

Universidad Nacional de Córdoba

Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación

Trabajo Especial de Licenciatura

Estudio de propiedades físicas
de una muestra de asteroides

Milagros Colazo

Directores: Rene Duffard
Walter Weidmann

Marzo de 2020

Esta obra está bajo una licencia [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)
“Reconocimiento-NoCommercial-CompartirIgual 4.0 Interna-
cional”.



A mis papis, Uti, Cerafina y Bigotes.

“Toda la educación es una larga obra de amor a los que aprenden.”

Manifiesto Liminar, 1918.

Agradecimientos

El amor por la astronomía vive en mí desde el primer latido de mi corazón. Desde muy pequeña “jugaba a hacer investigaciones astronómicas”, leyendo cuanta enciclopedia pudiera conseguir. Soñaba, prácticamente cada día, con el momento en que esto pudiera hacerse realidad. ¿Cuándo llegaría a llamarme “formalmente” astrónoma?.

Mamá y papá, desde siempre, me acompañaron y me alentaron a cumplir este gran objetivo. Mi pasión, crecía junto a mí, año tras año, página a página de mi “cuaderno de investigaciones astronómicas”.

Muchas personas me acompañaron en este gran camino. Mis padres, incondicionalmente como siempre, cualquiera sea el proyecto que tenga en mente. Como ya lo saben, vivo agradecida por su apoyo constante, y por todo el amor que me dan. Los amo, mamá y papá.

Quiero agradecer también, a mis tíos, tías, primos y primas que tuvieron que escuchar largas charlas (en particular, mi tía Gloria, tutío y Maru) de la pequeña Mili contando sus nuevos “descubrimientos”. Muchas personas me preguntaron si mi decisión tan temprana de dedicarme a la astronomía se debía a las influencias de mi tío, Carlos Colazo (reconocido astrónomo de la región). Si alguna vez tuvieron la dichosa oportunidad de tener una charla con él, ¿es posible resistirse a la pasión y el amor que transmite al hablar de esta hermosa ciencia?.

Un lugar especial en estos agradecimientos quisiera dárselos también a mis amigos y amigas. A mi grupo incondicional: Toti, Totol y Ana que me acompañan desde mis días en el secundario. A mis compañeros y compañeras de la facu y del obse que estuvieron para mí en los buenos y malos momentos. A mis correligionarios/as de la Franja Morada con quienes transité un bello camino en la vida política de la UNC. Gracias a mi hermana de otra madre, Sofi, con quien he compartido los más hermosos momentos de mi vida universitaria. Hemos pasado por muchísimas emociones en tal sólo 6 años de amistad. Yo sé, que pase lo que pase ella está ahí para mí, y viceversa.

Gracias a mis directores René y Walter. Ambos fueron un gran apoyo, no sólo académico, sino moral en todos los meses que duró mi trabajo final. Eternamente agradecida por todo lo que me han enseñado en este tiempo, y por como lo hicieron. Claramente, este trabajo no hubiera sido posible sin ellos.

Gracias al cuerpo docente de la FaMAF, por su dedicación, su acompañamiento, su capacidad y sobre todo, por su incondicional amor por la docencia.

Gracias a la Universidad pública, gratuita y laica por la excelencia académica que recibí en estos 6 años de estudio. La Universidad Nacional de Córdoba, y seguramente muchas otras universidades de América Latina, no serían lo que son si no fuera por el esfuerzo, la valentía y la convicción de los y las jóvenes reformistas de 1918 que se enfrentaron al régimen establecido, sentando las bases para el futuro de la educación en el Manifiesto Liminar. Gracias también a los y las militantes estudiantiles que durante las oscuras épocas de la dictadura llegaron a dar la vida

por la educación de nuestro país y nos permiten hoy gozar de ella. Gracias a la militancia estudiantil del pasado, del presente y del futuro.

GRACIAS a cada una de las personas que me acompañó en este viaje. Espero, que sigamos soñando juntos/as.

Resumen

Los asteroides son piezas fundamentales para entender la formación y evolución de nuestro Sistema Solar. Acorde a esto, los datos aportados por la misión Gaia (operativa desde 2014) o Lucy (próximamente a ser lanzada) recaban información sobre estos objetos, complementándose con los estudios realizados desde Tierra.

En el presente Trabajo Final de Licenciatura contribuiremos a este campo de investigación en pleno auge con curvas de luz de una selección de asteroides y con sus respectivos análisis. Estas curvas de luz fueron obtenidas entre los meses de Junio y Diciembre 2019 desde la Estación Astrofísica de Bosque Alegre (EABA) ubicada en las Sierras de Córdoba.

El análisis de curvas de luz permite modelar diferentes características físicas de los asteroides, como son su forma y orientación del eje de rotación, que a su vez ayudarán a construir modelos más precisos sobre la formación y evolución del Sistema Solar.

Obtuvimos períodos de rotación y amplitud de las curvas de luz para 7 asteroides: (266) Aline, (472) Roma, (525) Adelaide, (1115) Sabauda, (1310) Villigera, (3548) Eurybates y (21900) Orus. Además realizamos comparaciones con los datos ya existentes en la literatura.

Para los primeros cinco asteroides mencionados el objetivo es mejorar el modelo de la forma de ellos y con ello mejorar la determinación de su volumen. Los datos provenientes de la misión Gaia proveerán la masa de estos cinco asteroides. Combinando volumen y masa se podrá obtener la densidad de estos 5 objetos.

Por otro lado, para Eurybates y Orus, que son objetivos de la misión Lucy, nuestra colaboración pretende mejorar el conocimiento, que es poco, sobre sus formas, periodos de rotación y dirección del eje de rotación.

Si bien obtuvimos resultados favorables para la mayoría de ellos, se espera poder continuar con las observaciones de estos objetos de forma tal que podamos conseguir curvas de luz densamente muestreadas que disminuyan el error de los modelos en los que se las utilice.

Abstract

Asteroids are fundamental pieces to understand the formation and evolution of our Solar System. According to this, the data provided by the Gaia mission (operational since 2014) or Lucy (soon to be launched) collect information on these objects, complemented by studies carried out from Earth.

In this Final Degree Project we will contribute to this booming research field with light curves of a selection of asteroids and with their respective analyzes. These light curves were obtained between the months of June and December 2019 from the Estación Astrofísica de Bosque Alegre (EABA) located in the Sierras de Córdoba.

The analysis of light curves allows us to model different physical characteristics of asteroids, such as their shape and orientation of the axis of rotation, which in turn will help build more accurate models of the formation and evolution of the Solar System.

We obtained periods of rotation and amplitude of the light curves for 7 asteroids: (266) Aline, (472) Rome, (525) Adelaide, (1115) Sabauda, (1310) Villigera, (3548) Eurybates and (21900) Orus. Furthermore, we make comparisons with the data already existing in the literature.

For the first five asteroids mentioned, the objective is to improve their shape model and thereby improve the determination of their volume. Data from the Gaia mission will provide the mass of these five asteroids. Combining volume and mass, the density of these 5 objects can be obtained.

On the other hand, for Eurybates and Orus, who are objectives of the Lucy mission, our collaboration aims to improve the knowledge, which is little, about their forms, periods of rotation and direction of the axis of rotation.

Although we obtained favorable results for most of them, we hope to be able to continue observing these objects so that we can achieve densely sampled light curves that reduce the error of the models in which they are used.

Índice

1	Introducción	1
2	Generalidades sobre Asteroides	3
2.1	Diversidad de formas y tamaños	3
2.2	Ubicación en el Sistema Solar	4
2.3	¿Cómo se nombran los asteroides?	7
2.4	Técnicas de Observación	7
2.4.1	Inversión de curvas de Luz	8
2.4.2	Ocultaciones	11
2.4.3	Radar	12
2.4.4	Imagen Directa	13
2.4.5	Polarimetría	14
2.5	Sesgos observacionales	14
2.6	Clasificación espectral de asteroides	16
3	Objetivos	18
3.1	La misión Lucy	18
3.1.1	Objetos Seleccionados	19
3.2	La misión Gaia	19
3.2.1	Modelos 3D	20
3.2.2	Objetos Seleccionados	23
3.3	Nuestro Aporte	24
4	Observaciones	25
4.1	Plan de Observación	25
4.1.1	Generación de efemérides	25
4.1.2	Cartas de identificación	27
4.1.3	Imágenes de calibración	28
4.2	La noche de Observación	29
5	Reducción de Datos	30
5.1	Imágenes de Calibración	30
5.1.1	Bias (ruido de lectura)	31
5.1.2	Dark (corriente de oscuridad)	31
5.1.3	Flats	31
5.2	Obtención de las curvas de luz	32
5.2.1	Fotometría de Apertura	33
5.2.2	Fotometría Diferencial	34
5.3	Ajustes de las Curvas de Luz	36

5.3.1	Diagrama de Fase	39
6	Resultados	40
6.1	Nuestros datos observacionales	40
6.2	Ajustes de las curvas de luz	40
6.2.1	Misión Lucy	40
6.2.2	Misión Gaia	41
6.3	Resumen	43
7	Discusión	45
A	Datos observacionales obtenidos	50
B	Ajustes de las curvas de luz	56

Índice de figuras

1	Imágenes de a) Eros; b) Psyche; c) Ida; d) Chariklo	4
2	Distribución de asteroides en el Sistema Solar Interior: Las órbitas de los planetas están marcadas en azul claro, siendo la de mayor diámetro la órbita de Júpiter. En verde se muestran todos los objetos del Cinturón Principal de Asteroides y en rojo se denotan los NEAs. Los puntos azules corresponden a los asteroides troyanos. Fuente: Minor Planet Center (MPC).	5
3	Distribución de asteroides en el Sistema Solar Exterior. Los objetos del cinturón de Kuiper (KBOs) están representados por puntos rojos, en blanco los Plutinos, en magenta los objetos del Disco Disperso (SDOs) y en triángulos naranjas los Centauros. Nuevamente, las órbitas son círculos azul claro y la más externa corresponde a Neptuno. Fuente: Minor Planet Center (MPC).	6
4	Técnicas aplicadas a asteroides a diferentes distancias del Sol.	8
5	Esquemización de la curva de luz de un asteroide uniformemente iluminado.	9
6	θ es el ángulo de aspecto y α es el ángulo de fase.	10
7	Variación de la amplitud de la curva de luz en función del ángulo de fase. .	10
8	Variación de la iluminación del asteroide en función del ángulo de fase (α).	11
9	Izquierda: Curva de luz de la ocultación por Chariklo. Derecha: Sistema de anillos de Chariklo.	12
10	Imagen del asteroide 2014 JO25.	13
11	Asteroide Vesta. Izquierda: Ejemplo de una imagen directa obtenida a partir de Óptica Adaptativa. Derecha: Ejemplo de una imagen directa obtenida “in situ” por la misión <i>Dawn</i>	14
12	Polarización en función del ángulo de fase.	15
13	Distribución actual de períodos conocidos y amplitudes máximas de los 1200 asteroides más brillantes (basados en LCDB, Warner et al. (2009), actualizado el 5 de septiembre de 2016). Figura adaptada de Marciniak et al. (2018).	15
14	Trayectoria orbital de la Misión Lucy.	19
15	Ejemplo de una imagen generada para el cálculo del datos de curva de luz en un ángulo de fase alto que muestra el efecto de sombreado (Bartczak & Dudziński, 2018).	21
16	Esquema de modelado SAGE (Bartczak & Dudziński, 2018).	23
17	Altura de los objetos en función del tiempo. https://asteroid.lowell.edu/astfinder/	28
18	Ejemplo de una carta de Identificación obtenida con <i>AstFinder</i>	29
19	Histograma de un <i>dark</i> ya corregido por <i>bias</i>	32
20	Corte horizontal de una misma imagen corregida por <i>flat</i> de cúpula (izquierda) y <i>flat</i> de cielo (derecha).	32

21	Elección de apertura grande (izquierda). Elección de apertura pequeña (derecha).	33
22	Elección de un anillo de cielo grande (izquierda). Elección de un anillo de pequeño (derecha).	34
23	Criterio utilizado para los radios de los anillos correspondientes a la fotometría de apertura.	35
24	9 Imágenes de Adelaide separadas temporalmente por aproximadamente media hora. En verde, se resalta una estrella de referencia y en rojo se visualiza al asteroide.	36
25	Ejemplo de offset con dos curvas de diferentes noches del asteroide Sabauda.	37
26	Periodograma de Eurybates, es decir, gráfico de RMS en función del Período. Elegiremos el valor de período que corresponda al mínimo de RMS. . .	38
27	Modelos de Villigera para la noche del 09/25.	42
28	Modelos de Villigera para la noche del 10/29.	43
29	Curva de luz observada de (266) Aline.	50
30	Curva de luz observada de (472) Roma.	51
31	Curva de luz observada de (525) Adelaide.	52
32	Curva de luz observada de (1115) Sabauda.	53
33	Curva de luz observada de (1310) Villigera.	53
34	Curva de luz observada de (3548) Eurybates.	54
35	Curva de luz observada de (21900) Orus.	55
36	Ajuste efectuado a los datos de (266) Aline.	56
37	Ajuste efectuado a los datos de (472) Roma.	57
38	Ajuste efectuado a los datos de (525) Adelaide	58
39	Ajuste efectuado a los datos de (1115) Sabauda.	59
40	Ajuste efectuado a los datos de (1310) Villigera.	60
41	Ajuste efectuado a los datos de (3548) Eurybates.	61
42	Ajuste efectuado a los datos de (21900) Orus.	62

Índice de tablas

1	Vitácora de observación, año 2019.	26
2	Cámara APOGEE U-9.	26
3	Resumen de resultados obtenidos.	44

Este Trabajo Especial de Licenciatura fue realizado en base a observaciones propias tomadas en la Estación Astrofísica de Bosque Alegre durante 23 noches de observaciones de las cuales 4 fueron en modo clásico.

1 Introducción

Los asteroides son cuerpos pequeños que orbitan alrededor de Sol al igual que los planetas. Se encuentran principalmente en el Cinturón principal, en los puntos lagrangeanos de Júpiter (asteroides troyanos) y en la región transneptuniana. Entender sus propiedades físicas y orbitales nos ayudará a mejorar los modelos actuales sobre la formación del sistema solar y abordar así un conocimiento más preciso sobre el tema ya que, en general, las características físicas de los asteroides están relacionadas a diferentes procesos a los que han sido sometidos.

Para poder obtener una estimación de la forma de los asteroides se puede utilizar el método de inversión de curvas de luz. Este método, requiere de una gran cantidad de observaciones (para lograr curvas densamente muestreadas) y que además cubran un amplio rango de ángulos de aspecto y ángulos de fase. Dado este hecho, es fundamental la colaboración entre grupos de investigación en distintos países ubicados en diferentes partes del globo.

En el presente trabajo, abordamos esta temática desde el punto de vista observacional. Entre los meses de Junio y Diciembre del año 2019 organizamos una campaña de observación desde la Estación Astrofísica de Bosque Alegre. Los objetos se seleccionaron en base a dos colaboraciones internacionales en las que hemos participado. Por un lado, el satélite Gaia aportará información sobre las masas de un conjunto de asteroides gracias a su alta precisión astrométrica. Se espera entonces, combinar estos datos con la determinación de forma y por lo tanto, de volumen obtenidas a través del método de inversión de curvas de luz para calcular la densidad aproximada de estos objetos. Por otro lado, en 2021 la NASA lanzará a la misión espacial Lucy a un viaje de 12 años en los que recolectará información sobre los asteroides troyanos. Utilizando los datos de curvas de luz, se espera complementar los estudios que se adquieran a través de este proyecto como así también abarcar un conocimiento previo más detallado de sus *targets* de forma tal de lograr una mejor planificación de la misión.

En el Capítulo 2, introduciremos algunas características generales de los asteroides como son: sus formas, tamaños y ubicación dentro del Sistema Solar. También presentamos las diferentes técnicas de observación que pueden aplicarse al estudio de estos objetos. En el Capítulo 3, describimos los objetivos principales de los dos proyectos internacionales en los cuales estamos colaborando. Además, resumimos los datos ya conocidos presentes en la literatura de la selección de objetos a los cuales hemos observado. Ya abordando los temas que conciernen a la observación, en el Capítulo 4 contaremos los pormenores del armado del plan de observación, con todo lo que conlleva y finalmente algunos detalles sobre la noche de observación en sí. En el Capítulo 5 comentaremos cómo han sido calibrados los datos y cómo hemos extraído la información para el armado de las curvas de luz. Para un mejor entendimiento de éste último tema, es necesario repasar algunos conceptos

sobre fotometría. Finalmente, en el Capítulo 6 mostramos los resultados obtenidos y sus correspondientes análisis. En el Capítulo 7 discutiremos cuáles son los temas pendientes y las expectativas para el trabajo futuro.

2 Generalidades sobre Asteroides

Nuestro Sistema Solar se formó hace alrededor de 4.6 miles de millones de años. Luego del complejo proceso de formación de los planetas, algunos pedazos de aquella materia primigenia quedaron flotando en el espacio sin llegar a constituir estructuras mayores.

Hoy conocemos a estos “restos” de la formación planetaria como asteroides. Según la IAU (*International Astronomical Union*)¹ los asteroides son cuerpos celestes pequeños y a menudo de forma irregular que contienen información sobre las condiciones iniciales del Sistema Solar. Sin embargo, los asteroides que han sobrevivido desde esa época, han experimentado numerosos eventos de colisión, dinámicos y térmicos que han dado forma a sus propiedades físicas y orbitales actuales (Bottke et al., 2002). Nuestro desafío será interpretar estas características, apoyándonos en evidencias observacionales, numéricas y teóricas. A lo largo de este Trabajo Final, nos concentramos en la vasta cantidad de información que podemos obtener observacionalmente, haciendo hincapié en el análisis de curvas de luz.

2.1 Diversidad de formas y tamaños

Actualmente se conocen alrededor de 950.000 asteroides según el MPC (*Minor Planet Center*)². Entre todos ellos, se pueden encontrar una gran variedad de formas y tamaños. La mayoría tienen forma irregular, pueden presentar superficies cubiertas de cráteres, estar acompañados de uno o más satélites naturales e incluso ya existen registros de asteroides que poseen su propio sistema de anillos. Estos objetos también pueden encontrarse en sistemas binarios y sistemas triples. Los asteroides varían en tamaño desde 530 kilómetros de diámetro (Vesta, el asteroide más grande conocido actualmente), hasta cuerpos que miden menos de 10 metros de diámetro.

En la Figura 1 se muestran cuatro ejemplos que nos permiten apreciar la diversidad encontrada en este grupo.

- El panel a) muestra un mosaico de 4 imágenes tomadas por la misión NEAR-NASA/JPL del asteroide Eros. Este objeto fue el primer asteroide en ser orbitado por una nave espacial.
- El panel b) muestra una representación artística de Psyche. Se cree que este asteroide podría ser el núcleo expuesto de un planeta primitivo que ha perdido sus capas externas debido a algún evento de colisión. Esta hipótesis está basada en el hecho de que estaría compuesto principalmente de hierro y níquel, metales que solemos encontrar en núcleos de planetas terrestres.

¹<https://www.iau.org/>

²<https://minorplanetcenter.net/>

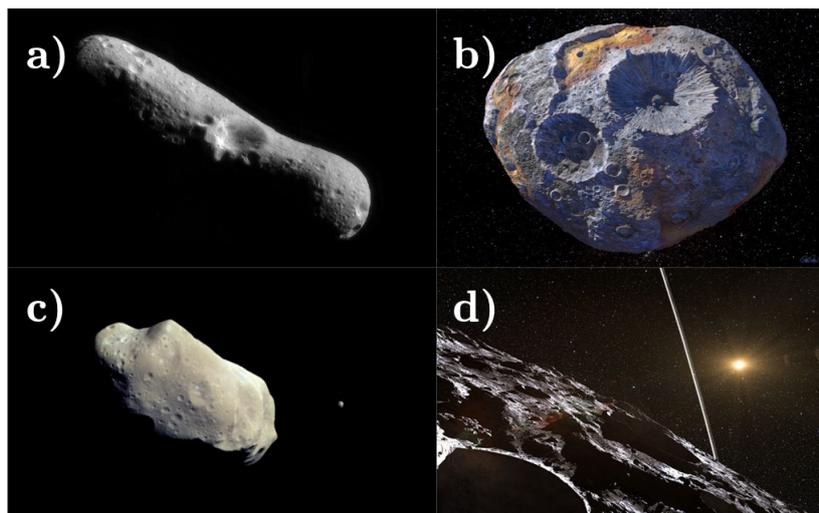


Figura 1: Imágenes de a) Eros; b) Psyche; c) Ida; d) Chariklo

Fuente: <https://solarsystem.nasa.gov>

- El panel c) muestra una imagen real tomada por la sonda espacial Galileo-NASA/JPL del asteroide Ida, el primer asteroide al cual se le descubrió una luna.
- El panel d) muestra una representación artística de Chariklo. Chariklo fue el primer asteroide al que se le detectó un sistema de anillos. Fue el quinto sistema de anillos encontrado en nuestro sistema solar, después de Saturno, Júpiter, Urano y Neptuno. Un grupo de astrónomos del Observatorio de Córdoba participaron de este descubrimiento aportando sus observaciones obtenidas desde la Estación Astrofísica de Bosque Alegre (Braga-Ribas et al., 2014).

2.2 Ubicación en el Sistema Solar

El mayor reservorio de asteroides en el sistema solar es el cinturón principal, ubicado entre las órbitas de Marte y Júpiter. Se cree que los procesos por los cuales el cinturón principal adquirió sus atributos actuales están vinculados a la formación de los planetas, particularmente de la formación de los planetas terrestres y Júpiter.

Los asteroides troyanos, el segundo grupo más grande de asteroides en el sistema solar interior, se encuentran alrededor de los puntos L_4 y L_5 de Lagrange³ de Júpiter. El origen y la evolución de los troyanos probablemente estén relacionados con el crecimiento y la evolución de Júpiter (Bottke et al., 2002). A pesar de que comparten su órbita con Júpiter, no chocan con él por estar en estos puntos “especiales”. También podemos encontrar asteroides en la región Transneptuniana, es decir , más allá de 30 UA.

³Los puntos de Lagrange son las soluciones estacionarias del problema de los tres cuerpos restringido a órbitas circulares .El punto L_4 y el punto L_5 están en los vértices de triángulos equiláteros cuya base común es la recta que une las dos masas, de forma que el punto L_4 precede al cuerpo menos masivo un ángulo de 60° visto desde la masa grande, mientras que L_5 gira detrás del cuerpo menos masivo, con un retraso de 60° visto a su vez desde el cuerpo principal. Estos dos puntos son los únicos dos puntos lagrangeanos estables.

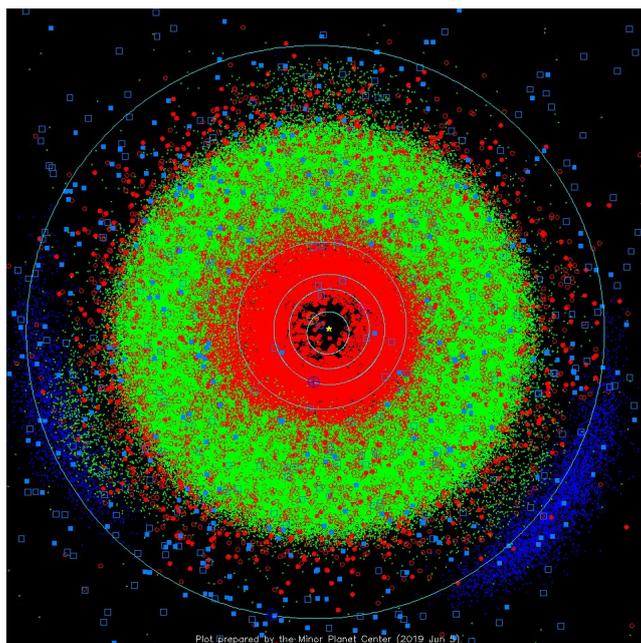


Figura 2: Distribución de asteroides en el Sistema Solar Interior: Las órbitas de los planetas están marcadas en azul claro, siendo la de mayor diámetro la órbita de Júpiter. En verde se muestran todos los objetos del Cinturón Principal de Asteroides y en rojo se denotan los NEAs. Los puntos azules corresponden a los asteroides troyanos. Fuente: Minor Planet Center (MPC).

