Por otro lado, utilizaremos el artículo de Arimatsu et al. (2022) para comparar la temperatura de brillo predicha en ese estudio. En este trabajo se indica que la temperatura de brillo que mejor se ajusta a los resultados obtenidos por el sistema PONCOTS en varias longitudes de onda incluida la banda de absorción del metano a 890 nm es de $8300 \pm$

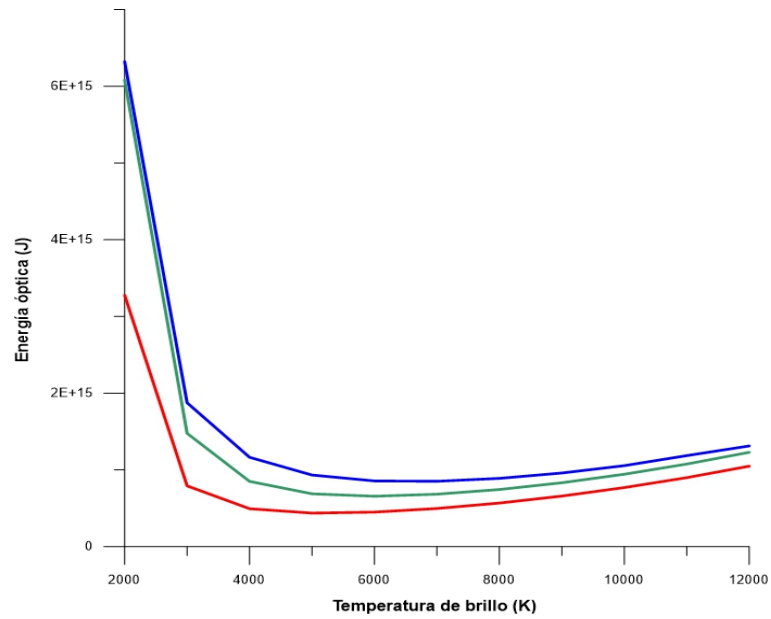


Figura 4.5: Gráfica de la energía óptica total en función de la temperatura de brillo para los datos extraídos del vídeo de Victor PS Ang del impacto del 15 de octubre de 2021.

600 K [10]. Por lo tanto, podemos concluir que el rango de temperaturas indicado para el impacto del 15 de octubre de 2021 es [7000-10000] K, que concuerda con la argumentación expuesta para el impacto del año 2020, el impacto de septiembre de 2021 y los rangos de temperatura que aparecen en la literatura para otros impactos en Júpiter.

Capítulo 5

Energía, masa y tamaño de los impactos

En esta sección se presentan los resultados finales de los análisis hechos para los tres impactos. Aquí se presentarán los resultados de energía cinética con la que impacta contra la atmósfera joviana y la masa y tamaño de estos objetos.

Lo primero que debemos hacer es transformar la energía óptica total calculada en el anterior capítulo en energía cinética. Esa energía será la que posee el objeto en el momento en el que impacta contra la atmósfera. Sabiendo el valor de la energía para cada una de las observaciones podremos calcular la masa y tamaño de los objetos. Será importante saber con qué eficiencia se transforma la energía cinética en energía óptica en el momento del impacto. Existe una fórmula empírica obtenida por Brown et al. (2002) que calcula el valor de la eficiencia, μ , para bólidos en la atmósfera terrestre [16],

$$\mu = 0,12E_0^{0,115}, \quad (5.1)$$

donde E_0 es la energía óptica medida en kilotones de TNT ($1\text{kton} = 4,185 \cdot 10^{12}\text{J}$). Los valores de este factor de eficiencia oscilan entre 0.15 y 0.20. Debemos tener en cuenta que el uso de esta expresión insertará cierta incertidumbre en el cálculo de las masas y tamaños al estar calibradas para impactos de meteoroides en la Tierra y tener valores de energía de entre 0.001 y 1 kton. La energía cinética será el cociente entre la energía óptica y la eficiencia calculada mediante la ecuación 5.1.

Lo siguiente será calcular la masa y diámetro de estos objetos. Para eso, asumiremos que los impactos se darán a velocidades muy cercanas a la velocidad de escape del planeta, 59.5 km/s. Concretamente, se utilizará la velocidad de 60 km/s. La masa se obtendrá directamente de la expresión de energía cinética clásica,

$$m = \frac{2E_{kin}}{v^2}. \quad (5.2)$$

Y para calcular el tamaño de los objetos, tomaremos estos como esféricos y obtendremos el valor del diámetro de la siguiente expresión,

$$D = 2\sqrt[3]{\frac{3m}{4\pi\rho}}, \quad (5.3)$$

utilizando tres valores de densidad diferentes: $\rho_1 = 2 \text{ g/cm}^3$, $\rho_2 = 0,6 \text{ g/cm}^3$ y $\rho_3 = 0,25 \text{ g/cm}^3$. Siendo considerado el último valor, ρ_3 , como el representativo de los fragmentos del SL9 [17], asumiendo, por lo tanto, material cometario altamente poroso.

A continuación se presentarán los resultados obtenidos para cada impacto y observador siguiendo el procedimiento descrito arriba.

5.1. Impacto del 11 de agosto de 2020

En el capítulo anterior hemos fijado el rango de temperaturas de brillo asociadas a este impacto en [7000-10000] K. Por lo tanto, utilizaremos los valores de energía óptica de la [Tabla 4.1](#) correspondientes a ese rango para calcular la energía cinética. Como hasta ahora, el procedimiento se hará con los tres canales de color. Una vez calculada el factor de eficiencia obtenemos los siguientes valores de energía cinética:

	R	G	B
7000 K	$2,367 \cdot 10^{14}$ J	$2,969 \cdot 10^{14}$ J	$3,188 \cdot 10^{14}$ J
8000 K	$2,663 \cdot 10^{14}$ J	$3,205 \cdot 10^{14}$ J	$3,317 \cdot 10^{14}$ J
9000 K	$3,039 \cdot 10^{14}$ J	$3,538 \cdot 10^{14}$ J	$3,548 \cdot 10^{14}$ J
10000 K	$3,486 \cdot 10^{14}$ J	$3,953 \cdot 10^{14}$ J	$3,859 \cdot 10^{14}$ J

Tabla 5.1: Energía cinética del impacto del 11/08/2020 para el rango de temperaturas de brillo propuesto y los diferentes canales de color.

