

METODOLOGÍA PARA DETERMINAR ALGUNOS PARÁMETROS FÍSICOS DE METEOROIDES A PARTIR DE LA OBSERVACIÓN DE SUS METEOROS, UTILIZANDO UNA SOLA CÁMARA

Hugo-Heomar Ramos-Hernández^{1,*}; Guadalupe Cordero-Tercero^{2,†}

¹Máster en Astronomía y Astrofísica, Dpto. de Astronomía y Astrofísica, Universidad Nacional Autónoma de Honduras, Ciudad Universitaria, Tegucigalpa, Honduras.

²Dra. en Física Espacial, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito de la Investigación Científica s/n, C.U., Coyoacán, 04150 CDMX, México.

Recibido: 10-07-2025

Aceptado: 20-01-2026

DOI: <https://doi.org/10.5377/ce.v16i2.22035>

RESUMEN

Durante décadas se ha investigado el comportamiento físico del material asteroidal y cometario cuando interactúa con la atmósfera terrestre. Estos objetos presentan distintas composiciones que varían de la rocosa a la metálica, pasando por una mezcla de ellas. El material cometario, además de su componente rocosa, contiene hielo de algunos compuestos volátiles. Los objetos que ingresan a la atmósfera de la Tierra lo hacen a velocidades geocéntricas de entre 11 y 70 km/s y a ángulos de impacto de entre 0° y 90°. Dichos objetos sufren una serie de fenómenos producto de su interacción con la atmósfera y, si ellos llegan a la superficie de la Tierra con suficiente energía cinética, también pueden crear cráteres de impacto. Al fenómeno lumínico producido por la interacción de cuerpos menores con la atmósfera se conoce como meteoro. En este trabajo se plantea un método para estimar algunos parámetros físicos de meteoroides a partir de la observación de sus meteoros, por medio de registros de videos tomados por una cámara sensible al infrarrojo, instalada en el edificio K1 de la Facultad de Ciencias Espaciales de la Universidad Nacional Autónoma de Honduras. Para el análisis de los datos se emplearon herramientas especializadas como Stellarium, ImageDS9, UFOCapture y Fitswork4. A partir de los videos capturados, y mediante un conjunto de transformaciones y procesos de calibración, se determinaron las trayectorias de los objetos en coordenadas ecuatoriales, así como las velocidades y aceleraciones angulares de los meteoroides. Si bien en las redes de meteoros instaladas en otras partes del mundo este es un proceso bien conocido, los dos objetivos de este trabajo fueron evaluar qué tanto se puede saber de este fenómeno utilizando una sola cámara y entender lo que se ha hecho para apropiarnos de ese conocimiento con la intención de planear el trabajo futuro.

Palabras clave: Asteroide, meteoroides, meteoro, observaciones, cámara.

ABSTRACT

For decades, the physical behavior of asteroidal and cometary material when it interacts with the Earth's atmosphere has been investigated. These objects have compositions that range from rocky to metallic, with a mix of both. The cometary material contains a rocky component and volatile ice.

*hugo.ramos@unah.edu.hn.  <https://orcid.org/0000-0002-5024-9141>

†gcordero@igeofisica.unam.mx.  <https://orcid.org/0000-0001-8135-9792>

Objects entering the Earth's atmosphere do so at geocentric speeds between 11 and 70 km/s and at impact angles between 0° and 90° . These objects undergo a series of phenomena as they interact with the atmosphere, and if they reach the Earth's surface with sufficient kinetic energy, they can create impact craters. The phenomenon produced by the interaction with the atmosphere, the emission of light, is known as a meteor. In this research, a method is proposed to estimate certain physical parameters of meteoroids from observations of their meteors, based on video recordings taken by a sensitive infrared camera located in the K1 building of the Faculty of Sciences at the National Autonomous University of Honduras. Using a series of software (Stellarium, ImageDS9, UFOCapture, Fitswork4), the videos obtained were analyzed, and, based on these data and a set of transformations, their angular velocity and acceleration were estimated. Although this is a well-known process in the Meteor Networks installed in other parts of the world, the two objectives of this work were to evaluate how much we get to know about this phenomenon using a single camera and to understand what has been done to appropriate that knowledge to plan future work.

Keywords: Asteroid, meteoroid, meteor, observations, camera.

1 Introducción

Cada día ingresan a la atmósfera terrestre toneladas de material de naturaleza asteroidal y cometaria: más de 1000 kg, según [Passey y Melosh \(1980\)](#), y entre 3 y 300 toneladas métricas, según [Plane \(2012\)](#). La forma de estos objetos es irregular y sus tamaños son diversos. Cuerpos de dimensiones mayores, menos comunes y con mayores energías cinéticas, pueden atravesar la atmósfera y llegar a la superficie de la Tierra con suficiente energía cinética como para producir un cráter de impacto ([Passey y Melosh, 1980](#)). Algunos de estos grandes impactos seguramente modificaron la superficie de nuestro planeta, como lo han hecho impactos similares en otras superficies planetarias, y afectaron profundamente los ecosistemas terrestres. Un ejemplo de esto último fue la formación del cráter de impacto de Chicxulub, cuyo choque y fenómenos posteriores relacionados con él, ocasionaron la extinción de los grandes saurios (p. ej. [Alvarez et al. \(1980\)](#); [Longrich et al. \(2012\)](#)).