En la Figura 2, vemos la distribución actual de asteroides en el Sistema Solar interior. Los NEAs (*Near Earth Objects*, por sus siglas en inglés) poseen perihelios menores a 1.3 UA y la gran mayoría de ellos cruzan la órbita de la Tierra en su recorrido alrededor del Sol, volviéndolos potencialmente peligrosos para la vida. De hecho, observando la Figura 2 podemos notar la gran concentración de NEAs por dentro de la órbita de Marte. En el mismo gráfico, son notorias dos “nubes” de puntos azules que comparten órbita con el planeta Júpiter. Estas nubes corresponden a la población de asteroides troyanos, que se encuentran ubicados en los puntos lagrangeanos L4 y L5 del planeta. Estudiar en detalle este grupo de asteroides es de vital importancia para entender la formación de los planetas gigantes ya que formarían parte del material primordial que le dio origen al planeta gigante de mayor tamaño de nuestro Sistema Solar.

En la Figura 3 vemos el gráfico análogo al anterior para la región Transneptuniana. Si miramos a la imagen como si fuera un reloj analógico, entre la 1 y las 2 y las 7 y las 8, se puede notar una mayor concentración de puntos. Esto se debe a un *bias* observacional: las campañas de observación suelen orientarse hacia esta dirección ya que en la diagonal opuesta se encuentra el plano de la galaxia, por lo tanto hay demasiadas estrellas y no se pueden observar los TNOs (objetos de magnitudes muy altas).

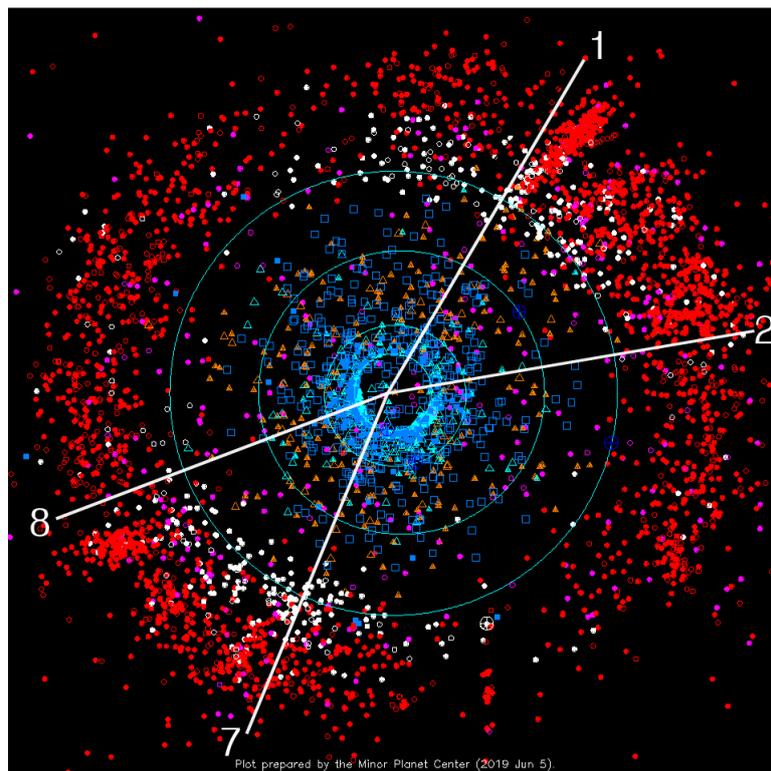


Figura 3: Distribución de asteroides en el Sistema Solar Exterior. Los objetos del cinturón de Kuiper (KBOs) están representados por puntos rojos, en blanco los Plutinos, en magenta los objetos del Disco Disperso (SDOs) y en triángulos naranjas los Centauros. Nuevamente, las órbitas son círculos azul claro y la más externa corresponde a Neptuno. Fuente: Minor Planet Center (MPC).

2.3 ¿Cómo se nombran los asteroides?

A continuación comentaremos brevemente el proceso mediante el cual se le asigna un nombre a los asteroides a medida que van siendo descubiertos⁴.

1. Todo comienza con el descubrimiento de un planeta menor, que no puede identificarse con ningún objeto ya conocido. En este momento se procede a asignarle al objeto una designación provisional. Ejemplo, 2010 UK4: Se coloca en primer lugar el año del descubrimiento y luego una combinación de caracteres alfabéticos que indican el mes y el número ordinal de descubrimiento.
2. Cuando se consiguen observaciones en cuatro o más oposiciones, el objeto puede recibir una designación permanente, un número. Ejemplo: (10199) Chariklo. El número asignado corresponde al número ordinal de nombramiento.
3. Quien haya descubierto el objeto, tiene el privilegio de sugerir un nombre, basado en una serie de requisitos impuestos por la IAU. Por ejemplo, existen grupos de asteroides a los que se les deben asignar ciertos nombres pertenecientes a dada categoría. Ejemplo: los asteroides que se encuentran en el punto Lagrangeano L_4 de Júpiter deben nombrarse en honor a los héroes del campamento Troyano.
4. Finalmente, el nombre propuesto por el descubridor es evaluado y aceptado/rechazado por el Comité de Nomenclatura de Cuerpos Pequeños de la IAU conformado por 15 astrónomos de diferentes partes del mundo.

El hecho de que ciertos grupos/familias de asteroides posean una designación especial, hace de la nomenclatura de asteroides un asunto relevante. Esto se debe a que dichos grupos poseen, en general, características físicas y/u orbitales distintivas. Por ejemplo, si escuchamos o leemos sobre un asteroide que lleva el nombre de un Centauro sabremos inmediatamente que se trata de un objeto que posee perihelio (q) más allá de la órbita de Júpiter ($q > 5.2$ AU) y un semieje mayor (a) menor que el de Neptuno ($a < 30.1$ AU).

2.4 Técnicas de Observación

En la actualidad contamos con una gran diversidad de instrumentos y técnicas observacionales que podemos aplicar al estudio de asteroides, permitiéndonos así recabar información en diferentes longitudes que nos brindará conocimientos en detalle de las distintas poblaciones. Cabe aclarar que cada una de estas técnicas posee un rango de aplicabilidad en función de la distancia a la que se encuentre el objeto (como se muestra en la Figura 4), por lo que en ocasiones, elegiremos cuál usar dependiendo de los parámetros orbitales de nuestro objetivo.

⁴<https://minorplanetcenter.net/iau/info/HowNamed.html>

Los métodos más utilizados actualmente son: inversión de curvas de luz, ocultaciones estelares, modelado termofísico, métodos radiométricos, observaciones de radar, imágenes de óptica adaptativa e incluso la exploración *'in situ'*. En las siguientes subsecciones explicaremos cada uno de estos métodos.

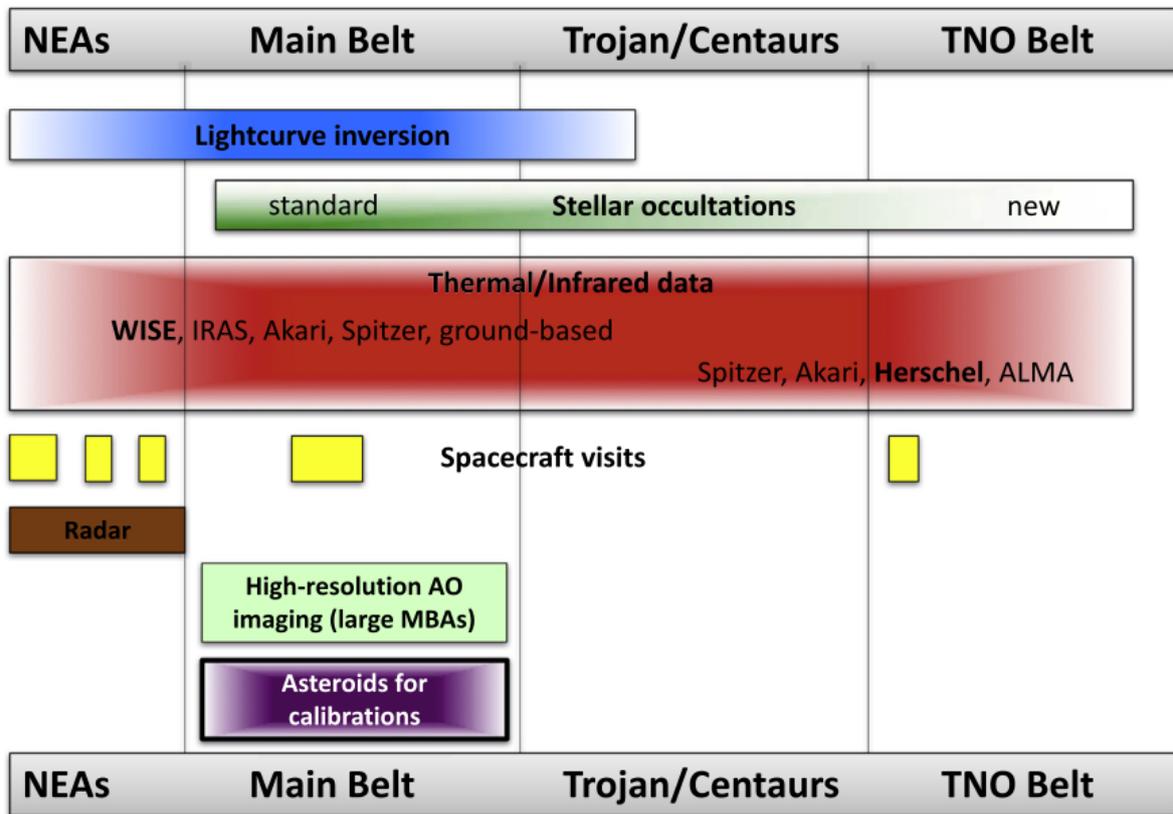


Figura 4: Técnicas aplicadas a asteroides a diferentes distancias del Sol. (Müller et al., 2018).

2.4.1 Inversión de curvas de Luz

Como hemos mencionado en el Capítulo 2.1, los asteroides en su mayoría poseen formas irregulares. Esto, sumado a las variaciones del albedo (capacidad de reflejar la luz incidente) que pueden existir sobre la superficie del objeto, provoca que se observe una variabilidad periódica del brillo del objeto a medida que este va rotando sobre su propio eje, que a su vez, puede estar orientado en diferentes direcciones. En concreto, una curva de luz es la variación del brillo del asteroide en función del tiempo, tal variación de brillo puede dar como resultado una gran cantidad de datos físicos sobre el objeto (por ejemplo, su período de rotación, forma e incluso su densidad y porosidad).

En la Figura 5 mostramos este comportamiento. Nótese que el brillo aumenta cuando estamos viendo la cara más extensa del asteroide y disminuye cuando observamos una superficie menor de este.

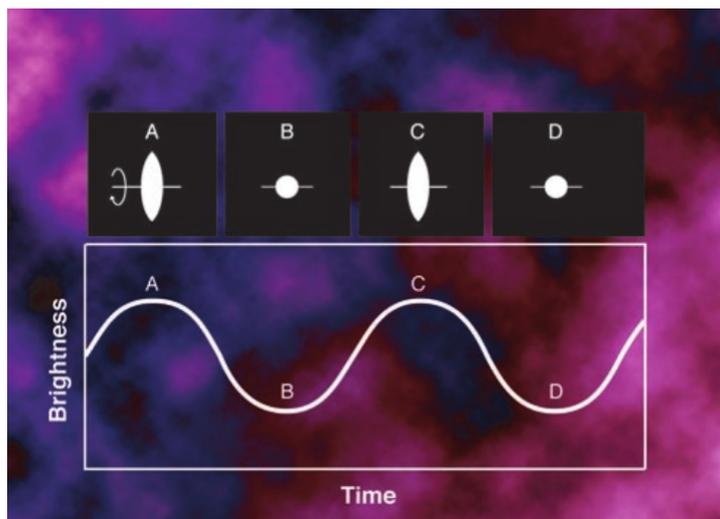


Figura 5: Esquemmatización de la curva de luz de un asteroide uniformemente iluminado. (McFadden et al., ???).

Notar que, si el objeto fuera perfectamente esférico, no podríamos detectar variabilidad alguna y la curva de luz sería en cambio una constante. Lo mismo ocurre si el eje de rotación está orientado en la dirección de la visual.

Russell “demostró” en su paper de 1906 que era imposible determinar la forma de un asteroide a partir de la información dada únicamente por su curva de luz. Esta conclusión estaba basada en el hecho de que, dada las variaciones de color y albedo en la superficie de estos objetos, a pesar de que estuviésemos observando su sección más extensa veríamos al asteroide menos brillante. Por ejemplo, si esta cara extensa fuera además la de albedo más bajo (esto es, con menor capacidad de reflejar luz) veríamos una disminución del brillo del asteroide (a pesar de estar viendo la cara más extensa). Gracias al gran avance que se ha producido en este campo en los últimos años, de la mano de las diferentes misiones espaciales que han orbitado varios de estos objetos, se ha descubierto que los asteroides tienen superficies con albedos y colores aproximadamente uniformes (Warner, 2016). Esto implica que, en buena aproximación, podemos considerar que los asteroides poseen superficies uniformes en brillo y color. De esta manera, las variaciones que observamos (curvas de luz) se deben casi exclusivamente a la forma que poseen estos objetos.

La amplitud de la curva de luz también puede cambiar con respecto al tiempo, a medida que va cambiando el ángulo de aspecto y el ángulo de fase. El **ángulo de aspecto** θ se forma por una línea que va desde el centro del asteroide a la Tierra (la línea de la visual) y el eje de rotación (ver Figura 6). En la Figura 7 esquematizamos este fenómeno. Cuando el objeto está en el punto A, el ángulo de aspecto es de 90° , en este momento es cuando tendremos la mayor amplitud de la curva de luz dado que estamos mirando hacia el ecuador del objeto. Cuando el cuerpo se mueve al punto B, el ángulo de aspecto es 0° y no notaremos variación de brillo (la amplitud de la curva será prácticamente cero) ya que estamos mirando hacia el polo del asteroide. El **ángulo de fase** α representa la distancia

angular entre el Sol y la Tierra vista desde un asteroide (ver Figura 6). Al variar el ángulo de fase, cambiarán la magnitud del asteroide y por otro lado, la amplitud de la curva de luz. Notemos que (ver Figura 8) cuando el ángulo de fase $\alpha=0^\circ$ el objeto se encuentra en oposición. En este instante, la luz del sol ilumina completamente toda la cara visible del asteroide por lo tanto observaremos una magnitud menor. A medida que el ángulo de fase aumenta, las sombras provocadas por la iluminación del Sol en la superficie del objeto comienzan a jugar un rol importante, provocando que disminuya la amplitud de la curva de luz. Estas diferencias deben tenerse en cuenta antes de comenzar con el cálculo del período (Warner, 2016).

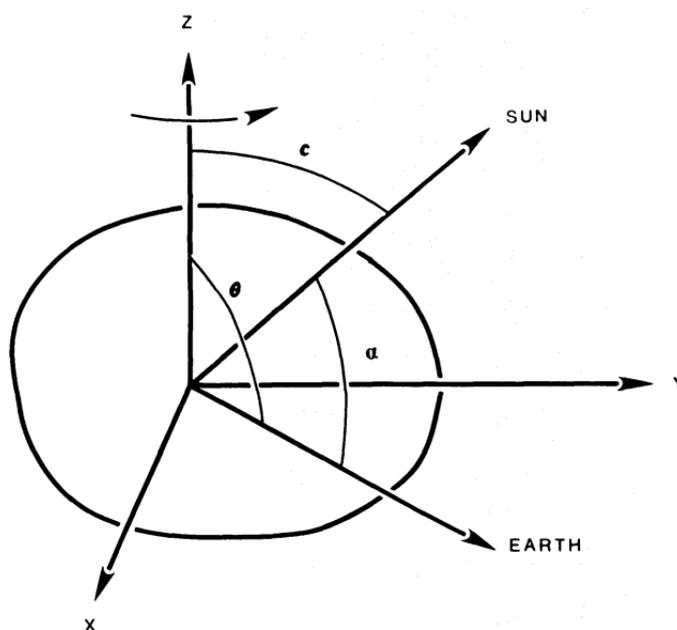


Figura 6: θ es el ángulo de aspecto y α es el ángulo de fase. (Karttunen & Bowell, 1989).

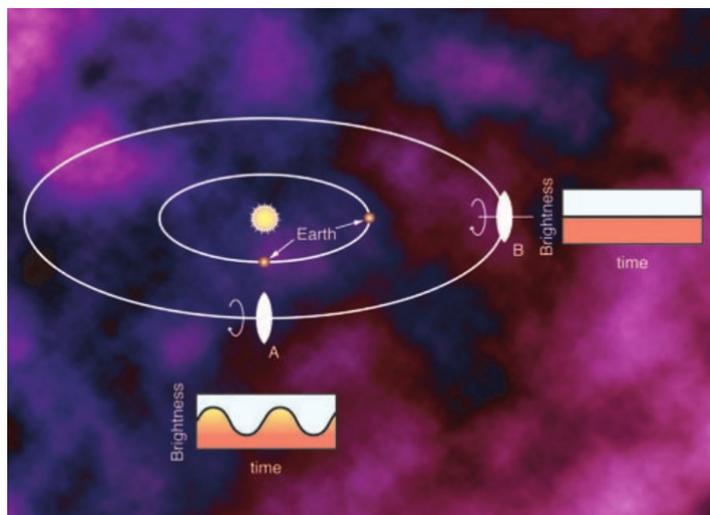


Figura 7: Variación de la amplitud de la curva de luz en función del ángulo de fase. (McFadden et al., ????).

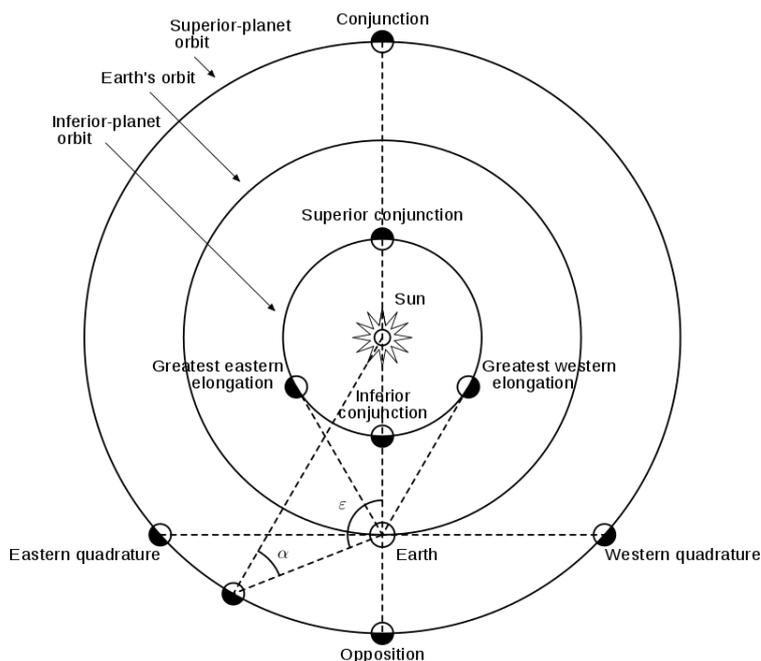


Figura 8: Variación de la iluminación del asteroide en función del ángulo de fase (α).
 Autor: Wmheric (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Positional_astronomy.png).

Para una reconstrucción precisa de la forma, existen demandas estrictas para los datos de la curva de luz, que deben ser densos, de poco ruido y provenir de una amplia gama de geometrías de visualización. En consecuencia, para reconstruir formas detalladas de asteroides, se necesitan campañas bien coordinadas. De aquí la importancia de contar con observatorios ubicados en distintos puntos geográficos del planeta a la hora de iniciar un proyecto de alto interés científico. La clave es complementar los datos ya disponibles (almacenados en bases de datos) con observaciones en diferentes geometrías, para sondear los cambios de la curva de luz en varios ángulos de aspecto y fase. Debido a la gran demanda de tiempo de observación, solo se pueden obtener modelos de forma precisos para un pequeño número de asteroides (Müller et al., 2018).

En resumen, el proceso de inversión de curvas de luz modela al asteroide basándose en un importante número de curvas de luz obtenidas a lo largo de varios años y desde diferentes lugares de la Tierra. Así, se encuentra la forma del cuerpo y la orientación de su eje de rotación. Para comprobar la precisión del modelo, se generan curvas de luz sintéticas (es decir, generadas por el modelo) y se comparan con las observadas. Para más detalle sobre uno de los métodos de inversión de curvas de luz, invitamos al lector a revisar la publicación de Bartczak & Dudziński (2018).

2.4.2 Ocultaciones

Una ocultación ocurre cuando un asteroide pasa frente a una estrella provocando que ésta “desaparezca” durante unos segundos, se observará entonces una caída de brillo en la magnitud de la estrella. Lo principal es poder determinar en qué momento ocurre

este evento, es decir, cuándo el cuerpo de interés pasa frente a una estrella. Medimos el flujo de la estrella antes, durante y después de la ocultación desde varios lugares en la Tierra por donde pase la sombra del objeto. Esta técnica puede revelar la presencia de atmósferas, descubrir posibles satélites, anillos o material en órbita alrededor de un objeto dado (Müller et al., 2018). En la Figura 9 mostramos un ejemplo de Ocultación, en este caso fue la producida por el asteroide Chariklo. Gracias a las observaciones de este evento aportadas por diferentes observatorios (incluyendo a la Estación Astrofísica de Bosque Alegre) se descubrió por primera vez en la historia un sistema de anillos en un cuerpo menor.

La principal ventaja de esta técnica es que se pueden determinar el tamaño y forma de un objeto con una precisión de menos del 2% (Müller et al., 2018).

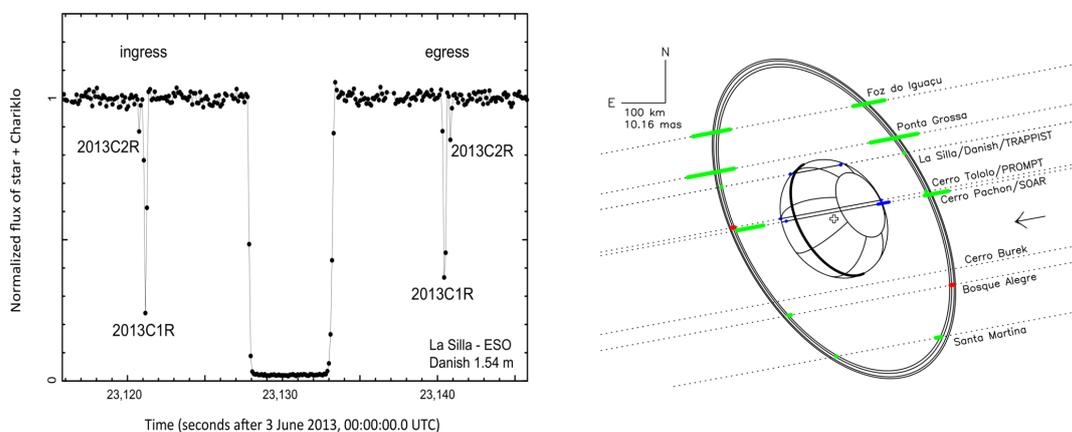


Figura 9: Izquierda: Curva de luz de la ocultación por Chariklo. Derecha: Sistema de anillos de Chariklo.

(Braga-Ribas et al., 2014).

2.4.3 Radar

La técnica de radar consiste en enviar señales desde un radiotelescopio y esperar que reboten en la superficie del objetivo para ser estudiadas desde Tierra. Teniendo en cuenta la variedad de formas que posee la superficie del asteroide, es claro que la señal viajará diferentes distancias dependiendo de a qué parte del asteroide llega. El “eco” de esta señal, llegará por lo tanto en distintos momentos permitiéndonos estimar su forma y diámetro.

Además, se puede aprovechar el efecto Doppler para estudiar la rotación del objeto, dado que la parte que se está acercando hacia el observador será una señal con frecuencias más altas (desplazada hacia el azul) y la que se está alejando tendrá frecuencias más cortas (desplazada hacia el rojo). El resultado es una “imagen” que representa el desplazamiento de frecuencia de la señal y la distancia que recorrió. En la Figura 10 se muestra una interpretación de estos resultados.



Figura 10: Imagen del asteroide 2014 JO25.

Generada con datos de radar recopilados utilizando el radar Goldstone del Sistema Solar de la NASA en el desierto de Mojave de California (<https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA21597>). La imagen tiene una resolución de 3.75 metros por píxel.

2.4.4 Imagen Directa

Al hablar de “Imagen Directa” nos referimos a que podemos resolver espacialmente las imágenes obtenidas de los asteroides, esto introduce un sesgo que favorece a cuerpos de gran tamaño. Existen diversos métodos para obtener imágenes directas de estos objetos, uno de ellos consiste en tomar imágenes con telescopios terrestres de diámetros considerables que posean además algún sistema de óptica adaptativa (AO) como por ejemplo Gemini. La óptica adaptativa (AO) tiene como objetivo eliminar las distorsiones del frente de onda mediante la inserción de uno o más elementos ópticos ajustables ubicados en el camino que recorre la luz entre la fuente y el detector, logrando aumentar significativamente el poder resolutivo. De hecho, en el caso ideal, la imagen formada en el detector estará limitada por difracción. Si el lector se siente interesado en ahondar en detalles de esta técnica, recomendamos leer a Chromey (2016).

