



FACULTAD DE  
CIENCIAS  
UDELAR [fcien.edu.uy](http://fcien.edu.uy)



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY

# Análisis de actividad en objetos transicionales

Observatorio virtual y nuevas observaciones

Silvia Martino

Programa de Posgrado en Física opción Astronomía  
Facultad de Ciencias  
Universidad de la República

Montevideo – Uruguay  
Diciembre de 2022



FACULTAD DE  
CIENCIAS  
UDELAR [fcien.edu.uy](http://fcien.edu.uy)



PEDECIBA



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY

# Análisis de actividad en objetos transicionales

Observatorio virtual y nuevas observaciones

Silvia Martino

Tesis de Maestría presentada al Programa de Posgrado en Física opción Astronomía, Facultad de Ciencias de la Universidad de la Repùblica, como parte de los requisitos necesarios para la obtención del título de Magíster en Física opción Astronomía.

Director:

Gonzalo Tancredi

Montevideo – Uruguay

Diciembre de 2022

Martino, Silvia

Análisis de actividad en objetos transicionales / Silvia Martino. - Montevideo: Universidad de la República, Facultad de Ciencias, 2022.

XVII, 173 p.: il.; 29, 7cm.

Director:

Gonzalo Tancredi

Tesis de Maestría – Universidad de la República, Programa en Física opción Astronomía, 2022.

Referencias bibliográficas: p. 85 – 94.

1. Asteroides, 2. Cometas, 3. ACOs, 4. Asteroides activados, 5. Objetos transicionales. I. Tancredi, Gonzalo, . II. Universidad de la República, Programa de Posgrado en Física opción Astronomía. III. Título.

## INTEGRANTES DEL TRIBUNAL DE DEFENSA DE TESIS

---

Julio Fernández (Presidente)

---

Romina Di Sisto

---

Juan José Downes

---

Carolina Rabin

---

Gonzalo Tancredi

Montevideo – Uruguay  
Diciembre de 2022

# Agradecimientos

A través de estas líneas quiero agradecer a todas las personas e instituciones que me han permitido llegar a donde estoy hoy.

Agradezco a la Agencia Nacional de Investigación e Innovación por la beca otorgada para llevar adelante esta maestría, así como al Programa de Desarrollo de las Ciencias Básicas (PEDECIBA) y al Instituto de Física de Facultad de Ciencias, por el apoyo y los recursos brindados.

A mis colegas del Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica y el Observatório Nacional de Río de Janeiro, en especial a Daniela Lazzaro, coordinadora del OASI y a Eduardo Rondón, responsable de las observaciones realizadas con el telescopio IMPACTON.

A Javier Licandro por permitirme colaborar con su trabajo, generando aportes para mi formación y mi tesis.

A los colegas del ON/LIneA que nos auspiciaron como sponsors en el proyecto del Dark Energy Survey, especialmente a Julio Camargo y Martín Banda.

A mis compañeros de estudio y los docentes que lograron hacer este camino disfrutable, además de formador.

A mis amigos y compañeros de mis distintos trabajos, por el cariño y el aguante.

A mi familia, por acompañarme desde siempre en esta locura.

## RESUMEN

Los Asteroides en Órbitas Cometarias (ACOs) son objetos que se comportan dinámicamente como cometas, pero no han mostrado actividad cometaria. Los Asteroides Activados (AAs), presentan una órbita típica asteroidal y han mostrado eyecciones de polvo en algún momento. Ambas poblaciones entran en lo que se conoce como objetos transicionales, ya que comparten algunas características con los asteroides y otras con los cometas. El objetivo de este trabajo es arrojar luz acerca del origen de estas poblaciones de objetos. Respecto a los ACOs interesa determinar si se trata de cometas durmientes o extintos, o asteroides que escaparon del cinturón principal y actualmente se encuentran en órbitas cometarias; en lo que refiere a los AAs, si la actividad es causada por sublimación de volátiles, existen implicancias cosmogónicas importantes. Se continuó con el monitoreo de un conjunto de 42 ACOs y tres AAs estudiados en los años 2015 y 2016 en mi tesis de licenciatura (Martino, [2017](#)). Se trabajó con imágenes de archivo de diferentes observatorios, así como con nuevas observaciones realizadas con el telescopio IMPACTON en Brasil. Para buscar indicios de actividad en los objetos se utilizaron dos técnicas. Por un lado se obtuvo el perfil de brillo de los objetos en las imágenes y se comparó con el perfil de estrellas presentes en el campo, en busca de un ensanchamiento que indique la presencia de actividad. Por otra parte, se obtuvieron datos de las magnitudes reportadas de esos objetos por diferentes observadores en la base de datos del Minor Planet Center, a las que se les sumó las obtenidas en las observaciones; se redujeron las mismas por distancia heliocéntrica y geocéntrica y ángulo de fase, y se estudió la evolución de la magnitud reducida en función de la distancia heliocéntrica del objeto, en busca de aumentos en el brillo que pudieran deberse a actividad. Además, en los casos que se contaba con datos suficientes, se realizaron curvas de luz y se estimaron sus períodos de rotación. Teniendo en cuenta los objetos analizados durante la licenciatura y el trabajo de esta tesis, se logró extender la muestra a 160 (de un total de 705) en el caso de los ACOs (23 %) y diez (de un total de 31) en el caso de los AAs (32 %). De los ACOs estudiados en esta tesis diez presentaron desviación en su perfil de brillo o en su magnitud reducida y uno en ambos. Seis son ACOs de

la Familia de Júpiter, cuatro son Centauros y uno se encuentra en una órbita tipo Halley. En el total acumulado (incluyendo el trabajo de licenciatura) son siete los que presentaron indicios de actividad a través de sus perfiles, cuatro a través de su magnitud reducida, y uno en ambos. Tres de estos ya fueron reportados anteriormente como cometas. Las observaciones fueron mayormente en la región perihélica, encontrándose un porcentaje muy bajo de objetos con indicios de actividad, lo que descartaría una transición lenta de activos a inertes. Con respecto a los AAs, son cuatro los que se mostraron con actividad, siendo seis el total acumulado. De estos cuatro, tres fueron coincidentes con los períodos de actividad reportados por otros observadores, mientras que en el caso de P/2015 X<sub>6</sub>, los datos analizados fueron obtenidos 19 días antes del primer报告 de actividad existente. Se pudo observar que los episodios de actividad de estos objetos son muy restringidos en el tiempo y no siempre vuelven a ocurrir en la misma región de la órbita.

Palabras clave:

Asteroides, Cometas, ACOs, Asteroides activados, Objetos transicionales.

## ABSTRACT

Asteroids in Cometary Orbits (ACOs) are objects that behave dynamically like comets, but have not shown cometary activity. Activated Asteroids (AAs) have a typical asteroidal orbit and have shown dust ejections at some point. Both populations fall into what are known as transitional objects, since they share some characteristics with asteroids and others with comets. The objective of this work is to shed light on the origin of these populations of objects. Regarding the ACOs, it is interesting to determine whether they are dormant or extinct comets, or asteroids that escaped from the main belt and are currently in cometary orbits; for AAs, if the activity is caused by sublimation of volatiles, there are important cosmogonic implications. The monitoring of a set of 42 ACOs and three AAs studied in 2015 and 2016 in my undergraduate thesis ([Martino, 2017](#)) is continued. We worked with archive images from different observatories, as well as with new observations made with the IMPACTON telescope in Brazil. Two techniques were used to look for signs of activity in the objects. On the one hand, the brightness profile of the objects was obtained and compared with the profile of stars present in the field, in search of a widening that indicates the presence of activity. On the other hand, data on the reported magnitudes of these objects by different observers were obtained in the Minor Planet Center database, to which were added those obtained in the observations; they were reduced by heliocentric and geocentric distance and phase angle, and the evolution of the reduced magnitude was studied as a function of the object heliocentric distance, in search of increases in brightness that could be due to activity. In addition, in cases where sufficient data was available, light curves were made and their rotation periods were estimated. Taking into account the objects studied during the degree and the work of this thesis, it was possible to extend the sample to 160 out of 705 in the case of ACOs (23%) and ten out of 31 in the case of AAs (32%). Of the ACOs studied in this thesis, ten presented deviation in its brightness profile or in its reduced magnitude and one in both. Six are Jupiter Family ACOs, four are Centaurs, and one is in a Halley-type orbit. In the accumulated total (including the degree work) there are seven that presented signs of activity through their

profiles, four through their reduced magnitude and one through both. Three of these were previously reported as comets. The observations were mostly in the perihelical region, finding a very small percentage of objects with signs of activity, which would rule out a slow transition from active to inert. Regarding the AAs, there are four that were active, with six being the total accumulated. Of these four, three coincided with the activity periods reported by other observers, while in the case of P/2015 X<sub>6</sub>, the data analyzed was obtained 19 days before the first existing activity report. We were able to observe that the episodes of activity of these objects are very restricted in time and do not always occur in the same region of the orbit.

Keywords:

Asteroids, Comets, ACOs, Activated asteroids, Transitional objects.

# Listas de figuras

2.1	Tabla con información de los ACOs disponible en la web. . . . .	17
3.1	Observatorio Astronomico do Sertao de Itaparica, OASI. . . . .	20
3.2	Observatorio del Teide, IAC . . . . .	23
3.3	Observatorio del Roque de los Muchachos, IAC . . . . .	23
3.4	Ventana de búsqueda de Mega Precosy. . . . .	27
3.5	Ventana de búsqueda de SSOIS. . . . .	28
3.6	Very Large Telescope, ESO. . . . .	29
3.7	Izquierda: esquema de DECam, con la disposición de la agrupación de CCD, lentes ópticas y filtros. Derecha: telescopio Blanco de 4 m. La flecha roja indica el foco principal, donde se colocó DECam. Figura 2.2 de Banda-Huarca (2020), con imágenes obtenidas de: <a href="http://www.ctio.noao.edu/">http://www.ctio.noao.edu/</a> . . . . .	31
3.8	Cerro Tololo Inter-American Observatory, CTIO. . . . .	32
4.1	Imagen alineada sobre las estrellas (el objeto 90572 se ve como un trazo). . . . .	35
4.2	Imagen alineada sobre el objeto 90572 (las estrellas se ven como trazos). . . . .	35
4.3	Ejemplo de una imagen original (izquierda) y rotada (derecha). .	38
4.4	Ejemplo de gráficas de curva de crecimiento realizadas por PP. Arriba: flujo promedio normalizado en función de la apertura para el target (línea roja) y para las fuentes de background (línea negra). Abajo: SNR normalizada en función de la apertura, también para target y background. La línea punteada horizontal indica el 70 % del flujo y la línea vertical azul, el radio adoptado como óptimo. . . . .	44

5.1	Histograma de distancias heliocéntricas. . . . .	49
5.2	Histograma de anomalías verdaderas. . . . .	49
5.3	Perfil con calidad alta. . . . .	49
5.4	Perfil con calidad media. . . . .	49
5.5	Perfil con calidad baja. . . . .	50
5.6	Perfil de una traza. . . . .	50
5.7	Perfil de un objeto con actividad clara. . . . .	50
5.8	Perfil con indicios de actividad. . . . .	50
5.9	Magnitud reducida en función de la distancia heliocéntrica para los ACOs 52007 (izquierda) y 90572 (derecha). . . . .	51
5.10	Magnitud reducida para los AAs 133P (izquierda) y 324P (derecha). . . . .	52
5.11	Magnitud absoluta en función del tiempo para cada noche, objeto 6144. . . . .	53
5.12	Magnitud absoluta en función del tiempo para cada noche, objeto 30512. . . . .	54
5.13	Periodograma de 30512. . . . .	54
5.14	Curva de fase rotacional. . . . .	54
5.15	Magnitud absoluta en función del tiempo para cada noche, objeto 52007. . . . .	55
5.16	Periodograma de 145485. . . . .	56
5.17	Curva de fase rotacional. . . . .	56
5.18	Magnitud absoluta en función del tiempo para cada noche, objeto 145485. . . . .	56
5.19	Periodograma de 494667. . . . .	56
5.20	Curva de fase rotacional de 494667 para las cuatro noches por separado. . . . .	57
5.21	Curva de fase rotacional de 494667 para las cuatro noches superpuestas. . . . .	57
5.22	Magnitud absoluta en función del tiempo para cada noche, objeto 494667. . . . .	57
6.1	Perfiles de brillo de 29981. . . . .	59
6.2	Perfil de brillo de 54598. . . . .	60
6.3	Perfiles de brillo de 90572. . . . .	60
6.4	Perfil de brillo de 515718. . . . .	60

6.5	Perfiles de brillo de 2015 BK <sub>22</sub> . . . . .	61
6.6	Perfil de brillo de 499522. . . . .	61
6.7	Perfiles de brillo de 2014 OG <sub>392</sub> . . . . .	62
6.8	Perfil de brillo de 2016 YB <sub>13</sub> . . . . .	62
6.9	Perfiles de brillo de 259P. . . . .	62
6.10	Perfiles de brillo de 311P. . . . .	63
6.11	Perfil de brillo de P/2015 X6. . . . .	63
6.12	Perfiles de brillo de 2020 MK <sub>4</sub> la noche del 16/07/2020 (izquierda) y del 17/07/2020 (derecha). . . . .	64
6.13	Magnitud reducida en función de la distancia heliocéntrica para los ACOs 10199, 20461, 275618, 322966, 323137 y 446816. . . . .	65
6.14	Magnitud reducida en función de la distancia heliocéntrica para los ACOs 494667 497619, 2000 DG <sub>8</sub> , 2008 YJ <sub>172</sub> , 2009 KF <sub>37</sub> , 2014 WX <sub>535</sub> , 2017 QO <sub>33</sub> y 2018 CZ <sub>16</sub> . . . . .	66
6.15	Magnitud reducida de 54598. . . . .	68
6.16	Magnitud reducida de 2000 CN <sub>152</sub> . . . . .	68
6.17	Magnitud reducida de 2014 SS <sub>303</sub> . . . . .	68
6.18	Evolución orbital de 29981. Se grafica semieje mayor ( $a$ ), distancia al perihelio ( $q$ ), inclinación ( $i$ ), longitud del perihelio ( $\bar{\omega}$ ), argumento del perihelio ( $\Omega$ ) y distancia a los planetas gigantes (si hay encuentros se grafican como un punto de color azul para Júpiter, rojo para Saturno, verde para Urano y negro para Neptuno) . . . . .	70
6.19	Evolución orbital de 54598. . . . .	70
6.20	Evolución orbital de 322966. . . . .	71
6.21	Evolución orbital de 90572. . . . .	71
6.22	Evolución orbital de 515718. . . . .	72
6.23	Evolución orbital de 2009 KF <sub>37</sub> . . . . .	72
6.24	Evolución orbital de 2014 SS <sub>303</sub> . . . . .	73
6.25	Evolución orbital de 2016 YB <sub>13</sub> . . . . .	73
6.26	Evolución orbital de 2015 BK <sub>22</sub> . . . . .	74
7.1	Histograma de distancias heliocéntricas de los ACOs observados: entre 0 y 5 ua (izquierda) y de más de 5 ua (derecha). . . . .	76

7.2	Histograma de anomalías verdaderas de los ACOs observados: con indicios de actividad (izquierda) y sin indicios de actividad (derecha). . . . .	77
7.3	Órbita de 133P. Las líneas negras representan las órbitas de los planetas, la línea azul la órbita del objeto, el círculo azul su perihelio, los asteriscos rojos los lugares en donde se ha observado actividad, los asteriscos verdes las observaciones realizadas durante este trabajo en las que se constató actividad y los celestes las que no se constató. La vista es desde el polo eclíptico norte, por lo que el desplazamiento de los objetos en su órbita es en sentido anti-horario. . . . .	80
7.4	Órbita de 259P indicando los episodios de actividad. . . . .	81
7.5	Órbita de 311P indicando los episodios de actividad. . . . .	81
7.6	Órbita de 324P indicando los episodios de actividad. . . . .	82
7.7	Órbita de 331P indicando los episodios de actividad. . . . .	82
7.8	Órbita de 354P indicando los episodios de actividad. . . . .	82
7.9	Órbita de P/2015 X <sub>6</sub> indicando los episodios de actividad. . . .	83

# Listas de tablas

2.1	Cantidad de asteroides. . . . .	17
2.2	Cantidad de ACOs según tipo. . . . .	17
2.3	Cantidad de Cometas según tipo. . . . .	17
3.1	Telescopio IMPACTON. . . . .	20
3.2	Objetos observados con el IMPACTON, por turno de observación.	22
3.3	Telescopio IAC80. . . . .	24
3.4	Telescopio JKT. . . . .	24
3.5	Objetos presentes en las imágenes del IAC80 y JKT. . . . .	24
3.6	Objetos observados con el VLT por fecha. . . . .	30
3.7	Telescopio Blanco + DECam. . . . .	31
4.1	Grandes surveys. . . . .	41
4.2	Corrección de color. . . . .	41
5.1	Resumen de perfiles obtenidos. . . . .	48
5.2	Resumen de objetos por instrumento, acumulado con el trabajo de licenciatura (entre paréntesis los objetos estudiados en esta tesis). . . . .	48
5.3	ACOs observados según tipo, acumulando con el trabajo de licenciatura (entre paréntesis los objetos estudiados en esta tesis). . . . .	48
5.4	Observaciones de los objetos 6144, 30512, 52007, 145485 y 494667. . . . .	52
6.1	Objetos seleccionados. . . . .	59
6.2	Objetos observados con el IMPACTON de los cuales no se obtuvo perfil de brillo. La magnitud listada es la estimada por el MPC. . . . .	69
7.1	Observaciones de asteroides activados. . . . .	83

# Tabla de contenidos

<b>Lista de figuras</b>	<b>x</b>
<b>Lista de tablas</b>	<b>xiv</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Objetos transicionales . . . . .	2
1.1.1 Asteroides en órbitas cometarias . . . . .	4
1.1.2 Asteroides activados . . . . .	7
1.2 Criterio dinámico . . . . .	10
1.3 Motivación . . . . .	12
<b>2 Selección de objetos</b>	<b>14</b>
2.1 Obtención de la base de datos de elementos orbitales . . . . .	14
2.2 Aplicación del criterio de selección . . . . .	15
2.3 Integraciones . . . . .	16
2.4 Página web . . . . .	16
<b>3 Observaciones</b>	<b>19</b>
3.1 Telescopio IMPACTON . . . . .	19
3.1.1 Planificación de las observaciones . . . . .	21
3.1.2 Objetos observados con el IMPACTON . . . . .	22
3.2 Telescopios del IAC . . . . .	22
3.2.1 Objetos observados en colaboración con el IAC . . . . .	23
3.3 Observatorio Virtual . . . . .	25
3.3.1 Acceso a bases de datos . . . . .	26
3.3.2 Instrumental utilizado . . . . .	28
3.3.3 ACOs y AAs presentes en imágenes del VO . . . . .	29
3.4 Dark Energy Survey . . . . .	30