La densidad de la atmósfera terrestre empieza a ser apreciable alrededor de los 100 km de altura. En esa zona, el choque de las partículas del aire con el material asteroidal o cometario hace que estos objetos se empiecen a calentar, posteriormente, se fundirán y evaporarán (es decir, perderán masa, se ablacionarán). El aire atmosférico y el vapor del objeto se ionizan produciendo la emisión de luz (en primera aproximación, también se supone que el objeto emite una radiación de cuerpo negro). Esta luz se conoce como meteoro, o como bólido si el meteoro es más brillante que el planeta Venus. En el momento en que la luz cesa, es decir, cuando deja de perder masa por alcanzar la velocidad terminal, ya no es posible observarlo a simple vista ([Ceplecha et al., 1998](#)).

El análisis de la traza del meteoro nos proporciona información sobre la trayectoria de pre-entrada a la atmósfera del cuerpo cósmico, la trayectoria seguida durante su caída y del material del cual está hecho. Las antiguas civilizaciones orientales de China, Japón y Corea observaron y registraron meteoros, lluvias de estrellas y caídas de meteoritos desde hace muchos siglos: Japón desde el 636 e.c, Corea desde el 57 a.e.c y China desde el 645 a.e.c. ([Yang et al., 2005](#)). Durante la Edad Media y el Renacimiento también se realizaron observaciones en Europa, aunque no en forma tan sistemática como lo hicieron en Asia ([Marvin, 2006](#)).

En el siglo XVIII, una de las interrogantes acerca de los meteoros era la altura a la cual se producía el fenómeno ([Marvin, 2006](#)). Ernst Chladni, el padre de la meteorítica, sugirió a Georg Christoph Lichtenberg realizar observaciones de meteoros durante una lluvia de estrellas desde dos puntos distintos sobre

la superficie de la Tierra, para estimar la altura y la trayectoria reales del objeto. Lichtenberg encargó esta tarea a dos de sus estudiantes: Johann Friedrich Benzenberg y Heinrich Wilhelm Brandes. Entre septiembre y octubre de 1798, con una distancia entre ellos de 15.61 km, observaron 402 meteoros de los cuales 22 fueron comunes. A partir de sus observaciones, Benzenberg y Brandes concluyeron que los meteoros ocurrían a alturas entre 26 km y 170 km moviéndose a velocidades de entre 29 y 44 km/s (Marvin, 2006). El método de observación propuesto por Chladni se emplea actualmente utilizando varias estaciones de observación.

Además de observaciones “a ojo”, en las últimas décadas se han desarrollado más formas de observar la entrada de asteroides y material cometario a la atmósfera terrestre; entre éstas se encuentran fotografías, videos, radar, infrasonido, sonido y LIDAR (Trigo-Rodríguez *et al.*, 2008). De estos métodos, el registro de meteoros por medio de videos es el más extendido, entre otras cosas, por ser el método más barato y por brindar una amplia información. Esta es la razón por la cual este estudio se realizó empleando el método de registro de meteoros mediante videos.

En el presente trabajo se obtuvieron algunos parámetros físicos de meteoroides que ingresaron a la atmósfera terrestre en el cielo de Tegucigalpa, Honduras, y fueron registrados desde el edificio K1 de la Facultad de Ciencias Espaciales de la Universidad Nacional Autónoma de Honduras. Para esta investigación se contó con una base de datos de alrededor de 400 meteoros, captados desde el mes de octubre de 2018 hasta inicios de abril de 2019, de los cuales se seleccionaron 5 videos. El criterio de selección fue que el video mostrara una traza del meteorito suficientemente grande como para contar con un buen número de datos para analizar, así como una buena nitidez en sus imágenes, cuadro por cuadro.

El presente documento está organizado en secciones, cada una de las cuales aborda diferentes aspectos. En la sección 2 se presenta en detalle la metodología aplicada tanto para el manejo de las imágenes como para el análisis de datos. Los resultados obtenidos se describen en la sección 3. Finalmente, en la sección 4 se presentan las conclusiones de este trabajo de investigación.

2 Metodología y obtención de datos

En este trabajo presentamos los resultados obtenidos de analizar una serie de videos donde se observan meteoros, con la intención de estimar velocidades y aceleraciones angulares de los objetos cósmicos registrados, así como sus trayectorias proyectadas en la bóveda celeste. Dicha determinación se realizó a partir de videos obtenidos por una única estación de observación compuesta por una sola cámara. Como la mayoría de este material es menor a unos cuantos metros, en nuestro escrito les llamaremos meteoroides (Cordero-Tercero *et al.*, 2023).

