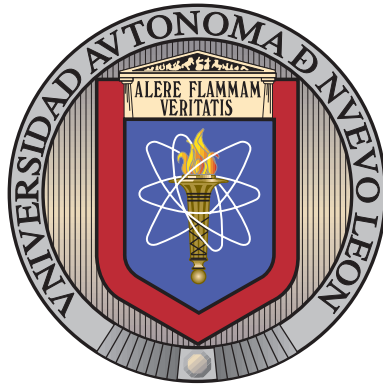


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS



FOTOMETRÍA DIFERENCIAL DE ASTEROIDES
DESDE EL OBSERVATORIO ASTRONÓMICO
UNIVERSITARIO

POR

DIEGO ENRIQUE MARTÍNEZ MARROQUÍN

EN OPCIÓN DE GRADO DE:

MAESTRÍA EN ASTROFÍSICA PLANETARIA Y TECNOLOGÍAS AFINES

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

MARZO 2026

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis “Fotometría Diferencial de Asteroides desde el Observatorio Astronómico Universitario”, realizada por el alumno Diego Enrique Martínez Marroquín, con número de matrícula 1725685, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestría en Astrofísica Planetaria y Tecnologías Afines.

El Comité de Tesis

Dr. Andrés Alberto Avilés Alvarado
Director

Dr. Raúl Mújica García
Codirector

Dr. Carlos Esteban Chávez Pech
Revisor

Vo. Bo.

Dra. Esmeralda Romero Hernández
Coordinar del Posgrado en Astrofísica Planetaria y Tecnologías Afines

*Dedicado a toda mi familia: los que están conmigo, los que ya partieron y los que
están por llegar.*

AGRADECIMIENTOS

A mi asesor, el Dr. Andrés Avilés, por su tiempo dedicado a supervisar mi trabajo. A la Dra. Esmeralda Romero, al Dr. Carlos Guerrero, a la Dra. Flor Garcia y al resto del personal docente de la maestría por su apoyo, paciencia y sugerencias para mejorar mi proyecto.

El Dr. Eduardo Pérez por el apoyo logístico y de transporte al Observatorio, así como por permitirme utilizar el equipo para llevar a cabo el proyecto.

Al Dr. Raúl Mujica y al Mtro. Guillermo Cerdán por instruirme en la metodología, proveer las máquinas virtuales y software y proporcionar valiosa retroalimentación a los resultados del trabajo. Asimismo se le agradece al Dr. Joel Castro por sus sugerencias de presentación de la información.

RESUMEN

Durante este proyecto de investigación se realizaron adecuaciones al equipo científico con que dispone el Observatorio Astronómico Universitario y se adaptó el método de análisis mediante el software MPO Canopus para lograr exitosamente el objetivo principal del trabajo, obteniendo curvas de luz de cuatro asteroides: (699) Hela, (1396) Outeniqua, (3255) Tholen y (113632) 2002 TA72. De estos, el último, (113632) 2002 TA72, no contaba con un periodo conocido previamente. Aunque el análisis de este asteroide está limitado por el tiempo de observación, la forma de la curva de luz y el periodo de rotación obtenido son congruentes con las características reportadas de este asteroide (ALCDEF). No obstante, se planea retomar su estudio en su siguiente aparición, en el año 2029.

Palabras clave: Observatorio Astronómico Universitario, fotometría diferencial, asteroides, curvas de luz

ÍNDICE GENERAL

1. Introducción	12
1.1. Antecedentes	12
1.1.1. Las razones del estudio de asteroides	12
1.2. Asteroides	14
1.2.1. ¿Qué es un asteroide?	14
1.2.2. Distribución de los asteroides	15
1.2.3. NEAs	16
1.3. Fotometría	17
1.3.1. Importancia de la fotometría de asteroides	17
1.3.2. Curvas de luz	18
1.3.3. Series de Fourier	19
1.3.4. CCD y CMOS	20
1.4. Base de datos ALCDEF	20
1.5. Objetivos del proyecto	21
1.6. Estructura del trabajo	21
2. Metodología de observación	23
2.1. Sitio	23
2.2. Equipo	23
2.2.1. Diseño óptico del telescopio	24
2.2.2. Montura	25

2.2.3.	Cámara de imagen principal	26
2.2.4.	Características de imagen	27
2.2.5.	Guiador	27
2.3.	Método de observación	28
2.4.	Selección de Objetivos	29
3.	Metodología de Análisis de Datos	31
3.1.	Reducción en IRAF	31
3.2.	MPO Canopus	32
3.2.1.	Algoritmo FALC	32
3.2.2.	Magnitudes Derivadas	32
3.2.3.	Catálogos Fotométricos	33
3.3.	Análisis en MPO Canopus	34
3.3.1.	Preparativos previos al análisis	34
3.3.2.	Herramienta <i>Single Image Astrometry</i>	36
3.3.3.	Fotometría mediante la rutina <i>Asteroid Photometry</i>	37
3.3.4.	Ajuste de curva de luz y búsqueda de periodo	41
3.4.	Objetos Seleccionados	44
4.	Análisis y Resultados	46
4.1.	(699) Hela	46
4.2.	(1396) Outeniqua	47
4.3.	(3255) Tholen	48
4.4.	(113632) 2002 TA72	48
5.	Discusión	50
5.1.	Resumen de resultados obtenidos	50
5.2.	Comparación con resultados previos	50
5.2.1.	(699) Hela	50

5.2.2. (1396) Outeniqua	51
5.2.3. (3255) Tholen	52
5.3. Caso de (113632) 2002 TA72	52
5.4. Limitaciones	53
6. Conclusión	55
A. Análisis de sensor	57

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Crater Barringer, consecuencia del impacto de un asteroide. Fotografía por D. Roddy, para el <i>US Geological Survey</i>	13
1.2. Diagrama Euler de la resolución de la IAU sobre la definición de planeta (texto en inglés)	14
1.3. Histograma de distribución de asteroides dentro del Cinturón Principal, basado en gráfica original elaborada por Alan Chamberlain. Los Huecos de Kirkwood aparecen marcados con su resonancia orbital con el planeta Júpiter	15
1.4. Ilustración de las órbitas de los cuatro tipos de asteroides NEA (Biktimirov, 2019)	17
1.5. Curvas de luz de (1831) Nicholson, elaboradas por Cerdan Hernández (2019). La gráfica de la izquierda muestra los datos en bruto mientras que la de la derecha los datos ajustados a la fase del asteroide.	19
2.1. Diseño óptico Dall-Kirkham. Imagen de la página web de “TheOpen-University” ¹	25
2.2. Cámara QHY174M GPS. Imagen obtenida de la página web de QHYCCD	26
3.1. La herramienta <i>FITS Header Editor</i> . En este ejemplo, se va a editar el campo OBJECT a un grupo de imágenes, de tal forma de que estén en un formato admitido por Canopus.	35

3.2. Un ejemplo de la ventana de configuración. Los valores de los campos en este perfil están configurados para el telescopio de 50cm, en el observatorio de Picacho	36
3.3. La ventana de la herramienta <i>Single Image Astrometry</i> . En este ejemplo, se resuelve exitosamente la imagen y se ubica al asteroide (113632) 2002 TA72. Asimismo, a la derecha de la imagen se muestra el editor de tamaño de aperturas.	37
3.4. La ventana de <i>Review</i> . Aquí se previsualizan las imágenes a analizar y se pueden descartar las que no sean adecuadas.	38
3.5. Aquí se selecciona el asteroide a estudiar (marcado en la imagen) así como los filtros con los que se van a trabajar.	39
3.6. La ventana de selección de estrellas de comparación.	40
3.7. La ventana principal de la rutina de búsqueda de periodo.	41
3.8. La ventana de selección de sesiones a cargar.	42
3.9. Visualización de las estrellas de comparación. Se eliminan los puntos que sean muy diferentes al resto.	43
4.1. Curva de luz obtenida para el asteroide 699 Hela	46
4.2. Curva de luz obtenida para el asteroide 1396 Outeniqua	47
4.3. Curva de luz obtenida para el asteroide 3255 Tholen	48
4.4. Curva de luz obtenida para el asteroide 113632 2002 TA72	49
5.1. Curva de luz obtenida por Brian D. Warner del asteroide Hela (Warner, 2017). Pese al filtro utilizado, podemos ver que la forma de la curva es muy parecida a la forma de la curva obtenida con nuestras observaciones.	51
5.2. Curvas de luz del asteroide (3255) Tholen. La primera de izquierda a derecha siendo con el filtro V (Ferrero, 2014) y las últimas dos en el filtro r de Sloann (Skiff et al., 2019).	52

ÍNDICE DE TABLAS

2.1. Propiedades del tubo óptico. Información obtenida de la página web de PlaneWave. ²	24
2.2. Características de la cámara	26
2.3. Características de imagen del sistema óptico	27
2.4. Características del guiador. Información obtenida de la página web de Orión	28
3.1. Resumen de características de los objetos seleccionados.	45
5.1. Resumen de resultados obtenidos.	50
A.1. Resultados de análisis de ganancia	57
A.2. Resultados de análisis de linealidad	58

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

En 1609, Galileo Galilei construyó un telescopio con el poder de amplificar 20 veces un objeto y lo apuntó a la bóveda celeste, comenzando así la historia del estudio de la astronomía moderna. Gracias a esto, pudo observar los cráteres de la Luna, los anillos de Saturno, las Gran Mancha Roja en Júpiter, así como otros astros del sistema solar . No obstante, sería hasta 1801 cuando comenzaría la búsqueda y estudio de asteroides con el descubrimiento de Ceres, por parte del astrónomo italiano Guiseppe Piazzi (Li et al., 2015).

Desde ese día, se han descubierto más de 1,283,348 asteroides (NASA, 2023), con la cantidad conocida de estos aumentando en número casi cada día. Gracias a los esfuerzos de sondeos como el SMASS (*Small Main Belt Asteroid Spectroscopic Survey*)(Burbine y Binzel, 2002) conocemos no solamente las órbitas de muchos de estos, sino también sus composiciones mineralógicas superficiales, formas y tamaños. Pese a esto, es muy importante continuar los esfuerzos de detección y caracterización de asteroides por diversas razones.

1.1.1 LAS RAZONES DEL ESTUDIO DE ASTEROIDES

La primera es por el riesgo destructivo que estos representan para la Tierra. Por ejemplo, el día 15 de febrero de 2013, un bólido estalló en los cielos de Chelyabinsk, Rusia. Una luz cegadora precedió una onda de choque que rompió ventanas a

kilómetros a la redonda, provocando lesiones, pero afortunadamente no hubo fatalidades.

El asteroide que provocó este evento fue detectado escasas horas antes de que entrara en la atmósfera terrestre. No es la primera vez que suceden eventos parecidos en la Tierra, sin embargo, las consecuencias de la colisión de un asteroide con la Tierra pueden ser muchísimo más devastadoras, llegando a niveles de catástrofes mundiales que ponen en peligro la vida en la Tierra. Conocer las trayectorias y tamaños de los asteroides nos ayuda a determinar si estos representan un peligro para la Tierra y nos permiten crear estrategias para desviarlos, destruirlos o minimizar el daño que estos ocasionan.



Figura 1.1: Crater Barringer, consecuencia del impacto de un asteroide. Fotografía por D. Roddy, para el *US Geological Survey*

Otra importancia de su estudio yace en que proporcionan una ventana a la historia de formación del sistema solar. Según modelos del sistema solar, los asteroides son escombros formados por la colisión de planetesimales que no pudieron acrecer a un tamaño más grande durante la formación del sistema solar (Gaffey et al., 1993). Actualmente, la colisión entre asteroides continúa siendo la forma principal en la que estos evolucionan. (Wetherill, 1992). Esto significa que muchos asteroides permanecen exactamente igual a como se formaron hace millones de años, permitiendo conocer las condiciones durante la formación del sistema solar y, por consiguiente, la formación de otros sistemas solares en el universo.

1.2 ASTEROIDES

1.2.1 ¿QUÉ ES UN ASTEROIDE?

En 2006, la IAU (*International Astronomical Union*) definió que para que un objeto del sistema solar se considere planeta, éste debe de cumplir con las siguientes características:

- Orbita alrededor del Sol
- Tiene suficiente masa para que su gravedad propia supere las fuerzas rígidas del cuerpo y asuma una forma en equilibrio hidrostático (casi esférico).
- Ha limpiado la vecindad de su órbita (es el cuerpo dominante)

Si un objeto cumple las primeras dos características, pero no la tercera y no es un satélite natural de algún planeta, entonces a este objeto se le denomina un **planeta enano**. A los objetos que no cumplen con ninguna de las características anteriormente mencionadas y no es un planeta enano entonces, se les llama **Cuerpos Menores del sistema solar**, dentro de los cuales se encuentran los **asteroides** y los **cometas**.

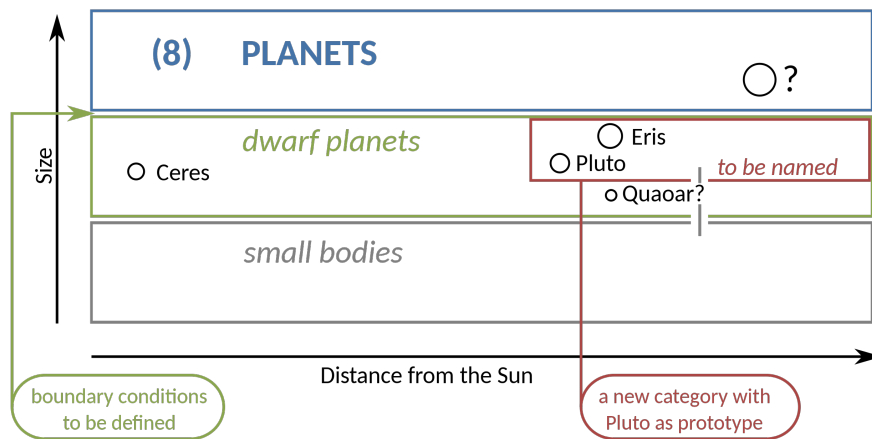


Figura 1.2: Diagrama Euler de la resolución de la IAU sobre la definición de planeta (texto en inglés)

Históricamente hablando, la distinción entre asteroide y cometa es en la forma en las que se resuelven. Los asteroides permanecen como fuentes puntuales sin

resolver (como las estrellas, de ahí el nombre asteroide) mientras que los cometas desarrollan una coma extendida (la nube de vapor) a medida que se acercan al sistema solar interno. (Gaffey et al., 1993).