3.4.1	Proyecto colaborativo con imágenes de DES . . . . .	32
<b>4</b>	<b>Procesamiento de datos</b>	<b>33</b>
4.1	Perfiles de brillo . . . . .	33
4.2	Magnitud reducida . . . . .	39
4.3	Curvas de luz . . . . .	42
4.3.1	Photometry pipeline . . . . .	42
4.3.2	Obtención del período de rotación . . . . .	45
<b>5</b>	<b>Resultados</b>	<b>47</b>
5.1	Perfiles de brillo de ACOs y AAs . . . . .	47
5.2	Estudio de la magnitud reducida . . . . .	50
5.3	Curvas de luz . . . . .	51
5.3.1	6144 . . . . .	53
5.3.2	30512 . . . . .	53
5.3.3	52007 . . . . .	54
5.3.4	145485 . . . . .	54
5.3.5	494667 . . . . .	55
<b>6</b>	<b>Análisis de casos</b>	<b>58</b>
6.1	Perfiles de brillo . . . . .	58
6.1.1	Centauro 2020 MK <sub>4</sub> . . . . .	64
6.2	Magnitud reducida . . . . .	65
6.3	Objetos no reducidos . . . . .	68
6.4	Integraciones . . . . .	69
6.5	Curvas de luz . . . . .	74
<b>7</b>	<b>Conclusiones y discusión</b>	<b>75</b>
7.1	Asteroides en órbitas cometarias . . . . .	75
7.2	Asteroides activados . . . . .	80
7.3	Consideraciones finales . . . . .	84
<b>Bibliografía</b>		<b>85</b>
<b>Glosario</b>		<b>94</b>
<b>Apéndices</b>		<b>97</b>
Apéndice 1 Scripts . . . . .		98

Apéndice 2	Datos observacionales . . . . .	102
Apéndice 3	Perfiles fotométricos . . . . .	105
Apéndice 4	Gráficos de magnitud reducida . . . . .	139
Apéndice 5	Datos asteroides activados . . . . .	157
<b>Anexos</b>		<b>158</b>

# Capítulo 1

## Introducción

El estudio de asteroides y cometas ha presentado siempre una especial relevancia debido a que estos son los remanentes de la formación del Sistema Solar, y como tales, contienen importante información acerca de las condiciones que debieron darse en el momento de la misma. Además, estos objetos tienen la particularidad de que sus propiedades físicas y químicas han permanecido prácticamente inalteradas desde sus orígenes. Su análisis permite determinar las condiciones que fueron necesarias para el origen de nuestro sistema planetario y su posterior evolución.

Si bien ambos forman parte de los cuerpos menores del Sistema Solar, presentan características bien diferentes, tanto en lo que respecta a su composición como a su apariencia al ser observados con un telescopio y a su dinámica orbital.

Desde el punto de vista composicional, los asteroides son objetos rocosos que no contienen sustancias volátiles (al menos en cantidades significativas) mientras que los cometas poseen un alto contenido de hielos en su superficie o incluso debajo de esta.

Observacionalmente, los cometas presentan una coma y pueden presentar una o más colas. Los asteroides, por su parte, se presentan como objetos inertes, cuyas variaciones de brillo son únicamente debido a factores rotacionales. Pero los cometas no presentan actividad en toda su órbita, sino que esta aparece al acercarse al Sol, donde los hielos presentes comienzan a sublimarse, e incluso ahí, la detección de una coma o cola cometaria depende fuertemente de las condiciones de observabilidad y del instrumental utilizado, generando la posibilidad de que objetos con muy baja actividad pasen desapercibidos para

los instrumentos que realizan la medición, si estos no son lo suficientemente sensibles.

Desde el punto de vista dinámico, estos objetos presentan también un comportamiento diferente, teniendo los cometas una evolución dinámica influenciada por encuentros cercanos con los planetas gigantes (Tancredi y Rickman, 1992).

El parámetro de Tisserand (Kresak, 1979) ha sido fundamental históricamente para clasificar a los objetos en asteroides o cometas. Éste parámetro surge del problema restringido de tres cuerpos, en el que se consideran dos cuerpos masivos y una partícula sin masa, o sea, que no es capaz de generar una influencia gravitacional en los otros objetos. De la integral de Jacobi se puede derivar el parámetro de Tisserand, dado por la ecuación 1.1.

$$T = \frac{a_p}{a} + 2\sqrt{\frac{a}{a_p}(1-e^2)\cos(i)} \quad (1.1)$$

En esta ecuación,  $a_p$  representa el semieje mayor del planeta en órbita circular alrededor del Sol,  $a$ ,  $e$  e  $i$  son el semieje mayor, excentricidad e inclinación de la partícula, respectivamente.

El parámetro de Tisserand está relacionado con la velocidad de encuentro  $U$  respecto a Júpiter de acuerdo a la ecuación 1.2, donde  $T_J$  es el parámetro de Tisserand con respecto a Júpiter.

$$U = \sqrt{3 - T_J} \quad (1.2)$$

La velocidad de encuentro solo queda definida para objetos que tengan  $T_J < 3$ . Un criterio puramente dinámico es entonces considerar asteroides a aquellos objetos con  $T_J > 3$  y cometas a los objetos con  $T_J < 3$ .

## 1.1. Objetos transicionales

A medida que la tecnología ha ido evolucionando, se han logrado detectar cada vez más cuerpos menores (en particular, existen hoy en día más de un millón de asteroides) y las categorías que se habían utilizado tradicionalmente para clasificarlos empezaron a tener fallas. Las clasificaciones típicas en asteroides y cometas se fueron desdibujando, siendo estos términos diferentes en distintos contextos (Hsieh, 2017). Se habla comúnmente de “objetos transicio-

nales” para describir a estos cuerpos que Hsieh denomina “continuum objects”, en relación a que no hay una línea clara que los distinga a unos de otros. De acuerdo a este autor, estos objetos se pueden clasificar de tres maneras, que aparecen resumidas a continuación.

### a) Cometas durmientes y extintos

Para los años 70 los astrónomos ya habían notado que algunos asteroides presentaban similitudes dinámicas con cometas de corto período, y que cometas previamente activos podían mostrarse inactivos por largos períodos (Marsden, 1970). Ante la aparición de estos objetos, una manera de distinguirlos podría ser a través de un criterio dinámico, como por ejemplo su vida dinámica. Para mejorar esto se utilizó luego el parámetro de Tisserand de una forma sencilla: objetos con  $T_J < 3$  son cometas mientras que objetos con  $T_J > 3$  son asteroides. Este criterio simple continúa siendo usado por muchos autores para clasificar asteroides y cometas. La existencia de objetos en órbitas cometarias de acuerdo a este criterio, pero que no mostraban actividad, llevó al estudio de estos en busca de determinar su naturaleza cometaria, con lo que se ha logrado descubrir actividad en unos pocos casos.

### b) Asteroides activos

Los asteroides activos serían el caso opuesto a los cometas durmientes/extintos, ya que se encuentran en órbitas típicamente asteroidales ( $T_J > 3$ ), pero ha sido observada su actividad. Dentro de esta categoría, Hsieh los separa en tres grandes sub categorías:

- *Main Belt Comets*: los primeros asteroides activos descubiertos, además de los más interesantes desde el punto de vista cosmogónico, ya que de ser su actividad debida a sublimación de hielos, esto implicaría la existencia de éstos en la región interna del Sistema Solar, y la posibilidad de la contribución de agua a la Tierra (Hsieh, 2014).
- *Disrupted asteroids*: asteroides que han mostrado actividad debido a impactos o inestabilidad rotacional, como son los casos de (596) Scheila (Bodewits et al. 2011) y P/2010 A2 (Jewitt et al. 2010).
- *Otros active asteroids*: algunos objetos activos que no pertenecen al cinturón principal, pero poseen órbitas con  $T_J > 3$ , como los casos de (2201) Oljato (Russell et al. 1984) y (3200) Phaethon (Gustafson, 1989).

### c) Otros ‘Continuum objects’

Además de los cometas durmientes y los asteroides activos, Hsieh deja esta etiqueta para otros objetos transicionales que no se engloban en las dos primeras categorías. Menciona por ejemplo la actividad cometaria vinculada con la producción de streams que causan las lluvias de meteoros. La asociación de un stream de meteoros con un objeto aparentemente inactivo sugeriría que ese objeto es al menos potencialmente cometario (Jenniskens, [2008](#)).

En general, se utiliza el término ‘Main Belt Comets’ (Hsieh y Jewitt, [2006](#)) para referirse a objetos con apariencia asteroidal ( $a < a_J$  y  $T_J > 3$ ) pero que presentan una pérdida de masa. El término ‘asteroides activos’ también se suele utilizar en la literatura para objetos con características dinámicas de asteroides que presentan actividad, pero que no necesariamente se encuentran en el cinturón principal. Este término comenzó a utilizarse a raíz de la aparición de actividad en otras poblaciones de asteroides, como ser NEAs o Centauros.

En este trabajo utilizaremos el término ‘Asteroides Activados’ (AAs) para referirnos a los objetos que presentan un comportamiento dinámico similar a los asteroides (se encuentren o no en el cinturón principal) y que hayan sufrido en el pasado uno o varios episodios de activación, ya sea debido a sublimación de volátiles o no. Decir que los asteroides son ‘activados’ en vez de ‘activos’ hace referencia a que la actividad es esporádica y a que es activada por algún mecanismo. Actualmente existen unas pocas decenas de objetos que enmarcan en la clasificación de asteroides activados. Si bien los mecanismos de activación más probables son la sublimación de volátiles y los impactos, para muchos de estos objetos esto aún no está determinado y continúa en discusión.

#### 1.1.1. Asteroides en órbitas cometarias

Un Asteroide en Órbita Cometaria (ACO, Asteroid in Cometary Orbit) es un objeto con una órbita con inclinación y excentricidad de moderada a alta, con bajas velocidades relativas de encuentro con Júpiter y por lo tanto forma parte de una población inestable, similar a los cometas de la familia de Júpiter (JFC, Jupiter Family Comet), los cuales cuentan con vidas dinámicas del orden de los  $10^4 - 10^5$  años (Alvarez-Candal y Roig, [2005](#), Di Sisto et al. [2009](#)).

El término ACO aparece en la literatura a partir del corriente siglo y la

mayoría de los trabajos son de la última década. Algunos de estos tienen que ver con su estudio físico (determinación de albedo, análisis de espectros, etc.) y también con la dinámica de estos objetos.

#### 1.1.1.1. Estudios físicos

Y. R. Fernández et al. (2005) llevaron a cabo un survey de 26 asteroides y encontraron una correlación entre bajos valores de parámetro de Tisserand y bajos albedos (tipo cometarios,  $p < 0.075$ ). 64 % de los objetos de la muestra (compuesta además por seis objetos con datos de la literatura) presentaron valores de albedo de tipo cometario, así como la mitad de los Near Earth Objects (NEOs). Esto implicaría que los cometas extintos o durmientes podrían representar el 4 % de esta población. A un resultado similar llegaron F. DeMeo y Binzel (2008) luego de estudiar los albedos y espectros de 55 NEOs con  $T_J < 3$ , quienes estiman que 8 % de la población de NEOs tienen las propiedades físicas y dinámicas de cometas originarios del Sistema Solar exterior.

Los espectros de una muestra de 24 ACOs fueron estudiados por Licandro et al. (2008) en busca de entender la relación entre estos objetos, los JFCs y otras poblaciones del cinturón exterior. A estos objetos se agregaron otros 17, obtenidos de la literatura. Del total de 41 ACOs analizados, 34 presentaron un espectro similar a los núcleos cometarios y a los asteroides del cinturón exterior. En este estudio encontraron además que los NEOs en órbitas cometarias presentan una fracción importante de asteroides escapados del cinturón interior, de acuerdo a sus características espetrales.

Alvarez-Candal (2013) exploró el catálogo de Moving Objects de la base de datos fotométrica del Sloan Digital Sky Survey (SDSS). Se analizaron los colores y propiedades orbitales y se realizó un estudio espectral, comparando con resultados espectroscópicos existentes de otros ACOs, concluyendo que los ACOs con  $T_J < 2.8$  son muy probablemente de origen primitivo (poblaciones más allá de la parte exterior del cinturón principal y JFCs), mientras que la población de objetos con  $T_J > 2.9$  es una mezcla de diferentes poblaciones entre el cinturón interno y externo.

Kim et al. (2014) investigaron los datos de tamaño y albedo de ACOs en el catálogo Infrared Astronomical Satellite, AKARI, y el Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE), encontrando que 80 % de los 123 ACOs de acuerdo

al criterio de estos autores (distancia afélica  $Q < 4.5$  ua y  $T_J < 3$ ) poseen un albedo bajo,  $p_v < 0.1$ , consistente con núcleos cometarios. El resto de los ACOs que poseen albedo alto son mayormente pequeños cuerpos ( $D < 3$  km) con perihelios  $q < 1.3$  ua, que los autores consideran pueden haber sido influenciados por el efecto Yarkovsky <sup>1</sup> y llevados a órbitas cometarias.

Licandro et al. (2016) realizaron un estudio de los albedos de 49 ACOs en órbitas cometarias de la familia de Júpiter y 16 ACOs en órbitas tipo Halley, con observaciones de WISE, en el que encontraron que 95% de la muestra de JF-ACOs presenta albedo bajo, compatible con un origen cometario. Licandro et al. (2018) también realizaron un estudio de las propiedades espectrales de poblaciones de ACOs, utilizando diversos telescopios. Se observaron 17 ACOs a los que se sumaron 12 espectros obtenidos de la literatura. Del total de 29 ACOs, 27 presentan una clase espectral primitiva (X o D). Casi todos los ACOs en órbitas cometarias de largo período (Damocloids) son tipo D. Los ACOs de la familia de Júpiter son 60% tipo D y 40% tipo X. La clase espectral y el spectral slope son similares a las de los cometas. Los autores de este trabajo concluyen que la clasificación taxonómica espectral, sumado a la distribución de spectral slope y la falta de características espectrales que indiquen la presencia de minerales hidratados en la superficie de los ACOs, son evidencias de que se trata de cometas durmientes o extintos.

Entre los trabajos más recientes se encuentra un análisis de los potenciales cometas extintos/durmientes entre los NEOs en órbitas cometarias ( $T_J \leq 3.1$ ) realizado por Simion et al. (2020), usando espectros en el visible e infrarrojo cercano de 150 objetos, donde se incluyen siete que pertenecen al conjunto de los estudiados en esta tesis, todos con órbitas de la familia de Júpiter. Los mismos fueron clasificados como tipo D (cuatro casos), tipo C, tipo T y tipo Xc. Los autores concluyen que esos siete cuerpos son cometas extintos/durmientes. Respecto a la población general estudiada, 56% de los NEOs con  $T_J \leq 3.1$  tienen espectro de tipo cometario, mientras que este número se eleva a 80% si se considera  $T_J \leq 2.8$ .

Por otra parte Geem et al. (2021) realizaron un estudio polarimétrico de tres de los ACOs estudiados en esta tesis, en el que concluyeron que dos de ellos

---

<sup>1</sup>Se denomina así al efecto que genera modificación en las órbitas de cuerpos de hasta 10 km de diámetro, debido a la reemisión de la radiación solar absorbida, desde el hemisferio iluminado.

tienen propiedades polarimétricas similares a núcleos cometarios y asteroides tipo D, mientras que uno presentó propiedades polarimétricas consistentes con asteroides tipo S. Un estudio dinámico de este último objeto muestra que fue llevado del cinturón principal a una órbita cometaria a través de una resonancia 3:1 con Júpiter.

#### 1.1.1.2. Estudios dinámicos

Se han realizado también estudios dinámicos para intentar identificar cometas durmientes. Pero estos son complicados debido a que el parámetro de Tisserand no siempre se conserva, por lo que la población de ACOs podría tener objetos que no tienen un origen cometario.

Un trabajo realizado por Hsieh y Haghighipour ([2016](#)) mostró que algunos objetos con órbitas iniciales de tipo JFC pueden evolucionar a órbitas de asteroides del cinturón principal en escalas relativamente cortas ( $< 2$  Myr), y objetos con órbitas iniciales del cinturón pueden evolucionar a órbitas tipo JFC en escalas parecidas. Los autores estiman que la fracción real de cometas de la familia de Júpiter que ocasionalmente alcanzan órbitas similares a las del cinturón principal en las escalas de tiempo de millones de años podrían estar en el orden de 0.1-1 %, aunque la fracción que permanece en tales órbitas durante períodos de tiempo apreciables es mucho menor (pero distinta de cero).

Ye et al. ([2016](#)) estudiaron 407 ACOs en la población de asteroides cercanos a la Tierra (NEAs, Near Earth Asteroids), debido a que éstos objetos, aparentemente inactivos, podrían en sus estados finales ser los causantes de algunas lluvias de meteoros. Para esto realizaron un survey en busca de cometas durmientes usando órbitas obtenidas por el Canadian Meteor Orbit Radar (CMOR). Simularon la evolución dinámica de los streams de meteoroides hipotéticos originados por NEAs en órbitas cometarias (NEACOs), con características similares a los JFCs, encontrando 5 detecciones estadísticamente significativas, que se traduce en un límite inferior del 2 % de cometas durmientes en la población de NEOs.

#### 1.1.2. Asteroides activados

Los objetos del cinturón principal de asteroides fueron supuestos inactivos durante mucho tiempo, ya que se pensaba que cualquier volátil que pudieran

tener se debería haber sublimado durante su vida (aproximadamente 4600 millones de años). Pero esta concepción cambió cuando el asteroide (7968) Elst-Pizarro mostró actividad en dos pasajes consecutivos por su perihelio, en 1996 (Elst et al. 1996) y 2002 (Hsieh et al. 2004). A partir de ahí, se realizó un monitoreo en el cinturón principal, en busca de otros objetos que pudieran mostrar actividad (Hsieh y Jewitt, 2006), encontrando dos nuevos casos: P/2005 U1 (Read) y 118401 (1999 RE<sub>70</sub>) LINEAR. Posteriormente, éstos tres primeros asteroides con actividad, fueron denominados 133P, 238P y 176P respectivamente. Con ese trabajo, se logró demostrar la existencia de un tercer reservorio de cometas en el cinturón principal (aparte del cinturón transneptuniano y la nube de Oort).