Otra alternativa para obtener imágenes directas es a través de misiones espaciales que son enviadas específicamente a un objetivo. En este último caso, no sólo es posible tomar imágenes de alta resolución (como fue el caso de la misión *Dawn* que visitó al asteroide Vesta, Figura 11) sino que también se pueden recolectar muestras para luego estudiar en laboratorios terrestres (esta tarea fue llevada a cabo por misiones como: Hayabusa I, Hayabusa II y Osiris-REX que recolectaron muestras de asteroides NEAs). El asteroide Vesta es el más grande conocido hasta el momento. Hasta hace algunos años, Ceres poseía este título. Sin embargo, cuando a principios de siglo fue reclasificado como un planeta enano, fue entonces cuando Vesta (en esa época, el segundo asteroide más grande) pasó a ser el líder del grupo en función de su tamaño.

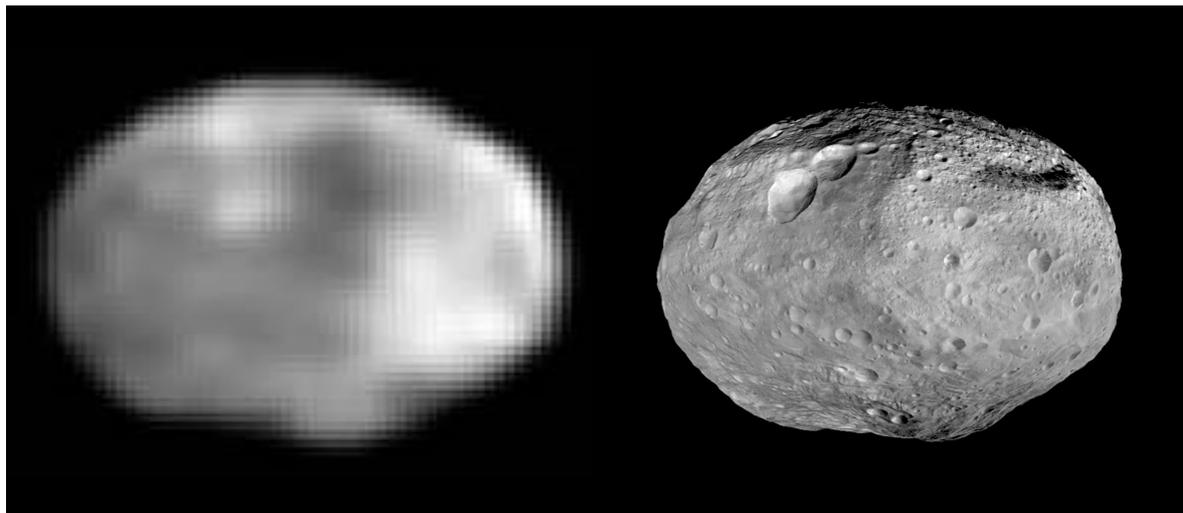


Figura 11: Asteroide Vesta. Izquierda: Ejemplo de una imagen directa obtenida a partir de Óptica Adaptativa. Derecha: Ejemplo de una imagen directa obtenida “in situ” por la misión *Dawn*.

Ben Zellner (Georgia Southern University), Peter Thomas (Cornell University) y NASA.

2.4.5 Polarimetría

La polarimetría es la medición del grado de polarización de la radiación reflejada desde la superficie de un asteroide. Las características de polarización dependen de la forma, el tamaño y las propiedades ópticas de las partículas de la superficie. Generalmente, la radiación está polarizada linealmente y se dice que está polarizada negativamente si se encuentra en el plano de dispersión y está polarizada positivamente si es perpendicular al plano de dispersión. Las mediciones de polarización en función del ángulo de fase solar para cuerpos sin atmósfera son negativas en ángulos de fase pequeños. Las comparaciones con mediciones de laboratorio indican que esto es característico de superficies complejas y porosas (McFadden et al., ???). En la Figura 12 se muestra un resultado de esta técnica, el porcentaje de polarización en función del ángulo de fase.

2.5 Sesgos observacionales

La mayoría de los asteroides mejor estudiados (aquellos que tienen ya un modelo de forma y rotación) son los que poseen períodos intermedios, no muy largos < 24 hs ni tampoco demasiado cortos > 2 hs. Además se encuentran favorecidos los objetos que poseen formas más bien elongadas y con ángulos de aspectos cercanos a 90° (Marciniak et al., 2018). Todas estas condiciones favorecen la observación dado que en pocas noches de observación es posible obtener el período y además poseen grandes amplitudes en sus curvas de luz. En la Figura 13, queda plasmado este problema de selección.

Otro sesgo (*bias*) observacional importante es la magnitud de los asteroides. Este problema es más evidente en aquellos casos en los que se cuenta con telescopios modestos que posean magnitudes límites por debajo de 20. Contrario a lo que tal vez nos dicta

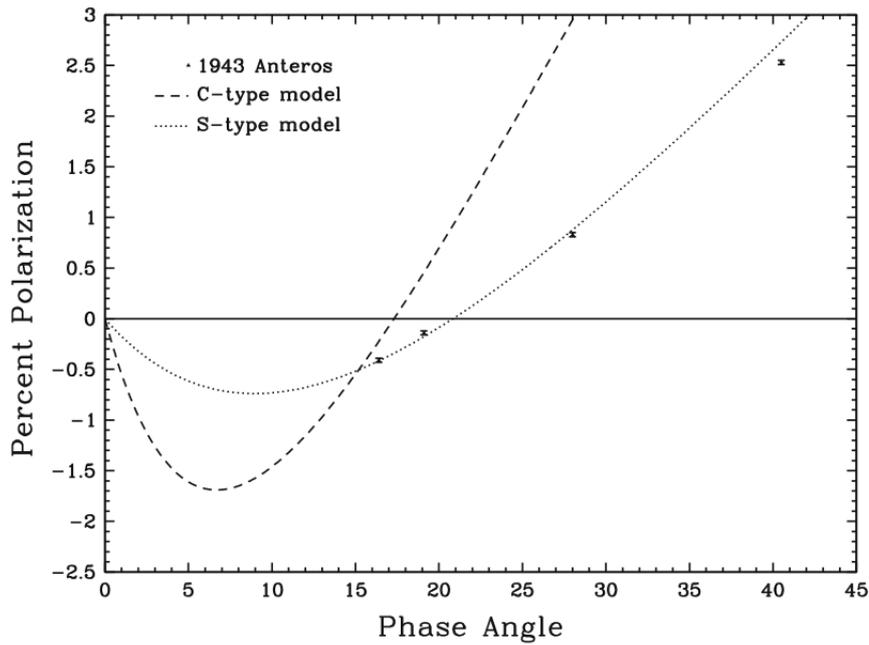


Figura 12: Polarización en función del ángulo de fase. (Masiero, 2010).

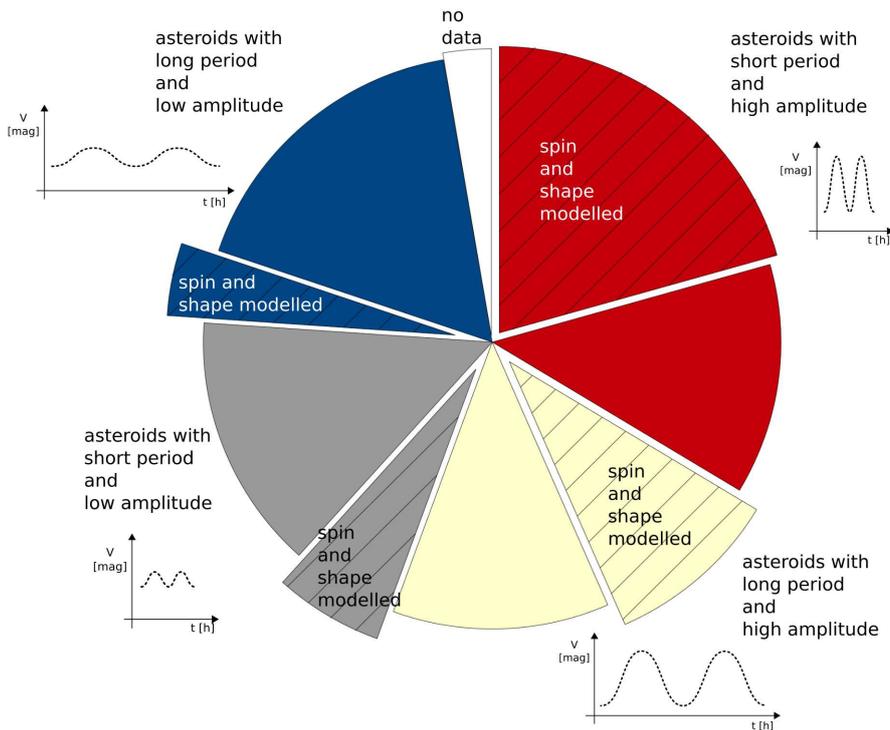


Figura 13: Distribución actual de períodos conocidos y amplitudes máximas de los 1200 asteroides más brillantes (basados en LCDB, Warner et al. (2009), actualizado el 5 de septiembre de 2016). Figura adaptada de Marciniak et al. (2018).

la intuición, un sesgo en magnitud no implica directamente un sesgo en el diámetro de los objetos (Warner, 2016). En realidad, debería pensarse como una combinación de la

distancia a la que se encuentra el asteroide, de su albedo y además de su forma.

2.6 Clasificación espectral de asteroides

Los asteroides se clasifican en diferentes tipos según su albedo, sus características espectrales y sus similitudes con los tipos de meteoritos conocidos. El albedo se refiere a la capacidad de una superficie de reflejar la luz incidente. Una superficie blanca que refleja perfectamente tiene un albedo de 1.0; una superficie negra que absorbe perfectamente tiene un albedo de 0.0.

Desde los primeros trabajos en taxonomía de asteroides, ha existido una tendencia a establecer relaciones entre las clases taxonómicas y la mineralogía. En ese momento, la única herramienta analítica disponible para los investigadores era la comparación directa entre los espectros de reflectancia (visible) y los de las muestras de meteoritos y minerales obtenidas en el laboratorio. De esta manera, el tipo C se asoció a las *condritas carbonáceas*⁵, el tipo S a meteoritos de hierro, el tipo E a *acondritas enstatitas*⁶ y el tipo M a meteoritos metálicos de hierro y níquel. (Carvano et al., 2010)

Existen diferentes clasificaciones taxonómicas de asteroides. La más utilizada es la propuesta por Tholen (1984). Tholen utilizó PCA (Principal Component Analysis) para cuantificar las similitudes espectrales en un conjunto de datos de ECAS (Eight-Color Asteroid Survey) (Zellner et al., 1985) y definió un sistema de 14 clases espectrales. Cada una de las clases se denota por una sola letra. La taxonomía de Tholen es una extensión de sistemas anteriores Zellner et al. (1985); Bowell et al. (1978). Además de las dos clases espectrales clásicas (los tipos C y S), Tholen identificó otros seis grupos que etiquetó con las letras A,B,D,F,G y T. Además, añadió las clases E,M y P correspondientes a objetos que presentaban espectros sin características para la resolución dada de ECAS. Finalmente, creó tres clases más, denotadas por Q,R y V para tres objetos con características espectroscópicas inusuales: (1862) Apollo (Tipo Q), (349) Dembowska (Tipo R) y (4) Vesta (Tipo V). (Bus & Binzel, 2002)

En el presente trabajo mencionaremos los tipos espectrales correspondientes a los objetos troyanos de nuestra muestra. Los asteroides troyanos tienen espectros predominantemente de tipo D y P, aunque hay una pequeña cantidad de tipo C. A continuación describimos cada uno de estos tipos (Bus & Binzel, 2002):

- Tipo C: tienen espectros que tienden a ser de color neutro y tienen características de absorción que son relativamente poco profundas, si es que está presentes.
- Tipo D: espectro casi sin características (espectro plano) con pendiente roja muy pronunciada.

⁵Meteoritos no metálicos (rocosos) que no han sufrido procesos de fusión o de diferenciación en los asteroides de los que proceden.

⁶Meteoritos rocosos de silicatos que se caracterizan por haber sufrido procesos de fusión y diferenciación en el planeta o asteroide del cual proceden.

- Tipo P: espectro generalmente sin características con pendiente leve a moderadamente rojiza. Puede existir una sutil absorción en el UV (0.55 μm) así también como en 0.85 μm .

Dada la escasez de caracterización mineralógica confiable de los asteroides, el uso de clases taxonómicas sigue siendo la mejor manera disponible para estudiar la composición del cinturón principal de asteroides. Y, aunque la taxonomía por sí sola no es suficiente para hacer inferencias mineralógicas significativas, el análisis de la distribución de clases en el cinturón principal puede, al menos, resaltar regiones y objetos que merecen una mayor investigación. (Carvano et al., 2010)

3 Objetivos

3.1 La misión Lucy

Los asteroides troyanos de Júpiter son cuerpos menores que comparten su órbita con el planeta ya que están ubicados en los puntos lagrangeanos L4 y L5 del mismo. Si bien su origen aún se mantiene en discusión, se cree que pueden ser restos del material primordial que formó los planetas exteriores (Marzari & Scholl, 1998; Morbidelli et al., 2005) por lo tanto podemos pensarlos como “fósiles” espaciales que nos ayudarían a entender el nacimiento y evolución de nuestro Sistema Solar.

Los troyanos cumplen un rol fundamental a la hora de buscar condiciones para mejorar los modelos dinámicos actuales, en este contexto aparece la misión Lucy de la NASA. La Misión Lucy será la primera misión espacial en estudiar a los troyanos. La misión toma su nombre del ancestro humano fosilizado (llamado “Lucy” por sus descubridores) cuyo esqueleto proporcionó una visión única de la evolución de la humanidad. Del mismo modo, se espera que la misión Lucy revolucione nuestro conocimiento acerca de los orígenes planetarios y la formación del sistema solar. La Misión Lucy se lanzará en octubre de 2021 y completará un viaje de 12 años a siete asteroides diferentes: un asteroide del Cinturón Principal, (52246) Donaldjohanson y cinco troyanos: (3548) Eurybates, (15094) Polymele, (11351) Leucus, (21900) Orus y el binario (617) Patroclus-Menoetius. Los objetivos de la misión se seleccionaron para cubrir diferentes tipos taxonómicos presentes en la región de los troyanos, tipos -D y -P (Tholen, 1984), cada uno con sus propias características físicas. En general, ambas clases presentan bajos albedos (Grav et al., 2012) y “espectros planos” enrojados (Dotto et al., 2006; Emery et al., 2011; Fornasier et al., 2007). Estas características sugieren que los troyanos de Júpiter poseen una naturaleza primitiva habiendo sufrido poca o ninguna alteración térmica desde su formación (Santana-Ros et al., 2017).

La Figura 14 ilustra la trayectoria orbital de la Misión Lucy. El camino de la nave espacial (verde) se muestra en un marco de referencia donde Júpiter permanece estacionario, dando a la trayectoria su forma de “pretzel”. Después del lanzamiento en octubre de 2021, la Misión Lucy tiene dos sobrevuelos cercanos a la Tierra antes de encontrar sus objetivos troyanos. En la nube L4 (campamento griego), la Misión Lucy volará por (3548) Eurybates (blanco), (15094) Polymele (rosa), (11351) Leucus (rojo) y (21900) Orus (rojo) durante los años 2027-2028. Antes de regresar a la Tierra, la Misión Lucy visitará la nube L5 (campamento troyano) y se encontrará con el binario (617) Patroclus-Menoetius (rosa) en 2033. Como “bonus”, en 2025 camino a la L4, la Misión Lucy volará por un pequeño asteroide del Cinturón Principal, (52246) Donaldjohanson (blanco), llamado así por el descubridor del fósil de Lucy. Después de volar por el binario Patroclus-Menoetius en 2033, la Misión Lucy continuará yendo y viniendo entre las dos nubes de troyanos cada seis años.

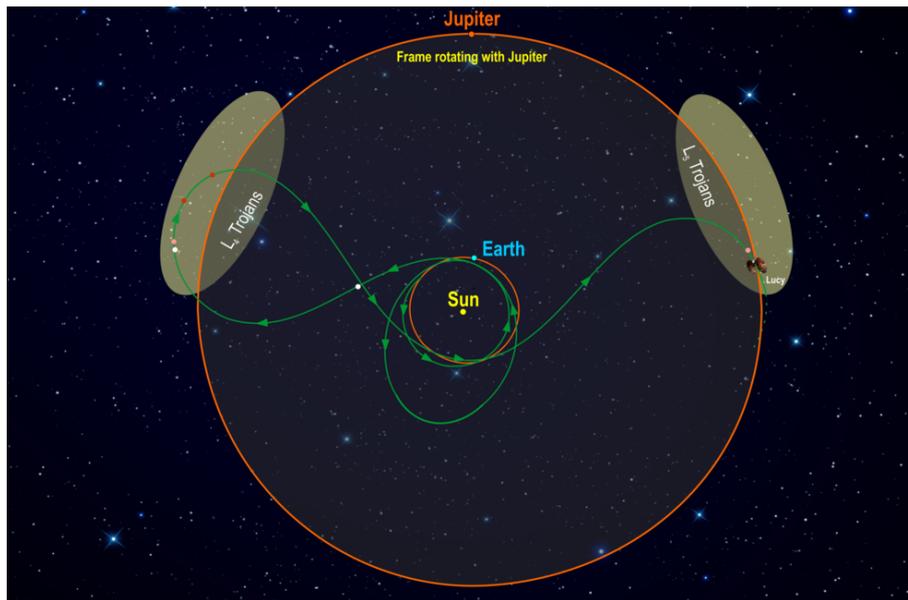


Figura 14: Trayectoria orbital de la Misión Lucy.

Fuente: Southwest Research Institute.

3.1.1 Objetos Seleccionados

- **Orus:** es un objeto perteneciente a la nube L_4 de Júpiter, se clasifica como un asteroide de tipo D (muy bajo albedo y un espectro rojizo sin rasgos distintivos) y posee un diámetro estimado de 51 km. El período reportado es de 13.48617 ± 0.00007 hs y la amplitud de la curva de luz es 0.18 ± 0.01 magnitudes. Su rotación es en sentido retrógrado y sus relaciones axiales equivalentes son $a/b=1.14$, $b/c=1.12$ (Mottola et al., 2016).
- **Eurybates:** Eurybates, asteroide perteneciente también a la nube L_4 , se clasifica como un tipo C (posee muy bajo albedo⁷: 0.0589 ± 0.007 porque su composición incluye una gran cantidad de carbono, además de rocas y minerales) en la taxonomía de Tholen (Tholen, 1984), pero es el cuerpo primario de una familia de colisión que contiene troyanos de tipo P y C (Fornasier et al. (2007)). Eurybates es un rotador retrógrado con un período de 8.702724 ± 0.000009 hs y su curva de luz posee una amplitud de 0.20 ± 0.01 magnitudes. Tiene una forma moderadamente alargada con relaciones axiales equivalentes $a / b = 1.08$, $b / c = 1.16$ (Mottola et al., 2016) y un tamaño de aproximadamente 63 km de diámetro (Nesvorný et al., 2015). Recientemente se descubrió que es un asteroide binario.

3.2 La misión Gaia

Como ya hemos mencionado, los asteroides juegan un papel importante en los modelos de formación y evolución del Sistema Solar. Para poder explicar los procesos evolutivos

⁷<https://sbnapps.psi.edu/ferret/SimpleSearch/results.action>

a los que han sido sometidos estos objetos, no basta sólo con considerar perturbaciones gravitacionales (tirones gravitatorios por encuentros próximos, resonancias orbitales) y colisiones entre los cuerpos (Santana-Ros et al., 2017). Para reproducir las características físicas observadas son necesarias determinaciones precisas de los períodos de rotación y forma que poseen los asteroides. La masa y el tamaño de un asteroide producen su densidad aparente, esto nos da una estimación de cuánta materia compone al cuerpo, así también como cuánto espacio ocupan sus cráteres.

Para una determinación precisa de la densidad, necesitamos un modelo del cuerpo, su forma 3D y la orientación de su eje de rotación. Estos modelos se obtienen comúnmente de mediciones utilizando fotometría relativa. Las curvas de luz obtenidas de diferentes geometrías (ángulos de fase y aspecto) pueden proporcionarnos mucha información sobre estos parámetros fundamentales. Sin embargo, la forma obtenida de los métodos de inversión de curvas de luz generalmente no tiene escala. Por lo tanto, necesitamos usar otros métodos para expresarlos en kilómetros y calcular los volúmenes. Las principales técnicas utilizadas para la determinación del tamaño (ver Capítulo 2.3) son ocultaciones estelares, técnicas radiométricas o imágenes de óptica adaptativa (AO), así como la exploración in situ de naves espaciales para una docena de asteroides visitados (Podlowska-Gaca et al., 2020). La determinación de las masas de asteroides tampoco es sencilla, pero se espera que Gaia⁸, gracias a sus mediciones astrométricas precisas, pueda proporcionar masas para más de cien asteroides. Esto es posible para los objetos que sufren perturbaciones gravitacionales durante los acercamientos con otros cuerpos menores (Mouret et al., 2007). La publicación de las masas de los asteroides observadas por Gaia se espera para 2023.

Para construir modelos precisos de rotación y forma para asteroides, se utilizan curvas de luz densamente muestreadas. Los modelos de asteroides confiables requieren curvas de luz de varias noches diferentes, que están bien distribuidas a lo largo de la longitud eclíptica, es decir, en un amplio rango de **ángulos de fase** (ver Figura 6). La coordinación de observaciones es también muy útil para objetos de períodos largos, para los cuales no se pudo cubrir toda la rotación desde un lugar durante una noche (Podlowska-Gaca et al., 2020).

3.2.1 Modelos 3D

Con nuestras curvas de luz, estaremos aportando datos para el modelo SAGE (Bartczak & Dudziński, 2018). SAGE es un algoritmo de modelado de asteroides basado únicamente en datos fotométricos de curvas de luz.

Los datos de curvas de luz se utilizan para producir formas no convexas de asteroides,

⁸El satélite Gaia fue lanzado en 2013 y comenzó sus operaciones científicas a mediados de 2014. Gaia continúa con el legado Hipparcos, el primer satélite en trazar un mapa de las posiciones de las estrellas. La estrategia de observación de Gaia, no solo le permite mapear más de mil millones de estrellas sino también descubrir y medir parámetros de exoplanetas, enanas marrones, supernovas y cuásares distantes, así como asteroides, planetas enanos y satélites planetarios de nuestro Sistema Solar.

asumiendo un albedo y distribución de masa homogéneos y rotación alrededor de un solo eje (no se tienen en cuenta asteroides *tumbling*, es decir, aquellos cuyo eje de rotación precesa). Cada modelo producido por SAGE tiene sentido físico, es decir, el eje de rotación se encuentra siempre a lo largo del eje de mayor inercia del modelo y atraviesa su centro de masa.

Se adopta un algoritmo de evolución genética para buscar un modelo de asteroide que mejor se adapte a las observaciones. El proceso de modelado se ejecuta en bucle y cada iteración genera una nueva población de formas y orientaciones de polos aleatorias basadas en la forma de la semilla. El proceso de modelado no hace suposiciones sobre la forma y la orientación del polo antes del modelado. Siempre se usa como punto de partida una esfera con orientación de polo aleatoria. Para cada combinación de forma y orientación de polo, se calculan las curvas de luz sintéticas y se comparan con las observadas.

En el proceso de generación de curvas de luz, se compone una escena 3D en un marco de referencia eclíptico heliocéntrico. Una cámara, como observador, se coloca en la posición de la Tierra como estaba durante el momento de la observación. Del mismo modo, el modelo de asteroide se coloca en su posición orbital correspondiente y se aplican rotaciones para orientar el eje de rotación del modelo. A continuación se crea una imagen en la que el modelo es visible como si se observara desde la Tierra con un telescopio de resolución infinita (Figura 15).