La obtención de la información de los meteoros asociados a la entrada de meteoroides se llevó a cabo en dos partes: la primera consistió en depurar la imagen original y la segunda en emplear la información de la imagen resultante para calcular algunos parámetros tales como la velocidad angular y la aceleración angular del meteoritoide. En las siguientes secciones describiremos el método con detalle.

2.1 Características generales del equipo y lugar de observación

2.1.1 Característica de la cámara, ubicación, tiempo de observación

La cámara empleada es una Watec-902H (EIA, CCIR). Dicha cámara se colocó en la Facultad de Ciencias Espaciales de la Universidad Nacional Autónoma de Honduras, empotrada en un tubo sobre el techo del

edificio K1 a una altura de 4 m sobre el piso (ver imagen 1). Las coordenadas del sitio de observación son $14^{\circ}5'14.75''$ N, $87^{\circ}9'34.69''$ O. El centro del campo de visión de la cámara se orientó hacia el zenit del sitio de observación. Esta elección se hizo por dos razones: la primera para evitar la mayor contaminación lumínica posible y la segunda porque sólo se cuenta con una cámara y, como los meteoroides no tienen una dirección preferencial de caída, en realidad no importaba tanto la dirección a la cual se dirigiera (a menos que se quiera observa una lluvia de estrellas en particular, en cuyo caso sí convendría cambiar la dirección hacia el radiante de la lluvia de estrellas). El periodo de observación empleado para registrar meteoros desde Tegucigalpa, Honduras es de 12 horas: de 17:30 h a 5:30 h. La razón de esto es la facilidad para observar meteoros durante la noche y el hecho de que las observaciones diurnas causan problemas tanto en el equipo como en el sistema de almacenamiento.



Figura 1: En el lado izquierdo de esta figura se muestran distintas tomas de la cámara empleada. En la imagen de la derecha se muestra la posición de la cámara durante el tiempo de observación. Fotografías tomadas por Ramos-Hernández en 2018.

2.2 Descripción del software empleado

En nuestro trabajo utilizamos una serie de programas para la detección de meteoros, la conversión de imágenes y la extracción de las coordenadas de imagen del meteorito, cuadro por cuadro. Es importante hacer notar que todo el software empleado es de uso libre (Fitwork, SAOImage DS9, Stellarium) o cuenta con un periodo de prueba gratuito (UFO Capture, 30 días). Describiremos brevemente estos programas en los párrafos siguientes.

2.2.1 Descripción del UFO Capture

El UFO Capture es un software de captura de video que puede programarse para captar objetos en movimiento (SonotaCo, 2025). Cuando se programa de esta manera, el software comienza a grabar en el disco duro de una computadora desde unos pocos segundos antes de que se reconozca un objeto en movimiento hasta unos pocos segundos después de que finalice dicha acción. En este enlace: http://sonotaco.com/e_index.html, se pueden consultar más detalles.

2.2.2 Descripción de Fitswork

Fitswork es un programa de tratamiento de imágenes diseñado especialmente para propósitos astronómicos (Dierks, sf). Dentro de su entorno y funcionalidad está el procesamiento de imágenes. Fitswork es fácil de manejar y está diseñado para la astrofotografía. En nuestro trabajo solamente usamos Fitswork como herramienta para convertir la imagen en formato .jpg que genera el UFO Capture a formato .fits. Esto se debe a que los programas en astronomía solo pueden leer este último tipo de formato. En este enlace: https://www.fitswork.de/software/softw_es.php, se puede descargar el software y obtener más información.

2.2.3 Descripción de SAOImage DS9

SAOImage DS9 es una aplicación de visualización de datos e imágenes astronómicas (Joye, 2019). Admite imágenes en formato .fits, permite manipular regiones y cuenta con numerosos algoritmos; además, facilita la comunicación con tareas de análisis externas y es compatible con diferentes sistemas operativos. SAOImage DS9 es una aplicación independiente; no requiere instalación o archivos de soporte. SAOImage DS9 tiene funciones tales como imágenes en mosaico, marcadores geométricos, manipulación de mapas de colores, escalado, zoom arbitrario, recorte, rotación, desplazamiento y una variedad de sistemas de coordenadas que sirven para análisis de imágenes. En este enlace: <http://ds9.si.edu/site/Home.html>, se encuentran las especificaciones y uso del programa. En nuestro estudio, contribuye a extraer las coordenadas de la traza del meteoro.

2.2.4 Descripción de Stellarium

Stellarium es un motor de simulación cuyo objetivo es mostrar la bóveda celeste tanto para poder visualizar estrellas y planetas que a simple vista no se ven debido a la contaminación lumínica y atmosférica como para trabajos en arqueoastronomía, donde se necesita identificar posiciones de cuerpos cósmicos relacionados con construcciones hechas por el ser humano en distintas épocas históricas (Zotti *et al.*, 2021). Stellarium se puede utilizar tanto como una aplicación en el celular como en un equipo de cómputo.