1.2.2 DISTRIBUCIÓN DE LOS ASTEROIDES

Los asteroides se pueden encontrar en diferentes regiones del sistema solar. Sin embargo, la principal concentración de ellos es en el Cinturón de Asteroides. Este se encuentra entre las órbitas de Marte y de Júpiter, entre 2.2 y 3.3 UA del Sol. (Karttunen et al., 2007). Sin embargo, la distribución de asteroides dentro del Cinturón no es uniforme, ya que se encuentran huecos conocidos como los Huecos de Kirkwood. No existen asteroides dentro de estos huecos ya que entrarían en una resonancia orbital con Júpiter y, por lo tanto, sus órbitas no serán estables.

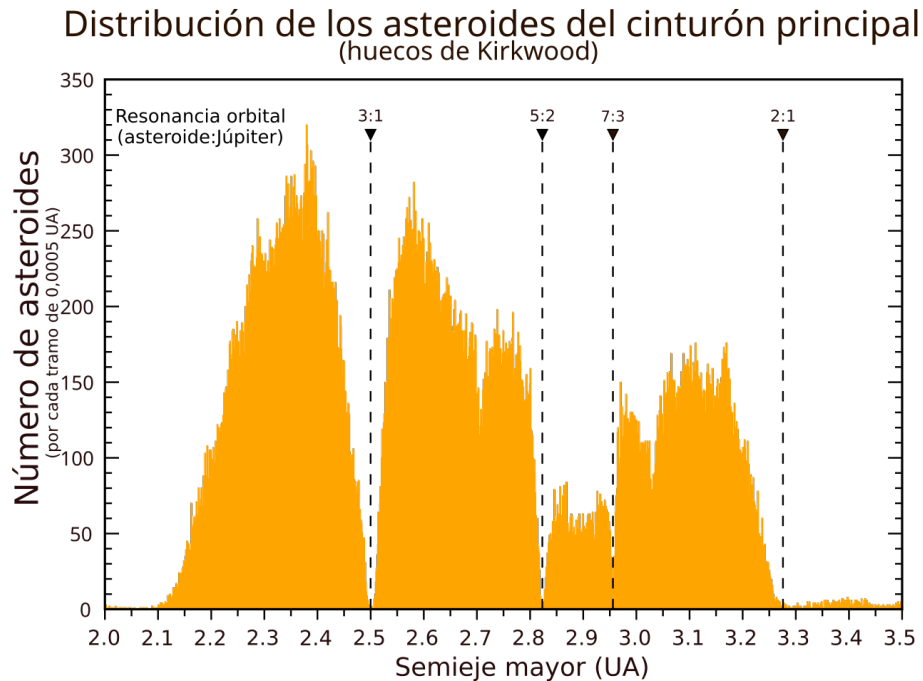


Figura 1.3: Histograma de distribución de asteroides dentro del Cinturón Principal, basado en gráfica original elaborada por Alan Chamberlain. Los Huecos de Kirkwood aparecen marcados con su resonancia orbital con el planeta Júpiter

Otra agrupación importante son los asteroides Troyanos. Estos se ubican en los puntos de Lagrange L4 y L5 de la órbita del cuerpo que orbitan, pero el grupo

significativamente más grande de estos son los Troyanos de Júpiter (Alferes Martínez, 2022). Esto es posible gracias a que los puntos L4 y L5 (que se encuentran 60° delante y 60° detrás del planeta que orbitan, respectivamente) son soluciones estables al sistema de tres cuerpos restringido y que los objetos que estén dentro de estos tienen aproximadamente el mismo periodo orbital que los dos cuerpos de masa mayor (Aguilera Ramírez, 2021).

1.2.3 NEAs

Todo objeto en el sistema solar cuyo perihelio se acerque a 1.3 UA se le considera un NEO, u Objeto Cercano a la Tierra. Dentro de estos están los NEC (*Near Earth Comet*) y los NEA (*Near Earth Asteroid*), que son asteroides cuyas trayectorias están muy cerca o cruzan la órbita terrestre. Dentro de estos se distinguen los siguientes tipos:

- Amor: Aquellos asteroides que tienen una órbita entre la Tierra y Marte, pero no cruzan la órbita terrestre
- Apolo: Asteroides que cruzan la órbita terrestre que tienen ejes semimayores más grandes que el de la Tierra
- Atenas: Asteroides que cruzan la órbita terrestre que tienen ejes semimayores más pequeños que el de la Tierra
- Atiras: Asteroides cuyas órbitas están completamente dentro de la órbita terrestre.

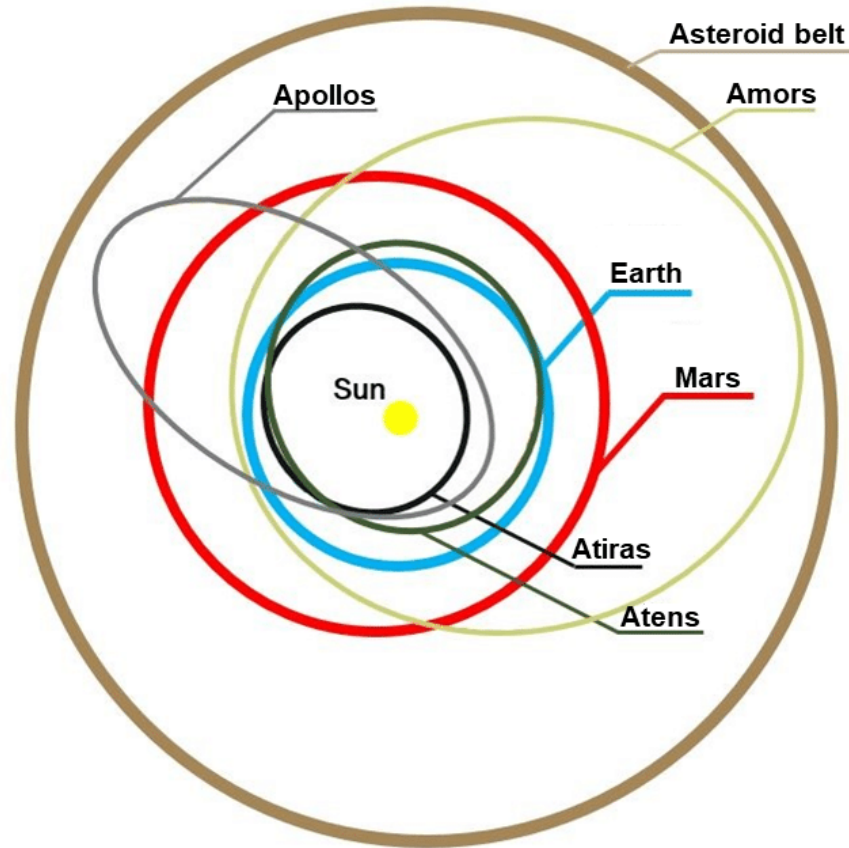


Figura 1.4: Ilustración de las órbitas de los cuatro tipos de asteroides NEA (Biktimirov, 2019)

Dentro de los NEAs destacan los denominados PHAs (*Potentially Hazardous Asteroids*) que son aquellos asteroides cuyas trayectorias los van a acercar en algún punto a menos de 0.05 unidades astronómicas de la Tierra. Su peligrosidad se clasifica utilizando la escala de Torino, siendo los de Nivel 0 aquellos con probabilidad nula de colisión y los Nivel 10 siendo aquellos que pueden provocar una catástrofe climática global (Naves y Campàs, 2020).

1.3 FOTOMETRÍA

1.3.1 IMPORTANCIA DE LA FOTOMETRÍA DE ASTEROIDES

La fotometría es la técnica astronómica que se encarga de medir la luz que emite un cuerpo celeste. En la astronomía, la utilizamos para medir el brillo o magnitud

de un objeto celeste (Naves y Campàs, 2020). Cuando este brillo se compara con estrellas de brillo constante en el mismo campo, se llama fotometría diferencial. Li et al. (2015) destacan tres usos importantes de la fotometría en el estudio de los asteroides:

1. Proporciona pistas sobre las propiedades físicas y composición mineralógica de la superficie del asteroide. La respuesta de la reflectancia de las partículas de la superficie a la iluminación y a la geometría de visión esta determinado por las propiedades ópticas y mecánicas de la superficie, como el tamaño de partículas, la porosidad, etcétera.
2. Facilitar correcciones fotométricas. Debido a que el espectro reflejante de la superficie depende de la iluminación y la geometría observada, es necesario hacer correcciones a una geometría común para hacer comparaciones entre diferentes áreas de un asteroide.
3. Predecir la reflectancia de la superficie del asteroide en condiciones arbitrarias de iluminación para diseñar y planear observaciones, especialmente para misiones de exploración por medio de misiones espaciales. Esto es debido a que un telescopio espacial va observar geometrías considerablemente distintas a las observadas desde la Tierra.

1.3.2 CURVAS DE LUZ

El método de curvas de luz es utilizado para medir las variaciones del flujo de un asteroide en función del tiempo o la fase rotacional de este mismo. Esto nos permite derivar el periodo de rotación de un asteroide y la amplitud de su variación (Cerdan Hernández, 2019).

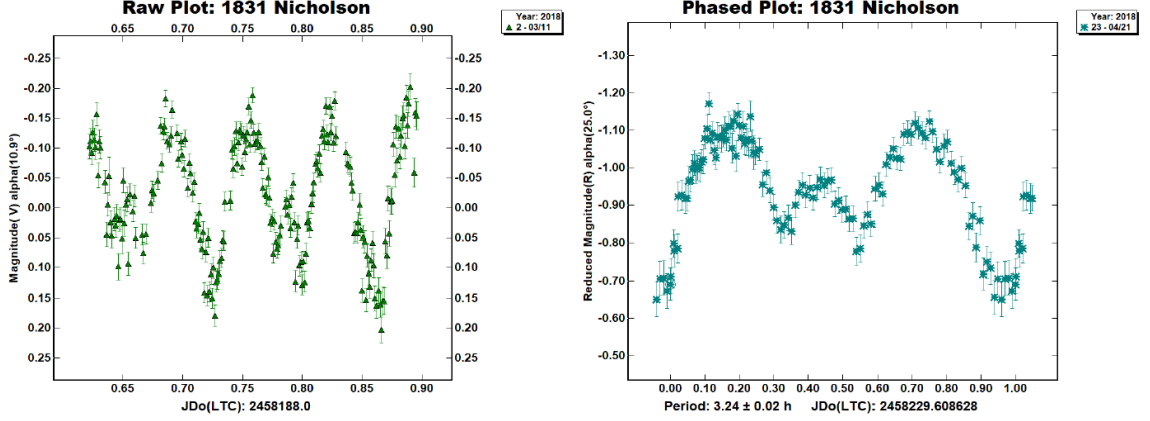


Figura 1.5: Curvas de luz de (1831) Nicholson, elaboradas por Cerdan Hernández (2019). La gráfica de la izquierda muestra los datos en bruto mientras que la de la derecha los datos ajustados a la fase del asteroide.

Para obtener un curva de luz, es necesario utilizar el método de fotometría diferencial, que implica encontrar la diferencia entre el brillo del objeto estudiado y una estrella de comparación (Michimani Garcia, 2019). De la curva de luz no solamente podemos obtener el periodo de rotación, sino también si el asteroide no está rotando en un eje singular, a lo que se le conoce como “*tumbling*”.

1.3.3 SERIES DE FOURIER

Estas series son empleadas para representar funciones periódicas en términos de sumatorias de senos y cosenos. Generalmente se expresan en la forma:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos \frac{2n\pi}{T}t + b_n \sin \frac{2n\pi}{T}t \right] \quad (1.1)$$

Dónde a_n y b_n son los Coeficientes de Fourier, t es una variable real y T es el periodo de la función.

Estas series se emplean a la hora de analizar los datos fotométricos de los asteroides ya que, al poseer una variación periódica en su brillo, nos permiten ajustarlos a una serie de orden n , obteniendo un periodo y amplitud. Asimismo, los coeficientes de Fourier pueden ser asociados a parámetros físicos del asteroide (como su forma) (Harris et al., 1989).

Otra ventaja muy importante de realizar este análisis es la posibilidad de construir curvas de luz compuestas, o en otras palabras, combinar las curvas de luz obtenidas a lo largo de sesiones de observación distintas. Para realizar este tipo de análisis, se emplea el software *MPO Canopus*, cuyas funciones y características serán detalladas en el siguiente capítulo.

1.3.4 CCD Y CMOS

Una cámara CCD (*Charge Coupled Device*) utiliza un chip de silicio sensible a la luz que está por unidades independientes llamados pixeles (Romanishin, 2022). Para realizar fotometría, se cuenta el número de fotones que “caen” por pixel. Los CCDs se eligen ya que tienen respuesta lineal al número de fotones incidentes (Naves y Campàs, 2020).

Existen ciertas propiedades importantes de las cámaras CCD. La primera de ellas es la eficiencia cuántica. La eficiencia cuántica nos dice, en términos de porcentaje, cuantos fotones que caen en el CCD son detectados por éste. La eficiencia cuántica es una función de la longitud de onda, por lo que va a haber chips más sensibles en ciertos intervalos de frecuencia que en otros (Romanishin, 2022).

Otra característica importante es la linealidad de las cuentas contra el tiempo de exposición. Para todos los CCDs, va a llegar un punto en donde esta relación ya no va a ser lineal, esto siempre sucede antes de que se llegue al límite de cuentas (Naves y Campàs, 2020). Para fotometría de alta precisión es necesario de que esta linealidad no se pierda para evitar ruidos, por lo que se recomienda elegir el tiempo de exposición adecuadamente.

1.4 BASE DE DATOS ALCDEF

Ante la carencia de una base de datos centralizada en fotometría de asteroides y el riesgo a que los datos observacionales se pierdan, en el año 2010 se propone la creación de la base de datos colaborativa ALCDEF (*Asteroid Lightcurve Data Exchange Format*) (Warner et al., 2011). Esta base de datos almacena, mediante un

formato UTF-8, toda la información pertinente a las curvas de luz obtenidas mediante fotometría diferencial de asteroides (Stephens et al., 2010). También permite a colaboradores acceder a la información, a forma de emplearse en futuros trabajos.

