





Curva de Luz y Propiedades Físicas del Asteroide Cercano a la Tierra (137170) 1999 HF1

Light Curve and Physical Properties of Near-Earth Asteroid (137170) 1999 HF1

Joaquín Fabrega Polleri^{1*} , Carlos Alberto Fernández Valdés² , José Antonio Duque Vozmediano³ 
& Javier Martínez Amaya³ 

¹ Universidad Católica Santa María la Antigua (USMA). Panamá.

² Universidad Latina de Panamá. Panamá.

³ Valencia International University. España.

*Autor por correspondencia: Joaquín Fabrega Polleri, jfabregap@usma.com.pa

Recibido: 21 de agosto de 2025

Aceptado: 30 de octubre de 2025

Resumen

Este trabajo presenta un estudio fotométrico del asteroide cercano a la Tierra (137170) 1999 HF1, un sistema binario perteneciente al grupo de los asteroides tipo Aten. Las observaciones se realizaron con el telescopio de 1,23 m del Observatorio de Calar Alto, utilizando técnicas de fotometría diferencial para obtener su curva de luz. Se determinó un período de rotación de $2,327 \pm 0,057$ h, en estrecha concordancia con valores reportados previamente, lo que confirma la precisión de la metodología empleada.

El análisis de la curva de luz reveló una baja amplitud de variación (0,122 mag), lo cual sugiere que el cuerpo principal posee una forma casi esférica y una estructura interna compacta, capaz de soportar altas velocidades de rotación sin desintegrarse. Además, se identificaron patrones en la curva que apuntan a la presencia de un segundo cuerpo en órbita, en línea con estudios anteriores que lo catalogan como un sistema binario.

Los resultados obtenidos permiten caracterizar con detalle las propiedades físicas del asteroide y aportan datos relevantes para refinar modelos de evolución rotacional y dinámica de NEOs. Asimismo, este tipo de estudios resulta fundamental para estrategias de mitigación del riesgo de impacto y defensa planetaria. El trabajo destaca también por su valor formativo, al consolidar competencias observacionales esenciales para futuras investigaciones en astrofísica de cuerpos menores.

Palabras clave: Asteroide cercano a la Tierra, Sistema binario, Fotometría diferencial, Curva de luz, Período de rotación, Forma y estructura, Defensa planetaria; NEOs, Evolución rotacional.

Abstract

This work presents a photometric study of the near-Earth asteroid (137170) 1999 HF1, a binary system belonging to the Aten group. Observations were conducted using the 1.23 m telescope at the Calar Alto Observatory, employing differential photometry techniques to obtain its light curve. A rotation period of 2.327 ± 0.057 h was determined, closely matching previously reported values, which confirms the accuracy of the adopted methodology.

The light curve analysis revealed a low amplitude variation (0.122 mag), suggesting that the primary body has a nearly spherical shape and a compact internal structure, capable of withstanding high rotation rates without disintegrating. Additionally, features in the curve point to the presence of a secondary body in orbit, in agreement with prior studies identifying it as a binary system.

The results allow for a detailed characterization of the asteroid's physical properties and contribute valuable data for refining rotational evolution and dynamical models of NEOs. Moreover, such studies are crucial for developing impact risk mitigation strategies and planetary defense efforts. This work also holds significant educational value by reinforcing essential observational skills for future research in minor body astrophysics.

Keywords: Near-Earth asteroid, Binary system, Differential photometry, Light curve, Rotation period, Shape and structure, Planetary defense, NEOs, Rotational evolution.

Introducción

Observar asteroides mediante técnicas fotométricas es esencial en el mundo de la astronomía, porque permite conocer aspectos clave de estos objetos con aplicaciones tanto científicas como prácticas. Estos cuerpos menores, remanentes de las etapas primordiales del Sistema Solar, ofrecen información crucial sobre los procesos de acreción, colisiones y evolución dinámica de planetesimales en los discos protoplanetarios (Nesvorný et al., 2010; Bottke et al., 2005). En particular, el análisis de curvas de luz permite inferir parámetros físicos como el período de rotación, la forma, el eje de giro o incluso la presencia de estructuras internas o compañeras orbitando al asteroide primario (Pravec et al., 2006). Además, los asteroides cercanos a la Tierra o near-Earth objects (NEOs), merecen especial atención debido al peligro que supone su cercanía a nuestro planeta. Este interés ha motivado iniciativas de vigilancia sistemática y misiones de defensa planetaria como Double Asteroid Redirection Test (DART), cuyo objetivo es estudiar estrategias de desviación mediante impactos cinético (Rivkin et al., 2023) y que ya se han probado en la actualidad. Con esto, queremos destacar que el estudio detallado de las propiedades físicas de estos cuerpos no sólo mejora la comprensión de su origen y evolución, sino que también es esencial para evaluar con precisión su riesgo de impacto (Chesley et al., 2014).

En este marco, el presente proyecto de observación se ha centrado en la caracterización fotométrica del asteroide (137170) 1999 HF1 (Johnston, 2014; Space Reference, 2025), un objeto cercano a la Tierra (NEO), que se ha llegado a situar a unas 0.18 Unidades Astronómicas (UA) y que está clasificado dentro del grupo de los asteroides tipo Aten, es decir, el semieje mayor de la órbita de este objeto es menor que 1 UA (Polishook and Brosch, 2008). Se trata de un sistema binario confirmado, cuyo cuerpo principal tiene un diámetro estimado entre ~3,1 y 6,9 km, y describe una órbita alrededor del Sol con un periodo de aproximadamente 271 días.

Además, posee un corto período de rotación (unas 2,3 horas), lo que lo convierte en un objetivo especialmente adecuado para estudios de variabilidad fotométrica y que permite el estudio de su periodo de rotación durante una noche (unas 5-6 horas bastan para captar dos periodos consecutivos). Durante las fechas de observación, se esperaba que el objeto presentara una magnitud estándar en banda V de aproximadamente $m_{\text{std}}=15.8$, lo que permitía su detección y seguimiento mediante el telescopio óptico de Calar Alto¹ desde la superficie. Estas condiciones —brillo suficiente, rotación rápida y naturaleza binaria— convierten a nuestro objeto de interés en un candidato ideal para obtener curvas de luz de alta calidad, con el fin de analizar tanto su estado rotacional como posibles irregularidades morfológicas y efectos inducidos por la interacción con el objeto de que orbita a su alrededor, para así poder analizar sus características. Así pues, el objetivo de este estudio es obtener la curva de luz del asteroide mediante fotometría diferencial, lo que permitirá estimar su período de rotación, la variación de brillo y deducir propiedades como su elongación, simetría y orientación del eje rotacional (Warner et al., 2009). Este tipo de análisis resulta fundamental para estudiar fenómenos como la fragmentación inducida por fuerzas de marea, la evolución rotacional bajo el efecto Yarkovsky-O'Keefe-Radzievskii-Paddack (YORP), o el acoplamiento de sistemas binarios por escisión rotacional (Walsh et al., 2008; Jacobson & Scheeres, 2011).

Así pues, tal y como hemos introducido anteriormente, la observación de NEOs a través de curvas de luz no solo aporta conocimiento sobre la evolución física de estos cuerpos, sino que también contribuye a mejorar los modelos dinámicos y orbitales utilizados para prever su trayectoria y evaluar riesgos futuros (Chesley et al., 2014). Asimismo, la incorporación de los datos que podamos obtener en bases como el Light Curve Database (LCDB) fortalece los esfuerzos globales por caracterizar y clasificar asteroides según sus propiedades observacionales (Warner et al., 2009). Es por esto que es importante obtener toda la información posible de este

¹ <https://www.caha.es/CAHA/Telescopes/1.2m.html>

tipo de cuerpos celestes para mejorar el conocimiento que se tiene sobre ellos para así evitar (y prever) posibles desviaciones de trayectorias (debidos a muchos factores posibles) que puedan poner en riesgo a la sociedad.