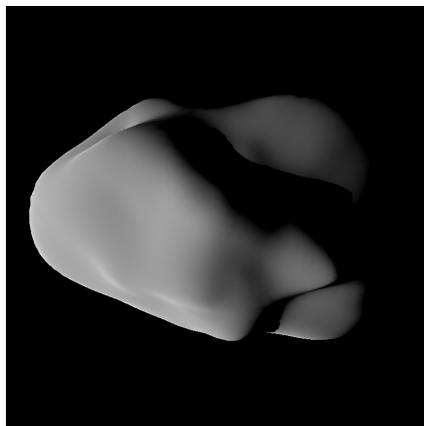


Figura 15: Ejemplo de una imagen generada para el cálculo del datos de curva de luz en un ángulo de fase alto que muestra el efecto de sombreado (Bartczak & Dudziński, 2018).

El fondo tiene un valor de 0 y cada elemento de superficie tiene su propio valor de color calculado utilizando la ley de dispersión. La suma de los valores de los píxeles de una imagen en un punto es la curva de luz. Para generar toda la curva de luz, se gira gradualmente al objeto y el proceso finaliza cuando se realiza una rotación completa. Para simular sombras, primero se genera una escena desde el punto de vista del Sol. El objetivo es crear un mapa de sombras en la superficie del modelo, que se utiliza para generar una escena desde el punto de vista de la Tierra para determinar si un elemento de la superficie está iluminado o no. Las curvas de luz generadas consisten en puntos

de flujos relativos. Cada punto se recalcula para dar una magnitud en escala logarítmica para que las curvas de luz sintéticas se puedan comparar con las observadas. Durante el cálculo de la desviación cuadrática media (RMSD), se permite que una curva de luz sintética se desplace verticalmente para encontrar el mejor ajuste. Esto es necesario, ya que la mayoría de las veces las curvas de luz observadas provienen de fotometría relativa. La generación de curvas de luz sintéticas no tiene en cuenta la distancia de un observador a un modelo, y el tamaño y el albedo del cuerpo son desconocidos.

Para decidir qué curvas de luz del modelo se parecen mejor a las reales, se utiliza un valor RMSD definido como:

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i^n (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (1)$$

donde n es el número de puntos en la curva de luz, y_i es la magnitud observada y \hat{y}_i es la magnitud calculada. El modelo con el valor RMSD más bajo se elige como el mejor y sirve como semilla para la próxima iteración del proceso de modelado.

El algoritmo SAGE genera modelos con períodos de rotación altamente precisos dependiendo del lapso de tiempo en el que se tomaron las observaciones. Para encontrar el período que mejor ajusta se arma una grilla equiespaciada de períodos y se elige el que devuelve el menor valor de RMS.

En el Capítulo 5.2 se explica detalladamente en qué consiste la fotometría diferencial, la construcción y el ajuste de las curvas de luz por lo que es recomendable volver al presente capítulo luego de haber repasado los conceptos mencionados arriba para lograr una mejor comprensión del proceso de modelado sintético de las curvas de luz.

El proceso de modelado descrito se ejecuta varias veces y cada ejecución, que comienza a partir de una esfera, sigue un camino diferente y produce un modelo separado (ver Figura 16).

La colección de modelos generados por diferentes ejecuciones del proceso se denomina familia de soluciones. En un escenario ideal, cuando la cantidad de datos observacionales es suficiente y cubre muchas apariciones de un asteroide (al menos tres), todos los modelos en una familia de soluciones son iguales. La mayoría de las veces, una familia de soluciones consistirá en dos subconjuntos de modelos, uno para cada posible orientación ambigua del polo (rotación prógrada y retrógrada). Los modelos finales resultantes (uno para cada una de las soluciones de dos polos) se eligen de una familia de soluciones basadas en el valor general de RMSD que describe el ajuste a todas las curvas de luz observadas.

Para minimizar el número de iteraciones y evitar la convergencia prematura, se requiere una cantidad suficiente de datos. La cantidad depende de factores como la orientación del eje de giro del asteroide, las posiciones mutuas del objetivo y la Tierra y la calidad de los datos. Esta última razón es uno de los motivos por los cuales contar con observaciones de telescopios con más de 1 metro de diámetro (como el instalado en la EABA) es

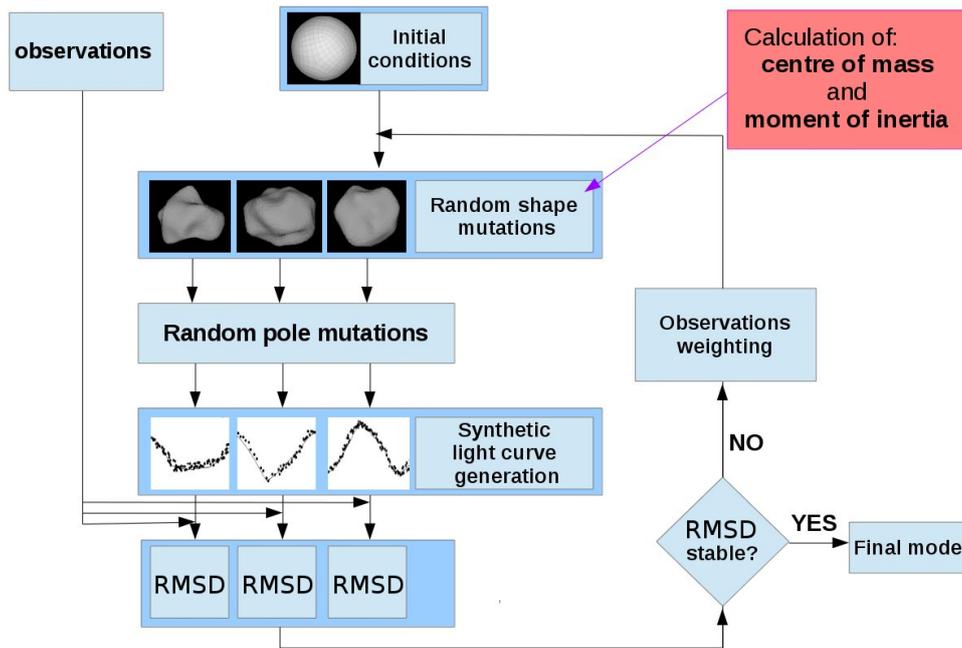


Figura 16: Esquema de modelado SAGE (Bartczak & Dudziński, 2018).

fundamental.

El éxito del modelado depende principalmente del conjunto de datos. Puede haber partes de la superficie del asteroide que están mal o nada cubiertas por las curvas de luz. Al estudiar una familia de soluciones, podemos saber si un conjunto de datos proporciona una buena cobertura de las geometrías y dará una solución de forma única. Las diferencias entre los modelos en una familia de soluciones revelan las partes de su forma que no estaban cubiertas por los datos y, si las soluciones no son iguales, el modelado se considera inconcluso. Formalmente, el mejor modelo encontrado tiene el valor RMSD más bajo. Esta es una muy buena métrica para evaluar un modelo, pero un número no puede contar toda la historia. Lo que también importa es la capacidad del modelo para reproducir algunas características distintivas y únicas presentes en las curvas de luz observadas sin producir artefactos adicionales. Sin embargo, algunas características observadas pueden ser falsas, lo que dificulta la validación.

3.2.2 Objetos Seleccionados

- **(266) Aline:** Denchev et al. (1998) obtuvieron una curva de luz con pocos puntos a la cual le ajustaron un período de 12.3 ± 0.1 horas asumiendo dos máximos y dos mínimos por ciclo. Pilcher & Benishek (2011) reportaron un período de 13.011 ± 0.001 horas con una amplitud de 0.07 ± 0.01 magnitudes asumiendo un máximo y un mínimo por ciclo. Sin embargo, estos autores también hallaron un buen ajuste proponiendo dos máximos y dos mínimos por ciclo, lo que arroja un período de 26.02 ± 0.02 horas. Otras determinaciones del período son: 13.018 ± 0.001 horas con amplitud de 0.1 magnitudes (Pilcher, 2012) y 13.05 ± 0.07 con una amplitud de 0.08 magnitudes

(Avdellidou et al., 2012).

- **(472) Roma:** Angeli (2001) no pudo obtener la curva completa para este asteroide sin embargo estimó el período en 9.6 horas con una amplitud de 0.45 magnitudes. Sheridan (2003) reportó un período de 9.8007 ± 0.0009 horas con una amplitud de 0.38 magnitudes. Behrend (2014) reportó curvas de luz en los años 2001, 2005, 2010 y 2013 con períodos de 9.8, 9.7965, 9.7964 y 9.7969 horas respectivamente. El último período calculado fue observado por Stephens (2014) quién obtuvo $P = 9.795 \pm 0.001$ horas y una amplitud de 0.38 magnitudes.
- **(525) Adelaide:** El único reporte encontrado en la literatura es el de Pilcher (2014) quien obtuvo un período de 19.967 ± 0.001 horas con una amplitud de 0.35 ± 0.03 magnitudes.
- **(1115) Sabauda:** Warner (2006) reportó un período de 6.72 ± 0.01 horas y una amplitud de 0.27 ± 0.02 magnitudes. Este período coincide con el obtenido por Ruthroff (2013) aunque obtuvo un valor diferente para la amplitud, 0.19 ± 0.02 . Behrend reportó curvas de luz en los años 2005 y 2015 en los que obtuvo períodos de 6.75 ± 0.01 con amplitud 0.16 ± 0.01 y 6.66 ± 0.02 con amplitud 0.16 ± 0.02 respectivamente. El último reporte encontrado en la literatura pertenece a Polakis & Skiff (2017) que obtuvieron $P = 6.7165 \pm 0.0007$ horas y amplitud 0.22 ± 0.01 magnitudes.
- **(1310) Villigera:** Koff (2002) reportó la primera curva de luz de este objeto junto a su período de 7.830 ± 0.005 y a su amplitud de 0.39 ± 0.02 magnitudes. Posteriormente Behrend (2006) obtuvo $P = 7.834 \pm 0.001$ horas y amplitud 0.36 ± 0.02 . Hanuš et al. (2016) obtuvieron $P = 7.83001 \pm 0.00005$ horas. Schmidt (2017) reportó $P = 7.8315 \pm 0.0006$ horas con una amplitud de 0.46 magnitudes.

3.3 Nuestro Aporte

Con las observaciones y ajustes obtenidos a partir de la elaboración de este Trabajo Final de Licenciatura pretendemos colaborar internacionalmente con datos significativos para ambos proyectos. Recordemos que es de vital importancia para ambos objetivos, la planificación de una misión espacial o el modelado de formas 3D de asteroides, contar con curvas de luz observadas en diferentes sitios del planeta. En este sentido, dado que ambos proyectos tienen sus sedes en el Hemisferio Norte, nuestra colaboración toma un rol crucial.

En los anexos A y B mostramos los resultados obtenidos durante los meses de observación, reducción y análisis de los datos. En el Capítulo 7 evaluaremos la calidad de nuestras contribuciones y discutiremos sobre que aspectos se planean mejorar para observaciones futuras.

4 Observaciones

Llevamos a cabo una campaña de observación entre Junio y Diciembre del 2019. La vitácora de observación se muestra en la Tabla 1⁹. Todas las observaciones se llevaron a cabo con el telescopio reflector de 1.54 m ubicado en la Estación Astrofísica Bosque Alegre (EABA). La cámara instalada actualmente en el telescopio es una APOGEE-U9, en la Tabla 2 se muestran sus especificaciones técnicas para distintos valores de *binneado*¹⁰. El observatorio también cuenta con los filtros corresponden al sistema UBVRI de Jhonson. Para todas las observaciones presentadas en este trabajo hemos utilizado un binning 4×4 basándonos en lo siguiente:

- El *seeing* medio en la EABA oscila entre 2" y 3". En la Tabla 2 podemos ver que con un *binning* 2×2 o 3×3 estamos utilizando una escala de placa mucho menor al valor del *seeing* medio, por lo tanto utilizando este valor de resolución estaremos sobremuestreando los datos.
- Nuevamente, de la Tabla 2 vemos que el tiempo de lectura del CCD disminuye prácticamente a la mitad si utilizamos *binning* 4×4 en lugar de *binning* 2×2.

La cantidad de noches que se nos asignaron fue de 23, de las cuales en 4 oportunidades se optó por el Modo Clásico (es decir, “*in situ*”) y el resto de las noches fueron “en servicio”.

4.1 Plan de Observación

A continuación describiremos los pasos a seguir en el armado del Plan de Observación.

4.1.1 Generación de efemérides

Para cada objeto que queramos observar debemos generar sus efemérides (posiciones de los objetos astronómicos en el cielo en un momento dado). Utilizando la base de datos del MPC¹¹ llevamos a cabo esta tarea. De la tabla de salida utilizaremos:

1. Las coordenadas ecuatoriales absolutas en J2000.0 para la fecha y el rango de tiempo universal (UT) elegido.
2. La magnitud visual (V) del objeto.
3. El movimiento aparente en el plano del cielo [arcsec/min].
4. La distancia angular entre el objeto y la Luna [°].

⁹Al leer la tabla: sf (sin filtro), R e I (filtros UBVRI de Jhonson). El número de imagenes está representado por N.

¹⁰Datos proporcionados por Carlos Colazo.

¹¹<https://minorplanetcenter.net/iau/MPEph/MPEph.html>

Tabla 1: Vitácora de observación, año 2019.

Día	Asteroide	Filtro	T_{exp} [s]	N
07/13	Orus	sf	100	57
07/14	Aline	I	60	64
07/14	Orus	sf	100	195
07/19	Aline	I	60	235
08/25	Eurybates	sf	200	115
08/26	Orus	sf	200	125
09/23	Sabauda	R	200	97
09/24	Villigera	R	200	82
09/24	Adelaide	R	200	51
09/28	Sabauda	R	300	31
09/28	Eurybates	sf	200	67
10/23	Eurybates	R	200	49
10/23	Adelaide	R	90	57
10/28	Villigera	R	200	49
10/28	Adelaide	R	90	151
10/29	Roma	R	40	248
10/29	Adelaide	R	90	145
10/30	Adelaide	R	90	40

Tabla 2: Cámara APOGEE U-9.

Binning	2×2	3×3	4×4	Unidades
Ancho/Alto de píxel	18	27	36	μm
Ancho del CCD	1536	1024	768	pixeles
Alto del CCD	1024	683	512	pixeles
Distancia Focal del Telescopio	7485	7485	7485	mm
Resolución horizontal/vertical	0.50	0.74	0.99	pixel
FOV horizontal	12.7	12.7	12.7	min
FOV vertical	8.5	8.5	8.5	min
Tiempo de lectura	5.43	3.40	2.57	seg

5. La altura (h) del objeto [°].

Algunos comentarios de cada uno de ellos:

1. Las coordenadas del objeto para los planes de observación de la EABA deben estar precesadas al equinoccio actual, en este trabajo usamos J2019.5 dado que las observaciones tuvieron lugar entre Junio-Diciembre del año 2019. Para este cálculo utilizamos la página de Chandra Xray¹².

¹²<https://cxc.harvard.edu/toolkit/precess.jsp>

2. La magnitud límite del telescopio de Bosque Alegre es alrededor de 18 magnitudes en filtro R y 20 magnitudes sin filtro. Claramente hay que tener en cuenta que el asteroide que queramos observar tenga una magnitud menor. Así mismo tampoco hemos seleccionado objetos muy brillantes (<12 magnitudes) para aprovechar el poder del diámetro de este telescopio.
3. Si el objeto se mueve rápidamente a través del cielo estaremos limitados en el tiempo de exposición que podemos darle ya que corremos el riesgo de que el objeto deje una traza en la imagen. Ejemplo: si el asteroide se mueve $0.5''/\text{min}$, en una exposición de 6 min se habrá desplazado $3''$.
4. Para una mejor visualización de la altura del objeto a lo largo de la noche y de su distancia a la luna utilizamos *StarAlt*¹³. En la Figura 17 se muestra un ejemplo. Cada una de las curvas corresponde a un asteroide en particular. La línea punteada corresponde a la trayectoria de la Luna. Podemos notar que en este caso la luna se mantuvo bien alejada de todos los objetos. ¿Por qué nos interesa saber donde está luna? Los asteroides son en general objetos de poco brillo, la dispersión de la luz de la Luna en el cielo puede entonces comprometer nuestra observación ya que el brillo de objeto quedaría por debajo del fondo de cielo. Otro punto importante para aclarar en esta instancia es que observaremos los objetos mientras se encuentren a más de 30° de altura sobre el horizonte. Esto último nos ayudará a definir en qué orden y rango de horarios observaremos cada objeto.

4.1.2 Cartas de identificación

Una vez que tenemos las coordenadas precesadas a J2019.5 sólo resta calar el campo con el telescopio. Para saber si el campo que estamos observando es el indicado debemos generar, previamente, la carta de identificación. Para esta tarea utilizamos *AstFinder*¹⁴. Este programa nos da la imagen del campo y una posición muy estimativa de la zona en donde debería encontrarse el asteroide la noche de la observación. En nuestro caso, las cartas de identificación tiene un tamaño de $5' \times 5'$ (ver Figura 18) que es aproximadamente el *FoV* de la cámara de Bosque Alegre. Es importante destacar que las cartas de identificación no tendrán al objeto de interés, dado que cuando se tomaron las imágenes para dado survey el asteroide no se encontraba en la región donde vamos a observarlo. Por lo tanto, durante la noche de observación compararemos la carta de identificación con la imagen observada y notaremos que en esta última “sobra” una fuente, ¡ese es nuestro objeto!

Otra cuestión importante es que, al ver la carta de identificación podemos darnos cuenta de que el campo está sobrepoblado. Si es el caso, nuestro objeto podrá quedar

¹³<http://catserver.ing.iac.es/staralt/>

¹⁴<https://asteroid.lowell.edu/astfinder/>

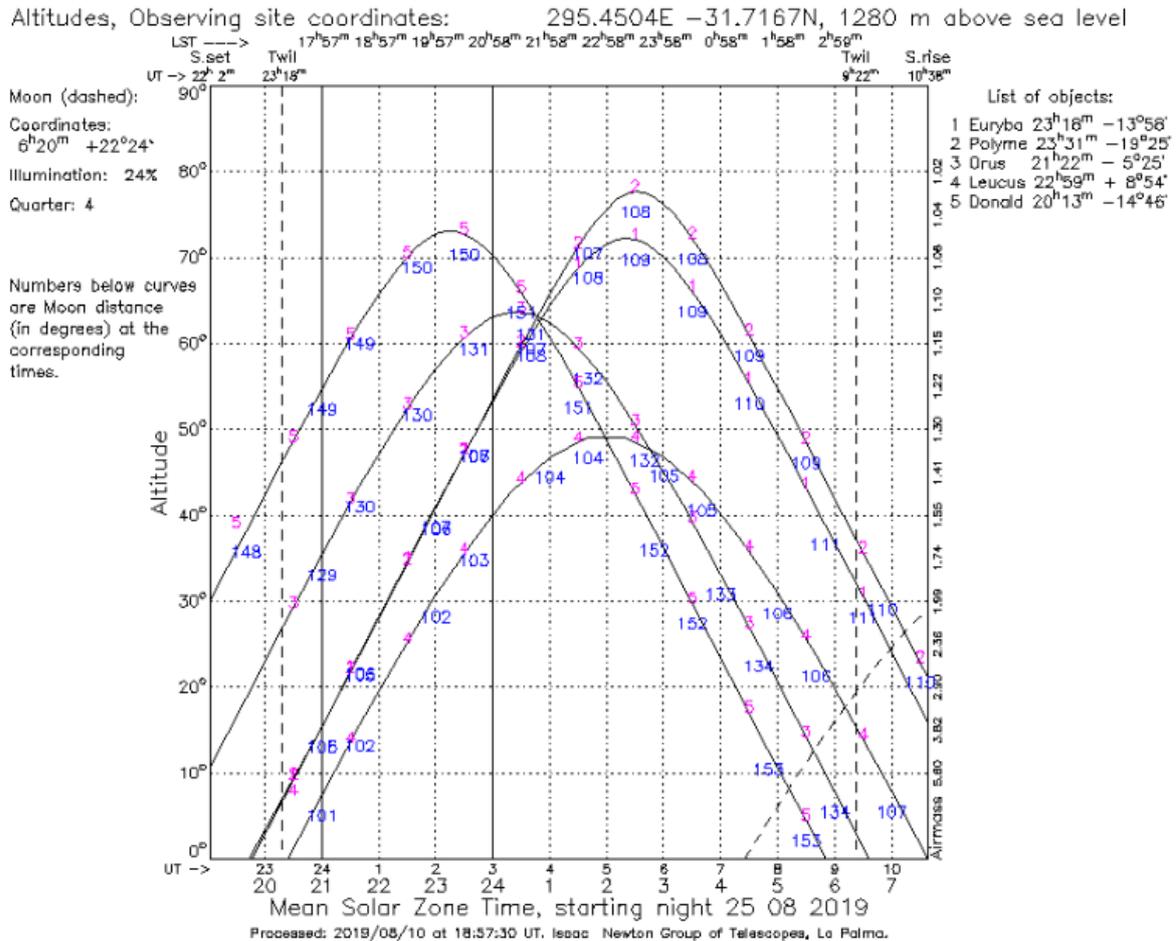


Figura 17: Altura de los objetos en función del tiempo.
<https://asteroid.lowell.edu/astfinder/>

oculto entre el brillo de todas las fuentes o puede que siempre tenga alguna fuente demasiado cercana. Como veremos en el Capítulo 5.2, es necesario que el asteroide tenga a su alrededor un “radio libre” para definir el anillo de apertura y el anillo de cielo al momento de aplicar la fotometría de apertura que nos permitirá obtener el brillo de los objetos para la fotometría diferencial. También puede ocurrir que una estrella demasiado brillante esté situada en el mismo campo que el asteroide de interés, comprometiendo de esta forma su observación.

4.1.3 Imágenes de calibración

En el plan de observación también se deben especificar las imágenes de calibración que desean tomarse y los momentos en que se debe llevar a cabo esta tarea. En nuestro caso, siempre hemos comenzado tomando las imágenes *bias*, luego los *flats de cielo* (durante el atardecer), antes de comenzar con las imágenes de ciencia tomamos las imágenes *dark* y finalmente, una vez terminada la noche de observación tomamos *flats* de cúpula. En el Capítulo 5.1 abordaremos en más profundidad el significado y la aplicación que se le da a cada una de las imágenes mencionadas.

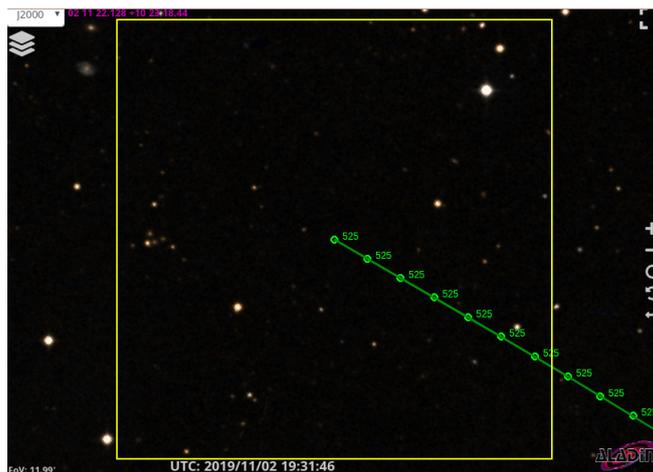


Figura 18: Ejemplo de una carta de Identificación obtenida con *AstFinder*. La imagen debe rotarse de forma tal que la orientación de los puntos cardinales coincida con la de la cámara instalada en el telescopio.

4.2 La noche de Observación

Durante la noche de observación debemos tomar algunas decisiones cuando comencemos a tomar las imágenes de ciencia para cada objeto. La calidad de las observaciones fotométricas está relacionada con la relación señal-ruido (SNR): relación entre la señal útil (fotones del objeto) y la señal total recibida (fotones del objeto+fondo del cielo). Cuanto mayor sea este número significa que estoy midiendo más señal (fotones) del asteroide que del fondo de cielo. En nuestro caso, intentamos que la señal-ruido de los objetos llegue al menos a 100, lo que significa que el ruido es aproximadamente el 1 por ciento de la señal total, o en otras palabras, que las mediciones tienen una precisión de aproximadamente 0.01 mag. Esto no siempre fue posible.

Factores que influyen en la SNR y que podemos controlar son: el tiempo de exposición y el uso (o no) de filtros. El uso de filtros disminuye la SNR, de todos modos, podemos usar un tiempo de exposición mayor para lograr el cociente deseado. Durante las noches de observación hemos notado que el aumento de la SNR en función de aumento del tiempo de exposición tiene un límite, es decir, llega un punto en el cual, a pesar de que sigamos aumentando el tiempo de exposición, no notamos un crecimiento acorde en la SNR. Dado este caso, optamos por realizar la observación sin filtro.

5 Reducción de Datos

5.1 Imágenes de Calibración

Para la reducción de las imágenes utilizamos IRAF.