1.5 OBJETIVOS DEL PROYECTO

El objetivo de este proyecto es implementar la metodología observacional y de análisis de datos utilizada en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE) para la obtención de curvas de luz de asteroides mediante fotometría diferencial en los datos obtenidos en el OAU. No obstante, debido a la naturaleza de los sitios (principalmente en cuestiones de clima) y del equipo disponible, esta metodología debe ser ligeramente modificada.

Para llevar a cabo el proyecto, se autorizó el uso del telescopio computarizado de 50cm ubicado en el observatorio de Picacho, en el municipio de Iturbide, Nuevo León. Esto nos permite tener un buen punto de referencia para futuros proyectos con Tlapiani, ya que el telescopio de 50cm posee el mismo sistema óptico que se está buscando implementar en el tetra telescopio.

La intención de este proyecto es con iniciar la caracterización de periodos de asteroides, lo que a su vez, es acorde con la misión por la cuál no solamente se fundó el Observatorio Astronómico Universitario, sino también la que el tetratelescopio Tlapiani busca cumplir.

1.6 ESTRUCTURA DEL TRABAJO

A continuación, se resume la estructura de este escrito. En el siguiente capítulo, *Observaciones*, se detallan la metodología de observación, que también incluye la información del sitio, las características del equipo y el método de selección de objetivos. Asimismo, se detalla la metodología de análisis de datos y el uso del software de análisis, MPO Canopus.

En el capítulo *Análisis y Resultados*, se presentan los resultados de las observaciones, así como un breve resumen de los antecedentes del objeto observado. Posteriormente, en *Discusión*, se discuten los resultados obtenidos y se comparan con otras observaciones realizadas del objeto. Finalmente, presentamos las conclusiones del trabajo.

CAPÍTULO 2

METODOLOGÍA DE OBSERVACIÓN

2.1 SITIO

Las observaciones se realizaron desde el Observatorio Astronómico Universitario, ubicado en el municipio de Iturbide en el estado de Nuevo León. Este sitio fue seleccionado por su facilidad de acceso y por el hecho de que ahí está instalado el tetra-telescopio Tlapiani, junto con un telescopio de 50cm que emplea el mismo modelo de tubo óptico y cámara. Al estar en el mismo sitio, podemos hacer comparaciones más directas a futuro entre la operación del telescopio de 50cm y Tlapiani.

La información del sitio es la siguiente:

- Lat: 24° 45' 29" N
- Lon: 99° 53' 34" E
- Altura: 2280 m sobre el nivel del mar

2.2 EQUIPO

Para realizar las observaciones se empleó el telescopio de 50cm, ubicado en el observatorio de Iturbide. Este es uno de los primeros telescopios que se montaron en el sitio y fue configurado para la observación de ocultaciones de asteroides.

Con excepción de la apertura del techo corredizo de su lugar de instalación, el telescopio es computarizado en su totalidad. Se emplea la plataforma ASCOM para su control y SharpCap¹ el software de imagen que principalmente se utiliza, aunque

¹<https://www.sharpcap.co.uk/>

hubo experimentos con el secuenciador automático del software NINA² para automatizar completamente el procedimiento de observación. A continuación, se presentan a detalle los componentes de este telescopio.

2.2.1 DISEÑO ÓPTICO DEL TELESCOPIO

Tabla 2.1: Propiedades del tubo óptico. Información obtenida de la página web de PlaneWave.³

Sistema óptico	
Apertura	508 mm
Longitud Focal	3454 mm
Razón Focal	f/6.8
Obstrucción Central	39 % del diámetro del espejo primario
Peso	63.5 kg
Longitud del Tubo óptico	1194 mm
Tamaño del Círculo de Imagen	52 mm
Grupo de lentes	
Diámetro	90 mm
Recubrimiento	AR de Banda Ancha
Espejo secundario	
Diámetro	191 mm
Material	Cuarzo
Forma	Esférico
Recubrimiento	Aluminio - 96 %
Espejo primario	
Diámetro Óptico	508 mm
Diámetro Exterior	521 mm
Forma	Elipsoide Prolato
Material	Cuarzo
Recubrimiento	Aluminio - 96 %

El tubo óptico del telescopio es el CDK20, fabricado por la empresa PlaneWave. Debido a su uso para la observación de ocultaciones de asteroides, se requería que el telescopio fuese más rápido, por lo que se le instaló un reductor focal de 0.66x. Esto redujo la longitud focal del telescopio a 2230 mm, con una nueva relación focal de f/4.4.

²<https://nighttime-imaging.eu/>

³<https://planewave.com/>

El diseño de este telescopio es un Dall-Kirkham Corregido (traducción de *Corrected Dall-Kirkham*, de aquí en adelante será referido como CDK). Este diseño óptico fue desarrollado por la misma empresa PlaneWave con el propósito de crear un telescopio de nivel astrográfico para sensores grandes. Al igual que un Dall-Kirkham convencional, este tubo óptico emplea un espejo elíptico como espejo primario y espejo esférico como secundario. Sin embargo, el diseño CDK implementa un grupo de lentes adicional para aplanar el campo de la imagen en su totalidad. Asimismo, el diseño CDK corrige la coma y el astigmatismo fuera de eje.

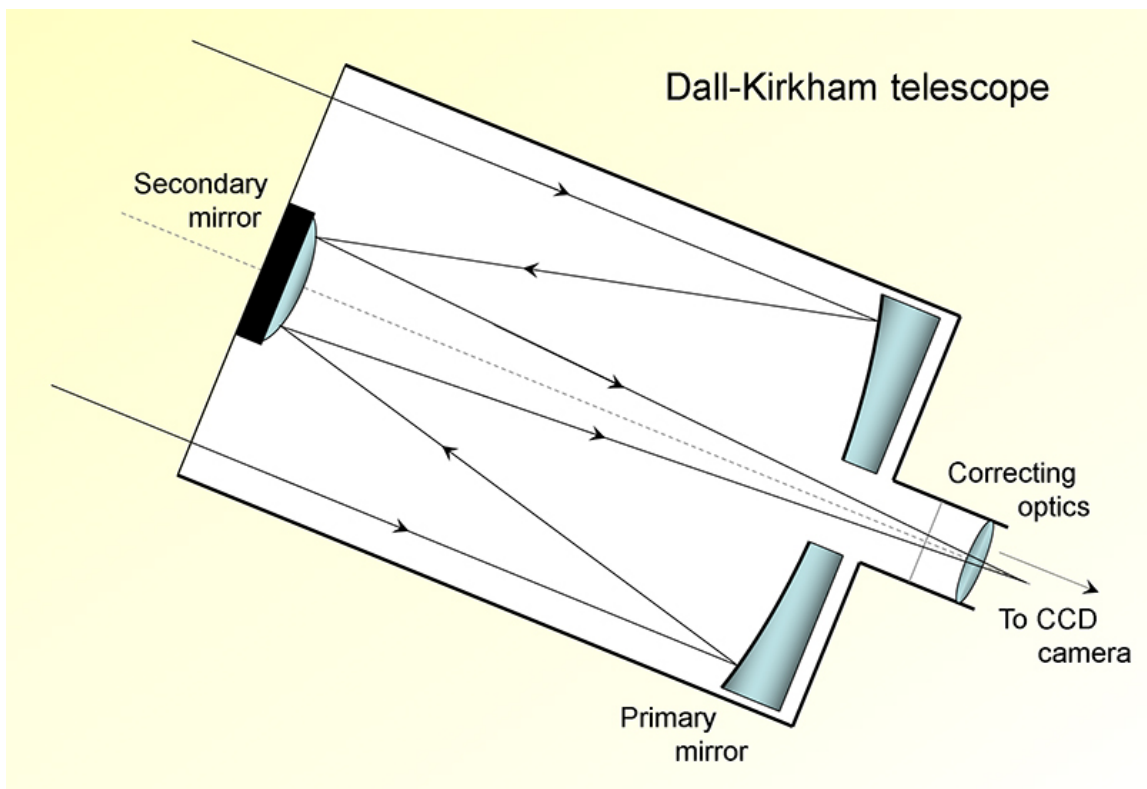


Figura 2.1: Diseño óptico Dall-Kirkham. Imagen de la página web de “TheOpenUniversity”⁴.

2.2.2 MONTURA

La montura es una 1600GTO, fabricada por AstroPhysics⁵. Esta montura es de diseño ecuatorial-alemana y está diseñada específicamente para poder operar en

⁴https://www.open.edu/openlearn/mod/oucontent/view.php?id=141781§ion=_unit3.3.2

⁵<https://www.astro-physics.com/>

una posición de “contrapeso arriba”, lo que permite hacer seguimientos extendidos posterior al cruce del objeto por el meridiano. Asimismo, la montura posee una capacidad de carga de 220 libras (alrededor de 100 kg).

2.2.3 CÁMARA DE IMAGEN PRINCIPAL

Tabla 2.2: Características de la cámara

Marca	QHYCCD
Modelo	QHY174M GPS
Tipo de Sensor	CMOS Monocromático
Tamaño de Sensor	11.25mm*7.03mm
Tamaño de píxel	5.86*5.86
Resolución	1920*1200
Binning	1x1, 2x2



Figura 2.2: Cámara QHY174M GPS. Imagen obtenida de la página web de QHYCCD

Montada al telescopio CDK se encuentra una cámara QHY174M GPS con un sensor CMOS. Una característica especial de esta cámara es la capacidad de conectarle un GPS. Esto le permite saber la hora exacta en la que empieza y termina la toma de la imagen. Sin embargo, la característica especial relevante de esta cámara

para el trabajo, es el hecho que posee un ruido de lectura bajo. En el Apéndice A se encuentran las características detalladas del sensor.

2.2.4 CARACTERÍSTICAS DE IMAGEN

Tabla 2.3: Características de imagen del sistema óptico

Equipo	
Longitud Focal	2230 mm
Razón Focal	f/4.4
Escala de Placa	92.49''
Imagen	
Campo de Visión	17.23' x 10.77'
Resolución (Binning 1x1)	0.54''
Resolución (Binning 2x2)	1.08''

2.2.5 GUIADOR

Debido al tiempo de exposición requerido para las imágenes de los asteroides observados, se requirió del uso de un guiador para corregir tanto errores mecánicos de la montura así como el error de alineación polar de la montura. El guiador consiste en una cámara secundaria no enfriada cuyo propósito es tomar exposiciones cortas de un campo de estrellas. Esto como objetivo de enviar correcciones de regreso a la montura, mejorando así el guiado.

El método ideal de guiado sería emplear un guiado fuera de eje. Es decir, utilizar un prisma para desviar luz del eje de imagen del telescopio primario a la cámara de guiado. Sin embargo, el uso del reductor focal impide este método ya que recorta bastante la longitud del plano de enfoque posterior. Esto limita a usar o un prisma o una rueda de filtros, junto con la cámara así que se prefirió la instalación de la rueda de filtros.

Tabla 2.4: Características del guiador. Información obtenida de la página web de Orión

Telescopio Guiador	
Marca	Orion
Nombre	ShortTube 80t
Tipo	Refractor
Longitud Focal	600 mm
Apertura	80 mm
Cámara de Guiado	
Marca	Orion
Nombre	StarShoot Autoguider
Sensor	CMOS Monocromático
Resolución	1280 x 1024
Tamaño de Pixel	5.2 micras
Resolución	2" por pixel

2.3 MÉTODO DE OBSERVACIÓN

Las observaciones se realizaron mediante la toma de imágenes directas del campo en donde se encontraba el asteroide. Debido a que el tamaño del campo de visión es un tanto reducido, es importante encuadrar correctamente estas imágenes, de tal forma de que se maximice el número de estrellas de comparación posibles.

La ganancia de la cámara se configuró a un valor lo más pequeño posible debido a dos factores principales:

1. La pérdida del valor de *fullwell* implica que los píxeles van a almacenar menos información antes de saturarse.
2. La relación señal/ruido disminuye frente al incremento desproporcionado del valor de fondo del cielo (rango dinámico inferior).

La cámara no posee distintos modos de lectura y se configuró y sincronizó el GPS. Sin embargo, a la hora del análisis de imagen, MPO Canopus no requiere de una hora de toma de imagen de alta precisión. Al tomar la imagen, SharpCap escribe la hora del sistema de la PC en el *Header*, así que mientras este sea correcto, MPO Canopus puede utilizarlo para poder ubicar el asteroide a la hora de resolver la placa.

Debido a las condiciones del *seeing*, se empleó un *binning* de 2x2 en las imágenes, para evitar un sobremuestreo en los píxeles. Esto también tiene la ventaja de reducir el tamaño de la imagen, lo cual también reduce el tiempo requerido durante el proceso de reducción.

El valor del *offset* se estimó utilizando el histograma de *SharpCap*, como si estuviésemos tomando imágenes tipo *bias*. Por otro lado, el tiempo de exposición de la imagen se determinó a la hora de observación. Se eligió de tal forma que el asteroide objetivo tuviese más de 15,000 cuentas y que las estrellas de comparación no excedieran el intervalo lineal del sensor.

2.4 SELECCIÓN DE OBJETIVOS

Las características deseadas de los asteroides observados cambiaron a medida que avanzó el proyecto. Al principio se buscaban asteroides brillantes con periodo reportado, con el objetivo de dedicar la sesión también a monitorear el guiado del telescopio y a hacer correcciones en la configuración del guiado. Esto culminó en la observación de un asteroide el cuál no tenía un periodo de rotación ya reportado. El esquema seguido para seleccionar objetivos fue el siguiente:

1. CALL - Se consultó el *Collaborative Asteroid Lightcurve Link* para seleccionar un grupo de candidatos. Esta página contiene una herramienta que permite filtrar los asteroides con base en sus características reportadas (o la falta de éstas). Esta herramienta se encuentra en el siguiente enlace: <https://minorplanet.info/php/calopplcdbquery.php>.