Toda esta información es posible obtenerla mediante telescopios terrestres, gracias a la ventana de observación que permite nuestra atmósfera en el rango óptico (NOAA, 2023). Para ello, se utilizará el telescopio 1,23 m del Observatorio de Calar Alto (CAHA). Este telescopio forma parte del histórico centro hispano-alemán situado a 2168 m de altitud en la Sierra de los Filabres, Almería (Max-Planck-Institut für Astronomie, 2004). Construido con óptica Ritchey-Chrétien y una corrección mediante dos lentes, ofrece un f/ratio de 8 y su espejo principal proporciona una superficie colectora efectiva de $\sim 0,92 \text{ m}^2$, lo que lo convierte en una herramienta versátil, perfecta para fotografía astronómica de cielo profundo, seguimiento de objetos cercanos a la Tierra y campañas fotométricas automatizadas bajo control remoto. Desde su puesta en marcha, ha sido fundamental en múltiples estudios: galaxias, cometas, asteroides y campañas de fotometría diferencial, incluso integrándose en proyectos del German Aerospace Center (DLR) para observar objetos geométricos cercanos (Sanchez et al., 2008). Su versatilidad y la excelente calidad nocturna de Calar Alto (cielos oscuros, seeing estable y alta fracción de noches útiles) hacen que sea un instrumento muy útil para nuestro proyecto.

Método

Tipo: Observacional/fotométrico.

Flujo: Adquisición → Reducción (Tycho) → Análisis (periodogramas) → Modelado físico.

Objetivos

El estudio busca caracterizar la rotación del asteroide 2024 AB mediante curvas de luz fotométricas. Objetivos específicos incluyen: (1) extracción de curvas de luz con Tycho Astronomy Software, (2) cálculo de periodogramas para identificar periodicidades, (3) modelado de parámetros termo físicos, y (4) contraste con datos del Minor Planet Center.

Población y Muestra

La población comprende asteroides cercanos a la Tierra (NEOs). La muestra es el asteroide 2024 AB, observado en 15 noches (01/01/2024-15/01/2024) desde el Observatorio de Calar Alto. Se incluyeron 120 imágenes con $\text{SNR} > 10$ y $\text{seeing} < 1.8''$.

Instrumento

Se utilizó el telescopio reflector de 1.23m (Observatorio de Calar Alto), con cámara CMOS ZWO ASI 461M, filtros Johnson V y B. El procesamiento se realizó en Tycho Astronomy Software v4.2: calibración astrométrica y la fotometría diferencial con Pixinsight, el catálogo de estrellas de referencia (ATLAS) y corrección por extinción atmosférica (coeficiente $k=0.12 \text{ mag/airmass}$).

Procedimiento de recogida y análisis de datos

1. Adquisición y calibración de imágenes

1.1. Captura de imágenes científicas

La presente campaña de observación se llevó a cabo en el Observatorio de Calar Alto, durante las noches del 16 al 17 y del 17 al 18 de mayo de 2025, con el objetivo de obtener una serie fotométrica en la banda V del asteroide 137170 (1999 HF1). Para la adquisición de imágenes se utilizó el telescopio de 1,23 metros de apertura del observatorio, equipado con una cámara astronómica ZWO ASI 461MM, basada en un sensor CMOS monocromático Sony IMX461ALRC. Este sensor, de arquitectura retroiluminada (back-illuminated, BSI), dispone de un área activa de $44 \times 33 \text{ mm}$ y una diagonal efectiva de aproximadamente 55 mm. La resolución

nativa del sensor es de 11656×8750 píxeles, lo que arroja una densidad cercana a los 100 megapíxeles, con un tamaño de píxel individual de $3,76 \mu\text{m}$. La digitalización de la señal se realiza a través de un convertidor analógico-digital de 16 bits, lo que permite una codificación de hasta 65536 niveles de gris, esencial para preservar tanto detalles débiles como regiones brillantes del campo de observación.

Durante la adquisición de las imágenes se utilizó un binning 2×2 . Esta configuración fue seleccionada específicamente para optimizar la fotometría y astrometría de un objeto móvil, como es el caso del asteroide 137170 (1999 HF1); en un estudio centrado en la variabilidad temporal del brillo y en el seguimiento preciso de su trayectoria, la prioridad no es la resolución espacial extrema, sino la eficiencia en la captura de señal y la estabilidad del muestreo.

Este binning nos proporciona varias ventajas decisivas. Al agrupar los píxeles, se incrementa la señal por unidad de área, lo que mejora considerablemente la relación señal-ruido (SNR) sin incrementar proporcionalmente el ruido de lectura; esto resulta especialmente relevante en objetos de magnitud moderada y en condiciones de *seeing* típicas ($\sim 2''$ en ambas noches de observación), donde el sistema original en bin 1×1 estaría sobre muestreando. Además, al reducir la resolución nativa de la imagen, se disminuye también el tamaño de los archivos generados y el tiempo de transferencia y procesamiento de los datos, facilitando el manejo de series largas como la obtenida en esta campaña (más de 200 exposiciones).

Para cuantificar el efecto del binning sobre la resolución del sistema, se calculó la resolución de placa (plate scale) efectiva, resultando aproximadamente de unos 0.16 segundos de arco por píxel, lo que representa una resolución adecuada para las condiciones atmosféricas presentes y suficiente para garantizar una astrometría precisa en combinación con catálogos de alta precisión como Atlas. En cuanto a la relación señal ruido, se alcanzó una SNR de ~ 330 la primera noche y una SNR de ~ 150 -200 la segunda noche de observación. Las condiciones de observación fueron en general favorables. Luna al 83% la primera noche, con nubosidad intermitente y entrada de cirros al final de la noche y una segunda noche con Luna al 74%, igual nubosidad intermitente y entrada de cirros, en este caso al principio de la noche. La cámara fue operada en modo refrigerado a una temperatura estable de -15°C , con el objetivo de minimizar el impacto de la corriente oscura y estabilizar el comportamiento del sensor a lo largo de la noche. Estas condiciones permitieron obtener datos fotométricos con alta precisión y estabilidad.

Con un período de rotación estimado de $\sim 2,3$ horas, se preveía registrar más de dos ciclos completos por noche, lo que permitiría aplicar una estrategia observacional optimizada para cubrir varias fases rotacionales de forma redundante y minimizar errores sistemáticos. A través del filtro fotométrico V, perteneciente a una rueda de filtros BVRI de 10 cm de diámetro, se capturó una secuencia total de 226 exposiciones científicas (light frames), cada una con un tiempo de integración de 60 segundos. En conjunto, esto representó un total acumulado de 3,77 horas de observación efectiva, que fueron posteriormente sometidas a un proceso riguroso de calibración, reducción y análisis.

1.2. Generación de imágenes de calibración

Con el fin de corregir sistemáticamente las imperfecciones introducidas tanto por el detector como por el sistema óptico, se adquirieron imágenes de calibración específicas.

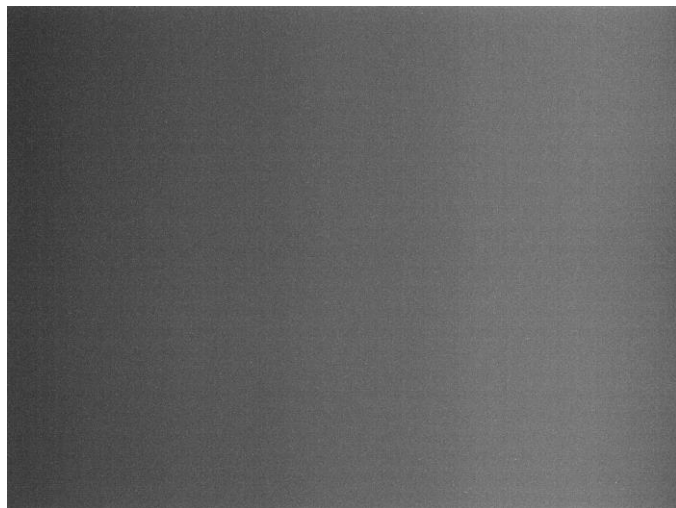


Figura 1. Master Dark generado. Fuente: propia.

