

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATÓLICA DEL PERÚ**

Escuela de Posgrado



Fotometría y Caracterización de los Asteroides Cercanos a la
Tierra (NEAs): (65803) Didymos, (86829) 2000 GR146, y
(161989) Cacus

Tesis para obtener el grado académico de Magíster en Física que
presenta:

Aldo Miguel Panfichi Sanborn

Asesora:

Dra. Myriam Virginia Pajuelo Cubillas


Lima, 2023

Informe de Similitud

Yo, **Myriam Virginia Pajuelo Cubillas**, docente de la Escuela de Posgrado de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesora de la tesis titulada **Fotometría y Caracterización de los Asteroides Cercanos a la Tierra (NEAs): (65803) Didymos, (86829) 2000 GR146, y (161989) Cacus**, del autor **Aldo Miguel Panfichi Sanborn**, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 8%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software Turnitin el 13/07/2023.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: San Miguel, 13 de julio del 2023

Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: Pajuelo Cubillas, Myriam Virginia	
DNI: 08194516	Firma 
ORCID: 0000-0002-0905-9223	

Agradecimientos

Quisiera agradecer a mi asesora, la Dra. Myriam Pajuelo, por su paciencia y apoyo durante el desarrollo del proyecto de maestría, por compartir sus conocimientos antes, durante, y después del periodo de observación, y por darme la oportunidad a través del proyecto de maestría para ir en persona a un gran telescopio científico en Chile y poder utilizarlo manualmente – una experiencia inolvidable. Asimismo, quisiera agradecer a la Pontificia Universidad Católica del Perú, que a través del Fondo de Apoyo a la Investigación, hizo posible esa experiencia.

Quisiera agradecer al director del telescopio SMARTS 0.9m, el Dr. Todd J. Henry, y a su alumno y contacto de posgrado Eliot Vrijmoet, por su ayuda en aprender a utilizar el telescopio y manipular los instrumentos durante el periodo de observación.

Quisiera agradecer a Brian D. Warner por su gran paciencia ayudándonos a solucionar problemas y utilizar correctamente el software *MPO Canopus*, y dándonos consejos sobre el buen uso y extracción de resultados fotométricos con éste.

Quisiera agradecer al Dr. Petr Pravec, no sólo por sus consejos sobre la observación de asteroides, pero por ponernos en contacto con el Equipo DART, guiando así nuestros objetivos durante y después del periodo de observación, y dejándonos ser una parte oficial del Equipo de Investigación de DART.

Finalmente, quisiera agradecer a mi familia por su apoyo constante de mis intereses y de mi carrera, siempre impulsándome a ser y dar lo mejor de mí, y a seguir mis intereses hasta más no llegar.

Esta investigación ha hecho uso de datos y/o servicios proporcionados por el Minor Planet Center de la Unión Astronómica Internacional. / *This research has made use of data and/or services provided by the International Astronomical Union's Minor Planet Center.*

Resumen

Los asteroides cercanos a la Tierra (NEAs en inglés) son un grupo de asteroides cuyas órbitas alrededor del Sol cruzan la órbita de la Tierra. Su proximidad a nuestros telescopios e instrumentos permite estudiarlos con mayor facilidad; pero además de esto, presentan un mayor riesgo de impacto que otros asteroides, y por lo tanto un posible peligro para la vida en nuestro planeta. Debido a esto, estudiar y caracterizar los miembros este grupo de asteroides es de alta importancia no sólo para el conocimiento científico, pero también para la humanidad.

En septiembre del 2022, la NASA realizó una prueba de impacto con una sonda a un asteroide a través de la misión DART, con el objetivo de ver si un impacto controlado puede cambiar la órbita de un posible colisionador. El objetivo de esta misión fue Dimorphos, un satélite que orbita el NEA Didymos.

En este trabajo reportamos la observación, fotometría, y análisis de un grupo de NEAs, utilizando principalmente un telescopio del Observatorio Ínter-Americano Cerro Tololo en Chile para las observaciones y el software *MPO Canopus* para el análisis fotométrico. Se extrajeron curvas de luz para los asteroides observados, y se pudieron calcular periodos de rotación para ellos, comparándolos con la literatura y resultados previos. Uno de los asteroides observados fue Didymos (en colaboración con la misión DART), debido a que nuestro lugar y fechas de observación nos pusieron en una posición excelente para poder observarlo en fechas previas al impacto.

Palabras clave: asteroides, NEAs, fotometría, curvas de luz, periodo de rotación, NASA, Didymos

Índice de Contenido

Agradecimientos.....	3
Resumen.....	4
Capítulo 1: Introducción.....	6
Capítulo 2: Marco Teórico.....	10
2.1. Asteroides.....	10
2.2. La Escala de Magnitudes.....	15
2.3. Fotometría y CCDs.....	20
2.3.1. CCDs.....	21
2.3.2. Fuentes de Ruido y Procesamiento de Imágenes.....	25
2.3.3. Fotometría de Apertura.....	32
2.3.4. MPO Canopus.....	35
2.4. La misión DART.....	36
Capítulo 3: Metodología y Observaciones.....	39
3.1. Selección de Asteroides.....	39
3.2. Proceso de Operación del Telescopio.....	43
3.3. Noche 1 – 06-Sep.....	47
3.4. Noche 2 – 07-Sep.....	49
3.5. Noche 3 – 08-Sep.....	50
3.6. Noche 4 – 09-Sep.....	53
Capítulo 4: Análisis y Resultados.....	54
4.1. (65803) Didymos.....	57
4.2. (86829) 2000 GR146.....	61
4.3. (161989) Cacus.....	64
4.4. Tablas de Resumen de Resultados.....	70
Capítulo 5: Conclusiones y Recomendaciones.....	73
Bibliografía.....	77

Capítulo 1: Introducción

El estudio de los asteroides – definidos como objetos principalmente rocosos y metálicos, de tamaño sub-planetario, que orbitan el Sol – es una pieza importante para el desarrollo de diversos temas y teorías en la astronomía y las ciencias del día de hoy. Por un lado, al ser formado al mismo tiempo que los planetas, los asteroides contienen un registro de las condiciones iniciales del disco protoplanetario durante las épocas de la formación de los cuerpos. Además, diversas teorías sobre la evolución y la migración de los planetas del sistema dependen de evidencia en la forma de asteroides para soportarse a sí mismas. Finalmente, preguntas sobre el origen del agua líquida, y del origen de la vida en la Tierra, pueden tener respuestas en las huellas dejadas por asteroides y meteoritos también [1]. Por lo tanto, el estudio de su naturaleza, distribución, y composición es fundamental para expandir nuestro conocimiento de la historia de nuestro sistema planetario.

Un grupo particular de los asteroides del Sistema Solar se llaman los Asteroides Cercanos a la Tierra, o NEAs (“Near-Earth Asteroids” en inglés). Estos son los asteroides cuyas órbitas alrededor del Sol cruzan la órbita de la Tierra. Los NEAs son objetos de estudio particular por varias razones. Del lado científico, al pasar cerca a la Tierra son más fáciles de observar y de coleccionar buena data; al estar más cercanos, tienen un mayor brillo y tamaño aparentes para nuestros instrumentos. Asimismo, misiones espaciales para estudiar asteroides de cerca con sondas, y coleccionar material de ellas, utilizan NEAs como objetivos ya que son mucho más accesibles. A partir del estudio de los NEAs, varias de las grandes preguntas de la astronomía y la evolución planetaria pueden probarse o acomodarse a los resultados y las observaciones.

Por otro lado, los NEAs por su definición son los asteroides que representan el mayor riesgo de colisionar con la Tierra. Desde ese punto de vista, tener una precisa y completa compilación de los NEAs del Sistema Solar – sus órbitas, velocidades, trayectorias, composiciones, densidades, etc. - es importante para conocer los riesgos y daños de una posible colisión, y poder preparar una respuesta

efectiva de minimización de peligro. Debido a esta necesidad, esfuerzos como el programa NEOO de la NASA¹ se han formado para incentivar y promover la caracterización de estos objetos.

Para el proyecto de tesis se planteó el estudio fotométrico de un grupo de NEAs, alrededor de 4-6 objetos (dependiendo de las condiciones de observación que se podrían conseguir). Esta propuesta tuvo el objetivo principal de complementar y expandir el conocimiento de estos asteroides, aportando no sólo las observaciones de éstos sino también las inferencias que podríamos obtener sobre sus propiedades a través de la fotometría y la construcción de curvas de luz. De ser así, quisimos observar principalmente NEAs que no hubieron sido muy estudiados previamente, para poder aportar lo más posible al conocimiento científico. Una vez hecho el estudio fotométrico, se caracterizarían algunas propiedades de los asteroides – como sus periodos de rotación y la amplitud de su variación en brillo – y se pondrían los resultados en contexto de previos estudios para los asteroides elegidos. Finalmente, nuestros resultados se compartirían y distribuirían a la comunidad astronómica en general, contribuyendo al conocimiento científico de los NEAs.

La fotometría, en el contexto de la Astronomía, se define como el estudio de la cantidad de luz que se recibe de objetos astronómicos, y por ende del brillo de éstos. La luz producida por una estrella o reflejada desde la superficie de un asteroide entra al telescopio e incide sobre un detector, comúnmente un arreglo de celdas de capacitadores semiconductores conocido como un chip “CCD” (charged-coupled device, en inglés). Los fotones son convertidos en corriente a través del efecto fotoeléctrico, y la magnitud de la corriente en cada “píxel” del CCD se guarda como una imagen astronómica digital. Cuando las fuentes de luz en estas imágenes son calibradas con fuentes estelares de brillo conocido, se puede medir el brillo de cualquier objeto en la imagen [2]. De esta manera, tomando imágenes de los NEAs elegidos cerca de estrellas conocidas, podemos medir el brillo de los asteroides en cada imagen. Dado el hecho que los asteroides tienen forma irregular, la cantidad de luz que reflejan de su superficie hacia la Tierra va a variar durante el transcurso de su órbita; viendo cómo el brillo de un asteroide varía durante el transcurso de un periodo de observación, se puede armar lo que llamamos “curvas de luz” – gráficos de la variación del brillo del objeto con el tiempo. De la periodicidad de las curvas podemos calcular el periodo de rotación del

¹“Near-Earth Objects Observations Program” <https://www.nasa.gov/planetarydefense/neo>

asteroide, y de la forma de las curvas podemos inferir otras propiedades, como su forma, el albedo de su superficie, si tiene satélites, si su órbita es estable o no, etc.

Para realizar este estudio, al no poder tener la oportunidad de observar los NEAs elegidos con telescopios dentro del Perú, se compraron noches de observación en el Observatorio Ínter-Americano Cerro Tololo (CTIO, en inglés) en Cerro Tololo, Chile, utilizando el telescopio de 0.9m del consorcio SMARTS². Las observaciones fueron tomadas en persona en el observatorio, durante la primera semana de septiembre del 2022.

El 26 de septiembre del 2022 se culminó la misión DART (Double Asteroid Redirection Test) liderada por la NASA. El objetivo de la misión era el asteroide doble Didymos-Dimorphos (Dimorphos siendo un satélite orbitando a Didymos, el NEA principal), y la misión consistía en impactar Dimorphos con una sonda controlada y observada por el equipo DART. El objetivo de la misión sería probar los efectos de un impacto controlado sobre un asteroide cercano a la Tierra, con la intención de modificar su órbita de una manera controlada. Esta sería la primera vez en la historia que se pondría a prueba un intento de defensa planetaria contra impactos de asteroides.

Debido a nuestras fechas de observación, dada la ubicación del telescopio que íbamos a utilizar, y conociendo que el éxito de la misión DART requeriría toda la data fotométrica posible del asteroide en las semanas antes y después de la colisión, decidimos entrar en colaboración con el equipo DART, y volvimos a Didymos nuestro objeto principal de observación durante el periodo asignado para observar, además del grupo de NEAs seleccionados previamente. Una vez que tuvimos todas nuestras imágenes, se procedió a reducirlas y analizarlas con el software de fotometría *MPO Canopus*, escrito por Brian D. Warner; un software que se usa comúnmente en el ámbito de la astronomía y la fotometría de asteroides alrededor del mundo [3].

Con la data para Didymos, pudimos extraer una curva de luz bastante comparable con resultados previos del asteroide, y un periodo de rotación de alta precisión que coincide con la literatura, demostrando la calidad de las observaciones tomadas. Para los otros asteroides, las curvas de luz y los periodos de rotación inferidos coinciden con la literatura pero con una precisión menor (y

2 El tiempo de observación con el telescopio SMARTS 0.9m se compra a un costo fijo por noche. Para más detalles, la página del consorcio SMARTS se encuentra en: <http://www.astro.gsu.edu/~thenry/SMARTS/>

barras de error mayores) que lo esperado, debido a una combinación de pobres condiciones de observación y una baja cantidad de imágenes. Una mayor cantidad de noches de observación hubiese sido ideal para obtener resultados más certeros y confiables para los demás cuerpos.



Capítulo 2: Marco Teórico

2.1. Asteroides

La teoría más aceptada al día de hoy para la formación del Sistema Solar y los cuerpos de los cuales consiste comienza con una densa nube molecular de gas y polvo hace 4.6 mil millones de años. Debido a la atracción gravitacional entre las partículas, esta nube colapsaría, eventualmente encendiendo la fusión de hidrógeno en el centro de la nube gracias a la contracción gravitacional, formando el Sol. El resto del material comenzaría a coalescer en un disco de materia alrededor del proto-Sol, orbitándolo gracias a la conservación de momento angular del material de la nube al colapsar. Este disco se le llama el *disco protoplanetario*, o la *nebulosa solar* [4].

Dentro del disco, la gravedad continúa actuando, coalesciendo material, formando las semillas de todos los cuerpos que vemos en el Sistema Solar al día de hoy. Algunas de estas semillas logran juntar suficiente masa para comenzar un proceso de crecimiento desbocado, formando planetesimales y protoplanetas, que a través de interacciones gravitacionales y dinámicas continúan creciendo e influenciando sus órbitas, eventualmente convirtiéndose en los planetas que observamos el día de hoy. Como consecuencia del crecimiento planetario, sea por restos de colisiones e interacciones dinámicas, o porque no pudieron coalescer suficiente material para comenzar el proceso de crecimiento desbocado, al mismo tiempo que los planetas se forman los millones de cuerpos menores que componen el resto del Sistema Solar; siendo éstos los planetas menores, las lunas, los cometas, y los asteroides [1][4][5].

Hoy en día, casi 99.9% de la masa del Sistema Solar se encuentra en el Sol, y 99% de la masa faltante está concentrada en los cuatro planetas gigantes gaseosos [4]. Modelos científicos de la formación del Sistema Solar generan decenas de protoplanetas y miles de veces la cantidad de masa y cuerpos menores que los que observamos hoy, sugiriendo que los cuerpos que componen el Sistema Solar hoy en día son los restos de colisiones, interacciones, y el efecto perturbador de las resonancias orbitales o la migración de los planetas mayores; la mayoría de los cuerpos siendo expulsados del sistema durante esta evolución, o absorbidos por colisiones con el Sol o los planetas [5].

Los asteroides comúnmente se definen como *cuerpos menores* (es decir, de tamaño sub-planetario), cuya composición es principalmente de roca o metal, que orbitan alrededor del Sol. Esta definición es dada para diferenciarlos de planetas enanos (como Plutón, aunque el asteroide (1) Ceres también califica como planeta enano bajo la definición dada por la Unión Astronómica Internacional [6]), de cometas (cuya composición es principalmente de hielo y polvo), y de meteoritos (asteroides que han impactado con la superficie de la Tierra o de otros cuerpos). Al haberse formado al mismo tiempo que los planetas mayores, y no haber sido mayormente perturbados, los asteroides contienen en sí restos relativamente intactos de la composición y las condiciones del disco protoplanetario al momento de su formación. Su distribución y la distribución de sus composiciones en el Sistema Solar hoy en día también da luz sobre la evolución dinámica del Sistema Solar; por ejemplo, la posición y la composición de asteroides dentro del cinturón de asteroides demuestran que interacciones gravitacionales con Júpiter fueron, y continúan siendo, una de las causas más importantes de la existencia del cinturón en su forma moderna. La presencia de una mezcla de asteroides de diferentes composiciones implica que la migración de la órbita de Júpiter causó una migración y mezcla de asteroides formados en diversos puntos del disco planetario, y simulaciones de este movimiento demuestran la expulsión de una gran cantidad de masa del Sistema Solar inicial [1]. Así, el estudio de los asteroides nos ayuda a restringir y mejorar nuestras teorías científicas sobre la formación y la evolución del Sistema Solar en el cual habitamos.

Hoy en día observamos que los asteroides del Sistema Solar se encuentran principalmente en dos zonas orbitales. La gran mayoría de asteroides se mueven en órbitas relativamente circulares en una zona entre las órbitas de Marte y Júpiter; esto se conoce como el cinturón de asteroides. Cientos de miles de asteroides han sido catalogados en este rango de órbitas, y los rasgos de la perturbación gravitacional por Júpiter son evidentes – por ejemplo, en zonas del cinturón de resonancia orbital con Júpiter, el cinturón se encuentra completamente falto de cuerpos, dado que objetos que entran en estas zonas son fuertemente perturbados y eventualmente expulsados de la órbita; estas zonas se llaman las Brechas de Kirkwood [7]. Aún conteniendo millones de asteroides, la masa total del cinturón sólo consiste en ~3% de la masa de la Luna, y los 4 asteroides más grandes contienen la mayoría de esta masa [8].

El segundo grupo de asteroides más poblado son los asteroides troyanos. Estos asteroides se encuentran en los puntos Lagrange L4 y L5 del sistema Sol-Júpiter; es decir, se encuentran en zonas de igual influencia gravitacional entre el Sol y Júpiter, y orbitan el Sol en la misma órbita que Júpiter. Debido a este hecho, la influencia de Júpiter en la órbita de estos asteroides es aún más obvia que los asteroides del cinturón. Más de un millón de asteroides orbitan en estas dos zonas, aunque debido a su mayor distancia de la Tierra en comparación con los asteroides del cinturón, se han estudiado comparativamente menos que estos primeros [1].

Además de estos dos grupos principales, existen diversas poblaciones de asteroides más pequeñas que orbitan en Sol en diferentes áreas del Sistema Solar, con órbitas de diversas excentricidades (siendo la excentricidad una medida de la “circularidad” de la órbita). De estos, un grupo de interés mayor y particular para nosotros son los “Asteroides Cercanos a la Tierra” o NEAs (por sus siglas en inglés – a veces se habla de “Objetos Cercanos a la Tierra”, o NEOs, para tomar en cuenta los objetos que no sean estrictamente asteroides, pero en este proyecto hablaremos particularmente de NEAs). Los NEAs, como se esperaría de su nombre, son los asteroides cuyas órbitas cruzan o pasan cerca de la órbita de la Tierra. En particular, se definen como los asteroides cuyo perihelio (distancia mínima de su órbita entre el cuerpo y el Sol) es menor que 1.3 AU (1 AU, o “unidad astronómica”, siendo la distancia promedio entre la Tierra y el Sol) y su afelio (distancia máxima de su órbita entre el cuerpo y el Sol) es mayor que 0.983 AU.

Los NEAs se pueden subdividir aún más en otras categorías dependiendo de las características de su órbita. Los NEAs ‘*Aten*’ tienen un semieje mayor³ menor que el de la Tierra y cruzan su órbita. Los NEAs ‘*Apollo*’ tienen un semieje mayor más grande que el de la Tierra, y también cruzan su órbita. Finalmente se tienen los ‘*Amor*’, cuyas órbitas técnicamente (y estrictamente) caen afuera de de la órbita de la Tierra, pero pasan lo suficientemente cerca para considerarse NEAs. También existen 26 NEAs a veces llamadas ‘*Atiras*’ o ‘*Apofeles*,’ con órbitas enteramente dentro de la órbita de la Tierra – pero al ser pocas, la distinción con los *Aten* no siempre se hace; algunos simplemente definen a los *Aten* como todos los NEAs cuyo semieje mayor es menor que el de la Tierra, irrespectivamente del hecho que cruzan su órbita o no. Ejemplos de las órbitas se ven en la Figura 1.

3 El semieje mayor de una elipse (y por lo tanto, una órbita elíptica) es el radio más largo de la elipse

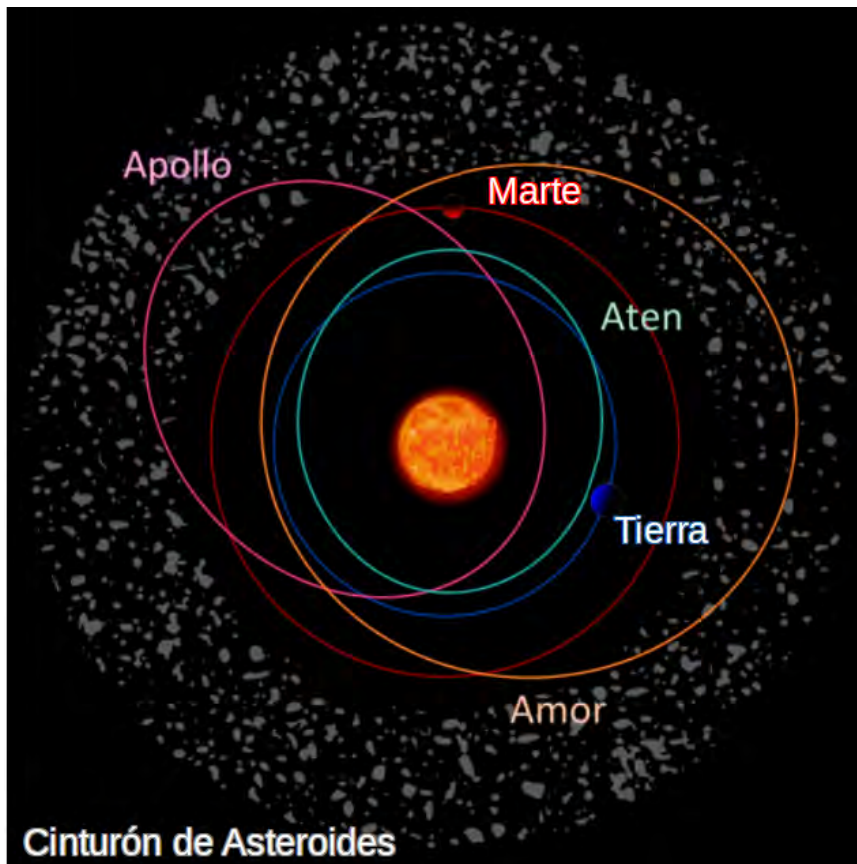


Figura 1: Órbitas típicas de NEAs Aten, Apollo, y Amor, en comparación con las órbitas de la Tierra y Marte, y con el cinturón de asteroides. Figura originalmente de la Agencia Espacial Europea (European Space Agency – ESA), editada por A. Panfichi.

Se cree que la mayoría de los NEAs fueron originalmente objetos del cinturón de asteroides que, por colisiones o perturbaciones gravitacionales, evolucionaron su órbita a una que aproxima la de nuestro planeta [1][9].

Los NEAs son un grupo de asteroides cuyo estudio es de gran interés por múltiples razones. Por un lado, debido a su proximidad a la Tierra, tienden a ser mucho más fácilmente visibles y observables (dependiendo de su tamaño y albedo) con nuestros instrumentos que los asteroides del cinturón o los troyanos, que se encuentran a distancias mucho más grandes del Sol (y por ende de la Tierra también). Por esta razón, misiones espaciales que involucran visitas o recolección de muestras directamente de asteroides se enfocan en NEAs como objetivos, para ahorrar en costos operativos y tiempo de duración de las misiones. Ejemplos de estas misiones incluyen las sondas Hayabusa2 (<https://www.hayabusa2.jaxa.jp/en/>) y OSIRIS-REx (<https://www.asteroidmission.org/>).

Por otro lado, el mayor interés sobre los NEAs por el público en general viene del hecho que, por definición, los NEAs son los asteroides que representan el mayor riesgo de colisión e impacto con la Tierra. Una colisión de este tipo con un asteroide suficientemente grande puede tener efectos devastadores en el clima, la biosfera, y la habitabilidad en gran parte de la superficie de nuestro planeta, evidenciado por teorías sobre la extinción masiva Cretácico-Palógeno (K-Pg), que acabó con $\frac{3}{4}$ de la vida terrestre en nuestro planeta, incluyendo los dinosaurios, hace ~67 millones de años. Por esta razón, aunque la probabilidad de una colisión de ese tipo con la Tierra en el futuro cercano es increíblemente baja [10], tener un buen registro, estudio, y caracterización de todos los NEAs detectados y catalogados, incluyendo sus propiedades físicas y orbitales, es esencial no solo para entender estos riesgos de manera estadística, sino para poder detectar posibles colisionadores con la debida anticipación con miras a realizar estrategias de defensa planetaria. Catálogos como el Minor Planet Center de la Unión Astronómica Internacional (<https://minorplanetcenter.net/>) y programas científicos gubernamentales como el Near-Earth Object Observations Program de la NASA (<https://www.nasa.gov/planetarydefense/neo>) existen para realizar estos propósitos.

La misión DART fue el primer intento de estudiar directamente el efecto de un impacto controlado sobre la órbita de un posible asteroide colisionador, con el propósito de desarrollar estrategias de defensa planetaria. La misión DART y su relevancia al proyecto de tesis se discuten en detalle más adelante en este capítulo.

Aunque los meteoritos se pueden estudiar directamente en un laboratorio, éstos en general han pasado bastante tiempo sobre la superficie de la Tierra antes de haber sido descubiertos, entonces no sólo han sido afectados por su paso por la atmósfera, sino que han sido contaminados por procesos de desgaste, atmosféricos, exposición al aire, el agua, o las plantas, etc. Misiones para obtener muestras de asteroides intactos en el espacio han ocurrido, pero una misión de ese tipo requiere un gran presupuesto, infraestructura, y cooperación gubernamental y científica; por eso pocas misiones de ese tipo han ocurrido. Esto es decir que la gran mayoría de lo que sabemos sobre los asteroides viene como resultado de observaciones de ellos de manera remota; recopilación y análisis de la luz del Sol que reflejan los asteroides con instrumentos y telescopios en la superficie de la Tierra (y más recientemente, con instrumentos en el espacio).