La actividad que muestran estos objetos, tiene que ser generada por mecanismos esporádicos que permitan que aparezca de vez en cuando y estira su supervivencia. En ningún caso se ha detectado eyección de gas, aunque existen limitaciones técnicas para que esta detección sea posible. Al no existir eyección de gas confirmada, surgen otras hipótesis para explicar la aparición de nubes de polvo (además de sublimación de volátiles). Los diferentes mecanismos de pérdida de masa que se han propuesto pueden encontrarse detalladamente en Jewitt (2012) y Jewitt et al. (2015); presentaremos aquí un resumen de los principales mecanismos (los siguientes apartados corresponden al análisis realizado por dichos autores en los mencionados trabajos).

#### 1.1.2.1. Sublimación

En un principio se pensó que los asteroides que mostraban colas necesariamente experimentaban sublimación de hielo cercano a la superficie, pero luego se determinó que este es uno dentro de una variedad de mecanismos. Aunque parece un concepto simple, es un proceso complejo donde intervienen un gran número de factores tales como: porosidad de la superficie, rotación del núcleo, conducción de calor hacia el interior, etc. El flujo de masa por unidad de área debido a sublimación puede estimarse a partir de la ecuación de balance de energía. Se pueden considerar dos casos límites para la temperatura superficial, y por tanto, para la tasa de sublimación: la temperatura máxima se alcanza en el punto subsolar de un cuerpo no rotante, y la mínima, en una superficie isotérmica. También se pueden considerar los casos de albedo alto ( $A = 0.5$ ) y bajo (0.05), pero el caso de alto albedo sublima muy lentamente para generar

actividad a la distancia del cinturón de asteroides, por lo que ese caso queda descartado.

Las tasas máximas de sublimación varían entre aproximadamente  $10^{-4}$  kg/m<sup>2</sup>s a 2 au, y  $10^{-5}$  kg/m<sup>2</sup>s a 3.5 au, correspondientes a los bordes interno y externo del cinturón principal, para el caso de temperatura máxima (en el caso de mínima, se requeriría un área muy grande para producir una tasa significativa de 1 kg/s).

Teniendo en cuenta estos parámetros, se puede concluir que el hielo expuesto puede sublimar en todo el rango de distancias del cinturón principal, siempre que el asteroide tenga bajo albedo. Pero para iniciar la sublimación, el manto que recubre el hielo debe ser removido, por ejemplo, por un impacto.

#### 1.1.2.2. Eyección por impactos

El material que es eyectado durante los impactos podría explicar episodios de actividad en algunos asteroides. Es posible obtener una relación entre las características del impactor y el aumento de brillo causado por el material eyectado.

Haciendo algunos cálculos sencillos, se puede estimar que un proyectil de 1 m impactando un asteroide de 1 km producirá eyecciones con una sección eficaz igual a 30 veces la sección eficaz del asteroide, generando un aumento de brillo de aproximadamente 3.5 mag. Pero si el mismo proyectil impacta un asteroide de 10 km, el cambio de magnitud será de apenas 0.01 mag. De cualquier manera, los resultados dependerán de los parámetros del impactor y los granos de polvo despedidos.

#### 1.1.2.3. Inestabilidad rotacional

La inestabilidad rotacional se da cuando se alcanza el período crítico, o sea, que la aceleración gravitacional iguala a la aceleración centrípeta en el ecuador. A pesar de que dicha igualdad se deduce que el período crítico sería independiente del tamaño del objeto, numerosas medidas muestran que solo asteroides más pequeños que 0.1 – 0.3 km rotan con períodos menores a 2 hs (Pravec et al. 2002), debido a que solo asteroides sub kilométricos tendrían la resistencia suficiente a las disrupturas rotacionales, mientras que los cuerpos más grandes son más débiles estructuralmente y rotacionalmente inestables cuando el período de rotación es menor al período crítico.

Dada la evidencia de la distribución de las tasas de rotación de los asteroides es razonable afirmar que la inestabilidad rotacional puede ser una causa de la pérdida de masa observable en el cinturón principal.

#### 1.1.2.4. Otros mecanismos

Si bien los descriptos anteriormente se consideran los principales mecanismos de generación de actividad, se han propuesto otros que podrían ser los causantes en algunos casos:

*Fractura térmica*: ocurre cuando las tensiones asociadas con un cambio en la temperatura del material exceden la resistencia del mismo. Es un agente capaz de eyectar partículas pequeñas de asteroides, pero solo en los que se aproximan mucho al Sol.

*Deshidratación térmica*: algunas condritas carbonáceas contienen 10-20 % de agua en peso en minerales hidratados. Si se liberara llevaría a pérdida de masa a medida que el agua escapa al espacio. Las energías de activación corresponden a temperaturas del orden de los 1000 K (mucho mayores que las del cinturón principal).

*Fuerzas electrostáticas*: eyección electrostática de partículas lo suficientemente grandes para dispersar fotones en el óptico es un mecanismo plausible de pérdida de masa solo para asteroides pequeños. No hay ejemplos claros de este proceso.

## 1.2. Criterio dinámico

Tancredi ([2014](#)) presentó un criterio estricto para distinguir entre asteroides y cometas, basado en sus parámetros orbitales. La necesidad de este criterio surge de la imposibilidad de realizar en la actualidad una clasificación correcta de todos los objetos. Por ejemplo, desde el punto de vista dinámico, se podrían estudiar los asteroides en busca de aquellos que comparten las características dinámicas con los cometas periódicos, como lo es, la posibilidad de experimentar encuentros cercanos con los planetas gigantes. A su vez, monitorear un asteroide durante toda su órbita permitiría detectar si presenta actividad cometaria en algún momento. Pero cualquiera de estas dos posibilidades resulta inviable, teniendo en cuenta que en la actualidad hay más de un millón de

asteroides descubiertos.

A continuación se puede ver una versión esquemática y resumida del criterio para distinguir asteroides y cometas. Para más detalle de este se recomienda la lectura del trabajo original.

### Criterio de clasificación para cometas periódicos:

- Halley type Comets:  $T_{Jup} < 2$  y  $a < a_{Nep}$
- Jupiter Family Comets:  $2 < T_{Jup} < 3.05$  y  $q < Q_{Jup}$
- “Comets” in Asteroidal Orbits:  $T_{Jup} > 3.05$  y  $q < Q_{Jup}$
- Centaur Comets:  $T_{Jup} > 2$  y  $Q_{Jup} < q < a_{Ura}$

### Criterio para identificar asteroides en diferentes tipos de órbitas cometarias

- ACO-Jupiter Family:
  - $2 < T_{Jup} < 3.05$  y  $q < Q_{Jup}$
  - No se encuentra en las resonancias internas: 4:1; 5:2; 7:3; 3:1; 2:1,  $Q < (Q_{Jup} + R_{H,Jup})$  y  $\text{NOT}(MOID}_{Jup} < 1.5 \& (Q > q_{Jup} - R_{H,Jup}/4))$
  - No se encuentra en las resonancias externas:
    - 3:2 y  $Q < (Q_{Jup} + R_{H,Jup}/4)$
    - 4:3 y  $Q < (q_{Jup} - R_{H,Jup}/2)$
    - 1:1 y  $e < 0.35$
  - No se encuentra en la región interna definida como: ( $MOID}_{Jup} > 1 \& a < a_{5:2}$ ) OR ( $MOID}_{Jup} > 2 \& a < a_{7:3}$ )
  - Cruza o se aproxima a la órbita de Júpiter:
    - $Q > q_{Jup}$  y  $\min(MOID}_{Giants) < 4R_H$  ◦
    - $(q_{Jup} - 1.5R_{H,Jup}) < Q < q_{Jup}$  y  $\min(MOID}_{Giants) < 2.5R_H$
- Centaur asteroids:  $T_{Jup} > 2$  y  $Q_{Jup} < q < a_{Ura}$
- ACO-Halley type:  $T_{Jup} < 2$

La mínima distancia de intersección orbital (MOID, Minimum Orbital Intersection Distance) se define como la distancia mínima entre dos órbitas.  $MOID}_{Jup}$  hace referencia al MOID respecto a Júpiter.  $Q_{Jup}$  y  $q_{Jup}$  son la distancia afelíca y perihélica de Júpiter respectivamente,  $R_{H,Jup}$  es el radio de Hill

de Jupiter,  $Q$ ,  $q$ ,  $a$  y  $e$  son la distancia afélida y perihélida, el semieje mayor y la excentricidad del objeto, respectivamente,  $a_{Ura}$  es el semieje mayor de Urano,  $a_{Nep}$  el semieje mayor de Neptuno y  $\min(MOID_{Giants})$  es el mínimo MOID entre los planetas gigantes.  $a < a_{5:2}$  significa que el semieje mayor del objeto está dentro de la resonancia 5:2 y  $a < a_{7:3}$  que está dentro de la resonancia 7:3.

Luego de desarrollar el criterio, Tancredi realiza integraciones numéricas de 10000 años hacia el pasado para verificar la validez de este. De esta manera, son eliminados los objetos que pertenecen a la categoría ACOs-JF y que no tuvieron encuentros.

### 1.3. Motivación

El estudio de los objetos transicionales ha cobrado relevancia en las últimas décadas, lo que ha motivado a realizar esfuerzos por tratar de entender su origen. Las investigaciones se han visto potenciadas por el descubrimiento de nuevos asteroides activados, el perfeccionamiento de los criterios de clasificación, y el constante avance en materia de técnicas observacionales.

Con relación a los ACOs, se trata de una población que comparte características dinámicas con los cometas, pero no han mostrado señales de actividad durante los períodos en que se han observado. Entendemos que es necesario determinar si estos objetos son cometas durmientes o extintos, o si se trata de asteroides que escaparon del cinturón principal y actualmente se encuentran en órbitas cometarias.

Si bien no existe evidencia para dar una respuesta definitiva respecto a esto, los estudios físicos y dinámicos de estos cuerpos así como la evidencia observational son los insumos que pueden permitirnos determinar sus orígenes. Estudiarlos puede ayudar a entender cuáles son los estados finales de los cometas, y cuál es el tamaño de esta población de objetos.

Respecto al origen de los asteroides activados, una cuestión clave es determinar si se formaron *in situ*. Si esto es así y el mecanismo disparador de la actividad es la sublimación de hielos, deben haber muchos más casos presentes en el cinturón de asteroides que los detectados actualmente. Esta población es muy relevante, debido a que podría ser una de las fuentes del agua en la Tierra (Hsieh, 2014). Si la actividad es en efecto causada por sublimación de

volátiles, ésto tiene implicancias cosmogónicas importantes, ya que supone la permanencia de hielo de agua dentro de la “línea de nieve” desde el origen del Sistema Solar.

La presencia o ausencia de volátiles en el presente en la región del cinturón de asteroides es de relevancia para conocer las condiciones del origen de esta población y las propiedades físicas y químicas del Sistema Solar en sus etapas iniciales. En este sentido, la detección de actividad en las diferentes regiones de sus órbitas, así como su recurrencia, son claves a la hora de evaluar los mecanismos de activación.

Este trabajo es la continuación del trabajo especial de licenciatura, donde se monitoreó un conjunto de ACOs y AAs en busca de actividad.

La tesis se organizará de la siguiente manera: en el capítulo [2](#) se describen los programas realizados para generar la lista de objetos a estudiar. En el capítulo [3](#) se describen los diferentes instrumentos utilizados para obtener los datos y los objetos observados con cada uno. En el capítulo [4](#) se explican los procedimientos para llevar a cabo el análisis de los datos. Los resultados obtenidos y su análisis son presentados en los capítulos [5](#) y [6](#). Por último, las conclusiones y la discusión se encuentran en el capítulo [7](#).

# Capítulo 2

## Selección de objetos

Los ACOs a estudiar fueron seleccionados tomando en cuenta el criterio descrito en la sección [1.2](#).

Para realizar la selección se partió de un conjunto de scripts desarrollados por Gonzalo Tancredi en diferentes lenguajes y se trabajó para unificarlos en un lenguaje común (Python), implementando además varias modificaciones con el fin de mejorar la automatización del proceso y los tiempos de ejecución.

Todos estos scripts pueden encontrarse en el repositorio Gitlab denominado `objects_selection` (ver Apéndice [1](#)).

A continuación se presenta una descripción de los pasos que realizan los programas de selección de los objetos, y cuyo resultado final es una lista actualizada de ACOs.

### 2.1. Obtención de la base de datos de elementos orbitales

En primer lugar se realiza la descarga de la base de datos de asteroides del Minor Planet Center (MPC) y la de cometas del Jet Propulsion Laboratory (JPL) de la NASA, de manera de tener los elementos orbitales actualizados tanto de asteroides como de cometas.

En el caso de los asteroides, se seleccionan únicamente aquellos que poseen elementos orbitales precisos, de acuerdo al parámetro de incertidumbre  $U$  que brinda el MPC. Este parámetro es un número entero comprendido en el rango de 0 a 9, donde 0 indica una incertidumbre muy pequeña y 9 una incertidumbre extremadamente grande. Los objetos recién descubiertos suelen tener

este parámetro muy alto, valor que va descendiendo a medida que se obtienen nuevas observaciones que mejoran su órbita.

Se computa de la siguiente manera: en primer lugar, se calcula el desfase en longitud en segundos de arco por década,  $RUNOFF$ , de acuerdo a la ecuación 2.1, donde  $dT$  es la incertidumbre en el tiempo de pasaje por el perihelio (en días),  $e$  la excentricidad,  $P$  el período orbital (en años),  $dP$  la incertidumbre del período orbital (en días) y  $ko$  la constante de Gauss en grados.

$$RUNOFF = \left( dT \times e + \frac{10}{P} \times dP \right) \frac{ko}{P} \times 3600 \times 3 \quad (2.1)$$

Luego, este valor es convertido al parámetro de incertidumbre  $U$  en una escala entre 0 y 9, de acuerdo a la ecuación 2.2.

$$U = INT \left( \frac{\ln(RUNOFF)}{1.49} \right) + 1 \quad (2.2)$$

Para nuestra selección se usó un máximo de  $U = 2$  que implica un error menor a 19.6 segundos de arco por década. De esta manera se pretende descartar asteroides cuyos elementos orbitales son considerados de mala calidad, para evitar contaminar la muestra con objetos que podrían en efecto no ser ACOs. Cabe destacar que el parámetro de incertidumbre suele disminuir con el paso del tiempo, hasta llegar a valores que entran dentro de nuestro criterio.

## 2.2. Aplicación del criterio de selección

Para la aplicación del criterio dinámico se realizan los pasos que se detallan a continuación.

- Se calculan los parámetros de Tisserand y MOID de los objetos con respecto a los cuatro planetas gigantes.
- Se genera un nuevo archivo con todos los elementos orbitales, parámetro de Tisserand y MOIDs con respecto a los planetas gigantes, mínimo MOID, distancia perihélica y afélica.
- Se clasifican los cometas en: cometas de la familia de Júpiter (JFC, Jupiter Family Comets), órbitas tipo Halley (HTO, Halley Type Orbits), órbitas asteroidales (CAO, Comets in Asteroidal Orbits) y Centauros (CC, Centaur Comets).

- Se calculan las resonancias para aplicar el criterio (para conocer el detalle de este procedimiento se recomienda ver el Material Suplementario de Tancredi, 2014).
- Se clasifican los ACOs en: familia de Júpiter (AJF, ACOs-Jupiter Family), Centauros (AC, ACOs-Centaur) y órbitas tipo Halley (AHO, ACOs-Halley Orbits).

## 2.3. Integraciones

A continuación se realizan integraciones numéricas de los objetos, utilizando el integrador de elementos orbitales RADAU (Everhart, 1985).

Se evalúan los encuentros de los objetos con los planetas gigantes. Si el ACO no tuvo encuentros se elimina de la lista.

Cumplidas todas estas etapas, se generan tablas con los datos de los ACOs seleccionados.

## 2.4. Página web

La lista actualizada de ACOs puede encontrarse en un sitio web que se desarrolló con este fin. Se encuentra disponible en: [acos.astronomia.edu.uy](http://acos.astronomia.edu.uy) y allí se pueden ver todos los objetos clasificados como ACOs de acuerdo al criterio utilizado, así como algunos de sus parámetros orbitales ( $a$ ,  $e$ ,  $i$ ,  $T_J$  y  $MOID$ ), magnitud absoluta ( $H$ ), slope parameter ( $G$ ), tipo de ACO, magnitud aparente ( $V$ ) y coordenadas ecuatoriales a la fecha de actualización. La figura 2.1 muestra un ejemplo de la tabla con algunos ACOs. En la esquina superior derecha aparece la cantidad total al momento de la actualización.

La lista completa también se puede descargar en formato `csv` desde la web.

La tabla 2.1 muestra los datos de asteroides, asteroides con órbitas precisas y asteroides con parámetro de Tisserand menor a 3, con datos tomados en julio de 2021. Los datos de los objetos obtenidos en la selección figuran en la tabla 2.2 discriminados por tipo de ACO. Algo similar se hace para los cometas en la tabla 2.3. Se puede observar que si bien la cantidad de asteroides con  $T < 3$  es bastante importante, el número cambia mucho al aplicar un criterio dinámico estricto.

Record Count: 705												
Name ↗	Packed name ↗	a ↗	e ↗	i ↗	H ↗	G ↗	T ↗	MOID ↗	Type ↗	RA ↗	DEC ↗	V ↗
944	00944	5.734	0.661	42.539	10.68	0.15	2.073	0.327	Jupiter Family	200.26	-23.32	19.47
2060	02060	13.694	0.378	6.935	5.83	0.15	3.358	3.093	Centaur	10.61	7.12	18.9
3552	03552	4.262	0.709	31.089	12.96	0.15	2.309	0.432	Jupiter Family	122.6	42.99	21.95
5145	05145	20.362	0.569	24.613	7.1	0.15	3.241	3.522	Centaur	273.93	-11.9	21.75
5164	05164	3.698	0.498	19.264	13.22	0.15	2.795	1.085	Jupiter Family	225.32	-20.37	19.14
5201	05201	3.391	0.454	3.271	14.87	0.15	2.97	0.222	Jupiter Family	313.31	-21.49	21.79
5335	05335	11.845	0.866	61.587	13.3	0.15	1.132	3.597	Halley Type	323.67	10.48	26.11
6144	06144	4.766	0.36	5.883	11.65	0.15	2.871	0.203	Jupiter Family	60.93	16.1	20.29
7066	07066	24.675	0.517	15.642	9.6	0.15	3.808	6.471	Centaur	350.69	-17.08	24.53
8405	08405	18.007	0.622	17.617	9.1	0.15	3.064	2.298	Centaur	83.99	39.95	23.06
10199	10199	15.839	0.169	23.35	6.55	0.15	3.456	8.259	Centaur	304.84	-19.21	18.83
10370	10370	25.175	0.245	4.142	8.6	0.15	4.461	13.556	Centaur	289.29	-18.16	22.57

**Figura 2.1:** Tabla con información de los ACOs disponible en la web.

**Tabla 2.1:** Cantidad de asteroides.

Objeto	Cantidad
Asteroides	1103617
Asteroides con órbitas precisas	955049
Asteroides con $T < 3$	17857
Asteroides con $T < 3$ y órbitas precisas	17064

**Tabla 2.2:** Cantidad de ACOs según tipo.

Objeto	Cantidad
ACOs de la familia de Júpiter	384
ACOs en órbita tipo Halley	115
ACOs Centauros	206
Total	705

**Tabla 2.3:** Cantidad de Cometas según tipo.

Objeto	Cantidad
Cometas de la familia de Júpiter	603
Cometas en órbita tipo Halley	110
Cometas Centauros	24
Cometas en órbitas asteroidales	31
Total	768

Una aclaración es que los que figuran en las tablas son tanto asteroides numerados como no numerados. En caso que un asteroide numerado presente actividad cometaria, pasa a tener doble denominación (como asteroide y como cometa). Si esto ocurre para un objeto con designación provisoria, pasa a tener denominación de cometa, sin llegar tener denominación definitiva como asteroide.