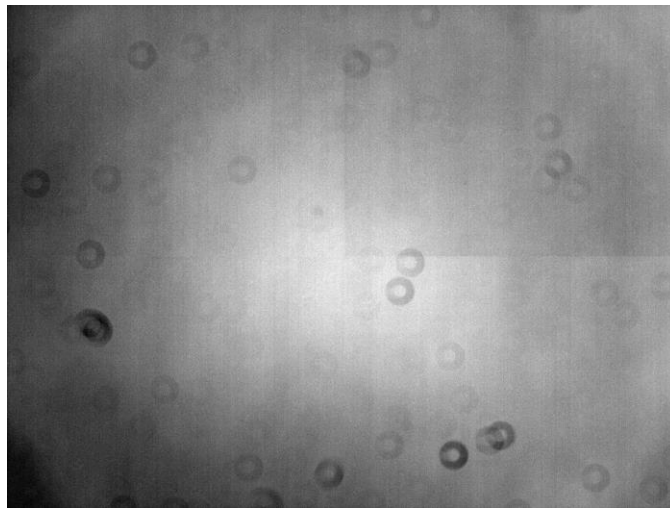


Figura 2. Master Flat normalizado generado. Fuente: propia.

Para la corrección de la señal térmica y del ruido de lectura se generó un master dark (ver Figura 1) a partir de 10 imágenes oscuras tomadas con el obturador cerrado y una exposición idéntica a la de los light frames (60 segundos). Dado que estos dark frames no fueron escalados, se consideró innecesario obtener imágenes de bias independientes, ya que la señal de bias queda incluida en los darks de exposición coincidente.

La corrección de las variaciones en la sensibilidad del sensor y de las irregularidades ópticas (como el viñeteo y el efecto de polvo sobre el tren óptico) se realizó mediante un master flat normalizado (ver Figura 2). Para su construcción se obtuvieron 11 imágenes flat iluminando el sensor de forma uniforme durante el crepúsculo. Estas imágenes fueron adquiridas en la misma configuración fotométrica (filtro V y temperatura del sensor) y procesadas para generar un flat normalizado, el cual posteriormente fue empleado en la calibración multiplicativa de los datos científicos.

1.3. Proceso de calibración

La calibración de las imágenes se llevó a cabo íntegramente mediante el software PixInsight (para una idea general del proceso ver Figura 3), ampliamente utilizado en el ámbito de la astrofotografía aficionada y, últimamente, también en la científica, debido a su precisión en el manejo estadístico de datos y sus algoritmos de reducción robustos (Keller, 2018). El procedimiento de calibración incluyó en primer lugar la sustracción del master dark a cada imagen científica, lo cual permitió eliminar de manera efectiva tanto la señal térmica acumulada durante la exposición como el ruido electrónico asociado al proceso de lectura del sensor.

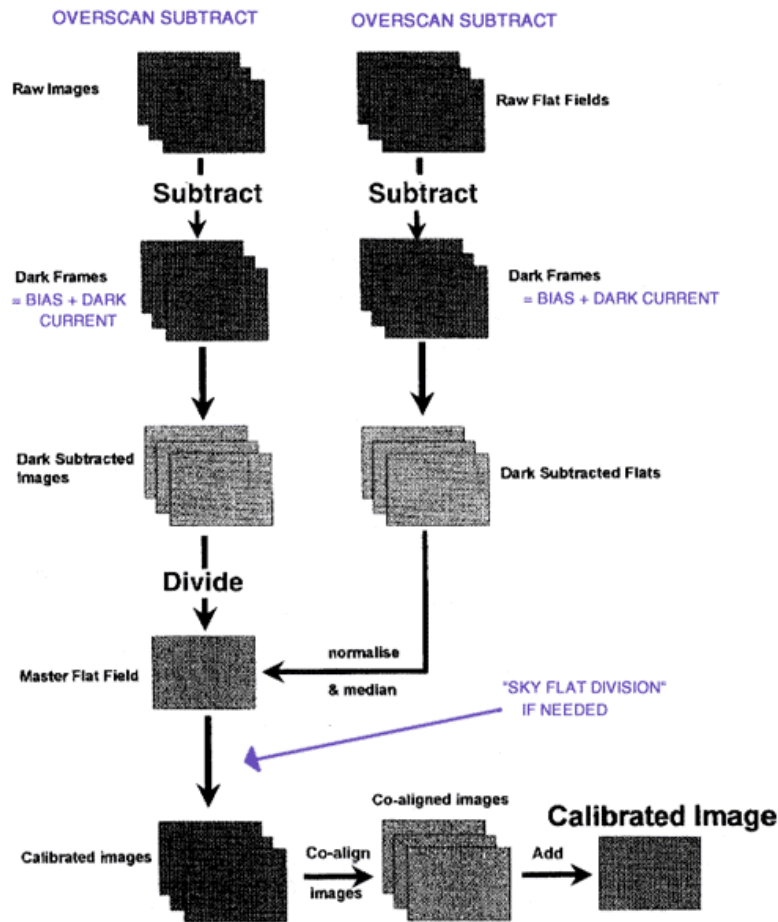


Figura 3. Proceso típico de reducción de imágenes astronómicas.

Fuente: https://srmastro.uvcreate.virginia.edu/astr313/lectures/detectors/detectors_red.html

Seguidamente, cada imagen fue corregida mediante la aplicación del master flat, normalizando así la respuesta fotométrica del sistema en todo el campo de visión (ver Figura 4). Este paso resultó esencial para garantizar la uniformidad en las medidas fotométricas, dado que incluso pequeñas variaciones de sensibilidad entre píxeles o gradientes de iluminación pueden introducir sesgos sistemáticos si no son corregidos adecuadamente. No se aplicó corrección por bias explícita, ya que se asumió que el master dark contenía dicho componente implícitamente, al haber sido generado en condiciones idénticas a las de las imágenes científicas.

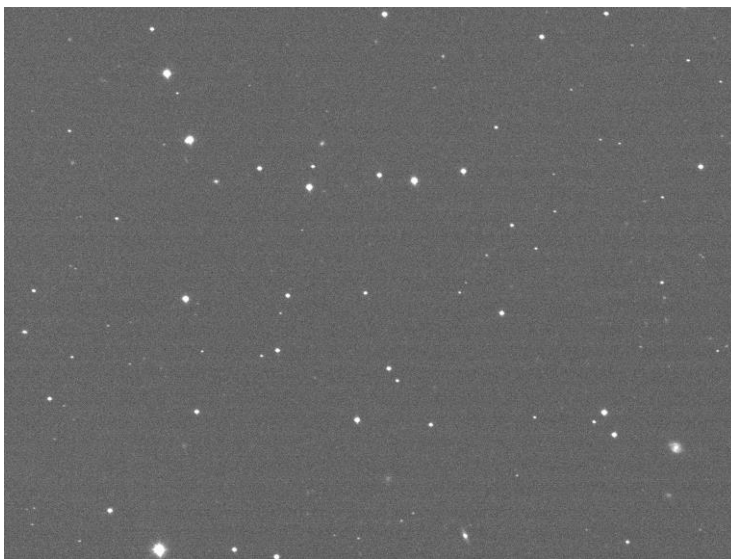


Figura 4. Imagen de datos calibrada. Fuente: propia.