2.3 Tratamiento de las imágenes

2.3.1 Formatos de la información obtenida

Cuando registramos un meteoro mediante el UFO Capture se crean varios archivos en distintos formatos: .avi (muestra el video completo del inicio al final del meteoro), .bmp (exhibe parte de la traza del meteoro delimita por un rectángulo), .jpg (muestra la traza del meteoro en una imagen de 720 px de largo por 576 px de alto), .jpg (muestra la traza del meteoro y un recuadro que contiene parte de esa traza). En este caso, la imagen tiene 320 px de largo por 240 px de alto) y .xml (muestra algunas coordenadas (x,y) de la traza del meteoro; es decir, es un archivo de datos) (ver Figura 2). Para obtener los datos, es necesario depurar primero las imágenes. Para esto se lleva a cabo una serie de correcciones que describiremos en los siguientes párrafos.

2.3.2 Dark

El Dark es un proceso que se emplea para identificar los pixeles dañados del CCD de la cámara. Este se obtiene de dos formas: a) tapando la cámara con una tela o base oscura y generando un video de 1 a 2 segundos; este video se introduce a un programa para separarlo cuadro por cuadro de los cuales se eligen 5 que nos muestren los pixeles dañados y b) se expone la cámara al cielo nocturno y se elige un valor de

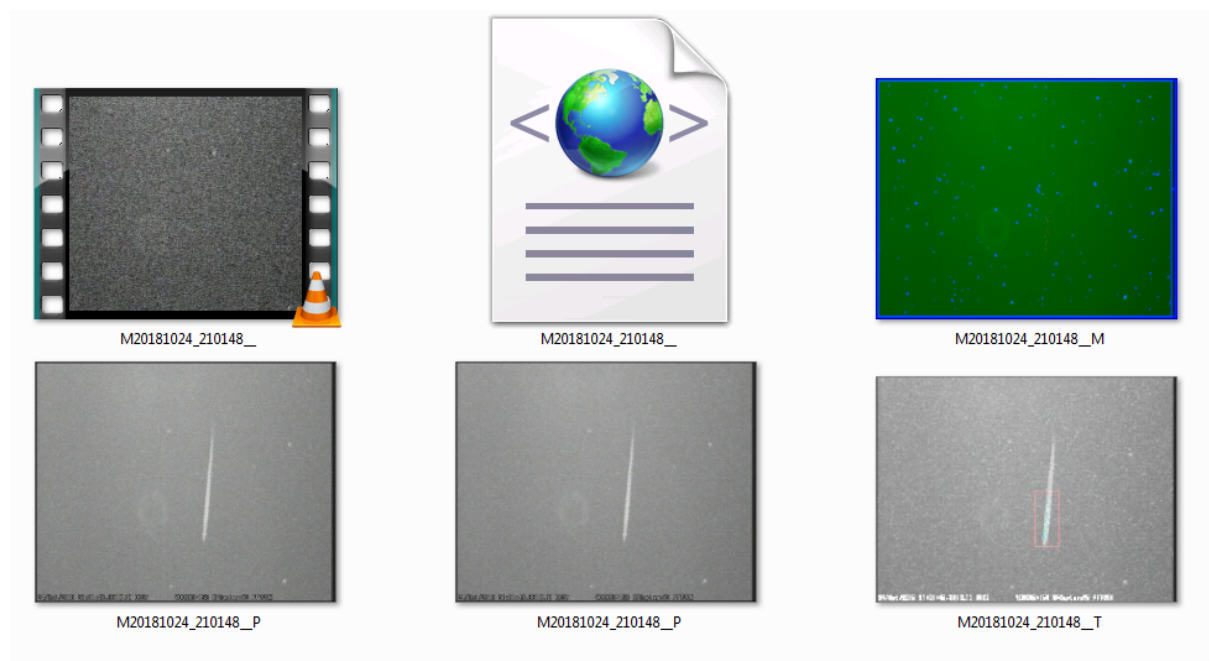


Figura 2: En la imagen se observan los archivos generados por el software UFO Capture. En la fila superior, de izquierda a derecha, se muestran una captura de video en formato .avi, un archivo en formato .xml que proporciona los datos de la traza del meteorito y una imagen en formato .bmp, presentada en color verde. En la fila inferior, de izquierda a derecha, se presentan: la imagen de la traza del meteorito en formato .jpg (resolución de 720 x 576 píxeles); una imagen en formato .jpg (320 x 240 píxeles); y, finalmente, la imagen en formato .jpg (archivo), en la que se muestra parte de la traza del meteorito dentro de un recuadro rojo.

saturación cero en el programa de UFOCapture; bajo estas condiciones se toma un video 1 a 2 segundos; finalmente se toman 5 cuadros como en el caso del inciso (a). Independientemente del método empleado, de los 5 cuadros obtenidos se elige aquel donde los pixeles dañados del CCD se registren mejor. A este cuadro le llamamos el Dark y servirá para diferenciar los pixeles dañados de las estrellas de referencia (ver Figura 3).