La muestra de objetos que interesa analizar estará constituida de todos los ACOs (705) y de los Cometas en órbitas asteroidales (31).

# Capítulo 3

## Observaciones

En este trabajo se obtuvieron imágenes de ACOs y AAs de diferentes instrumentos. Por un lado, se diseñó un plan de observación, trabajando en colaboración con el telescopio del proyecto Iniciativa de Mapeamento e Pesquisa de Asteroides nas Cercanias da Terra no Observatório Nacional (IMPACTON), del Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica (OASI), Pernambuco, Brasil. Los detalles pueden encontrarse en la sección [3.1](#).

También se utilizaron imágenes del telescopio IAC80 del Observatorio del Teide, Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), España y del Jacobus Kapteyn Telescope (JKT) del Observatorio del Roque de los Muchachos, también dependiente del IAC (sección [3.2](#)).

Además, se trabajó con datos del Observatorio Virtual (VO, Virtual Observatory), a través del cual se logró acceder a imágenes del Very Large Telescope (VLT) perteneciente al European Southern Observatory (ESO) (sección [3.3](#)).

Por último, se presentó un proyecto para trabajar con imágenes del Dark Energy Survey (DES), lo que se describe en la sección [3.4](#).

### 3.1. Telescopio IMPACTON

El proyecto IMPACTON surgió con el objetivo de instalar y operar un observatorio astronómico dedicado a la búsqueda y seguimiento de cuerpos menores del Sistema Solar, de manera de integrar a Brasil en los programas internacionales de estudio de asteroides y cometas en riesgo de colisión con la Tierra.

El OASI (figura [3.1](#)) está instalado en el municipio de Itacuruba (esta-

do de Pernambuco, Brasil). El telescopio es operado remotamente desde el Observatório Nacional (ON) de Río de Janeiro. Los detalles del instrumental pueden encontrarse en la tabla 3.1. Las imágenes fueron tomadas con filtro R y dos cámaras CCDs diferentes, por los observadores del OASI; los planes de observación fueron coordinados por Eduardo Rondon (ON, Río de Janeiro).



**Figura 3.1:** Observatorio Astronomico do Sertao de Itaparica, OASI.

**Tabla 3.1:** Telescopio IMPACTON.

Latitud	8° 47' 32.1" S
Altura	390 m s. n. m.
Telescopio	Reflector 1.0 m
CCD 1	Apogee Alta U47
Tamaño en píxeles	1024 × 1024
Tamaño angular	5.9 ' × 5.9 '
Escala de placa	0.343 " /pixel
CCD 2	Apogee Alta U42
Tamaño en píxeles	2048 × 2048
Tamaño angular	13.5 ' × 13.5 '
Escala de placa	0.395 " /pixel

Durante los años 2015 y 2016 se desarrolló un programa conjunto de monitoreo de actividad residual en ACOs y asteroides activados, entre la Facultad de Ciencias de la UdelaR y el ON. Durante este período, se observaron y analizaron decenas de éstos objetos transicionales. Se redujeron 42 ACOs y tres

asteroides activados logrando detectarse actividad en uno de los ACOs observados, P/2015 PD<sub>229</sub>, así como la reactivación de dos MBCs, 238P y 288P. (Martino et al. 2019).

El programa de monitoreo fue retomado entre agosto de 2019 y abril de 2021, realizando observaciones entre una y tres noches por mes, siempre que el instrumental estuviera operativo (en total se realizaron observaciones en 11 meses). La mayoría de los objetos fue observado en una única oportunidad, aunque algunos pudieron ser observados en dos meses consecutivos.

### 3.1.1. Planificación de las observaciones

Para la planificación de las observaciones se desarrolló un conjunto de scripts en Python utilizando el servicio de efemérides de JPL-Horizons, a través de la herramienta `astroquery` de Python.

A la lista final de objetos, se le aplican algunas consideraciones de observabilidad, listadas a continuación:

- La altura del objeto en el momento de la observación no debe ser inferior a  $27^\circ$  ni superior a  $72^\circ$ , debido a las restricciones en la movilidad del telescopio.
- La elongación del objeto debe ser superior a  $60^\circ$ .
- Su magnitud visual no debe ser superior a  $V = 21$ , magnitud límite del instrumental para 30 segundos de exposición, estimada por Martino (2017) (a partir de la magnitud de completitud).

En principio no se consideran restricciones en la anomalía verdadera del objeto, aunque de la lista de objetos observables se les da prioridad a los que se encuentran más próximos al perihelio.

Se seleccionan solamente objetos que presenten estas condiciones de observabilidad desde el OASI, durante al menos dos horas.

Una vez terminado este filtrado, se obtienen las efemérides para la fecha de observación de los objetos seleccionados, entre las que se incluyen: coordenadas ecuatoriales, altura, elongación, magnitud aparente y sky motion (“/min) del objeto.

Los scripts desarrollados para generar el plan de observación para una determinada fecha también pueden encontrarse en el repositorio de GitLab que figura en el Apéndice 1, con el nombre de `ephemeris`.

### 3.1.2. Objetos observados con el IMPACTON

En la mayoría de los casos se tomaron dos secuencias de 15 imágenes por objeto, distanciadas un tiempo suficiente para que el objeto se desplazara significativamente en la imagen, teniendo en cuenta el movimiento en el cielo que presentaba este. Además, se obtuvieron imágenes bias, flat y dark, para realizar la calibración básica.

En la tabla 3.2 se presenta un resumen de los objetos observados por turno de observación (con excepción de 133P, 324P, 331P y 354P, los AAs observados, todos los demás son ACOs).

**Tabla 3.2:** Objetos observados con el IMPACTON, por turno de observación.

Turno	Objetos
08/2019	90572, 523673, 523720, 523727, 1999 LE <sub>31</sub> , 2013 QQ <sub>95</sub> , 2017 RG <sub>16</sub> , 133P, 354P
09/2019	2060, 6144, 44594, 90572, 434762, 499522, 523673, 2013 QQ <sub>95</sub> , 2014 OG <sub>392</sub>
11/2019	5164, 6144, 44594, 318875, 322713, 501585, 503273
05/2020	119039, 469442, 472651, 2009 YF <sub>7</sub> , 324P
08/2020	20898, 90572, 366186, 406803, 2006 UA <sub>150</sub> , 2016 ED <sub>85</sub> , 2019 KN <sub>19</sub> , 331P
09/2020	54598, 90572, 145627, 406803, 1999 LE <sub>31</sub> , 2015 BK <sub>22</sub> , 2016 ED <sub>85</sub>
10/2020	2005 CR <sub>16</sub> , 2015 BK <sub>22</sub> , 90572, 248590
12/2020	2005 CR <sub>16</sub> , 2006 BF <sub>208</sub> , 2006 XL <sub>5</sub> , 2017 SW <sub>11</sub> , 2019 SS <sub>79</sub> .
01/2021	44594, 54598, 2005 CR <sub>16</sub> , 2010 ER <sub>22</sub> , 2015 BK <sub>22</sub> .
03/2021	118624, 275618, 323137, 2005 XR <sub>132</sub> , 2006 BF <sub>208</sub> .
04/2021	228862, 386968, 2005 XR <sub>132</sub> , 2005 NP <sub>80</sub> , 2006 BF <sub>208</sub> , 2015 XW <sub>379</sub> , 2017 SW <sub>11</sub> .

## 3.2. Telescopios del IAC

Mediante una colaboración con Javier Licandro, del IAC, se trabajó con un conjunto de imágenes de objetos observados con los telescopios IAC80 y JKT durante los años 2015 y 2016.

El telescopio IAC80 se encuentra en el Observatorio del Teide (figura 3.2), perteneciente al IAC, está ubicado en la isla de Tenerife y sus características pueden encontrarse en la tabla 3.3.

Por su parte el JKT se encuentra en el Observatorio del Roque de los Muchachos en La Palma (figura 3.3) y sus datos están disponibles en la tabla 3.4.



**Figura 3.2:** Observatorio del Teide, IAC



**Figura 3.3:** Observatorio del Roque de los Muchachos, IAC

La mayoría de las observaciones con los telescopios del IAC fueron realizadas con filtro R, excepto algunos pocos casos en que se observó sin filtro.

### 3.2.1. Objetos observados en colaboración con el IAC

Los ACOs presentes en las imágenes del IAC80 y del JKT fueron seleccionados con el mismo criterio dinámico utilizado para las observaciones realizadas con el IMPACTON. Las imágenes proporcionadas ya contaban con un pre procesamiento por bias, dark y flat, por lo que no fue necesario realizar ningún tipo de calibración previa.

**Tabla 3.3:** Telescopio IAC80.

Latitud	28° 17' 58.8" N
Altura	2381 m s. n. m.
Telescopio	Reflector 82 cm
CCD	CCD42-40-BI
Tamaño en píxeles	2048 × 2048
Tamaño angular	10.37 ' × 10.37 '
Escala de placa	0.305 " /pixel

**Tabla 3.4:** Telescopio JKT.

Latitud	28° 45' 40.1" N
Altura	2396 m s. n. m.
Telescopio	Reflector 1.0 m
CCD	Andor Camera
Tamaño en píxeles	2048 × 2048
Tamaño angular	11.6 ' × 11.6 '
Escala de placa	0.34 " /pixel

Las observaciones fueron realizadas en noviembre y diciembre del 2015, y entre julio y octubre del 2016. En la tabla 3.5 se presenta un resumen de los objetos presentes en las imágenes, por fecha, indicando el telescopio con el que fueron observados.

**Tabla 3.5:** Objetos presentes en las imágenes del IAC80 y JKT.

Fecha	Telescopio	Objetos
11/2015	IAC80	145485
12/2015	IAC80	145485
07/2016	IAC80	6144, 30512, 494667
07/2016	JKT	30512, 52007, 494667
09/2016	IAC80	52007
09/2016	JKT	52007, 494667
10/2016	JKT	52007, 494667

Además, en el marco de esta colaboración, se trabajó con imágenes del centauro 2020 MK<sub>4</sub>, descubierto en 2020. Los centauros son objetos que orbitan al Sol entre las órbitas de Júpiter y Neptuno, y solamente algunos han mostrado actividad cometaria. Estos objetos forman parte de nuestro criterio

adoptado para ACOs, aunque, como todo objeto descubierto hace poco tiempo, presenta incertidumbre en sus parámetros orbitales (posee un parámetro de incertidumbre del MPC de 3) y no figura aún en nuestra lista final.

2020 MK<sub>4</sub> fue descubierto el 15 de junio de 2020 y fue observado con los telescopios IAC80 y JKT el 16 y 17 de julio de 2020 respectivamente. Posee una órbita similar en tamaño y forma a la del cometa 29P (de la Fuente Marcos et al. [2021](#)).

### 3.3. Observatorio Virtual

El Observatorio Virtual cumple con la visión de que los datos y recursos astronómicos deberían funcionar en forma conjunta y como un todo. Con esto en mente se han desarrollado en la actualidad muchos proyectos y data centers por todo el mundo. El objetivo principal del VO es que todo dato astronómico esté disponible para su exploración en un único sistema transparente y de fácil acceso.

La International Virtual Observatory Alliance (IVOA), es una organización que debate y acuerda los estándares técnicos necesarios para que el VO sea posible. Tiene la misión de “facilitar la coordinación y colaboración internacional necesarias para el desarrollo y despliegue de las herramientas, sistemas y estructuras organizativas necesarias para permitir la utilización internacional de archivos astronómicos como un observatorio virtual integrado e interoperativo”. Entre sus objetivos también se encuentran discutir y compartir ideas y tecnología del VO, además de publicitarlo y promoverlo. Fue creada en 2002 y no dispone en la actualidad de financiación directa, sino que los proyectos afiliados buscan financiación en sus agencias nacionales (Fabbiano, [2017](#)).

El VO permite a los astrónomos explorar muchos data centers de forma transparente, proporcionando herramientas de análisis y visualización. Para esto, es necesario que tanto los datos como los métodos de intercambio de estos, estén estandarizados, además de que se requiere de un registro que contenga cuáles son los servicios disponibles y qué se puede hacer con cada uno de ellos.

El IVOA es quien ha establecido estos estándares para los datos y protocolos de intercambio. Varios observatorios virtuales han sido construidos de acuerdo a los estándares IVOA. Los principales usuarios de éstos han sido investigadores en astronomía, aunque existen también algunas interfaces para el público en general. Cada archivo/data center contiene diferentes estructuras

para los datos y metadatos. Debido a que la forma de organizarlos es diferente para cada uno, si bien los datos están disponibles para los usuarios, puede llegar a ser complejo acceder a algunos de estos, dependiendo el tipo de dato que se quiera obtener. Por ejemplo, obtener imágenes de objetos del Sistema Solar implica una complejidad adicional, ya que se debe hacer coincidir la posición con el tiempo de observación, y muchas de las herramientas no están pensadas para objetos en movimiento.

El VO es el camino hacia la interoperabilidad de los datos, servicios y herramientas. El conjunto de estándares desarrollados por la IVOA incluyen la estandarización para: datos de observaciones y simulaciones; métodos de intercambio de datos; listas y características de los servicios disponibles; protocolos de mensajería (Giommi y Pollock, 2017).

### 3.3.1. Acceso a bases de datos

Se estudiaron las diferentes bases de datos con imágenes astronómicas que presentan acceso hoy en día, en busca de herramientas que permitieran la búsqueda en esas imágenes de los objetos que se deseaba analizar.

Se encontraron dos herramientas que permiten la búsqueda de imágenes de objetos del Sistema Solar en los archivos a nivel mundial, de una forma relativamente accesible: Mega Preccovery, MP (Vaduvescu et al. 2013) y Solar System Object Image Search, SSOIS (Gwyn et al. 2012).

MP es una herramienta de The EUROpean Near Earth Asteroids Research (EURONEAR), un proyecto para mejorar la contribución Europea al estudio de los NEAs. El archivo actual posee acceso a imágenes de 112 instrumentos y contiene imágenes desde el 30 de noviembre de 1989. La figura 3.4 muestra la pantalla de búsqueda de esta herramienta.

SSOIS, por su parte, fue desarrollada por el Canadian Astronomy Data Centre (CADC). Da acceso a 75 instrumentos y posee imágenes desde el 1 de enero de 1990. La figura 3.5 muestra la pantalla de búsqueda por nombre del objeto que proporciona esta herramienta.

Ambas herramientas generan una lista de IDs de imágenes que coinciden con el criterio provisto. Las búsquedas pueden realizarse por nombre del objeto, elementos orbitales o efemérides. SSOIS permite buscar una lista de objetos.

Si se ingresa el nombre del objeto, el cálculo se realiza en base a las efemérides precalculadas de un servidor (en el caso de MP, IMCCE París, mientras

**Designation:**  [SsODNet](#) is used to check designations.  
The designation for the asteroids must respect one of the following formats:  
Apophis (for named objects), 22281 (for numbered objects), 2013 TH6 (for un-numbered objects)  
The designation for the comets must respect one of the following formats: c:19P, c:P/2004 T1, c:C/2005 A1-B, c:73P-E

**Ephemeris generator:**  Warning: OrbFit does not work with names of comets, please select Miriade.

**Output style:**

**Advanced Options:**

Computation interval (default entire interval):   
Safety search border (deg):   
Running mode:  
 Fast (ephemerides computed relative to geocenter)  
 Slow (ephemerides computed relative to the observatory, only for intervals lower than 100 days)

**Figura 3.4:** Ventana de búsqueda de Mega Precovrey.

que SSOIS permite elegir entre diferentes variantes, incluyendo MPC, JPL y su propio servidor).

Se debe ingresar el rango de fechas a buscar teniendo en cuenta que se puede acceder a imágenes obtenidas hasta hace un año y medio de la fecha de búsqueda, las demás son de propiedad exclusiva. SSOIS proporciona un enlace directo a la imagen a descargar. MP proporciona solo el identificador de la imagen, con el que se debe ir a buscar en la base de datos del telescopio (se proporciona un enlace para eso). Para algunos telescopios es necesario crear una cuenta gratuita para acceder directamente a las imágenes; en otros casos las imágenes deben ser solicitadas y se envía un enlace para la descarga a la dirección de mail ingresada (esto implica un e-mail por imagen solicitada).

Luego de obtener el listado con las imágenes que coinciden con el criterio de búsqueda (es decir, contienen las coordenadas del objeto del Sistema Solar para ese momento), se deben filtrar las innecesarias ya que además de las imágenes de ciencia también se proporcionan imágenes de calibración, imágenes de prueba, etc. Otro punto importante es que no se tienen en cuenta límites de magnitud, por lo que si bien las imágenes pueden contener las coordenadas del objeto para ese momento, el mismo puede quedar por fuera del límite del instrumental.