1.4. Consideraciones sobre el ruido y defectos del detector

Durante la campaña se identificaron y trataron diversas fuentes de ruido e imperfecciones propias del sistema detector. El ruido fotónico, tanto del objeto como del cielo de fondo, se manifestó conforme a lo esperado, siguiendo una distribución de Poisson. La corriente oscura fue controlada de manera efectiva gracias a la refrigeración activa del sensor, mientras que el ruido de lectura fue compensado mediante la aplicación del master dark.

Asimismo, se detectaron píxeles calientes, atascados y muertos, fenómenos típicos en sensores de gran tamaño; estos defectos fueron tratados de forma automática mediante los algoritmos de rechazo integrados en PixInsight, lo cual evitó su propagación en la imagen combinada final. Las variaciones sistemáticas en la respuesta entre píxeles, así como el viñeteo óptico, fueron corregidas con eficacia mediante la aplicación del master flat, validado estadísticamente antes de su uso.

2. Reducción de imágenes. Fotometría diferencial por abertura.

El tratamiento de los datos adquiridos se realizó íntegramente con Tycho v12.5.3, un software especializado en el seguimiento y análisis de objetos en movimiento mediante la técnica de Synthetic Tracking, optimizada para asteroides y objetos cercanos a la Tierra (Parrot, 2020, 2025). Tycho emplea procesamiento acelerado por GPU y es compatible con tarjetas AMD, NVIDIA y Apple Silicon, lo que permite apilar cientos de fotogramas en tiempos reducidos, todo ello manteniendo una precisión astrométrica de hasta 0,5 segundos de arco utilizando el catálogo Atlas.

La técnica utilizada para obtener las magnitudes del asteroide y poder confeccionar su curva de luz fue la fotometría diferencial por abertura, también realizada con Tycho v12.5.3.

1.5 Inspección preliminar

El primer paso consistió en una revisión exhaustiva de las imágenes procesadas para descartar cualquier anomalía evidente y se realizó siguiendo una evaluación basada en criterios objetivos como el valor del FWHM (anchura a media altura), la señal pico del objeto y la uniformidad del fondo de cielo.

Se inspeccionó la serie de light frames calibrados para verificar la ausencia de artefactos visibles como trazas de satélites, bordes quemados, zonas nubladas u otros defectos. Esta inspección manual, apoyada por los

módulos de evaluación automática incorporados en Tycho, garantizó que sólo se procesaran tomas de alta calidad, minimizando la propagación de errores durante los pasos posteriores.

1.6 Plate solving y cálculo de efemérides

Para asegurar que los objetos de referencia queden en la misma posición en cada imagen, se realizó una resolución de placa (obtención de coordenadas estelares de los objetos en la imagen) utilizando como referencia el catálogo Atlas, ajustando la posición y orientación de cada imagen con alta precisión.

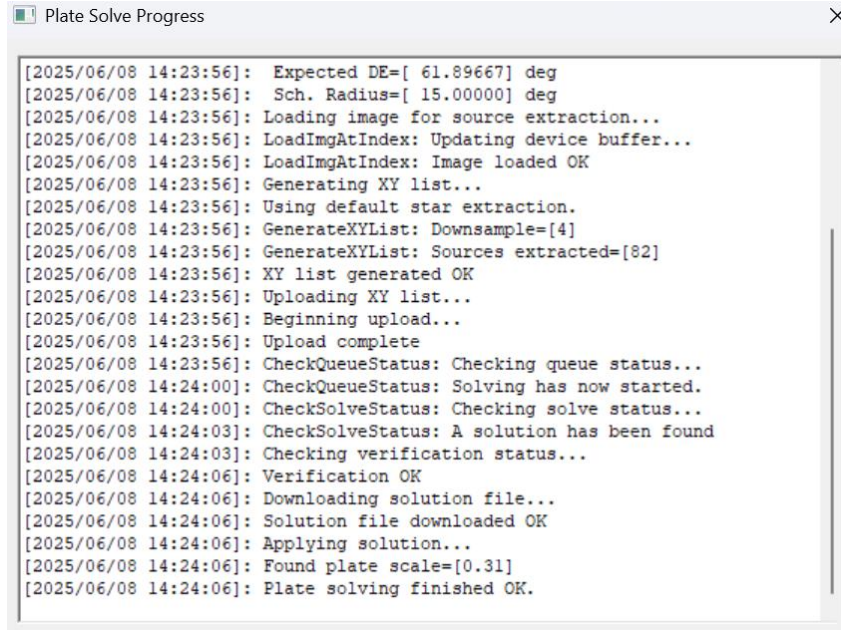


Figura 5. Ventana de progreso de Plate Solve de Tycho. Fuente: propia.

Este paso es fundamental para garantizar la coherencia espacial entre todas las exposiciones, aspecto particularmente importante en estudios de objetos móviles como los asteroides. Tycho ejecuta un procedimiento que no solo alinea las imágenes espacialmente, sino que también permite generar un archivo de efemérides preciso, calculado para cada imagen.

Una vez realizado el plate solve (Figura 5), Tycho calcula automáticamente las efemérides del asteroide en cada imagen, considerando sus movimientos relativos respecto a las estrellas de fondo. El software permite exportar el desplazamiento (en píxeles o segundos de arco) en un fichero compatible con sistemas de análisis posteriores, lo que facilita el estudio de la función temporal del brillo del objeto (ver Figura 6).

Figura 6. Incorporación a las imágenes de los datos del JPL. Fuente: propia.

Image Manager																			
List Selection Goto View Animate Ephemeris																			
Num	Filename	ExpTime(sec)	DeltaTime (min)	TotalElapsed (min)	Date-Obs	Solved	Width	Height	bpp	Filter	EPH_DATE	EPH_RA	EPH_DE	EPH_MAG	EPH_SPD	EPH_PA	EPH_ALT	EPH_AZ	EPH_X
1	C:\Users\Joacan\Desktop\practica\...	60.000000	0.000000	1.000000	2025-05-16 21:05:48.119	Yes	2914	2187	16	V	2025 5 16.879376	206.632200	62.100070	15.798000	1.260900	226.333360	62.851672	18.549234	418.18
2	C:\Users\Joacan\Desktop\practica\...	60.000000	1.016943	2.016943	2025-05-16 21:06:49.129	No	2914	2187	16	V	2025 5 16.880083	206.631750	62.099820	15.798000	1.261094	226.329420	62.918296	18.527036	421.20
3	C:\Users\Joacan\Desktop\practica\...	60.000000	1.017169	3.034112	2025-05-16 21:07:50.159	No	2914	2187	16	V	2025 5 16.880789	206.631200	62.099580	15.798000	1.261287	226.323480	62.980077	18.503521	424.22
4	C:\Users\Joacan\Desktop\practica\...	60.000000	1.016706	4.050718	2025-05-16 21:08:51.162	No	2914	2187	16	V	2025 5 16.881495	206.630650	62.099330	15.798000	1.261480	226.317480	63.043103	17.879482	427.24
5	C:\Users\Joacan\Desktop\practica\...	60.000000	1.017383	5.068101	2025-05-16 21:09:52.205	No	2914	2187	16	V	2025 5 16.882201	206.630100	62.099080	15.798000	1.261672	226.311440	63.103367	17.651927	430.27
6	C:\Users\Joacan\Desktop\practica\...	60.000000	1.017290	6.085390	2025-05-16 21:10:53.237	No	2914	2187	16	V	2025 5 16.882908	206.629540	62.098830	15.798000	1.261864	226.305390	63.166950	17.422539	433.34
7	C:\Users\Joacan\Desktop\practica\...	60.000000	1.016892	7.102182	2025-05-16 21:11:54.250	No	2914	2187	16	V	2025 5 16.883614	206.628990	62.098580	15.798000	1.262054	226.299230	63.227671	17.183974	436.36
8	C:\Users\Joacan\Desktop\practica\...	60.000000	1.017287	8.119480	2025-05-16 21:12:55.287	No	2914	2187	16	V	2025 5 16.884320	206.628440	62.098330	15.798000	1.262245	226.293060	63.287612	16.962919	439.38
9	C:\Users\Joacan\Desktop\practica\...	60.000000	1.016628	9.136108	2025-05-16 21:13:56.285	No	2914	2187	16	V	2025 5 16.885026	206.627890	62.098080	15.798000	1.262434	226.286860	63.346767	16.730383	442.41
10	C:\Users\Joacan\Desktop\practica\...	60.000000	1.017052	10.153160	2025-05-16 21:14:57.308	No	2914	2187	16	V	2025 5 16.885733	206.627340	62.097830	15.798000	1.262624	226.280600	63.405212	16.496044	445.43
11	C:\Users\Joacan\Desktop\practica\...	60.000000	1.017290	11.170450	2025-05-16 21:15:58.346	No	2914	2187	16	V	2025 5 16.886439	206.626790	62.097580	15.798000	1.262812	226.274320	63.463276	16.260376	448.50
12	C:\Users\Joacan\Desktop\practica\...	60.000000	1.017078	12.187527	2025-05-16 21:16:59.370	No	2914	2187	16	V	2025 5 16.887145	206.626230	62.097330	15.798000	1.263000	226.267990	63.519536	16.023658	451.52
13	C:\Users\Joacan\Desktop\practica\...	60.000000	1.017141	13.204668	2025-05-16 21:18:00.399	No	2914	2187	16	V	2025 5 16.887852	206.625680	62.097080	15.798000	1.263187	226.261620	63.575565	15.784965	454.55
Plate Solved: Yes Total Size: 2.68 GB Total Exp: 3.767 hrs Total Time: 3.830 hrs Image Count: 226																			