2.4 Identificación de estrellas de referencia y obtención de algunas cantidades físicas

Una vez que determinamos el Dark, se cuentan con las condiciones necesarias para identificar las estrellas de referencia que se emplearán para determinar algunos parámetros del meteorito, en particular, la localización de su traza en coordenadas ecuatoriales.

Para llevar a cabo la identificación de las estrellas de referencia se realizó lo siguiente: a) comparamos la imagen obtenida durante el proceso de Dark (ver Figura 3), con la imagen original de la traza del meteorito generada por UFOcapture con la intención de diferenciar entre los pixeles dañados y las estrellas de referencia, b) buscamos en el programa Stellarium la zona del cielo observada considerando la fecha, hora y coordenadas geográficas del observador en el momento de la grabación del meteorito; c) superpusimos la imagen original (Figura 4) con la captura de pantalla realizada mediante Stellarium (Figura 5). Mediante esta superposición es posible identificar las estrellas de referencia (Figura 6), d) una vez identificadas las estrellas de referencia de la manera descrita anteriormente, por medio de la base de Stellarium se obtienen los nombres y las coordenadas ecuatoriales (ascensión recta y declinación) de las estrellas de referencia.



Figura 3: En esta imagen se muestran los pixeles dañados encerrados en círculos azules. Esto contribuye a identificar las estrellas de referencia.

2.5 Comparación de la traza meteoro con los datos obtenidos por UFO Capture

Entre la información proporcionada por el software UFO Capture está el archivo en formato .xml, el cual contiene las coordenadas de imagen (x,y) de algunos puntos de la traza del meteoro. Con estos datos, hicimos un gráfico en Microsoft Excel© con el objetivo de verificar que las coordenadas del archivo .xml correspondieran con las de la traza del meteoro dada por la imagen obtenida con el UFO Capture. Esas coordenadas se emplearon posteriormente para determinar la velocidad y la aceleración angulares del objeto. Por otro lado, si cuando se fragmentaba el video obtenido por UFO Capture se obtenía un número mayor de cuadros que de puntos registrados en el documento .xml, no a todos los cuadros se les podía asignar un punto del citado documento; cuando esto ocurría, se prefería obtener las coordenadas de imagen leyéndolas de la figura de la traza del meteoro generada por UFOCapture, de lo contrario, se utilizaban las coordenadas del documento .xml.

2.6 Cálculo de la velocidad angular

Para calcular la velocidad angular, primero es necesario determinar la posición del meteoróide sobre la esfera celeste durante el tiempo de observación. Lograr esto implica realizar una transformación de coordenadas de imagen (x,y) a coordenadas ecuatoriales (α , δ). Para lograr esto, primero se delimita la zona en la imagen donde está la traza del meteoro “encerrándolo” en un polígono cuyos vértices son las estrellas de referencia alrededor de la traza y después se obtienen las coordenadas del centro geométrico de dicho polígono (Cornejo-Patiño (2017) y referencias citadas en ese trabajo de tesis). En primera aproximación, consideramos que este punto coincide con el punto de tangencia de un plano perpendicular a la línea de



Figura 4: Traza del meteoro y estrellas de referencia.



Figura 5: Imagen de Stellarium que sirvió para identificar las estrellas de la Figura 4.