2. MPO Ephemeris Service - Una vez seleccionados los asteroides, estos se introdujeron en este servicio, para obtener sus posiciones a la hora y el día de observación. Una vez hecho esto, se descartaron los asteroides que culminaban a menos de 30° de altitud en el sitio y los que no aparecían durante la noche. Enlace: <https://www.minorplanetcenter.net/iau/MPEph/MPEph.html>.
3. SIMBAD - Finalmente, se consultó esta base de datos para visualizar el campo donde se encontraría el asteroide. En caso de que el asteroide no se encontraría en un campo con muchas estrellas, ese día se daba prioridad a asteroides con mejores campos de estrellas. Enlace: <https://simbad.cds.unistra.fr/simbad/>.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE DATOS

3.1 REDUCCIÓN EN IRAF

Para reducir las imágenes, se utilizó el programa IRAF, que se ejecutó mediante una terminal del Subsistema de Linux para Windows (*WSL*, por sus siglas en inglés). Se utilizaron imágenes tipo *bias*, *dark* y *flat* para corregir las imágenes del campo de estrellas con el asteroide (las imágenes tipo *light*). El procedimiento realizado se detalla a continuación:

1. Utilizar el comando *trimsec* para eliminar las columnas con píxeles muertos. Luego utilizar *imstat* para revisar las estadísticas de todas las imágenes para eliminar aquellas que tengan valores anómalos o aquellas que no se pueden abrir.
2. Combinar las imágenes *bias* utilizando el comando *zerocombine*. Debido a que ya se recortaron las imágenes, no es necesario activar la opción de *process*. La imagen combinada final se llama *masterzero*.
3. Asegurarse que *ccdproc* esté configurada para corregir *bias*. Luego, combinar las imágenes tipo *dark* y las imágenes tipo *flat* usando *darkcombine* y *flatcombine*, respectivamente, con la opción *process* encendida. Las imágenes producidas en este paso son *masterdark* y *combflat*, respectivamente.

4. Normalizamos la imagen *combflat*. Para esto, primero utilizamos *imstat* para conocer su punto medio y luego, utilizando *imarith*, dividimos toda la imagen *combflat* por este valor. La imagen final es *masterflat*.
5. Finalmente, utilizando *ccdproc*, corregimos por *darks* y *flats* todas las imágenes tipo *light*.

3.2 MPO CANOPUS

MPO Canopus es un programa desarrollado por Brian D. Warner que rápidamente se convirtió en el “estándar” para el estudio y reporte de asteroides. Esto es gracias a que posee diversas rutinas y catálogos pre-instalados para agilizar y simplificar no solamente el proceso de fotometría, sino también el ajuste y búsqueda de periodos.

El método implementado en el INAOE empleaba la versión 10 del software. Sin embargo, la licencia de esta versión ya no está disponible a la venta, ya que se lanzó la versión 12 del software de forma gratuita. Debido a esto, se decidió adaptar el método a la versión 12, con la finalidad de familiarizarse para trabajos futuros.

3.2.1 ALGORITMO FALC

Para la rutina de búsqueda de periodo y ajuste de datos, MPOCanopus emplea el programa *FALC* (*Fourier Analysis of Light Curves* desarrollada por Alan Harris (Harris et al., 1989). Este programa realiza un análisis de Fourier y busca ajustar los datos a una serie de Fourier de orden n .

Para su implementación en la rutina de Canopus, este programa fue modificado por Petr Pavec para incluir análisis de periodos aditivos y no aditivos, con la finalidad de poder buscar compañeros binarios al asteroide observado.(Warner, 2018).

3.2.2 MAGNITUDES DERIVADAS

Aunque Canopus v12 sigue proporcionando las herramientas para trabajar con las magnitudes absolutas de los objetos, la opción recomendada (y la que se utili-

za por defecto) es la del uso de “magnitudes derivadas”. Esto consiste en estimar la transformación de la banda fotométrica seleccionada mediante el uso de algún catálogo de magnitudes estelares.

Mediante el uso de la resolución de placa, Canopus identifica estrellas en el campo que pertenezcan al catálogo fotométrico seleccionado. Luego, compara la magnitud medida por el instrumento con la magnitud registrada en el catálogo y utiliza esta diferencia para estimar la magnitud del asteroide en la banda seleccionada. En caso de trabajar con observaciones realizadas sin filtro, Warner (2018) recomienda lo siguiente:

- Seleccionar la banda fotométrica del análisis con base en las características de la cámara. Específicamente, las magnitudes de las estrellas en la banda seleccionada tienen que ser lo más similares posible a las magnitudes medidas en la imagen sin filtro. Para el caso de asteroides, normalmente son los filtros V o R.
- A la hora del análisis, seleccionar únicamente estrellas de comparación con índices de color similares al Sol y que tengan magnitudes similares al asteroide. Canopus ya incluye herramientas para filtrar y seleccionar estas estrellas a la hora del análisis. Esto se profundiza más a detalle en la sección 3.3 “*Análisis en MPO Canopus*”.

3.2.3 CATÁLOGOS FOTOMÉTRICOS

Por defecto, MPO Canopus puede instalarse con los siguientes catálogos:

- MPOSC3: Catálogo basado en 2MASS cuyas magnitudes estelares han sido convertidas al sistema BVRcIc de forma numérica.
- CMC15: Catálogo astrométrico y fotométrico basado en las observaciones realizadas entre 1999 y 2013 por el telescopio Meridiano de Carlsberg, que estaba ubicado en el Observatorio del Roque de los Muchachos.

- MPOATLAS2: Combina datos fotométricos de Pan-STARRS DR1, ATLAS Pathfinder, ATLAS re-flattened APASS, SkyMapper DR1, APASS DR9, Tycho-2 y Yale Bright Star Catalog. Asimismo, emplea datos de Gaia DR2 para astrometría.
- UCAC4: Catálogo realizado por el Observatorio Naval de los EE.UU.

Bajo recomendación del desarrollador de MPO Canopus (Warner, 2018), se empleó el catálogo MPOATLAS2 para la fotometría de las imágenes. No obstante, se debe tener en cuenta que la mayor parte de los datos fotométricos de ese catálogo fueron tomados utilizando el sistema de filtros Sloan. En caso de que no exista la magnitud en el sistema Johnson, entonces se hace una conversión numérica empleando los datos existentes, lo que implica incrementar el error.

3.3 ANÁLISIS EN MPO CANOPUS

3.3.1 PREPARATIVOS PREVIOS AL ANÁLISIS

Antes de comenzar el análisis de las imágenes reducidas en MPO Canopus, es importante asegurarse de algunos detalles tanto de la imagen, así como de la configuración misma del programa. Para las imágenes, es necesario que:

- No exista una diferencia demasiado alta entre el valor máximo y el mínimo. Si las cuentas de los píxeles están entre 0 y 65000, entonces el programa no tendrá problemas en resolver la placa. Si se presentan píxeles con cuentas muy superiores o muy inferiores a este rango, probablemente se trate de un error de procesamiento de imagen o la cámara presenta daños.
- En el *header* de la imagen, el campo OBJECT contenga el nombre correctamente formateado del asteroide y que exista un campo donde se indique la fecha y hora de la imagen (sea inicio, punto medio o término). MPO Canopus emplea estos campos para consultar la base de datos *mpcorbs*, y emplear los elementos orbitales del asteroide para ubicarlo en la imagen. Formatos válidos para el campo OBJECT incluyen: “*Número de asteroide*”, o “*Nombre del*

asteroide”, o “*Numero del asteroide Nombre del Asteroide*”. En caso de ser necesario, se puede emplear la herramienta *FITS Header Editor*, ubicada en la sección *Utilities 2* para editar en grupo el campo del *header* de las imágenes que lo requieran.

- En el *header* de la imagen se encuentren las coordenadas de Ascensión Recta y Declinación de la zona observada. Esto es debido a que emplea esa información para resolver la placa y no va a poder ubicar el campo ni el asteroide si no está presente. En caso que el *header* no tenga esa información, se puede emplear la herramienta *FITS Header Editor* de la misma forma que en el caso anterior.

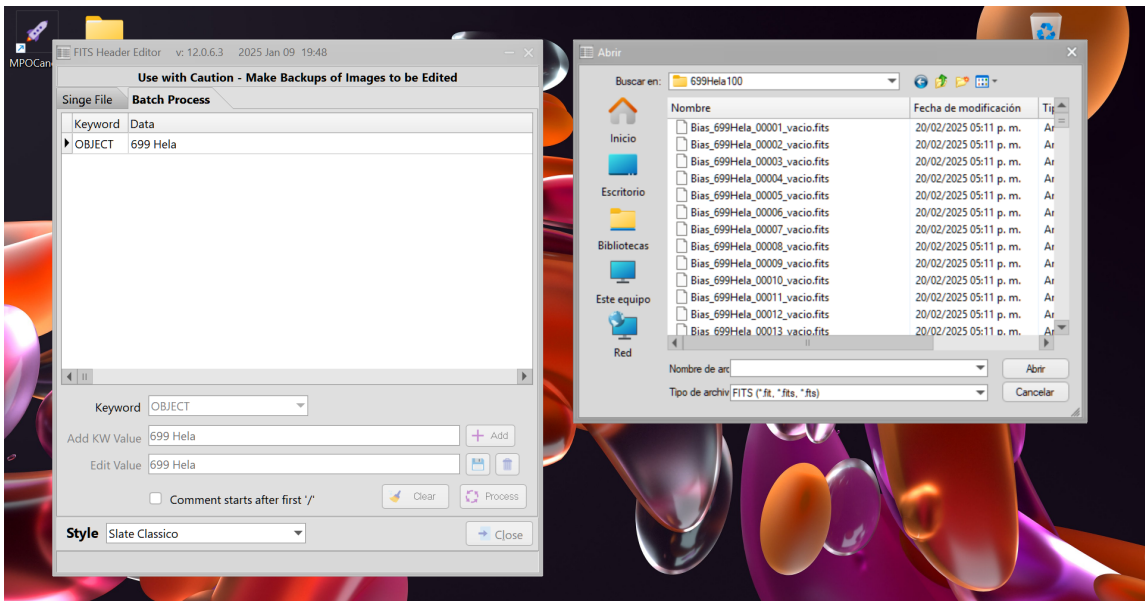


Figura 3.1: La herramienta *FITS Header Editor*. En este ejemplo, se va a editar el campo OBJECT a un grupo de imágenes, de tal forma de que estén en un formato admitido por Canopus.

Por otro lado, es importante que la configuración del software sea correcta, de lo contrario, los resultados del análisis no serán los correctos. Si se van a trabajar con diferentes equipos o sitios de observación, es conveniente crear perfiles de sesión, así como perfiles para el tubo óptico y para la cámara. Los campos que tienen que estar correctamente configurados son los siguientes:

- En la sección “Observer”, los campos de sitio de observación (*Longitude* y *Latitude*), la longitud focal del telescopio (*Focal Len*), el número de píxeles de la cámara y sus tamaños (*Cols (Xpix)*, *Rows (Y pix)* y *Size*). Asimismo, se tiene que indicar si la barra diagonal que indica el comienzo del comentario es el primero o el subsecuente (*Slash*)
- En la sección “Photometry” es conveniente revisar los filtros por defecto, así como el factor de conversión (eADU) de la cámara



Figura 3.2: Un ejemplo de la ventana de configuración. Los valores de los campos en este perfil están configurados para el telescopio de 50cm, en el observatorio de Picacho

3.3.2 HERRAMIENTA *Single Image Astrometry*

Antes de comenzar el análisis propio de las imágenes, es conveniente primero utilizar la herramienta *Single Image Astrometry* en algunas de las imágenes para comprobar que el software pueda hacer tanto la resolución de placa así como ubicar el asteroide en la imagen.

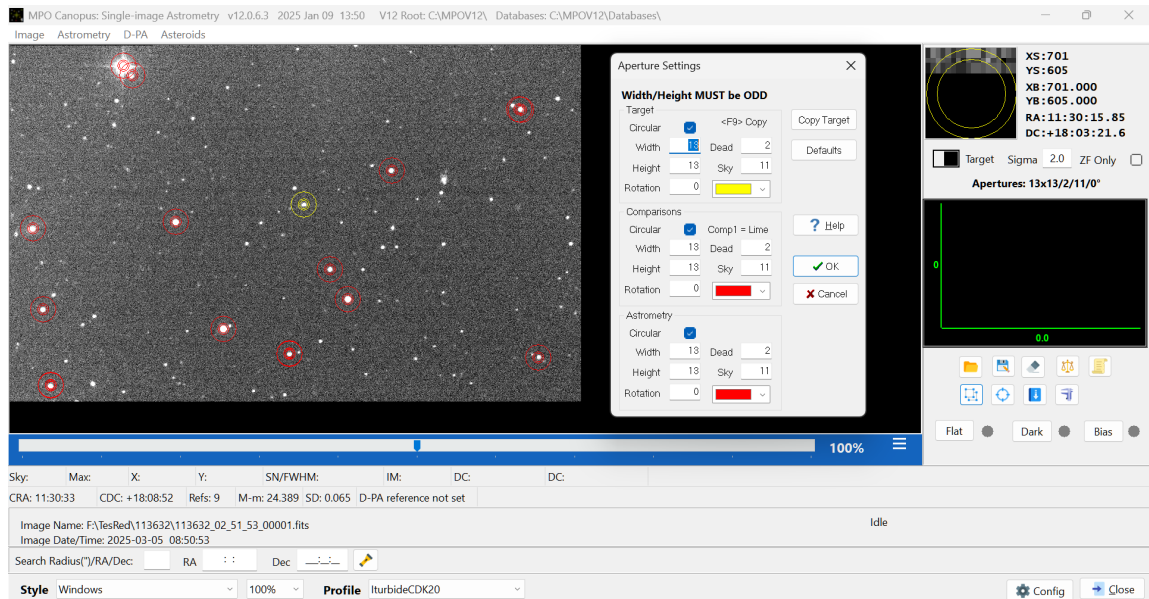


Figura 3.3: La ventana de la herramienta *Single Image Astrometry*. En este ejemplo, se resuelve exitosamente la imagen y se ubica al asteroide (113632) 2002 TA72. Asimismo, a la derecha de la imagen se muestra el editor de tamaño de aperturas.

Para ello, simplemente cargamos la imagen a analizar en “Image - Open...” y luego pulsamos las teclas CTRL+A para realizar el *Automatch*. Aquí podemos empezar a editar las aperturas de fotometría, de tal forma que se ajusten a las fuentes en la imagen. MPO Canopus permite diferentes tamaños de apertura para la astrometría, para el objeto y para las estrellas de comparación.