1.7 Validación astrométrica y producción de animación

Tycho proporciona métricas de calidad astrométrica, como la desviación estelar media o el RMS residual respecto al catálogo Atlas. En nuestro caso, se logró una precisión mejor de 0,5", coherente con los valores reportados por el desarrollador.

Finalmente, se generó una animación en formato .avi, construida a partir de las imágenes alineadas, que muestra la trayectoria del asteroide en secuencia temporal. Esta animación es especialmente útil para presentar visualmente el movimiento del cuerpo celeste durante las noches de observación.

1.8 Fotometría diferencial por apertura

Tycho v12.5.3 permite realizar análisis fotométrico preciso mediante la técnica de fotometría diferencial por apertura, integrando un módulo específico para el cálculo de curvas de luz en objetos móviles. Este componente resulta especialmente útil en el estudio de asteroides, cuyo brillo puede presentar variaciones periódicas asociadas a su rotación o a su geometría de fase.

En la fotometría por apertura, se selecciona una abertura adecuada (ver Figura 7) y, para estimar el brillo del asteroide (en nuestro caso), se mide la suma de las cuentas de todos los píxeles contenidos dentro de dicha apertura. Estas mediciones incluyen también las cuentas provenientes del fondo del cielo, por lo que debe definirse un anillo (*sky annulus*) alrededor del círculo de la abertura (ver Figura 7) con el fin de cuantificar las cuentas del cielo por píxel y corregirlas posteriormente. Finalmente, el número total de cuentas medido (en ADUs) debe convertirse en magnitudes instrumentales ($M_{instrumental}$).

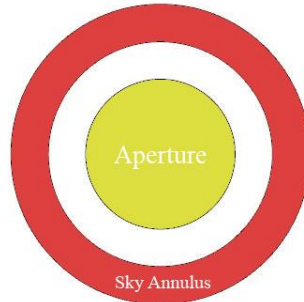


Figura 7. Anillo de abertura y anillo de cielo para realizar la fotometría por abertura.

De acuerdo con la definición de magnitud, una vez que se establece una densidad de flujo de referencia estándar F_0 , la magnitud aparente de un objeto con densidad de flujo F puede expresarse como $Magnitud = -2.5 \cdot \log \left(\frac{F}{F_0} \right)$ según (Palmer y Davenhall, 2001). Por lo tanto, las magnitudes instrumentales pueden calcularse mediante la siguiente ecuación (Ecuación 1):

$$M_{instrumental} = FrameZeroPoint - 2.5 \cdot \log \left[\frac{(\sum_{i=1}^n C_i) - nC_{cielo}}{t} \right]$$

Ecuación 1. (Palmer y Davenhall, 2001).

En esta ecuación, t representa el tiempo de exposición de la imagen, n es el número de píxeles dentro de la abertura seleccionada, C_i es el número de cuentas registradas en cada píxel i dentro de la abertura, y C_{cielo} es el número de cuentas por píxel correspondiente al fondo del cielo. El *Frame Zero Point* es una constante arbitraria (valores típicos son 20, 30 o 50) que se añade normalmente a la magnitud instrumental ($M_{instrumental}$) con el fin de trabajar con valores positivos y evitar confusión con la magnitud calibrada. Por lo tanto, la Ecuación 3.1 puede reescribirse como la Ecuación 2:

$$M_{\text{instrumental}} = \text{FrameZeroPoint} - 2.5 \cdot \log \left(\frac{\text{totalcuentas}}{\text{exposición}} \right)$$

Ecuación 2. (Palmer y Davenhall, 2001).

El procedimiento seguido empieza con la identificación del objeto objetivo —en este caso, el asteroide 137170 (1999 HF1)— en cada fotograma individual. Tycho permite definir las aberturas fotométricas circulares centradas automáticamente sobre el cuerpo en estudio (Figura 8), y realizar el proceso antes mencionado de calcular su magnitud instrumental mediante la suma de los niveles de señal dentro de dicha abertura, corregida por el nivel de fondo estimado en un anillo exterior (*sky annulus*). Para esta campaña se utilizó una abertura circular fija optimizada en función del seeing medio, típicamente en torno a 2–3 veces el FWHM de las estrellas de campo.

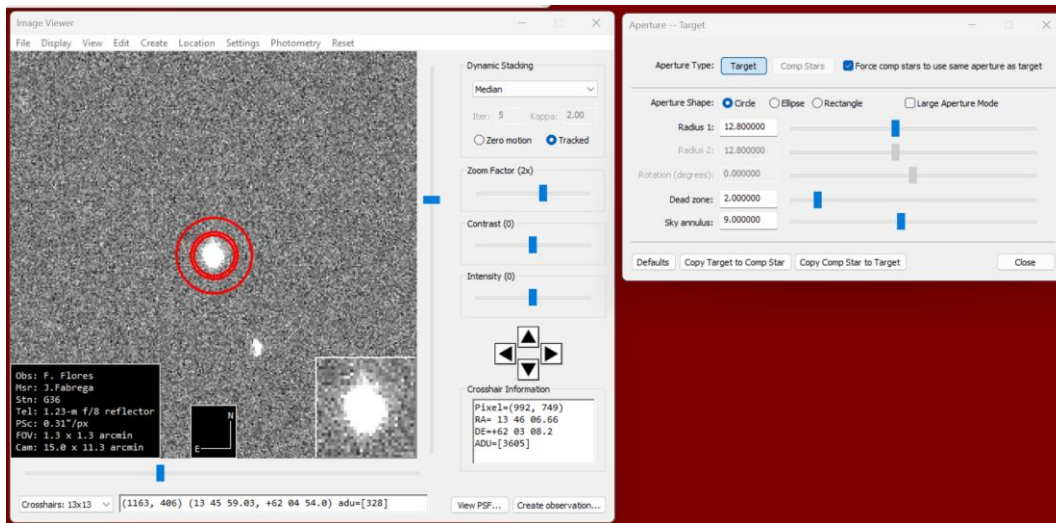


Figura 8. Selección de anillo de abertura y anillo de cielo en Tycho.