La fotometría de asteroides se discutirá más en detalle en una sección siguiente de este capítulo, pero a través del estudio de la cantidad y la variación del flujo de luz que recibimos de un asteroide, se pueden inferir propiedades físicas del objeto; por ejemplo, a través de la periodicidad y la amplitud de la curva de luz de un asteroide se pueden inferir restricciones sobre su periodo de rotación y su forma. Estudios de perturbación gravimétrica de asteroides se han realizado para poner límites a las masas de ciertos asteroides [11]. El tamaño de un asteroide se puede observar con instrumentos ópticos de alta precisión, con observaciones de radio, con buen conocimiento de la órbita del objeto en cuestión, y/o a través de técnicas de inversión de curvas de luz [1]. Con espectroscopia, se puede determinar la composición de la superficie de un asteroide, y a través de modelos científicos y en combinación con otras observaciones, se puede inferir algo sobre su densidad y su masa.

Todas estas características se pueden calcular o inferir a través de las observaciones y el estudio de los asteroides y los NEAs, a través de (y en combinación con) múltiples métodos de observación. Por esa razón, iniciativas para la observación e intercambio de estos estudios abundan en el campo de los asteroides, desde repositorios y bases de datos como el Asteroid Lightcurve Photometry Database – ALCDEF (<https://alcdef.org/>) hasta publicaciones estrictamente sobre cuerpos menores como el Minor Planet Bulletin (<https://mpbulletin.org/>).

2.2. La Escala de Magnitudes

La medición de la cantidad de luz que recibimos de objetos celestiales ha sido un tema importante para la astronomía desde la antigüedad. Desde el punto de vista histórico, en el segundo siglo AC el astrónomo griego Hiparco creó un catálogo de estrellas, clasificándolas por su brillo aparente (es decir, que tan brillante aparecía en el cielo). Luego refinado y utilizado por Ptolomeo varios siglos después, esta clasificación terminó evolucionando en la escala histórica de “magnitudes.” Esta escala separaba las estrellas en seis puntos: estrellas de “primera magnitud” hasta “sexta magnitud,” donde las estrellas más brillantes eran de primera magnitud, y las menos brillantes de sexta. Todas las estrellas del cielo se intentaron clasificar en esta escala, a veces de manera bastante arbitraria [12].

Con el invento del telescopio, se descubrieron muchas más estrellas y objetos celestiales que previamente no eran visibles para el ojo humano, poniéndolos fuera de la escala de magnitud histórica, y volviendo el problema de estimar magnitudes aún más grande. Sin embargo, debido a su uso histórico por siglos, la escala de magnitudes continuaba siendo un concepto importante en el campo de la astronomía durante esta época, a pesar de sus problemas y discrepancias.

En el siglo 18, tempranas observaciones fotométricas por astrónomos como el astrónomo inglés Edmund Halley mostraron que una estrella típica de primera magnitud era más o menos 100 veces más brillante que una estrella de sexta magnitud. Siguiendo esta idea, el astrónomo inglés Norman Pogson propuso en 1856 una re-definición moderna de la escala de magnitudes a una escala logarítmica, donde una diferencia de 5 magnitudes entre dos estrellas coincidía con una diferencia de brillo de 100 veces entre ellas; por ende una diferencia de 1 magnitud equivale a una razón de $\sqrt[5]{100} \sim 2.512$ entre el brillo aparente en el cielo [12].

La escala de magnitudes moderna sigue este concepto. Para dos estrellas 1 y 2, la diferencia de magnitudes m_1 y m_2 entre las dos se define como:

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log_{10}(F_1/F_2)$$

donde F_1 y F_2 son el *flujo* o *intensidad* de la luz medida en la Tierra proveniente de las estrellas 1 y 2, en unidades de potencia por unidad de área, e.g. [W/m^2] o [$\text{J} / \text{m}^2 \text{s}$].

Bajo esta escala, teniendo una estrella de referencia, se le puede asignar a cada estrella una magnitud dependiendo del flujo de luz medido de ella en comparación a la referencial, y se puede extender la escala de magnitudes mas allá de la magnitud 1 (para objetos astronómicos más brillantes) y la magnitud 6 (para menos brillantes). Cabe notar que en la definición histórica de la escala, fuentes de *menor* magnitud (es decir, número más pequeño) aparentan ser *más* brillantes que fuentes de mayor magnitud; y que ahora la escala se puede extender hasta los números negativos. Por ejemplo, bajo la convención común de usar la estrella Vega como estrella de referencia, el Sol tiene una magnitud aparente de -27; la Luna llena de -13, Vega de 0, Polaris de ~2, etc.

Cabe notar que esta escala define las magnitudes *aparentes* de un objeto estelar; es decir, mide el brillo de los objetos *vistos desde la superficie de la Tierra*. Esto es importante porque estrellas que

son físicamente más luminosas que otras pueden aparecer menos brillantes si se ubican a distancias mayores de nuestro planeta. Para corregir la *magnitud aparente* de una fuente astronómica a una *magnitud absoluta* – es decir, la magnitud si fuese medida a una distancia estándar de la estrella en cuestión – se utiliza la siguiente relación:

$$m - M = 2.5 \log_{10}(d/10)^2$$

o expresiones equivalentes, como:

$$M = m - 5 \log_{10}(d) + 5$$

donde m es la magnitud aparente medida, M la magnitud absoluta a calcular, y d la distancia a la estrella en parsecs. Estas relaciones nos dan la magnitud absoluta de una estrella como la magnitud aparente si ésta fuese medida a una distancia de 10 parsec de la estrella en cuestión.⁴

Aunque estas escalas fueron usadas y desarrolladas inicialmente para medir el brillo de estrellas, hoy en día se utilizan en el campo de la astronomía observacional para describir qué tan brillantes son diversos tipos de objetos celestiales, desde estrellas hasta planetas, asteroides, y galaxias.

Siguiendo estos convenios, la magnitud aparente es una medida del brillo de un objeto astronómico según lo que se observa en la Tierra, y la magnitud absoluta es una medida de la luminosidad intrínseca del objeto. También existe el concepto de *magnitudes instrumentales*, que son las magnitudes que mide un instrumento debido a su construcción física y que hay que corregir para convertirlas a las otras escalas de magnitudes. Discutiremos este concepto en detalle más adelante.

Para estrellas lejanas, se espera que la magnitud aparente de la estrella no cambie radicalmente (a menos que sean estrellas variables, o hayan inconvenientes con las observaciones y mediciones), ya que se mantienen “fijas” en distancia a la Tierra en escalas temporales humanas. Para objetos del Sistema Solar, su distancia a la Tierra y al Sol pueden variar significativamente mientras el objeto y la Tierra orbitan nuestra estrella con diferentes periodos y excentricidades de órbita. Para asteroides en particular, que generalmente no son esferas lisas y uniformes, el ángulo de fase de la órbita puede afectar bastante las observaciones.

4 El parsec se define como la distancia en cual un objeto tiene un paralaje que subtiende un segundo de arco; equivalente a 3.26 años luz, o $\sim 3.08 \times 10^{16}$ m

El ángulo de fase de un objeto del Sistema Solar es el ángulo entre el vector de la luz incidente hacia un objeto y la luz reflejada del objeto hacia la Tierra, como se ve en la Figura 2.

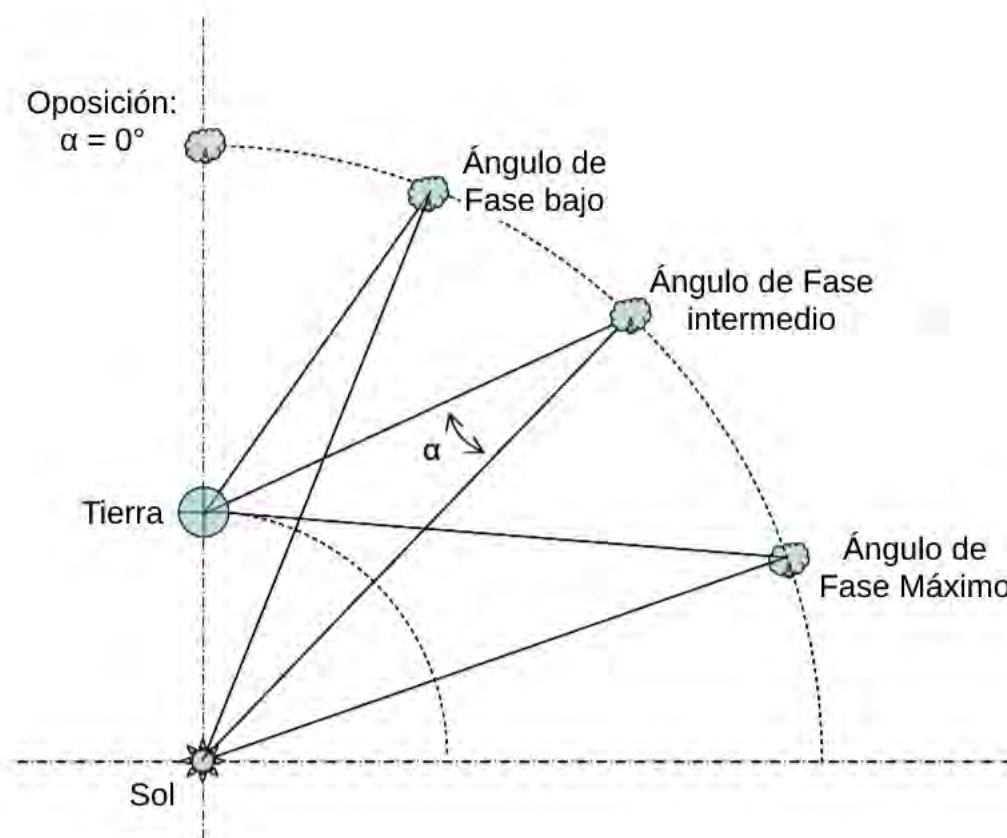


Figura 2: Esquema del ángulo de fase α de un asteroide en el sistema Sol-Tierra. Figura adaptada de la Figura 1 de Buchheim (2010) [13], traducida al español.

El brillo de un objeto en el Sistema Solar depende del ángulo de fase del objeto desde nuestro punto de vista - esto se ve claramente en las fases de la Luna, mientras orbita la Tierra. Para un asteroide, que orbita el Sol y no la Tierra, su ángulo de fase y la variación en luz reflejada no va a ser tan regular como la Luna. Generalmente, es ideal observar asteroides cuando su ángulo de fase es lo más cercano a 0° posible, para aprovechar la máxima cantidad de luz reflejada, y además el *efecto de oposición*: un incremento significativo no-lineal de la luz reflejada de un objeto cuando su ángulo de fase se acerca al valor de 0° (ver Figura 3). Se cree que el efecto de oposición ocurre debido a una combinación de dos factores. Primero, la desaparición de sombras de la superficie de un objeto irregular cuando la fuente de luz que la ilumina lo hace desde un ángulo normal a la superficie.

Segundo, la retrodispersión coherente de diferentes ondas de luz reflejada de la superficie, que a ángulos de fase bajos (variando con la composición de la superficie, pero siempre incluyendo ángulos cercanos a 0°), interfieren de manera constructiva entre sí, multiplicando el brillo de la luz recibida [14].

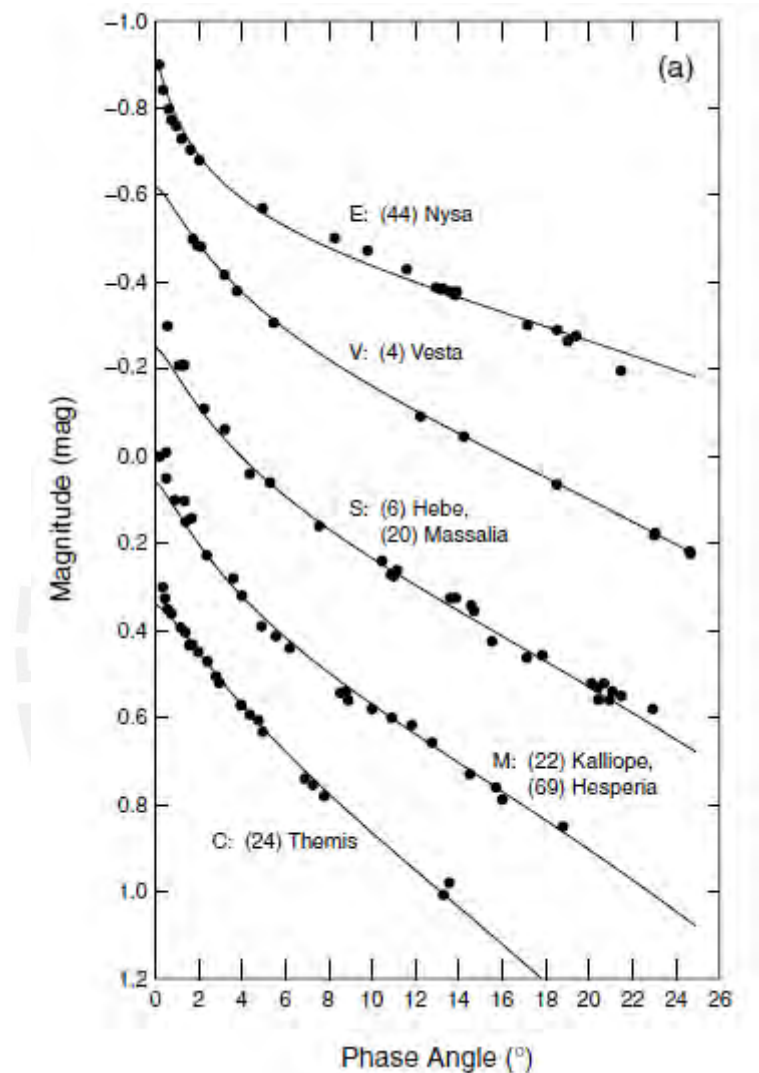


Figura 3: Efecto de oposición visualizado en la variación en magnitud relativa de 5 diferentes tipos de asteroides con el ángulo de fase de su órbita. Notar como, a ángulos de fase aproximándose a 0° , el incremento lineal de magnitud se vuelve no-lineal. Figura adaptada de la Figura 1(a) de Muinonen et al. (2002) en Asteroids III [14].

Por esta razón, al estudiar objetos del Sistema Solar, se tiende a trabajar con magnitudes aparentes, y al reportar observaciones de ellos, se incluyen las fechas de observación y las fases de órbita de los

cuerpos en cuestión. Esto permite la comparación de observaciones, la corrección por la fase de órbita, y la toma en cuenta de efectos adicionales de fase – no solo efectos fotométricos de oposición, sino también efectos polarimétricos. Por ejemplo, se cree que el mecanismo de retrodispersión coherente causa que la luz reflejada de un asteroide sea fuertemente polarizada de forma lineal negativa a ángulos de fase pequeños, similar al efecto de oposición [14].

2.3. Fotometría y CCDs

La astronomía observacional parte del estudio de la luz recibida de objetos celestiales, que se captura y analiza con diversos instrumentos para obtener conclusiones científicas sobre los objetos que se investigan. Por ejemplo, para hacer espectroscopia, se separa la luz incidente en su espectro de energías o longitudes de onda, y se buscan señales espectrales de elementos y moléculas en la variación de intensidad de la luz en cada división. También se puede aprovechar el efecto Doppler para hacer mediciones de velocidad radial, viendo la velocidad de recesión o aproximación de estrellas y galaxias con respecto a nosotros a través del desplazamiento de las líneas espectrales. Para hacer esta separación, se necesitaría pasar la luz incidente en nuestros telescopios por un espectrógrafo o instrumento equivalente antes de hacer el análisis.

Para este proyecto, planteamos hacer un análisis fotométrico de una serie de NEAs; los detalles específicos del proyecto se describen más adelante. La fotometría, como término científico que se usa en el campo de la astronomía, es el proceso de medición y el estudio de la cantidad de luz recibida por cuerpos celestiales y objetos astronómicos (el brillo de éstos); en su esencia más simple, es la colección y medición del número de fotones recibido desde un objeto celestial por unidad de tiempo. Haciendo observaciones fotométricas bajo diferentes filtros de luz, se puede medir qué tanto emite o refleja el objeto en diferentes longitudes de onda; es decir, determinar el *color* del objeto. Si se hace fotometría de serie temporal, tomando múltiples observaciones de un mismo objeto a través de un intervalo temporal extendido, se puede ver cómo el brillo de un objeto varía con el tiempo, armando un gráfico llamado *curva de luz*. Las curvas de luz nos dan información sobre la variabilidad del brillo de un objeto; por ejemplo, en un sistema de estrellas binario

eclipsante, se podría ver la duración y magnitud del eclipse como depresiones en la curva de luz, y a través de ella determinar el tamaño relativo de las estrellas, el tamaño, inclinación, y periodo de la órbita, entre otra información. Un proceso similar se utiliza para detectar planetas orbitando otras estrellas. Para asteroides, la periodicidad (o falta de) en la curva de luz de un asteroide nos da el periodo de rotación del cuerpo, si su rotación es simple (alrededor de un sólo eje) o más complicado, si tiene satélites, etc. Y combinando observaciones de asteroides tomadas desde diferentes ángulos (diferentes fases de la órbita) y en diferentes filtros, con suficiente data se puede inferir el tamaño, la forma, y la composición de la superficie del asteroide [12].

2.3.1. CCDs

El instrumento clave para el desarrollo moderno de la fotometría es el CCD (“Charged-Coupled Device”, en inglés). Un CCD es un sensor de luz en forma de chip, que contiene un arreglo bidimensional de “píxeles” – elementos sensibles a fotones, usualmente del tamaño de micras (μm). Cada píxel es típicamente un capacitador MOS (metal-óxido-semiconductor) de dopado tipo p, usualmente de silicio [2][12].

El proceso de operación del CCD está basado principalmente en el efecto fotoeléctrico, y la analogía usual para explicar su funcionamiento es la analogía del “balde de agua” (una visualización de esta analogía se encuentra en la Figura 4). Típicamente se describe de la siguiente manera: existe un arreglo de baldes de agua puestos afuera en la lluvia – los baldes en este caso siendo los píxeles del CCD, y la lluvia siendo una lluvia de fotones incidentes. Una vez terminada la lluvia (acabando la exposición del CCD a la luz incidente), se recogen los baldes y se anota la cantidad de agua en cada balde. Los resultados de este acopio entonces son un registro de la cantidad de lluvia que incidió en cada posición del arreglo donde había un balde; es decir, un registro bidimensional de la cantidad de lluvia que cayó en cada parte del campo. Regresando al CCD, bajo esta analogía, la lectura de los píxeles da un registro de la cantidad de luz que incidió en cada píxel durante el tiempo de exposición, y entonces la cantidad de luz recibida por diferentes partes del cielo a donde se apuntó el telescopio o instrumento que contiene el CCD. Esto permite identificar fuentes de luz en el cielo y medir el flujo de fotones de estas fuentes.

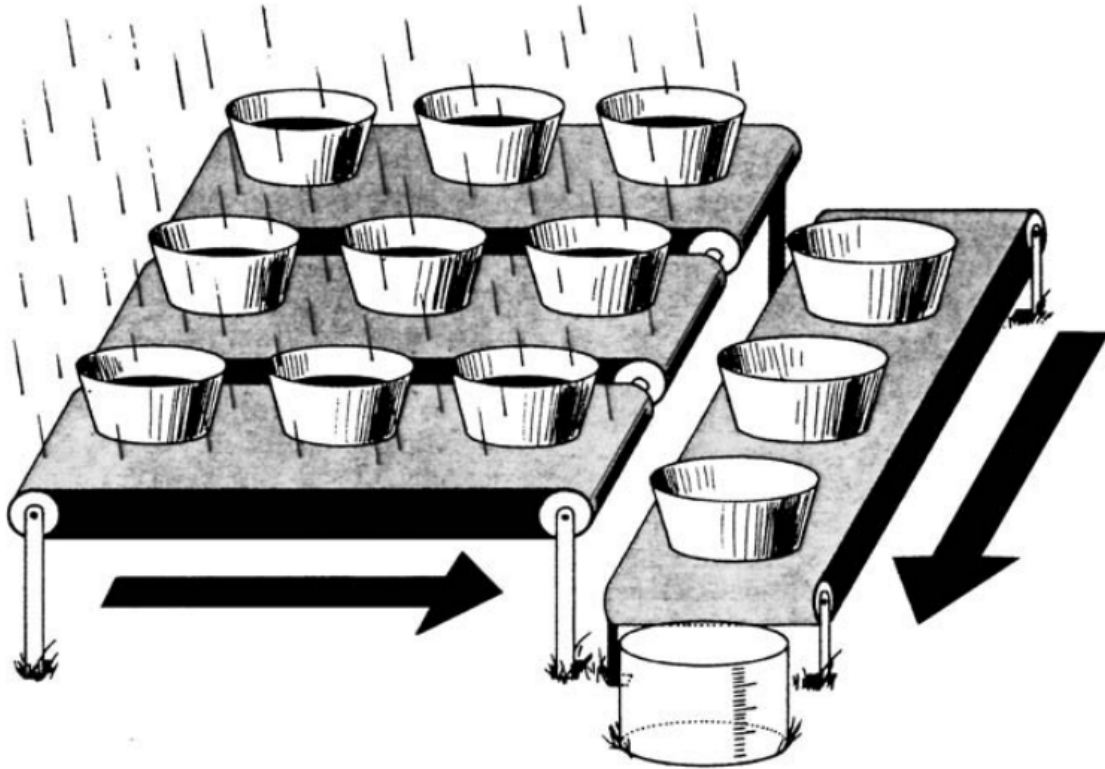


Figura 4: Analogía del CCD como un arreglo de baldes puesto bajo la lluvia. Después de la lluvia, los baldes son transferidos al punto de medición, donde se vierte el agua del balde al medidor. Figura originalmente de Janesick & Blouke (1987) [15], referenciada de Howell (2006) [2].

En la práctica, los fotones usualmente entran por la apertura de un telescopio o instrumento comparable, donde son dirigidos al CCD. Cuando estos fotones inciden en la interfaz óxido-semiconductor, y son absorbidos por el silicio, emitiendo fotoelectrones a través del efecto fotoeléctrico (se usa silicio típicamente porque el ancho de banda de este material permite la absorción de fotones cuyas energías se encuentran en el rango de casi-infrarrojo hasta rayos-X de baja energía, y por lo tanto cubren el rango entero de luz visible [2]). Los fotones incidentes por lo tanto generan una carga en el semiconductor; mientras más fotones inciden en un pixel, más carga se genera. La carga se guarda dentro de un pozo de potencial generado por un voltaje aplicado al pixel, cuyos detalles técnicos dependen de la construcción del chip. La cantidad máxima de carga guardada también depende de esta construcción – pasado este nivel, se considera *sobresaturado* el pixel, y la carga acumulada puede desplazarse a pixeles vecinos, malogrando la medición.

Se expone el CCD a luz incidente por una cantidad de tiempo determinada, que depende del tipo de ciencia, el clima, y el objeto que se quiere observar. Una vez terminada la exposición, hay que leer la data; para hacer eso, se aplica una serie de voltajes para transferir la carga en cada pixel a una fila vecina, con la última fila siendo una fila de registro. Uno por uno, la carga de pixel de la fila de registro son transferidos a un amplificador y medidor, que convierte la carga en un voltaje, y el voltaje en una señal digital, vaciando la carga en el proceso [2]. Esto se repite hasta que un registro digital completo de la cantidad de carga generada en cada pixel es guardada en el formato deseado [12], típicamente en un formato digital para imágenes astronómicas común, como por ejemplo el formato .fits. Una imagen FITS (“Flexible Image Transport System”, en inglés) contiene no solo las posiciones de cada pixel y la carga generada en cada pixel (permitiendo la reconstrucción de una imagen astronómica), sino también contiene metadata del telescopio y el instrumento que crearon la imagen. Esta metadata podría contener, por ejemplo, la fecha y hora de la toma de la imagen, la duración de la exposición, detalles técnicos del telescopio, el CCD, y el observatorio, etc.

Cabe notar que la cantidad de fotones incidentes, carga generada, y voltaje leído son valores proporcionales, pero son valores analógicos, mientras que el producto final es un valor digital. Para producir los resultados finales, se hace uso de un convertidor analógico-digital, que convierte la señal analógica en unidades “ADU” (“Analog-to-Digital Units”), que son números enteros. La *ganancia* o “gain” de un CCD es un factor que determina el factor de conversión de carga a ADUs (por ejemplo, un instrumento con una ganancia de 3 electrones/ADU produce, en promedio, un valor de 1 ADU por cada 3 electrones colectados en el pixel), y este valor se determina en la construcción del arreglo instrumental. Como los ADUs son valores en números enteros, la resolución de la ganancia y conversión digital del chip afecta la precisión de los resultados [2]. Con un número mayor de ganancia, se obtiene menos precisión (e.g. con una ganancia de 10, valores desde 5-6 hasta 14-15 electrones podrían dar 1 ADU como resultado), pero con un número menor, los valores de ADU en promedio serán mayores, entonces se requiere mayor número de bits y por lo tanto más memoria en el convertidor y en la computadora para guardar los resultados.

Las operaciones de toma de datos y de lectura del CCD vienen con sus propias fuentes de ruido o error intrínsecas a su funcionamiento. Al estar a temperaturas sobre cero absoluto, las operaciones

electrónicas generan ruido térmico procedente de electrones térmicamente excitados en el circuito, que se pueden acoplar a la señal y confundirse por fotoelectrones. Para combatir esto, típicamente se mantienen los CCDs a temperaturas bajas a través de sistemas de enfriamiento; además, se puede compensar el ruido térmico tomando imágenes oscuras o *dark frames*, como se describirá más adelante. Felizmente, en CCDs modernos, el ruido térmico usualmente es del orden de 5 electrones por píxel; entonces para una exposición de miles de ADUs, es usualmente ignorable [12]. También existe la posibilidad de tener ruido o pérdida de información al momento de hacer la lectura – en un CCD de 1024 x 1024 píxeles, el último pixel del arreglo hará más de un millón de movimientos antes de su lectura, por ejemplo [12]. Sin embargo, un típico CCD moderno tiene una eficiencia de transferencia de carga de 99.9999% [2], y similar al ruido térmico, el ruido de lectura se puede compensar a través de una toma de imágenes *bias*. Hoy en día, los CCDs se utilizan en todo ámbito de la astronomía observacional precisamente porque sus niveles de error o ruido son o naturalmente bajos, o fácilmente compensables.