Para obtener la energía cinética media que poseía el objeto a la hora de impactar contra la atmósfera joviana calcularemos el promedio a los resultados presentados en la tabla y la desviación típica. Así, obtenemos un valor de energía de 78 kilotonnes y una desviación típica de 11 ktn, mostrando así un error de alrededor del 14 % en el valor de la energía. Este error no es demasiado realista, ya que no podemos afirmar con tanta certeza el valor de la energía cinética obtenida de un sólo vídeo. Por lo tanto, se ha optado por aplicar un error semejante al obtenido en el impacto del 13 de septiembre de 2021. En ese impacto se han estudiado un total de seis vídeos, haciendo así que los diferentes resultados obtenidos nos den un abanico más realista. Como veremos en la siguiente sección el error relativo obtenido será de alrededor del 27 %. De esta manera, se ha decidido asignar a los resultados de este impacto el mismo error porcentual para conseguir resultados con mayor incertidumbre pero más ajustados a la realidad. Así, obtenemos unos resultados para la energía cinética de 57-99 kilotonnes. Para calcular la masa del objeto impactante hemos calculado la masa promedio para cada temperatura de brillo y le hemos aplicado el mismo error que en el caso de la energía obteniendo así un valor medio de 181 toneladas y una desviación típica de 49 toneladas.

Finalmente, hemos calculado los tamaños del objeto para las tres densidades diferentes. En este caso, los errores relativos obtenidos son aún menores al arrastrar los valores de error de energía y masa. Por lo que se ha optado una vez más por asignar un error semejante al obtenido en el impacto de septiembre de 2021. Dicho valor es inferior al 27 % aplicado para energía y masa, en promedio el error ronda el 12 %. Se obtienen de esta manera los siguientes valores para los diámetros del objeto: (4.9-6.2) m para $\rho_1 = 2 \text{ g/cm}^3$, (7.3-9.3) m para $\rho_2 = 0,6 \text{ g/cm}^3$ y (9.8-12.4) m para $\rho_3 = 0,25 \text{ g/cm}^3$. Estos resultados se encuentran resumidos en la [Tabla 5.3](#) junto a los resultados de los otros dos impactos.

5.2. Impacto del 13 de septiembre de 2021

El método utilizado para calcular los valores de energía cinética, masa y tamaño en el impacto del 13 de septiembre de 2021 ha sido el mismo que el explicado para el anterior impacto, pero con un total de seis vídeos diferentes. Es decir, para cada vídeo hemos calculado primero la energía promedio entre los tres canales de color para cada temperatura de brillo. En el caso de los vídeos monocromáticos directamente hemos utilizado los resultados obtenidos para la energía en el único canal. Después, hemos calculado el promedio entre todos los vídeos para todas las temperaturas de brillo del rango y el correspondiente error de este cálculo.

En este caso existe la posibilidad de tener en cuenta o no los vídeos de J.L. Pereira y del observatorio de AstroQueyras. Como hemos apuntado anteriormente, estos vídeos presentan pixels saturados que hacen que la cantidad de luz detectada sea menor de la que se debería haber detectado. Eso hace que los resultados de energía, masa y diámetro sean inferiores en comparación a los otros cuatro observaciones. Por un lado, el valor medio de la energía cinética calculada incluyendo los resultados de Pereira y AstroQueyras es de 407 kilotones y una desviación típica de 113 kilotones. Obteniendo así un error relativo de alrededor del 27%, valor que se ha utilizado como representativo para calcular la desviación típica del anterior impacto. Si no tuviésemos en cuenta estas dos observaciones la energía media rondaría los 476 kilotones con una desviación típica de 36. Se puede ver como el valor medio en este último caso es superior al excluir del cálculo valores bastante inferiores que no hacen que la media disminuya. Además, debido a la desviación típica tan baja los resultados obtenidos estarán todos muy cerca del valor medio con un error relativo del 7%. Por lo tanto, se cree que estos últimos resultados que excluyen esas dos observaciones serán las mejores estimaciones posibles de energía, masa y tamaño.

Por lo tanto, para calcular la masa y tamaño de los objetos optaremos por excluir los dos vídeos saturados. De esta manera, se obtiene una masa media del objeto de 1107 toneladas y una desviación típica de 83 toneladas y unos tamaños de (8.6-10.5) m para ρ_1 , (14.8-15.6) m para ρ_2 y (19.9-20.9) m para ρ_3 . Los resultados están recogidos en la tabla resumen 5.3 al final de la siguiente sección.

5.3. Impacto del 15 de octubre de 2021

Para este último impacto se ha procedido de la misma manera que con el del 11 de agosto de 2020. Primero, se han obtenido los resultados de energía cinética para las temperaturas del rango de temperatura asociado al impacto, [7000-10000] K. Los resultados se muestran en la siguiente tabla,

	R	G	B
7000 K	$2,392 \cdot 10^{15}$ J	$3,168 \cdot 10^{15}$ J	$3,849 \cdot 10^{15}$ J
8000 K	$2,692 \cdot 10^{15}$ J	$3,420 \cdot 10^{15}$ J	$4,005 \cdot 10^{15}$ J
9000 K	$3,071 \cdot 10^{15}$ J	$3,776 \cdot 10^{15}$ J	$4,284 \cdot 10^{15}$ J
10000 K	$3,523 \cdot 10^{15}$ J	$4,219 \cdot 10^{15}$ J	$4,659 \cdot 10^{15}$ J

Tabla 5.2: Energía cinética del impacto del 15/10/2021 para el rango de temperaturas de brillo propuesto y los diferentes canales de color.