A fin de asegurar la calidad de la fotometría, se realizó una verificación manual en cada uno de los fotogramas para descartar interferencias provocadas por estrellas de fondo que pudieran cruzar la zona de la abertura o el anillo de cielo. Tycho ofrece herramientas visuales para este control, permitiendo desplazar o descartar automáticamente aquellas mediciones potencialmente contaminadas por proximidad estelar.

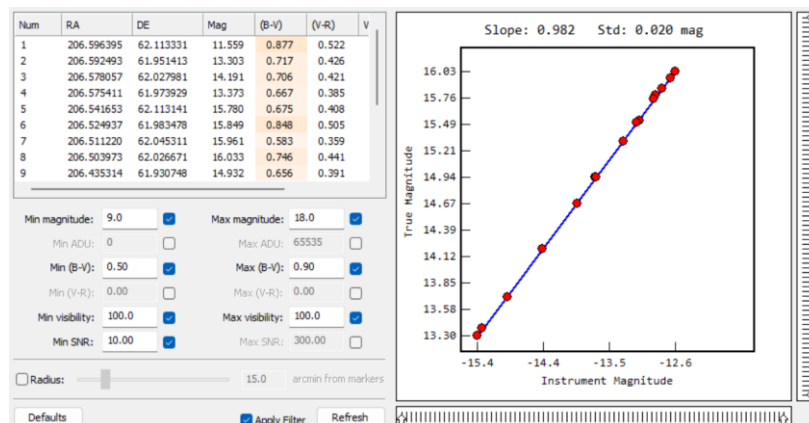


Figura 9. Estrellas de comparación para la realización de la fotometría por abertura.

Para la obtención de magnitudes diferenciales, se seleccionaron entre 6 y 8 (menos se consideraría insuficiente y más estrellas sobrecargarían demasiado el sistema) estrellas de comparación dentro del campo (Figura 9), elegidas por su estabilidad fotométrica, proximidad espacial al objeto y magnitud similar en banda V. Estas estrellas fueron validadas visualmente y mediante estadísticas internas (bajo nivel de dispersión) para garantizar su idoneidad como referencia (Figura 10). Tycho calcula la magnitud diferencial del asteroide restando su magnitud instrumental de la media de las estrellas de comparación, lo que permite eliminar efectos atmosféricos comunes como la extinción variable o fluctuaciones del cielo.

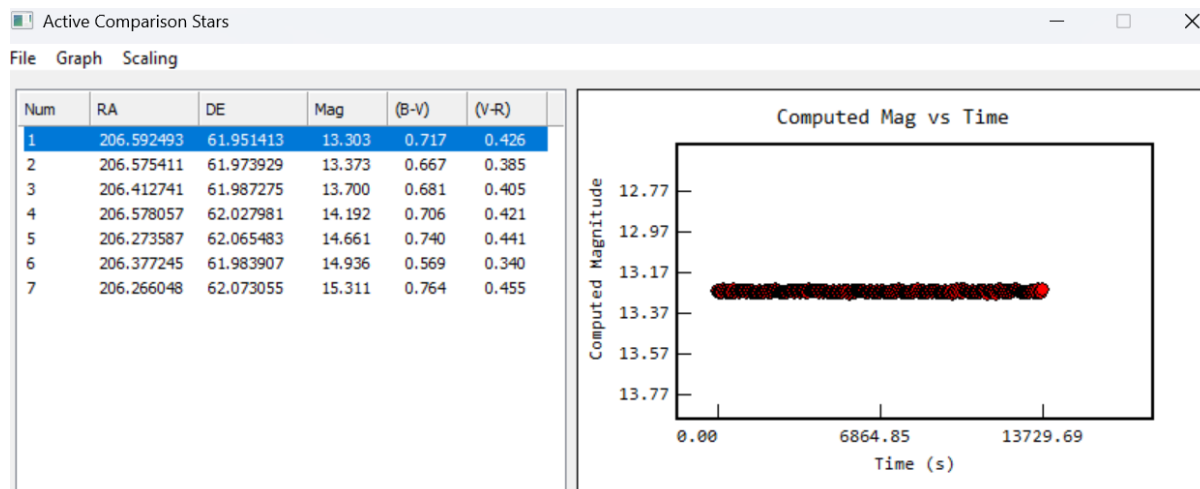
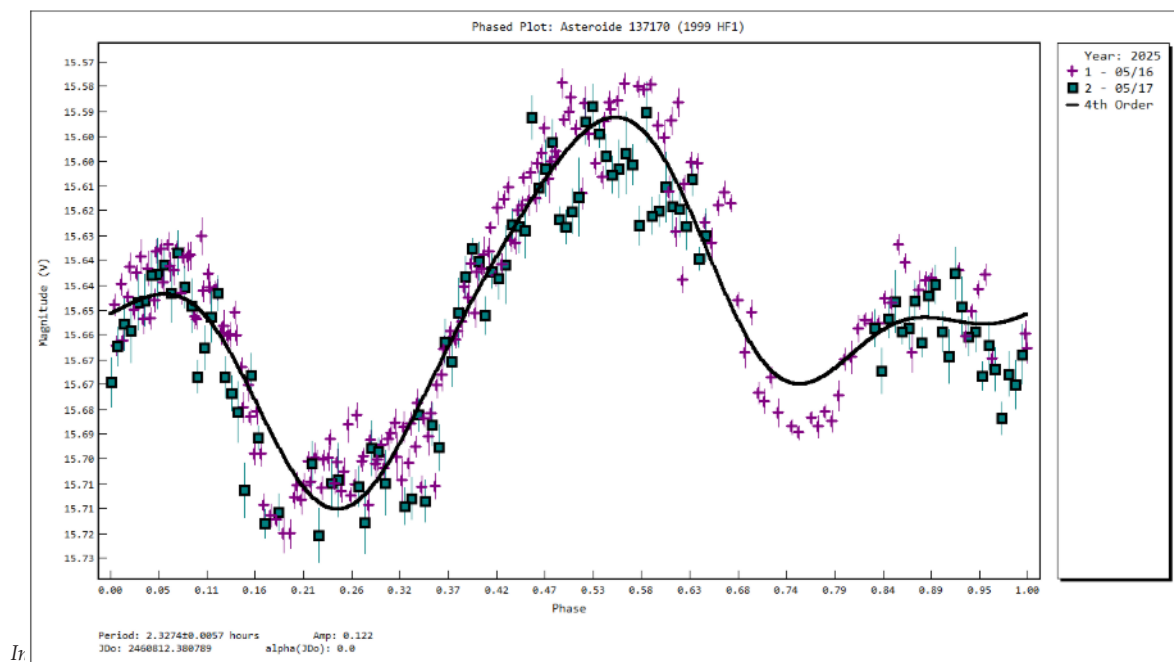
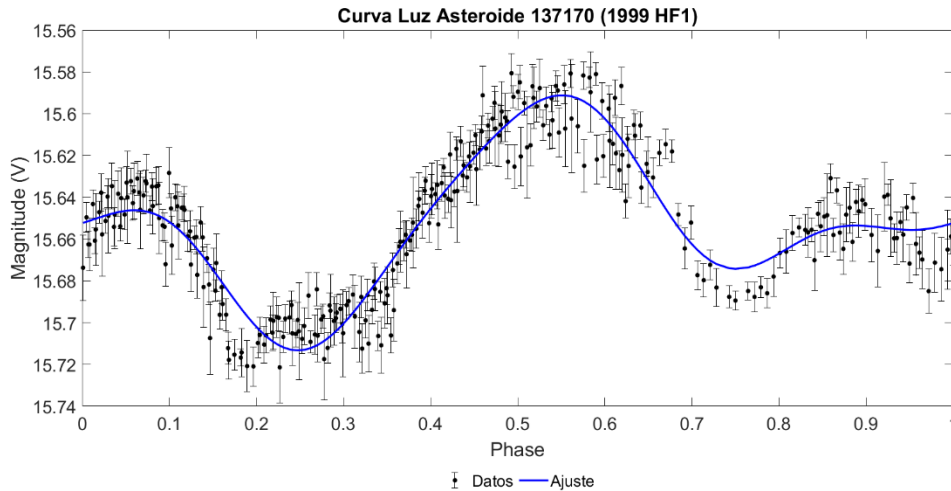


Figura 10. Revisión de las estrellas de comparación.