Debido al hecho que las imágenes astronómicas guardan su data en unidades de ADUs, en vez de unidades físicas como flujo o energía, la diferencia entre el brillo medido de dos estrellas o fuentes de luz en una imagen estará relacionada con la diferencia de ADUs medida para cada fuente. Utilizando la ecuación para calcular la magnitud aparente de estrellas, podríamos calcular una relación de *magnitudes instrumentales* para cada fuente de luz en nuestras imágenes astronómicas, utilizando los valores de ADUs o electrones provenientes de las fuentes en vez de flujo o intensidad. Para convertir las magnitudes instrumentales medidas en una imagen a magnitudes aparentes “reales,” habría que utilizar un catálogo astronómico de fuentes conocidas y aplicar una conversión. Este proceso se detalla más en las siguientes secciones.

El telescopio que nosotros usamos para recolectar datos y tomar imágenes para este proyecto fue el telescopio 0.9m del consorcio SMARTS, ubicado en el Observatorio Ínter-Americano Cerro Tololo. Este telescopio es modelo Cassegrain $f/13.5$; es decir, la longitud focal del telescopio es 13.5 veces su apertura. El telescopio viene equipado con un detector CCD Tek2K, cuyo tamaño es de 2048×2046 píxeles, y tiene una ganancia de 3 electrones por ADU. Sin embargo, el chip también tenía un modo de funcionamiento de $\frac{1}{4}$ chip; permitiendo el uso de sólo un cuarto del chip, en vez

del chip entero, para las observaciones. El uso del CCD en este modo reduce la cantidad del cielo visible en las imágenes finales, pero también acelera de manera significativa la lectura de cada imagen, ya que solo se tiene que leer una fracción del CCD, en vez del chip entero. Como no creíamos necesario usar todo el campo de visión máximo del telescopio, utilizamos este modo de funcionamiento para tomar imágenes; nuestras imágenes entonces resultaron ser arreglos de 1074x1024 píxeles. Con la longitud focal del telescopio, cada pixel correspondía a una extensión de 0.401 segundos de arco en el cielo. Un segundo de arco corresponde a 1/3600 de un grado (de los 360 grados de la esfera celestial), entonces cada pixel correspondía a 0.0001114 grados del cielo.

2.3.2. Fuentes de Ruido y Procesamiento de Imágenes

Clave para tener datos de alta calidad es tener un buen “SNR,” o *signal-to-noise ratio* en inglés. El SNR es un término que define la razón entre una “señal” (en este caso, la luz recibida directamente del objetivo que queremos analizar) y el “ruido” que podría contaminar la señal. Para imágenes astronómicas, existen varias fuentes de ruido: hemos descrito el ruido térmico y el ruido de lectura, pero también existe ruidos intrínsecos a la imagen propia, como la luz del fondo o “background” que se suma a la señal del objetivo, fluctuaciones en la señal recibida debido a la atmósfera y el clima, entre otras [12]. Mientras mayor sea el SNR, mejor será la calidad de la señal y la confianza en los resultados.

Típicamente, se asume que la mayoría de las fuentes de ruido siguen una estadística de Poisson, donde el valor del ruido o la incertidumbre es proporcional a la raíz cuadrada de la señal misma [2]. Para las imágenes astronómicas tomadas en un CCD, existe una ecuación típica que se usa para estimar el SNR de una imagen: la “ecuación del CCD” descrita inicialmente por Mortara & Fowler (1981) [16]:

$$SNR = \frac{N_S}{\sqrt{N_S + n_{pix}(N_{SKY} + N_D + N_R^2)}}$$

En esta ecuación, N_S es la señal: el número total de fotones recibidos del objeto de la observación. Los términos del denominador son los términos de ruido más importantes. Primero se tiene la raíz

cuadrada de N_s , el ruido Poisson intrínseco en la señal misma por su naturaleza estadística. Luego se tiene el término representando el número de fotones que viene del cielo, fondo, o background (N_{SKY}). Sigue el número de electrones generados por “corriente oscura,” o *dark current*, el ruido que ocurre debido a la producción de electrones cuando el detector está a oscuras: pueden ser electrones térmicos, como también generados por un efecto fotoeléctrico interno en el semiconductor (N_D). Finalmente, se tiene el número de electrones generados durante la lectura (N_R) – este último término no se debe a una fuente de estadística de Poisson, así que entra al denominador como su valor propio, y no la raíz cuadrada del valor. Mientras que N_s es la señal total de la fuente, N_{SKY} , N_D , y N_R^2 son el ruido de electrones generados por pixel, así que multiplican por el número de pixeles n_{pix} antes de pasar por la raíz cuadrada.

En un CCD típico, los últimos tres términos pueden ser o suficientemente pequeños, o reducidos durante el procesamiento de datos, tal que el término N_s domina el denominador. De ser así, el SNR terminaría siendo $\sim N_s / \sqrt{N_s} = \sqrt{N_s}$, un ruido de Poisson ideal. Para fuentes “brillantes,” donde N_s domina, este valor termina siendo una buena aproximación del error total. Para fuentes menos brillantes, o CCDs más imprecisos, se pueden agregar más términos de error a la ecuación CCD (e.g. un ruido por la digitalización resultando de un alto nivel de ganancia, o un término representando un error al estimar el nivel de fondo de la imagen) [2]. En la práctica, para los CCDs que utilizan la mayoría de los astrónomos, las ecuaciones presentadas previamente son suficientes.

Como hemos descrito brevemente en la sección anterior, existen métodos estándares para estimar algunas de las fuentes de error más comunes en las imágenes astronómicas con CCD, y procesar las imágenes previamente al análisis para compensar o reducir estos errores. Típicamente estos métodos involucran la toma de una serie de imágenes bajo diferentes condiciones, construidas para aislar una fuente de error particular, estimar el nivel de ese error, y promediar o restarlo de las observaciones astronómicas, como corresponda. Hay tres diferentes tipos de imágenes de calibración de este tipo:

1. Una toma “bias” (*bias frame*) es una imagen, tomada en la oscuridad, con un tiempo de exposición cero. Bajo estas condiciones, la única señal electrónica en la imagen proviene del

ruido de lectura, que depende únicamente del proceso de lectura de la imagen (ver sección 2.3.1) y es independiente de otros parámetros de la observación, como el tiempo de exposición. Generalmente se toma una serie de tomas *bias*, se promedian las tomas para obtener una buena estimación del ruido de lectura por pixel, y se restan los valores de esta toma de las imágenes astronómicas con la intención de sustraer la contribución del ruido de lectura de las imágenes finales.

2. Una toma oscura (*dark frame*) es una imagen, tomada en la oscuridad completa (usualmente con el telescopio cerrado y tapado), con un tiempo de exposición usualmente igual al tiempo de exposición de las imágenes astronómicas. El propósito de estas tomas es estimar el ruido oscuro/térmico – debido a que este ruido está siendo generado durante las exposiciones, se asume que el nivel de corriente oscura generada escala linealmente con (o al menos es proporcional a) el tiempo de exposición de la imagen, entonces típicamente se toman imágenes *dark* con este mismo tiempo de exposición. Similar al caso *bias*, generalmente se toma una serie de tomas *dark*, se promedia el valor de señal de las tomas, y se resta esta contribución de las imágenes astronómicas para reducir el ruido oscuro. Cabe notar que dentro de las imágenes *dark*, existirá la contribución del ruido de lectura también, entonces si se hacen tomas *dark*, no es necesario generar tomas *bias*. Sin embargo, en varios observatorios profesionales (como el observatorio CTIO donde hicimos nuestra colección de datos), el CCD usualmente se mantiene a temperaturas bastante bajas a través de refrigeración activa – bajo estas condiciones, el ruido térmico es esencialmente ignorable, y tomas *dark* no son necesarias. En ese caso sí sería importante hacer tomas *bias*.
3. Las tomas de campo plano (*flat field frames*, o *flat frames*) son imágenes de una fuente de luz uniformemente iluminada de alta señal por un tiempo de exposición fijo. El propósito de estas tomas es de corregir variaciones en la respuesta individual de cada pixel del CCD a la misma cantidad de luz. Cada pixel puede reaccionar diferentemente a una igual cantidad de fotones que se dirige hacia ella; esto puede ocurrir por varias razones, desde defectos en el chip hasta polvo cubriendo el lente o el pixel. Si se expone el CCD a una fuente de luz uniforme, estas variaciones individuales se resaltarán en la toma plana, y se pueden corregir

estas variaciones. Fuentes de luz para tomas planas en un telescopio científico tienden a ser una pantalla blanca iluminada dentro del domo del telescopio (*dome flats*), pero típicamente se pueden también usar el cielo nocturno, mañanero, o crepúsculo (*sky flats*) u otra fuente de luz uniforme. Se toma una serie de *flats* con el mismo tiempo de exposición de las imágenes, para cada filtro de luz a utilizarse. Luego se promedian las tomas para caracterizar la variación de respuesta por pixel, y se calibran las imágenes astronómicas basándose en este *master flat*.

A continuación, en las Figuras 5 y 6, mostramos ejemplos de nuestras tomas *bias* y *flat*. Bajo indicaciones de los operadores de nuestro telescopio, hacer tomas *dark* era innecesario para nuestro análisis de datos.



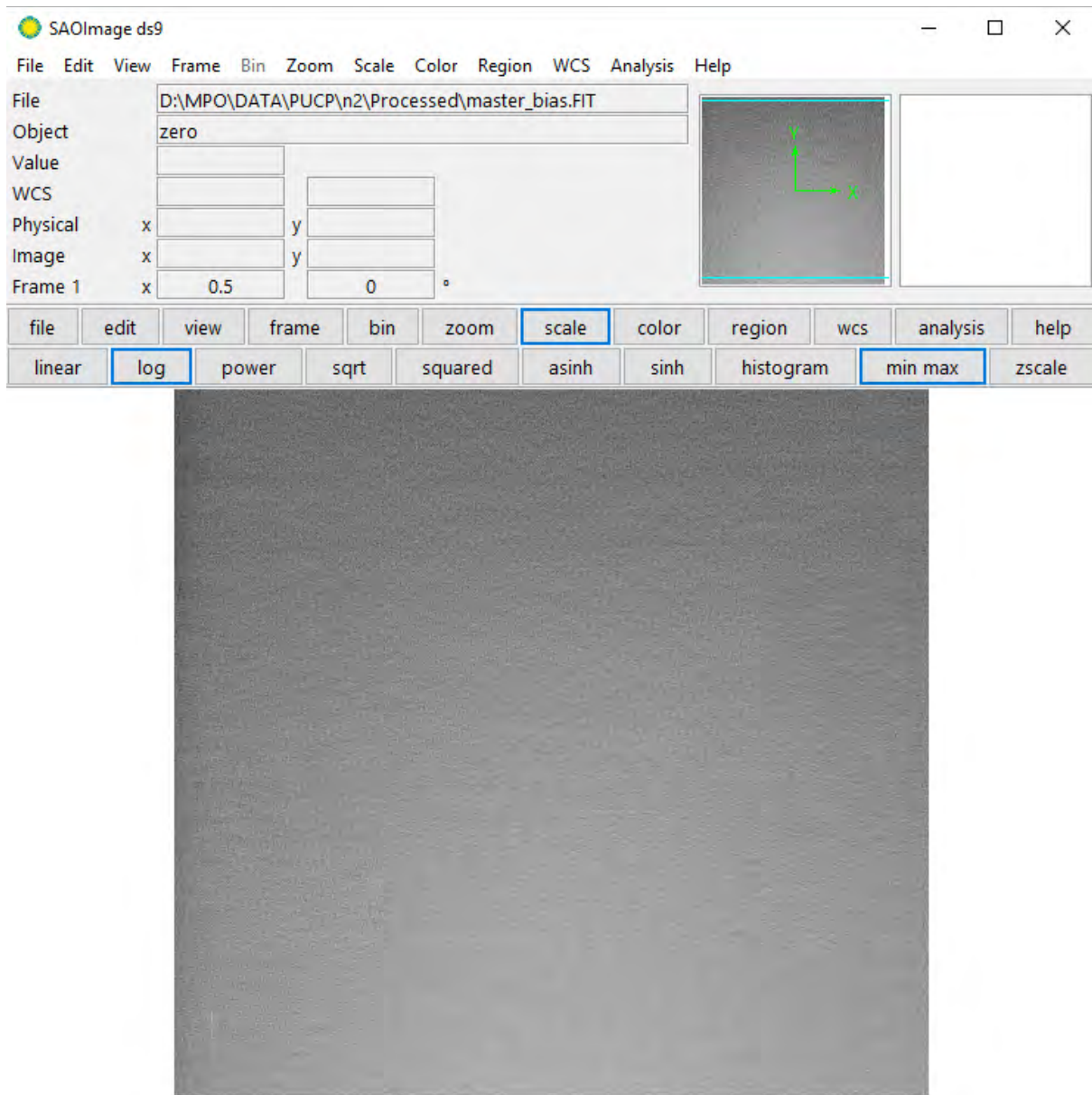


Figura 5: Toma *master bias* generada con imágenes del telescopio SMARTS 0.9m en CTIO. Los valores en ADUs de la imagen varían en el rango 1275 ± 10 ADU.

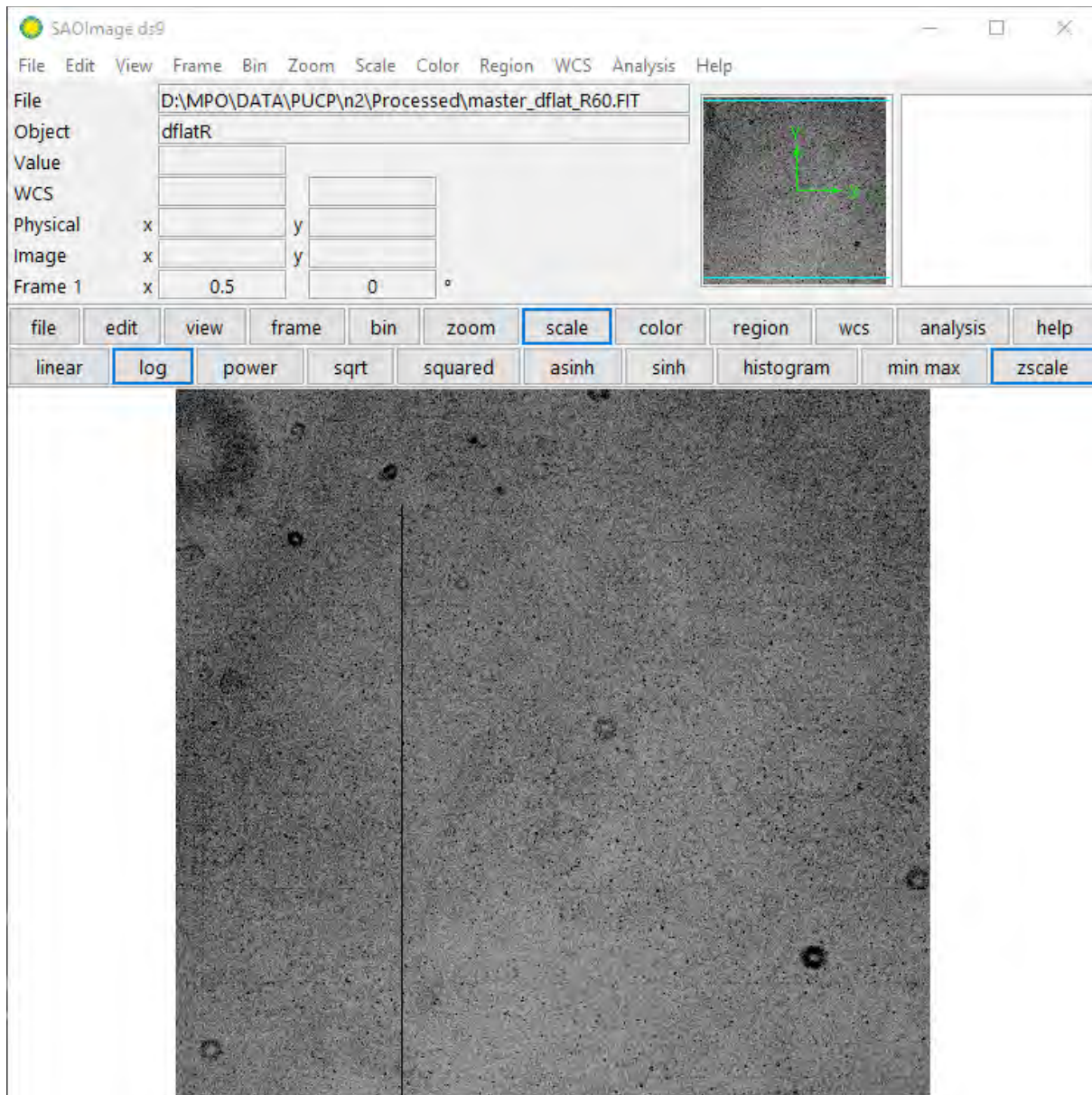


Figura 6: Toma *master flat* generada con imágenes del telescopio SMARTS 0.9m en CTIO. Los anillos visibles en la imagen corresponden a partículas de polvo; la línea vertical oscura es un artefacto del CCD.

Una fuente de error importante que no es compensable con estos métodos de reducción de datos, lamentablemente, son errores, incertidumbres, y ruido debido a la atmósfera o el clima. Típicamente, para tener buena data con baja incertidumbre, se desea tomar imágenes con cielos claros y de baja humedad. Sin embargo, debido a circunstancias fuera del control del observador, a veces el clima durante las noches de observación no es ideal, y esto afecta la calidad de la data.

Al pasar a través de la atmósfera, los fotones interactúan con átomos y moléculas en ella, y son desviados o distorsionados de su camino al telescopio. Esto resulta en un fenómeno conocido como el *seeing* – las fuentes de luz en nuestras imágenes se agrandan, ocupando un mayor número de píxeles, volviéndose más borrosas mientras el seeing aumenta. Esto usualmente es causado por alta humedad o diferencias en temperatura entre diferentes capas de aire en la atmósfera, afectando el índice de refracción en cada capa [12]. El seeing se mide como el FWHM (“full-width at half-maximum” o la *anchura a media altura*) del perfil de una estrella típica en una imagen astronómica, en segundos de arco (“arcsec”). Mayor seeing lleva a menor precisión y exactitud en los resultados del análisis fotométrico, y por ende mayor incertidumbre. Para tener excelentes resultados científicos, un seeing ideal es alrededor de 0.5 – 1.0 arcsec.

Otro fenómeno relacionado es el fenómeno de *extinción*. Esta es la disminución del brillo de un objeto astronómico, debido al hecho que la luz se absorbe o se pierde en la atmósfera. Las causas de la extinción son parecidas a las del seeing, pero el efecto es de reducir el número de fotones que llegan al CCD, en vez de separarlos sobre un mayor área de píxeles. La extinción cambia con la posición del objeto fuente en el cielo (mientras más cerca al horizonte, más masa atmosférica se encuentra entre la fuente y el telescopio, y por ende mayor el nivel de extinción), y también bastante con la humedad y el clima – vapor, nubes, neblina, humo, y otros factores que afectan la transparencia del cielo causarán extinción; y con menor señal de fotones llegando al telescopio, menor será el SNR, y más significativas serán las incertidumbres [12].

Finalmente, la Luna frecuentemente es otra fuente de angustia para las observaciones astronómicas – debido a su brillo, la Luna llena o cerca-a-llena tiene la tendencia de dominar completamente sobre fuentes comparativamente menos potentes, como asteroides y estrellas que se encuentran cerca a la Luna en la esfera celeste. Intentar observar objetos poco brillantes cerca a la Luna es normalmente una tarea vana, ya que el nivel de fotones de fondo o “background” será tan alto que ahogará la señal proveniente de otras fuentes cercanas.

Lamentablemente, estas últimas fuentes de error son cosas con las que el astrónomo debe lidiar al momento de hacer observaciones, y afectan la calidad de la data directamente.

2.3.3. Fotometría de Apertura

Habiendo generado las tomas de calibración, y aplicado estas reducciones a las imágenes astronómicas para reducir el ruido lo más posible, se procede a analizarlas para extraer la data fotométrica que buscamos. Para este proyecto, utilizamos un proceso que llamamos *fotometría de apertura* para hacer este análisis.

La técnica de fotometría de apertura tiene el propósito de aislar únicamente los fotones, electrones o ADUs provenientes del objeto astronómico que se quiere analizar (en este caso, un asteroide), restando la señal proveniente del fondo y otras fuentes en la imagen. Con esto se puede generar una *magnitud instrumental* para el objeto y para una serie de fuentes conocidas en la imagen, típicamente estrellas de referencia cuyas magnitudes aparentes están registradas en catálogos astronómicos confiables. La magnitud instrumental es un valor de la “magnitud” de una fuente según los valores internos de ADUs de las imágenes, que son proporcionales a (pero no directamente equivalentes a) el brillo real de esa fuente. Por lo tanto, la magnitud instrumental es proporcional a la magnitud aparente real de la fuente. Utilizando catálogos astronómicos y las fuentes de referencia como calibración, se puede establecer una conversión de magnitud instrumental a magnitud aparente derivada para el objeto en cuestión. Aplicar este proceso a cada una de nuestras imágenes permite analizar la evolución de la magnitud del objeto con el tiempo, armar curvas de luz, y calcular periodos de rotación para los asteroides a analizarse.

El procedimiento de fotometría de apertura involucra la generación de una apertura circular en la imagen, alrededor del objeto en cuestión, tal que la apertura rodea completamente la señal proveniente del objeto, pero no contiene ni una otra fuente astronómica dentro de ella. Se asume que toda la señal dentro de esta apertura proviene del objeto mismo, o del fondo del cielo (o *background*), ya que otras fuentes de ruido han sido reducidas previamente. Luego, se genera un anillo de ancho fijo alrededor de esta apertura – esta vez, el anillo contiene únicamente señal proveniente del fondo del cielo, y no del objeto propio (ni de algún otra fuente de luz).

Todos los valores de ADUs dentro de la apertura se suman – esta es la contribución de la señal del objeto y del fondo. Luego, se obtiene el valor medio de ADUs *por pixel* de los píxeles dentro del anillo – esto nos da una medida de la señal de fondo celestial en el área del cielo alrededor del

objeto. Finalmente, se resta el valor calculado del fondo por pixel, multiplicado por el número de píxeles dentro de la apertura, a la suma de los ADUs dentro de la apertura. En principio, este procedimiento debería restar toda la contribución de luz del fondo celestial, dejando únicamente los ADUs provenientes del objeto, y permitiendo el cálculo de magnitud instrumental para el objeto en esta imagen utilizando este valor. En la práctica, este valor también se puede normalizar con el tiempo de exposición de la imagen para obtener el número de ADUs por segundo (sabiendo la ganancia, esto sería equivalente al número de fotones recibidos y/o fotoelectrones generados por segundo debido a la fuente objeto).

Por ejemplo, digamos que se genera una apertura alrededor de una fuente astronómica que contiene 100 píxeles, y el número total de ADUs dentro de la apertura es de 85,000. Luego se genera un anillo alrededor de esta apertura, y se encuentra que la señal de fondo en este anillo es de 345 ADUs por pixel. El número de ADUs totales provenientes de la fuente sería de $345 \cdot 100 = 34,500$ ADUs, y por ende la señal total proveniente de la fuente es de $85000 - 34500 = 50500$ ADUs. Luego, si se quiere normalizar esta señal y se conoce que la imagen fue expuesta por 180 segundos, se puede normalizar la señal a $50500 / 180 = \sim 280.6$ ADU/s.

El tamaño de las aperturas y los anillos a aplicarse sobre las fuentes en cada imagen generalmente es decidido por experiencia, o prueba y error (para un ejemplo, ver la Figura 7). La apertura debe ser lo suficientemente pequeña para tener un alto SNR (que la mayoría de la señal dentro de la apertura sea de la fuente) y no ocupar el espacio de otras estrellas o fuentes astronómicas contaminantes, pero también lo suficientemente grande para que toda la señal proveniente de la fuente caiga dentro de la apertura, y no se pierda. El anillo debe ser lo suficientemente grande para tener una buena estadística de conteo, y no ser sesgada por la aparición de rayos cósmicos u otros eventos transientes, pero también lo suficientemente pequeño para no ocupar el espacio de otras fuentes astronómicas cuya luz puede contaminar la medición del fondo. Finalmente, el número de píxeles dentro del anillo debería ser mucho más grande que dentro de la apertura; típicamente se construyen el anillo y la apertura tal que el ancho del anillo es de la misma longitud (en píxeles) que el diámetro de la apertura [2][12].

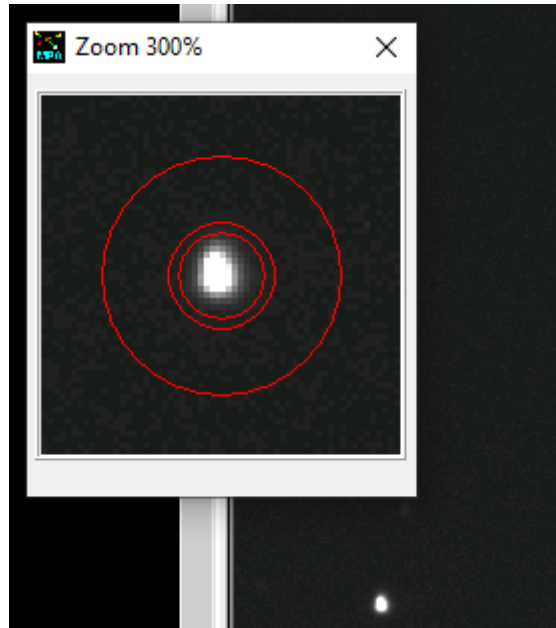


Figura 7: Visualización de la generación de apertura y anillo alrededor de una estrella en una de nuestras imágenes astronómicas, para el proceso de fotometría de apertura utilizando el software *MPO Canopus*. La apertura y el anillo están separadas por una zona muerta pequeña para evitar el doble conteo de píxeles.