Cuando hacemos una observación, la imagen “cruda” que obtendremos estará compuesta por:

$$I_{obs}(x, y) = b(x, y) + d(x, y) + s(x, y) \cdot I_{ideal}(x, y). \quad (2)$$

Dónde:

- $b(x,y)$: es el *bias*. Si no exponemos el detector a ninguna luz y no le damos ningún tiempo de exposición (esto es, obturador cerrado y tiempo de exposición cero) mediremos así mismo una señal. Esta salida producida de una exposición de tiempo cero se llama “Nivel cero” o “Nivel *bias*” y estará presente en todas las imágenes como una cantidad añadida.
- $d(x,y)$: es el *dark*. Si no exponemos el detector a ninguna fuente (obturador cerrado) y le damos un tiempo de exposición t , mediremos una señal de salida. En la mayoría de los detectores, esta respuesta (corriente oscura) es el resultado de efectos térmicos. Como el *bias*, agregará cuentas a todas las imágenes que tomemos. A diferencia del *bias*, depende del tiempo de exposición.
- $s(x,y)$: es el *flat*. Señales idénticas en general no producen respuestas idénticas en cada píxel de un detector. No todos los píxeles responden a la luz con la misma eficiencia, todos tienen diferente sensibilidad. Los *flat* pueden ser de cúpula o de cielo.
 - Cúpula: se apunta a una pantalla blanca iluminada uniformemente.
 - * Ventajas: Podemos controlar el espectro y la intensidad de la iluminación. Las observaciones pueden realizarse durante el día (no consume horas de observación).
 - * Desventajas: Puede ser difícil conseguir una iluminación bien uniforme.
 - Cielo: se apunta el telescopio cerca del cenit al atardecer/amanecer.
 - * Ventajas: Por un pequeño intervalo de tiempo, la iluminación es bien uniforme. No consume horas de observación.
 - * Desventajas: El brillo del cielo cambia rápidamente y es probable que no alcancemos a acumular suficientes *flats*. Además pueden comenzar a aparecer estrellas en el campo.

En nuestro caso, crearemos también una máscara para remover píxeles malos. Consideramos “píxeles malos” a aquellos que detectan menor/mayor cantidad de cuentas de las que deberían, píxeles no lineales. Para crear la máscara seguiremos los siguientes pasos:

1. Creamos la máscara, esto es, una tabla con las coordenadas de estos píxeles.
2. Una tarea de *IRAF* cambiará el valor de este píxel por un promedio que realiza con sus píxeles adyacentes, identificados gracias a las coordenadas que lee del archivo correspondiente a la máscara.

5.1.1 Bias (ruido de lectura)

Para comenzar a tomar las imágenes es necesario que el CCD esté estabilizado. Para controlar esto, encendemos la cámara unas tres horas antes de la hora estipulada para la observación y seguidamente comenzamos a tomar imágenes *bias*. Cuando el nivel de cuentas se estabiliza, tomamos las imágenes *bias* que usaremos para la calibración. Todas las noches tomamos una serie de 20 *bias*.

5.1.2 Dark (corriente de oscuridad)

El tiempo de exposición de los *dark* es de unos 300 segundos ya que es el máximo de tiempo de exposición que utilizamos para las imágenes de ciencia. Cada noche, se toman 4 imágenes *dark*.

Es importante destacar que en las cámaras modernas el *dark* (corriente oscura) es una cantidad que puede ser despreciada, sin embargo, hemos notado que para observaciones realizadas desde Bosque Alegre esta cantidad no puede ser ignorada ya que aporta una cantidad sustancial de cuentas a las imágenes. En la Figura 19 mostramos un histograma de número de cuentas en una imagen *dark* y es evidente que la cantidad de cuentas que añade a las imágenes no es, en absoluto, despreciable.

5.1.3 Flats

La pregunta disparadora para este capítulo es la siguiente: ¿es mejor tomar *flats* de cielo o *flats* de cúpula? Para responder esto, llevamos a cabo un pequeño “experimento”: corregir a la misma imagen con los dos tipos de *flats* por separado. En la Figura 20 se muestra un corte horizontal de la imagen corregida por *flat* de cúpula (izquierda) y la imagen corregida por *flat* de cielo (derecha). No se evidencian diferencias sustanciales entre ambas, por lo tanto decidimos continuar tomando flats de cielo. Por cada noche de observación tomamos alrededor de 10 imágenes *flats*.



Figura 19: Histograma de un *dark* ya corregido por *bias*.

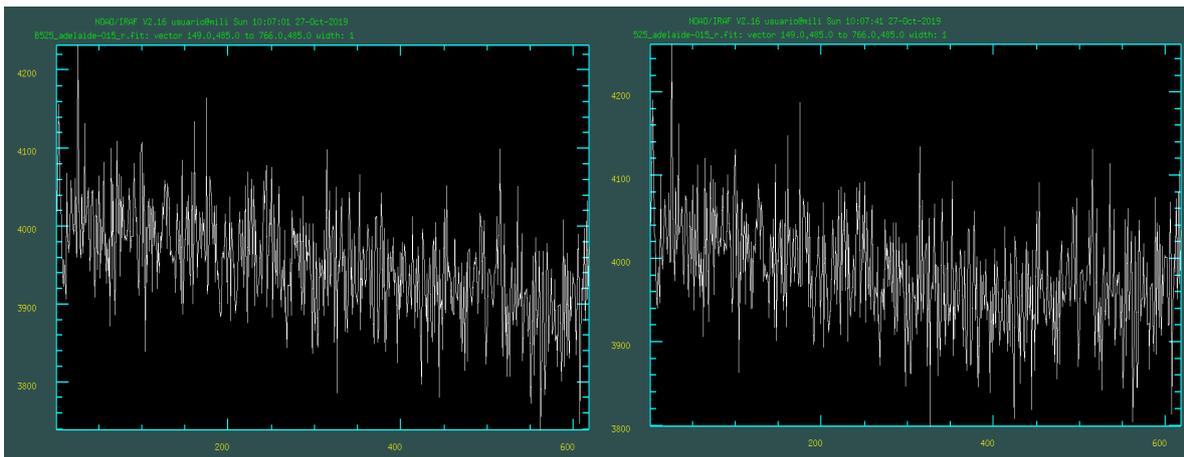


Figura 20: Corte horizontal de una misma imagen corregida por *flat* de cúpula (izquierda) y *flat* de cielo (derecha).

5.2 Obtención de las curvas de luz

Para obtener las curvas de luz, aplicaremos fotometría diferencial a nuestras imágenes. La fotometría diferencial consiste en la medición de la diferencia de brillo entre el asteroide y una estrella de calibración (que no debe ser variable). Básicamente, lo que haremos será medir la magnitud del asteroide y las estrellas de calibración con Fotometría de Apertura. Luego haremos las restas de magnitudes.

Para las mediciones fotométricas utilizaremos el *software* AstroImJ (Collins et al., 2017) y para el ajuste de las curvas de luz utilizaremos el programa Periodos¹⁵.

¹⁵<http://www.astrosurf.com/salvador/Programas.html>

5.2.1 Fotometría de Apertura

Queremos determinar el brillo de una fuente puntual. Definiremos un área circular (apertura), que estará centrada en el objeto de interés. El radio de la apertura debería incluir una buena fracción de la fuente. Los pasos a seguir serán:

1. Sumar todos los valores de los píxeles que están dentro de la apertura. Esta suma representa el brillo total de la apertura: la luz proveniente de la fuente más la contribución del cielo.
2. Estimar el valor del cielo. Usualmente usamos una región cercana al objeto de interés y libre de otras fuentes.
3. Calcular cuál es la contribución del cielo dentro de la apertura.
4. Sustraer el valor del cielo del total. Obtenemos la señal de la fuente.

¿De qué tamaño debe ser la apertura?

Queremos una apertura grande para incluir la mayor cantidad de luz posible de la fuente, pero, queremos una apertura chica porque esto excluye contribución del cielo. Una apertura que incluya mucho cielo disminuirá la señal-ruido, como también lo hará una apertura que incluya demasiado poco de la fuente de interés (ver Figura 21).

La apertura óptima dependerá del brillo de la fuente. Usualmente debe ser mayor al FWHM ¹⁶. Si $\text{FWHM} < 4$, entonces utilizaremos como radio 4 o 5 veces el FWHM. Si es > 4 , más de 5 veces el FWHM (ver Figura 23).

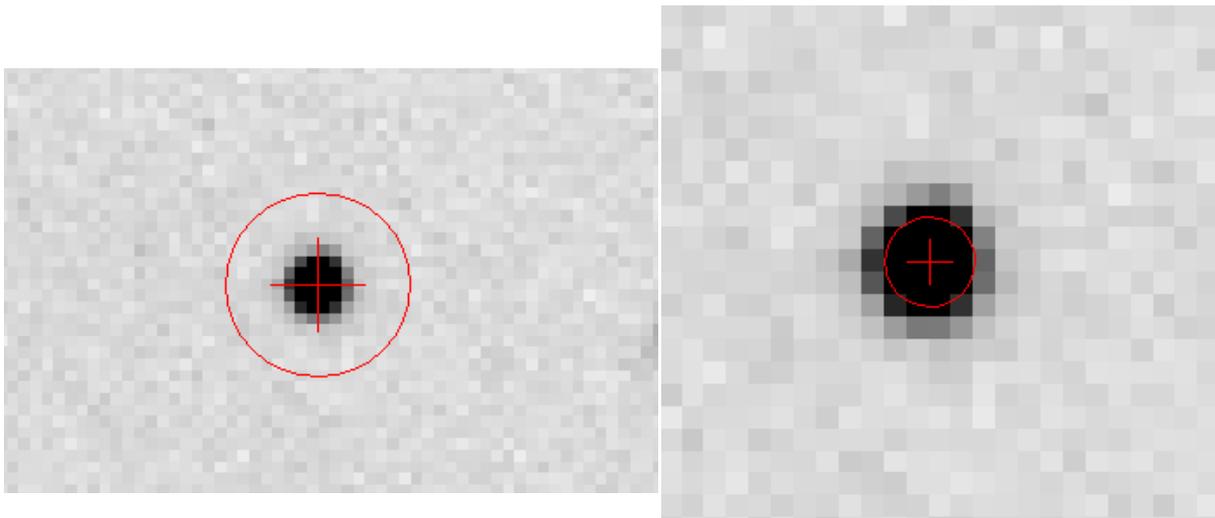


Figura 21: Elección de apertura grande (izquierda). Elección de apertura pequeña (derecha).

¹⁶FWHM (*full width half maximum*): ancho a mitad de altura de la gaussiana correspondiente a la fuente

Anillo de cielo:

Como vimos antes, necesitamos saber cuál es la emisión del cielo en la apertura. Claramente no podemos medir esta contribución dentro de la apertura y por eso medimos el valor de cielo en alguna región cercana a la fuente. Para esto usamos el anillo de cielo: una región entre dos círculos centrados en la fuente. El círculo menor es lo más pequeño posible pero lo suficientemente grande como para excluir cualquier contribución de la fuente. El radio exterior debe ser lo suficientemente grande como para tener una buena cantidad de píxeles para a estadística, pero no demasiado grande ya que podemos incluir otras fuentes y/o medir un nivel de cielo muy diferente al de la apertura (ver Figura 22).

El criterio utilizado fue: $Inner = Apertura + 5px$ y $Outer = Inner + 5px$. Esta elección, así también como la del radio de la apertura, fueron realizadas en base a análisis estadísticos presentes en la literatura que aseguran que estos valores proporcionan la mejor señal ruido posible. En la Figura 23 mostramos gráficamente los radios elegidos para cada anillo.

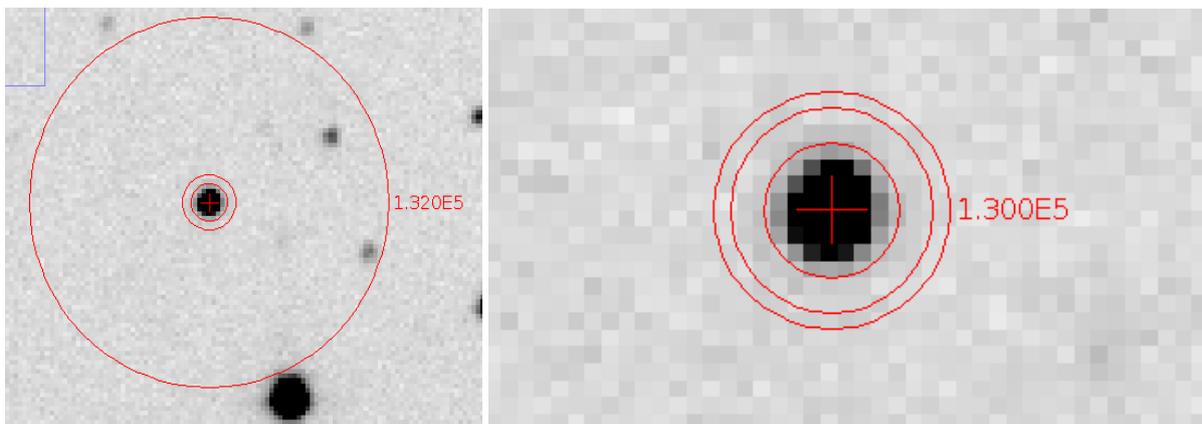


Figura 22: Elección de un anillo de cielo grande (izquierda). Elección de un anillo de pequeño (derecha).

5.2.2 Fotometría Diferencial

La fotometría diferencial mide el flujo del objeto de interés en relación con el flujo de una o más estrellas de comparación. Esta medición se realiza utilizando fotometría de apertura en el asteroide y en una o más estrellas de comparación. Una vez medidos los flujos, podemos obtener las magnitudes (ver Ecuación 3) para el objeto de interés y las estrellas de comparación. Comparando la magnitud del asteroide con la magnitud de las estrellas de comparación (se espera sea constante) podremos ver la variación del brillo del objeto de interés.

$$m = 2.5 \times \log(F) \quad (3)$$

¿Cómo elegimos las estrellas de calibración?

- De brillo similar al asteroide

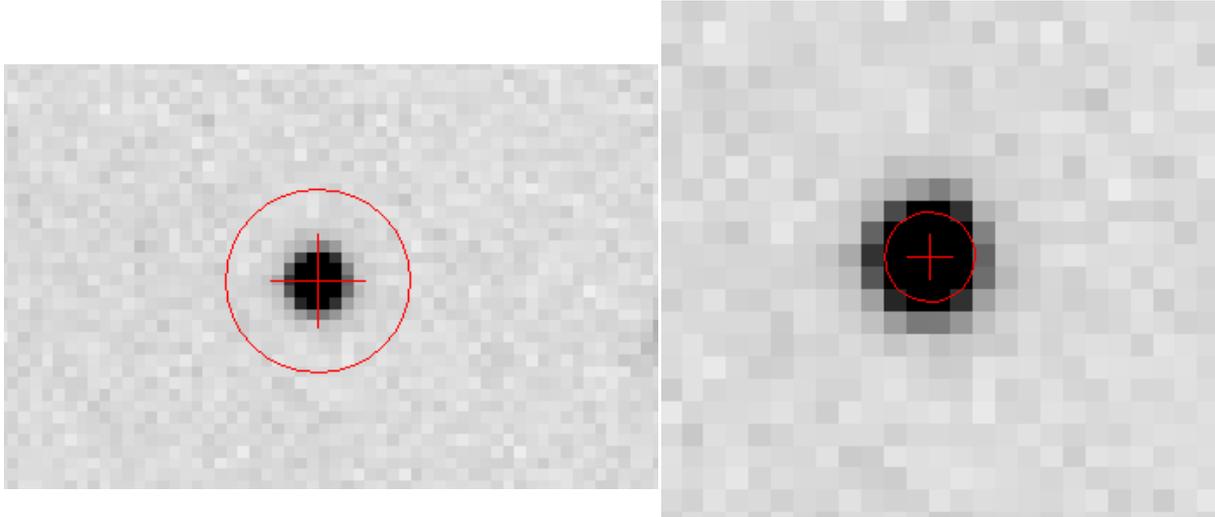


Figura 23: Criterio utilizado para los radios de los anillos correspondientes a la fotometría de apertura.

- Que no sean estrellas variables. Podemos fijarnos en un catálogo cuáles estrellas del campo no lo son.

¿Que consecuencias trae el hecho de observar una fuente en movimiento?

- Cuando comencemos a trabajar con las imágenes de ciencia, notaremos que al verlas una por una el asteroide es indistinguible, es decir, es una fuente más entre todas las que pertenecen al campo de la imagen. Para la identificación del objeto, simplemente apilamos todas las imágenes correspondientes. Este proceso, centra todas las imágenes, por lo tanto las estrellas de campo quedarán quietas y distinguiremos al asteroide porque será una fuente en movimiento a través de la imagen. En la Figura 24 mostramos 9 imágenes de Adelaide, cada una de ellas separadas temporalmente por aproximadamente media hora. Puede notarse como este asteroide cambia considerablemente su posición en comparación a las estrellas de fondo en cuestión de unas pocas horas.
- Noche a noche, el objeto cambiará de campo. Esto ocasiona que las estrellas de calibración que utilizamos en cada observación sean, en su mayoría, distintas. Por lo tanto existirá una diferencia (*offset*, ver Figura 25) entre la medición de la magnitud relativa del asteroide en cada noche. Al momento de unir todas las sesiones, es necesario corregir este valor de modo que todas las mediciones queden en una misma escala.
- Además del *offset* producido por la elección de distintas estrellas de calibración noche a noche, también debemos tener en cuenta el hecho de que la magnitud del asteroide cambiará según la noche de observación dado que cambia el ángulo de fase α (ver Capítulo 2.4.1).

- También hay que tener en cuenta que las condiciones atmosféricas cambian noche a noche. Si se utilizan diferentes telescopios, también sería necesario corregir la diferencia de mediciones producidas por ello.
- De la Figura 25 debemos pasar a lo que se conoce como **Diagrama de Fase**. Para ello, necesitamos pasar de UT a Fase rotacional y, como se mencionó antes, corregir el *offset* en magnitud. Discutiremos esto con más detalle en el Capítulo 5.3.1.

Todas estas cuestiones deben ser contempladas por el *software* que utlicemos para realizar el ajuste de las curvas de luz.

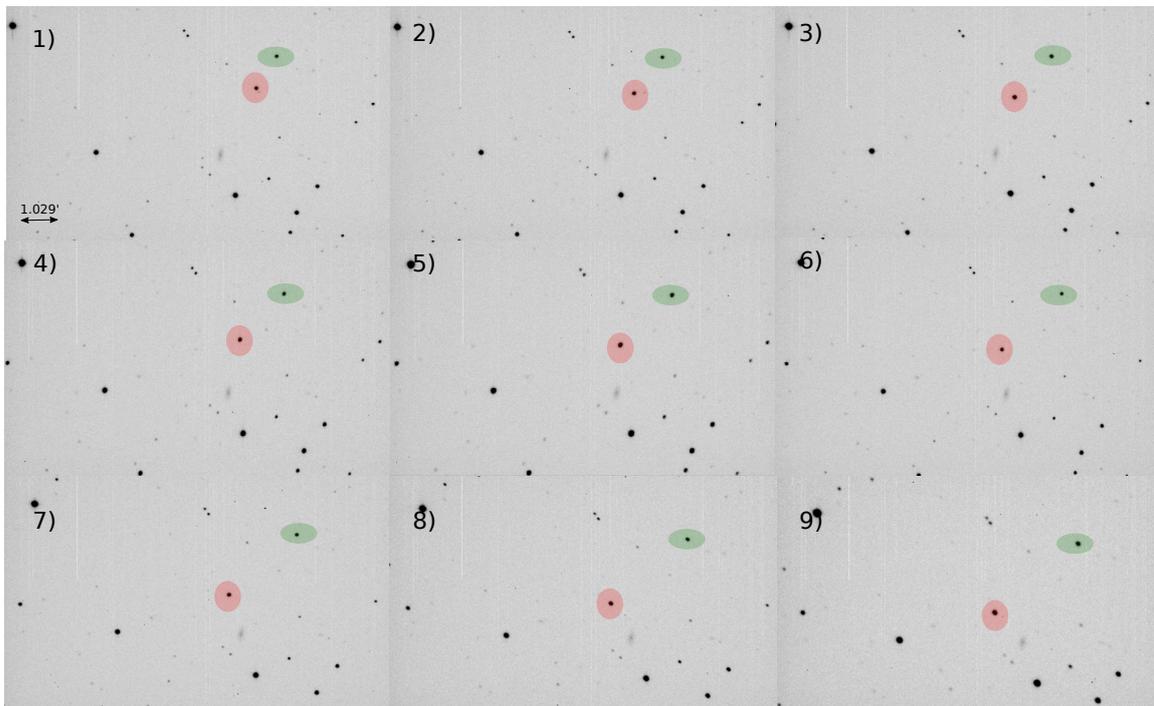


Figura 24: 9 Imágenes de Adelaide separadas temporalmente por aproximadamente media hora. En verde, se resalta una estrella de referencia y en rojo se visualiza al asteroide.

5.3 Ajustes de las Curvas de Luz

Una vez que ya tenemos las mediciones de las magnitudes queremos calcular el período de la curva de luz. Para esto, ajustaremos a nuestros datos una función periódica de tipo:

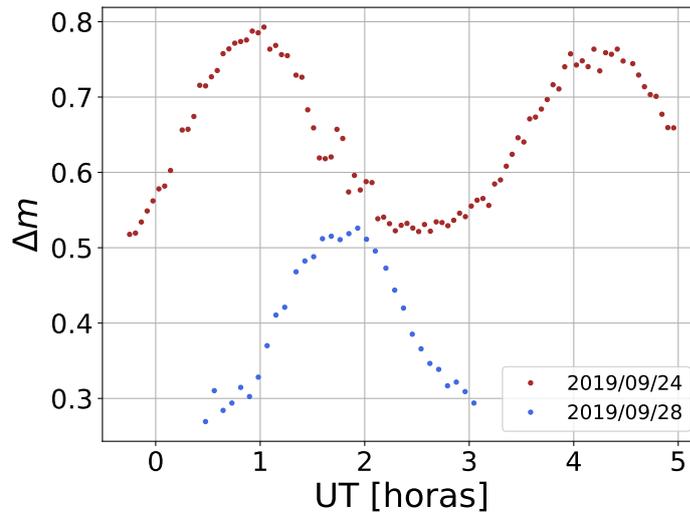


Figura 25: Ejemplo de offset con dos curvas de diferentes noches del asteroide Sabauda.

$$\begin{aligned}
 f(t) = & a_0 + a_1 \cdot \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) + b_1 \cdot \text{sen}\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \\
 & + a_2 \cdot \cos\left(2 \cdot \frac{2\pi t}{T}\right) + b_2 \text{sen}\left(2 \cdot \frac{2\pi t}{T}\right) \\
 & + a_3 \cdot \cos\left(3 \cdot \frac{2\pi t}{T}\right) + b_3 \cdot \text{sen}\left(3 \cdot \frac{2\pi t}{T}\right) \\
 & + \dots \\
 & + a_n \cdot \cos\left(n \cdot \frac{2\pi t}{T}\right) + b_n \cdot \text{sen}\left(n \cdot \frac{2\pi t}{T}\right)
 \end{aligned} \tag{4}$$

La función f es de periodo T , es decir $f(t) = f(t + T)$. La variable independiente t representa el tiempo. La frecuencia se define por $\omega = \frac{n2\pi}{T}$.

El objetivo de un ajuste es encontrar todos los parámetros desconocidos en la función f , es decir $T, a_0, \dots, a_n, b_0, \dots, b_n$ de modo tal que comparando los valores de nuestra función f con aquellos obtenidos a través de la fotometría, la diferencia entre ellos sea mínima. Lo que haremos será calcular los residuos o error cuadrático medio (RMS) entre el modelo y nuestros datos y buscar los parámetros que minimicen dicha medida de error. Por el momento, el parámetro que nos interesa es T , que nos dará el período de rotación del asteroide.

El valor n , que determina la cantidad de términos en f se llama **orden**. Cuando n es chico, f sólo podrá ajustar cambios de muy baja frecuencia, cambios en tiempos largos, mientras que si n es muy grande f podrá ajustar cambios de frecuencia alta, es decir cambios repentinos y de poca duración. Cuando n tiende a infinito f puede ajustar con exactitud arbitraria prácticamente cualquier dato periodico empirico. En general, cuanto más grande sea n , f ajustará mejor cualquier tipo de datos. El problema es que nuestras

mediciones tienen errores (ruido) que poseen frecuencias grandes y, por lo tanto, si usamos un valor muy grande de n nuestra función ajustará el ruido (estará sobremuestreando) y claramente, esto no es lo que buscamos. Si tenemos pocos datos, un valor de n entre 2 y 4 es aceptable.