**Search by object name**

**Enter object name(s)** one per row

944  
6144  
30512

**Select ephemeris generator:**

- CADC only
- JPL Horizons ([Link to the JPL Horizons ephemeris generator](#))
- Minor Planet Center ([Link to the Minor Planet Center ephemeris generator](#))
- Lowell Observatory ([Link to the Lowell Observatory ephemeris generator](#))
- All of the above

**Date range for search:**

from Date 1:

to Date 2:

**Positional uncertainty:**  Arcseconds ▾

**Resolve to image extension?:**  Yes  No

**Resolve to X,Y?:**  Yes  No

**Show telescope/instrument list**

**Search by name** **Clear form** **Show example**

**Figura 3.5:** Ventana de búsqueda de SSOIS.

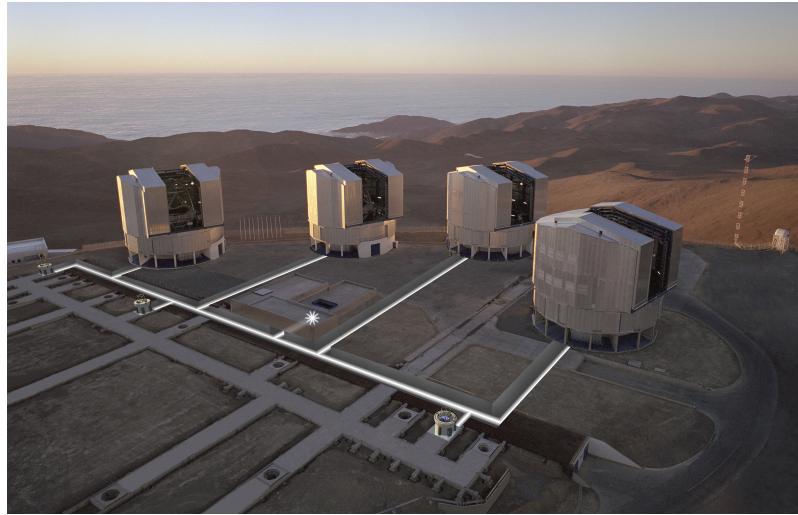
### 3.3.2. Instrumental utilizado

Luego de realizar la búsqueda de objetos en las bases mencionadas anteriormente, se logró descargar un conjunto de imágenes del VLT que fueron procesadas con efectividad.

El VLT es un conjunto de telescopios europeos pertenecientes al ESO, ubicado en Cerro Paranal, Chile, Latitud 24° 40' S, a 2635 m s. n. m (figura 3.6).

Está compuesto de cuatro Telescopios Unitarios (UT, Unit Telescopes) con espejo primario de 8.2 metros de diámetro, más cuatro Telescopios Auxiliares (AT, Auxiliary Telescopes) móviles, de 1.8 metros de diámetro. Los telescopios pueden funcionar conjunta o individualmente.

Las imágenes utilizadas en este trabajo fueron obtenidas con los telesco-



**Figura 3.6:** Very Large Telescope, ESO.

pios UT individualmente, con el instrumento FOcal Reducer and low dispersion Spectrograph (FORS) (Appenzeller et al. 1998). Existen dos versiones de FORS: FORS1 y FORS2. Este instrumento funciona en el rango de 330 nm a 1100 nm y provee imágenes con una escala de placa de 0.25 "/pixel. FORS posee una variedad de filtros. Para nuestro trabajo se seleccionaron imágenes obtenidas en los filtros V, R e I.

### 3.3.3. ACOs y AAs presentes en imágenes del VO

Utilizando las imágenes descargadas del observatorio virtual, específicamente del VLT, se pudieron obtener los perfiles de brillo de 20 ACOs y cuatro AAs.

La tabla 3.6 muestra un listado de estos objetos, para las diferentes fechas, que abarcan 22 turnos entre los años 2000 y 2018.

En dicha tabla, todos los objetos que aparecen son ACOs, con excepción de 133P, 311P, 324P y 331P que son asteroides activados.

Las imágenes obtenidas correspondían a diferentes proyectos para observar estos objetos de nuestro interés, que dieron lugar a los siguientes trabajos: Romon-Martin et al. (2002), Doressoundiram et al. (2005), Lorin y Rousselot (2007), DeMeo et al. (2008), Belskaya et al. (2010) y Tozzi et al. (2012). Para la mayoría de los objetos no se encontraron publicaciones asociadas.

**Tabla 3.6:** Objetos observados con el VLT por fecha.

Fecha	Objetos
09/2000	29981
02/2001	63252
06/2001	8405
08/2002	29981
03/2003	55576
03/2004	95626
04/2007	85490
07/2007	83982, 133P
09/2007	196256
02/2008	10199, 120061
09/2008	250112, 281371, 527443
11/2008	2007 VH <sub>305</sub>
11/2010	145486
04/2011	52872
04/2015	324P
12/2015	331P
08/2016	311P
09/2016	60558
10/2016	60558
11/2016	2016 US <sub>109</sub>
08/2017	2017 MZ <sub>4</sub>
08/2018	2018 AS <sub>18</sub>

## 3.4. Dark Energy Survey

El Dark Energy Survey (DES) es un trabajo de colaboración internacional que tiene como objetivo mapear cientos de millones de galaxias, detectar miles de supernovas y encontrar patrones de estructura cósmica que puedan revelar la naturaleza de la energía oscura que está acelerando la expansión del universo.

Este proyecto comenzó a tomar imágenes en los cielos del hemisferio sur el 31 de agosto de 2013.

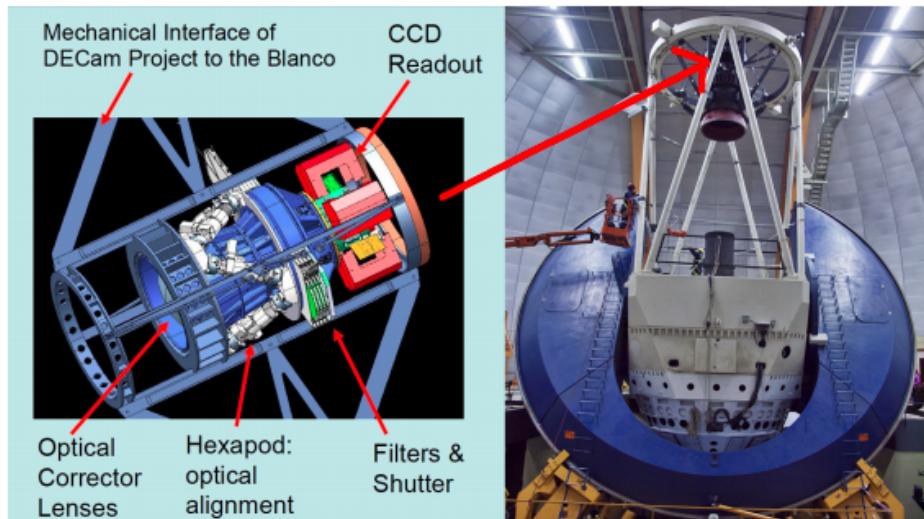
Más de 400 científicos de más de 25 instituciones de Estados Unidos, España, Reino Unido, Brasil, Alemania, Suiza y Australia trabajan en el proyecto. El instrumento utilizado es una cámara digital de 570 megapíxeles extremadamente sensible, DECam (figura 3.7), y se encuentra en el telescopio Blanco de 4 metros del Cerro Tololo Inter-American Observatory (CTIO) en Chile (figura 3.8). Los datos del instrumental se resumen en la tabla 3.7.

**Tabla 3.7:** Telescopio Blanco + DECam.

Latitud	30° 10' 11" S
Altura	2200 m s. n. m.
Telescopio	Reflector 4 m
CCD	DECam
Tamaño de cada detector	2048 px × 4096 px
Tamaño angular	8.98 ' × 17.95 '
Escala de placa	0.263 " /pixel

DECam es una cámara de campo grande, diseñada y construída por la colaboración DES. Aproximadamente el 30 % del tiempo de observación anual de DECam se dedicó exclusivamente a la ejecución del proyecto DES. El resto del tiempo estuvo disponible para uso comunitario. Si bien el fin del proyecto era otro, esta cámara también ha servido para el descubrimiento de objetos del Sistema Solar, como satélites y TNOs (Banda-Huarca, 2020).

Las imágenes de DES fueron tomadas durante 758 noches, a lo largo de seis años, registrándose información de 300 millones de galaxias, en un total de 5000 grados cuadrados de cielo, en cinco filtros ópticos (g, r, i, z, e Y).



**Figura 3.7:** Izquierda: esquema de DECam, con la disposición de la agrupación de CCD, lentes ópticas y filtros. Derecha: telescopio Blanco de 4 m. La flecha roja indica el foco principal, donde se colocó DECam. Figura 2.2 de Banda-Huarca (2020), con imágenes obtenidas de: <http://www.ctio.noao.edu/>.



**Figura 3.8:** Cerro Tololo Inter-American Observatory, CTIO.

### 3.4.1. Proyecto colaborativo con imágenes de DES

En Septiembre de 2020 se presentó una propuesta de proyecto de colaboración externa, contando con el apoyo de Julio Camargo, Martin Banda-Huarca y Luiz Nicolaci da Costa (ON/LIneA) como DES Sponsors. La propuesta fue aceptada en Noviembre de 2020 y el trabajo con las imágenes de DES comenzó a principios del 2021.

Se proporcionó la lista de ACOs y AAs a estudiar a los sponsors de DES, quienes generaron una búsqueda de estos objetos en la base de datos de imágenes. Para esto utilizaron el servicio SkyBoT, que identifica todos los objetos conocidos del Sistema Solar en imágenes astronómicas. El resultado de una consulta es un archivo que contiene información de los objetos identificados (una línea por objeto).

Se obtuvieron un total de 3374 imágenes que contenían las coordenadas de 195 objetos diferentes de nuestra lista. En esta búsqueda de imágenes no se tomó en cuenta la magnitud del objeto, por lo que muchas veces si bien las coordenadas del mismo estaban dentro del campo, este no era detectable ya que excedía el límite del instrumental. Tampoco hubo restricciones respecto a la anomalía verdadera del objeto.

De acuerdo a Banda-Huarca ([2020](#)), la magnitud límite es de 22.9 en el filtro r. Teniendo en cuenta este número se clasificaron los objetos de acuerdo a su magnitud en:

- Muy probablemente detectables si  $V \leq 22$  (97 objetos).
- Potencialmente detectables si  $22 < V \leq 25$  (85 objetos).
- Muy probablemente indetectables si  $V > 25$  (13 objetos).

# Capítulo 4

## Procesamiento de datos

En este capítulo se presentan en detalle los procedimientos llevados a cabo para el procesamiento de las imágenes obtenidas con los diferentes telescopios.

La sección 4.1 describe los pasos para generar los perfiles de brillo de los objetos, realizados a todos los conjuntos de imágenes, así como el cálculo de la magnitud aparente de ACOs y AAs, la sección 4.2 detalla el estudio de la magnitud reducida de los objetos, y por último la sección 4.3 explica el procedimiento seguido para obtener las curvas de luz de los ACOs observados con los telescopios del IAC.

### 4.1. Perfiles de brillo

El método que se utilizó durante este trabajo es similar al descrito por Luu (1992), en cuyo trabajo se estudiaron 11 NEAs, y consiste en la comparación de los perfiles superficiales de brillo de asteroides con los de estrellas presentes en el campo. Esto permite detectar una coma cometaria, a través del ensanchamiento del perfil del objeto con respecto al de la estrella. Este método fue utilizado por Martino et al. (2019) para el estudio de ACOs y AAs, permitiendo detectar actividad en los objetos P/2015 PD<sub>229</sub> ISON-Cameron y 288P.

Para realizar el procesamiento de las imágenes se partió de un conjunto de scripts en Unix C-shell (csh), Python y MatLab, desarrollados por Gonzalo Tancredi, y se trabajó para actualizarlos, unificarlos y automatizar lo más posible el proceso, reduciendo los tiempos de ejecución.

Se generó entonces un nuevo conjunto de scripts en Python que realizan las diversas tareas que se detallan a continuación. Los perfiles de brillo y el cálculo

de la magnitud del objeto se continúan realizando en MatLab, con scripts que fueron optimizados.

Todos los programas pueden encontrarse en el repositorio de GitLab `data_reduction` (ver Apéndice 1).

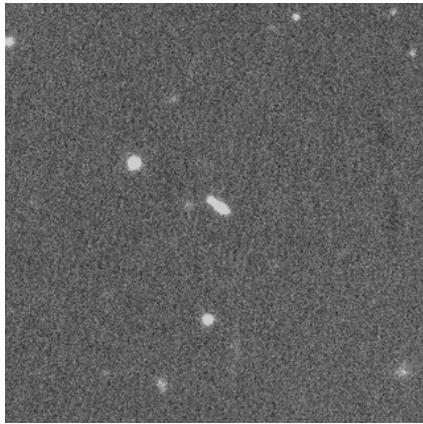
### Pre procesamiento

- Se generan las imágenes de calibración `Zero.fits`, `Dark.fits` y `Flat.fits`, combinando las imágenes bias, dark y flat obtenidas cada noche.
- Se genera una lista con todas las imágenes a calibrar para cada noche de observación.
- Se calibran las imágenes de ciencia.

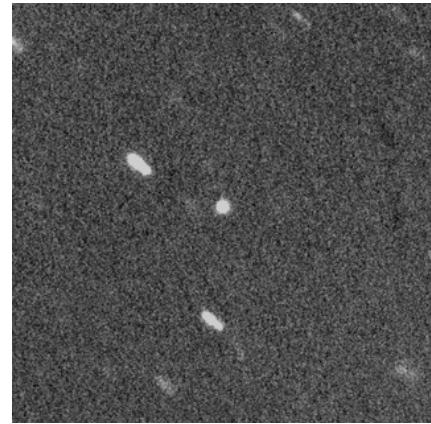
### Procesamiento

- Se actualizan las bases de datos de asteroides y cometas, descargándolas de la web del MPC.
- Se remueven los rayos cósmicos presentes en las imágenes, utilizando el algoritmo LA-Cosmic (van Dokkum, 2001), implementado en el paquete `cosmic.py`.
- Para los objetos que cuentan con una o dos secuencias de imágenes, estas son alineadas. De cada conjunto, se selecciona una imagen de referencia (generalmente la del medio de la secuencia).
- Se realiza la astrometría utilizando rutinas de Astrometry.net (Lang et al. 2010). Astronomy.net es una “máquina astrométrica” diseñada para crear metadatos astrométricos de imágenes astronómicas. Se obtienen así los coeficientes del World Coordinate System (WCS, ver por ejemplo Calabretta y Greisen, 2002) para realizar la transformación entre coordenadas en píxeles y coordenadas astronómicas (ascensión recta y declinación).
- Se alinea la secuencia de imágenes sobre las estrellas, respecto a la imagen de referencia utilizando el paquete `alipy`.
- Con las imágenes alineadas sobre las estrellas, se genera una imagen suma (figura 4.1).
- Se calcula la velocidad de movimiento del objeto en la imagen, para luego realizar un shift de las imágenes alineadas, de manera de alinear ahora sobre el objeto.

- Con las imágenes alineadas sobre el objeto, se genera una nueva imagen suma (figura 4.2).



**Figura 4.1:** Imagen alineada sobre las estrellas (el objeto 90572 se ve como un trazo).



**Figura 4.2:** Imagen alineada sobre el objeto 90572 (las estrellas se ven como trazos).

## Pre fotometría

- Se convierten las tablas fits generadas en la resolución de placa con astrometry.net a un formato legible con MatLab.
- Se genera un archivo para la búsqueda de estrellas de la imagen en el catálogo UCAC4. De esta manera se obtienen las coordenadas ecuatoriales de cada estrella, así como su magnitud de catálogo (que será utilizada para la calibración fotométrica), la cual es cercana a un Johnson V.
- Se calculan las efemérides del objeto para la fecha, nuevamente utilizando el servicio de efemérides del JPL-Horizons.
- Se realiza la transformación de las coordenadas ecuatoriales del objeto a coordenadas en píxeles, mediante `rd2xy` de astrometry.net. De esta manera, se obtiene automáticamente la posición del objeto en la imagen.

## Perfiles fotométricos

Los perfiles fotométricos se realizan utilizando los scripts de MatLab desarrollados previamente, a los cuales se les realizaron modificaciones para lograr mejores ajustes a los datos, calcular errores y estimar la calidad de los perfiles. Pueden encontrarse en el repositorio GitLab `photometry` (ver Apéndice 1). A continuación se presenta una descripción detallada de lo que realizan estos programas.

- Se cargan los datos de las estrellas obtenidos en la pre fotometría (coordenadas ecuatoriales y en píxeles, magnitud de catálogo, tamaño de la imagen, etc.), así como las coordenadas del objeto.
- Se remueven las estrellas cercanas a los bordes, y con valores de flujo próximos a la saturación.
- Se identifican cuáles estrellas presentes en la imagen están también en el catálogo.
- Se realiza un ajuste entre los valores de flujo de las estrellas coincidentes, y sus valores de catálogo.
- Se realiza una estimación del seeing ajustando los valores de flujo de las estrellas con una función Moffat (ecuación 4.1). Esta función es la que mejor ajusta a los perfiles estelares ya que otros ajustes, como por ejemplo con curvas gaussianas, han arrojado peores resultados (Moffat, 1969).

$$f(r) = \frac{C}{\left(1 + \left(\frac{r}{\alpha}\right)^2\right)^\beta} \quad (4.1)$$

Donde la constante C está relacionada con la intensidad de la estrella y está determinada por la normalización, y  $\alpha$  y  $\beta$  definen la forma de la función.

- Se selecciona un conjunto de estrellas coincidentes, que no estén saturadas ni se encuentren cerca de otras estrellas, y se obtiene el valor de flujo por pixel en función de la distancia al centroide (calculado previamente con la función `centroid`).
- Los datos normalizados del conjunto de estrellas seleccionadas son ajustados con una función Moffat.
- Se obtiene el valor de flujo en función de la distancia al centroide para el objeto (a partir de la imagen sumada sobre este) y se grafica superpuesto al perfil de las estrellas.
- El perfil del objeto también se ajusta con una función Moffat, ya que si el mismo no presenta actividad es indistinguible de un perfil estelar. Para algunos casos en que no es posible realizar este ajuste, debido a que el objeto se encuentra próximo a una estrella y el brillo de este podría estar contaminado, se realiza un ajuste por valores medios. Este consiste en tomar anillos concéntricos, centrados en el centroide del objeto, con

ancho 1 píxel, y se calcula el flujo promedio para cada anillo. Se le da prioridad al ajuste Moffat por considerarse que da una curva suave y es la mejor función que ajusta para los perfiles.

- Los perfiles contienen barras de error que se computan de la siguiente manera: se toma la diferencia en el eje  $y$  entre el valor del flujo y el ajuste y se calcula el promedio cuadrático de esos valores en intervalos de 1 píxel ( $\sigma$ ). De esta manera, la longitud de la barra de error es de  $2\sigma$  ( $\pm\sigma$ ). Estas barras son utilizadas para definir un criterio de desviación del perfil del objeto respecto al estelar: se considerará que ésto ocurre si las barras del objeto caen por encima del ajuste de las estrellas, típicamente para distancias de 1.5 a 3 veces el Full Width at Half Maximum (FWHM), donde generalmente se observa la máxima separación entre curvas activas y perfiles estelares.