Para cada imagen, se generan aperturas y anillos alrededor de la fuente objetivo (el asteroide para este proyecto), y para una serie de estrellas de referencia cuya señal es alta, su magnitud es conocida y uniforme (e.g. no son estrellas variables), y están registradas en catálogos astronómicos confiables. Se procede a realizar la fotometría de apertura y calcular una magnitud instrumental para el objeto y las estrellas ancla. Finalmente, comparando las magnitudes instrumentales de las estrellas de referencia con sus magnitudes conocidas en un catálogo, se puede generar (a través de un algoritmo de regresión lineal) una ecuación o factor lineal que convierte las magnitudes instrumentales en magnitudes aparentes derivadas. Aplicando esta conversión al objeto fuente, se puede calcular entonces la magnitud aparente del objeto en esa imagen en particular.

Este procedimiento se repite para cada imagen a analizar, obteniendo magnitudes derivadas para el asteroide en cada una de las imágenes. De tal manera, se puede ver la variación en la magnitud del asteroide en el tiempo, y armar una curva de luz que cubre la rotación del asteroide durante el periodo de observación del mismo.

2.3.4. MPO Canopus

El proceso de fotometría de apertura se puede hacer manualmente, a través de algoritmos escritos en lenguajes de programación como Python, que permiten no solo aplicar los algoritmos sino también hacer la búsqueda de catálogos astronómicos en el mismo código. Sin embargo, para este proyecto, se decidió utilizar el programa profesional de fotometría *MPO Canopus*, escrito y distribuido por el astrónomo Brian D. Warner [3].

Este software es un programa que permite realizar el proceso entero de fotometría, desde el procesamiento y reducción de imágenes, hasta la fotometría de apertura y calibración con catálogos astronómicos, a través de su interfaz. El software permite también la visualización de curvas de luz, y contiene dentro de él un algoritmo de análisis de Fourier de curvas de luz “FALC” desarrollado por Alan Harris [17] y modificado por Petr Pravec [18].

El análisis de Fourier es una técnica de análisis de señales basada en la transformada de Fourier: una construcción matemática que permite transformar una señal del espacio temporal o real a un espacio de frecuencias. Esta transformada permite separar una señal en los componentes sinusoidales periódicos de los cuales está compuesta [19]. Si existe un componente fuertemente periódico en la señal, este se verá reflejado en el espectro de frecuencias al momento de transformar la señal. Por ejemplo, si pasáramos los datos resultantes del análisis fotométrico de un asteroide por un algoritmo de Fourier correctamente construido, la frecuencia de la señal (y por lo tanto, su periodicidad) debería resaltarse en el análisis. Esto permitiría la reconstrucción del periodo de rotación del asteroide y su curva de luz.

A través del algoritmo FALC, los astrónomos que utilizan MPO Canopus pueden modelar diversas hipótesis y periodos de rotación, con diferentes órdenes de Fourier y periodicidades, sobre la curva de luz de un asteroide, y encontrar los periodos que mejor concuerdan con la data obtenida. Decidimos utilizar este software debido al nivel de confianza que presenta, y su versatilidad y uso extendido en el campo de fotometría de asteroides [3] [20].

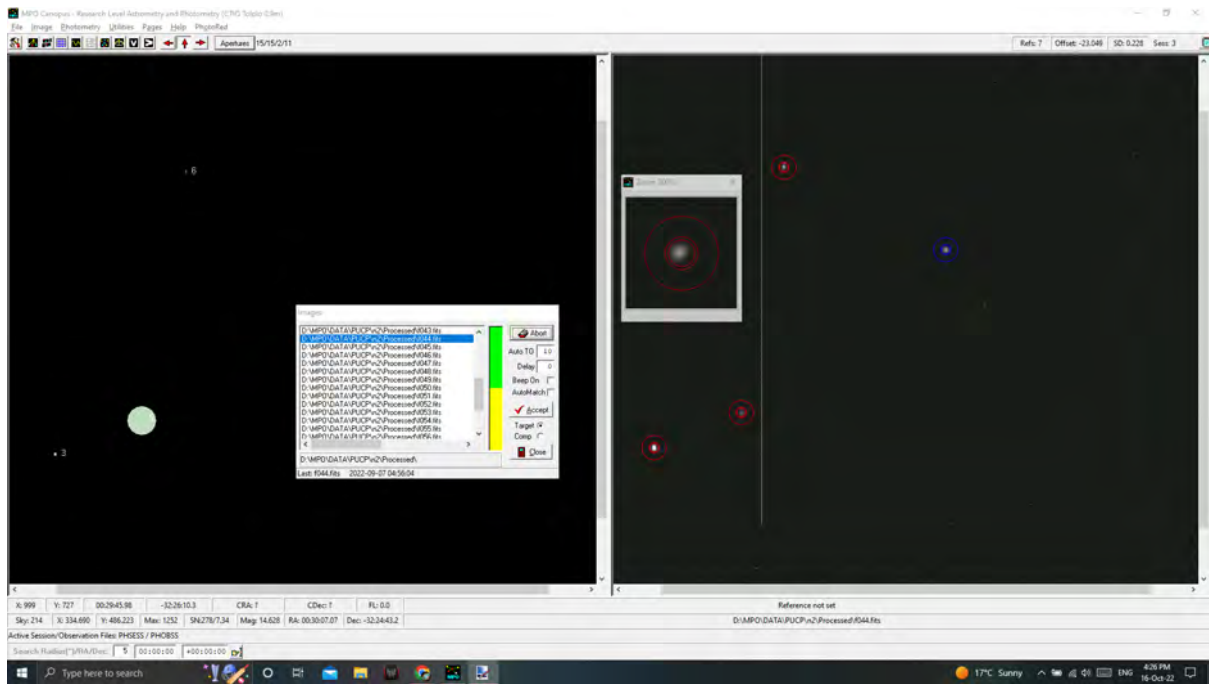


Figura 8: Interfaz principal de *MPO Canopus* al momento de realizar fotometría de apertura

2.4. La misión DART

La misión DART (“Double Asteroid Redirection Test” en inglés) es una misión espacial liderada por la NASA, y el primer ensayo de defensa planetaria directa en la historia. Lanzada originalmente en noviembre del 2021, la sonda impactadora autónoma DART colisionó con Dimorphos, un asteroide satélite que orbita el NEA Didymos, el 26 de septiembre del 2022, a una velocidad de más de 6 km por segundo (22,000 km por hora). El objetivo principal de la misión DART es observar el efecto del impacto sobre la órbita de Dimorphos, bajo la intención de modificar su órbita intencionalmente a través del impacto. Esto serviría como un ensayo de defensa planetaria, por si una solución de este tipo sea requerida en el futuro para desviar la órbita de un posible colisionador a la Tierra.

Según el comunicado de prensa oficial de la misión DART [21], la realización de esta misión cumpliría tres metas. Primero, sería un ensayo directo de un método de desviación de un asteroide, demostrando que con tecnología e ingeniería moderna, una desviación de impacto cinético sobre un objeto colisionador peligroso es posible. Segundo, las observaciones detalladas del sistema

Didymos-Dimorphos antes y después del impacto serían importantes para confirmar, descartar, y mejorar los modelos científicos y computacionales sobre impactos de este tipo, y así ayudar a estar mejor preparados si una desviación real en el futuro fuera necesaria. Finalmente, La misión DART sería una buena oportunidad para poner a prueba nuevas tecnologías, como el sistema autónomo de guiado “SMART Nav” que dirigió la sonda hacia el asteroide durante las últimas 4 horas antes del impacto de una manera completamente autónoma, sin tener un operador manual. Además de este sistema, nuevas tecnologías de paneles solares y propulsores de iones fueron utilizadas como parte de la misión.

El sistema Didymos-Dimorphos se eligió como el objetivo de la misión DART por múltiples razones. Primeramente y principalmente, Didymos es un NEA relativamente conocido y brillante, observable claramente con telescopios desde el planeta Tierra, y su proximidad en ciertas etapas de su órbita permite también a la sonda DART llegar a él con costos y tiempo de viaje razonables. Segundo, Didymos es un sistema que no posee ningún riesgo de impacto con la Tierra, aún con la desviación y la transferencia de energía proporcionada por la colisión. Finalmente, la órbita de Dimorphos alrededor de Didymos, desde la perspectiva de la Tierra, es una órbita eclipsante – con el satélite menor pasando en frente de, y detrás de, el asteroide principal desde la perspectiva de un observador en la Tierra. Esto permite que un observador que esté mirando el asteroide durante el tiempo de órbita completo de Dimorphos vea los cambios en el brillo del objeto en la curva de luz durante los eclipses primarios y secundarios del sistema [22].

Se conocía previo al impacto que el asteroide Didymos tenía un tamaño aproximado de 780 m de diámetro, mientras que su satélite Dimorphos tenía un diámetro de alrededor de 160 m. Didymos rota alrededor de su eje cada 2.26 horas, y previas observaciones de radio del asteroide mostraban que su forma era relativamente circular, con una cresta alrededor de su ecuador, “recordando como un trompo de juguete” (trad.). Mientras tanto, todo lo que se sabía de Dimorphos era que orbitaba Didymos cada 11 h 55 m, probablemente rotaba con ese mismo periodo (mostrando siempre la misma cara hacia Didymos), y que tenía una forma algo elongada – aunque no se sabía con seguridad esta última conclusión [21]. Las masas de los dos asteroides tampoco se habían medido

directamente, pero estimaciones basadas en observaciones previas estimaban la masa de Dimorphos en alrededor de 5 mil millones de kg, en comparación a los 570 kg de la sonda impactadora [22].

Los efectos completos de la colisión sobre la órbita de Dimorphos eran difíciles de predecir y modelar, ya que el impacto ocurrió a velocidades mayores de 22,000 km por hora, transfiriendo una gran cantidad de energía. Además de eso, el impacto expulsó una gran cantidad de material de la superficie del asteroide hacia el espacio, añadiendo a la transferencia de momento de manera significativa, y cuya magnitud dependía de la forma y composición del satélite, que no se conocía en detalle [21]. Para poder entender en detalle los resultados exactos de la colisión, sería necesario tener una gran cantidad de observaciones de alta calidad del sistema Didymos-Dimorphos antes y después del impacto. Por esa razón, se eligió la fecha de 26 de septiembre del 2022 como la fecha de impacto de la sonda, ya que en esa fecha, Didymos estaría casi en su mínima distancia orbital a la Tierra (alrededor de 11 millones de km), la proximidad permitiendo mejores observaciones telescópicas desde la superficie de nuestro planeta [22].

Nuestras fechas (septiembre del 2022), ubicación (el observatorio CTIO en Cerro Tololo, Chile), y objetos a observar (NEAs), nos pusieron en las circunstancias perfectas para poder observar a Didymos con el telescopio SMARTS 0.9 m. Debido a estas razones, y la importancia científica de la misión DART, siguiendo sugerencias de astrónomos y miembros del equipo de investigación de DART, decidimos incorporar a (65803) Didymos como uno de nuestros principales asteroides en nuestra lista de observación durante nuestra estadía en el observatorio. Concluyendo las observaciones, reducción de imágenes, y análisis, los resultados de nuestras observaciones de Didymos fueron enviadas al equipo DART para formar parte oficial del banco de conocimiento y observaciones del sistema Didymos de la misión.

Capítulo 3: Metodología y Observaciones

3.1. Selección de Asteroides

El primer paso en la metodología del trabajo de investigación sería formar una lista preliminar de asteroides que planeáramos observar en Cerro Tololo. Esta lista idealmente contendría 8-10 NEAs, y una vez en el observatorio, se refinaría aún más dependiendo de las circunstancias del clima, la Luna, y las posibilidades de observación de cada objeto. Para hacer esta selección, se utilizó principalmente la herramienta “*What’s Observable*” de la NASA/JPL (<https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbwobs.html#/>). Esta herramienta permite poner el lugar donde planeamos observar (para nosotros es el Observatorio Ínter-Americano Cerro Tololo), llenar un formulario de restricciones que queremos imponer sobre los resultados (“constraints”), y las fechas de observación. Con esto devuelve una lista de todos los asteroides y cometas que son observables durante esas fechas, en esa ubicación, bajo las restricciones impuestas. Esta información se pudo corroborar con otra herramienta similar, la herramienta “CALL” de la página [minorplanet.info](https://minorplanet.info/php/call.php) (<https://minorplanet.info/php/call.php>).

Las restricciones que pusimos sobre los resultados de las herramientas fueron las siguientes:

1. El asteroide está bajo la categoría “NEA”; es un Asteroide Cercano a la Tierra
2. El asteroide es visible por al menos dos horas en cada una de las cuatro noches de observación seleccionadas (del 6 de Septiembre al 9 de Septiembre del 2022), entre el oscurecer y el amanecer (hora local), desde el observatorio seleccionado (CTIO en Cerro Tololo, Chile – el Código del Observatorio es 807).
3. El asteroide tiene una magnitud aparente en la banda V ≤ 20 . Este es el límite mínimo de visibilidad que decidimos tener para nuestros asteroides, teniendo en cuenta las especificaciones del telescopio que íbamos a utilizar. Nuestro telescopio utilizaba un sistema de filtros ‘Johnson-Cousins’ – bajo este sistema, el filtro V (“visible”) es un filtro

óptico que únicamente deja pasar bandas de luz con longitudes de onda centradas alrededor de 547.5 nm; el filtro R (“rojo”) se centraría alrededor de 640 nm [23].⁵

4. El asteroide tiene un ángulo mínimo de elevación $>50^\circ$ en las noches de observación. Esto se impone para asegurar que el asteroide esté suficientemente alto sobre el horizonte por varias horas, para que el telescopio pueda apuntar a él y seguirlo durante este tiempo.

Estas restricciones nos dieron una lista de 95 NEAs como posibles objetivos. El siguiente paso fue filtrar esta lista manualmente bajo otra serie de condiciones, esta vez menos estrictas:

1. La tasa de movimiento del asteroide en el cielo (“Rate of Sky Motion”) < 200 arcsec/h. Esta es la velocidad aparente del asteroide en el plano del cielo; mientras más rápido se mueve, más distorsionado será su perfil durante un tiempo fijo de exposición de la cámara. Esta restricción es flexible ya que si el asteroide es suficientemente brillante, el tiempo de exposición necesario para tener una buena imagen sería menor, entonces se puede minimizar el efecto de una tasa de movimiento rápida. Además, existen métodos para compensar la distorsión de un asteroide en las imágenes, como haciendo un seguimiento del asteroide a la mitad de su velocidad, para así distorsionar igualmente el asteroide y las estrellas, y utilizando aperturas en forma de píldora para la fotometría [24].
2. El periodo de rotación del asteroide es menor que 6-7 horas, así se podría observar más de una rotación completa durante una noche. Para poder extraer un buen periodo de rotación de una curva de luz de un asteroide, los datos fotométricos deben extenderse sobre el periodo de rotación completo y hasta más; idealmente se observarían entre 1.5-2 rotaciones para poder estar seguros de su periodicidad. Esta restricción es algo flexible ya que se pueden combinar datos de múltiples noches en una misma curva de luz, pero idealmente serían datos de la misma noche para tener similares condiciones observacionales.
3. El asteroide no presenta muchas curvas de luz u observaciones previas. De tal forma, aseguramos contribuir con la caracterización de dicho NEA. Esta condición también es

5 Los detalles específicos de todos los filtros utilizables con el telescopio SMARTS 0.9m se pueden encontrar en la página dedicada del consorcio: <http://www.astro.gsu.edu/~thenry/SMARTS/0.9m.filters.text>

flexible dependiendo de las necesidades u oportunidades científicas que aparezcan, como la oportunidad de observar Didymos en las semanas previas al impacto de la misión DART.

Para caracterizar esta última condición, se realizó una búsqueda de observaciones, reportes, y curvas de luz previas de toda la selección de asteroides en diversas fuentes y bases de datos de objetos menores. Las fuentes más importantes utilizadas fueron el Índice de Curvas de Luz (Lightcurve Index) del Minor Planet Bulletin (https://mpbulletin.org/index/MPB_LightcurveIndex.pdf), la base de datos del Minor Planet Center (MPC) de la Unión Astronómica Internacional (MPO) (https://www.minorplanetcenter.net/db_search/), y el Asteroid Lightcurve Photometry Database ALCDEF (<https://alcdef.org/>). Los resultados de estas páginas además sirven como una fuente de datos de literatura al momento de hacer el análisis de los resultados.

Habiendo aplicado estas restricciones, se armó una lista preliminar de asteroides que podríamos observar durante el periodo de observación. Esta lista se puede observar en la Tabla 1:

Número de Objeto	Nombre del Objeto	V-Mag	Periodo (h)	Tasa de Mov. (arcsec/h)	Comentarios Adicionales
4401	Aditi	19.6	6.67	51	Periodo un poco alto
31210	1998 BX7	17.2	6.38	45	Periodo un poco alto
66008	1998 QH2	18.5	7.09	124	Periodo un poco alto
86829	2000 GR146	17.8	3.10	76	
154276	2002 SY50	19.5	4.82	36	
161989	Cacus	13.8	3.75	708	Tasa enorme, pero muy brillante
218863	2006 WO127	19.3	3.27	24	
406213	2007 AB2	17.7	8.55	185	Periodo alto, pero poco observado
410088	2007 EJ	18.1	4.56	165	
65803	Didymos	15.3	2.26	161	Objetivo de la misión DART

Tabla 1: Resultados de la selección de NEAs

Finalmente, el último paso requerido antes de hacer las observaciones es asegurar que conocemos las posiciones y las trayectorias de cada uno de los objetos de la Tabla 1 durante las noches de observación, para poder apuntar correctamente el telescopio y observarlas. Esta colección de coordenadas celestiales de los objetos vs. fecha y hora se conocen como *efemérides*. Para extraer las efemérides de cada objeto durante las cuatro noches de observación, utilizamos la herramienta *Miriade VO*, gestionada por el instituto IMCCE del Observatorio de París (<http://vo.imcce.fr/webservices/miriade/?forms>). Esta herramienta nos permite no sólo obtener efemérides para cada objeto de selección durante las noches de observación, pero también visualizar las horas de la noche en las cuales están sobre el horizonte, y su proximidad a la Luna, cuya luz es tan brillante que podría sobrepasar la luz de un asteroide y esconderlo completamente.

A continuación, en las Figuras 9 y 10, hay algunos ejemplos de las figuras que ayudan a visualizar las elevaciones y trayectorias de algunos de los objetos de interés durante las noches de observación, proporcionadas por *Miriade VO* y su sub-herramienta *ViSiON*. Las horas están en tiempo universal (UT); durante las fechas de observación, Chile se encontraba en la zona horaria UT-4.

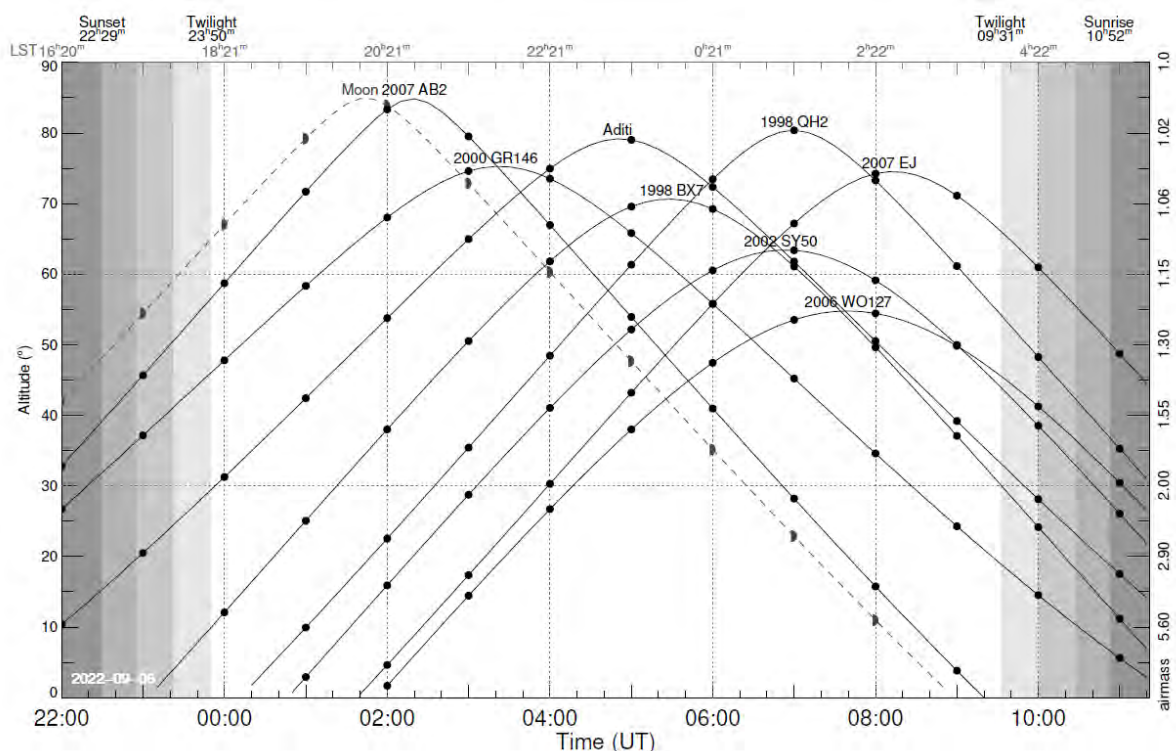


Figura 9: Elevación sobre el horizonte de los asteroides objetivo durante la noche del 06-Sep

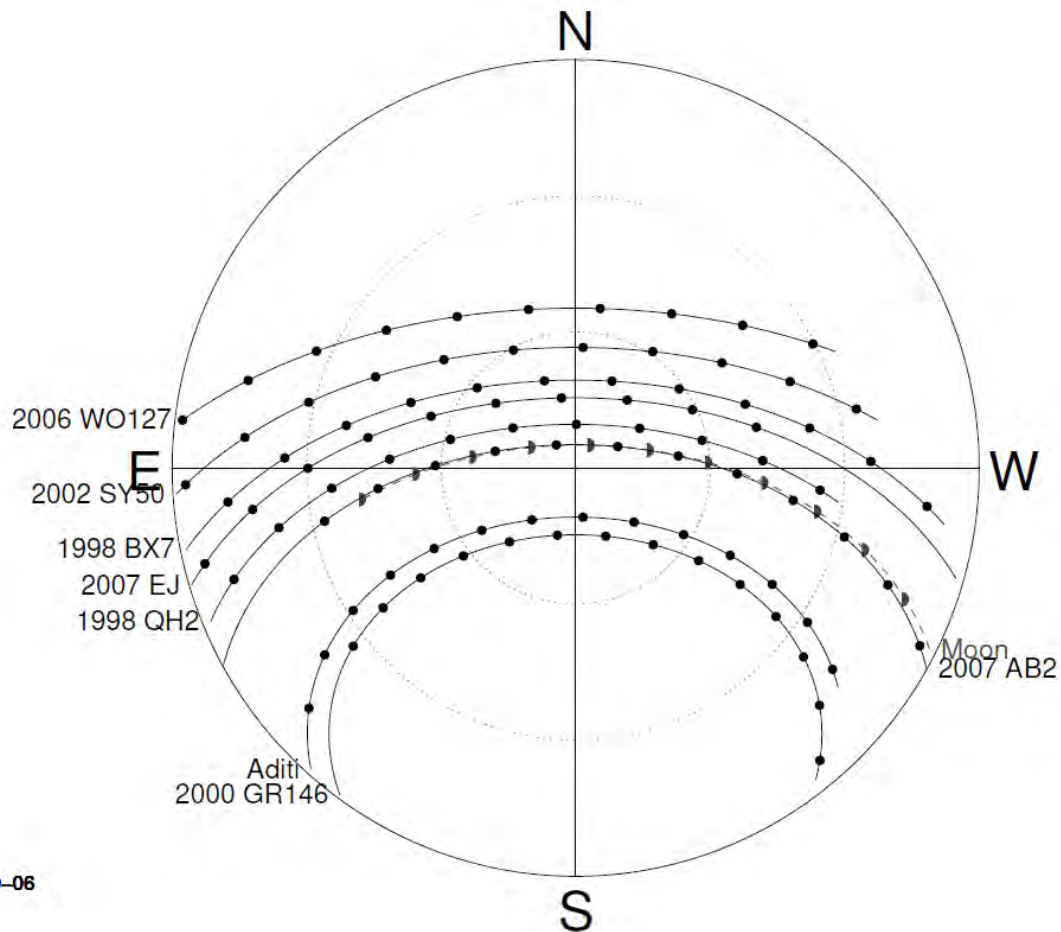


Figura 10: Visualización de la trayectoria en el cielo de los asteroides candidatos durante la noche del 06-Sep

3.2. Proceso de Operación del Telescopio

Los detalles técnicos del telescopio CTIO 0.9m Cassegrain $f/13.5$ se describieron en la sección 2.3.1. El telescopio y sus instrumentos se encuentran dentro de un edificio en la cima de Cerro Tololo. El edificio contiene dentro de sí el domo principal (donde está el telescopio propio, y directamente conectado al telescopio, el CCD, ubicado dentro de un tanque criogénico dewar⁶ lleno de nitrógeno líquido), un cuarto de control (donde están las interfaces que operaban el telescopio, y donde los operadores del telescopio se quedan durante el transcurso de la noche), y diversos cuartos para instrumentos y servicios.

⁶ Recipiente o vaso de vacío inventado por físico escosés James Dewar que almacena criógenos y proporciona aislamiento térmico a sus contenidos.

Durante el día, el telescopio se encuentra en su posición de reposo, con los instrumentos y las computadoras en “standby”, y el domo donde se encuentra el telescopio cerrado, para no exponerlo a la luz del Sol. Por lo tanto, al inicio de una noche de observación, hay que encender los componentes del sistema de control en el orden correcto para su función durante la noche.