3.3.3 FOTOMETRÍA MEDIANTE LA RUTINA *Asteroid Photometry*

Una vez las imágenes estén reducidas y que estemos seguros de que todos los preparativos previos detallados en esta sección estén bien configurados, entonces podemos pasar a analizar los datos mediante la rutina *Asteroid Photometry*. Para empezar, primero tenemos que cargar la serie de imágenes para su revisión. Cuando se importa un gran número de imágenes, Canopus ofrece la opción de importar solamente cada cierto número. No obstante, es preferible analizar la secuencia y posteriormente, en el paso del análisis de curva de luz, aplicar un binning a los datos obtenidos (Warner, 2018)

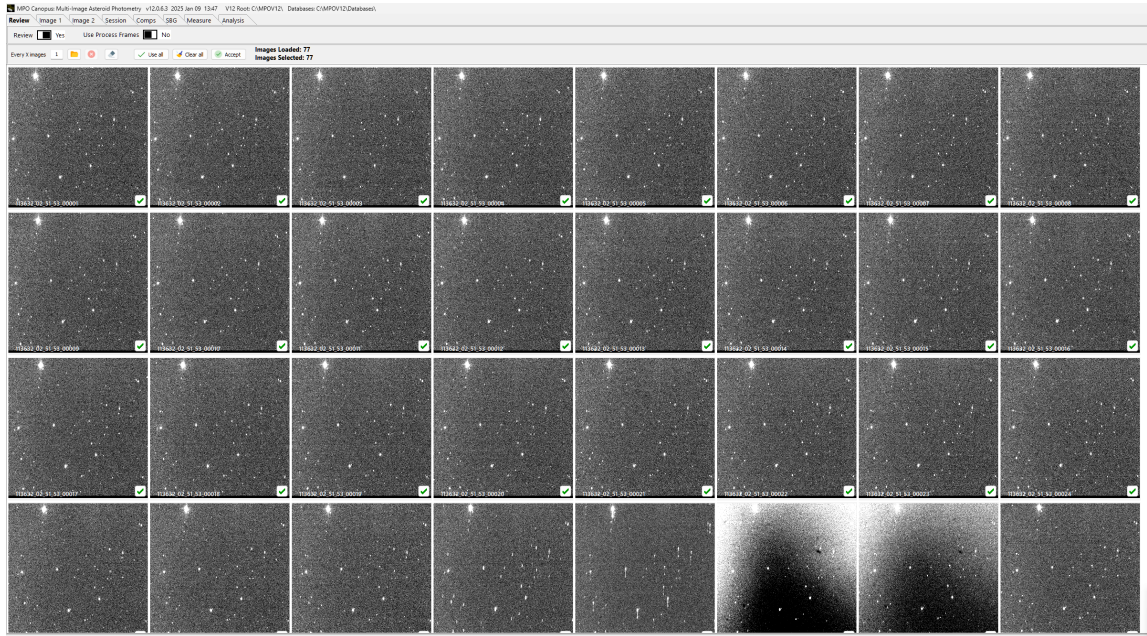


Figura 3.4: La ventana de *Review*. Aquí se previsualizan las imágenes a analizar y se pueden descartar las que no sean adecuadas.

Una vez cargadas las imágenes, procedemos a seleccionar las aquellas en la secuencia que posean “desperfectos”, como líneas de satélites o estrellas barridas, para que sean ignoradas durante el análisis. En ciertos casos, se pueden llegar a apreciar nubes en las imágenes, pero no es necesario eliminarlas de la secuencia al menos que la pérdida de cuentas de las estrellas sea considerable, una ventaja de utilizar fotometría diferencial. Sin embargo, imágenes con nubes causan ruido a la hora de realizar la fotometría, ya que alteran levemente la determinación de las medidas de las estrellas, alrededor de 0.01-0.001 mag (Warner, 2018).

Seleccionadas las imágenes a ignorar, hacemos click en “*Accept*” para pasar al siguiente paso, que es la selección del objeto de estudio. En este paso, Canopus intenta identificar mediante resolución de placa los asteroides presentes en la primera imagen y permite al usuario seleccionar cual es el que desea estudiar. Asimismo, hay que seleccionar el catálogo fotométrico a utilizar, el filtro utilizado para las observaciones, la banda a utilizar del catálogo y las bandas de los índices de color a utilizar. En nuestro caso, seleccionamos el catálogo *ATLAS2*, seleccionamos el filtro C (sin filtro), la banda fotométrica R (de Johnson-Cousins) y el índice de color VR.

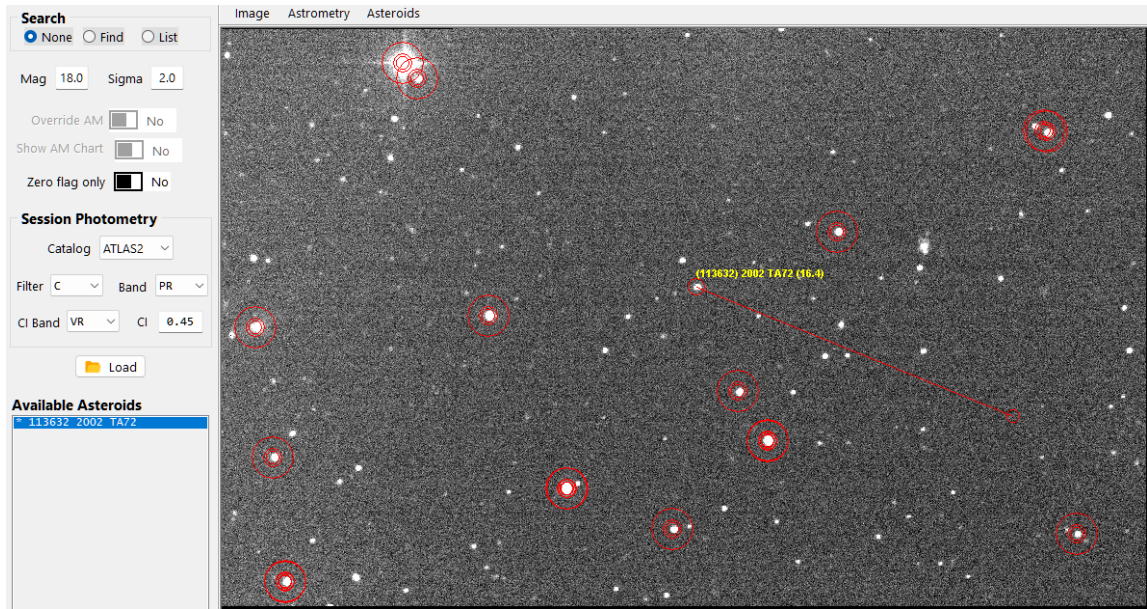


Figura 3.5: Aquí se selecciona el asteroide a estudiar (marcado en la imagen) así como los filtros con los que se van a trabajar.

Una vez que seleccionamos el asteroide y comprobamos los filtros, hacemos click en “Accept” y avanzamos a la siguiente parte, en donde el programa selecciona la última imagen de la secuencia para identificar el asteroide. En este paso el usuario tiene que especificar el modo de la sesión. Si no vamos a trabajar en el futuro con otros asteroides presentes en el campo, seleccionamos “New Target and Comps”. La opción “Add/Edit existing session” la utilizamos solamente si vamos a añadir datos de observación de la misma jornada. Si la intención es combinar distintas noches, entonces lo más recomendable es usar la opción “New Target and Comps” (Warner, 2018).

De nuevo, hacemos click en “Accept” y en el siguiente paso volvemos a hacer click en “Accept” para confirmar la sesión y pasar a la selección de estrellas de comparación. Antes de pulsar en “Select”, nos aseguramos que la configuración para las estrellas de comparación sea correcta. Hay que asegurarnos que en “Sat” se encuentre el límite de cuentas en el cuál la respuesta de nuestra cámara sea lineal. En caso de trabajar con un filtro fotométrico, hay que seleccionar la opción “Solar” para filtrar todas estrellas que tengan un índice de color muy diferente al del Sol.

Ahora, pulsamos “*Select*” para mostrar todas las estrellas de comparación presentes del catálogo seleccionado. Nos aseguramos que ninguna de ellas esté saturada y que no tengan otras estrellas muy cerca en la imagen. En caso de ser necesario, podemos eliminar estrellas de comparación, asegurándonos que siempre haya una estrella principal (que se selecciona con el botón de llave). En este paso es conveniente revisar las aperturas del objetivo y de las estrellas de comparación, las cuales pueden ser modificadas de forma interactiva en el menú “*Ap*”. Cuando estemos satisfechos con las estrellas de comparación, seleccionamos “*Accept*” para pasar a el paso de SBG.

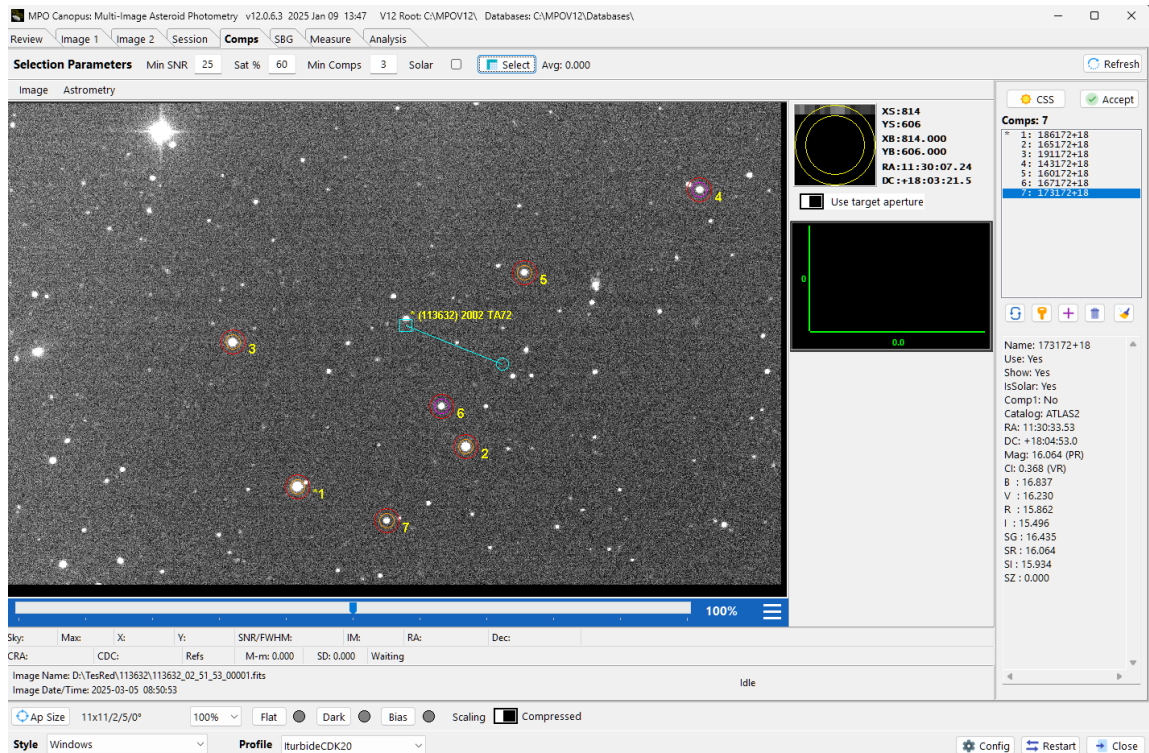


Figura 3.6: La ventana de selección de estrellas de comparación.

MPO Canopus incluye un pequeño programa llamado “*Star Be Gone*” (SBG) cuya intención es borrar las cuentas de estrellas que estén muy cerca del asteroide y que contaminen en las aperturas del objetivo. Si no es necesaria esta función, entonces nos aseguramos que la opción “*Use SBG*” diga no y podemos hacer click en “*Accept*”. De lo contrario, hacemos click en “*Select*” para que el programa seleccione todas las estrellas cerca de la trayectoria del asteroide. Para no alentar la mucho la

medición de imágenes en el paso final, borramos todas las estrellas que no supongan un riesgo.

Finalmente, pasamos a la parte de la medición de imágenes. Hacemos click en “*Load*” para cargar las imágenes y, si deseamos que MPO Canopus se encargue automáticamente de la medición, nos aseguramos que las opciones “*Auto*” y “*C1 Reset*” estén encendidas. Hacemos click en “*Measure*” para que el programa comience a medir las imágenes. Aunque el programa se encargara de saltarse imágenes que no pueda medir de forma automática, debemos monitorearlo en caso de que necesitemos hacer algún input manual que nos pida. Una vez completada la medición podemos avanzar a la búsqueda de periodos.

3.3.4 AJUSTE DE CURVA DE LUZ Y BÚSQUEDA DE PERIODO

Una vez completada la medición de las imágenes, podemos pasar al análisis. Alternativamente, si ya tenemos datos fotométricos a analizar, podemos acceder a la herramienta de búsqueda de periodo directamente desde el menú inicial de MPO Canopus, ubicado en “*Analysis*”² *Asteroid Period/TOM*”.

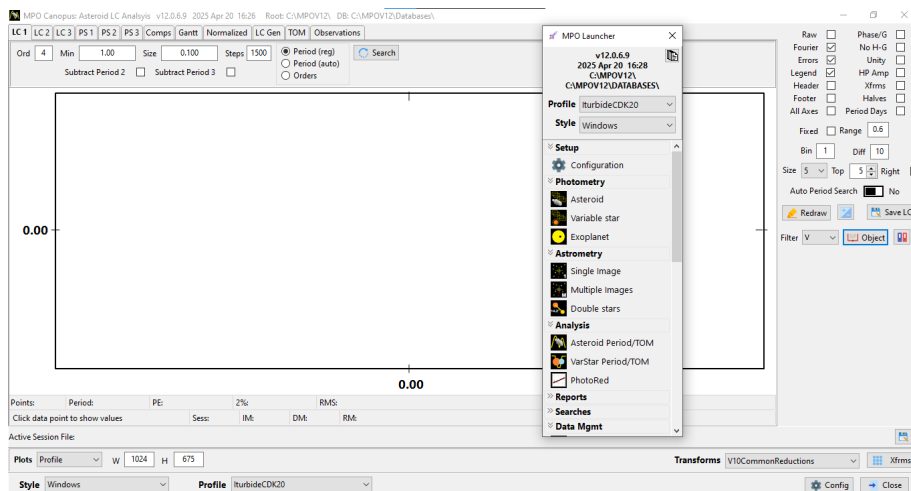


Figura 3.7: La ventana principal de la rutina de búsqueda de periodo.