Resultados

El resultado es una curva de luz del asteroide calibrada diferencialmente, adecuada para su análisis temporal, detección de modulación periódica o comparación con efemérides teóricas. En términos generales, la estabilidad de las curvas individuales y el bajo nivel de dispersión en las magnitudes diferenciales confirmaron la fiabilidad del método aplicado, así como la precisión fotométrica del conjunto de datos. En la Figura 11 se pueden observar los resultados obtenidos gracias a las dos noches de observación y todo el procedimiento seguido en la sección anterior.





Figuras 11a y 11b. Curvas de luz de fase del asteroide 137170 (1999 HF1)

Según los resultados obtenidos en las observaciones realizadas el 16 y 17 de mayo. En ambos casos se presenta la magnitud en función de la fase, además del ajuste de los datos mediante una línea negra (Figura 4a) y azul (Figura 4b).

Así pues, el análisis fotométrico diferencial ejecutado con Tycho Tracker permitió obtener una serie temporal muy estable, ya que la dispersión puntual quedó por debajo de 0,03 (se encontró un error medio de 0,01), lo que avala la precisión fotométrica del conjunto y la idoneidad de aplicar técnicas de búsqueda periódica sobre los datos. El propio programa, que combina un periodograma Lomb-Scargle con ajustes armónicos y presenta de forma interactiva las soluciones candidatas, calculó un periodo (la opción con menor varianza residual) de $2,327 \pm 0,057$ h y una amplitud pico a pico de 0,122 en magnitud (bastante por encima del error medio encontrado), valores que se acercan mucho al periodo publicado para 137170 (1999 HF1), establecido en $2,319 \pm 0,000$ h mediante campañas fotométricas previas (Johnston, 2014).

La coincidencia entre el periodo aquí derivado y el de la bibliografía, junto con la baja dispersión de cada uno de los puntos calculados, ofrece una verificación cruzada de la fiabilidad tanto del método de reducción como de la calidad instrumental. La amplitud modesta sugiere que el objeto presenta una elongación baja y, por consiguiente, una forma cercana a la esfericidad, ya que asteroides con ejes muy desiguales (poco esféricos) producen normalmente variaciones luminosas superiores a 0,5 en magnitud (Harris et al., 2014; McNeill et al., 2016; Lu and Jewitt, 2019). En paralelo, la velocidad de rotación, cercana a la conocida como *spin barrier* o barrera de cohesión (Pravec et al., 2006b), indica que el asteroide posee una estructura interna sólida o, al menos, suficientemente cohesionada, ya que un cúmulo de escombros (*rubble pile*) debería desintegrarse a esa frecuencia de giro. Así, la conjunción de periodo corto y amplitud reducida apunta a un monolito denso cuya superficie, al girar, genera los “picos y valles” que Tycho visualiza como un suave sube-baja.

Por otro lado, aunque la curva de luz que hemos obtenido muestra dos máximos y dos mínimos a lo largo de un ciclo completo, lo que en principio encaja con la rotación de un cuerpo levemente alargado que presenta más o menos superficie iluminada según gira, hay varios rasgos que invitan a pensar en la presencia de un satélite. Si nos fijamos en la Figura 11, el valle situado en la fase 0,25 desciende unos centésimos de magnitud más que el de la fase 0,75, una asimetría pequeña pero sistemática que podría deberse a un eclipse o tránsito mutuo entre dos componentes. Del mismo modo, el máximo principal, alrededor de la fase 0,55, se redondea en lugar de formar un pico agudo, como si el brillo adicional de un compañero suavizara la subida y la bajada. Además, este comportamiento lo hemos encontrado de manera consecutiva en dos noches diferentes.

Aunque es cierto que durante una de las noches dejamos de obtener datos (ver Figura 11a, donde hay un gap de datos para la segunda noche), la similitud de los datos de ambas nos hace pensar que existe un proceso físico que genera esta diferencia entre los picos y los valles del brillo del asteroide (o del sistema analizado). Además, la amplitud total de la modulación resulta moderada para un período de rotación tan breve ($\sim 2,3$ h), es

decir, si el asteroide principal fuera muy alargado, esperaríamos oscilaciones bastante mayores, de modo que la luz extra de un segundo cuerpo encajaría con esa amplitud amortiguada. Estas variaciones consideramos que no deberían de ser producto del ruido, ya que el error fotométrico de las mediciones es pequeño en relación con la señal. Con estos datos, junto con las evidencias encontradas por otros estudios (Vereshchagina, 2011; Sonka et al., 2014) podríamos confirmar que nos encontramos ante un sistema binario y que además hemos sido capaces de observar y analizar los efectos a nivel de magnitud estándar del comportamiento binario de este sistema. Sin embargo, solo con nuestras observaciones no sería suficiente para confirmar este hecho y convendría realizar observaciones de alta cadencia durante varias noches consecutivas y comprobar si aparece un patrón de eclipses que se repita con un intervalo ligeramente distinto del período de rotación del primario. Tomar curvas de luz en filtros diferentes podría aportar más información, dependiendo de la naturaleza del acompañante.

Por último, repetir la campaña en futuras oposiciones ayudaría a ver si la profundidad y la forma de los valles varían con la geometría Sol-Tierra-asteroide, algo característico de eclipses entre componentes.

Discusión y conclusiones

Los resultados obtenidos en esta práctica permitieron identificar las variaciones de brillo en un asteroide binario de manera eficaz, validando el uso de la curva de luz como técnica esencial para estudiar cuerpos menores del Sistema Solar. Las técnicas de fotometría diferencial permitieron caracterizar el comportamiento rotacional del objeto, lo cual proporciona datos que permitieron determinar su forma, su estructura y su posible naturaleza binaria. Estos resultados corroboran estudios previos en el área y ayudaron a validar la metodología utilizada.

Concretamente, se encontró un periodo de rotación del asteroide de $2,327 \pm 0,057$ h, un valor muy cercano al teórico (2.319h), el cual se encuentra dentro del margen de error calculado por el software utilizado durante el estudio (Tycho). Además, analizando de manera cualitativa la curva de luz calculada después del proceso de calibración de las imágenes, se analizó la forma del objeto y la posible presencia de un segundo cuerpo orbitando al objeto principal. Debido a la baja diferencia en amplitud entre los máximos y mínimos (0,122), se determinó que su forma tenía que ser cercana a la de un objeto esférico (una mayor diferencia entre magnitudes haría pensar que el objeto fuera más elongado, ya que según la cara que mostrara, la magnitud variaría mucho) y se determinó además que se debía de tratar de un objeto compacto, ya que su bajo periodo de rotación facilitaría la dispersión del material en pos de la cohesión en el caso de que fuera un objeto frágil. Finalmente, se encontró un comportamiento en la curva de luz que nos da muchos indicios acerca de la presencia de un segundo cuerpo orbitando en las vecindades del 137170 (1999 HF1), confirmando las hipótesis de trabajos anteriores.