De estos resultados se ha calculado la energía cinética media y su desviación estándar. La energía media es de 857 kilotones con una desviación de 161 ktn. En este caso, esa desviación supone un 19% de error, superior al del 2020. Pero aplicaremos de nuevo el error del 27% que aumente la incertidumbre en el valor de la energía. Además, tenemos más razones para aumentar la incertidumbre en este impacto, ya que no hemos podido obtener el rango de temperaturas de brillo de manera experimental y la incertidumbre en este caso debe ser mayor. Por lo tanto, introducimos una desviación típica de 231 kilotones.

Los siguientes cálculos se repiten, se ha calculado una masa promedio de 1993 toneladas y se le ha aplicado un error del 27% que supone una desviación típica del 538. Y, finalmente, se han calculado los tamaños del objeto para las tres densidades dadas con un error del 12%: (10.9-13.8) m para ρ_1 , (16.2-20.7) m para ρ_2 y (21.7-27.7) m para ρ_3 .

En la siguiente tabla vienen recogidos los resultados principales de este último impacto y de los dos anteriores a modo resumen,

Fecha	Energía cinética (ktn)	Masa ($10^3\text{kg}=\text{ton}$)	Diámetro (m) $\rho = 2,0 \text{ g/cm}^{-3}$	Diámetro (m) $\rho = 0,6 \text{ g/cm}^{-3}$	Diámetro (m) $\rho = 0,25 \text{ g/cm}^{-3}$
2020-08-11	57-99	132-230	4.9-6.2	7.3-9.3	9.8-12.4
2021-09-13	440-512	1024-1190	8.6-10.5	14.8-15.6	19.9-20.9
2021-10-15	625-1088	1455-2531	10.9-13.8	16.2-20.7	21.7-27.7

Tabla 5.3: Resumen de los resultados de energía, masa y tamaño de los impactos estudiados en este trabajo.

5.4. Discusión

Ahora, discutiremos los resultados obtenidos en los anteriores apartados y recogidos en la [Tabla 5.4](#) junto a los resultados de los impactos de 2010-2017. Lo primero que se puede observar es que, como hemos venido indicando durante el trabajo, el impacto del año 2020 es el menos energético de los tres impactos. Es 6 veces menos energético que el de septiembre de 2021 y 10 veces menos energético que el de octubre de ese mismo año. No es el menos energético de entre todos los impactos, ya que como podemos ver el impacto de 2017 presenta valores inferiores. Además, en cuanto a energía se refiere, los dos impactos del año 2021 son hasta la fecha los más energéticos tratados si los comparamos con los estudiados por Hueso et al. (2018) [6].

El impacto de octubre de 2021 es sin lugar a dudas el impacto más energético que se ha obtenido, siempre relacionándolos con los impactos estudiados en Hueso et al. (2018). Esto se debe principalmente a que la duración del impacto es superior a lo observado en los anteriores. De media un impacto de los tamaños que estamos estudiando en este trabajo, 5-20 m, tienen una duración de entre 1 y 2 s. Este impacto, sin embargo, tiene una duración de 5 s en el vídeo de Victor PS Ang. y 5.5 s en el de Ko Arimatsu. De manera razonable, la energía recogida de un impacto más duradero es superior y por eso, en comparación con el impacto observado por el mismo observador un año antes, los valores de energía obtenidos son cerca de un orden de magnitud superior como se puede ver comparando las [Tablas 5.1](#) y [5.2](#).

Fecha	Energía cinética (ktn)	Masa ($10^3\text{kg}=\text{ton}$)	Diámetro (m) $\rho = 2,0 \text{ g/cm}^{-3}$	Diámetro (m) $\rho = 0,6 \text{ g/cm}^{-3}$	Diámetro (m) $\rho = 0,25 \text{ g/cm}^{-3}$
2010-06-03	46-350	107-780	4.7-9.1	7.0-14	9.3-18
2010-08-20	88-260	205-610	5.8-8.4	8.7-13	12-17
2012-09-10	215-405	500-950	7.8-9.7	12-14	15-19
2016-03-17	175-350	403-805	7.3-9.2	10.9-13.7	14-19
2017-05-26	32-55	75-130	4.1-5.0	6.1-7.4	8.3-10
2020-08-11	57-99	132-230	4.9-6.2	7.3-9.3	9.8-12.4
2021-09-13	440-512	1024-1190	8.6-10.5	14.8-15.6	19.9-20.9
2021-10-15	625-1088	1455-2531	10.9-13.8	16.2-20.7	21.7-27.7

Tabla 5.4: Resumen de los resultados de energía, masa y tamaño de los impactos estudiados desde 2010 hasta el 2021. Tabla actualizada de la publicada en Hueso et al. (2018) [6].

Si comparamos los resultados del último impacto estudiado con los obtenidos por Ko Arimatsu para ese mismo impacto se puede observar que existen claras discrepancias entre ellos. En cuanto a la energía cinética del objeto impactante, Arimatsu et al. (2022) calcula una energía promedio de 1768 kilotonnes [10]. En este trabajo, sin embargo, se ha obtenido una energía promedio de 857 kilotonnes. La diferencia es sustancialmente grande haciendo así que no exista posibilidad de acuerdo en los resultados de esta variable. Siguiendo con la masa, la masa promedio obtenida en este trabajo es de 1993 toneladas y en el estudio hecho por Arimatsu y colaboradores de 4100 toneladas. Finalmente, los tamaños obtenidos por Arimatsu también demuestran resultados superiores a los presentados en la [Tabla 5.3](#): 15.8 m para ρ_1 , 23.5 m para ρ_2 y 31.5 m para ρ_3 .

Estos resultados son de gran relevancia porque evidencian que este impacto no supone una gran diferencia con los anteriores observados. Además, los resultados propuestos por Ko Arimatsu influyen en el estudio de la frecuencia con la que impactan estos objetos sobre el planeta Júpiter, pero los obtenidos en este trabajo no influirán de manera sustancial, como lo veremos en el siguiente capítulo. Es decir, por más energético que sea el impacto, los resultados relativos al tamaño están dentro de los límites de estudio de este trabajo.