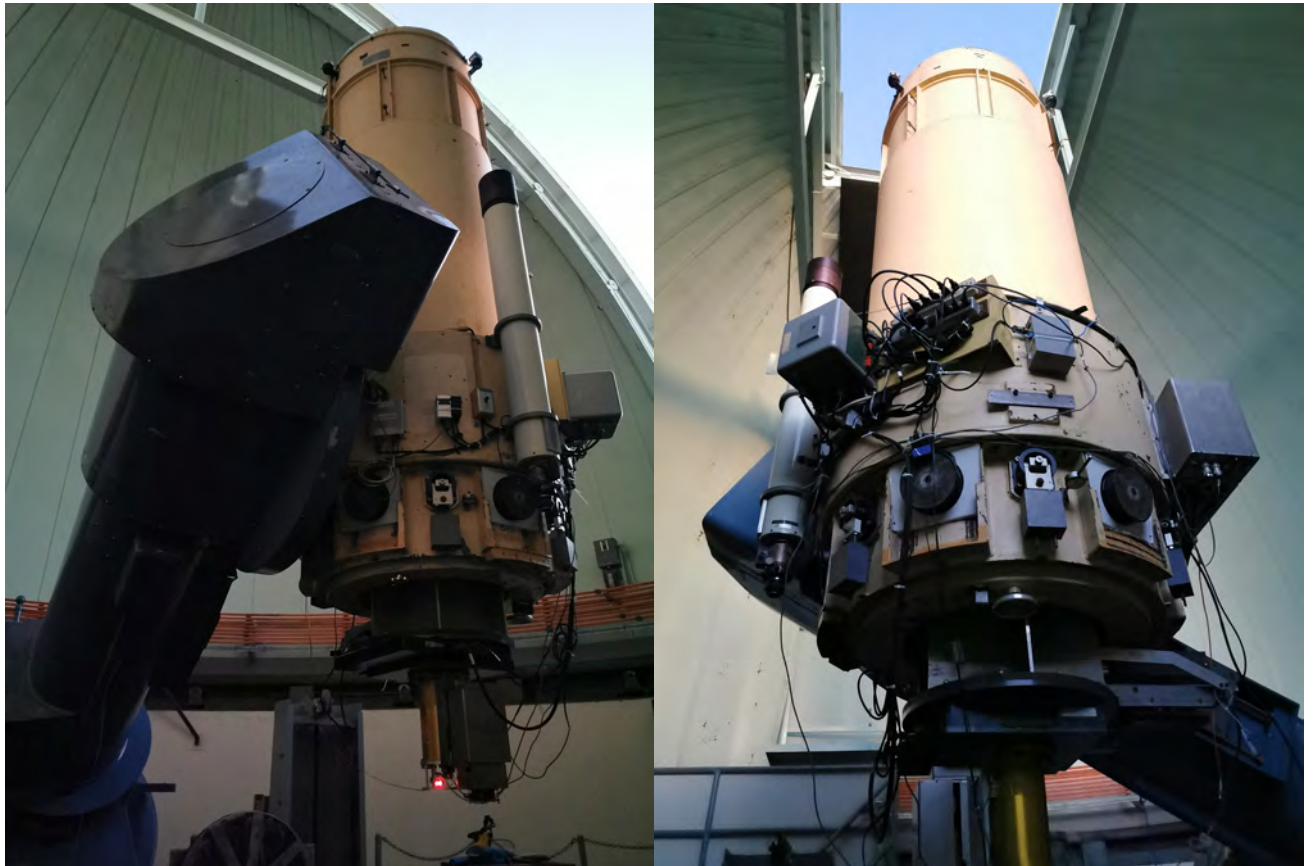


Figura 11: El telescopio utilizado para realizar el trabajo de tesis, en su posición de reposo durante el día.

Dentro de la sala de control hay dos computadoras: una de ellas controla la toma y procesamiento de imágenes, y la otra controla los motores y el seguimiento del telescopio, asegurando que se pueda mover correctamente y que pueda rastrear con precisión el movimiento de la esfera celeste (debido a la rotación de la Tierra), tal que el objetivo del telescopio se mantenga fijo en el mismo punto del cielo. Esto se llama “rastreo sideral”.

El primer paso de la noche es encender los motores del telescopio y del domo a través de la sala de control; esto se hace a través de interruptores mecánicos dentro de la sala. Luego, fuera de la sala de control, hay que prender los ventiladores del domo, y abastecer el dewar de nitrógeno líquido que

se encuentra en el telescopio mismo. Los instrumentos al trabajar emiten calor, y para reducir el ruido térmico y preservar los instrumentos mismos, se utilizan los ventiladores y el nitrógeno para mantenerlos a temperaturas deseadas durante la noche. El CCD, en particular, requiere el abastecimiento del nitrógeno debido a su temperatura ideal de operación de ~ 163 K. Si el telescopio sigue tapado, se utiliza la computadora de control de motores para rotar el telescopio a una posición donde se pueda retirar la tapa del objetivo, y luego se retorna a su posición previa.

Las primeras imágenes que se toman en una noche típica de observación son las tomas *bias* y *flat*, ya que éstas se pueden hacer con el domo cerrado, mientras todavía hay Sol en el cielo (en este telescopio generalmente no se toman *darks* debido al bajo nivel de ruido térmico - se consideran innecesarias). Desde la sala de control se encienden las luces específicas para la toma de *flats* (y se asegura que todas las otras luces del domo estén apagadas); luego, en la computadora de control de imágenes, se ordena la toma de una serie de imágenes del tipo deseado (con el filtro deseado, y para los *flats*, un tiempo de exposición que corresponda a las imágenes a tomarse más adelante). El telescopio automáticamente (si se encendieron correctamente los motores) maniobra a la posición correcta y comienza a tomar las imágenes.

Terminada la toma de *biases* y *flats*, y con el Sol y su luz completamente ocultas bajo el horizonte, se puede comenzar propiamente la toma de imágenes científicas. Desde la sala de control, se apagan todas las luces del domo, y con controles manuales se abre el domo, exponiendo el telescopio al cielo nocturno. Luego se prenden los motores de seguimiento del telescopio y del domo (para que el telescopio pueda rastrear correctamente el movimiento del cielo, y el domo lo siga).

Antes de buscar los objetos que queremos observar en el cielo, hay que asegurar que el telescopio esté correctamente calibrado con respecto a las coordenadas celestiales ecuatoriales⁷. Para hacer esto, dentro de la sala de control hay almanaques de estrellas brillantes cuyas coordenadas son precisamente conocidas. Tomando un almanaque, se elige una estrella que esté visible en el cielo, y con la computadora de control de movimiento, se inserta manualmente las coordenadas de la estrella. El telescopio y el domo (si los motores están correctamente encendidos) giran para apuntar

⁷ Asensión Recta (RA) y Declinación (DEC), equivalentes a longitud y latitud pero para la esfera celestial. Para más información, ver la página "Cosmic Coordinates" del Observatorio Las Cumbres (LCO): <https://lco.global/spacebook/sky/equatorial-coordinate-system/>

hacia las coordenadas, y con la computadora de imágenes, se toma una exposición rápida de la estrella. A partir de esa imagen de prueba, se puede determinar si el telescopio está correctamente calibrado con respecto a las coordenadas y el foco de la imagen. Si hay que añadir un “offset” a las coordenadas para centrar mejor la estrella, o si hay que modificar el foco del telescopio para que la estrella esté correctamente enfocada, esto se puede hacer manualmente desde la sala de control.

Una vez correctamente calibrado, podemos comenzar a tomar imágenes científicas. En la computadora de imágenes, se determina los filtros a utilizarse, el tiempo de exposición requerido, y el número de imágenes a tomar en secuencia. Utilizando servicios de efemérides, se determina las coordenadas celestiales del primer asteroide que queremos observar en el minuto y hora presente. En la computadora de control de movimiento, se inserta esas coordenadas y se mueve el telescopio. Idealmente se toma primero una que otra imagen “borrador”, para ver si las imágenes que salen son las queridas, o si hay que modificar de nuevo las coordenadas, el foco, el tiempo de exposición, etc. Una vez satisfechos, se comienzan a tomar las series de imágenes científicas utilizando la computadora de imágenes en la sala de control.

Este proceso general se repite durante el transcurso de la noche: moviendo el telescopio a nuevas coordenadas, tomando imágenes de prueba, modificando los parámetros requeridos, y tomando series de imágenes científicas. Mientras pasan las horas, algunos asteroides pasan por debajo del horizonte y otros salen por arriba de éste, entonces se va cambiando de objeto de observación. Además, como los asteroides tienen tasas de movimiento en el cielo mucho mayores que las estrellas, hay que apuntar el telescopio a nuevas coordenadas cada vez que el asteroide sale del marco de la imagen. Al punto medio de la noche también hay que volver a abastecer el dewar del telescopio con nitrógeno líquido, para que no se acabe durante la noche. Finalmente, dentro del cuarto de control hay monitores que muestran las condiciones internas de los instrumentos (e.g. temperatura) y las condiciones climáticas del exterior (e.g. temperatura, humedad, seeing). Si ocurre algún imprevisto, o si hay que cerrar el domo o apagar los instrumentos debido a estas condiciones saliendo de los rangos de operación segura, también se puede ver y hacer eso desde ahí.

Al finalizar la noche con la salida del Sol de madrugada, hay que volver a poner los instrumentos y las computadoras en su estado de reposo. Primero, desde la sala de control, se apaga los motores de

seguimiento sideral para que el telescopio deje de moverse. Luego se utiliza la computadora que controla los motores para mover el telescopio primero a una posición que permite volver a tapar el objetivo, y después a su posición de reposo. Se cierra el domo con los controles manuales, y después se apaga el resto de los motores, se apagan los ventiladores, se llena una última vez el dewar con nitrógeno, y procedemos a retirarnos del edificio. El último paso es llenar un reporte explicando a los ingenieros y operadores diurnos de nuestra experiencia durante la noche, para que se pueda hacer el mantenimiento debido de manera informada durante el día.

3.3. Noche 1 – 06-Sep

Las primeras horas de la primera noche fueron dedicadas a aprender a utilizar el instrumento y seguir los procedimientos de encendido, control, y calibración. El Director del Telescopio SMARTS 0.9 m, Dr. Todd Henry, y el estudiante de posgrado Eliot Vrijmoet nos ayudaron con todos estos procedimientos de manera remota, y nos dieron consejos para obtener las mejores observaciones posibles con el telescopio. Uno de estos consejos fue utilizar sólo $\frac{1}{4}$ del chip CCD en vez de el chip entero, ya que no nos parecía necesario tener un gran campo de visión (“Field of View”, o FOV) para poder hacer el análisis fotométrico. La ventaja de este modo de operación del instrumento es que este procedimiento cortaba de manera significativa el tiempo de lectura (“readout”) de cada imagen, dejándonos tomar más imágenes en el transcurso de cada noche. Debido a esto, nuestras imágenes terminaron siendo arreglos de 1074×1024 pixeles, cubriendo 0.401 segundos de arco por pixel, para un FOV de aproximadamente 7 minutos de arco.

Inicialmente quisimos comenzar tomando imágenes de 2007 AB2, ya que era el primer asteroide visible en la noche del 06-Sep (ver Figura 9); pero como se ve en la Figura 10, su proximidad a la Luna hizo inviable esas observaciones. Tuvimos la mala suerte que nuestras fechas de observación asignadas correlacionaban con una Luna casi llena, entonces era imposible sacar buenas imágenes de asteroides que pasaban cerca a la Luna durante las cuatro noches de observación. Sin embargo, aparte de la Luna, el clima estuvo bastante claro, y las imágenes tomadas en esta noche de los otros asteroides observados fueron de buena calidad, con bajo seeing.

Durante las horas de 03:07 y 06:17 UT, se tomaron 35 imágenes de (86829) 2000 GR146, en el filtro V, con un tiempo de exposición de 180s por imagen – de estas, 27 eran de suficiente calidad para realizar el análisis de manera confiable. Este tiempo de exposición fue elegido después de unos intentos manuales, tomando imágenes de prueba con distintos tiempos de exposición, y comparando la calidad de los resultados. En teoría estas exposiciones eran suficientes para cubrir un periodo de rotación entero del asteroide (~3.10h, según resultados previos), pero en la práctica, para tener un resultado más confiable del periodo de rotación se debería haber observado el asteroide por una o dos horas más, para cubrir al menos una rotación y media.

Durante el transcurso de los días anteriores y el principio de la noche, estuvimos en contacto con el astrónomo Petr Pravec del Observatorio Ondřejov (<https://www.asu.cas.cz/~ppravec/>). El Dr. Pravec es un descubridor prolífico de cuerpos menores, una autoridad en el campo de asteroides, y forma parte del Equipo de Investigación de la misión DART (<https://dart.jhuapl.edu/Team/>). Él nos puso en contacto con otros miembros del Equipo de Investigación, y bajo sus consejos, decidimos enfocar una parte significativa de nuestras observaciones al NEA Didymos, con la intención de extraer la mayor cantidad de data fotométrica de alta calidad del asteroide binario en las semanas antes del impacto. Debido a esta contribución, mi asesora y yo fuimos incorporados como parte del Equipo de Investigación DART.

Con este objetivo en mente, durante las horas de 06:42 y 08:58 UT se tomaron 29 imágenes de (65803) Didymos en el filtro V, con tiempos de exposición de 90s, ya que el asteroide era bastante más brillante que 2000 GR146. Similar al caso previo, estos tiempos eran suficiente para cubrir un periodo de rotación del asteroide, pero un mayor número de observaciones hubiese producido mayor cantidad de datos, y por ende un resultado más confiable. En este caso, la aproximación del amanecer y la necesidad de comenzar los protocolos de cierre del telescopio no permitieron tomar más imágenes durante esta primera noche.

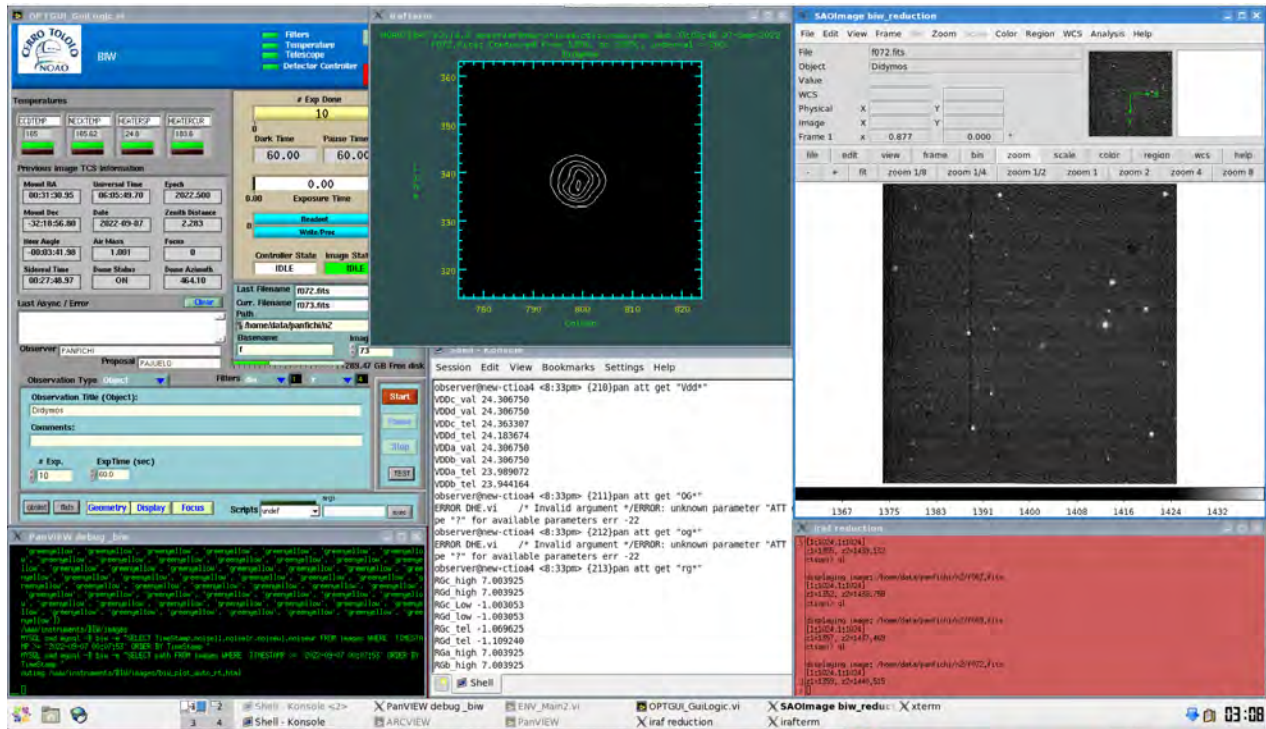


Figura 12: Interfaz virtual de control del telescopio, mostrando las imágenes tomadas (DER.), un zoom del centroide del perfil del asteroide objetivo (CNTR.), y un monitoreo del CCD y la toma de imágenes (IZQ.)

3.4. Noche 2 – 07-Sep

La segunda noche de observación, similar a la primera noche, tenía buen clima y mostraba buen nivel de seeing, dejándonos tomar bastantes imágenes de buena calidad durante la noche. A diferencia de la primera noche, de esta noche en adelante decidimos trabajar principalmente con el filtro R (rojo) en vez de V (visible) en el telescopio. Esta decisión fue tomada debido al hecho que la luz que reciben los instrumentos de los asteroides es luz reflejada del Sol, que emite más en las longitudes de onda R que en V. De ser así, los asteroides son más brillantes en R que en V, lo que permite reducir el tiempo de exposición de las imágenes, y así tomar mayor cantidad de imágenes por noche, teniendo una mejor estadística de resultados.

Durante el primer par de horas de la noche, mientras que Didymos seguía debajo del horizonte, intentamos implementar el método de seguimiento no-sideral descrito por Kolenczuk [24] con observaciones de 2000 GR146. Este artículo describe una metodología donde el telescopio, en vez

de girar siguiendo el movimiento del cielo debido a la rotación de la Tierra (movimiento “sideral”), es movido a una velocidad intermedia entre la velocidad sideral y la tasa de movimiento del asteroide objetivo. Una imagen tomada bajo estas condiciones debería mostrar una distorsión-elongación idéntica entre el asteroide y las estrellas del fondo, permitiendo colocar aperturas en forma de píldora (en vez de circulares) de igual tamaño al asteroide y las estrellas al momento de hacer fotometría de apertura. Este método ayudaría a analizar asteroides cuyas tasas de movimiento son muy altas, y se distorsionarían en el proceso de tomar imágenes de manera sideral.

La implementación de este método de seguimiento resultó ser más difícil de lo esperado, y al mismo tiempo innecesario para los asteroides objetivo (incluyendo Cacus, cuya tasa de movimiento en el cielo era bastante alta, pero se compensaba siendo un asteroide bastante brillante), entonces no se implementó este método para las observaciones siguientes.

Dedicamos la mayoría de la segunda noche a observaciones de (65803) Didymos en el filtro R, tomando 105 imágenes con 60s de exposición entre las 04:17 y 09:28 UT. En este periodo pudimos cubrir alrededor de dos rotaciones enteras del asteroide, con imágenes de buena calidad. Eso sí, sabiendo de la literatura que Didymos es un asteroide binario cuya curva de luz es de baja amplitud y no obviamente bimodal, esperábamos tomar aún más imágenes en las siguientes noches.

3.5. Noche 3 – 08-Sep

Intentamos dedicar la primera mitad de la tercera noche a observaciones de otros NEAs menos observados. Sin embargo, para esta noche la Luna estaba llegando casi a su pico de brillo en el cielo, iluminando claramente el observatorio y ocultando varios de nuestros asteroides objetivo detrás de su luz en las primeras horas de la noche. Intentamos observar en orden: (406213) 2007 AB₂, (86829) 2000 GR₁₄₆, (154276) 2002 SY₅₀, y (4401) Aditi, sin poder resolver los asteroides en las imágenes de prueba.

Durante el transcurso de estos intentos de observación, la humedad subía consistentemente, en un punto sobrepasando el límite de operación del telescopio de 80% humedad, e inundando el observatorio con neblina, como se ve en las imágenes que componen la Figura 13 y las condiciones

ambientales reportadas en la Figura 14. Debido a esto, estuvimos obligados a cerrar el domo y cesar operaciones durante varias horas de la noche.

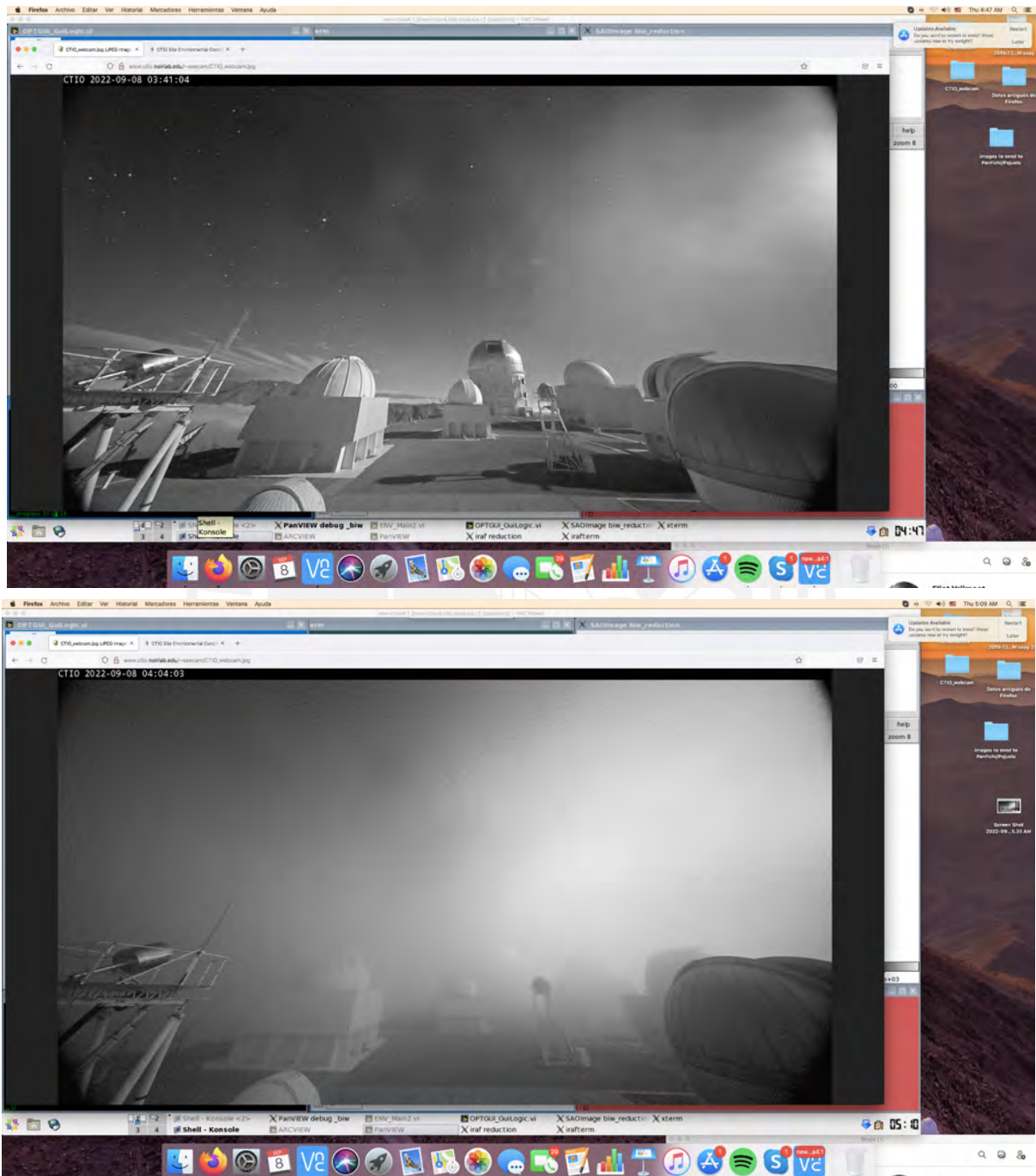


Figura 13: Cámara externa del domo del telescopio mostrando la evolución de la neblina y humedad entre las 04:47 y 05:10 UT la noche del 08-Sep

Entre las horas de 06:13 y 07:37 UT, cuando la humedad bajó a niveles manejables, pudimos tomar 66 imágenes de (161989) Cacus en el filtro R. Como Cacus es un asteroide bastante brillante, pudimos tomar exposiciones de sólo 15s, y aún así obtener una buena señal del asteroide en las imágenes. Con tiempos de exposición tan bajos pudimos esquivar el problema de la alta tasa de movimiento de Cacus, evitando su distorsión por movimiento durante las exposiciones. Sin embargo, la humedad alta resultaba en un seeing elevado, incrementando el nivel base de ruido en las imágenes, y empeorando la calidad de la data.

Además, en este periodo intentamos tomar imágenes del asteroide (37309) Pajuelo, que lleva el nombre de la asesora. Este asteroide orbita entre Marte y Júpiter, y por lo tanto no es un NEA; sin embargo, quisimos ver si era observable por interés personal, ya que no se conoce su periodo de rotación. Lamentablemente, debido a su bajo nivel de brillo aparente y el mal clima, no fue posible distinguir a (37309) Pajuelo en las imágenes.

Pasando este horario, la humedad volvió a subir, y fuimos obligados a terminar ahí la noche.



Figura 14: Monitoreo de condiciones ambientales del observatorio, mostrando la evolución de la humedad y el seeing (entre otros parámetros) durante el transcurso de la noche.

3.6. Noche 4 – 09-Sep

Durante la cuarta y última noche, aunque la neblina no subió al nivel de la noche anterior, la humedad sí se mantuvo en niveles más altos de lo ideal, y la Luna llena continuaba iluminando el cielo desde el inicio de la noche. Por lo tanto, las mediciones en esta última noche, aunque fueron mejores que la noche anterior, continuaban mostrando mayor nivel de ruido e incertidumbre que las primeras dos noches. Tomando esto en cuenta, decidimos concentrarnos en continuar y complementar nuestras observaciones de Didymos, en vez de dedicarnos a observar algún otro asteroide nuevo y menos brillante, que potencialmente se perdería en este ruido. Esto nos permitiría tener el resultado más fuerte y confiable con el NEA más importante del punto de vista científico, ya que estábamos a dos semanas del impacto de la misión DART.