En el Capítulo anterior comentamos que es necesario corregir el valor de *offset* ocasionado por distintos factores como la elección de diferentes estrellas calibración por sesión y/o los cambios en el *seeing* que pueden existir entre distintas noches de observación. Esto se consigue usando un función ligeramente diferente a la presentada en la Ecuación 4. Los *offset* se manifiestan como un una diferencia i entre sesiones. Entonces, en lugar de considerar la función f vamos a considerar la función $f + \alpha_i$ donde α_i es número que se suma a f cuando ajusta a las mediciones de la misma sesión i . El número α_i representa el *offset*. Esto nos permitirá no sólo ajustar las frecuencias sino también corregir verticalmente nuestras mediciones para que queden todas en una misma escala. Es importante destacar que el número α_i es el mismo para todas las observaciones en la misma sesión.

Ya avocándose en el procedimiento del ajuste, primero buscaremos el período candidato. En la modalidad de búsqueda de periodo el programa devolverá un gráfico RMS vs periodo que lleva el nombre de **Periodograma**, (ver la Figura 26).

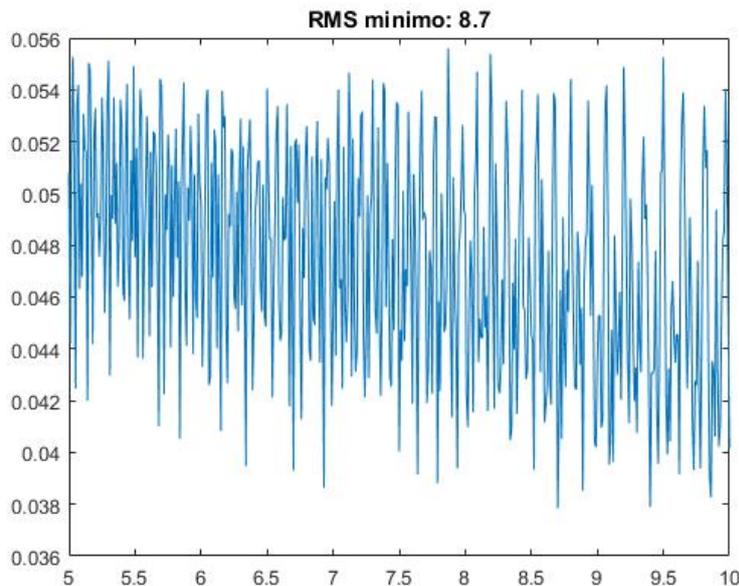


Figura 26: Periodograma de Eurybates, es decir, gráfico de RMS en función del Período. Elegiremos el valor de período que corresponda al mínimo de RMS.

Como dijimos anteriormente, estamos buscando el periodo que nos dé el valor mínimo de RMS, de modo que estaremos interesado en el valor más chico de esta gráfica. El programa lo indicará.

Cuando ya dispongamos de candidatos a periodo podemos realizar el ajuste. El resultado se muestra en la Figura 36 en el Anexo A. Periodos buscará el mejor periodo que puede encontrar cerca del candidato que seleccionamos. Generalmente devolverá el

minimo local más cercano al candidato. Además transformará cada tiempo en un correspondiente ángulo de fase rotacional. Estimaré, como se dijo, el periodo y además el error en esta estimación, dando el intervalo de confianza con un $\alpha = 0.05$. También tendremos calculada la amplitud de la curva y su error.

Una subgráfica mostrará un histograma de los residuos de todas las observaciones y el cuadro de referencias contiene de izquierda a derecha: El símbolo del marcador de una sesión, el código del observatorio que produjo esa sesión, la fecha de la sesión, el *offset* calculado de la sesión y la cantidad de puntos en la sesión.

5.3.1 Diagrama de Fase

Un Diagrama de fase es un gráfico en el que todos los datos se grafican en el rango entre cero y una vez (0.0-1.0) el período de la curva de luz. Los diferentes valores se calculan tomando el tiempo transcurrido desde un tiempo universal (UT) fijo y luego dividiendo por el período. La parte decimal del resultado es la **fase**:

$$Fase = \frac{UT_{fijo} - UT_{punto}}{Período} \quad (5)$$

6 Resultados

En este capítulo presentaremos los resultados obtenidos por cada noche de observación y también analizaremos los resultados obtenidos al realizar el ajuste de las curvas de luz.

6.1 Nuestros datos observacionales

Las curvas obtenidas de cada objeto, por noche, se muestran en el Anexo A. En todas ellas mostramos lo siguiente:

- En el título, indicamos el asteroide al que le corresponde la curva de luz y las noches a la que pertenece cada curva.
- En puntos azules: la diferencia de magnitud entre el asteroide y la estrella de comparación.
- En cruces negras: la diferencia entre la estrella de comparación y la estrella de control. Estos puntos deben representar una constante, indicando que ninguna de las estrellas elegidas es variable.

6.2 Ajustes de las curvas de luz

En este capítulo, analizaremos los ajustes obtenidos y compararemos nuestros resultados con los ya presentes en la literatura. Los ajustes obtenidos de cada objeto se muestran en el Anexo B. Cada gráfico muestra:

- Título indicando el nombre del asteroide.
- La curva de luz donde cada conjunto de puntos de color corresponde a una noche de observación diferente. La línea negra corresponde a la función que se le ha ajustado a los puntos.
- Un histograma de los residuos obtenidos luego del ajuste. Consideramos que el ajuste es bueno si el σ del histograma es menor a 0.1. Sin embargo, que al ajuste sea correcto no significa que el período y la amplitud estén bien determinados.
- La información más relevante del recuadro es: el período y la amplitud obtenida junto a sus errores. Además se muestra cuántos puntos se utilizaron para el ajuste.

6.2.1 Misión Lucy

- Orus: el período obtenido es de $P=13.48\pm 0.04$ hs y la amplitud de la curva es de 0.15 ± 0.05 . Notamos que los valores obtenidos están en acuerdo con los encontrados en la literatura.

- Eurybates: para el ajuste de la curva de luz de este objeto hemos probado con dos órdenes distintos, 2 y 4. El modelo que devolvió el mejor ajuste es el de orden 4. El período obtenido es de $P=8.70\pm 0.01$ hs con una amplitud de 0.14 ± 0.02 , lo que está de acuerdo con períodos y amplitudes reportadas por otros autores. Notar que la curva de luz tiene 3 máximos, esto indica que claramente este objeto no es un elipsoide tri-axial (presenta dos máximos y dos mínimos) sino que presenta alguna peculiaridad. Como ya hemos mencionado, recientemente se ha descubierto que Eurybates posee un satélite por lo tanto, la forma caprichosa que vemos en el ajuste puede ser debida a la presencia de este objeto.

6.2.2 Misión Gaia

- Aline: este asteroide posee una curva de luz con una amplitud muy baja, 0.07 ± 0.01 con lo cual, sumado a las condiciones atmosféricas de la EABA, dificulta la obtención de una buena curva de luz. En las Figuras 29 y 36 se observa en el asteroide lo que parecerían variaciones de corto período. Estas variaciones tienen una amplitud similar a la amplitud de la estrella de comparación. Por lo tanto, deducimos que se deben a la mala noche y no a un fenómeno intrínseco del asteroide. Además, las variaciones son de algunos minutos, típico de alguna nube que se interpone en la observación.
- Roma: Nuestros datos corresponden aproximadamente a la mitad del periodo reportado por lo que se ajusta ese tiempo. De todo modos, sabemos que la curva de luz debería tener dos máximos y dos mínimos, es decir deberíamos “repetir” la curva observada una vez más, lo que indicaría el doble del periodo y esto si corresponde con la literatura.
- Adelaide: El período obtenido es de $P=19.89\pm 0.02$ hs con amplitud 0.35 ± 0.03 . Por un lado, notamos que el período obtenido está de acuerdo con el observado por Pilcher (2014), sin embargo la amplitud de la curva presentada en este trabajo es menor que la publicada por el autor (0.35 ± 0.03). Asumiendo que las observaciones y el ajuste aquí realizado son correctos (esta suposición es válida dada los valores de RMS obtenidos), podemos decir que el cambio observado en la amplitud se debe a que ha cambiado el ángulo de aspecto de asteroide entre las mediciones de Pilcher (2014) y las propias (2019). En la Figura 31 se puede observar una leve variación en la estrella de calibración (representada por cruces negras). Atribuimos este comportamiento a variaciones de la atmósfera durante la noche de observación y no a una variación intrínseca de la estrella. Más aún, notemos que esto no representa un inconveniente para el ajuste (Figura 38).
- Sabauda: el período obtenido es de $P=6.71\pm 0.01$ hs con amplitud 0.26 ± 0.02 , el ajuste de esta curva se realizó con una función de orden 4. Se pueden notar claramente

dos máximos y dos mínimos por lo que esperamos que la forma de este asteroide se aproxime en gran medida a un elipsoide triaxial.

Villigera:

En el caso de Villigera obtuvimos un período de $P=7.81\pm 0.05$ hs con una amplitud de 0.38 ± 0.02 . Estos valores están de acuerdo con los publicados en la literatura. Mirando la Figura 33 vemos que en la primera noche la estrella de calibración presenta un comportamiento un tanto alejado de una constante (que es lo que se esperaría). Atribuimos esta variación a fluctuaciones de la atmósfera durante la noche de observación y no a causas intrínsecas de la estrella. Como vemos en la Figura 40, esta variación no afecta al ajuste final.

Este objeto ya posee una determinación de la orientación del polo, así también como de su forma¹⁷. Se presentan dos modelos diferentes (Figura 27 y 28). Comparando con nuestros datos y de ahí la validez de ellos, podemos identificar el modelo 2 como el mejor de ellos (ver Figura 33 en el Anexo A). Arribamos a esta conclusión dado que, como se puede observar en las Figuras 27 y 28, la curva de luz presenta un mínimo más profundo y uno con menor profundidad, similar a lo obtenido a partir de nuestras observaciones y ajustes.

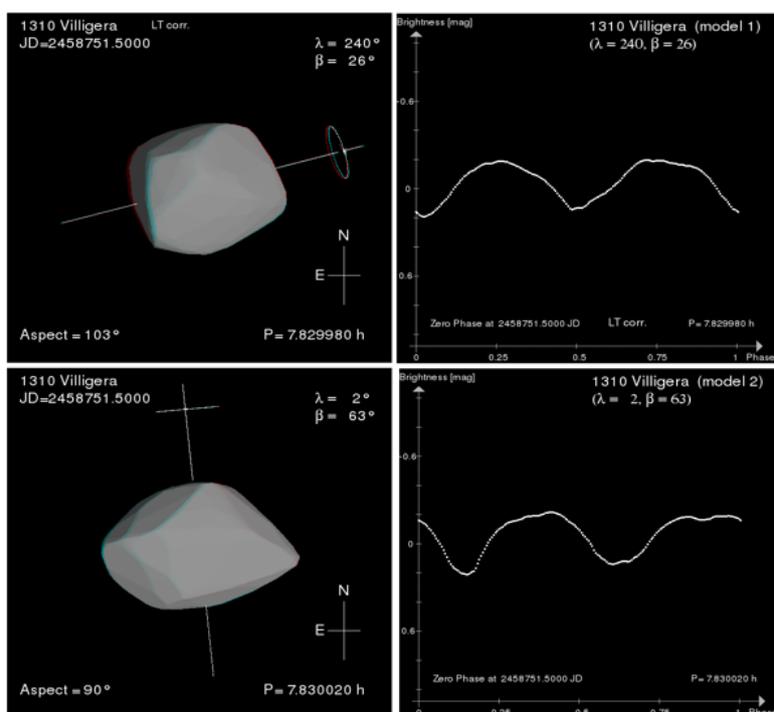


Figura 27: Modelos de Villigera para la noche del 09/25.

¹⁷<http://isam.astro.amu.edu.pl/>

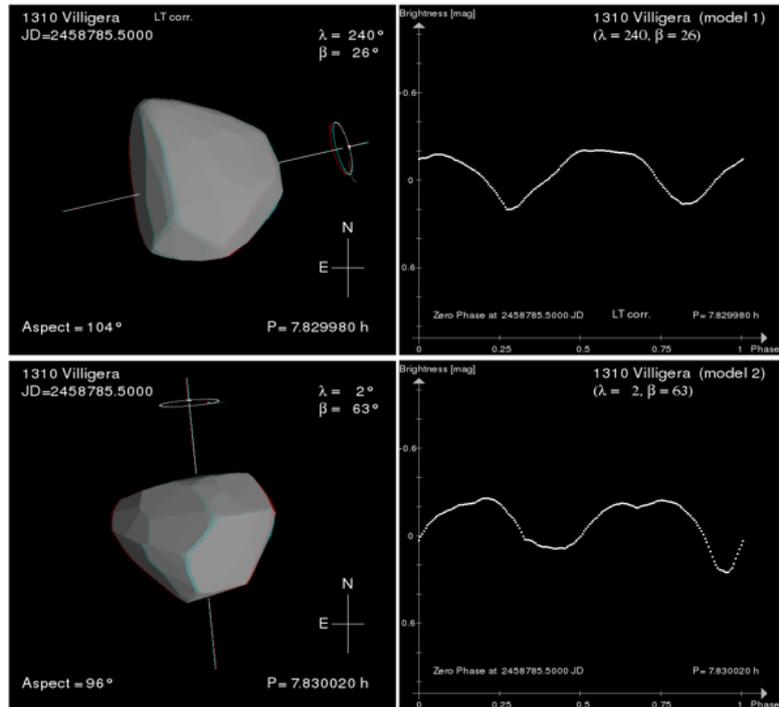


Figura 28: Modelos de Villigera para la noche del 10/29.

6.3 Resumen

A continuación, presentamos la Tabla 3 a modo de resumen de todos los datos propios obtenidos durante este Trabajo Final utilizando el telescopio de 1.54 m de la Estación Astrofísica de Bosque Alegre.

Tabla 3: Resumen de resultados obtenidos.

Asteroide	Período [horas]	Amplitud [magnitudes]	Período [horas]	Amplitud [magnitudes]	Referencia
(266) Aline	4.55±0.02	0.07±0.03	13.05±0.07	0.08	Avdellidou et al. (2012)
(472) Roma	5.10±0.01	0.23±0.02	P=9.795±0.001	0.38	Stephens (2014)
(525) Adelaide	19.88±0.01	0.16±0.02	19.967±0.001	0.35±0.03	Pilcher (2014)
(1115) Sabauda	6.71±0.01	0.27±0.01	6.7165±0.0007	0.22±0.01	Polakis & Skiff (2017)
(1310) Villigera	7.81±0.02	0.37±0.03	7.8315±0.0006	0.46	Schmidt (2017)
(3548) Eurybates	8.73±0.02	0.17±0.02	8.702724±0.000009	0.20±0.01	Mottola et al. (2016)
(21900) Orus	13.48±0.02	0.16±0.03	13.48617±0.00007	0.18±0.01	Mottola et al. (2016)

7 Discusión

Al finalizar este Trabajo Especial de Licenciatura hemos colaborado en proyectos internacionales con datos de buena calidad que permitirán a ambos grupos mejorar sus modelos. En cualquiera de los casos, será necesario continuar con las observaciones desde Bosque Alegre e incluso sería interesante disponer de otro instrumento de mayor diámetro o ubicado en un sitio que posea mejores condiciones de *seeing*.

Parte de nuestras observaciones fueron dirigidas a troyanos objetivos de la misión Lucy. **Orus** es un asteroide de tipo D con un diámetro estimado de 51 km. Es un rotador retrógrado con período de 13.48617 ± 0.00007 hs y amplitud de la curva de luz 0.18 ± 0.01 magnitudes (Mottola et al., 2016). El período que obtuvimos es de $P=13.48 \pm 0.04$ hs y la amplitud de la curva es de 0.15 ± 0.05 . Dado que este objeto tiene muy pocos resultados publicados en la literatura, es de fundamental importancia continuar con las observaciones para completar la información sobre este asteroide desde un amplio rango de ángulos de aspecto que aún no ha sido cubierto de manera efectiva.

Eurybates es un asteroide tipo C y es un rotador retrógrado con un período de 8.702724 ± 0.000009 hs y su curva de luz posee una amplitud de 0.20 ± 0.01 magnitudes (Mottola et al., 2016). El período obtenido es de $P=8.70 \pm 0.01$ hs con una amplitud de 0.14 ± 0.02 .

En ambos casos aún queda mucho trabajo por hacer. Por un lado, como mencionamos, es necesario cubrir un amplio rango de ángulos de aspecto para poder recabar más información sobre las amplitudes de las curvas de luz y así, poder determinar la dirección del eje de rotación de estos objetos. Así mismo, para una determinación precisa de la forma también serán necesarias más observaciones de calidad. En consecuencia lo ideal sería contar con mediciones de telescopios de mayor diámetro, como Casleo o ubicados en un cielo con mejores condiciones atmosféricas y mayor cantidad de noches aptas para observación como es el caso de el observatorio ubicado en Tolar Grande del cual el OAC (Observatorio Astronómico de Córdoba) participa activamente.

No se han encontrado reportes de ocultaciones de estos asteroides, con lo cual, sería muy interesante aportar mediciones llevadas a cabo a utilizando esta técnica. Recordemos que las ocultaciones son de gran importancia a la hora de determinar diámetros y formas de asteroides. Más aún, dado que se sospecha de que Eurybates es un asteroide binario, durante una ocultación podría observarse la caída de brillo debida al compañero y así, confirmar el descubrimiento.

Como comentario final sobre nuestra participación en el proyecto observacional relacionado a la misión Lucy, pretendemos continuar observando a Orus y Eurybates sumando también a los otros targets de la misión.

Con respecto a nuestra colaboración con el grupo de Póznán (Polonia) para el cual aportamos datos para la misión Gaia, podemos continuar proporcionando información

relevante no sólo para conseguir una mejor determinación de la forma y orientación del polo de los asteroides sino también para ayudar a discernir entre los diferentes modelos propuestos para cada uno de los asteroides, como es el caso de (1310) Villigera presentado en este trabajo.

El período de rotación de **Aline** es de 13.05 ± 0.07 horas con una amplitud de 0.08 magnitudes (Avdellidou et al. (2012)). Si bien Aline posee estudios realizados utilizando una gran variedad de técnicas (ocultaciones, radar, espectroscopía, curvas de luz) aún no se han publicado modelos de forma ni orientación de polo, razón por la cual es necesario continuar contribuyendo con datos. Dado que actualmente la amplitud de la curva de luz es muy baja, las observaciones desde Bosque Alegre se tornan dificultosas. Para este tipo de objetivos, esperamos contar con telescopios como Casleo o el telescopio de Tolar Grande que nos posibiliten medir variaciones de brillo más pequeñas.

Roma posee un período de $P=9.795 \pm 0.001$ horas y una amplitud de 0.38 magnitudes (Stephens, 2014). Este objeto puede seguir siendo observado desde la EABA, de hecho, debemos hacerlo para completar la curva de luz y obtener el período correcto ya que con una sola noche de observación nuestro ajuste da aproximadamente la mitad del mismo. Este asteroide también está estudiado a través de una gran variedad de técnicas: curvas de luz, ocultaciones, radar, polarimetría y espectroscopía. Sin embargo tampoco cuenta con modelo de forma y orientación de polo.

El único reporte encontrado en la literatura sobre **Adelaide** es el de Pilcher (2014) quien obtuvo un período de 19.967 ± 0.001 horas con una amplitud de 0.35 ± 0.03 magnitudes. El período que obtuvimos es de $P=19.89 \pm 0.02$ hs con amplitud 0.35 ± 0.03 . Este asteroide claramente necesita seguir siendo observado durante una cantidad considerable de tiempo ya que hasta el momento tenemos escasa información sobre él. Dado que tiene un período de rotación largo será necesario coordinar campañas de observación porque desde un sólo sitio, en una sola noche, no se puede obtener el período completo. Además este asteroide no posee reportes de ocultaciones, por lo tanto, un objetivo a futuro sería poder realizarlas.

Sabauda posee un período de $P=6.7165 \pm 0.0007$ horas y amplitud 0.22 ± 0.01 magnitudes (Polakis & Skiff, 2017). El período que obtuvimos es de $P=6.71 \pm 0.01$ hs con amplitud 0.26 ± 0.02 . Para este objeto aún no hay modelado de forma y orientación del eje de rotación por lo que hay que continuar con las observaciones que pueden ser realizadas desde la EABA sin ningún inconveniente.

El período de rotación de **Villigera** es $P=7.8315 \pm 0.0006$ horas con una amplitud de 0.46 magnitudes (Schmidt, 2017). Nosotros obtuvimos un período de $P=7.81 \pm 0.05$ hs con una amplitud de 0.38 ± 0.02 . De nuestra muestra, es el único objeto que posee un modelo de forma y orientación del eje de rotación. Sin embargo, hay dos modelos probables y nuestras observaciones sugieren que el correcto es el Modelo 2 (ver Capítulo 6.2.2). Son necesarias más mediciones de la curva de luz para afirmar esta hipótesis. Además, este asteroide tampoco posee datos provenientes de ocultaciones con lo cual, esperamos poder

aportar datos a través de esta técnica a futuro.

Consideramos importante resaltar el hecho de que en el único caso que por el momento se ha calculado el modelo de forma es en Villigera. Es fundamental aportar más datos de curvas de luz para que se puedan concluir los modelos de los demás asteroides.

¿Cuál es la fortaleza de nuestras observaciones en ambos casos? Actualmente hay pocos telescopios con 1.5 m de diámetro con tiempo disponible en el hemisferio sur y que además resulten útiles para obtener curvas de luz densas de estos y otros asteroides. Creemos fuertemente que es muy valioso explotar esto y mantener las colaboraciones con estos dos grupos.

En conclusión, no sólo hemos participado satisfactoriamente en los dos proyectos de gran calibre antes mencionados, sino que también hemos sido capaces de obtener cálculos propios de períodos y amplitudes de curvas de luz para 7 asteroides, estando 5 de ellos en un buen acuerdo con los ya publicados en la literatura. Más aún, en el caso del asteroide Eurybates, podríamos estar brindándole a la comunidad científica datos muy relevantes sobre la presencia de su objeto compañero descubierto hace sólo unas semanas. Cabe aclarar que todos los datos fueron puestos a disposición de los grupos mencionados, y participaron de los artículos científicos que sean publicados.

Como trabajo futuro ya contamos con una selección de asteroides para observar utilizando la técnica de ocultación: Adelaide, Villigera, Eurybates y Orus. Pretendemos continuar con las observaciones de curvas de luz de los asteroides presentes en la muestra utilizada para este Trabajo Final ampliándola para abarcar mayor cantidad de objetivos de ambas misiones.