En relación con esta discrepancia encontrada en los resultados del impacto de octubre de 2021, en el trabajo de Ko Arimatsu se discute la falta de la huella observable que debería haber generado un objeto de 4100 toneladas de peso. El fragmento N del SL9 dejó en la atmósfera joviana una huella observable durante horas que fue observada por el telescopio Hubble (HST). Según los resultados de Arimatsu, este objeto es aproximadamente 3 veces menos masivo que el fragmento N por lo que cabría esperar que con el HST se pudiese observar dicha huella. Observaciones hechas 16 minutos después del impacto desde el observatorio de la Universidad de Kyoto y observaciones hechas desde órbita por la cámara JunoCam 28 horas después del impacto no encontraron ningún tipo de huella visible en la atmósfera. Pese a que el tiempo en el que una huella de este tipo es visible en la atmósfera es desconocido, quizás este impacto concreto no dejó ninguna huella duradera debido a que su tamaño y masa era inferior a la calculada por Arimatsu et al. (2022).

Finalmente, cabe destacar que el impacto del 13 de septiembre de 2021 es comparable al evento de Chelyabinsk en cuanto a energía cinética se refiere [18] y el de octubre de ese mismo año sólo fue cerca de cinco veces menos energético que el impacto de Tunguska [19].

Capítulo 6

Frecuencia de impactos en Júpiter

Hacer una interpretación estadística de los impactos detectados e intentar inferir un flujo o una frecuencia de impactos en Júpiter es una tarea compleja. Es importante tener en cuenta que se han observado muy pocos impactos, 8 detecciones amateurs, como para realizar un análisis con unas bases sólidas. Pese a ello, existen en la literatura diferentes análisis de las frecuencias de los impactos en Júpiter y en esta sección se resumirán los resultados más relevantes, se compararán entre sí y se estudiará la influencia de estos tres últimos hallazgos sobre esos estudios.

Lo primero de todo será identificar los múltiples factores que influyen directamente en la detección de estos impactos. Por un lado, la instrumentación de los observadores impondrá limitaciones importantes en la detección de estos eventos. En este trabajo y en los anteriores ([4]-[6]) se han analizado los flashes generados por objetos de diámetros entre los 5 y 20 m. Es lógico pensar que la cantidad de objetos de menor tamaño es superior y que, por lo tanto, estos objetos impactarán con mayor frecuencia sobre el gigante gaseoso. De todas formas, los telescopios usualmente utilizados por los observadores amateurs no son capaces de detectar los impactos de objetos de un tamaño inferior, como el objeto de 1-4 m que observó el instrumento UVS de la nave Juno [7].

Por otro lado, existen limitaciones que se quedan fuera del alcance del observador, como la época que se pueda observar con calidad el planeta. El momento adecuado para poder observar Júpiter será cerca de la época de su oposición. Cuando esa época se dé en los meses más veraniegos, la capacidad de observación aumentará sustancialmente. Dado que la mayoría de los observadores amateur se encuentran en el hemisferio norte de la Tierra, cuando la oposición del planeta sea cerca del invierno en este hemisferio, menos observadores serán capaces de detectar este tipo de eventos porque el clima no lo permitirá. Un ejemplo de esto lo vemos en el archivo PVOL (Planetary Virtual Observatory and Laboratory). El PVOL es un archivo online que recoge observaciones hechas desde la Tierra por astrónomos amateur de los planetas del Sistema Solar. Entre los años 2010 y 2011 hubo un total de 2400 observaciones del planeta con el descubrimiento de dos de los impactos mencionados en este trabajo [6]. En los años 2013-2015 los meses en los que se dio esta oposición fueron diciembre y febrero, dificultando así la observación. Por este motivo, el número de observaciones se vio reducido un 25 % y no se pudo detectar ningún impacto [6]. Sin embargo, en 2018-2022 la oposición se da entre mayo y septiembre, aumentando la probabilidad de detectar más impactos, como se ha podido comprobar con los impactos de agosto de 2020 y septiembre y octubre de 2021. A este último dato hay que sumarle el hecho de contar con cada vez más observadores observando y analizando

sus vídeos, mejorando la capacidad de detección y la eficiencia de sus estudios.

Hueso et al. (2018) [6] expuso en su trabajo diferentes argumentos para obtener una estimación sobre la cantidad de impactos detectables al año. Primero, estableció un mínimo absoluto únicamente basándose en los cinco impactos detectados entre los años 2010 y 2017, 0.63 impactos por año. Cuya actualización a los ocho impactos detectados entre 2010 y 2021 no supone un gran cambio, 0.67 impactos por año. Después, obtuvo el tiempo total observado del planeta y junto a la cantidad de impactos observados se extrapoló la cantidad de impactos detectables al año. Así, obtuvo una cantidad de 4-18 impactos observables al año. A continuación, se van a actualizar dichos resultados a los impactos de entre 2010 y 2021 y, después, se van a comparar con la actualización hecha por Ko Arimatsu en el artículo del 2022 [10].

El tiempo total observado se obtiene con la siguiente expresión:

$$T = N \cdot t_1 \cdot e, \quad (6.1)$$

donde N es la cantidad total de imágenes obtenidas de la base de datos del PVOL, t_1 el tiempo acumulado por imagen y e la eficiencia para obtener una imagen de calidad que muestre el impacto. El número de imágenes actualizado es de 31971 y los valores de t_1 y e se encuentran entre 5-15 minutos y 0.3-0.5, respectivamente, según Hueso et al. (2013) [5]. Por lo que el valor de T aproximado es de 32-163 días en un total de doce años. Es necesario sumar un factor corrector que estime de manera adecuada el tamaño de la red global de astrónomos amateur. Hueso en el artículo del 2018 estimaba que sólo 2 de los 11 observadores de los impactos eran contribuyentes habituales al archivo PVOL y Arimatsu en el artículo del 2022 estima que sólo 4 de los 25 observadores son colaboradores regulares del PVOL. Por lo tanto, un factor corrector de 25/4 estimaría la red total de observación de Júpiter, aumentando el tiempo total observado a 200-1018 días. Con base en ese tiempo total se obtiene que durante los doce años se ha observado el planeta con una eficiencia de entre el 4.5 y 23.3%. En consecuencia, un total de ocho impactos durante los últimos doce años suponen un ratio de impactos de 3-14 impactos detectables por año. En comparación con los resultados de Hueso et al. (2018), 4-18 impactos por año, supone una disminución de la estimación de la frecuencia de este tipo de eventos.