Para empezar, primero cargamos los datos de las sesiones a analizar, pulsando en “*Object*” para abrir el menú de selección. Antes de seleccionar las sesiones, es importante filtrarlas de tal forma que trabajemos únicamente con observaciones rea-

lizadas con el mismo filtro fotométrico, de lo contrario Canopus no hará el análisis correctamente. Podemos seleccionar el filtro a trabajar en la sección de “*Select by Filter*”. Es importante también saber que Canopus va a seleccionar todas las sesiones del mismo objeto en el filtro. Podremos seleccionar las sesiones a analizar en el siguiente paso. Por lo pronto, seleccionamos el objeto y pulsamos “*Ok*”

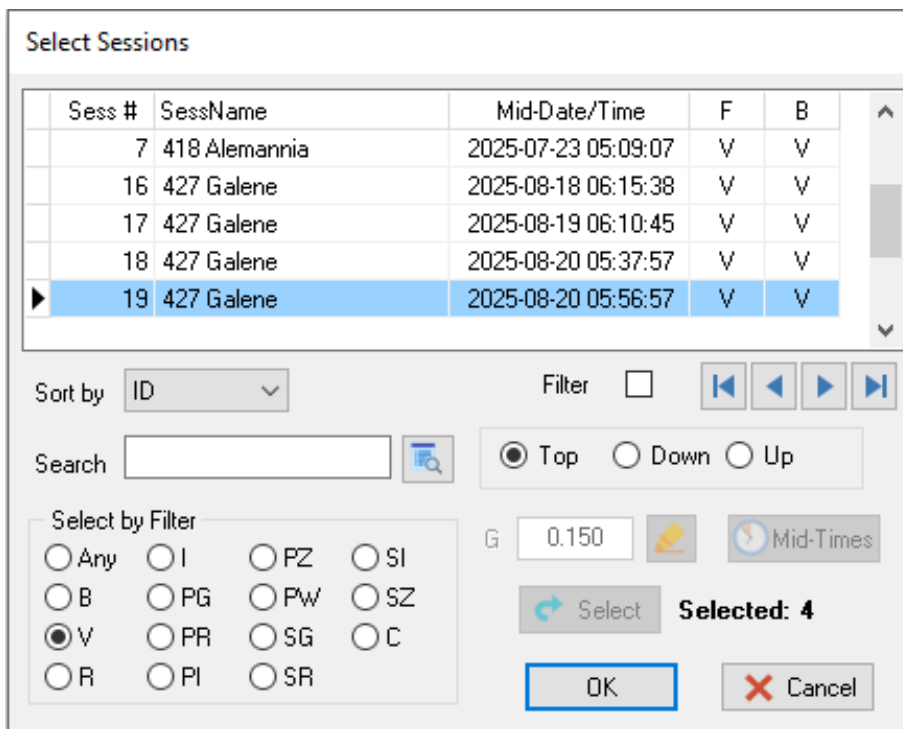


Figura 3.8: La ventana de selección de sesiones a cargar.

Las secciones seleccionadas luego aparecerán en el editor para que el usuario decida cuales son las que desea combinar para el análisis de periodo. Luego de seleccionarlal, se debe de ir a la pestaña de “*Comps*” para revisar los datos. En esta sección, el usuario puede revisar y comparar las mediciones hechas para cada estrella de comparación de forma individual, con el propósito de eliminarlas del análisis y, en caso de ser necesario, ignorar una estrella de comparación completamente.

Seleccionamos la sesión a revisar en “*Session*”. Luego, para eliminar puntos de datos “malos”, se recomienda seleccionar la opción de “*Avg*” y poner el escalado en “*2 Mag*”. Esto mostrará puntos de información que sean muy distintos de los demás. Para eliminar un punto, hacemos CTRL + Click Izquierdo en el punto a borrar.

Cabe mencionar que en realidad estos puntos no se borran de la sesión, solamente se ignoran. Si el usuario borra un punto y posteriormente lo quiere restaurar, esto se puede hacer en la pestaña “*Observations*”.

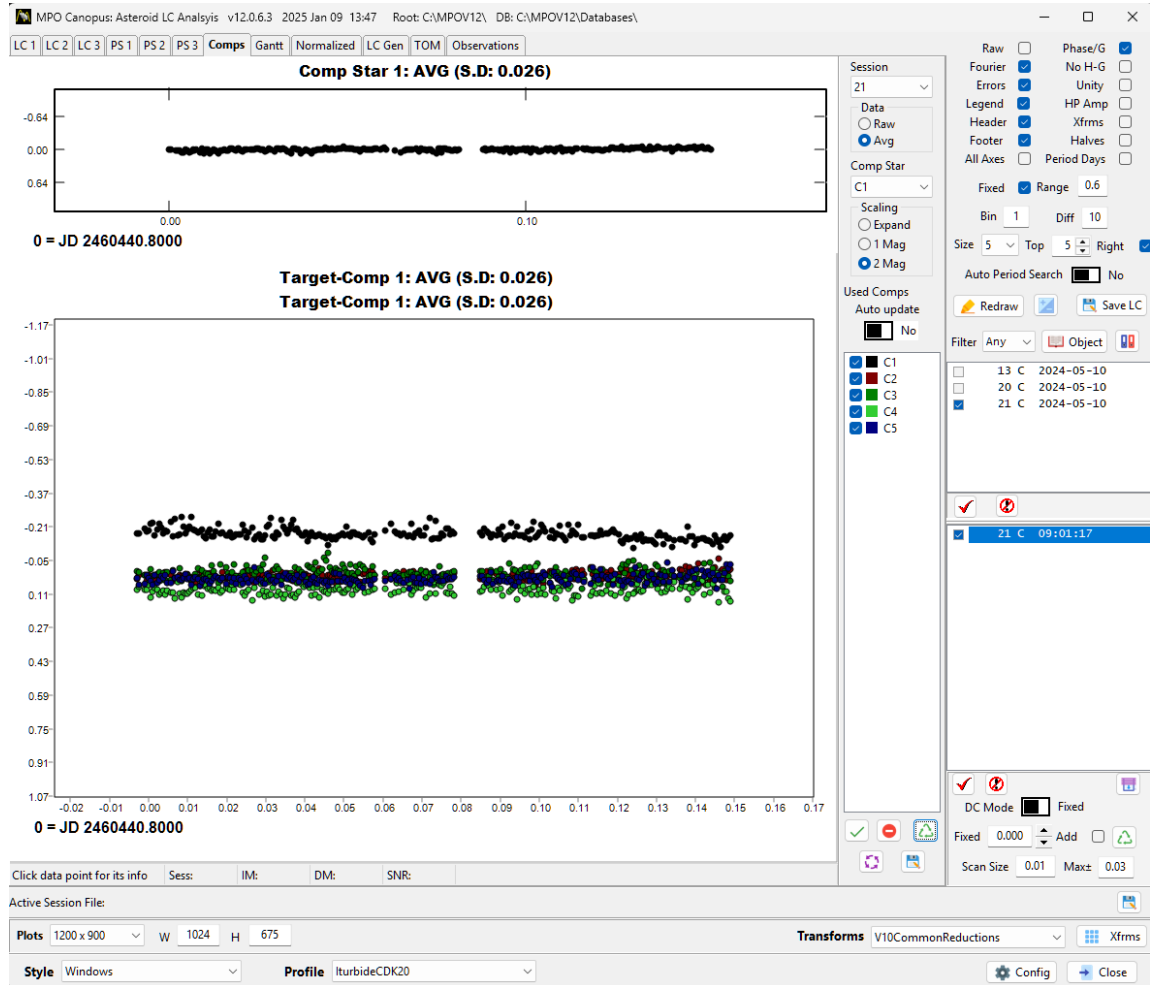


Figura 3.9: Visualización de las estrellas de comparación. Se eliminan los puntos que sean muy diferentes al resto.

Una vez terminemos de revisar los datos, regresamos a la pestaña “*LC1*” para comenzar a ajustar los datos a una curva de luz. Para ello, debemos modificar los siguientes valores:

- *Ord*: Determina el orden de la serie de Fourier a ajustar. Es importante recalcar que a medida que aumentamos el orden, la amplitud máxima posible del ajuste disminuye, al grado que ordenes superiores a 6 no tienden a tener amplitudes estadísticamente significantes (Harris et al., 2014). Por lo tanto, se recomienda

comenzar desde órdenes más pequeños (por encima de 2), al menos que la amplitud de los datos obtenidos sea baja.

- *Min*: El valor mínimo del periodo a buscar. En cierta forma podemos verlo como el punto inicial de la búsqueda.
- *Size*: El tamaño del paso de búsqueda.
- *Steps*: El número de pasos de búsqueda
- *Substract Period 2* y *Substract Period 3*: Estas opciones se emplean cuando se buscan posibles “compañeros”, es decir, asteroides que orbiten al cuerpo de estudio.

Cuando se empieza la búsqueda, es recomendado usar pasos grandes (entre 1.0 y 0.1), con la opción “Period (auto)” seleccionada. Una vez que nos acerquemos al periodo buscado, podemos usar pasos más pequeños con la opción “Period (reg)”. Si estamos trabajando con múltiples sesiones simultáneamente, es muy probable que los sets de datos se encuentren “desfasados” debido a las diferentes condiciones de cada noche. Para ajustar los datos, es necesario modificar el valor del punto cero, ubicado en la esquina inferior derecha de la interfaz. Después de cada modificación, es necesario repetir la búsqueda del periodo en la misma configuración previa, para que se actualice la interfaz.

3.4 OBJETOS SELECCIONADOS

A continuación, se presenta un resumen de las características de los objetos seleccionados. En las primeras dos columnas de la tabla 3.1 se presenta el número y nombre de designación MPC del asteroide. La columna Mag presenta un estimado de la magnitud aparente en el filtro V en la fecha de observación (extraído del *MPC Ephemeris Service*). En la última columna se incluye el periodo de rotación estimado en la base de datos ALCDEF. Este valor está basado en todos los reportes que se subieron a la plataforma.

Tabla 3.1: Resumen de características de los objetos seleccionados.

Designación MPC		Fecha de Observación	Mag	Periodo
#	Nombre	(UTC)	(En fecha)	Reportado (h)
699	Hela	10/05/2024	14.27	3.3962
1396	Outeniqua	03/10/2024	14.7	3.08158
3255	Tholen	9/10/2024	14.8	2.9463
113632	2002 TA72	04/03/2025	16.4	-

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS Y RESULTADOS

4.1 (699) HELA

Este asteroide fue descubierto por Joseph Helffrich el 5 de junio de 1910 en Heidelberg. Originalmente se clasificaría como un asteroide tipo S en el sistema de Tholen (Tholen, 1984), pero sería reclasificado a clase Sq en el sistema SMASS (Bus y Binzel, 2002). Es un asteroide que cruza la órbita de Marte, con un perihelio de 1.54 UA.

Fue observado el 10 de mayo del 2024, con una ganancia de 100 y un offset de 0. El tiempo de exposición utilizado fue de 45 s.

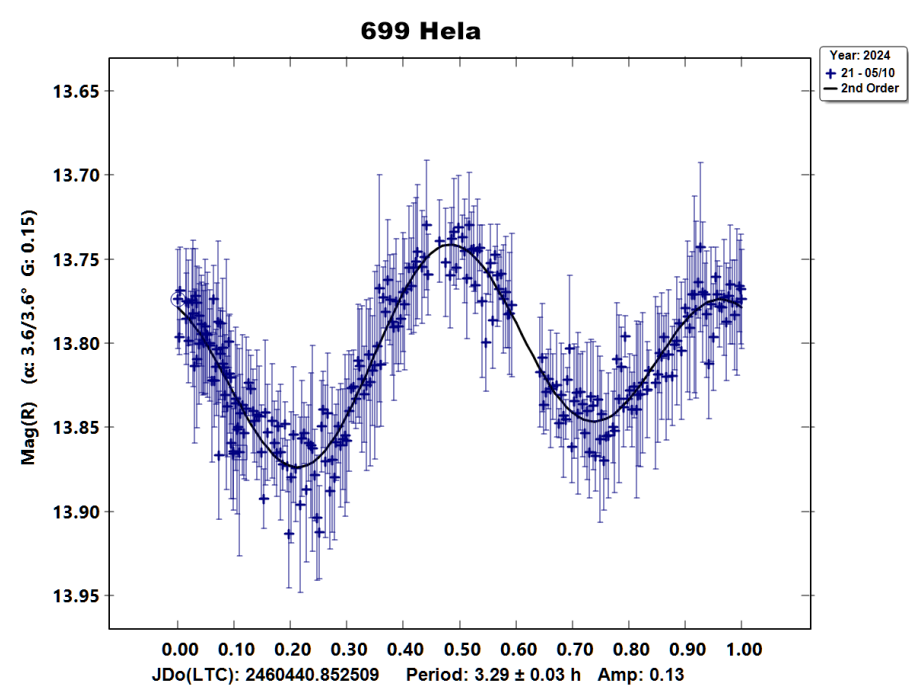


Figura 4.1: Curva de luz obtenida para el asteroide 699 Hela

4.2 (1396) OUTENIQUA

El asteroide 1396 Outeniqua fue descubierto en el Observatorio Union, en Johannesburgo, Sudáfrica el 9 de agosto de 1936. Recibe el nombre de una cadena montañosa en Provincia del Cabo del mismo país. Este asteroide forma parte del Cinturón Principal. Mediante NEOWISE, se ha estimado el albedo y tamaño del asteroide, siendo este último alrededor de los 11 km de diámetro (Mainzer et al., 2019).

Este asteroide se seleccionó debido a su magnitud aparente y el hecho de que su periodo reportado por diferentes trabajos coinciden en al menos 3 cifras significativas, dándonos un buen marco de referencia para probar la metodología. Fue observado la noche del 2 de octubre de 2024. Las imágenes se tomaron sin filtro, con ganancia 0, offset de 10 y una exposición de 60s.