### Cálculo de la magnitud del objeto

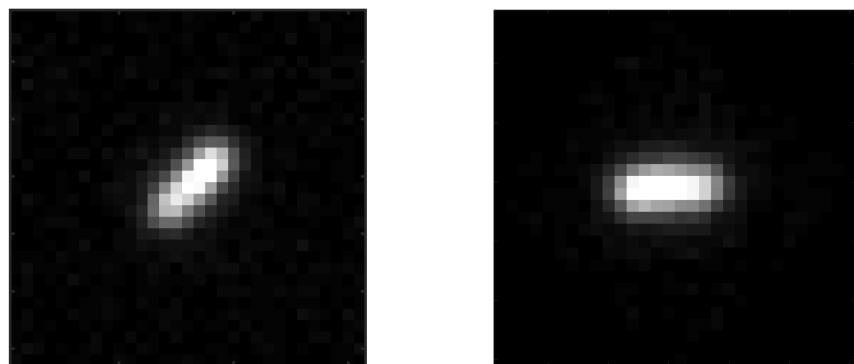
- Se realiza un ajuste entre los valores de flujo obtenidos experimentalmente de las estrellas presentes en el campo, coincidentes con las estrellas de catálogo (UCAC4), y las magnitudes de catálogo, calculando el ‘zeropoint magnitude’ como el promedio de los offset entre la magnitud instrumental medida y la magnitud fotométrica (el número de estrellas varía dependiendo de la imagen, previamente se descartan estrellas cuasi-saturadas, cercanas a otras o cercanas a los bordes de la imagen). El error se calcula como la desviación estándar de la diferencia entre el valor estimado y el de catálogo. Con el zeropoint magnitude determinado, se calcula la magnitud del objeto a partir de la magnitud instrumental. Esta metodología no incluye una corrección por color, lo que podría traer una diferencia en la estimación del zeropoint. Esta corrección color se debería hacer en cada uno de las observaciones, tomando en cuenta el instrumental que se utilizó para cada una de las observaciones (filtro + CCD) y los colores de las estrellas usadas en la calibración. Consideramos que para el objetivo de nuestro estudio, que es detectar grandes variaciones de brillo respecto a la magnitud esperada, esta corrección no es necesaria, ya que diferencias de una magnitud no podrían explicarse únicamente por la corrección de color.
- El error en la magnitud se computa como la suma cuadrática de dos errores: el error del zeropoint magnitude y el error en la señal,  $\delta m =$

$2.5 \log_{10} \left( \frac{1}{SNR} + 1 \right)$ , donde  $SNR$  es la relación señal-ruido (del inglés Signal-to-Noise ratio).

El proceso completo detallado anteriormente es realizado para las imágenes obtenidas con el IMPACTON. En el caso de las imágenes de los telescopios del IAC, del VO y las del DES, estas ya se encuentran calibradas por bias, flat y dark, por lo que no se realiza el pre procesamiento. Las imágenes provistas del centauro 2020 MK<sub>4</sub> también presentaban reducción básica, pero además habían sido alineadas y sumadas sobre el objeto y las estrellas.

Por otra parte, de los datos obtenidos del VO y del DES, no se cuenta con secuencias de imágenes, si no con imágenes individuales (generalmente con largos tiempos de exposición) por lo tanto no se realiza el proceso de alineado y suma, sino que se trabaja directamente con cada imagen. Los tiempos de exposición largos pueden generar que los objetos queden registrados en las imágenes como trazas. Para estos casos la obtención del perfil del objeto es diferente y se detalla a continuación.

- A partir del cálculo de efemérides del objeto se obtienen los valores de desplazamiento en ascensión recta y declinación y se realiza una rotación de manera de que la traza quede horizontal en la imagen (figura 4.3).
- Se calcula el promedio del flujo por filas y a partir de estos valores se realiza el cálculo del centroide.
- Se calculan las distancias de los valores obtenidos al centroide y para estas distancias se grafican los valores de flujo normalizados, superpuestos a los perfiles de las estrellas.



**Figura 4.3:** Ejemplo de una imagen original (izquierda) y rotada (derecha).

## 4.2. Magnitud reducida

La magnitud reducida se define como la magnitud que tendría un objeto con distancia heliocéntrica  $r = 1$ , distancia geocéntrica  $\Delta = 1$  y ángulo de fase  $\alpha = 0$  (la magnitud absoluta se obtiene a partir de varias medidas de magnitud reducida). Su estudio permite encontrar cambios de brillo a lo largo de la órbita de los objetos, que sirven como indicadores de actividad cometaria. Si un objeto presenta un episodio de actividad, su brillo aumenta y su magnitud reducida disminuye, por lo que resulta útil para detectar estos cambios en el brillo, generar gráficos de magnitud reducida en función de distancia heliocéntrica, con los datos fotométricos disponibles. Este tipo de procedimiento fue seguido por Tancredi et al. (2000) y Tancredi et al. (2006) para estudiar las magnitudes nucleares de cometas de la familia de Júpiter, por Tancredi (2014) para el estudio de ACOs, y por Martino et al. (2019) para el estudio de ACOs y AAs. En este último trabajo, se encontró una disminución en la magnitud reducida de 288P dos meses antes de los primeros reportes de actividad (Hsieh et al. 2017), lo que indicaría que esta ya había comenzado, aunque no fuera posible detectar una coma a través del estudio de los perfiles de brillo.

Este procedimiento consiste en realizar gráficos de magnitud reducida en función de la distancia heliocéntrica, utilizando un gran número de datos. Para esto se utilizan los reportes de magnitudes de diferentes observadores que están disponibles en la base de datos del MPC. A estos datos además, se les agregan los obtenidos del telescopio IMPACTON, los telescopios del IAC y el VO.

El procesamiento de los datos se realiza con scripts en Python que se encuentran disponibles en el repositorio GitLab `magni` (Apéndice 1), mientras que los gráficos se realizan en MatLab. A continuación se describe el procedimiento seguido.

- Se descarga la base de datos de observaciones de asteroides y cometas, del MPC, donde cada observación de cada objeto representa una línea en la tabla descargada (20 GB de datos aproximadamente).
- Se extraen de esa tabla los datos de todos los ACOs y de los AAs que fueron monitoreados durante el proyecto y se guardan en archivos individuales para cada objeto.
- Para cada observación de cada objeto, se generan efemérides con el servicio JPL-Horizons. Si las coordenadas ecuatoriales obtenidas por las

efemérides son cercanas a las reportadas por los observadores se selecciona la observación, si no, se descarta.

- De las efemérides se obtiene la distancia heliocéntrica ( $r$ ), distancia geocéntrica ( $\Delta$ ) y ángulo de fase ( $\alpha$ ) para cada observación y se extraen la magnitud aparente, el filtro y el código del observatorio de la tabla del MPC.
- Se clasifican las observaciones, indicando si pertenecen o no a grandes surveys (identificados por su código de observatorio, ver listado de grandes surveys en tabla 4.1).
- Las magnitudes aparentes son reducidas por distancia heliocéntrica, distancia geocéntrica y ángulo de fase, considerando un coeficiente de fase  $\beta = 0.04 \text{ mag/deg}$ , de acuerdo a las ecuaciones 4.2 y 4.3 (Jewitt y Luu, 1989).

$$m(1, 1, \alpha) = m(r, \Delta, \alpha) - 5\log(r\Delta) \quad (4.2)$$

$$m(1, 1, 0) = m(1, 1, \alpha) - \beta\alpha \quad (4.3)$$

- Se aplican las correcciones de color correspondientes para llevar todo a una misma banda V (ver tabla 4.2, Tonry et al. 2012, González-Fernández et al. 2017, Jordi et al. 2006, Sesar et al. 2011 y Tonry et al. 2018).
- Se grafica la magnitud reducida en función de la distancia heliocéntrica para cada objeto.

A las observaciones del MPC se le agregan los valores de magnitudes obtenidos con nuestras observaciones, a las que se le realizan también las correcciones por distancia heliocéntrica, geocéntrica y ángulo de fase.

Este tipo de análisis permite acceder a datos de los objetos que cubren diferentes partes de su órbita, lo que no sería viable de realizar con un solo observador. Una vez realizados los gráficos se buscan diferencias significativas entre las magnitudes calculadas y la media reportada, que no puedan ser explicadas por otros factores. La rotación del objeto genera una amplitud máxima en magnitud ( $A_{max}$ ) de acuerdo a la ecuación 4.4, donde  $a$  y  $b$  son los ejes del objeto. Por ejemplo, una relación de ejes 1:5 generaría una amplitud máxima de 1.75 magnitudes.

$$A_{max} = 2.5 \log \frac{a}{b} \quad (4.4)$$

Además, se busca que haya más de un reporte de este tipo, que se corresponda con varias noches de observación o diferentes observadores.

**Tabla 4.1:** Grandes surveys.

Código	Survey
291	LPL/Spacewatch II
566	Haleakala-NEAT/GEODSS
644	Near-Earth Asteroid Tracking
691	Spacewatch
699	LONEOS
703	Catalina Sky Survey
704	Lincoln Laboratory ETS
E12	Siding Spring Survey
F51	Pan-STARRS 1
F52	Pan-STARRS 2
G96	Mount Lemmon Survey
T05	ATLAS-HKO
T08	ATLAS-MLO

**Tabla 4.2:** Corrección de color.

Color	Conversión	Filtro
V - B	-0.65	Johnson-Coussins
V - R	+0.36	Johnson-Coussins
V - C	+0.40	Johnson-Coussins
V - I	+0.70	Johnson-Coussins
V - g	-0.21	Pan-STARRS
V - r	+0.19	Pan-STARRS
V - i	+0.28	Pan-STARRS
V - w	+0.11	Pan-STARRS
V - Z	+0.89	VISTA
V - Y	+1.03	VISTA
V - J	+1.21	VISTA
V - H	+1.48	VISTA
V - K	+1.56	VISTA
V - G	+0.22	Gaia
V - L	-0.19	LINEAR
V - c	-0.01	ATLAS
V - o	+0.23	ATLAS

## 4.3. Curvas de luz

En esta sección se describe la herramienta utilizada para la obtención de curvas de luz (Photometry Pipeline), y el procedimiento para obtener el período de rotación.

### 4.3.1. Photometry pipeline

El análisis de las curvas de luz se realizó en las imágenes de los telescopios del IAC.

Para el procesamiento se utilizó la herramienta Photometry Pipeline (PP) de Mommert (2017). Se trata de un software open-source basado en Python, para análisis fotométrico, específicamente diseñado para telescopios pequeños y medianos, que utiliza Sextractor (Bertin y Arnouts, 1996) y SCAMP (Bertin, 2006).

La astrometría y fotometría realizada requiere la coincidencia de estrellas del campo con catálogos que son consultados online. La calibración fotométrica tiene una precisión  $\leq 0.03$  mag y la astrométrica  $\leq 0.3$  segundos de arco.

Si bien se aclara que el pipeline puede ser utilizado para cualquier tipo de datos su diseño ha sido realizado principalmente para la observación de asteroides.

PP puede funcionar de manera automática (llamando a la función `pp_run`) o semi-automática, llamando a un conjunto de scripts de Python por separado.

El programa genera por defecto mucha información de diagnóstico en cada ejecución, que documenta cada paso del análisis de las imágenes y es guardada automáticamente en un directorio `diagnostics`. Además es generado un archivo de texto con un log.

A continuación se presenta resumidamente el paso a paso que realiza el programa, describiendo cada función. Para un análisis más detallado se puede consultar el trabajo de Mommert o la web de PP.

#### Preparación

La tarea `pp_prepare` requiere configurar varios parámetros del header de las imágenes en el archivo de configuración llamado `mytelescopes.py`, como ser: fecha y hora, escala de placa, binneado, código del observatorio, filtros utilizados, etc.

Al ejecutarla, identifica el instrumento utilizado y modifica los keywords necesarios en el header a un formato común independiente del instrumento, además de insertar información WCS en el header.

## Registro

`pp_register` utiliza SCAMP para registrar las imágenes basado en la información WCS insertada; se obtiene una solución de placa para cada imagen. Luego utiliza SExtractor para generar un catálogo de fuentes en la imagen. La extracción de fuentes es realizada mediante una función `pp_extract` automáticamente.

Tanto SCAMP como SExtractor son llamados directamente por PP, sin interacción del usuario.

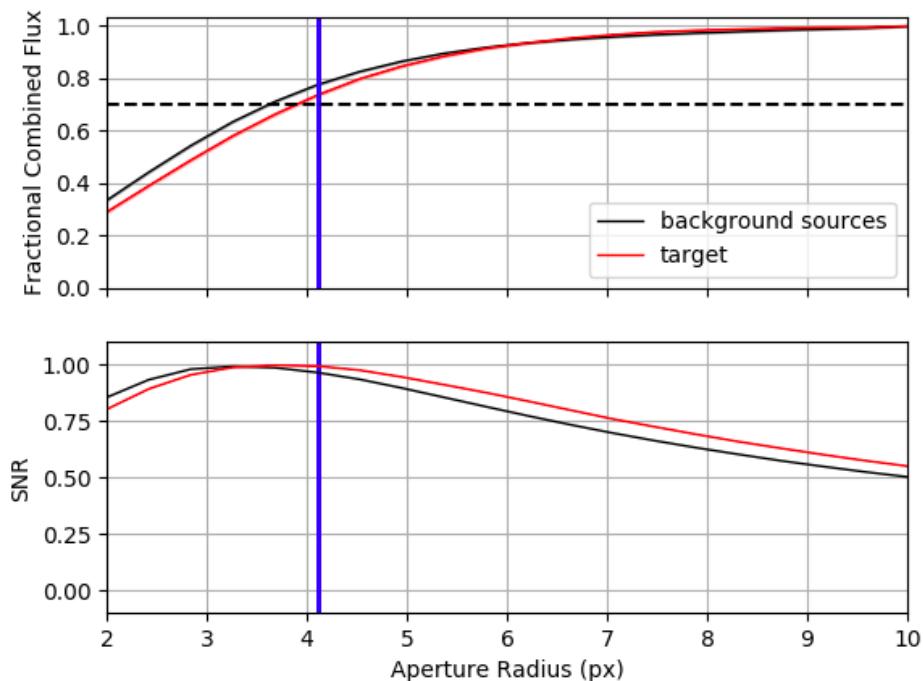
SCAMP realiza el ajuste del catálogo generado con catálogos astrométricos del servicio VizieR (Ochsenbein et al. 1996), entre los que se encuentran Gaia DR1 (Gaia Collaboration et al. 2016), USNO-B1 (Monet et al. 2002) y 2MASS (Skrutskie et al. 2006).

## Fotometría

`pp_photometry` utiliza las magnitudes instrumentales obtenidas de SExtractor. El radio de apertura óptimo se calcula usando análisis de curva de crecimiento (Howell, 2000). `pp_extract` es el encargado de medir el flujo y la incertidumbre para cada fuente usando diferentes radios de apertura. Se generan gráficos que son guardados dentro de la información de diagnóstico (ejemplos de estos gráficos son mostrados en la figura 4.4).

PP utiliza el siguiente criterio para determinar el radio de apertura de la fotometría: se selecciona el menor radio de apertura en el que se incluya por lo menos el 70 % del total del flujo del objeto (target) y del flujo de las estrellas de background. Además, la diferencia entre los flujos normalizados del target y background debe ser menor que el 5 %. De esta manera se obtiene una cantidad suficiente de flujo maximizando la SNR.

Existen otras maneras de fijar el radio de la apertura. Se puede hacer manualmente o también pedir que el radio maximice la SNR en el target o en las estrellas de background. Para esto es necesario realizar el procedimiento semi-automático.



**Figura 4.4:** Ejemplo de gráficas de curva de crecimiento realizadas por PP. Arriba: flujo promedio normalizado en función de la apertura para el target (línea roja) y para las fuentes de background (línea negra). Abajo: SNR normalizada en función de la apertura, también para target y background. La línea punteada horizontal indica el 70 % del flujo y la línea vertical azul, el radio adoptado como óptimo.

## Calibración

`pp_calibrate` calibra fotométricamente las magnitudes instrumentales, determinando la magnitud zeropoint al comparar el brillo de las estrellas en la imagen con las de catálogo, ignorando estrellas quasi-saturadas o con grandes incertidumbres fotométricas. Varios catálogos son utilizados para esta tarea, entre los que se encuentran el Sloan Digital Sky Survey Data Release 9 (SDSS-R9, Ahn et al. 2012) y el AAVSO Photometric All-Sky Survey Release 9 (APASS9, Henden et al. 2016). Al menos tres estrellas son necesarias para la calibración fotométrica; si esto no se alcanza, se reportan las magnitudes instrumentales.

## Identificación manual

La función `pp_manident` se utiliza cuando el target no tiene un identificador o no se lograron obtener las posiciones automáticamente. El objeto se identifica manualmente en cada imagen (en general es suficiente seleccionarlo

en unas pocas imágenes y luego la trayectoria se calcula con una función spline). Al terminar la identificación se genera un archivo **positions.dat** con las posiciones del objeto en cada imagen, que será usado de input para la función **pp\_distill**.

### Identificación y extracción del target

**pp\_distill** extrae información del objeto seleccionado, de los archivos generados con las tareas anteriores.

Para cada target se genera un archivo con datos de la fotometría así como información de diagnóstico. Además, **pp\_distill** elige automáticamente una estrella de control bastante brillante, presente en la imagen, a la que se le aplica el mismo tratamiento que al target; esta estrella sirve para verificar la consistencia de la magnitud zeropoint.

Como resultados se obtienen archivos **.dat** con las posiciones, magnitudes instrumentales y calibradas, con su error, junto con otra información complementaria, tanto del target como de una estrella de control; también se obtienen tablas ASCII con información del target y un archivo **diagnostics.html** que resume los resultados.

Los datos fotométricos deben ser luego corregidos por tiempo luz y distancia. Para esto se utilizó un script Python desarrollado por Javier Licandro, que realiza los siguientes pasos:

- Lee el archivo **.dat** obtenido con PP.
- Extrae la magnitud aparente y el día juliano.
- Calcula las efemérides del objeto para cada fecha, utilizando el servicio de JPL-Horizons.
- Corrige por tiempo luz y por distancia heliocéntrica, geocéntrica y ángulo de fase.

El resultado final es un archivo **.txt** con los datos fotométricos corregidos.

#### 4.3.2. Obtención del período de rotación

A continuación se trabajó con MatLab para obtener el período de rotación del objeto observado y generar la curva de fase rotacional.