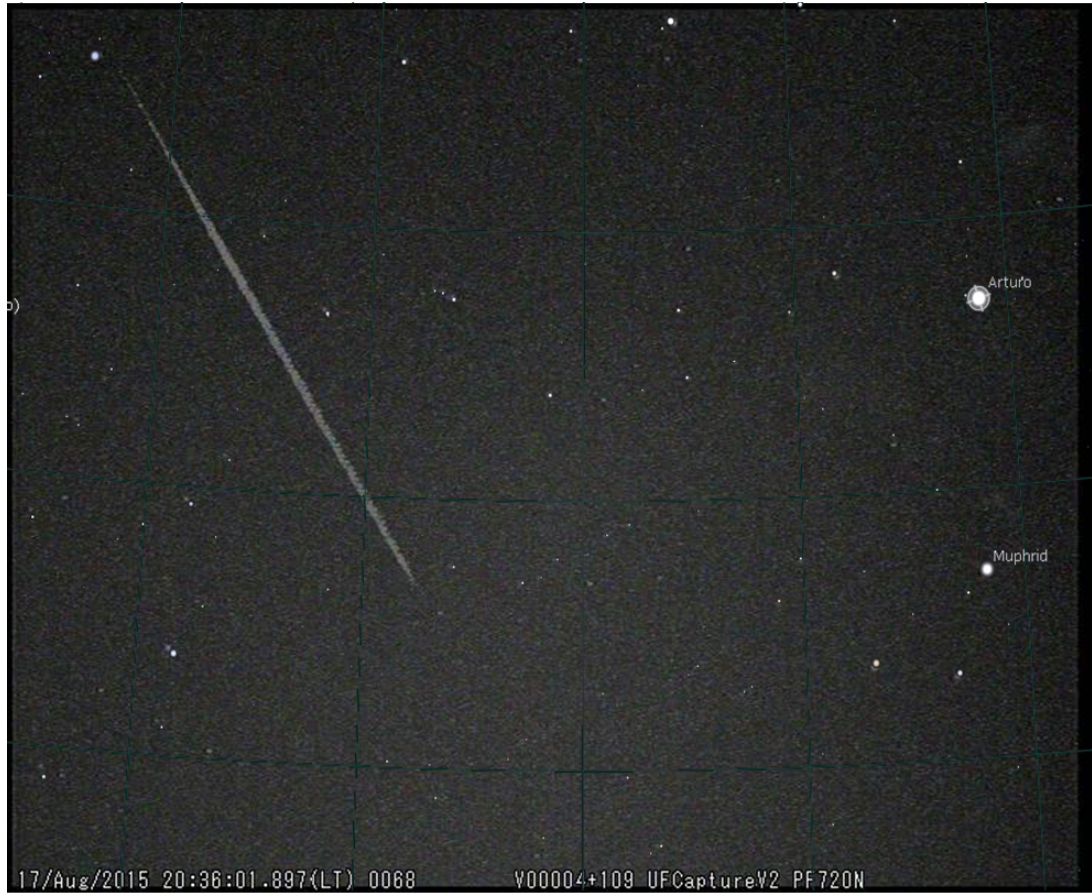


Figura 6: Superposición de la imagen original de la traza del meteoro (Figura 4), con la imagen obtenida de Stellarium (Figura 5).

visión del observador. Dicho esto, el punto de tangencia se determina mediante la expresión:

$$T = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_i, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i \right) = (A, D) \quad (2.1)$$

donde n es el número de estrellas de referencia con coordenadas ecuatoriales (α_i, δ_i) con $i=1, \dots, n$. Sabiendo las coordenadas ecuatoriales de cada estrella de referencia y las coordenadas del punto tangente T , determinamos las coordenadas estándar ξ_i y ψ_i de cada estrella de referencia. Estas coordenadas son las posiciones de las estrellas de referencias sobre el plano tangente a la línea de visión del observador y se obtienen mediante las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} \xi_i &= \frac{\sin(\alpha_i - A) \cos \delta_i}{\sin \delta_i \sin D + \cos(\alpha_i - A) \cos \delta_i \cos D} \\ \psi_i &= \frac{-\cos(\alpha_i - A) \cos \delta_i \sin D + \sin \delta_i \cos D}{\sin \delta_i \sin D + \cos(\alpha_i - A) \cos \delta_i \cos D} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Una vez determinadas las coordenadas estándar, y de las estrellas de referencia procedemos a determinar las ecuaciones de transformación que nos permitan pasar de coordenadas (x, y) sobre la fotografía a coordenadas estándar ξ_i y ψ_i y de ahí a coordenadas ecuatoriales (ξ_i, ψ_i) . Las expresiones 2.3 a 2.9 permiten

calcular una serie de parámetros que sirven como auxiliares para obtener las ecuaciones de transformación mencionadas.

$$A = \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.3)$$

$$B = \sum_{i=1}^n y_i \quad (2.4)$$

$$C = \sum_{i=1}^n \xi_i \quad (2.5)$$

$$D = \sum_{i=1}^n \psi_i \quad (2.6)$$

$$E = \sum_{i=1}^n x_i^2 + y_i^2 \quad (2.7)$$

$$F = \sum_{i=1}^n \xi_i x_i + \psi_i y_i \quad (2.8)$$

$$G = \sum_{i=1}^n \xi_i y_i - \psi_i x_i \quad (2.9)$$

A partir de los parámetros anteriores se calculan otros parámetros u_1 a u_5 :

$$\begin{aligned} u_1 &= nF - AC - BD \\ u_2 &= nG - BC + AD \\ u_3 &= -AF - BG + EC \\ u_4 &= -BF + AG + ED \\ u_5 &= \frac{1}{nE - (A^2 + B^2)} \end{aligned} \quad (2.10)$$

y de ellas se encuentra una relación entre las coordenadas de imagen y las coordenadas estándar:

$$\begin{aligned} \xi_j &= u_5(u_1 x_j + u_2 y_j + u_3) \\ \psi_j &= u_5(-u_2 x_j + u_1 y_j + u_4) \end{aligned} \quad (2.11)$$