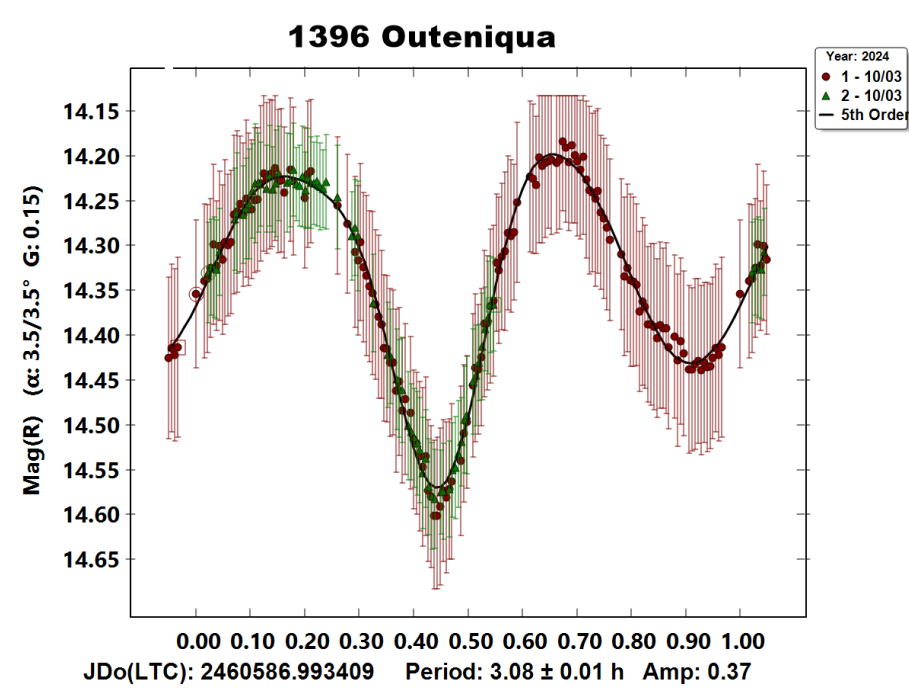


Figura 4.2: Curva de luz obtenida para el asteroide 1396 Outeniqua

4.3 (3255) THOLEN

Fue descubierto el 2 de septiembre de 1980 en el observatorio de la Estación Anderson Mesa en Flagstaff, Arizona. Recibe el nombre del astrónomo estadounidense David Tholen. Este asteroide cruza la órbita de Marte, teniendo un afelio de 1.5 UA. Como parte del sondeo SMASS, se estudio este asteroide en la segunda fase del programa, para formar el sistema de taxonomía Bus-Binzel, siendo clasificado como de tipo espectral S (Bus y Binzel, 2002).

Se seleccionó este asteroide por la magnitud aparente en la fecha y por la gran elevación durante la noche. Fue observado las noches del 9 y 10 de octubre del 2024, con un tiempo de exposición de 80s, ganancia 0 y offset de 10.

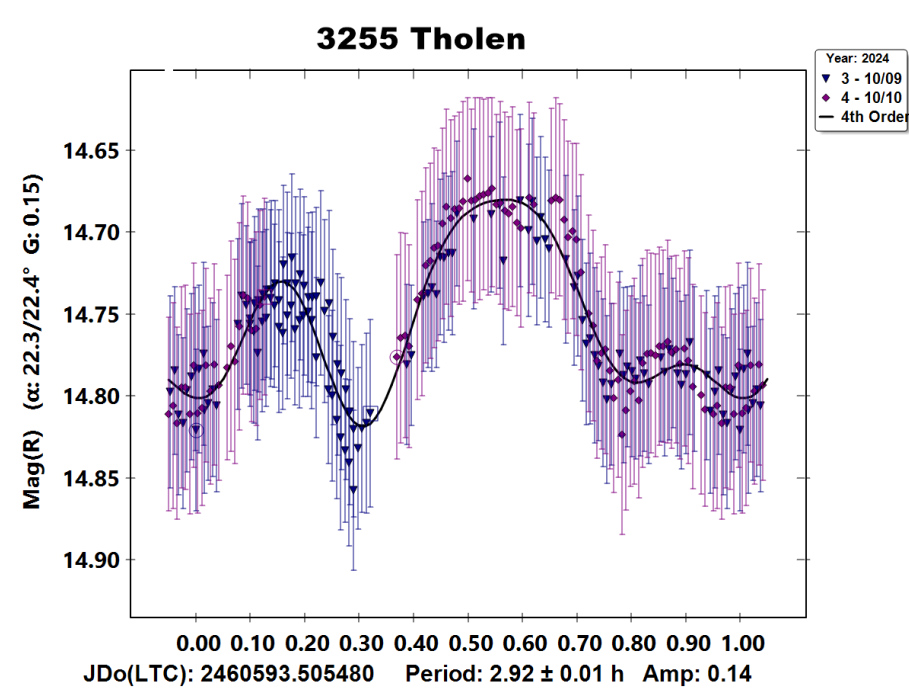


Figura 4.3: Curva de luz obtenida para el asteroide 3255 Tholen

4.4 (113632) 2002 TA72

El asteroide (113632) fue descubierto en el Observatorio Monte Palomar el 3 de octubre de 2002, por parte del programa NEAT (*Near Earth Asteroid Tracking*) y perteneciente al Cinturón Principal. El asteroide luego fue observado con el te-

telescopio Pan-STARRS1, durante su misión de sondeo de tres años, empezando en 2010 (Vereš et al., 2015), en donde se determinó una magnitud absoluta H de 15.24. Posteriormente, fue observado por NEOWISE en su segundo (Nugent et al., 2016), cuarto y quinto año de operación (Masiero et al., 2020). Con estas observaciones se determinaron el albedo y diámetro del asteroide, este último siendo estimado en 3.31 km (Mainzer et al., 2016).

El asteroide fue observado desde el OAU la noche del 4 de marzo del 2025. Las imágenes se tomaron con un tiempo de exposición de 120s, con una ganancia de 0 y un offset de 3.

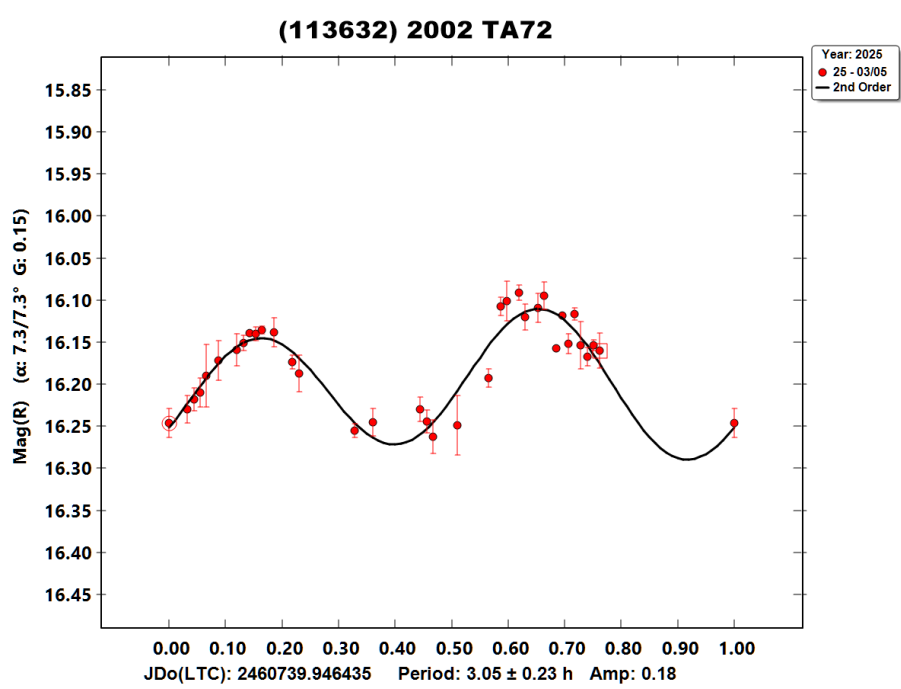


Figura 4.4: Curva de luz obtenida para el asteroide 113632 2002 TA72

CAPÍTULO 5

DISCUSIÓN

5.1 RESUMEN DE RESULTADOS OBTENIDOS

En la Tabla 5.1 se presenta un resumen de los resultados obtenidos. En esta tabla se comparan el periodo de rotación reportado en la base de datos ALCDEF con el periodo de rotación obtenido del análisis de nuestras observaciones. Se incluye también el error y amplitud del ajuste. La columna Mag reporta la magnitud aparente en el filtro V del asteroide, el día de la observación. Este estimado se extrae del *MPC Ephemeris Service*.

Tabla 5.1: Resumen de resultados obtenidos.

Designación MPC		Mag	Periodo	Periodo	Error	Amplitud
#	Nombre	(En fecha)	Reportado (h)	Obtenido (h)		
699	Hela	14.27	3.3962	3.29	0.03	0.13
1396	Outeniqua	14.7	3.08158	3.08	0.01	0.37
3255	Tholen	14.8	2.9463	2.92	0.01	0.14
113632	2002 TA72	16.4	-	3.05	0.23	0.18

5.2 COMPARACIÓN CON RESULTADOS PREVIOS

En esta Sección se comparan los resultados obtenidos de las curvas de luz con resultados previamente reportados en la base de datos ALCDEF.

5.2.1 (699) HELA

Mediante la utilización del “Transiting Exoplanet Survey Satellite” (TESS), Pál et al. (2020) reportaron que el asteroide tenía un periodo de 3.39619 horas, con

un error de 0.00005h. Asimismo, Warner (2017) reporta un ajuste de 3.3960 horas, con observaciones en el filtro V realizadas en julio de 2017.

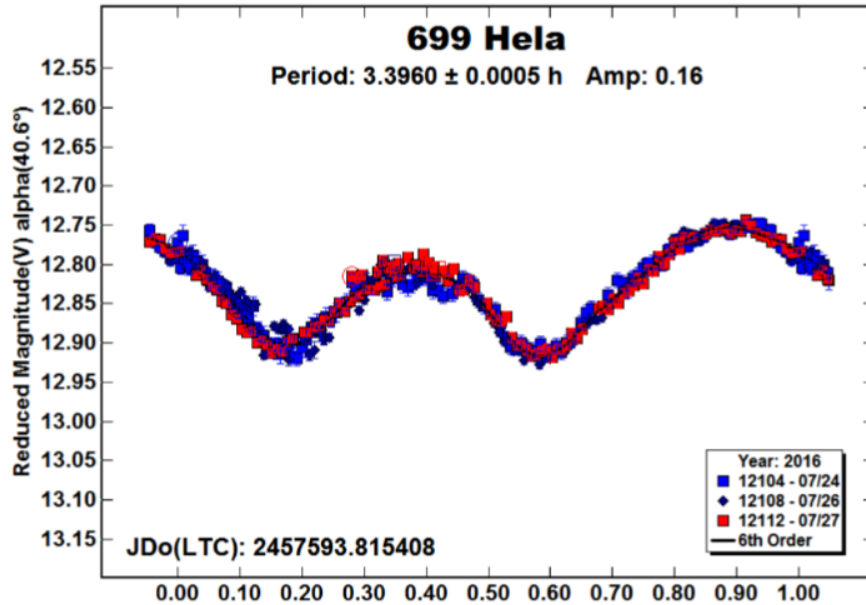


Figura 5.1: Curva de luz obtenida por Brian D. Warner del asteroide Hela (Warner, 2017). Pese al filtro utilizado, podemos ver que la forma de la curva es muy parecida a la forma de la curva obtenida con nuestras observaciones.

En nuestro caso, las observaciones obtenidas nos permitieron ajustar una curva con un periodo de 3.29 horas. Tomando en cuenta el error de 0.03, el periodo obtenido no coincide con los reportes publicados del asteroide. Sin embargo, la curva presenta la estructura de dos picos y dos valles; y su observación abarcó más de un periodo completo de rotación, por lo que tenemos completa certeza de la veracidad de la curva de luz. Es posible que con observaciones adicionales se logre un ajuste más cercano a lo reportado previamente, pero este resultado fue el mejor ajuste obtenido con nuestros datos.

5.2.2 (1396) OUTENIQUA

Nuestro análisis arrojó un periodo de 3.08 horas. Tenemos certeza de este resultado ya que su periodo de observación abarcó más de un periodo de rotación.

Asimismo, otras observaciones encontraron periodos de 3.081 horas (Warner et al., 2006) y 3.082 horas (Klinglesmith et al., 2013).

5.2.3 (3255) THOLEN

La búsqueda de periodo del asteroide encontró un mejor ajuste a 2.92h, teniendo información de observaciones de dos noches consecutivas. La curva es asimétrica, solamente presentando un único pico y valle significativo. No obstante, al comparar nuestros resultados con observaciones previamente reportadas, encontramos periodos similares. En este caso, son de 2.94 (Skiff et al., 2019) y 3.255h (Ferrero, 2014), también presentando una forma asimétrica similar.

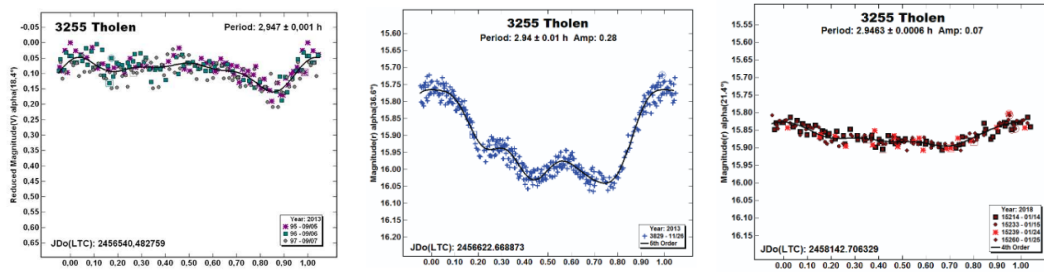


Figura 5.2: Curvas de luz del asteroide (3255) Tholen. La primera de izquierda a derecha siendo con el filtro V (Ferrero, 2014) y las últimas dos en el filtro r de Sloann (Skiff et al., 2019).

Tomando en cuenta nuestras observaciones divididas en dos días, así como los datos adicionales previamente reportados, podemos descartar que este asteroide se trate de un “*tumbler*”. De lo contrario, si el asteroide muestra una geometría variable entonces los datos de ambos días no coincidirían y el resultado de la búsqueda de periodo presentaría diferencias considerables dependiendo de qué sesiones se tomen en cuenta.