Entre las 03:31 y las 09:03 UT se tomaron 100 imágenes más de (65803) Didymos en el filtro R con 60 s de exposición, para complementar las observaciones de la segunda noche. Otra vez, pudimos observar más de dos rotaciones teóricas completas del asteroide, lo cual permitiría una muy buena determinación de la periodicidad en la curva de luz, independientemente de la mayor cantidad de ruido en los datos de esta última noche. Finalmente, entre las 09:11 y las 09:35 pudimos tomar 17 imágenes más de (161989) Cacus, con 15 s de exposición, para intentar complementar las observaciones de la noche anterior. En ninguna noche individual pudimos cubrir el periodo de rotación teórico completo del asteroide (debido principalmente a la necesidad de cerrar el telescopio por varias horas en la tercera noche), pero con estas nuevas imágenes quisimos ver si era posible cubrir la cantidad suficiente del periodo tal que una buena solución para la curva de luz se podría encontrar de todas formas.

Durante las cuatro noches, al principio y/o al final de la noche, se tomaron imágenes *flat* y *bias*, siguiendo los procedimientos descritos por los operadores del telescopio, adaptados al tiempo y filtros de exposición de nuestras imágenes. Con estas tomas, sería posible aplicar las reducciones a las imágenes descritas en el Capítulo 2. Bajo estas mismas indicaciones, nos sugirieron que hacer tomas *dark* sería innecesario, ya que el instrumento propio corre de tal manera que el ruido térmico del CCD sería insignificante e ignorable en las imágenes.

Capítulo 4: Análisis y Resultados

El análisis fotométrico de las imágenes tomadas durante las noches de observación se realizó utilizando el software *MPO Canopus*. Los catálogos de estrellas *MPOSC3* (basado en los catálogos SDSS [25] y 2MASS [26]) y *ATLAS* [27] fueron los catálogos principales utilizados para calcular y calibrar las magnitudes instrumentales y derivadas para cada imagen durante el proceso de la fotometría.

El software *Canopus*, además de la fotometría de apertura, puede también hacer el procesamiento de imágenes descrita en la Sección 2.3.2, realizando la reducción de ruido a través de la aplicación de tomas *bias* y *flat*. Es más – el manual de operación del software sugiere que subir las imágenes sin procesar a *Canopus*, en conjunto con un *master bias/flat/dark*, y hacer el procesamiento al momento de hacer el análisis, da resultados más precisos y confiables que hacer la reducción previamente y trabajar con las imágenes ya procesadas [18]. Dado esto, decidimos aceptar la sugerencia y trabajar directamente con *Canopus* para todo el proceso de análisis fotométrico de nuestros resultados. Las tomas *master bias* y *master flat* que pide el programa se generaron de la manera descrita en el Capítulo 2, y éstas fueron suministradas al programa durante el análisis – un par de tomas *master bias* y *master flat* para cada combinación de noche de observación, filtro utilizado, y tiempo de exposición.

El cálculo del periodo de rotación de cada asteroide también se hizo utilizando la ayuda de *MPO Canopus*. Debido a las circunstancias de nuestra salida de observación (descritas en el Capítulo 3), al final extrajimos curvas de luz para tres asteroides: (65803) Didymos, (86829) 2000 GR146, y (161989) Cacus. Las órbitas de estos asteroides se ven en la Figura 15.

Órbitas Relativas de los NEA Seleccionados

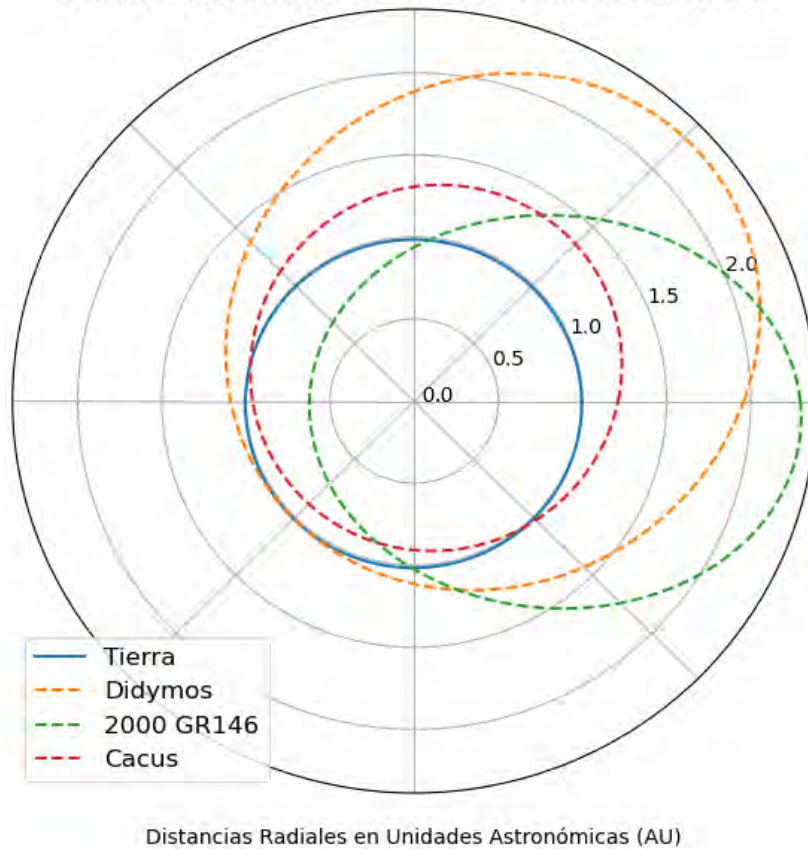


Figura 15: Esquema de las órbitas de los tres asteroides analizados, proyectadas en 2D en el plano del Sistema Solar, con respecto al órbita de la Tierra. El Sol se encuentra en el punto (0,0). Gráfico propio generado en Python con datos del Minor Planet Center de la Unión Astronómica Internacional (IAU-MPC) [28].

El cálculo de un periodo de rotación para nuestro asteroide a través de la data obtenida se realiza a través de un proceso de análisis de Fourier de la curva de luz. *MPO Canopus* aplica el algoritmo “FALC” de Harris y Pravec [18] para hacer la transformación. Dado un periodo y número de órdenes armónicos especificado, el algoritmo puede hacer un ajuste de mínimos cuadrados a la data, entonces si se le proporciona una serie de periodos posibles al algoritmo, se pueden encontrar soluciones a la ecuación Fourier que encajen mejor con las observaciones. Para hacer esto, el algoritmo muestrea una serie de periodos posibles y retorna un *espectro de periodos*; un gráfico del error RMS (“root mean square”, o media cuadrática) de la solución para un periodo particular vs el valor de ese periodo. Los mínimos en el espectro de periodos corresponden a soluciones

posibles/probables para el periodo de rotación del asteroide (interpretándose como el periodo de repetición de la curva de luz). Cuanto menor el valor del mínimo en el espectro de periodos, más probable piensa FALC/*Canopus* que ese mínimo corresponde a la periodicidad real de la data.

Para el uso del algoritmo, proporcionamos un valor de semilla inicial para el periodo de rotación del asteroide, un tamaño de paso y número de pasos para que el algoritmo muestree el espacio de posibles periodos, y un número de orden armónico de la solución Fourier a aplicar a la data, que se utilizará para buscar señales de periodicidad en los datos de la curva de luz.

Las figuras de las curvas de luz en este capítulo son las figuras proporcionadas directamente por *MPO Canopus* al hacer el análisis, editadas para condensar la información siguiendo los requisitos de publicación del Minor Planet Bulletin (MPB) [20], y agregando etiquetas a los ejes horizontales. En los gráficos, ' a ' es el ángulo de fase solar durante el punto medio de las observaciones; es decir, el ángulo formado por los vectores asteroide-Sol y asteroide-Tierra, y es de importancia ya que al acercarse a la oposición ($a \sim 0^\circ$), efectos de oposición afectan el brillo del asteroide. El parámetro ' G ' es un parámetro que utiliza *Canopus* para corregir efectos de fase y de oposición en las magnitudes, si es que existen, y es computado automáticamente por el software [18]. 'Jo (LTC)' es la fecha y hora del punto medio de las observaciones, en formato de Días Julianos – "LTC" significa "Light-Time Correction", y señala que la fecha Juliana ha sido corregida considerando el tiempo de viaje de la luz desde el asteroide hasta el telescopio. Finalmente, en la leyenda de cada gráfico, las diferentes sesiones de observación en las cuales la data fue tomada son notadas con el número de sesión interno de *Canopus*, y la fecha en la cual se tomó las observaciones. Esta fecha está en el formato americano de MM-DD (mes-día). Finalmente, 'Amp' representa la amplitud de la curva de luz, y el eje X muestra la fase de rotación de la solución elegida para el asteroide, en vez de la data temporal cruda en fechas y horas, para representar la rotación periódica del asteroide en la curva de luz.

4.1. (65803) Didymos

Didymos, como describimos previamente, fue el objetivo principal de la observación; por lo tanto, en total se tomaron y analizaron 29 imágenes de Didymos de 90s de exposición en el filtro V, y se tomaron 205 imágenes con 60s de exposición en el filtro R (de las cuales 166 fueron utilizadas). Debido a su rol en la misión DART, Didymos era el asteroide más estudiado de nuestra lista de objetos. El periodo más preciso previamente determinado para Didymos fue publicado por Naidu et al. (2020) [29]; ellos utilizaron extensivas observaciones de radio del asteroide, en combinación con las curvas de luz obtenidas por Pravec et al. (2006) [30] (de más de 1500 imágenes fotométricas de Didymos, tomadas en el transcurso de un mes), para modelar el asteroide en tres dimensiones y determinar su periodo de rotación con gran precisión a ser 2.2600 ± 0.0001 h. La curva de luz para Didymos es complicada, debido en parte a que Didymos varía poco en su magnitud inherentemente, y en parte porque su curva de luz es una superposición de los dos componentes del sistema binario.

Las observaciones en el filtro V durante la primera noche resultaron de alta calidad (y baja incertidumbre en magnitud), aunque al final obtuvimos sólo 29 imágenes en ese filtro. La curva de luz para Didymos obtenida con esos 29 puntos de datos se encuentra en la Figura 16.

El periodo de rotación de mayor confianza encontrado para Didymos con la data del filtro V es de 2.299 ± 0.128 h, utilizando una solución de Fourier de sexto orden. Aunque el periodo encontrado sí contiene el valor conocido de 2.2600 ± 0.0001 h dentro de sus barras de error, debido a la pequeña cantidad de puntos de datos, esta incertidumbre es mucho mayor de lo ideal. La amplitud de la curva encontrada es de 0.12 magnitudes, indicando la poca variabilidad en magnitud de Didymos mientras rota, a esta proximidad de la Tierra.

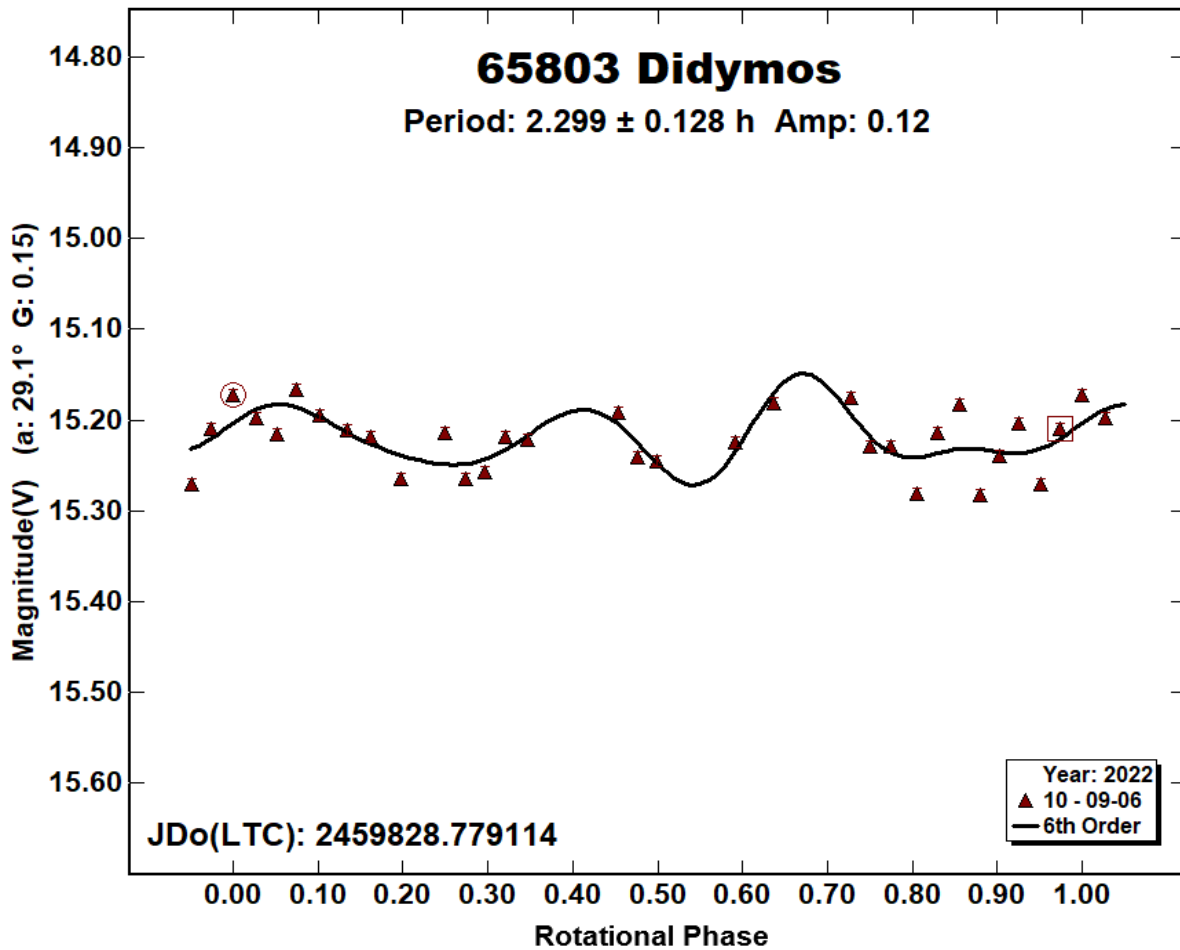


Figura 16: Curva de luz para nuestros datos de Didymos en el filtro V, con la periodicidad “best-fit” encontrada sobre ella. El eje X es la fase de la rotación, normalizada entre 0 y 1 periodos. La leyenda indica la(s) sesión(es) de observación donde salieron los datos; para mas detalle, ver la Sección 4.4. Los puntos rodeados por un círculo y un cuadrado corresponden a la primera y última imagen tomada durante cada sesión de observación. Ver significado de ‘a’, ‘G’, y ‘Jo(LTC)’ al comienzo del capítulo.

La mayoría de la data para Didymos, como describimos previamente, fue tomada en el filtro R durante la segunda y cuarta noche; mas de siete veces la cantidad de puntos de datos que en el filtro V. La mayoría de la data vino de la segunda noche, y es de alta calidad, con bajo seeing. En la cuarta noche, sin embargo, tomamos data de mayor seeing y menor calidad debido a las condiciones de visibilidad de esa noche. La mejor curva de luz obtenida se encuentra en la Figura 17.

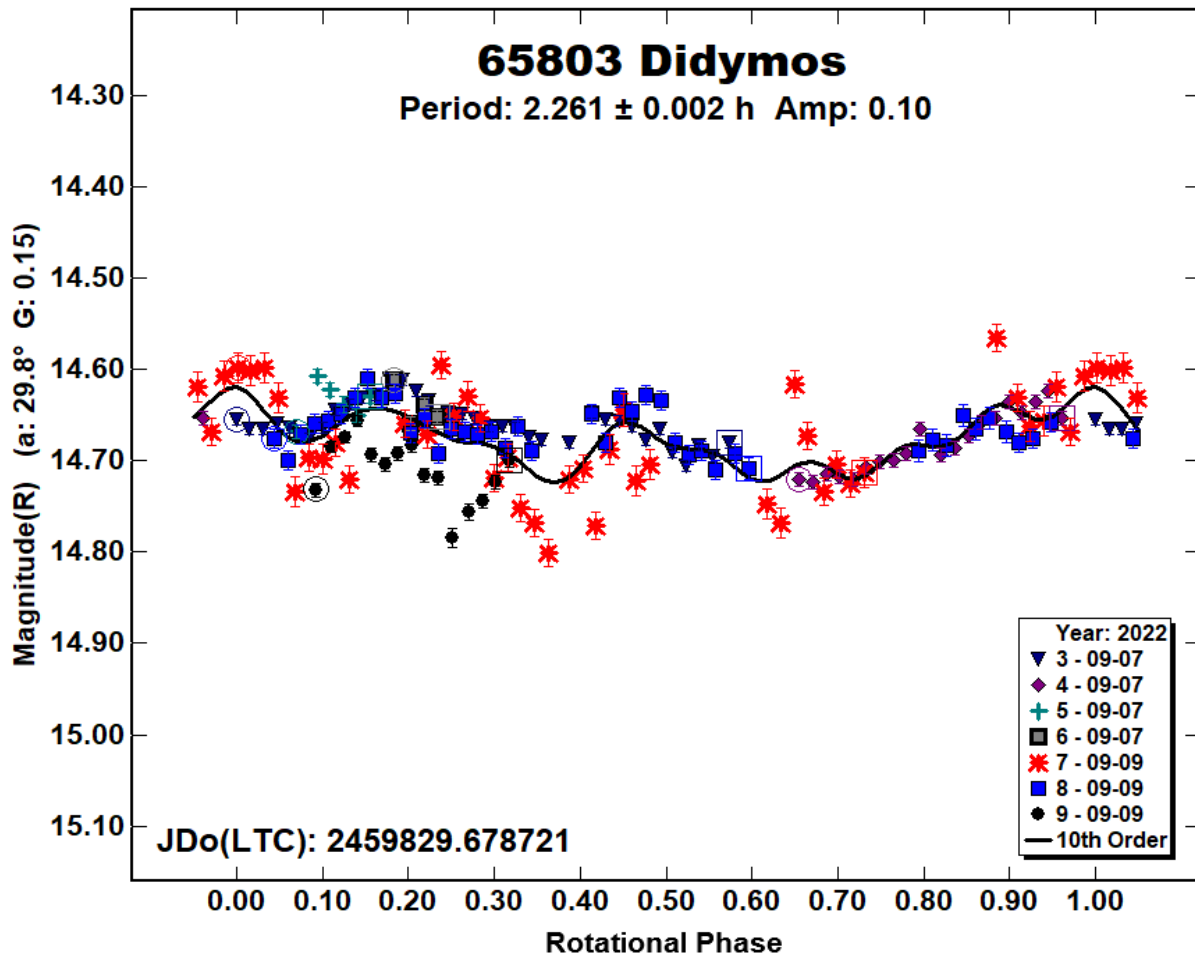


Figura 17: Curva de luz para nuestros datos de Didymos en el filtro R, con la periodicidad “best-fit” encontrada sobre ella. El eje X es la fase de la rotación, normalizada entre 0 y 1 periodos. Las sesiones 3, 4, 5, y 6 (ver leyenda) son datos tomados en la segunda noche, mientras que las sesiones 7, 8, y 9 son de la cuarta.

La curva de luz inicialmente se ve mucho más complicada, debido en parte a la alta variabilidad de magnitud de la data de la cuarta noche (ver la leyenda para identificar la data tomada el 09/09), y en parte por la complejidad misma de la curva de rotación de Didymos, que es de baja amplitud, no demuestra fuerte bimodalidad, y contiene la señal de Dimorphos en ella. Lamentablemente, debido que el periodo de órbita de Dimorphos alrededor de Didymos es de casi 12h, y sólo pudimos observar Didymos durante unas cuantas horas cada noche, no fue posible resolver el periodo secundario con buena precisión; idealmente se tendría que cubrir entre 1.5 – 2.0 veces el periodo entero en la data para determinar la señal periódica en las curvas de luz. Pravec (2006) [30] y Naidu

(2020) [29] utilizaron observaciones cubriendo el espacio de un mes entero para obtener sus curvas de luz con tan alta confianza.

Sin embargo, aún con la complejidad visual de la curva de luz, la solución para la periodicidad de la curva de luz de Didymos en el filtro R es de muy alta precisión – a través de una solución de décimo orden, obtuvimos un periodo de rotación de 2.261 ± 0.002 h, un valor en muy buen acuerdo con el valor de literatura de 2.2600 ± 0.0001 h, y con solo una fracción de la data de éste. Este resultado indica que nuestras observaciones de Didymos eran en general de suficiente calidad tal que serían de utilidad para las observaciones pre-impacto del equipo DART.

Aún así, mirando la curva de luz observamos que existen bastantes puntos que sobresalen sobre y debajo de la curva periódica de manera significativa; como indica la leyenda, estas son enteramente parte de las observaciones de la cuarta noche. Aunque *Canopus* reporta alta confianza en la solución del periodo de rotación, hubiese sido ideal poder tomar mayor cantidad de datos en noches de mejor clima y seeing, para incrementar esta confianza aún más. Debemos notar aquí que elegir no utilizar la data de la cuarta noche en la curva de luz nos da una solución mucho peor para el periodo de rotación, de mucha mayor incertidumbre y menor confianza. Esto ocurre aún removiendo los puntos de menor calidad ya que también estaríamos quitando casi la mitad de nuestros datos, y la mayor cantidad de puntos ayuda más que lo que empeora la solución la baja calidad de esos puntos. Mayor número de noches de observación hubiesen sido requeridos para mejorar la curva de luz (y para expandir nuestras observaciones a un mayor número de asteroides), pero lamentablemente debido a las circunstancias del proyecto eso no fue posible.

Finalmente, notamos también que Didymos demuestra una magnitud promedio menor en el filtro R que en el filtro V, justificando a través de los resultados nuestra suposición que el asteroide reflejaría más luz en R que en V, y así poder tomar observaciones de menor tiempo de exposición (y por lo tanto tomar mayor número de observaciones por noche).

4.2. (86829) 2000 GR146

Observamos 2000 GR146 durante la primera mitad de la primera noche (06 Sep), antes de las observaciones de Didymos esa noche. En total tomamos 35 imágenes de este asteroide en el filtro V con 180 s de exposición por imagen; siendo mucho menos brillante que Didymos, el asteroide requería significativamente más tiempo de exposición que éste. El periodo de rotación más preciso previamente determinado para 2000 GR146 fue de 3.0996 ± 0.0001 h, por Pravec (2007web) [31]; sin embargo, Warner (2014k) [32] determinó un periodo de 2.917 ± 0.002 h, lo cual es cercano al anterior pero no en acuerdo con éste, dado las bajas incertidumbres. Nuestras observaciones de 2000 GR146 fueron de alta calidad, pero debido al tiempo de exposición alto y a la necesidad de priorizar Didymos como objeto de observación, solo se tomaron un bajo número de imágenes del asteroide.

Al aplicar un análisis de Fourier tomando una semilla y espacio de fases cerca a 3 h como periodo de rotación, observamos que no se ha cubierto una parte de este periodo en la data. Debido a este hecho, Canopus no pudo encontrar una solución que no tenía un nivel significativo de incertidumbre en el periodo calculado; idealmente se observaría al menos 1.5-2.0 veces el periodo de rotación (como mínimo) para que una señal periódica clara aparezca en la data. Aún tomando en cuenta esto y forzando un análisis bastante cercano al valor de 3 h, el bajo nivel de puntos de datos disminuye la confianza en la solución, similar al caso de Didymos en V (que tuvo aún menos puntos de datos, pero sí logró cubrir un periodo de rotación entero).

Con una solución armónica de segundo orden, nuestra curva de luz sale como en la Figura 18; el periodo de mayor confianza en ese caso es de 3.49 ± 0.81 h, que incluye los valores de literatura en su incertidumbre, pero debido al hecho que el error es de más de 20% del valor.

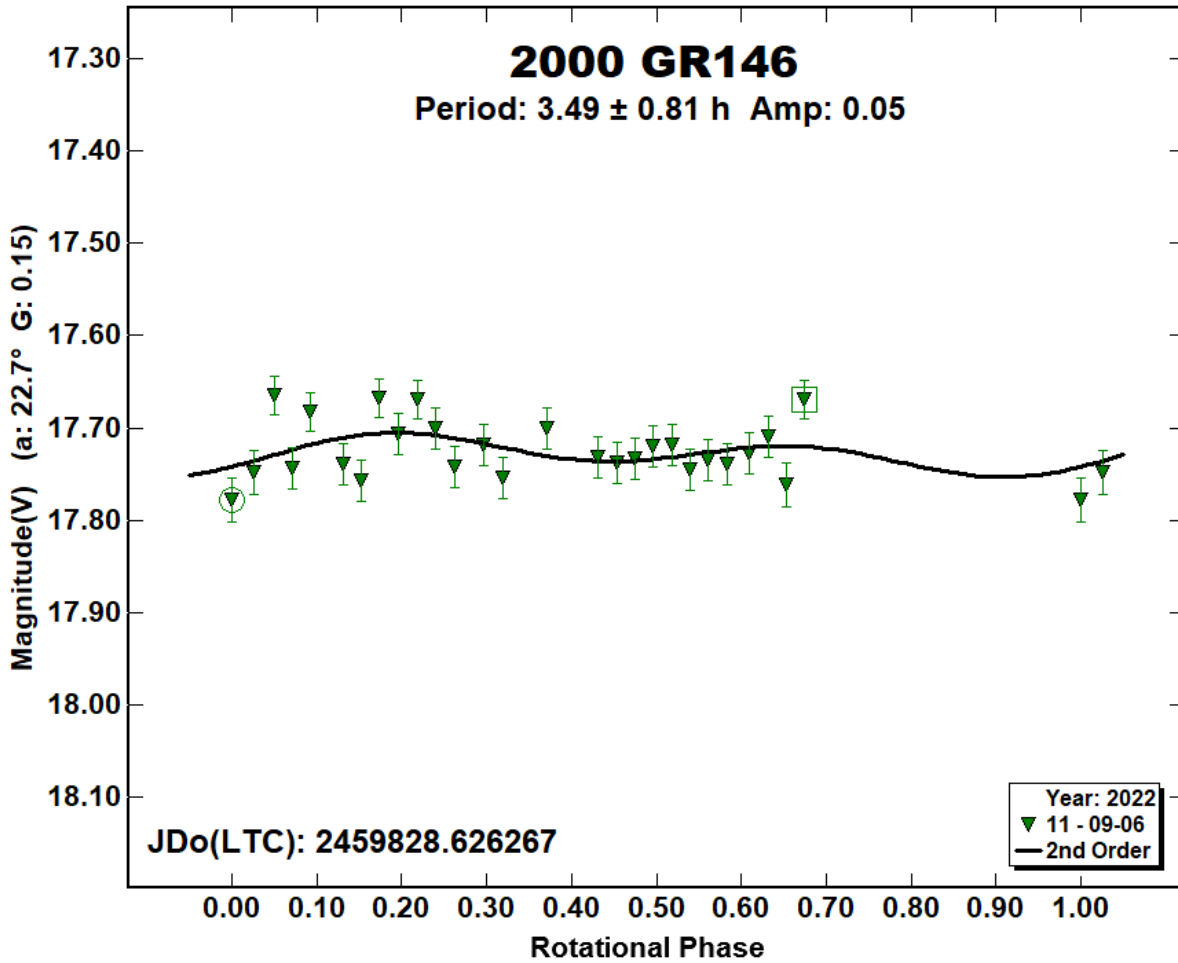


Figura 18: Curva de luz para nuestros datos de 2000 GR146 en el filtro V, mostrando la periodicidad “best-fit” utilizando una solución armónica de segundo orden.