Finalmente, se obtiene una expresión que relaciona las coordenadas estándar y las coordenadas del punto de tangencia con las coordenadas ecuatoriales de los puntos sobre la imagen:

$$\begin{aligned} \alpha_j &= A + \tan^{-1} \left(\frac{-\xi_j}{\cos D - \psi_j \sin D} \right) \\ \delta_j &= \sin^{-1} \left(\frac{\psi_j \cos D + \sin D}{\sqrt{\psi_j^2 + \xi_j^2 + 1}} \right) \end{aligned} \quad (2.12)$$

donde α_j y δ_j son la ascensión recta y la declinación sobre la esfera celeste de algún punto de coordenadas estándar ξ_j y ψ_j (Cornejo-Patiño, 2017). Con el procedimiento recién descrito, se puede pasar de

las coordenadas (x,y) de cualquier punto sobre la imagen a sus coordenadas ecuatoriales (α, δ) . Una vez conocidas la ascensión recta y la declinación de los puntos de la traza del meteoro, obtenidos mediante el procedimiento recién descrito, determinamos la distancia angular entre dos puntos consecutivos de la traza del meteoro, es decir entre las posiciones del meteoro en cada dos cuadros consecutivos del video. La distancia angular entre dos puntos sobre la superficie de una esfera está dada por:

$$\cos b = \sin \delta_1 \sin \delta_2 + \cos \delta_1 \cos \delta_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) \quad (2.13)$$

donde b representa la distancia angular entre dos puntos de coordenadas (α_1, δ_1) y (α_2, δ_2) sobre la esfera.

Luego, de obtener la distancia angular b , calculamos la velocidad angular promedio del objeto dividiéndola entre el tiempo transcurrido entre dos cuadros consecutivos.

3 Resultados y discusión

En esta sección mostramos los resultados obtenidos del análisis de cinco meteoros observados con fechas de 24 de octubre, 14 de noviembre, 30 noviembre y 14 de diciembre de 2018 y 10 de enero de 2019.

3.1 Cálculo de la velocidad y aceleración angulares

A partir de las coordenadas de imagen y de las posiciones de las estrellas de referencia, aplicamos el método descrito para obtener las coordenadas ecuatoriales de la traza del meteoro a partir de sus coordenadas de imagen. Para evaluar qué tan buena es esta transformación, aplicamos las ecuaciones a las coordenadas (x,y) de las estrellas de referencia para obtener sus coordenadas ecuatoriales, las cuales comparamos con sus coordenadas obtenidas mediante Stellarium por medio de la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{\text{Posición observada} - \text{Posición calculada}}{\text{Posición observada}} \right) \times 100$$

la cual nos permitió estimar el error porcentual en las posiciones calculadas de las estrellas de referencia mediante las ecuaciones de transformación. Todos los errores obtenidos fueron menores a 0,8 % en ascensión recta y a 6,5 % en declinación. Estos son errores bastante razonables, por lo cual podemos decir que las ecuaciones de transformación obtenidas resultan aceptables para describir el movimiento del objeto.

A partir de las posiciones de la traza del meteoro y por tanto del objeto, se obtuvo la distancia angular media recorrida por éste entre cada par de cuadros. Una vez calculadas las distancias angulares y los tiempos entre cada par de cuadros consecutivos, procedimos a hacer gráficas de velocidad angular vs. tiempo para cada uno de los meteoros estudiados. Los datos en todas las gráficas se ajustaron muy bien a regresiones cuadráticas pues todos los ajustes tuvieron un coeficiente de correlación del orden de 0.99. Los resultados se pueden observar en la Tabla 1.

3.2 Comentario sobre la visibilidad de los meteoros

La visibilidad de los meteoros dependerá de la contaminación lumínica y atmosférica del lugar donde se encuentre el observador. De acuerdo con la escala de Bortle, la calidad del cielo en Tegucigalpa, Honduras, tiene un valor entre 7 y 8 (Bortle, 2001). Esto implica que sería muy difícil observar meteoros de magnitud superior a 5. Por otro lado, el método descrito aquí no se ve limitado por la calidad del cielo, lo que se limita es el número de meteoros observados.

Tabla 1: Resultados del análisis de los meteoros estudiados. La primera columna indica el nombre del archivo analizado, la segunda columna muestra el ajuste cuadrático a los datos, mientras que la tercera y cuarta columnas muestran la velocidad angular inicial del objeto así como su aceleración angular, ambas obtenidas a partir del ajuste cuadrático.

Descripción	Ecuación	Velocidad angular inicial (°/s)	Aceleración angular (°/s ²)
M 2018 10 24	$\theta = 0.15 + 9.58t + 4.24t^2$	9.58	8.48
M 2018 11 14	$\theta = 6.32t + 2.65t^2$	6.32	5.28
M 2018 11 30	$\theta = 0.06 + 6.06t + 0.69t^2$	6.06	1.38
M 2018 12 14	$\theta = 0.16 + 6.45t + 1.34t^2$	6.45	2.68
M 2019 01 10	$\theta = 0.16 + 18.05t + 12.09t^2$	18.05	24.18

4 Conclusiones

Es importante estudiar la interacción meteoroides-atmósfera a partir de la observación de sus meteoros pues nos da información sobre los objetos que colisionan con nuestro planeta. De dichas observaciones se pueden calcular trayectorias de los meteoroides, órbitas de pre-entrada y algunos parámetros físicos del objeto. Sin embargo, los estudios mencionados sólo son posibles si se cuenta con al menos dos estaciones, aunque cuatro sería el número mínimo recomendado. Dado que para este trabajo sólo se contó con una cámara, no es posible realizar todos los estudios mencionados, pero sí se pudieron realizar algunos análisis y familiarizarse con la cámara, el sistema de captura de meteoros, el software de manejo de imágenes y las ecuaciones de transformación de coordenadas.