Para el cálculo de la frecuencia de impactos, Ko Arimatsu utiliza la distribución de Poisson cuyo resultado difiere mucho del presentado aquí. Arimatsu en su artículo obtiene el valor del tiempo total observado T en base a utilizar los valores medios de t_1 y e (10 minutos y 0.4), $T = 550$ días. Siguiendo la distribución de Poisson, $(rT)^{-rT}$, la probabilidad máxima se da cuando $r = 1/T$. Por lo tanto, establecen que el ratio de impactos por año es de $0,7_{-0,6}^{+1,5}$. Ratio que aumenta a $1,3_{-1,1}^{+3,1}$ al tener en cuenta que Tierra sólo se observa la cara diurna del planeta [10].

En el artículo de Hueso y colaboradores del año 2018 se establece un ratio final de 10-65 impactos por año. A esta cifra se le ha aplicado la corrección debida a que los impactos ocurridos en el lado oscuro del planeta no son visibles desde la Tierra y, por lo tanto, el número de impactos potencialmente detectables en Júpiter por año será una cantidad inferior. Como hemos podido comprobar, los tres impactos encontrados en 2020-2021 no modifican sustancialmente la frecuencia de impactos detectables en el planeta Júpiter. Por lo que, se concluye que el ratio de 10-65 impactos por año es totalmente consistente con estos nuevos hallazgos.

Otra estimación para la cantidad de impactos por año es la extraída de DeTeCt. Esta estimación se calcula basándose en la cantidad de observaciones acumuladas y de impactos detectados. DeTeCt estima una cantidad de 20.8 impactos por año, resultado que ya tiene en cuenta las limitaciones relacionadas con los impactos en la cara oculta del planeta. Esta estimación es consistente con los resultados descritos anteriormente.

Un análisis parecido se lleva a cabo en el Giles et al. (2021) [7], aunque el valor de T se obtiene de manera diferente. En este trabajo se estudia un impacto observado por el espectrógrafo UVS de la nave Juno. Este instrumento observa el gigante gaseoso a través de una rendija rectangular, cubriendo un total de $9,3 \cdot 10^{11} \text{ km}^2$ durante 27 *perijoves*. Dado que el flash observado es de una duración de 17 ms y este tipo de eventos tienen una duración media de 1-2 s, la cobertura efectiva del planeta es considerada 88 veces mayor, $8,2 \cdot 10^{13} \text{ km}^2$. Lo que supone un tiempo equivalente de 1300 s. Por lo tanto, utilizando de nuevo la distribución de Poisson con $T = 1300 \text{ s}$, el ratio es de 24000 impactos por año. Sin embargo, el trabajo de Rohini S. Giles está basado en impactos de objetos de entre 250 y 5000 kg, es decir, 1-4 m. Como hemos mencionado anteriormente, la cantidad de objetos de este tamaño que pueden impactar contra Júpiter es muy superior al tipo de objetos que se han estudiado en este trabajo, dando así una frecuencia de impactos muy superior.

Para comparar los resultados, Giles et al. presenta en su trabajo otro estudio hecho por Bland y Artemieva (2006) para calcular el ratio de impactos de meteoroides en la atmósfera superior de la Tierra [20]. En este trabajo se presenta una relación log-log entre el ratio de impactos, N , y la masa de los meteoroides, m ,

$$\log N = -0,926 \log m + 4,739. \quad (6.2)$$

Dado que el trabajo de Hueso et al. se centra en el rango de 100-1000 Tn obteniendo un ratio final de 10-65 impactos por año, usando la ecuación 6.2 se establece un ratio de 2600-17000 impactos por año para objetos de masa superior a 250 kg y de 160-1000 impactos por año para masas superior de 5000 kg. Por lo tanto, extrapolando los resultados de Hueso et al. mediante la expresión dada por Bland y Artemieva se obtiene que el resultado para las masas más pequeñas es consistente con el ratio obtenido por Giles et al. (2021) [7].

Finalmente, vamos a estudiar el ratio de impactos por año en Júpiter en función del tamaño de los objetos. Para ello, utilizaremos la gráfica presentada en la Figura 6.1 y extraída del artículo de Arimatsu et al. (2022). De esta gráfica prestaremos toda la atención en el rectángulo rojo y negro que podemos encontrar en la esquina superior izquierda. El rectángulo negro indica la estimación de impactos por año extraída del artículo de Hueso et al. (2018) para los tamaños de los impactos estudiados entre 2010 y 2017. El rectángulo rojo, sin embargo, indica la estimación de impactos por año calculada por Arimatsu y colaboradores para el tamaño del objeto que impactó en Júpiter el 15 de octubre de 2021.

Como se puede ver, el rango de tamaños que abarca el rectángulo del trabajo de Arimatsu es mayor al haber conseguido tamaños para ese impacto de entre 15.8 y 31.5 metros, en función de la densidad. Además, el ratio de impactos por año obtenido en ese trabajo es inferior como hemos analizado en este mismo capítulo. En este trabajo, sin embargo, se han obtenido resultados diferentes.