Si se utiliza una solución armónica de mayor orden, *Canopus* reporta un periodo con menor magnitud de error, pero si se mira directamente la solución Fourier (ver Figura 19), se ve que la solución de mayor orden demuestra fuertemente el fenómeno de Gibbs en las secciones discontinuas, y por lo tanto es menos confiable. El fenómeno de Gibbs es un comportamiento que se ve en series de Fourier que intentan describir señales con saltos o discontinuidades finitas (en nuestro caso, debido a una falta de datos); el efecto causa grandes ondulaciones en los valores de la serie Fourier en el entorno de estas discontinuidades, que pueden alejarse bastante de los valores de la señal real [33]. Esto demuestra la importancia de revisar bien los resultados de algoritmos científicos computacionales, y no simplemente aceptar la solución que te de resultados con una incertidumbre menor reportada por el programa.

Los resultados para 2000 GR146 resaltan la necesidad de tener un buen número de imágenes y observaciones, y de poder cubrir el periodo de rotación completo del asteroide (idealmente más de una vez completa), para poder resaltar las características periódicas de la curva de luz y así tener una buena solución para el periodo de rotación (como se observa con la Figura 17 para Didymos).

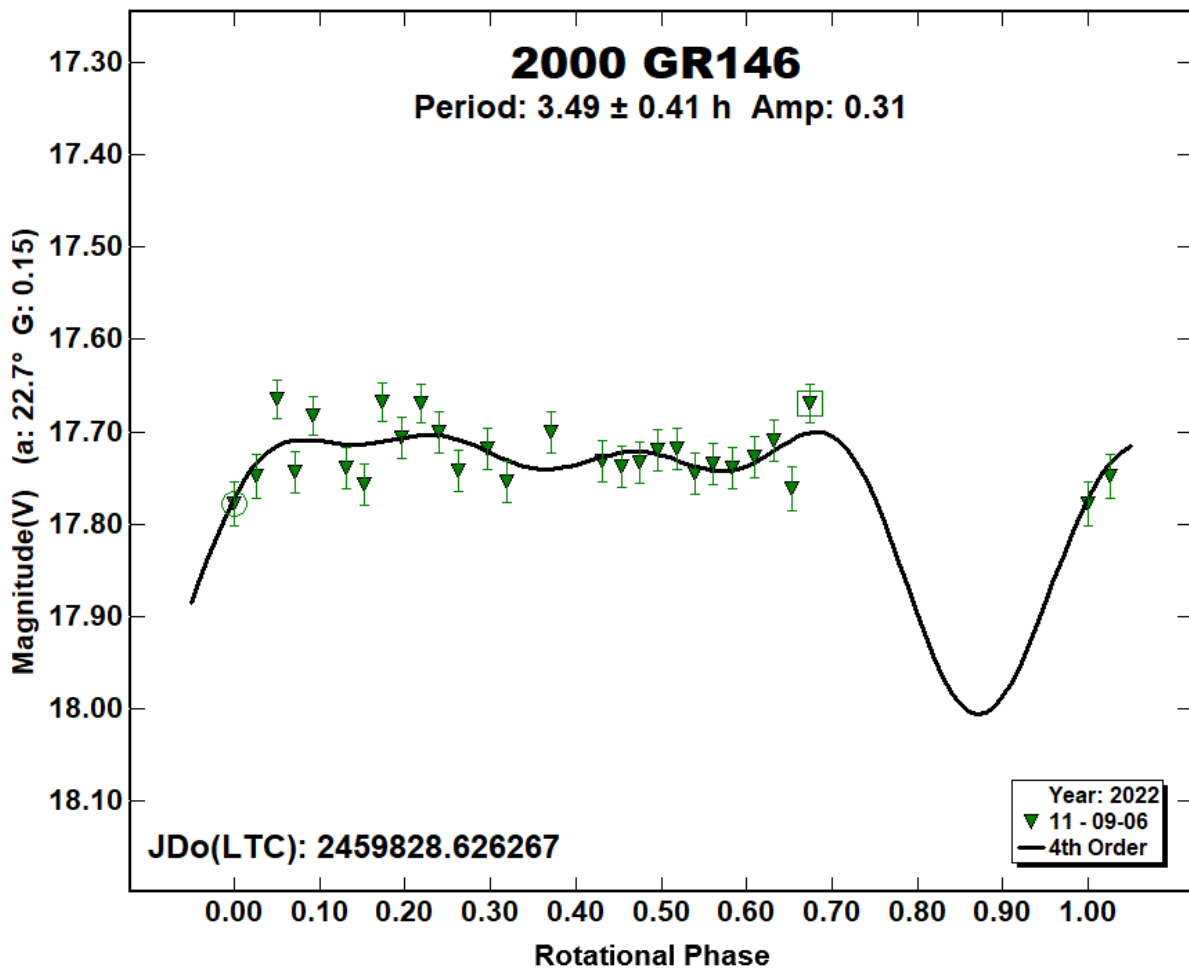


Figura 19: Curva de luz para nuestros datos de 2000 GR146 en el filtro V, mostrando la periodicidad “best-fit” utilizando una solución armónica de cuarto orden.

La solución para el periodo de rotación, utilizando una ecuación Fourier de cuarto orden, demuestra un periodo de 3.49 ± 0.41 h, que parece tener menor incertidumbre que la solución de segundo orden. Sin embargo, como se ve en la curva, esta solución no solo triplica la amplitud de la curva de luz, sino que también introduce un mínimo significativo en la sección de la curva que no

está cubierta por las observaciones, y que no parece de carácter físico. Incrementar el orden de la solución solo aumenta los artefactos de este tipo debido al bajo número de datos.

4.3. (161989) Cacus

Inicialmente se eligió a Cacus como objeto de observación no sólo porque Cacus mostraba únicamente un par de curvas de luz reportadas previamente en el ALCDEF (<https://alcdef.org/>) y en el Minor Planet Bulletin (<https://mpbulletin.org/>), sino también porque se conocía que era un asteroide bastante brillante. Al pesar de tener una enorme tasa de movimiento aparente en el cielo (alrededor de 700 arcsec/h), el asteroide era suficientemente brillante para ser observado con tiempos de exposición bastante pequeños, y así mantener el uso de aperturas circulares durante el proceso de fotometría.

Se planeó observar a Cacus casi enteramente durante la tercera noche, utilizando la noche completa para obtener una curva de luz completa del asteroide. Sin embargo, como se describió en el Capítulo 3, debido a las circunstancias climáticas de la noche, no se pudo obtener una curva de luz completa durante esa noche, ya que se tuvo que cerrar el domo y parar de observar por varias horas. Además, el nivel alto de humedad garantizaba un seeing bastante elevado, incrementando la incertidumbre en las imágenes y afectando la calidad de los datos. De ser así, se intentó completar la curva de luz con observaciones durante parte de la cuarta noche, concurrentemente con las observaciones de Didymos, dependiendo de la elevación de ambos objetos en el cielo durante el transcurso de la noche.

Se tomaron en total 83 imágenes de Cacus en el filtro R, con 15 s de exposición para cada imagen; esto dejaba suficiente señal para que se note claramente el asteroide, y mayor tiempo de exposición mostraba distorsiones significativas en la forma del asteroide en las imágenes. El periodo de rotación del Cacus previamente publicado con mayor precisión es de 3.7538 ± 0.0019 h, por Pravec (2003web) [34]; otros resultados publicados concuerdan con este valor.

Una sección del espectro de periodos de Cacus encontrado por *Canopus* se muestra en la Figura 20. Este espectro muestra mínimos anchos centrados en 3.52 h y 4.00 h, con un mínimo adicional

angosto centrado en un valor alrededor de 3.74 h. El algoritmo calcula que esta solución es menos probable que los otros dos (teniendo un error RMS menor), pero comparando con la literatura, parecería que este mínimo central corresponde al periodo de rotación real del asteroide.

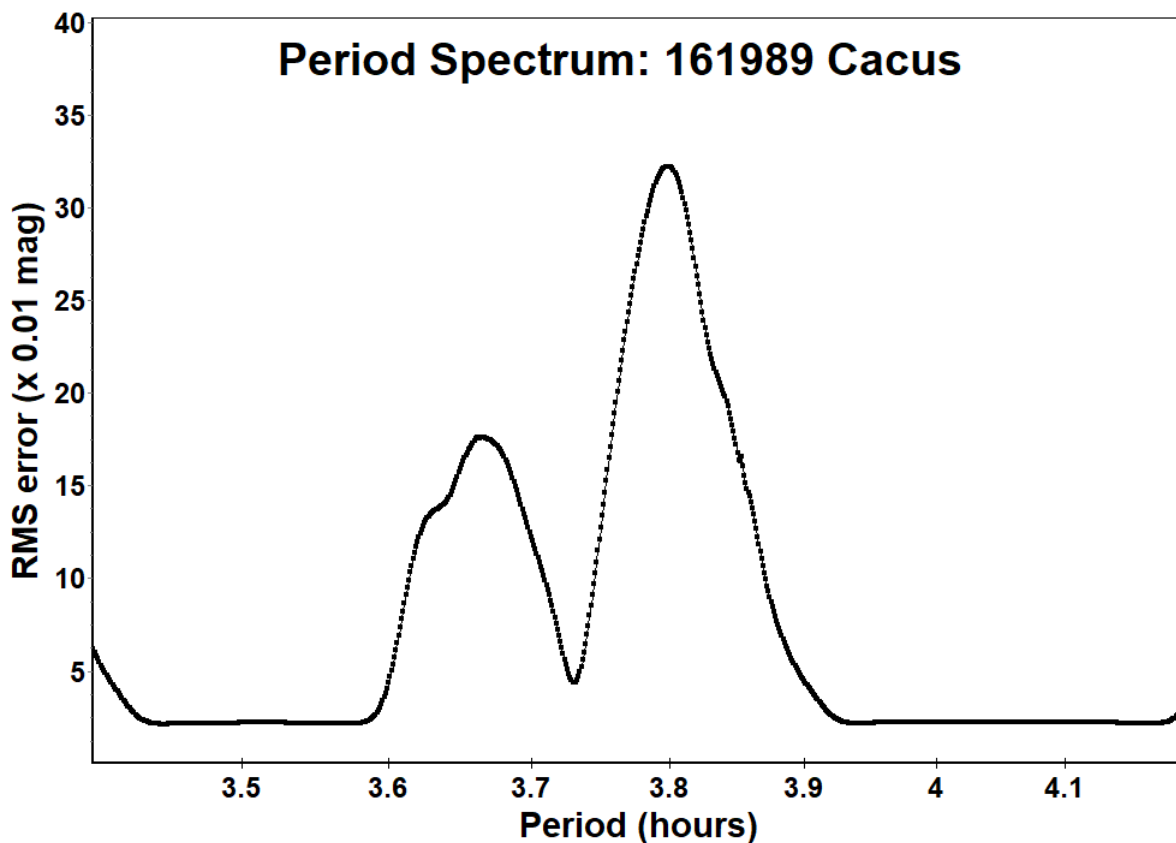


Figura 20: Sección del espectro de periodos para nuestras observaciones de (161989) Cacus

Tomando esto en cuenta, en las Figuras 21 y 22 presentamos curvas de luz para dos soluciones del periodo de rotación del asteroide, sin la curva Fourier dibujada en el gráfico por razones demostrativas.

En la Figura 21, mostramos la solución preferida por el algoritmo, que da un periodo de 3.52 ± 0.04 h. Aunque la curva de luz se ve visualmente llena, la diferencia con resultados previos del periodo de rotación del asteroide nos hace creer que esta solución no es la correcta, a pesar de la confianza del algoritmo.

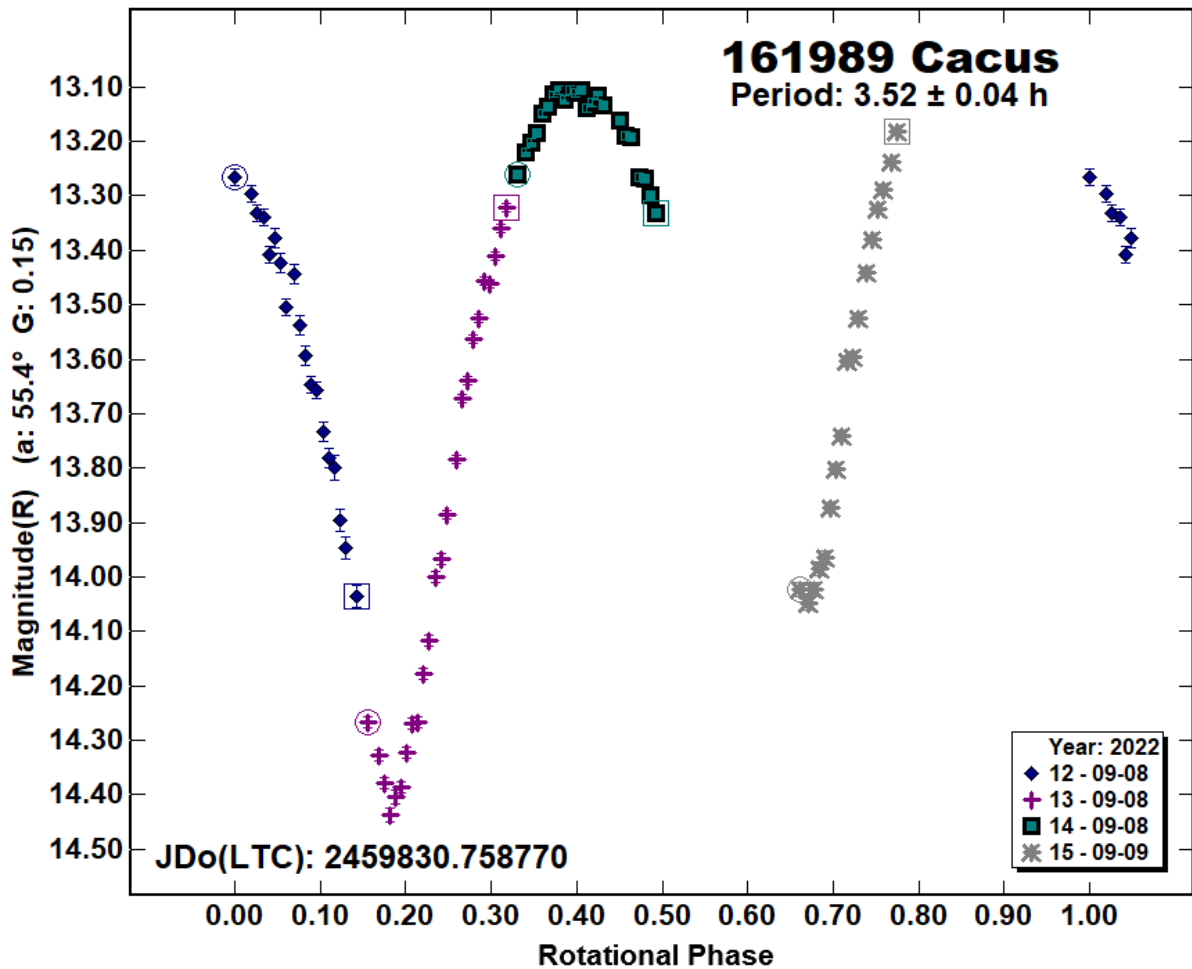


Figura 21: Curva de luz para Cacus, utilizando la solución preferida del algoritmo

En la Figura 22, mostramos la solución cuando forzamos al algoritmo a seleccionar el mínimo central en el espectro de periodos, lo cual nos da un periodo de 3.74 ± 0.01 h. Si esta solución es la correcta (y concuerda con la mayoría de resultados previos), entonces la obligación de cerrar el domo y dejar de observar nos hizo perder una parte bastante significativa de la curva de luz, dejando un gran hueco en el gráfico, y nuestras observaciones del cuarto día no lograron cubrir esta parte del periodo de rotación, sino que se superpusieron a los resultados del día anterior.

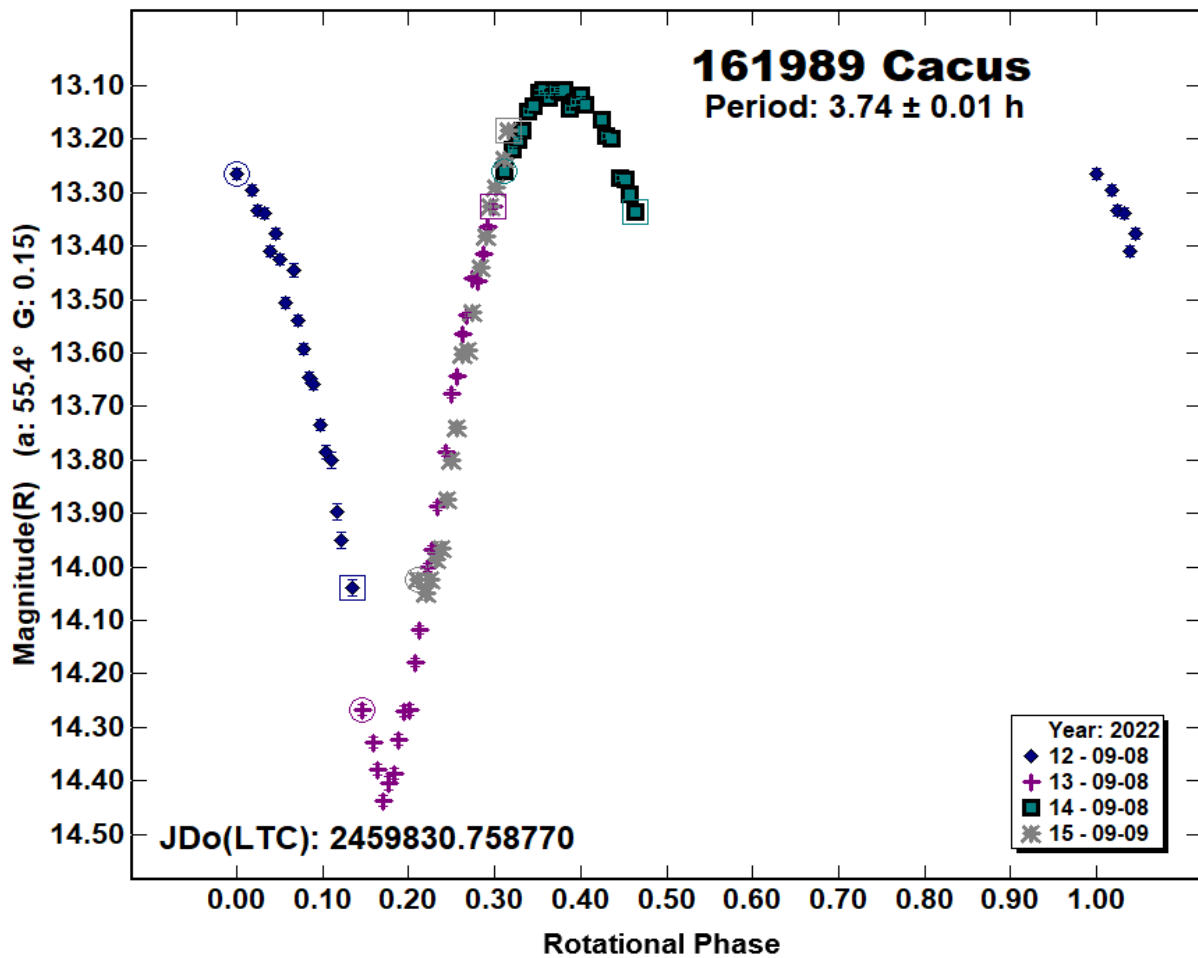


Figura 22: Curva de luz para Cacus, utilizando la solución que concuerda con resultados previos

Debido a este hueco en las observaciones de Cacus, la solución Fourier no pudo encontrar un resultado que encaje bien con los datos, y por ende resaltamos que el nivel de error reportado por el algoritmo en los periodos de rotación de las Figuras 21 y 22 son probablemente menores de las reales. En la Figura 23, mostramos la forma de la solución de Fourier que intenta cubrir el periodo seleccionado de la Figura 21; aún con una solución de sólo segundo orden, el algoritmo predice un gran mínimo secundario en la curva de luz. Puede ser que este mínimo sea real – previas curvas de luz para Cacus demuestran que su perfil fotométrico es fuertemente bimodal, y la amplitud de la magnitud de uno de sus mínimos se ve claramente en las figuras previas (más de 1 magnitud entera entre máximo y mínimo, en contraste con Didymos y 2000 GR146, cuyas amplitudes eran del orden de 0.1 magnitudes). Sin embargo, sin poder completar la curva de luz y observar una rotación completa de Cacus, no se podrían corroborar estos resultados.

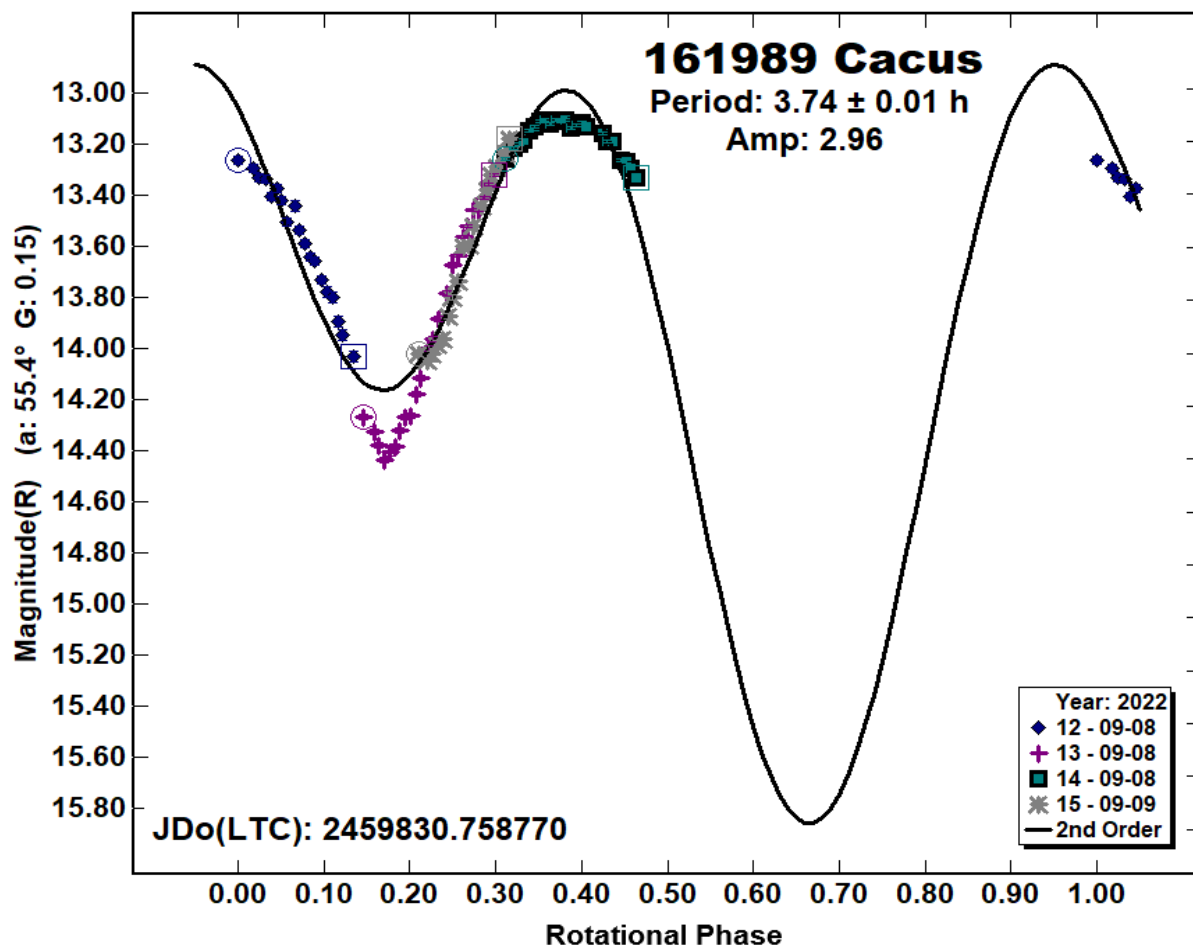


Figura 23: Curva de luz para Cacus, utilizando la solución que concuerda con resultados previos, mostrando la solución Fourier de segundo orden que queda mejor con los datos. La falta de datos entre 0.5 y 0.95 de la fase de rotación afectan de manera significativa la forma de la solución del algoritmo, y la amplitud de ella.