A partir del trabajo realizado en esta investigación y de los resultados mostrados anteriormente, llegamos a las siguientes conclusiones:

1. Para poder localizar la traza del meteorito en la bóveda celeste, así como para realizar algunos cálculos cinemáticos y de la magnitud del meteorito, Stellarium, Free Video to JPG Converter, Fitswork4, e ImageDS9 es el conjunto de software adecuado para analizar los videos donde se capturaron meteoros. Los principales criterios para elegir este software fueron su disponibilidad y su fácil manejo.
2. Las transformaciones empleadas para pasar de coordenadas de imagen (x,y), a coordenadas ecuatoriales son bastantes adecuadas pues los errores porcentuales obtenidos al comparar las coordenadas reales de las estrellas de referencia con las coordenadas ecuatoriales obtenidas por las transformaciones fueron, en todos los casos, menores a 0.8 % en ascensión recta y a 6.5 % en declinación. En primera aproximación podríamos considerar que las coordenadas determinadas para la traza del meteorito mediante estas transformaciones tienen errores similares.
3. En todos los casos se determinaron relaciones cuadráticas entre la distancia angular y el tiempo con coeficientes de correlación mayores o iguales a 0.9974; lo cual implica que ambas variables están correlacionadas de esa manera en más de un 99 %.
4. Con base en las ecuaciones que relacionan distancia angular y tiempo se tiene que los objetos que ingresaron a la atmósfera de la Tierra lo hicieron con aceleraciones angulares de entre 1.38 y 24.18. Uno de los objetivos más importantes de este trabajo fue el de sentar las bases para la creación de

una red de observación de meteoros en Honduras. Dado que las condiciones de los países latino-americanos dificultan a los científicos participar en los grandes proyectos espaciales; proyectos de este tipo permiten hacer investigación en temas espaciales a relativamente bajo costo.

5 Referencias

- Alvarez, L. W., Alvarez, W., Asaro, F., y Michel, H. V. (1980). Extraterrestrial cause for the cretaceous-tertiary extinction. experimental results and theoretical interpretation. *Science*, 208:1095–1108.
- Bortle, J. E. (2001). Introducing the bortle dark-sky scale. *Sky and Telescope*, 101(2):126–129.
- Cepilecha, Z., Borovička, J., Elford, W. G., Revelle, D. O., Hawkes, R. L., Porubčan, V., y Šimek, M. (1998). Meteor phenomena and bodies. *Space Science Reviews*, 84:327–471.
- Cordero-Tercero, G., Maravilla, D., y Covarrubias-Saavedra, M. (2023). A new proposal of the term meteoroid. *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*, 59:313–322.
- Cornejo-Patiño, S. (2017). Estudio de las trayectorias de meteoroides a través de la atmósfera terrestre.
- Dierks, J. (s.f.). Fitswork (v4). [Software de procesamiento de imágenes astronómicas]. https://www.fitswork.de/software/softw_en.php.
- Joye, W. (2019). SAOImage DS9 (v8.01). [Software]. Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics. <http://www.doi.org/10.5281/zenodo.2530958>.
- Longrich, N. R., Bhullar, B.-A. S., y Gauthier, J. A. (2012). Mass extinction of lizards and snakes at the cretaceous-paleogene boundary. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(52):21396–21401.
- Marvin, U. (2006). Meteorites in history: an overview from the renaissance to the 20th century. En McCall, G. J. H., Bowden, A. J., y Howarth, R. J., (Eds.), *The history of meteoritics and key meteorite collections: Fireballs, falls and finds*, volumen 256 de *Special Publications*, pp. 15–71. Geological Society, London.
- Passey, Q. R. y Melosh, H. J. (1980). Effects of atmospheric breakup on crater field formation. *Icarus*, 42(2):211–233.
- Plane, J. M. C. (2012). Cosmic dust in the earth's atmosphere. *Chemical Society Reviews*, 41(19):6507–6518.
- SonotaCo (2025). UFOCapture (v4.86). [Software de captura de meteoros]. http://www.sonotaco.com/soft/e_index.html.
- Trigo-Rodríguez, J. M., Rietmeijer, F. J. M., Llorca, J., y Janches, D., (Eds.) (2008). *Advances in Meteoroid and Meteor Science*. Springer.
- Yang, H.-J., Park, C., y Park, M.-H. (2005). Analysis of historical meteor and meteor shower records: Korea, china, and japan. *Icarus*, 175:215–225.
- Zotti, G., Hoffmann, S. M., Wolf, A., Chéreau, F., y Chéreau, G. (2021). The simulated sky: Stellarium for cultural astronomy research. *Journal of Skyscape Archaeology*, 6(2):221–258.