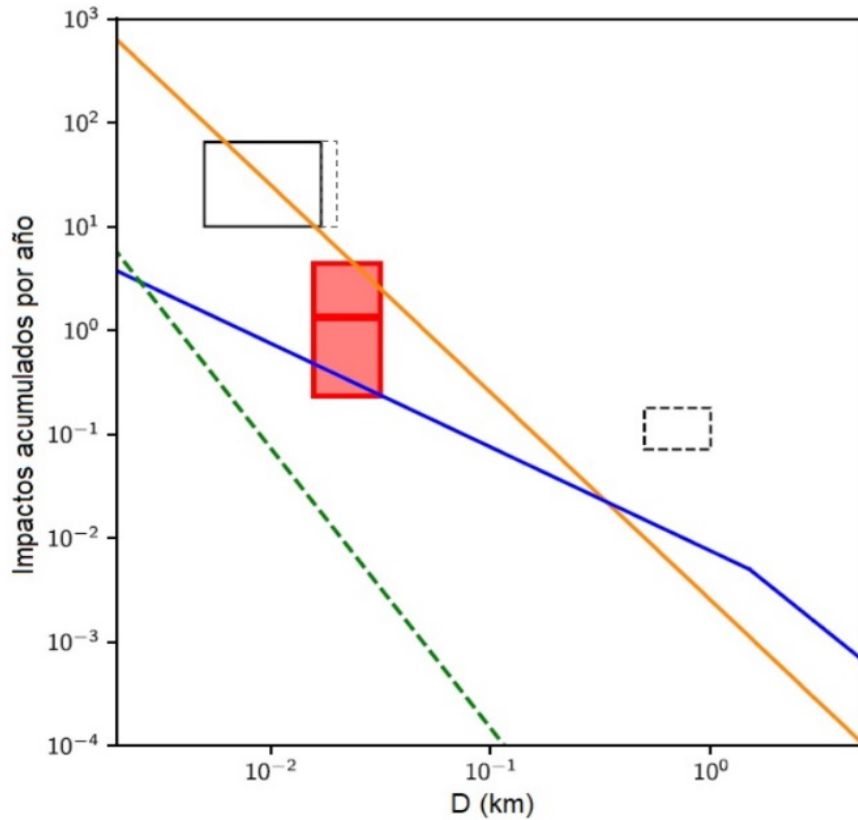


Figura 6.1: Ratio de impactos por año en función del tamaño de los objetos impactantes. Gráfica extraída del artículo de Arimatsu et al. (2022) [10]. El rectángulo rojo indica la estimación del ratio de impactos obtenido por Arimatsu y colaboradores. La línea roja intermedia marca la mejor estimación obtenida de impactos por año. El rectángulo negro indica el ratio de impactos establecido por Hueso et al. (2018) para los cinco impactos estudiados entre 2010-2017 [6]. El rectángulo negro punteado indica la estimación de impactos por año en base a los impactos del SL9 (1994) y del impacto del 2009 extraído de Sánchez-Lavega et al. (2010) [3]. Las líneas naranja y azul son los impactos por año esperados extraídos de modelos dinámicos (Levison et al. (2000), [21]) y del registro de cráteres de las lunas galileanas (Zanhle et al. (2013), [22]), respectivamente. La línea punteada verde indica la estimación de impactos por año en la Tierra extraído de Brown et al. (2002) [16].

Por un lado, hemos concluido que los impactos analizados en este trabajo no influyen ni alteran de manera significativa las estimaciones propuestas por Hueso et al. (2018) para la cantidad de impactos por año. La única diferencia que hay en los resultados propuestos aquí y los de Hueso es en el tamaño obtenido para el impacto del 15 de octubre de 2021 para la densidad mínima. En ese caso el tamaño excede los 20 metros que se trata como límite. Por eso, en la gráfica se ha sumado al rectángulo negro una línea punteada gris que tendría en cuenta el tamaño de este último impacto y que sería totalmente compatible con los impactos estudiados hasta la fecha.

Capítulo 7

Conclusiones

En este trabajo de fin de máster se han examinado tres impactos de objetos de entre 5-20 m de diámetro ocurridos en la atmósfera de Júpiter. Dichos eventos se dieron el 11 de agosto de 2020, el 13 de septiembre de 2021 y el 15 de octubre de 2021. El trabajo se presenta a modo de continuación del artículo publicado por Hueso et al. (2018) para los impactos de objetos semejantes que se dieron entre los años 2010 y 2017.

A continuación se exponen los principales resultados y conclusiones obtenidos.

Las observaciones de estos eventos se han obtenido gracias a la gran cantidad de astrónomos amateurs que observan el gigante gaseoso. Estas observaciones hechas desde la Tierra con instrumental de calidad generan material de investigación que permite realizar trabajos como el que se ha hecho aquí. Los impactos de 2020-2021 han sido observados por un total de 9 observadores (1 el impacto del 11 de agosto de 2020, 6 el impacto de septiembre de 2021 y 2 el de octubre de 2021), más observadores adicionales que han observado el impacto, pero que no han conseguido obtener grabación de ello.

Gracias a estos vídeos se ha conseguido obtener las curvas de luz de cada impacto, de las cuales después se han extraído los resultados de energía, masa y tamaño. Primero, se han generado las imágenes de los fotogramas que recogen el flash de luz ligado al impacto y, tras ubicar la posición de dicho impacto, se han obtenido las curvas de luz tras aplicar fotometría diferencial en las imágenes gracias a un software escrito en IDL. Se han analizado un total de 23 curvas de luz en los diferentes canales de color (rojo, verde, azul) y en blanco y negro. De estas curvas se ha podido concluir la naturaleza menos energética del impacto del año 2020 y la posible fragmentación del objeto en el momento del impacto en los impactos del año 2021.

El paso de obtener las curvas de luz a través de la fotometría diferencial tiene su complejidad. El procedimiento de fotometría diferencial de apertura requiere de la elección de diferentes parámetros que influirán directamente en los resultados finales. Es por eso de vital importancia ubicar correctamente el impacto en las imágenes generadas y elegir bien los parámetros de la máscara circular y del anillo exterior que calcule las diferentes contribuciones de luz para no obtener resultados erróneos. Para ello, en diferentes casos se han repetido los procesos explicados con ligeros cambios en los parámetros para observar su influencia y elegir finalmente los resultados correctos.