Hubiese sido ideal obtener una curva de luz completa para Cacus, ya que curvas de luz reportadas previamente en el Minor Planet Bulletin mostraban tener aún menos puntos de datos que nosotros, y también estaban incompletas, al igual que la nuestra. Lamentablemente no pudimos obtener una curva de luz completa para Cacus debido a circunstancias fuera de nuestro control, combinado con el deseo de priorizar Didymos como objeto principal de observación.

En las Figuras 24 y 25 mostramos curvas de luz para Cacus reportadas por Koehn et al. (2014) [35] y Skiff et al. (2019) [36] para fines de comparación. Ambas curvas utilizan el mismo set de datos, tomadas por el Near-Earth Asteroid Photometric Survey (NEAPS) del observatorio Lowell en Febrero del 2009. Sin embargo, el análisis del 2019 resultó en un periodo más preciso.

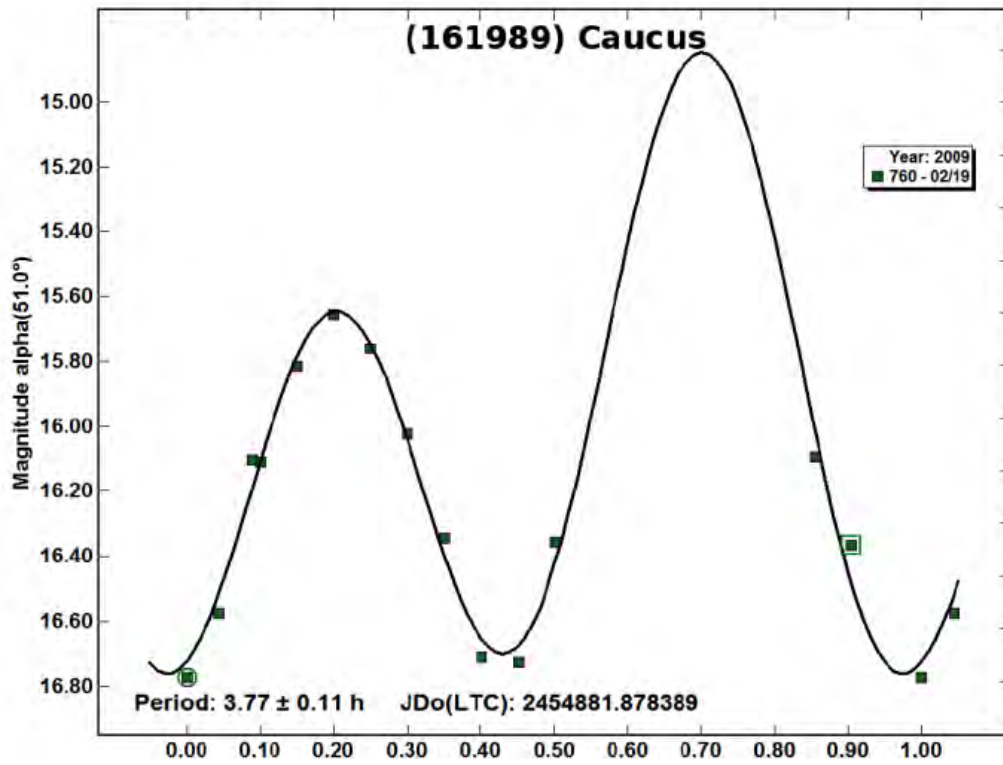


Figura 24: Curva de luz para Cacus reportada por Koehn et al. (2014), tomado directamente de la fuente

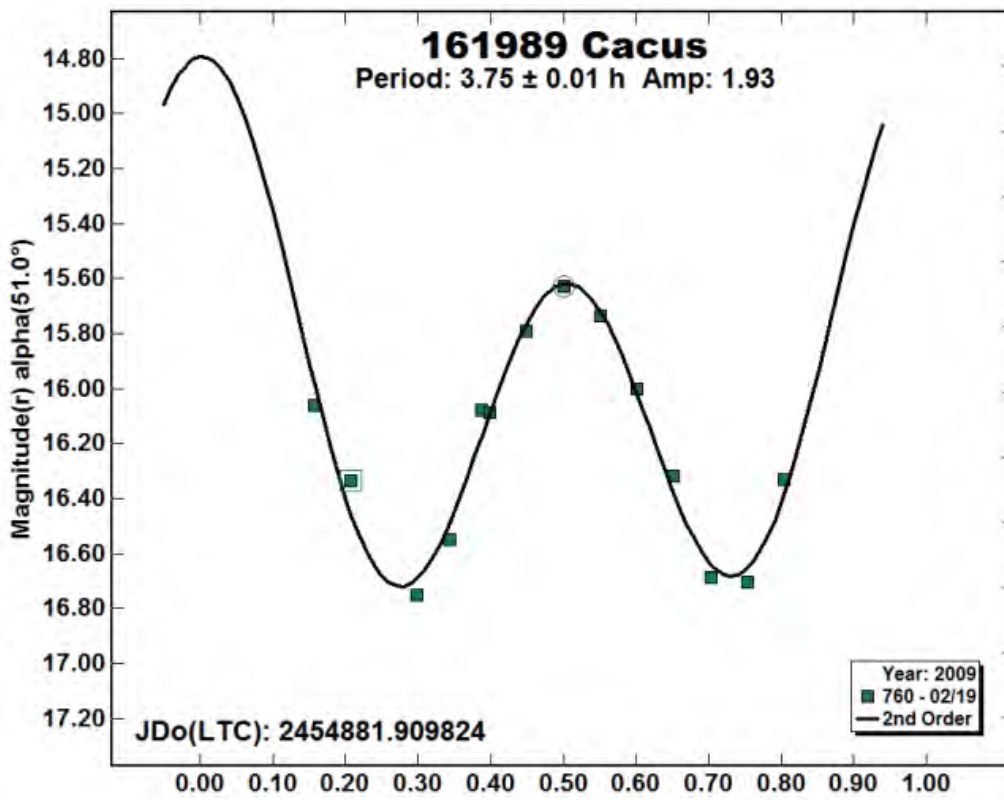


Figura 25: Curva de luz para Cacus reportada por Skiff et al. (2019), tomado directamente de la fuente

4.4. Tablas de Resumen de Resultados

En esta sección, presentamos dos tablas donde resumimos los resultados del análisis de nuestras imágenes y del proceso de fotometría para nuestros asteroides objetivo.

En la Tabla 2, se describe cada ‘sesión’ distinta de observación – cada conjunto de observaciones que se tomó en secuencia antes de que el asteroide objetivo salga del campo de visión y se tuvo que mover el telescopio, o cuando se cambió de objetivo durante la noche. Debido a que cada sesión contenía el mismo campo celestial, las estrellas de referencia elegidas de los catálogos astronómicos son consistentes durante cada sesión individual, pero cambian de sesión en sesión, ya que el campo celestial cambiaba al necesitar mover el telescopio.

La numeración de las sesiones corresponde a las leyendas de las curvas de luz previamente en el capítulo, y se basa en el orden interno en el cual se realizó el análisis con *MPO Canopus*, no la fecha/hora de la observación. La numeración comienza en el número 3, ya que las primeras dos sesiones generadas en *Canopus* fueron sesiones de prueba de utilización del software, y no formaron parte del análisis final.

El número estrellas de referencia elegidas en cada sesión variaban dependiendo de la cantidad de estrellas brillantes y catalogadas que se podían claramente resaltar en las imágenes, y por lo tanto el algoritmo podía utilizarlas para tener resultados confiables de la magnitud del asteroide objetivo en cada imagen. Los datos de estas estrellas, incluyendo sus designaciones, fueron tomadas de los catálogos astronómicos descritos al principio del capítulo.

Sesión	Fecha/Hora approx. (UTC)	Asteroide Observado	Filtro/Tiempo de Exp.	Núm. Imág.	Estrellas de Referencia
3	07/09 05:00	(65803) Didymos	R - 60s	36	Catálogo: ATLAS - 002955.68 -322144.2 - 003013.16 -322619.0 - 003004.55 -322804.5 - 003006.59 -322320.0
4	07/09 06:00	(65803) Didymos	R - 60s	20	Catálogo: ATLAS

Sesión	Fecha/Hora approx. (UTC)	Asteroide Observado	Filtro/Tiempo de Exp.	Núm. Imág.	Estrellas de Referencia
					- 003013.16 -322618.7 - 003008.13 -322847.7 - 003006.56 -322319.1 - 003008.73 -322556.3 - 003024.79 -322321.4
5	07/09 07:00	(65803) Didymos	R - 60s	6	Catálogo: ATLAS - 003013.16 -322619.1 - 003008.73 -322556.8 - 003038.10 -322846.9
6	07/09 07:00	(65803) Didymos	R - 60s	4	Catálogo: ATLAS - 003013.17 -322618.9 - 003008.13 -322847.7 - 003038.10 -322846.7 - 003008.74 -322556.6
7	09/09 04:20	(65803) Didymos	R - 60s	42	Catálogo: ATLAS - 004101.32 -331016.4 - 004103.98 -331241.0 - 004055.07 -331153.4 - 004047.41 -330820.0
8	09/09 06:30	(65803) Didymos	R - 60s	42	Catálogo: ATLAS - 004139.23 -331217.2 - 004119.05 -331019.6 - 004140.68 -331221.4 - 004121.64 -330927.8
9	09/09 08:45	(65803) Didymos	R - 60s	16	Catálogo: ATLAS - 004150.69 -331400.2 - 004157.13 -330830.0 - 004146.08 -331136.1 - 004149.47 -331408.5
10	06/09 08:00	(65803) Didymos	V - 90s	29	Catálogo: ATLAS - 002524.56 -320400.3 - 002517.05 -320557.3 - 002515.13 -320352.6 - 002514.68 -320258.8
11	06/09 05:00	(86829) 2000 GR146	V - 180s	27	Catálogo: MPOSC3 - 214749.64 -444325.9 - 214758.14 -444307.7 - 214814.06 -444145.8
12	08/09 06:30	(161989) Cacus	R - 15s	19	Catálogo: APASS - 025634.93 -293610.2 - 025636.68 -294155.3 - 025634.65 -294129.4

Sesión	Fecha/Hora approx. (UTC)	Astroide Observado	Filtro/Tiempo de Exp.	Núm. Imág.	Estrellas de Referencia
13	08/09 07:00	(161989) Cacus	R - 15s	24	Catálogo: APASS - 025620.09 -294546.7 - 025629.08 -294235.1 - 025611.78 -294216.7 - 025622.45 -294556.7 - 025611.47 -294254.9
14	08/09 07:30	(161989) Cacus	R - 15s	23	Catálogo: APASS - 025611.16 -295202.9 - 025626.87 -295308.1 - 025631.60 -295327.0
15	09/09 09:30	(161989) Cacus	R - 15s	17	Catálogo: APASS - 025303.58 -335024.8 - 025259.57 -334936.5

Tabla 2: Resumen de sesiones de observación. La fecha y hora de observación es un aproximado del punto medio de la sesión, y está estandarizada a UTC; la zona horaria local era de UTC-4.

En la Tabla 3, resumimos los resultados del análisis de periodos realizado con *MPO Canopus*.

Astroide	Filtro Utilizado	Tiempo de Exposición (s)	Núm. Imágenes	Periodo Calculado (h)
(65803) Didymos	Johnson - V	90	29	2.299 ± 0.128
(65803) Didymos	Cousins - R	60	166	2.261 ± 0.002
(86829) 2000 GR146	Johnson - V	180	27	3.49 ± 0.81
(161989) Cacus	Cousins - R	15	83	3.74 ± 0.01 (*)

Tabla 3: Resumen de resultados de observación. (*) Se cree que el error real en el periodo es mayor del reportado por *MPO Canopus*, debido a la probable pérdida de una parte significativa del periodo de rotación del astroide.

Capítulo 5: Conclusiones y Recomendaciones

En este trabajo de tesis se buscaron completar dos objetivos principales. El primer objetivo, más general, fue la observación y fotometría de una serie de asteroides cercanos a la Tierra (NEAs), idealmente algunos que no hayan sido altamente observados antes, para caracterizar estos cuerpos y fortalecer el conocimiento científico de ellos. El segundo objetivo, más específico, sería la observación y análisis de una buena cantidad de data fotométrica del asteroide binario Didymos-Dimorphos, con el propósito de contribuir al banco de data de observaciones del sistema para la misión DART, previo al impacto. Este objetivo sería importante para el éxito y la precisión de los resultados y las conclusiones de DART, y por esa razón se priorizó este objetivo.

Nuestro análisis resultó en los siguientes valores calculados para los periodos de rotación de los asteroides objetivo: un periodo de 2.261 ± 0.002 h para (65803) Didymos (basándonos en el resultado más preciso, utilizando los datos del filtro R), 3.49 ± 0.81 h para (82829) 2000 GR146, y 3.74 ± 0.01 h para (161989) Cacus, con la nota que esta última incertidumbre probablemente está siendo subestimada por el algoritmo de análisis utilizado.

Comparando los resultados obtenidos para la observación de Didymos con resultados previos de la observación del asteroide, obtuvimos un muy buen resultado para el periodo de órbita del cuerpo principal, debido principalmente a la cantidad de data que pudimos obtener, y la calidad de la mayoría de la data. Más de 160 imágenes fueron procesadas y analizadas fotométricamente, y esto se resalta en la precisión del resultado. Sin embargo, debido al periodo corto de observación que tuvimos, no fue posible observar lo suficiente para distinguir la órbita del cuerpo secundario.

Para los otros dos asteroides elegidos como objetivos de observación – (86829) 2000 GR146 y (161989) Cacus – obtuvimos data de decente calidad, pero debido a variadas circunstancias de observación (incluyendo el clima, el brillo de la Luna, y las limitadas noches de observación), sólo se obtuvo una serie limitada de imágenes para estos asteroides. Estas circunstancias también impidieron la observación de al menos una rotación completa para los cuerpos, como se ve en los resultados del análisis de Fourier de su periodicidad. Pudimos armar curvas de luz incompletas para

ellos, pero la precisión de los resultados es afectada por la cantidad limitada de observaciones. Por estas razones, aunque nuestras conclusiones sobre la periodicidad y la amplitud de la curva de luz son compatibles con previos resultados (a veces también incompletos, como se ve en las Figuras 24 y 25 para Cacus), no logramos obtener resultados de mayor precisión que ellos; solo resultados complementarios.

Para un estudio similar futuro, sería ideal poder tener un periodo de observación significativamente más amplio (teniendo más noches para observar, y así no sólo teniendo más datos pero también minimizando el impacto de una que otra noche con mal clima/seeing). Esto permitiría obtener un gran número de observaciones, y así resultados más precisos y conclusiones más robustas sobre las características de una serie de asteroides cercanos a la Tierra. Nuestro tiempo limitado también solo nos permitió observar tres asteroides suficientemente para poder al menos armar una curva de luz parcial; un periodo de observación mayor nos dejaría completar y agrandar el estudio a un número mayor de cuerpos. También hubiese sido ideal observar en unas fechas donde el ciclo lunar fuese tal que la Luna estuviese mucho menos brillante; varios objetivos posibles de este trabajo fueron ocultados debido a la Luna durante las fechas limitadas de nuestra observación.

Finalmente, se demostró el uso del análisis fotométrico y Fourier utilizando el software *MPO Canopus*, y en los resultados se ve no solo la utilidad y el poder del software para el uso de fotometría, sino que también se ven lecciones en los resultados parciales de la necesidad de combinar el uso de algoritmos con el análisis humano, identificando los límites de estos algoritmos con la falta de datos, y no aceptando ciegamente los resultados dados.

El impacto de la sonda de la misión DART sobre Dimorphos fue televisado por la NASA el 26 de septiembre del 2022, y comentado por el portal PuntoEdu de la PUCP [37]. En estas conferencias, se explicó la necesidad de tener un gran banco de observaciones precisas del sistema antes y después del impacto, para tener el mayor conocimiento posible sobre las características del sistema y como fue afectado por la misión. Recientemente, la NASA confirmó que la misión fue exitosa, y que la órbita de Dimorphos definitivamente fue afectada por el impacto; de aproximadamente 11h 55m a aproximadamente 11h 23m de tiempo requerido para completar una órbita alrededor de Didymos; un cambio de alrededor de 32 minutos, mientras que un cambio de 75 segundos hubiese sido

suficiente para considerar la misión un éxito. El paso siguiente sería el análisis completo y riguroso de este cambio, y de las características completas de la órbita y del sistema. En este paso, esperamos que nuestros datos contribuyan con este análisis, y nos mantenemos a la espera de futuros anuncios científicos del equipo DART.



Los resultados de este trabajo de investigación fueron publicados en el artículo:

Panfichi, A.M. & Pajuelo, M. V. (2023). Photometry and Lightcurve Analysis for Near-Earth Asteroids 65803 Didymos, (86829) 2000 GR146, and 161989 Cacus. *The Minor Planet Bulletin: Bulletin of the Minor Planets Section of the Association of Lunar and Planetary Observers*, 50 (2), pp. 128-130.

El artículo se puede recuperar de: https://mpbulletin.org/issues/MPB_50-2.pdf



Bibliografía

- [1]: Bottke, W. F., Cellino, A., Paolicchi, P., Binzel, R. P. (2002). An Overview of the Asteroids: The Asteroids III Perspective. En W. F. Bottke, A. Cellino, P. Paolicchi, & R. P. Binzel (Eds.), *Asteroids III* (pp. 3-16). University of Arizona Press
- [2]: Howell, S. B. (2006). *Handbook of CCD Astronomy*. New York: Cambridge University Press
- [3]: Warner, B. D. (2022). MPO Software: An Overnight Success. Recuperado de <https://minplanobs.org/BdwPub/php/mpocanopus.php>
- [4]: Woolfson, M. (2000). The origin and evolution of the solar system. *Astronomy & Geophysics*, 41 (1), 1.12 - 1.19
- [5]: Nagasawa, M., Thommes, E. W., Kenyon, S. J., Bromley, B. C., Lin, D. N. C. (2007). The Diverse Origins of Terrestrial-Planet Systems. En Reipurth, B., Jewitt, D., Keil, K. (Eds.), *Protostars and Planets V* (pp. 639-654). University of Arizona Press
- [6]: IAU (2006, Ago. 24). Resolution B5: Definition of a Planet in the Solar System, & Resolution B6: Pluto. Recuperado de https://www.iau.org/static/resolutions/Resolution_GA26-5-6.pdf
- [7]: Ferraz-Mello, S. (1993, Jun.). Kirkwood Gaps and Resonance Groups. En *Proceedings of the 160th International Astronomical Union* (pp. 175-188). Belgirate, Italia: Kluwer Academic Publishers
- [8]: Pitjeva, E.V., Pitjev, N. P. (2018). Masses of the Main Asteroid Belt and the Kuiper Belt from the Motions of Planets and Spacecraft. *Solar System Research*, 44, 554-566
- [9]: Morbidelli, A., Bottke, W. F., Froeschle, C., Michel, P. (2002). Origin and Evolution of Near-Earth Objects. En W. F. Bottke, A. Cellino, P. Paolicchi, & R. P. Binzel (Eds.), *Asteroids III* (pp. 409-422).
- [10]: Baalke, R. para NASA/JPL (2000). The Probability of Collisions with Earth. Recuperado de <https://www2.jpl.nasa.gov/sl9/back2.html>
- [11]: Hilton, J. (2002). Asteroid Masses and Densities. En W. F. Bottke, A. Cellino, P. Paolicchi, & R. P. Binzel (Eds.), *Asteroids III* (pp. 103-112).
- [12]: Warner, B. D. (2016). *A Practical Guide to Lightcurve Photometry and Analysis*. Switserland: Springer Cham
- [13]: Buchheim, R. K. (2010). Methods and Lessons Learned Determining the H-G Parameters of Asteroid Phase Curves. *The Society for Astronomical Sciences 29th Annual Symposium on Telescope Science*, , 101-115

- [14]: Muinonen, K., Piironen, J., Shkuratov, Y. G., Ovcharenko, A., Clark, B. E. (2002). Asteroid Photometric and Polarimetric Phase Effects. En W. F. Bottke, A. Cellino, P. Paolicchi, & R. P. Binzel (Eds.), *Asteroids III* (pp. 123-138).
- [15]: Janesick, J. & Blouke, M., (1987). Sky on a Chip: The Fabulous CCD. *Sky and Telescope*, 74, 238-242
- [16]: Mortara, L., Fowler, A. (1981). Evaluations of Charged-Coupled Device / CCD / Performance for Astronomical Use. En *SPIE Conference Proceedings* (pp. 28). Bellingham, WA: Society for Photo-Optical Instrumentation Engineers
- [17]: Harris, A. W., Young, J. W., Bowell, E., Martin, L. J., Millis, R. L., Poutanen, M., Scaltriti, F., Zappala, V., Schober, H. J., Debehogne, H., Zeigler, K. (1989). Photoelectric Observations of Asteroids 3, 24, 60, 261, and 863. *Icarus*, 77, 171-186
- [18]: Warner, B. D. (2012). *The MPO User's Guide: A Companion Guide to the MPO Canopus/PhotoRed Reference Manuals*. Colorado Springs, CO: BDW Publishing
- [19]: Stickler, B. A., Schachinger, E. (2016). *Basic Concepts in Computational Physics*. Switzerland: Springer Cham
- [20]: The Minor Planet Bulletin (2022). Bulletin of the Minor Planets Section of the Association of Lunar and Planetary Observers. Recuperado de <https://mpbulletin.org/>
- [21]: NASA & Johns Hopkins University Applied Science Laboratory (2021). Double Asteroid Redirection Test Press Kit. Recuperado de <https://dart.jhuapl.edu/News-and-Resources/files/DART-press-kit-web-FINAL.pdf>
- [22]: Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory (2022). DART: Double Asteroid Redirection Test Mission Overview. Recuperado de <https://dart.jhuapl.edu/Mission/>
- [23]: Bessell, M. S. (2005). Standard Photometric Systems. *Annual Review of Astronomy & Astrophysics*, 43 (1), 293-336
- [24]: Kolenczuk, P. (2020). Determination of Light Variations of NEAs by the Pill Aperture Photometry. *XXXIX Polish Astronomical Society Meeting*, 10, 101-104
- [25]: Ahumada, R., Prieto, C. A., Almeida, A., Anders, F., Anderson, S. F., Andrews, B. H., ... Zou, H. (2020). The 16th Data Release of the Sloan Digital Sky Surveys: First Release from the APOGEE-2 Southern Survey and Full Release of eBOSS Spectra. *The Astrophysical Journal*, 249 (3), 3
- [26]: Skrutskie, M. F., Cutri, R. M., Stiening, R., Weinberg, M. D., Schneider, S., Carpenter, J. M., ... Wheelock, S. (2006). The Two Micron All Sky Survey (2MASS). *The Astronomical Journal*, 131 (2), 1163-1183

- [27]: Tonry, J. L., Deneau, L., Flewelling, H., Heinze, A. N., Onken, C. A., Smartt, S. J., Stalder, B., Weiland, H. J., Wolf, C. (2018). The ATLAS All-Sky Stellar Reference Catalog. *The Astrophysical Journal*, 867 (2), 105
- [28]: IAU Minor Planet Center (2023, May. 17). Orbits for Near Earth Asteroids (NEAs) - Data Available from the Minor Planet Center. Recuperado de <https://www.minorplanetcenter.net/data>
- [29]: Naidu, S. P., Benner, L. A. M., Brozovic, M., Nolan, M. C., Ostro, S. J., Margot, J. L., Giorgini, J. D., Hirabayashi, T., Scheeres, D. J., Pravec, P., Scheirich, P., Magri, C., Jao, S. (2020). Radar observations and a physical model of binary near-Earth asteroid 65803 Didymos, target of the DART mission. *Icarus*, 348, 113777
- [30]: Pravec, P., Scheirich, P., Kusnirak, P., Sarounova, L., Mottola, S., Hahn, G., ... Kober, G. (2006). Photometric survey of binary near-Earth asteroids. *Icarus*, 181, 63-93
- [31]: Pravec, P., Wolf, M., Sarounova, L. (2007). Ondrejov Asteroid Photometry Project Website. Recuperado de <http://www.asu.cas.cz/~ppravec/neo.htm>
- [32]: Warner, B. D. (2014). Near-Earth Asteroid Lightcurve Analysis at CS3-Palmer Divide Station: 2014 March-June. *The Minor Planet Bulletin: Bulletin of the Minor Planets Section of the Association of Lunar and Planetary Observers*, 41 (4), 213-224
- [33]: Hewitt, E. & Hewitt, R. E. (). The Gibbs-Wilbraham phenomenon: An episode in Fourier analysis. *Archive for History of Exact Sciences*, 21 (2), 129-160
- [34]: Pravec, P., Wolf, M., Sarounova, L. (2003). Ondrejov Asteroid Photometry Project Website. Recuperado de <http://www.asu.cas.cz/~ppravec/neo.htm>
- [35]: Koehn, B. W., Bowell, E. G., Skiff, B. A., Sanborn, J. J., McLelland, K. P., Pravec, P., Warner, B. D. (2014). Lowell Observatory Near-Earth Asteroid Photometric Survey (NEAPS) - 2009 January through 2009 June. *The Minor Planet Bulletin: Bulletin of the Minor Planets Section of the Association of Lunar and Planetary Observers*, 41 (4), 286-300
- [36]: Skiff, B. A., McLelland, K. P., Sanborn, J. J., Pravec, P., Koehn, B. W. (2019). Lowell Observatory Near-Earth Asteroid Photometric Survey (NEAPS): Paper 4. *The Minor Planet Bulletin: Bulletin of the Minor Planets Section of the Association of Lunar and Planetary Observers*, 46 (4), 458-503
- [37]: Contreras, D. para PuntoEdu (2022). DART: CIENTÍFICOS PUCP PARTICIPAN COMO INVESTIGADORES EN MISIÓN DE DEFENSA PLANETARIA DE LA NASA. Recuperado de <https://puntoedu.pucp.edu.pe/orgullo-pucp/dart-cientificos-pucp-participan-como-investigadores-en-mision-de-defensa-planetaria-de-la-nasa/>