Referencias

- Avdellidou C., Ioannidis P., Skoulidou D. K., Tsiganis K., Seiradakis J. H., 2012, *Minor Planet Bulletin*, 39, 103
- Bartczak P., Dudziński G., 2018, *MNRAS*, 473, 5050
- Bottke, W. F. J., Cellino A., Paolicchi P., Binzel R. P., 2002, *Asteroids III*
- Bowell E., Chapman C. R., Gradie J. C., Morrison D., Zellner B., 1978, , 35, 313
- Braga-Ribas F. et al., 2014, *Nature*, 508, 72
- Bus S. J., Binzel R. P., 2002, , 158, 146
- Carvano J. M., Hasselmann P. H., Lazzaro D., Mothé-Diniz T., 2010, *A&A*, 510, A43
- Chromey F. R., 2016, *To Measure the Sky: An Introduction to Observational Astronomy*, 2nd edn. Cambridge University Press
- Collins K. A., Kielkopf J. F., Stassun K. G., Hessman F. V., 2017, *The Astronomical Journal*, 153, 77
- Denchev P., Magnusson P., Donchev Z., 1998, , 46, 673
- Dotto E. et al., 2006, , 183, 420
- Emery J. P., Burr D. M., Cruikshank D. P., 2011, *AJ*, 141, 25
- Fornasier S., Dotto E., Hainaut O., Marzari F., Boehnhardt H., De Luise F., Barucci M. A., 2007, , 190, 622
- Grav T., Mainzer A. K., Bauer J. M., Masiero J. R., Nugent C. R., 2012, *ApJ*, 759, 49
- Hanuš J. et al., 2016, *A&A*, 586, A108
- Karttunen H., Bowell E., 1989, *A&A*, 208, 320
- Koff R. A., 2002, *Minor Planet Bulletin*, 29, 25
- Marciniak A. et al., 2018, *A&A*, 610, A7
- Marzari F., Scholl H., 1998, , 131, 41
- Masiero J., 2010, , 207, 795
- McFadden L. A. A., Weissman P. R., Johnson T. V., ????
- Morbidelli A., Levison H. F., Tsiganis K., Gomes R., 2005, *Nature*, 435, 462

- Mottola S., Marchi S., Buie M. W., Hellmich S., Di Martino M., Proffe G., Levison H. F., Zangari A. M., 2016, in AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #48, AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts, p. 208.04
- Mouret S., Hestroffer D., Mignard F., 2007, *A&A*, 472, 1017
- Müller T. G. et al., 2018, *Advances in Space Research*, 62, 2326
- Nesvorný D., Brož M., Carruba V., 2015, *Identification and Dynamical Properties of Asteroid Families*, pp. 297–321
- Pilcher F., 2012, *Minor Planet Bulletin*, 39, 171
- Pilcher F., 2014, *Minor Planet Bulletin*, 41, 155
- Pilcher F., Benishek V., 2011, *Minor Planet Bulletin*, 38, 15
- Podlewska-Gaca E. et al., 2020, arXiv e-prints, arXiv:2001.07030
- Polakis T., Skiff B. A., 2017, *Minor Planet Bulletin*, 44, 299
- Ruthroff J. C., 2013, *Minor Planet Bulletin*, 40, 90
- Santana-Ros T., Dudziński G., Bartczak P., 2017, in *Assessment and Mitigation of Asteroid Impact Hazards: Proceedings of the 2015 Barcelona Asteroid Day*, Trigo-Rodríguez J. M., Gritsevich M., Palme H., eds., Vol. 46, p. 55
- Schmidt R. E., 2017, *Minor Planet Bulletin*, 44, 191
- Sheridan E. E., 2003, *Minor Planet Bulletin*, 30, 28
- Stephens R. D., 2014, *Minor Planet Bulletin*, 41, 226
- Tholen D. J., 1984, PhD thesis, University of Arizona, Tucson
- Warner B. D., 2006, *Minor Planet Bulletin*, 33, 85
- Warner B. D., Harris A. W., Pravec P., 2009, , 202, 134
- Warner B. D. D., 2016, *A Practical Guide to Lightcurve Photometry and Analysis*
- Zellner B., Tholen D. J., Tedesco E. F., 1985, , 61, 355

A Datos observacionales obtenidos

Presentamos las curvas de luz obtenidas durante los meses de Junio-Diciembre del año 2019 desde la Estación Astrofísica de Bosque Alegre.

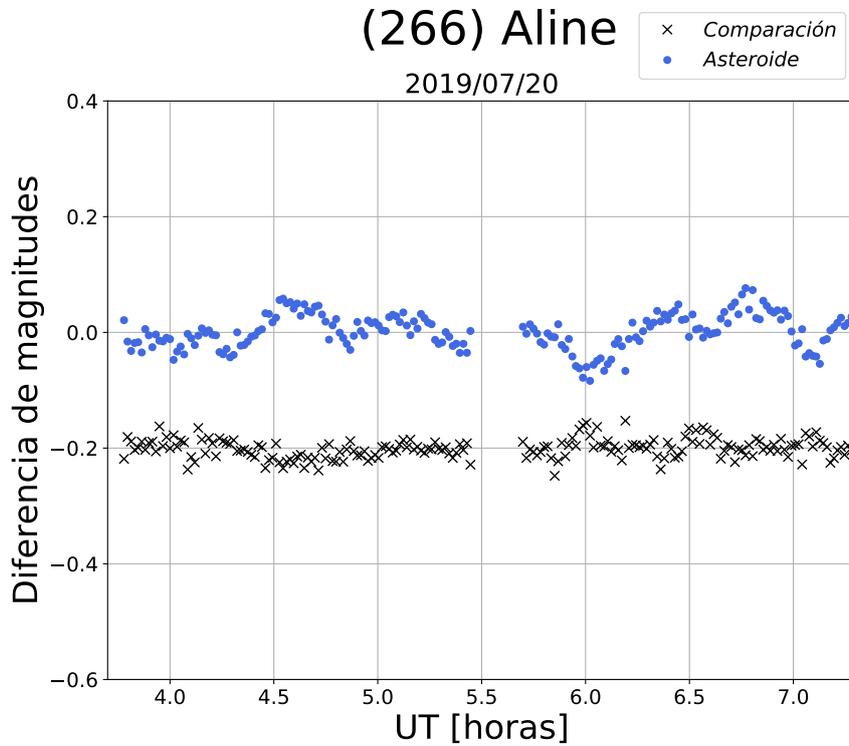


Figura 29: Curva de luz observada de (266) Aline.

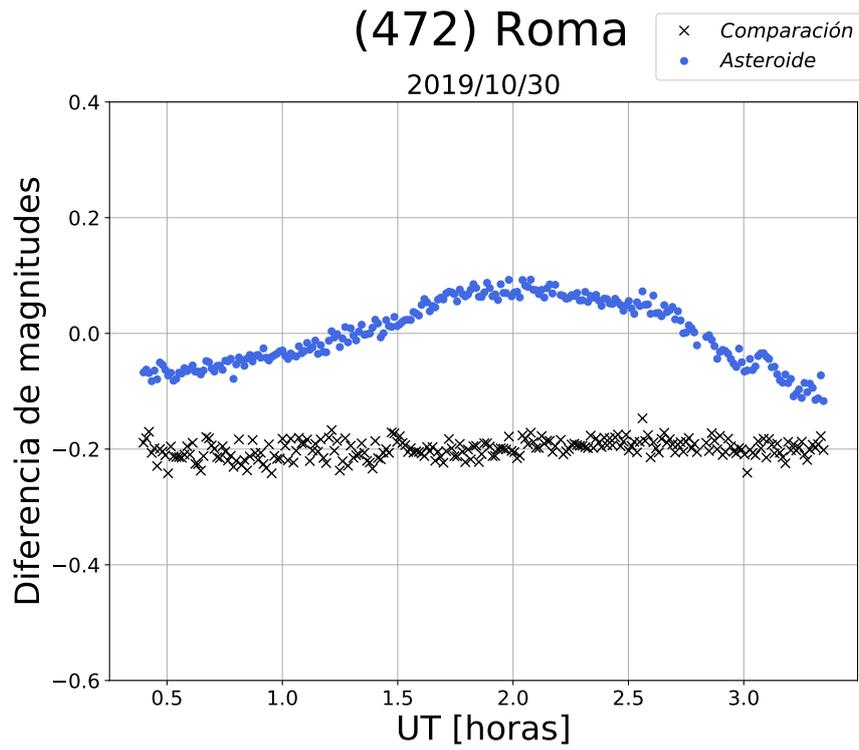


Figura 30: Curva de luz observada de (472) Roma.

(525) Adelaide

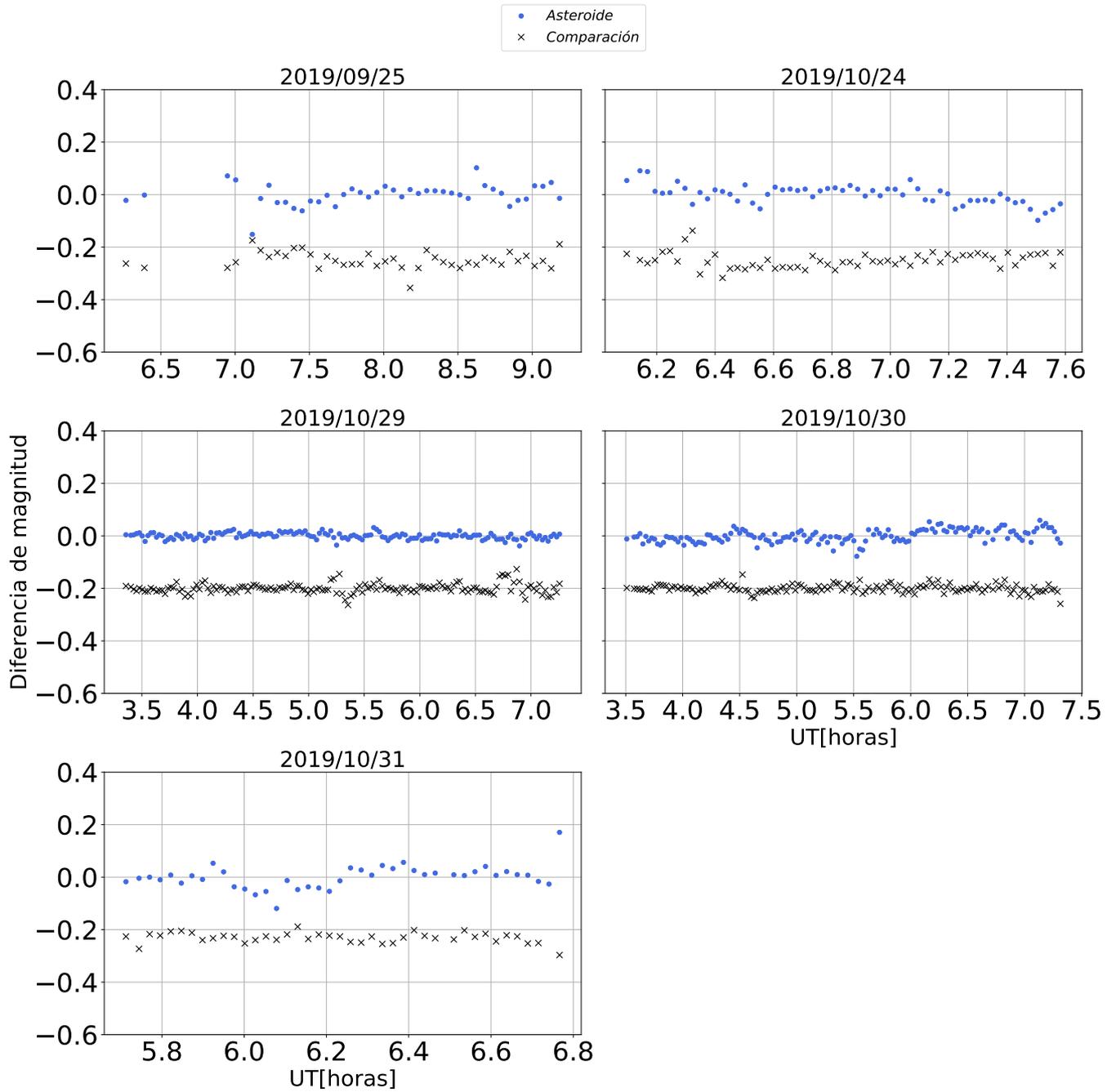


Figura 31: Curva de luz observada de (525) Adelaide.

(1115) Sabauda

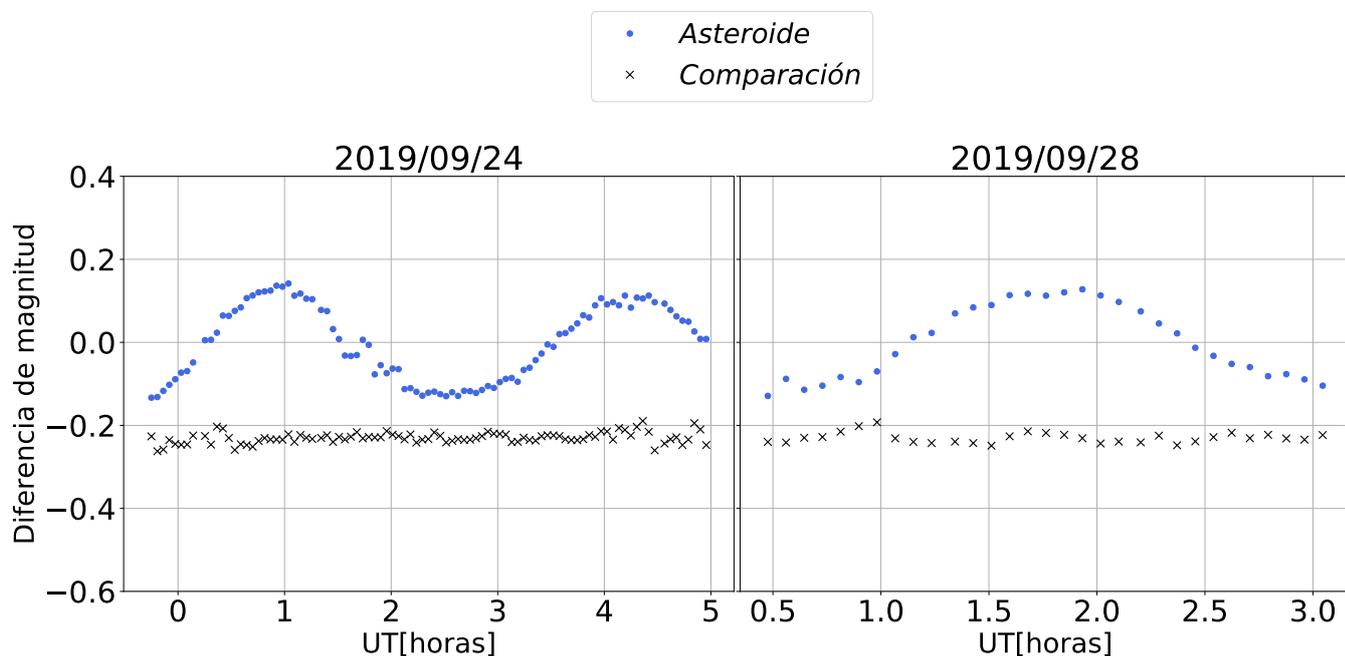


Figura 32: Curva de luz observada de (1115) Sabauda.

(1310) Villigera

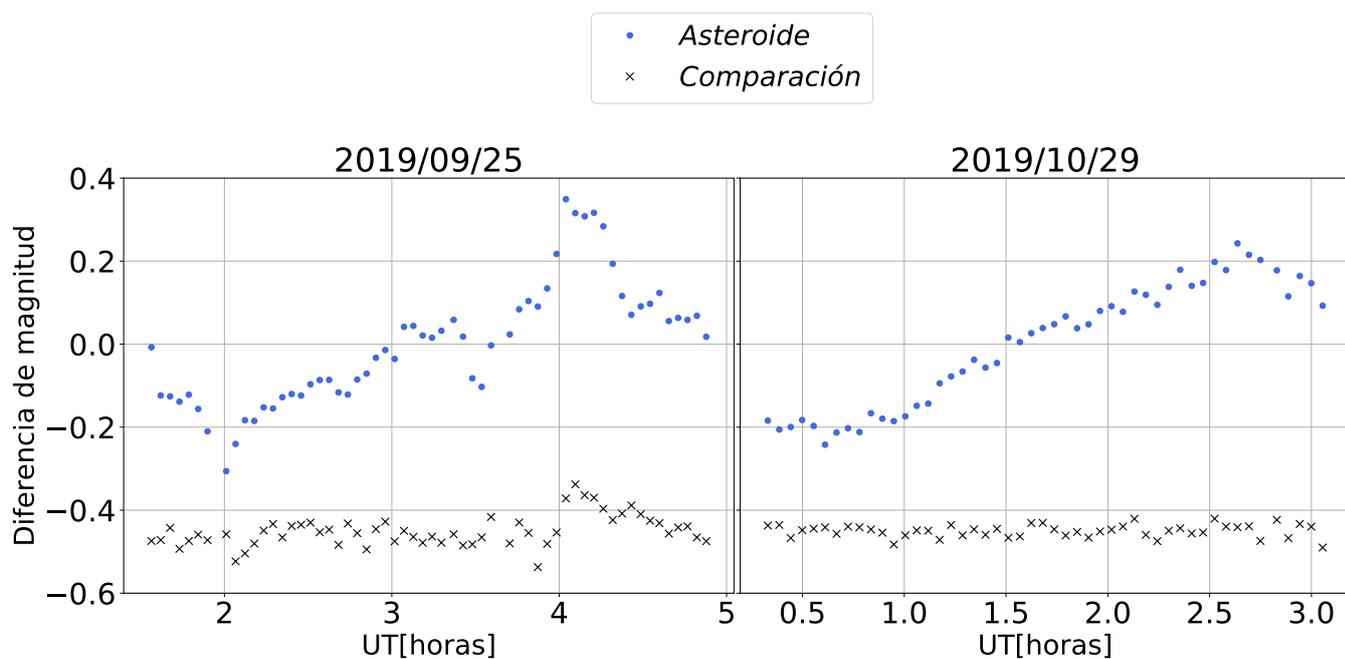


Figura 33: Curva de luz observada de (1310) Villigera.

(3548) Eurybates

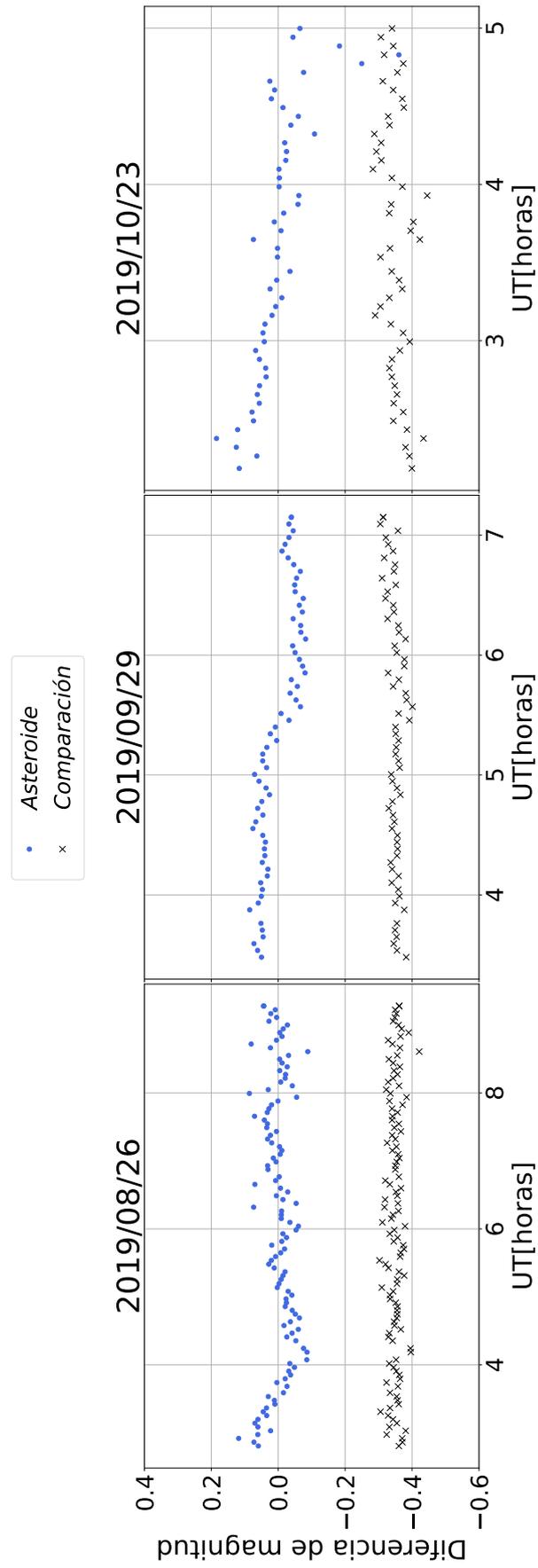


Figura 34: Curva de luz observada de (3548) Eurybates.

(21900) Orus

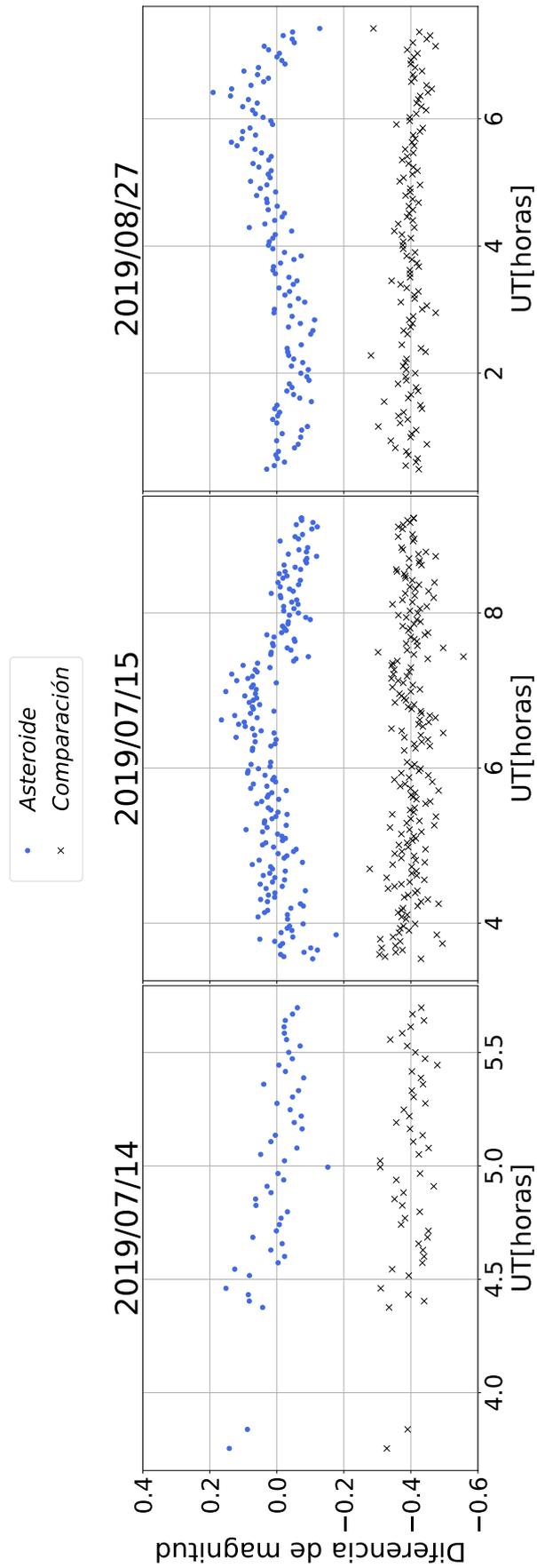


Figura 35: Curva de luz observada de (21900) Orus.

B Ajustes de las curvas de luz

En este apéndice mostramos los ajustes obtenidos utilizando el programa Periodos.

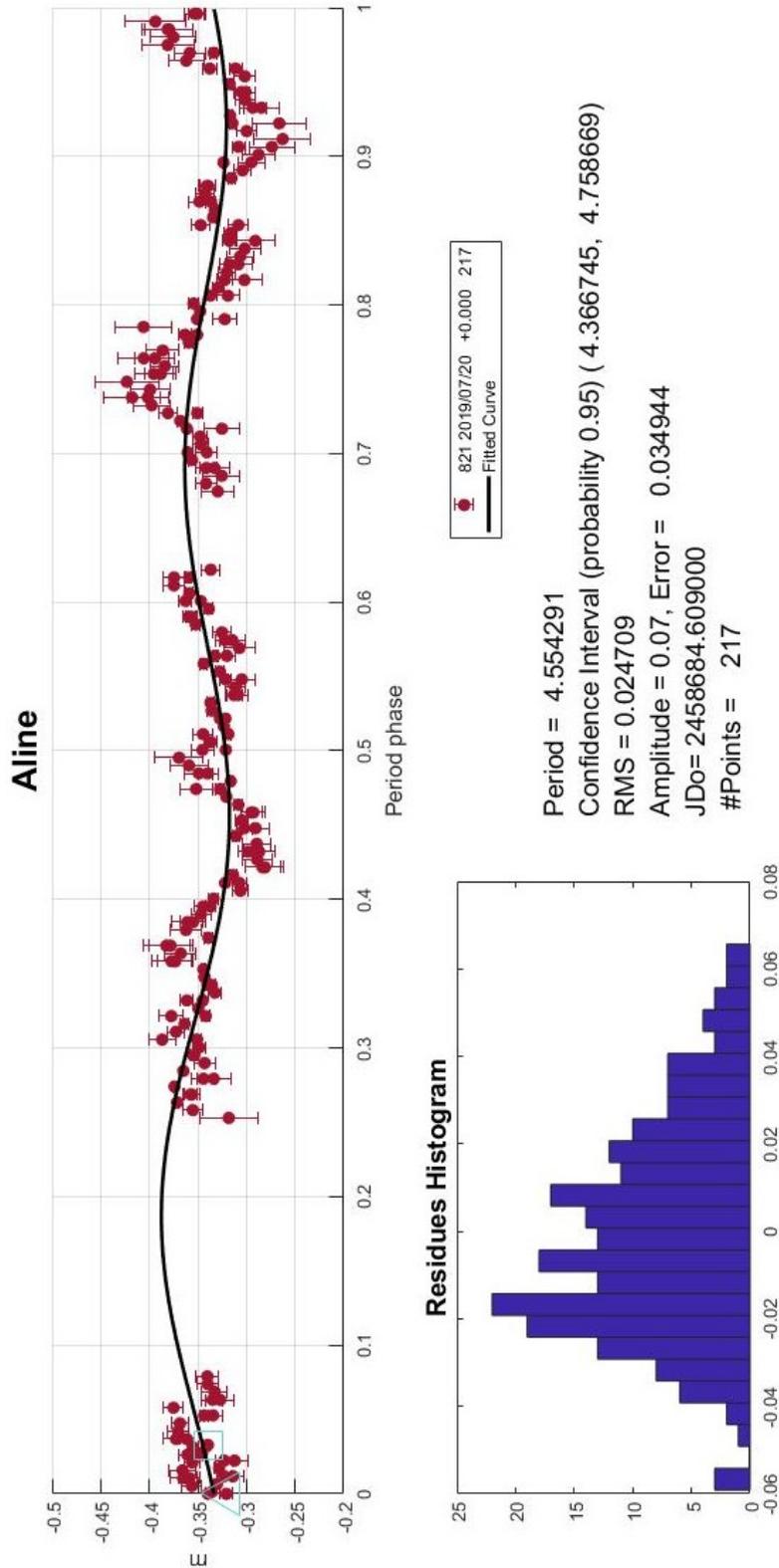


Figura 36: Ajuste efectuado a los datos de (266) Aline.