Para cálculo del periodograma se utilizó la función `plomb`. Esta función devuelve la estimación de densidad espectral de potencia (PSD, Power Spectral Density) de Lomb-Scargle. El periodograma Lomb-Scargle (Lomb, 1976 y Scargle, 1982) es un algoritmo para detectar y caracterizar señales periódicas en datos muestreados de manera desigual, con amplio uso dentro de la comunidad astronómica. Es un método que permite el cálculo eficiente de un estimador de espectro de potencia tipo Fourier a partir de dichos datos muestreados de manera desigual, y determinar el período de oscilación (VanderPlas, 2018).

Para obtener la curva de fase rotacional se realizan los siguientes pasos:

- Búsqueda de períodos entre 0.1 horas y 10 días utilizando la función `plomb`.
- Se obtiene el máximo valor de la PSD, y el correspondiente valor de frecuencia, que se convierte a período.
- Se transforman los valores de tiempo a fase, entre 0 y 1.
- Se generan las curvas de fase rotacional para cada noche. Estas son graficadas independientemente y superpuestas.

Según VanderPlas (2018), para períodos derivados del periodograma Lomb-Scargle, las incertidumbres no pueden expresarse como estamos habituados y los errores derivados del ancho del pico en el periodograma deben ser evitados; una cantidad más relevante para expresar la incertidumbre en los resultados del periodograma viene de la altura del pico, en comparación con la altura de los picos de fondo.

# Capítulo 5

## Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos durante el trabajo, organizados en secciones correspondientes a los perfiles de brillo (sección 5.1), el estudio de la magnitud reducida (sección 5.2) y la realización de la curva de luz para los datos del IAC (sección 5.3).

### 5.1. Perfiles de brillo de ACOs y AAs

Se obtuvieron un total de 415 perfiles de brillo de 140 objetos estudiados, ya que muchos de los objetos se observaron en diferentes fechas, obteniendo así varios perfiles por objeto. La tabla 5.1 muestra la cantidad de ACOs y AAs de los que se pudo obtener un perfil de brillo superficial bien definido, y la calidad de éstos. La calidad depende de las condiciones de observación y la SNR del objeto y se adoptaron los siguientes valores para definirla: un perfil se considera de calidad alta si la desviación media no excede 5 % del flujo normalizado, de calidad media si está entre 5 y 10 % y de calidad baja si supera el 10 %. Para el cálculo de la desviación media se selecciona un rango de píxeles (medidos desde el centroide del objeto), típicamente entre 4 y 8, siendo ajustados estos valores de acuerdo al seeing de la noche. Se destaca que se considera que un objeto tuvo calidad alta si hay al menos un perfil de esta calidad, media si el mejor perfil es de esta calidad y baja si solamente hay perfiles de esta calidad. En el caso de los perfiles en los que el objeto aparecía en la imagen en una traza no se realizaron cálculos de calidad, por contarse con pocos valores de intensidad para realizar un ajuste; aparecen en la tabla 5.1 como “Trazas”.

La tabla 5.2 muestra la cantidad de ACOs y AAs con al menos un perfil,

discriminada por instrumento (en este caso, en los totales no se consideran los objetos que fueron estudiados en más de un instrumento). Por último la tabla 5.3 detalla la cantidad y porcentaje de ACOs según tipo (de acuerdo al criterio usado). En estas dos tablas se adicionaron los datos obtenidos en el proyecto llevado a cabo durante la licenciatura, donde se trabajó con observaciones del IMPACTON de los años 2015 y 2016; los objetos estudiados en el marco de esta tesis son los que figuran entre paréntesis.

**Tabla 5.1:** Resumen de perfiles obtenidos.

	ACOs	Perfiles	AAs	Perfiles
Calidad alta	53	158	1	4
Calidad media	38	90	4	7
Calidad baja	34	126	2	4
Trazas	8	24	0	0
Total	133	388	7	15

**Tabla 5.2:** Resumen de objetos por instrumento, acumulado con el trabajo de licenciatura (entre paréntesis los objetos estudiados en esta tesis).

	OASI	IAC	VO	DES	Total*
ACOs	62 (33)	5	20	85	160 (133)
AAs	5 (2)	0	4	4	9 (7)
Total	67 (35)	5	24	89	169 (140)

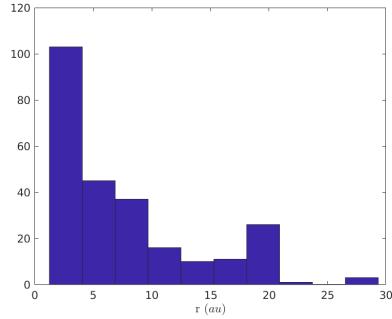
\* No se consideran los objetos que fueron observados por más de un instrumento.

**Tabla 5.3:** ACOs observados según tipo, acumulando con el trabajo de licenciatura (entre paréntesis los objetos estudiados en esta tesis).

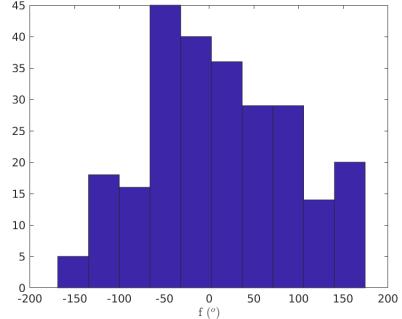
Tipo de ACO	Cantidad	Porcentaje
AJF	92 (68)	24.0 %
AHO	18 (17)	15.7 %
AC	50 (48)	23.8 %
Total	160 (133)	22.7 %

Las figuras 5.1 y 5.2 muestran histogramas de distancia heliocéntrica ( $r$ ) y anomalía verdadera ( $f$ ) al momento de la observación, respectivamente, para los ACOs. En el Apéndice 2 se puede ver la lista completa de objetos reducidos, la fecha de la observación, su distancia geocéntrica y heliocéntrica, ángulo de fase y anomalía verdadera al momento de la observación.

A continuación se presentan algunos ejemplos de los perfiles obtenidos. Los perfiles que requirieron un análisis posterior son presentados en la sección 6.

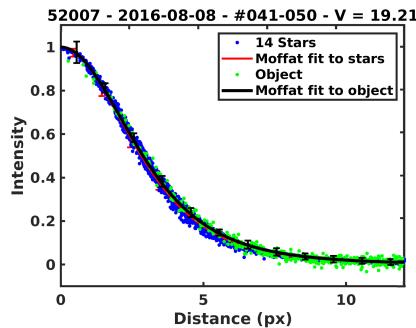


**Figura 5.1:** Histograma de distancias heliocéntricas.

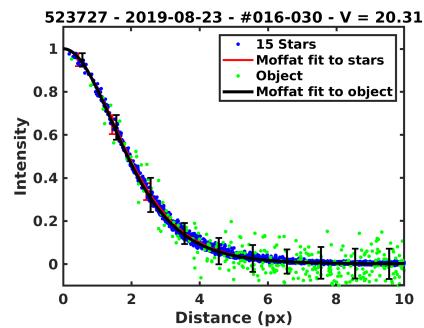


**Figura 5.2:** Histograma de anomalías verdaderas.

Allí se incluyen también los resultados para el centauro 2020 MK<sub>4</sub>. Los gráficos de todos los objetos pueden encontrarse en el Apéndice 3. Las figuras 5.3, 5.4 y 5.5 muestran ejemplos de calidad alta, media y baja, respectivamente. La figura 5.6, un ejemplo de perfil de un objeto que aparecía como traza en las imágenes. Las figuras 5.7 y 5.8, ejemplos de un objeto claramente activo y un objeto con indicios de actividad; un caso sin actividad es el de la figura 5.3.



**Figura 5.3:** Perfil con calidad alta.



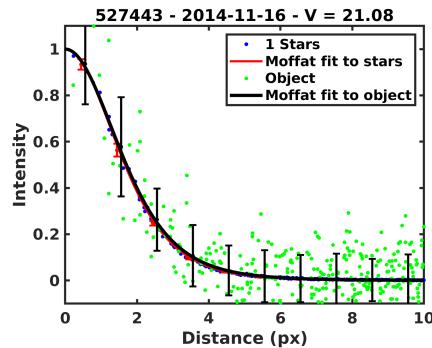
**Figura 5.4:** Perfil con calidad media.

En los gráficos pueden verse: los valores de intensidad normalizada de cada píxel desde el centroide, para una o varias estrellas (puntos azules); el ajuste Moffat de las estrellas (línea roja); los valores de intensidad normalizada de cada píxel desde el centroide del objeto (puntos verdes) y el ajuste Moffat o por valores medios (línea negra). Las barras de error rojas corresponden a las estrellas, mientras que las negras al objeto, y fueron calculadas a partir de la dispersión de los valores de flujo respecto al ajuste (procedimiento detallado en capítulo 4). Nótese que se introdujo un pequeño desplazamiento artificial en la posición de las barras para que no se superpongan. En el encabezado de la imagen puede verse el nombre del objeto, la fecha, el rango de imágenes (si

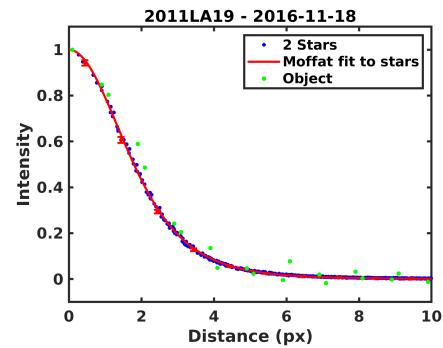
corresponde), número de imagen u hora (imágenes del VLT) y la magnitud calculada.

En los casos en que el objeto aparece como una traza se graficaron los valores de intensidad de este superpuestos al perfil de las estrellas con su ajuste Moffat.

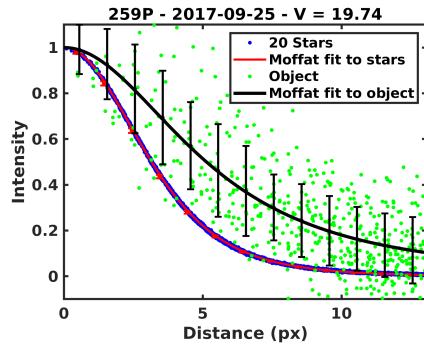
Hay que tener en cuenta que si bien los datos tienen diferentes calidades, dependiendo principalmente del brillo del objeto, todos los objetos deberían presentar un perfil Moffat similar al estelar independientemente de la dispersión de los datos, a menos que presenten actividad.



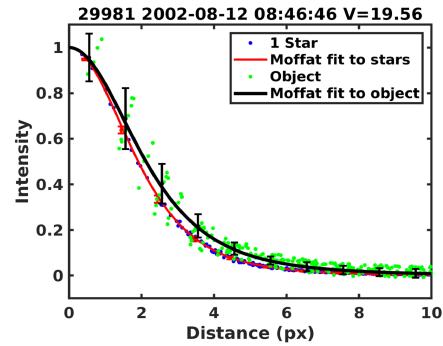
**Figura 5.5:** Perfil con calidad baja.



**Figura 5.6:** Perfil de una traza.



**Figura 5.7:** Perfil de un objeto con actividad clara.



**Figura 5.8:** Perfil con indicios de actividad.

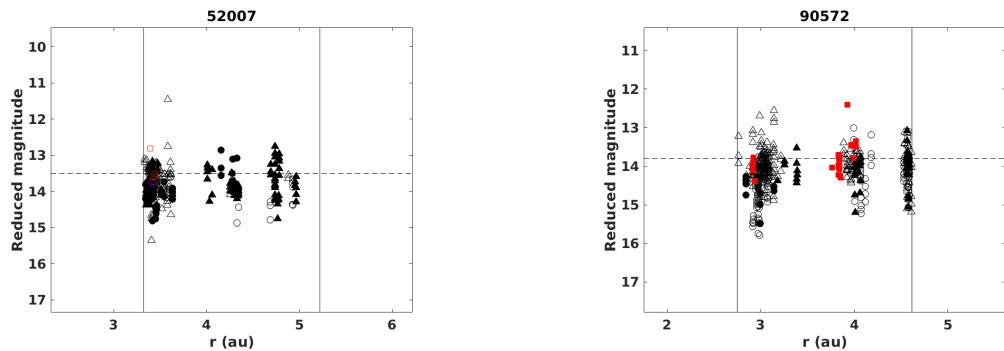
## 5.2. Estudio de la magnitud reducida

Se realizaron gráficos de magnitud reducida en función de la distancia heliocéntrica, para todos los ACOs de la lista y para los AAs observados durante este proyecto, en donde se incluyeron todos los datos de observaciones fotométricas reportadas al MPC. A estos datos se adicionaron además las

magnitudes calculadas a partir de las imágenes obtenidas con los diferentes telescopios.

En las figuras 5.9 y 5.10 se pueden ver dos ejemplos de gráficas de ACOs y AAs respectivamente. Todas las gráficas de los objetos observados durante este trabajo pueden encontrarse en el Apéndice 4.

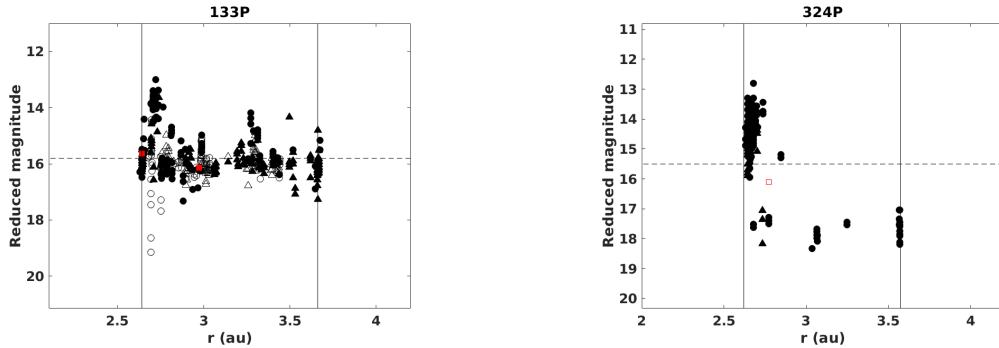
En las gráficas, la línea vertical de la izquierda indica la distancia perihélica del objeto; en algunos casos también se grafica una línea vertical a la derecha, indicando la distancia afélica (como en los ejemplos de la figura 5.9). La línea horizontal punteada muestra la magnitud absoluta que figura en el MPC y es tomada como referencia para estudiar las desviaciones que puedan presentar los objetos. Los símbolos vacíos corresponden con objetos que fueron observados antes de su pasaje por el perihelio ( $f > 180^\circ$ ), mientras que los llenos hacen lo mismo para objetos que ya pasaron por el perihelio ( $f < 180^\circ$ ). Los datos graficados con triángulos corresponden a grandes surveys. Los círculos negros corresponden a las observaciones del MPC, los cuadrados azules a las observaciones realizadas con el telescopio IMPACTON en los años 2015 y 2016, y los cuadrados rojos a los datos obtenidos en éste trabajo. Cabe destacar que las escalas son diferentes para cada imagen, ya que se ajustan a los valores de los datos de cada objeto.



**Figura 5.9:** Magnitud reducida en función de la distancia heliocéntrica para los ACOs 52007 (izquierda) y 90572 (derecha).

### 5.3. Curvas de luz

Utilizando la herramienta Photometry Pipeline se trabajó con datos de cinco ACOs: 6144, 30512, 52007, 145485, 494667. En la tabla 5.4 se muestran los datos de las observaciones: fecha de observación, cantidad de imágenes



**Figura 5.10:** Magnitud reducida para los AAs 133P (izquierda) y 324P (derecha).

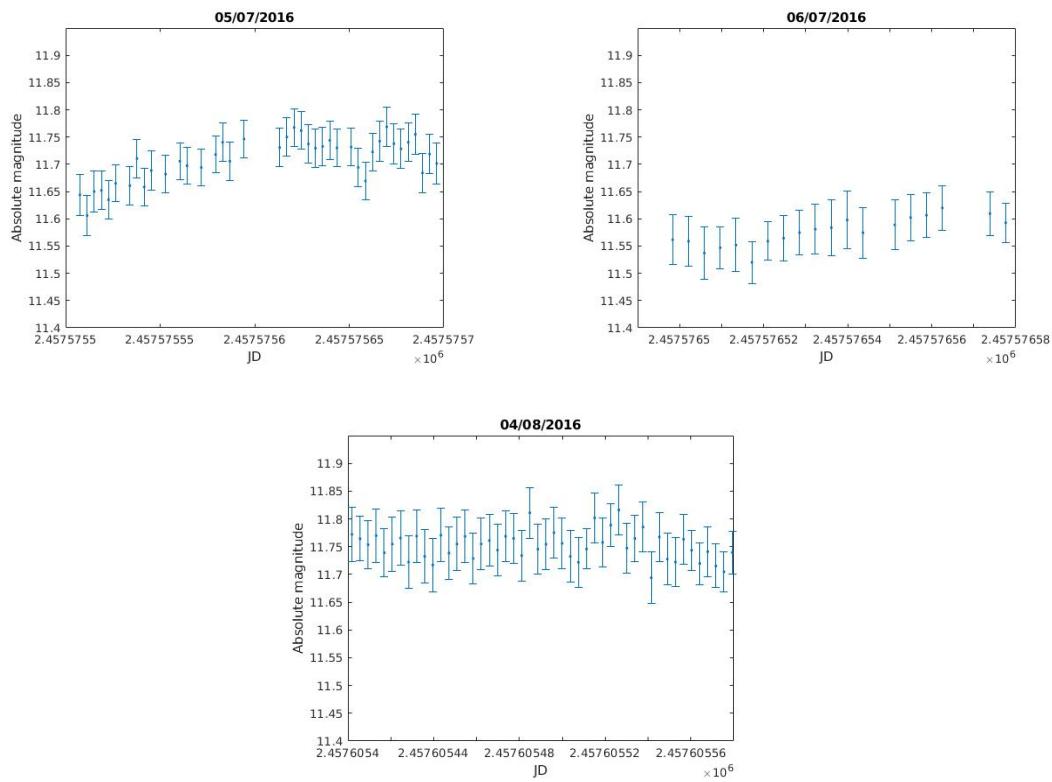
procesadas, tiempo de exposición ( $t_{exp}$ ), elongación ( $E$ ) y ángulo de fase ( $\alpha$ ). De éstos, 52007 y 494667 fueron observados con el telescopio JKT y los restantes con el IAC80. En los casos de 145485 y 494667 se llegó a determinar los períodos de rotación a partir de la curva de luz. En todos los casos, luego de obtenidos los datos fotométricos estos fueron corregidos para obtener la magnitud absoluta del objeto para cada imagen y se realizaron las curvas de luz para cada noche. En los casos en los que se obtuvo un período de rotación a través del análisis del periodograma, se realizó la curva de fase rotacional. Las siguientes subsecciones presentan los resultados obtenidos para cada objeto.