El siguiente paso ha sido convertir estas curvas de luz en datos numéricos relacionados con la energía óptica capturada. Este proceso se ha llevado a cabo con otros dos códigos

escritos en IDL. El primero de ellos calcula la fracción de energía solar que es reflejada en el planeta Júpiter y que finalmente es detectada en la Tierra. El segundo calcula la efectividad de detección de las cámaras para obtener la cantidad de energía real generada por el flash de luz. De esta manera, se han obtenido los resultados de energía óptica del impacto y se han estimado las temperaturas de brillo de cada uno de los impactos.

De estos resultados hemos podido concluir que en el impacto del 13 de septiembre de 2021 dos de los vídeos estudiados, J.L. Pereira y AstroQueyras, poseen pixels saturados que detectan menos luz de la que se ha generado en el impacto. Esto se puede ver fácilmente al conseguir resultados de energía inferiores a las otras cuatro observaciones. De las estimaciones de temperaturas de brillo se obtienen rangos con incertidumbres bastante altas. En los impactos que sólo se ha podido analizar un único vídeo la incertidumbre es aún mayor debido a la imposibilidad de comparar resultados de diferentes observaciones de un mismo impacto, como en el caso del 13 de septiembre de 2021.

Después, se han obtenido los resultados finales de energía cinética, masa y tamaño para los tres impactos. Se han obtenido valores de energía de 57-99 ktn, 440-512 ktn y 625-1088 ktn para los impactos de agosto de 2020, septiembre de 2021 y octubre de 2021, respectivamente. El primer impacto es sin duda el menos energético de los tres. Este impacto y el del 26 de mayo de 2017 son los menos energéticos y, por lo tanto, los impactos cuyos objetos impactantes son menos masivos y más pequeños, con resultados de entre 75 y 230 toneladas de peso y diámetros de entre 4.1 a 12.4 m para las diferentes densidades.

Los impactos del año 2021, sin embargo, son los dos impactos más energéticos observados hasta ahora de entre los objetos de 5-20 m. El impacto de septiembre tiene valores de energía ligeramente superiores a los observados el 10 de septiembre de 2012, con resultados de energía de 440-512 ktn y de masa de entre 1024 y 1190 toneladas. El impacto de octubre presenta resultados de energía muy superiores, hasta 1088 ktn, y de masa de 1455-2531 toneladas. Incluso se han obtenido resultados de diámetro superiores al límite de estudio de 20 m que había sido establecido hasta el momento para el valor mínimo de densidad.

Los resultados de este último impacto han sido comparados con el estudio hecho por Arimatsu et al. (2022) para este mismo evento [10]. Ambos trabajos hemos llegado a la conclusión de que este impacto es, en lo que se refiere a los anteriores, el más energético observado, pero los resultados arrojan diferencias. Los resultados de energía, masa y diámetros obtenidos por Arimatsu y colaboradores son muy superiores a los conseguidos en este trabajo del vídeo del astrónomo amateur Victor PS Ang, cerca del doble en todos los resultados. De esa manera, en este trabajo se ha llegado a la conclusión de que este impacto no es diferente a lo observado hasta el momento, como si concluye Arimatsu en su trabajo.

Finalmente, se ha estudiado la bibliografía relacionada con las estimaciones hechas hasta el momento del ratio de impactos por año. Se ha actualizado la estimación hecha por Hueso et al. (2018) de impactos por año y se ha concluido que estos tres nuevos impactos no influyen ni alteran significativamente los resultados expuestos en ese trabajo [6]. Dichos resultados son compatibles con la estimación dada por el programa DeTeCt y muy superior a la estimación que da Arimatsu en su trabajo [10]. En cuanto a la

estimación de impactos por año en función del tamaño del objeto, se presenta una gráfica extraída del artículo de Arimatsu et al. (2022) de la cual se modifica muy levemente el resultado relacionado con el artículo de Hueso para introducir los resultados de diámetro algo superiores que se han obtenido en este trabajo.

De cara al futuro, se espera que aumente la cantidad de impactos observados a consecuencia del aumento de observadores amateur que contribuyen mediante el software DeTeCt al proyecto. El hecho de que las cámaras modernas posibiliten la captura de vídeos con un ratio de *frames* por segundo superior a 60 ayudará también a obtener vídeos con mayor calidad y mejor relación señal-ruido. Aunque quizás los próximos años no sean los mejores para realizar estos descubrimientos, ya que la oposición de Júpiter se dará entre los meses de noviembre y febrero en los años 2023-2027. Además, se descubrirán impactos de objetos cada vez más pequeños gracias a las observaciones obtenidas de misiones como la JUNO o JUICE, que permitirán incluso aumentar la frecuencia de impactos al observar en sus sobrevuelos la cara nocturna del planeta.

Finalmente, estudiar la frecuencia de este tipo eventos sobre Júpiter será importante para analizar el potencial riesgo de impactar contra la Tierra. La frecuencia de impactos de este tipo de objetos sobre la Tierra es cerca de cuatro órdenes inferior en comparación a la de Júpiter [21], pero avanzar en el estudio de estos impactos ayudará a determinar con mayor certeza su influencia sobre nuestro planeta.