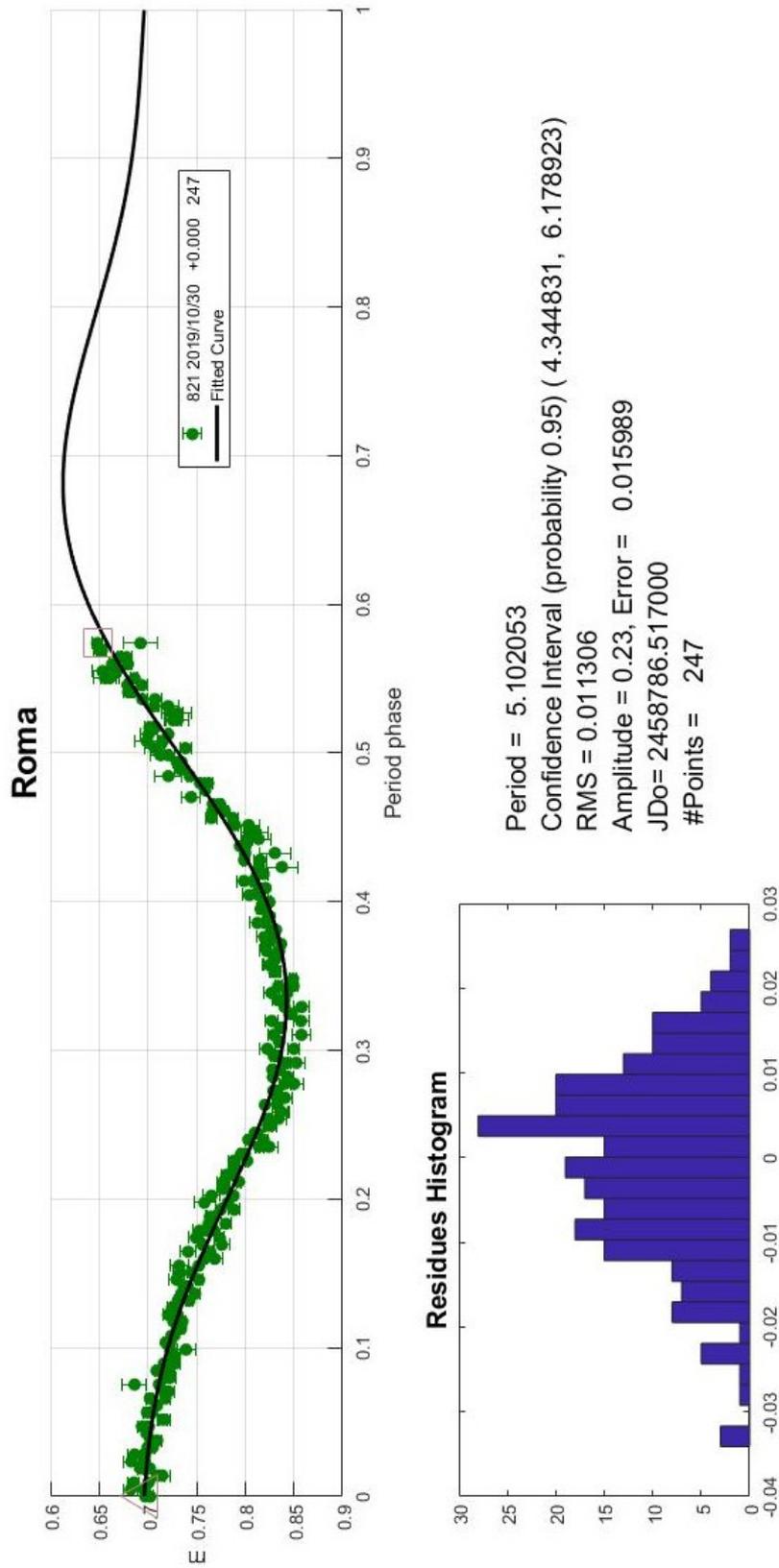


Figura 37: Ajuste efectuado a los datos de (472) Roma.

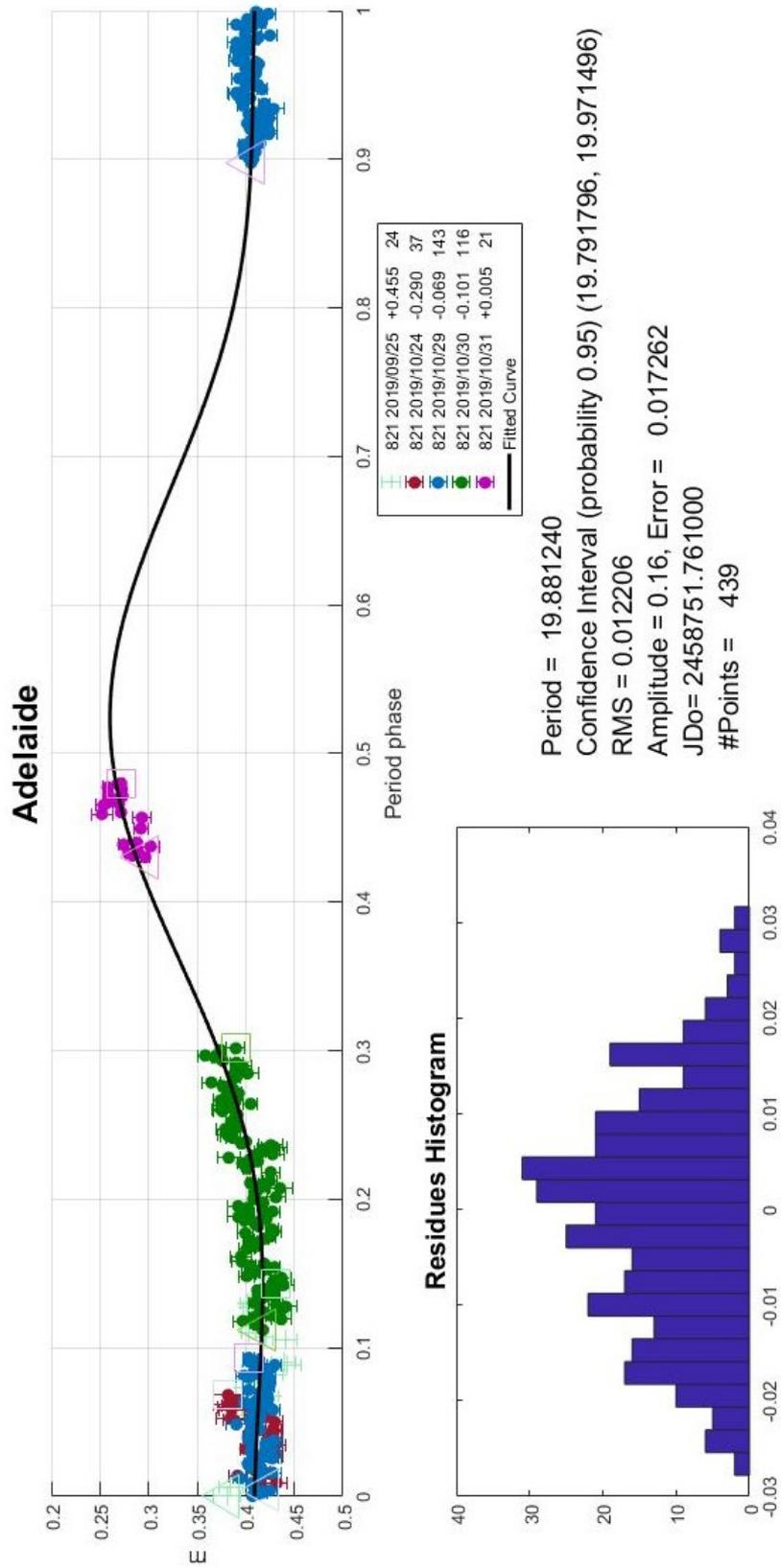


Figura 38: Ajuste efectuado a los datos de (525) Adelaide

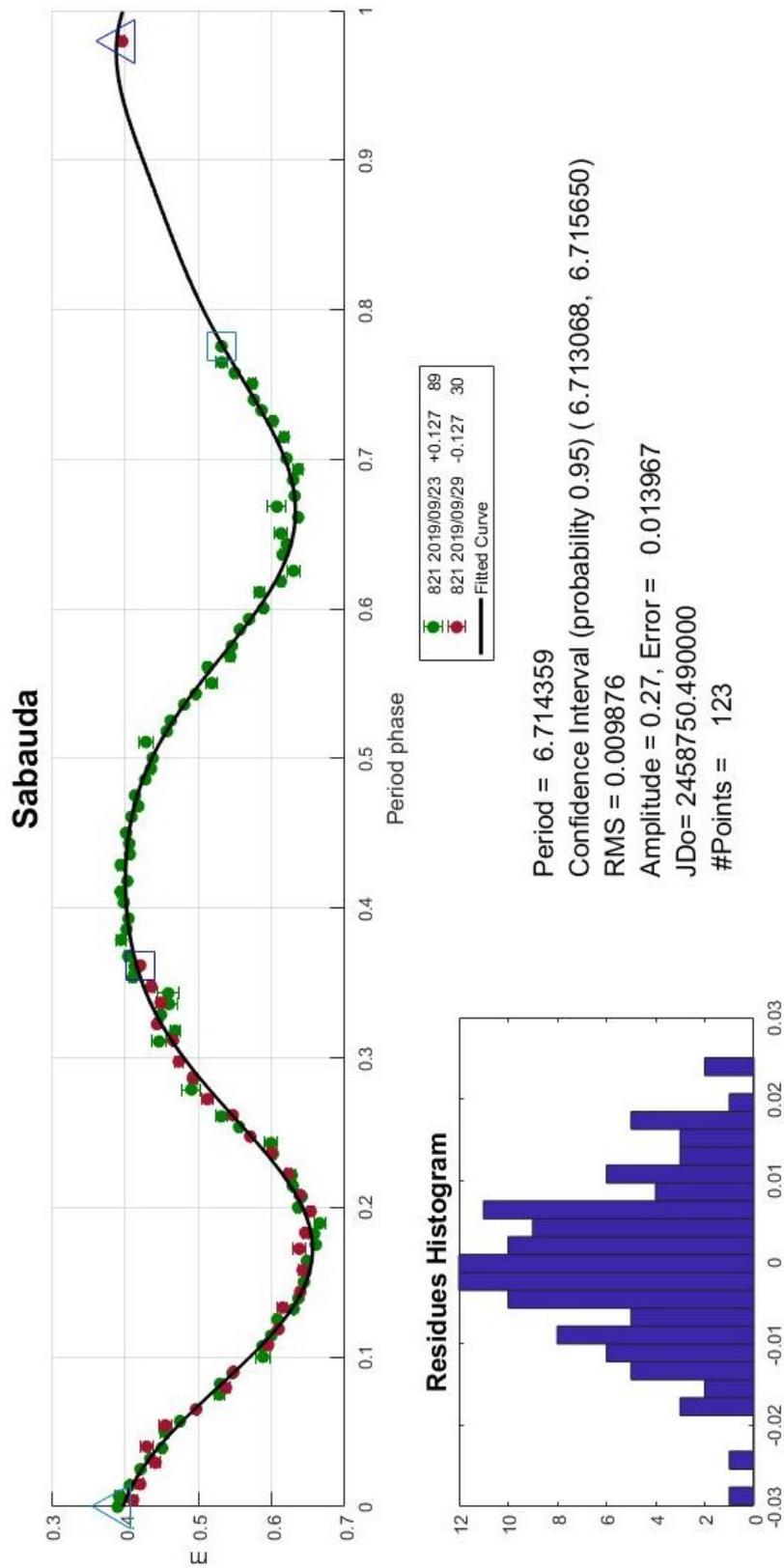


Figura 39: Ajuste efectuado a los datos de (1115) Sabauda.

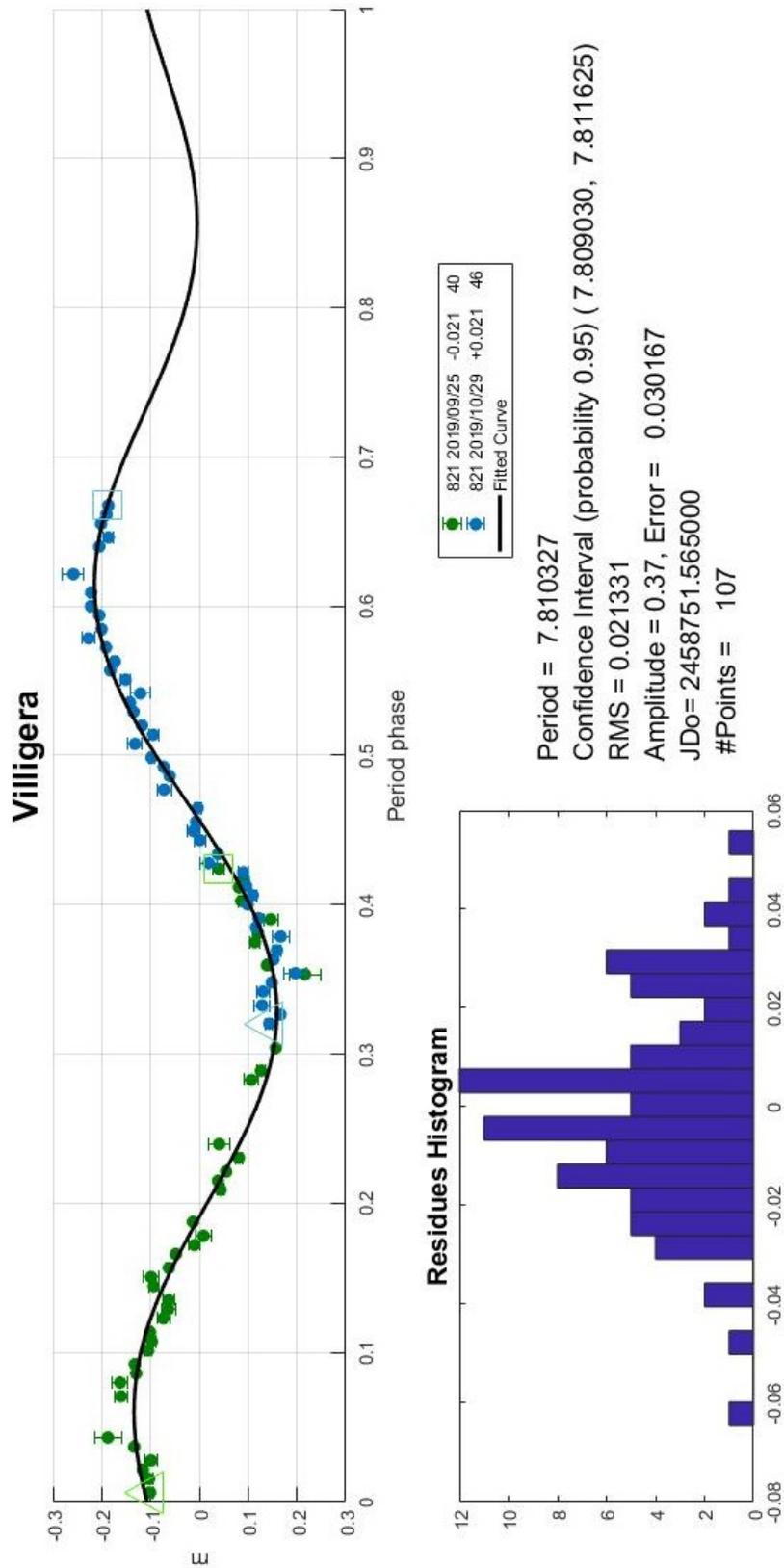


Figura 40: Ajuste efectuado a los datos de (1310) Villigera.

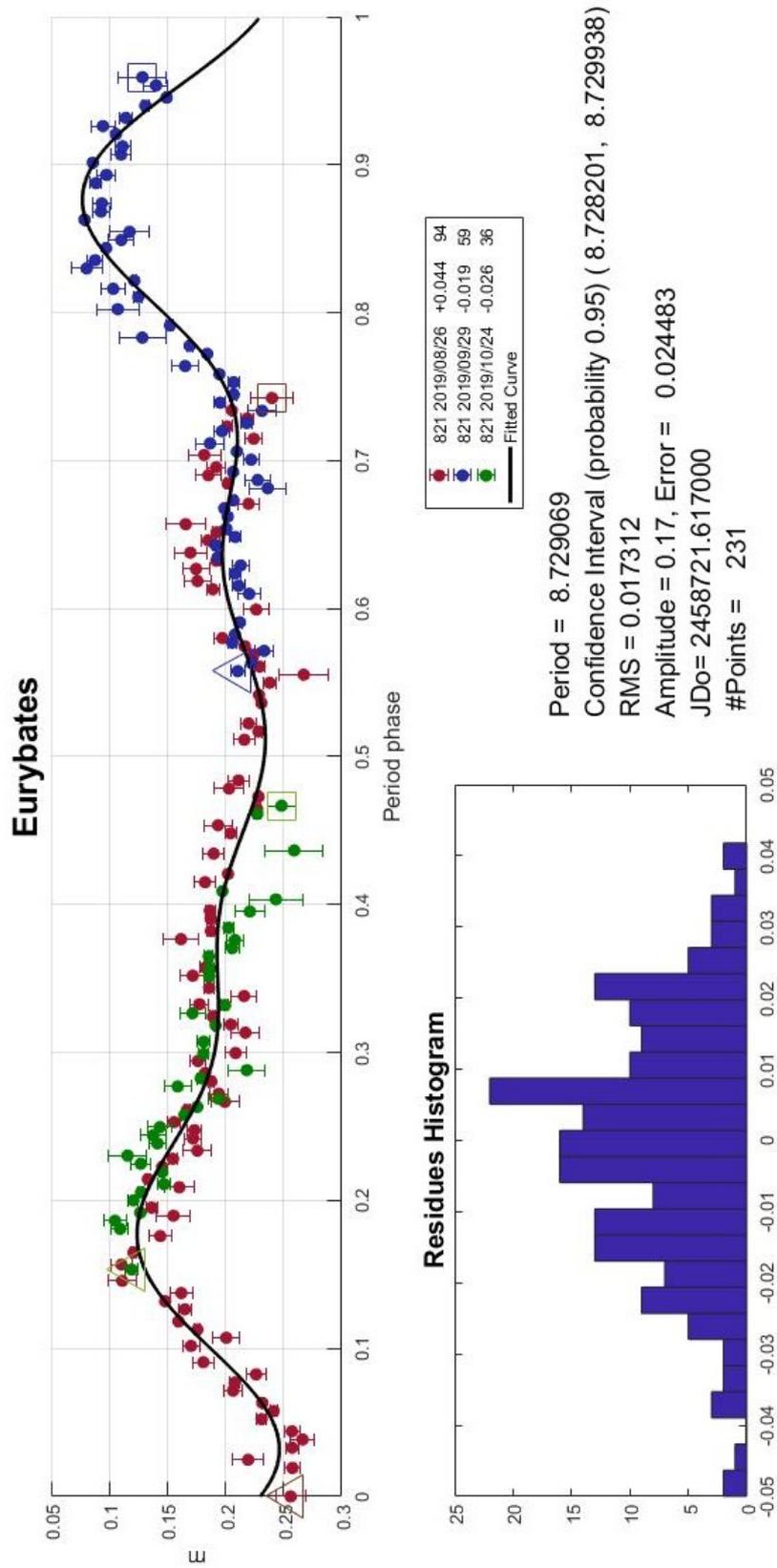


Figura 41: Ajuste efectuado a los datos de (3548) Eurybates.

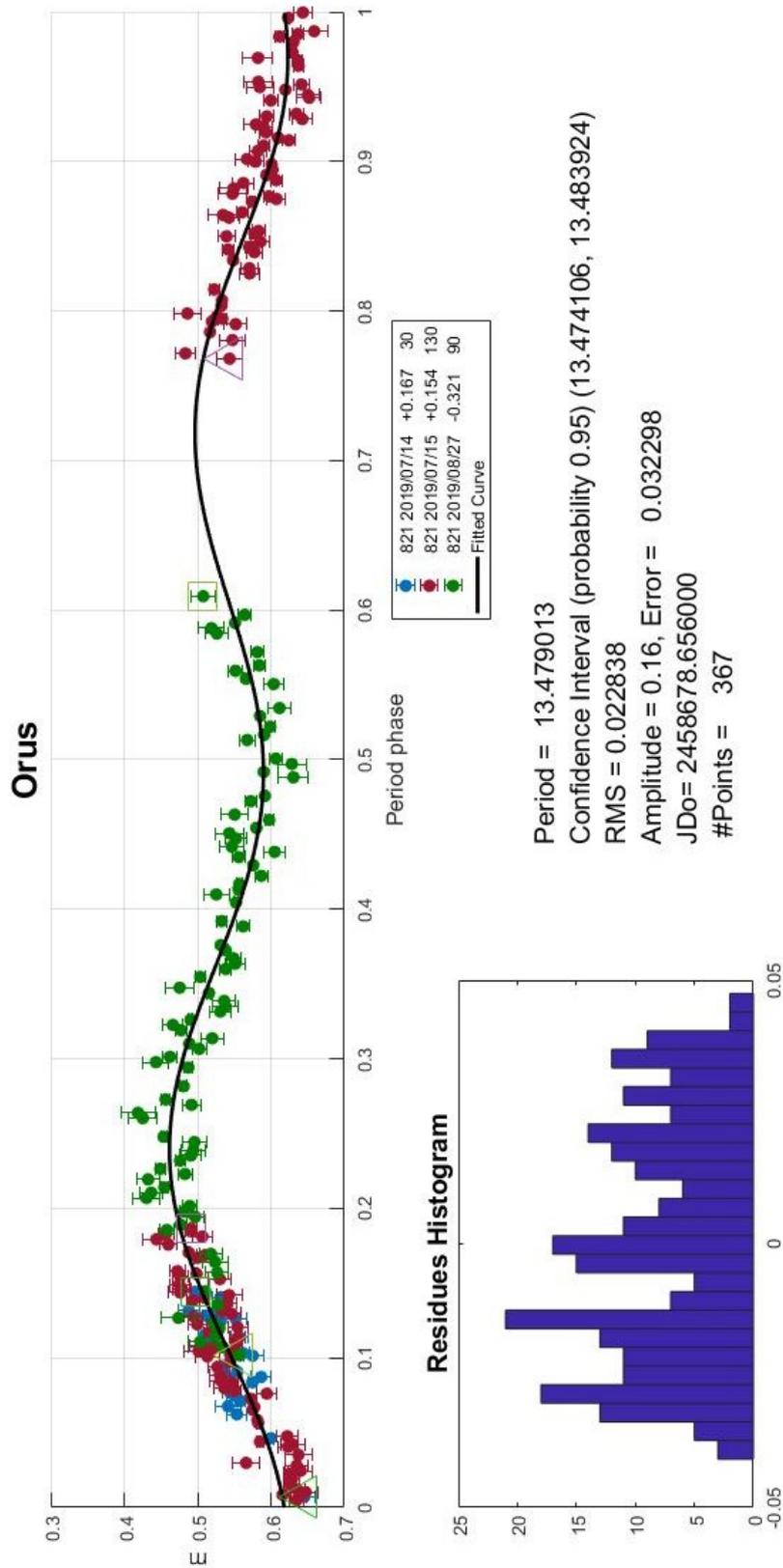


Figura 42: Ajuste efectuado a los datos de (21900) Orus.