5.3 CASO DE (113632) 2002 TA72

MPO Canopus encontró un mejor ajuste para un periodo de 3.05 horas y se logra apreciar una curva de dos picos y dos valles. Sin embargo, debido a las condiciones de la noche, se tuvieron que ignorar imágenes que salieron mal, por lo que

los datos observacionales no abarcan la totalidad de la curva. Asimismo, asumiendo un periodo correcto, solo se tienen suficientes datos para una sola rotación, por lo que no podemos descartar la posibilidad de que este asteroide sea un “*tumbler*”, es decir, que tenga más de un eje de rotación.

Otro punto a considerar es la simetría del ajuste. A simple vista, esto nos podría decir que este asteroide tiene una elongación muy baja; pero esto a su vez dificulta la determinación de un periodo “correcto” al carecer la curva de una asimetría significativa. Para su tamaño y su tipo espectral reportado (clase S), un periodo de 3 horas no es fuera de lo común. Sin embargo no podemos descartar la posibilidad de un ajuste para un periodo más largo.

La mejor forma de eliminar estas incertidumbres es volver a observar al asteroide en su próxima oposición (Julio de 2029, según la base de datos CALL), en distintos ángulos de fase (Harris et al., 2014). Esto no solamente nos darán más puntos de datos para utilizar, sino además nos permitirá buscar algún punto donde exista una mejor asimetría en la curva para poder determinar su periodo con mejor exactitud.

5.4 LIMITACIONES

Durante las observaciones realizadas para este trabajo, no nos acercamos al brillo límite del sitio, siendo la magnitud más tenue observada de 16. No obstante, durante las observaciones del proyecto existieron dos factores limitantes muy importantes que dificultaron la posibilidad de tomar imágenes con tiempos de exposición superiores a 30 segundos. El primero de estos fueron errores mecánicos de la montura que provocaban “saltos” en las imágenes a la hora de exponer la imagen. Asimismo, estos provocaban que, lentamente, el campo de visión se fuera moviendo, al grado que en ciertos casos, el asteroide podría quedar fuera de la imagen en menos de una hora de seguimiento.

Es por esto que se recurrió al uso de un guiador, el cuál fue montado en un tubo óptico externo. Gracias a este, no solamente se lograron imágenes con exposi-

ciones más largas, sino que además se redujo la deriva significativamente, resolviendo ambos problemas. No obstante, sigue persistiendo el problema de una deriva mínima (perceptible en una secuencia de más de dos horas).

Revisando foros y el manual del software de guiado, podemos descartar la alineación polar y el balanceo del telescopio como posibles causas, ya que ambos se revisaron en el primer día de la jornada. Por lo tanto, la causa más probable es la presencia de flexión diferencial entre el tubo de guiado y el tubo óptico principal. Esto quiere decir que existe cierto “juego” en el tubo de guiado, ocasionando que se asiente en distintas posiciones, dependiendo de la dirección a donde esté apuntando el telescopio. Para solucionar de raíz este problema, es necesario modificar la montura del tubo de guiado, de tal forma que esté bien sostenido y que no se mueva ni resbale. Aunque un guiador fuera de eje es la solución más recomendada, el reductor focal no permite que se le añada un guiador de este tipo.

El segundo problema y, en opinión del autor, el más grave, es la exposición del telescopio a los elementos a la hora de observación. Aunque se siguen medidas de seguridad durante la sesión de observación para proteger al equipo de la humedad, el detalle principal es el viento. Incluso ráfagas de poca velocidad son suficientes para mover la imagen del telescopio, arruinando la exposición. Para solucionar este problema, va a ser necesario proteger el telescopio con una cúpula, pero esto implica una inversión económica, sino también técnica, ya que debe de quedar automatizado para que el telescopio pueda seguir siendo operado de forma remota.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIÓN

Para lograr el objetivo del trabajo, se realizaron adecuaciones tanto al telescopio de 50cm que alberga el OAU, como su montura. Éstas incluyen alineación polar, balanceo y la automatización de las posiciones del enfocador para cada filtro. Lo más importante fue la instalación y calibración de la cámara de guiado. Esto ayudó a corregir errores mecánicos de la montura durante el seguimiento continuo de los objetos de interés así como a compensar la alineación polar. De esta forma mejoramos considerablemente el seguimiento del campo y logramos los tiempos de exposición necesarios para obtener imágenes buenas de los asteroides de estudio para su análisis, aplicando la técnica de fotometría diferencial.

Asimismo logramos definir un proceso adecuado de reducción de las imágenes astronómicas, para su posterior análisis en el software MPO Canopus. Configuramos este programa correctamente y adaptamos los *headers* de las imágenes para su análisis, en caso de que estos se encontraran incompletos. Con esto logramos utilizar exitosamente el programa para obtener las curvas de luz y calcular los periodos de rotación de los cuatro asteroides observados.

Para los primeros tres asteroides: (699) Hela, (1396) Outeniqua y (3255) Tholen, sus periodos de rotación ya han sido previamente estudiados y publicados por otros autores. Los resultados que obtuvimos con nuestro análisis concuerdan con los ya reportados, por lo que la metodología propuesta y empleada en este proyecto de investigación es adecuada para estudiar el periodo de rotación de asteroides.

De los cuatro asteroides, el último que reportamos, (113632) 2002 TA72, no tiene un periodo de rotación previamente publicado, por lo que los resultados de este

trabajo presentan una propuesta para su periodo de rotación, respaldada por nuestras observaciones. Aunque el análisis de este asteroide está limitado por el tiempo de observación, la forma de la curva de luz y su periodo de rotación obtenido es congruente a las características reportadas. Para mejorar la certeza de los resultados, es necesario que se realice otra jornada de observación en su siguiente aparición, la cual ocurrirá en el año 2029.

APÉNDICE A

ANÁLISIS DE SENSOR

A continuación se presentan los resultados del análisis del sensor CMOS de la cámara montada al telescopio CDK. Este análisis se realizó utilizando una herramienta "Sensor Analysis" de SharpCap, con la intención de conocer las características del sensor actualizadas.

Ganancia	e/ADU	Ruido de Lectura (e)	Full Well (e)	Rango Dinámico (Stops)
0	8.223348692	6.030005853	33682.83624	12
50	4.715050037	5.013833451	19312.84495	11.91135901
100	2.684565268	4.46034277	10995.97934	11.2675339
150	1.530040908	4.138823299	6267.047561	10.56434957
200	0.858202395	3.887557935	3515.197008	9.820525656
250	0.481487235	3.724713422	1972.171713	9.048440025
300	0.266118913	3.693623248	1090.023066	8.20510623
350	0.159231729	3.931287067	652.2131619	7.37419803
400	0.082484228	3.624496912	337.8553991	6.54248134
450	0.05358127	4.16890178	219.4688818	5.718205203
480	0.033189484	3.630676712	135.9441258	5.226631529

Tabla A.1: Resultados de análisis de ganancia

Exposición (ms)	Señal (% de máx.)
12.667578767144715	2.1733418727914495
25.33515753428943	3.1903487940629325
63.33789383572358	6.077398732304573
126.67578767144715	11.108291894197464
253.3515753428943	20.899155239264168
380.02736301434146	30.696698029836018
506.7031506857886	40.465912222862244
633.3789383572357	50.10355909665426
760.0547260286829	59.59314703941345
886.7305137001301	68.81264050801596
1013.4063013715772	78.0466616153717
1076.7441952073007	82.67044822374979
1140.0820890430243	87.02519138654074
1165.4172465773138	88.63882422447205

Tabla A.2: Resultados de análisis de linealidad

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilera Ramírez, A. (2021). *Estudio de curvas de fase para correlacionar familias de asteroides antiguos* [Tesis de maestría, UANL].
- Alferes Martínez, V. P. (2022). *Estudios preparatorios para el seguimiento y caracterización de asteroides, desde el OAU* [Tesis de maestría, UANL].
- Burbine, T. H., & Binzel, R. P. (2002). Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey in the Near-Infrared. *Icarus*, *159*(2), 468-499. <https://doi.org/https://doi.org/10.1006/icar.2002.6902>
- Bus, S. J., & Binzel, R. P. (2002). Phase II of the Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey. A Feature-Based Taxonomy., *158*(1), 146-177. <https://doi.org/10.1006/icar.2002.6856>
- Cerdan Hernández, G. (2019). *Morphological Properties Determination of Main Belt Asteroids* [Tesis de maestría, INAOE].
- Ferrero, A. (2014). Period Determination of Four Main-belt Asteroids in Mid-2013. *Minor Planet Bulletin*, *41*(1), 24-25.
- Gaffey, M. J., Burbine, T. H., & Binzel, R. P. (1993). Asteroid spectroscopy: Progress and perspectives. *Meteoritics*, *28*(2), 161-187.
- Harris, A. W., Pravec, P., Galád, A., Skiff, B. A., Warner, B. D., Világi, J., Gajdoš, Š., Carbognani, A., Hornoch, K., Kušnirák, P., Cooney, W. R., Gross, J., Terrell, D., Higgins, D., Bowell, E., & Koehn, B. W. (2014). On the maximum amplitude of harmonics of an asteroid lightcurve., *235*, 55-59. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2014.03.004>

- Harris, A., Young, J., Bowell, E., Martin, L., Millis, R., Poutanen, M., Scaltriti, F., Zappalà, V., Schober, H., Debehogne, H., & Zeigler, K. (1989). Photoelectric Observations of Asteroids 3, 24, 60, 261, and 863. *Icarus*, (77), 171-186.
- Karttunen, H., Kröger, P., Oja, H., Poutanen, M., & Donner, K. (2007). *Fundamental Astronomy*. Springer.
- Klinglesmith, D. A., III, Hanowell, J., Risley, E., Turk, J., Vargas, A., & Warren, C. A. (2013). Inversion Model Candidates. *Minor Planet Bulletin*, 40(4), 190-193.
- Li, J.-Y., Helfenstein, P., Buratti, B., Takir, D., & Clark, B. E. (2015). Asteroid Photometry. En *Asteroids IV*. University of Arizona Press. https://doi.org/10.2458/azu_uapress_9780816532131-ch007
- Mainzer, A. K., Bauer, J. M., Cutri, R. M., Grav, T., Kramer, E. A., Masiero, J. R., Sonnett, S., & Wright, E. L. (2019). *NEOWISE Diameters and Albedos V2.0*. <https://doi.org/10.26033/18S3-2Z54>
- Mainzer, Bauer, J., Cutri, R., Grav, T., Kramer, E. A., Masiero, J. R., Nugent, C. R., Sonnett, S. M., Stevenson, R., & Wright, E. L. (2016). *NEOWISE Diameters and Albedos V1.0*.
- Masiero, J. R., Mainzer, A. K., Bauer, J. M., Cutri, R. M., Grav, T., Kramer, E., Pittichová, J., Sonnett, S., & Wright, E. L. (2020). Asteroid Diameters and Albedos from NEOWISE Reactivation Mission Years 4 and 5., 1(1), Artículo 5, 5. <https://doi.org/10.3847/PSJ/ab7820>
- Michimani Garcia, J. (2019). *3D Modelling of Near-Earth Asteroids using Lightcurve Database* [Tesis de maestría, INAOE].
- Naves, R., & Campàs, M. (2020). *Cometas y asteroides*. Alfaomega.
- Nugent, C. R., Mainzer, A., Bauer, J., Cutri, R. M., Kramer, E. A., Grav, T., Masiero, J., Sonnett, S., & Wright, E. L. (2016). NEOWISE Reactivation Mission Year Two: Asteroid Diameters and Albedos., 152(3), Artículo 63, 63. <https://doi.org/10.3847/0004-6256/152/3/63>
- Pál, A., Szakáts, R., Kiss, C., Bódi, A., Bognár, Z., Kalup, C., Kiss, L. L., Marton, G., Molnár, L., Plachy, E., Sárneczky, K., Szabó, G. M., & Szabó, R. (2020).

- Solar System Objects Observed with TESS—First Data Release: Bright Main-belt and Trojan Asteroids from the Southern Survey., *247*(1), Artículo 26, 26. <https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab64f0>
- Romanishin, W. (2022). *An Introduction to Astronomical Photometry using CCDs*. Consultado 2023, desde <https://www1.phys.vt.edu/~jhs/phys3154/CCDPhotometryBook.pdf>
- Skiff, B. A., McLelland, K. P., Sanborn, J. J., Pravec, P., & Koehn, B. W. (2019). Lowell Observatory Near-Earth Asteroid Photometric Survey (NEAPS): Paper 3. *Minor Planet Bulletin*, *46*(3), 238-265.
- Stephens, R. D., Warner, B. D., & Harris, A. W. (2010). A Proposed Standard For Reporting Asteroid Lightcurve Data. *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #42*, *42*, Artículo 39.14, 39.14.
- Tholen, D. J. (1984). *Asteroid Taxonomy from Cluster Analysis of Photometry*. [Tesis doctoral, University of Arizona].
- Vereš, P., Jedicke, R., Fitzsimmons, A., Denneau, L., Granvik, M., Bolin, B., Chastel, S., Wainscoat, R. J., Burgett, W. S., Chambers, K. C., Flewelling, H., Kaiser, N., Magnier, E. A., Morgan, J. S., Price, P. A., Tonry, J. L., & Waters, C. (2015). Absolute magnitudes and slope parameters for 250,000 asteroids observed by Pan-STARRS PS1 - Preliminary results., *261*, 34-47. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.08.007>
- Warner, B. D. (2017). Asteroid Lightcurve Analysis at CS3-Palmer Divide Station: 2016 July-September. *Minor Planet Bulletin*, *44*(1), 12-19.
- Warner, B. D. (2018). *The MPO Users Guide*.
- Warner, B. D., Shepard, M. K., Harris, A. W., Pravec, P., Crawford, G., & Husarik, M. (2006). Analysis of the lightcurve of 71 Niobe. *Minor Planet Bulletin*, *33*(4), 102-103.
- Warner, B. D., Stephens, R. D., & Harris, A. W. (2011). Save the Lightcurves. *Minor Planet Bulletin*, *38*(3), 172-174.
- Wetherill, G. W. (1992). An Alternative Model for the Formation of the Asteroids. *Icarus*, *100*(2), 307-325.