Bibliografía

- [1] J. Harrington, I. de Pater, S. H. Brecht, D. Deming, V. Meadows, K. Zahnle, and P. D. Nicholson, “Lessons from Shoemaker-Levy 9 about Jupiter and planetary impacts,” in *Jupiter. The Planet, Satellites and Magnetosphere* (F. Bagenal, T. E. Dowling, and W. B. McKinnon, eds.), vol. 1, pp. 159–184, 2004.
- [2] F. Bagenal, T. E. Dowling, and W. B. Mckinnon, *Jupiter: The planet, satellites and magnetosphere*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [3] A. Sánchez-Lavega, A. Wesley, G. Orton, R. Hueso, S. Perez-Hoyos, L. N. Fletcher, P. Yanamandra-Fisher, J. Legarreta, I. de Pater, H. Hammel, A. Simon-Miller, J. M. Gomez-Forrellad, J. L. Ortiz, E. García-Melendo, R. C. Puetter, and P. Chodas, “THE IMPACT OF a LARGE OBJECT ON JUPITER IN 2009 JULY,” *The Astrophysical Journal*, vol. 715, pp. L155–L159, may 2010.
- [4] R. Hueso, A. Wesley, C. go, S. Perez-Hoyos, M. Wong, L. Fletcher, A. Sanchez-Lavega, M. Boslough, I. Pater, G. Orton, A. Simon, G. Djorgovski, M. Edwards, H. Hammel, J. Clarke, K. Noll, and P. Yanamandra-Fisher, “First earth-based detection of a superbolide on jupiter,” *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 721, 09 2010.
- [5] Hueso, R., Pérez-Hoyos, S., Sánchez-Lavega, A., Wesley, A., Hall, G., Go, C., Tachikawa, M., Aoki, K., Ichimaru, M., Pond, J. W. T., Korycansky, D. G., Palotai, C., Chappell, G., Rebeli, N., Harrington, J., Delcroix, M., Wong, M., de Pater, I., Fletcher, L. N., Hammel, H., Orton, G. S., Tabe, I., Watanabe, J., and Moreno, J. C., “Impact flux on jupiter: From superbolides to large-scale collisions,” *A&A*, vol. 560, p. A55, 2013.
- [6] R. Hueso, M. Delcroix, A. Sánchez-Lavega, S. Pedranghelu, G. Kernbauer, J. McKeon, A. Fleckstein, A. Wesley, J. M. Gómez-Forrellad, J. F. Rojas, and J. Juaristi, “Small impacts on the giant planet Jupiter,” , vol. 617, p. A68, Sept. 2018.
- [7] R. S. Giles, T. K. Greathouse, J. A. Kammer, G. R. Gladstone, B. Bonfond, V. Hue, D. C. Grodent, J.-C. Gérard, M. H. Versteeg, S. J. Bolton, J. E. P. Connerney, and S. M. Levin, “Detection of a Bolide in Jupiter’s Atmosphere With Juno UVS,” , vol. 48, p. e91797, Mar. 2021.
- [8] L. Calderón, “Análisis y detección de impactos en vídeos de Júpiter,” Master’s thesis, Escuela de Ingeniería, Bilbao, 2011.
- [9] R. Hueso, T. del Río-Gaztelurrutia, A. Sánchez-Lavega, M. Delcroix, J. Juaristi, and L. C. Fernández-González, “Detectability of possible space weather effects on Mars upper atmosphere and meteor impacts in Jupiter and Saturn with small telescopes,” *Journal of Space Weather and Space Climate*, vol. 8, p. A57, Dec. 2018.

-
- [10] K. Arimatsu, K. Tsumura, F. Usui, and J. Watanabe, “Detection of an Extremely Large Impact Flash on Jupiter by High-cadence Multiwavelength Observations,” , vol. 933, p. L5, July 2022.
- [11] K. Arimatsu, K. Tsumura, K. Ichikawa, F. Usui, T. Ootsubo, T. Kotani, Y. Sarugaku, T. Wada, K. Nagase, and J. Watanabe, “Organized Autotelescopes for Serendipitous Event Survey (OASES): Design and performance,” , vol. 69, p. 68, Aug. 2017.
- [12] Mendikoa, I., Sánchez-Lavega, A., Pérez-Hoyos, S., Hueso, R., Félix Rojas, J. and Aceituno, J., Aceituno, F., Murga, G., De Bilbao, L., and García-Melendo, E., “PlanetCam UPV/EHU: A Two-channel Lucky Imaging Camera for Solar System Studies in the Spectral Range 0.38-1.7 μm ,” , vol. 128, p. 035002, Mar. 2016.
- [13] L. Colina, R. C. Bohlin, and F. Castelli, “The 0.12-2.5 micron Absolute Flux Distribution of the Sun for Comparison With Solar Analog Stars,” , vol. 112, p. 307, July 1996.
- [14] E. Karkoschka, “Spectrophotometry of the Jovian Planets and Titan at 300- to 1000-nm Wavelength: The Methane Spectrum,” , vol. 111, pp. 174–192, Sept. 1994.
- [15] *The Collision of Comet Shoemaker-Levy 9 and Jupiter*, July 1996.
- [16] P. Brown, R. E. Spalding, D. O. ReVelle, E. Tagliaferri, and S. P. Worden, “The flux of small near-Earth objects colliding with the Earth,” , vol. 420, pp. 294–296, Nov. 2002.
- [17] D. A. Crawford, “Comet Shoemaker-Levy 9 Fragment Size Estimates: How Big was the Parent Body?,” *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 822, p. 155, May 1997.
- [18] P. G. Brown, J. D. Assink, L. Astiz, R. Blaauw, M. B. Boslough, J.čka@, N. Brachet, D. Brown, M. Campbell-Brown, L. Ceranna, W. Cooke, C. de Groot-Hedlin, D. P. Drob, W. Edwards, L. G. Evers, M. Garces, J. Gill, M. Hedlin, A. Kingery, G. Laske, A. Le Pichon, P. Mialle, D. E. Moser, A. Saffer, E. Silber, P. Smets, R. E. Spalding, P.ý@, E. Tagliaferri, D. Uren, R. J. Weryk, R. Whitaker, and Z. Krzeminski, “A 500-kiloton airburst over Chelyabinsk and an enhanced hazard from small impactors,” , vol. 503, pp. 238–241, Nov. 2013.
- [19] M. B. E. Boslough and D. A. Crawford, “Low-Altitude Airbursts and the Impact Threat,” *International Journal of Impact Engineering*, vol. 35, pp. 1441–1448, Jan. 2008.
- [20] P. A. Bland and N. A. Artemieva, “The rate of small impacts on Earth,” , vol. 41, pp. 607–631, Apr. 2006.
- [21] H. F. Levison, M. J. Duncan, K. Zahnle, M. Holman, and L. Dones, “NOTE: Planetary Impact Rates from Ecliptic Comets,” , vol. 143, pp. 415–420, Feb. 2000.
- [22] K. Zahnle, P. Schenk, H. Levison, and L. Dones, “Cratering rates in the outer Solar System,” , vol. 163, pp. 263–289, June 2003.