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro agradecimiento al Observatorio de Calar Alto por brindarnos el acceso a sus instalaciones y equipamiento de observación, lo cual fue fundamental para el desarrollo de este proyecto. Asimismo, agradecemos a nuestro Tutor de prácticas, y Operador del telescopio, Francisco Javier Flores Martín por su valiosa asistencia técnica como operador del telescopio y su orientación durante las noches de observación. Su experiencia y compromiso enriquecieron significativamente nuestro aprendizaje práctico y científico

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Referencias

- Bottkejr, W. et al. (2005) 'The fossilized size distribution of the main asteroid belt', *Icarus*, 175(1), pp. 111–140. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2004.10.026>.
- Chesley, S.R. et al. (2014) 'Orbit and bulk density of the OSIRIS-REx target Asteroid (101955) Bennu', *Icarus*, 235, pp. 5–22. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2014.02.020>.
- Davenhall, A.C., Privett, G.J. and Taylor, M.B. (2001) 'The 2-d CCD Data Reduction Cookbook', *Starlink Cookbook*, 5. Available at: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2001StarC...5.....D> (Accessed: 23 June 2025).

Dymock, R. (2010) *Asteroids and Dwarf Planets and How to Observe Them*. New York, NY: Springer New York (Astronomers' Observing Guides). Available at: <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6439-7>.

Gratton, R.G., Carretta, E. and Bragaglia, A. (2012) Multiple populations in globular clusters: Lessons learned from the Milky Way globular clusters', *The Astronomy and Astrophysics Review*, 20(1), p. 50. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00159-012-0050-3>.

Green, S.F. and Jones, M.H. (2004) An Introduction to the Sun and Stars, An Introduction to the Sun and Stars. Available at: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2004iss.book....G> (Accessed: 23 June 2025).

Harris, A.W. et al. (2014) 'On the maximum amplitude of harmonics of an asteroid lightcurve', *Icarus*, 235, pp. 55–59. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2014.03.004>.

Jacobson, S.A. and Scheeres, D.J. (2011) 'Dynamics of rotationally fissioned asteroids: Source of observed small asteroid systems', *Icarus*, 214(1), pp. 161–178. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2011.04.009>.

Johnston, W. R. (2014). (137170) 1999 HF1. En Asteroids with Satellites Database – Johnston's Archive. Recuperado el 24 de junio de 2025, de <https://www.johnstonsarchive.net/astro/astmoons/am-137170.html>

Keller, W.A. (2018) *Inside PixInsight*. Cham: Springer International Publishing (The Patrick Moore Practical Astronomy Series). Available at: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-97689-1>.

Lu, X.-P. and Jewitt, D. (2019) 'Dependence of Light Curves on Phase Angle and Asteroid Shape', *The Astronomical Journal*, 158(6), p. 220. Available at: <https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab4ce4>.

McNeill, A. et al. (2016) 'Brightness variation distributions among main belt asteroids from sparse light-curve sampling with Pan-STARRS 1', *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 459(3), pp. 2964–2972. Available at: <https://doi.org/10.1093/mnras/stw847>.

Nesvorný, D., Youdin, A.N. and Richardson, D.C. (2010) 'Formation of Kuiper Belt binaries by gravitational collapse', *The Astronomical Journal*, 140(3), pp. 785–793. Available at: <https://doi.org/10.1088/0004-6256/140/3/785>.

NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). 2023, April 10. The Atmospheric Window. <https://www.noaa.gov/jetstream/satellites/absorb>

Parrott, D. (2020). Tycho Tracker: A new tool to facilitate the discovery and recovery of asteroids using synthetic tracking and modern GPU hardware. En 39^a Annual Conference of the Society for Astronomical Sciences (SAS-2020). <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020sas.conf..101P/abstract>

Parrott, D. (2025). Tycho Tracker: A New Tool to Facilitate the Discovery and Recovery of Asteroids using Synthetic Tracking and Modern GPU Hardware. Recuperado el 24 de junio de 2025, de <https://www.tycho-tracker.com/>

Polishook, D. and Brosch, N. (2008) 'Photometry of Aten asteroids—More than a handful of binaries', *Icarus*, 194(1), pp. 111–124. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2007.09.022>.

Pravec, P. et al. (2006) 'Photometric survey of binary near-Earth asteroids', *Icarus*, 181(1), pp. 63–93. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2005.10.014>.

Pravec, P., Harris, A.W. and Warner, B.D. (2006) 'NEA rotations and binaries', *Proceedings of the International Astronomical Union*, 2(S236), pp. 167–176. Available at: <https://doi.org/10.1017/S1743921307003201>.

Rivkin, A.S. and Cheng, A.F. (2023) Planetary defense with the Double Asteroid Redirection Test (DART) mission and prospects', *Nature Communications*, 14(1), p. 1003. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41467-022-35561-2>.

Sánchez, S.F. et al. (2008) 'The Night Sky at the Calar Alto Observatory II: The Sky at the Near-infrared', *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 120(873), pp. 1244–1254. Available at: <https://doi.org/10.1086/593981>.

A. Sonka et al., New photometric observations of the binary near-earth asteroid (137170) 1999 HF1. Minor Planet Bull. 41(4), 285 (2014). <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2014MPBu...41..285S/abstract>
Space Reference. (s. f.). 137170 1999 HF1. Recuperado el 24 de junio de 2025, de <https://www.spacereference.org/asteroid/137170-1999-hf1>

Vereshchagina, I. A. (2011). Investigation of multiple asteroids 2006 VV2,(45) Eugenia,(90) Antiope,(762) Pulcova,(87) Sylvia, 137170 (1999 HF1). arXiv preprint arXiv:1102.0152. <https://arxiv.org/abs/1102.0152> Walsh, K.J., Richardson, D.C. and Michel, P. (2008) 'Rotational breakup as the

origin of small binary asteroids', *Nature*, 454(7201), pp. 188–191. Available at: <https://doi.org/10.1038/nature07078>.

Warner, B.D. (2016) *A Practical Guide to Lightcurve Photometry and Analysis*. Cham: Springer International Publishing (The Patrick Moore Practical Astronomy Series). Available at: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-32750-1>.

Warner, B.D., Harris, A.W. and Pravec, P. (2009) 'The asteroid lightcurve database', *Icarus*, 202(1), pp. 134–146. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2009.02.003>.

Margot, J.-L., Pravec, P., Taylor, P., Carry, B., & Jacobson, S. A. (2015). Asteroid systems: Binaries, triples, and pairs. En P. Michel, F. E. DeMeo, & W. F. Bottke (Eds.), *Asteroids IV* (pp. 355–374). University of Arizona Press.

Max-Planck-Institut für Astronomie. (2004, noviembre 16). 25 Years of Calar Alto Observatory – From the Past to the Future. <https://www.mpa.de/5314368/2004-07-Calar-Alto>

Gratton, R. G., Carretta, E., & Bragaglia, A. (2012). Multiple populations in globular clusters. Lessons learned from the Milky Way globular clusters. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 20(1), 50. <https://doi.org/10.1007/s00159-012-0050-3>

Enríquez, D. G., Soler, E. M., García, V. J. M., & Torres, J. A. M. (2011). *Astronomía fundamental*. Universitat de València. <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=FGZWadltoC8C&oi=fnd&pg=PA1&ots=-65kBT40Y1&sig=qU-zV5-XbEHcsvOcKNvLJbrCUNA#v=onepage&q&f=false>

Jain, P. (2024). *An introduction to astronomy and astrophysics*. CRC Press. <https://bib-pubdb1.desy.de/record/612244/>