**Tabla 5.4:** Observaciones de los objetos 6144, 30512, 52007, 145485 y 494667.

Objeto	Fecha	Imágenes	$t_{exp}$ (seg)	$E$	$\alpha$
6144	05/07/2016	40	300	150.9	6.8
	06/07/2016	19	300	152.0	6.5
	04/08/2016	48	300	175.7	1.0
30512	05/07/2016	22	300	122.7	15.8
	07/07/2016	23	300	121.2	16.0
52007	08/08/2016	50	300	115.1	15.4
	28/08/2016	123	180	134.1	12.2
	01/09/2016	65	300	138.1	11.4
	02/09/2016	36	300	139.1	11.1
	08/09/2016	219	120	145.2	9.7
	30/10/2016	16	180	166.7	3.9
	145485	03/11/15	60	300	145.9
494667	04/12/15	53	300	160.7	7.4
	12/07/16	187	60	108.9	34.7
	27/07/16	290	60	115.0	33.6
	26/09/16	223	120	131.4	26.6
	03/10/16	83	180	131.9	26.0

### 5.3.1. 6144

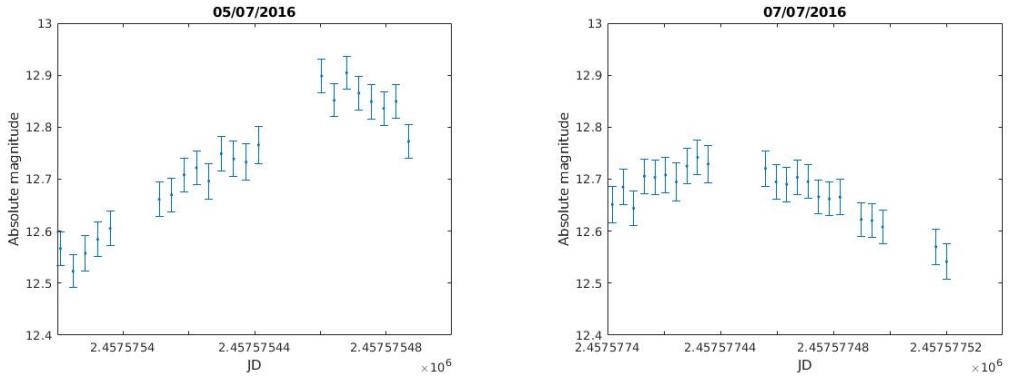
La figura 5.11 muestra la curva de luz para cada noche de observación, con los datos obtenidos del pipeline, incluyendo el error en magnitud. Se grafica la magnitud absoluta en función del tiempo (día juliano). Se puede ver que para este objeto el cambio en magnitud es de apenas 0.2 magnitudes, siendo la dispersión de los datos de 0.1, por lo cual para la cantidad de datos que se tiene no se pudo estimar un período de rotación.



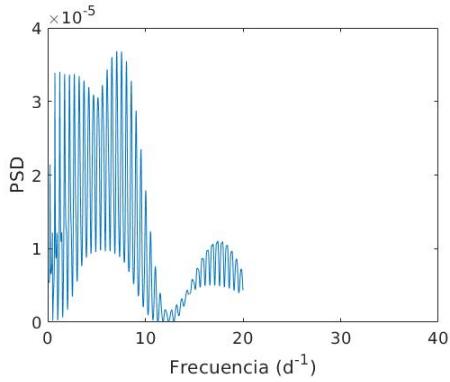
**Figura 5.11:** Magnitud absoluta en función del tiempo para cada noche, objeto 6144.

### 5.3.2. 30512

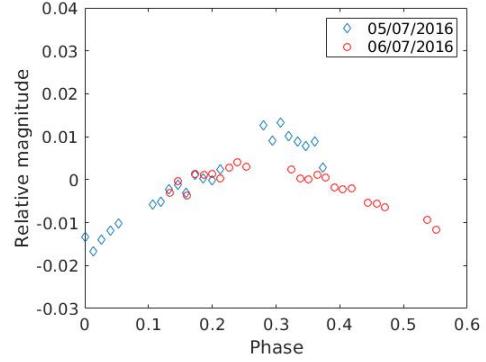
La figura 5.12 muestra la curva de luz para cada noche. Para este objeto no se contaba con suficientes datos y si bien del análisis del periodograma (figura 5.13) se logró una estimación de período (del orden de las 6.8 h), la misma fue considerada de baja calidad, ya que se cubrió menos de medio período. La curva de fase rotacional ajustada con este período puede verse en la figura 5.14, donde cada noche aparece representada con un color y símbolo diferente.



**Figura 5.12:** Magnitud absoluta en función del tiempo para cada noche, objeto 30512.



**Figura 5.13:** Periodograma de 30512.



**Figura 5.14:** Curva de fase rotacional.

### 5.3.3. 52007

La figura 5.15 muestra la curva de luz para cada noche. Este objeto presenta también una curva plana, en la que la variación de magnitud para los datos de las seis noches es de apenas 0.15 magnitudes. Al igual que en el caso de 6144, esto no permitió la estimación de un período de rotación.

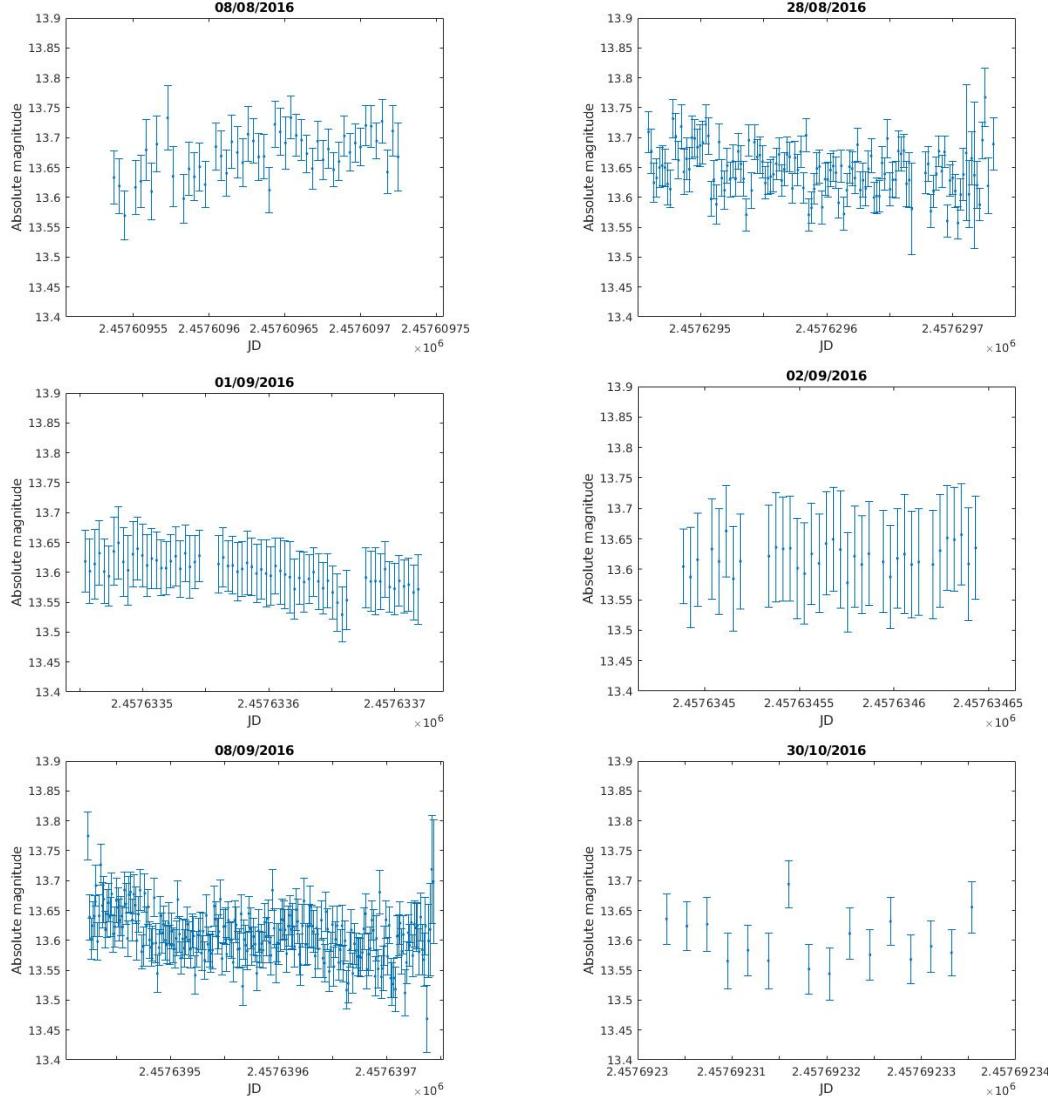
### 5.3.4. 145485

La figura 5.18 muestra la curva de luz para cada noche de observación.

A continuación se realizó el periodograma del cual se obtuvo el período que mejor ajusta los datos de las dos noches (figura 5.16). Al generar el objeto una curva de luz simétrica ocurre que a cada período comprenden dos picos, por lo tanto, el valor del período obtenido con el análisis de Lomb-Scargle es la mitad del período real. El valor obtenido es de 6.82 h , por lo tanto, el período es de

13.64 h.

Con este período se realizó la curva de fase rotacional. La figura 5.17 muestra las dos noches superpuestas (identificadas con un símbolo y color diferente).

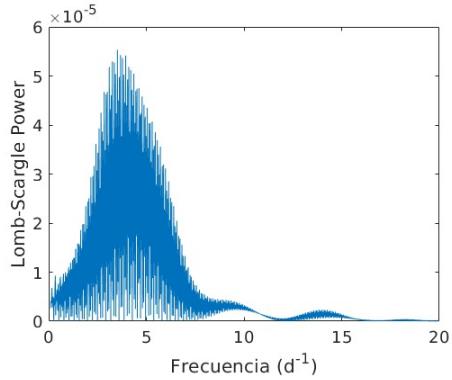


**Figura 5.15:** Magnitud absoluta en función del tiempo para cada noche, objeto 52007.

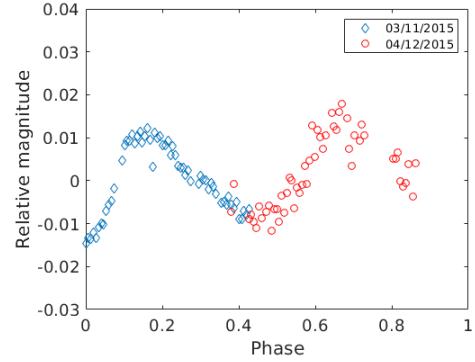
### 5.3.5. 494667

Del análisis del periodograma (figura 5.19) se obtuvo un período de  $P = 8.66$  h con el que se ajustó la curva de fase rotacional, la cual puede verse en las figuras 5.20 y 5.21 (en la primera se grafican las dos noches por separado,

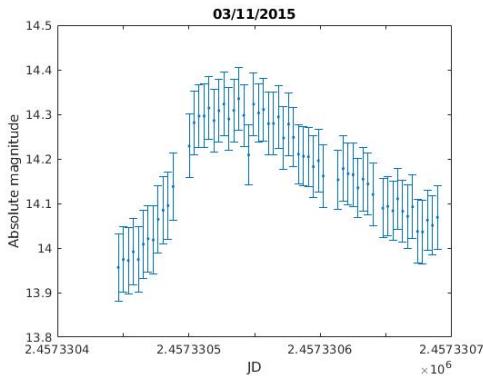
con un desplazamiento artificial en magnitud y en la segunda, superpuestas). En la figura 5.22 se muestra la curva de luz para cada noche.



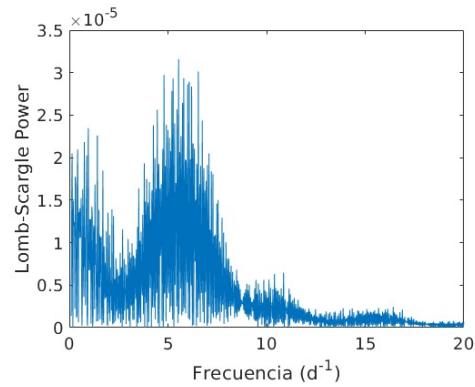
**Figura 5.16:** Periodograma de 145485.



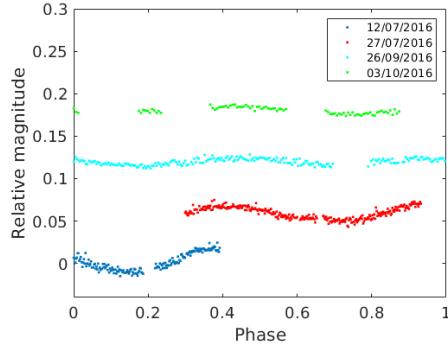
**Figura 5.17:** Curva de fase rotacional.



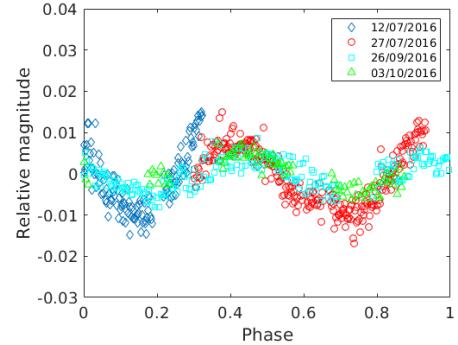
**Figura 5.18:** Magnitud absoluta en función del tiempo para cada noche, objeto 145485.



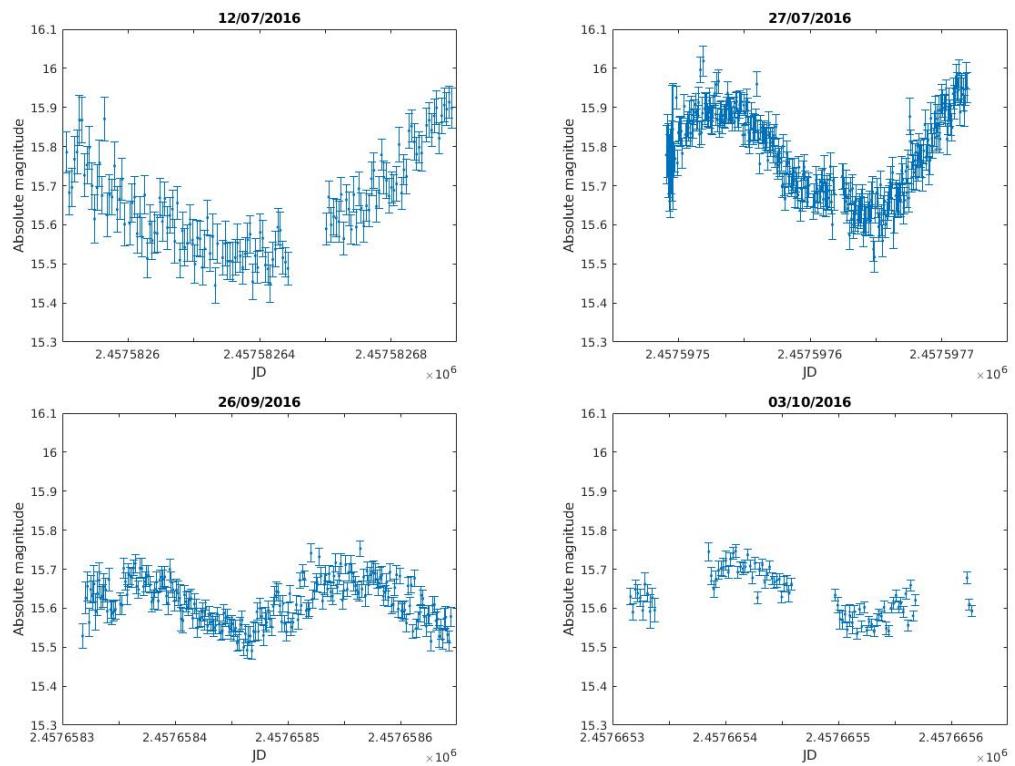
**Figura 5.19:** Periodograma de 494667.



**Figura 5.20:** Curva de fase rotacional de 494667 para las cuatro noches por separado.



**Figura 5.21:** Curva de fase rotacional de 494667 para las cuatro noches superpuestas.



**Figura 5.22:** Magnitud absoluta en función del tiempo para cada noche, objeto 494667.

# Capítulo 6

## Análisis de casos

En este capítulo se presenta un análisis de los casos que consideramos de mayor interés. Todos los perfiles de brillo fueron inspeccionados en busca de desviaciones respecto a un perfil estelar; el análisis de estos objetos puede verse en la sección 6.1. A su vez, las gráficas de magnitud reducida fueron también revisadas para ver si algún objeto presentaba abrillantamiento en algún punto de su órbita, lo que se encuentra detallado en la sección 6.2. Los objetos observados que no pudieron ser detectados en las imágenes, o para los que no se logró un perfil definido son analizados en la sección 6.3. Para los casos donde no se descartó la posibilidad de que el objeto estuviera activo, se realizaron integraciones numéricas hacia el pasado (sección 6.4). Un resumen de los resultados obtenidos a partir de las curvas de luz se puede ver en la sección 6.5.

La tabla 6.1 lista los objetos que presentaron un perfil interesante o alguna desviación en su magnitud reducida, indicando nombre, fecha de observación, telescopio con el que fue observado, magnitud reducida calculada y la magnitud absoluta que figura en el MPC.

### 6.1. Perfiles de brillo

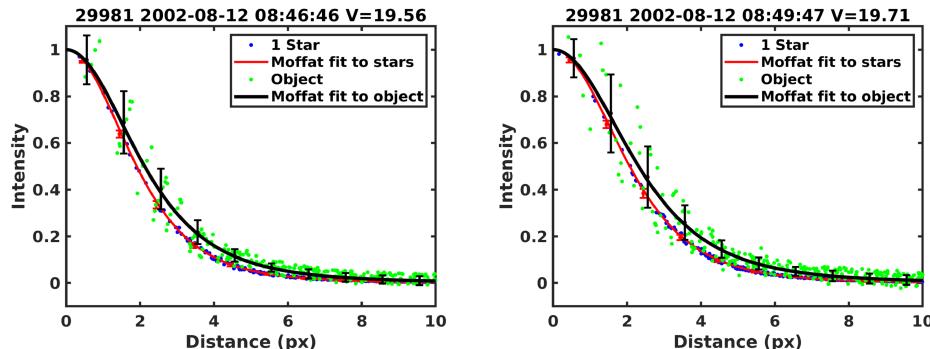
A continuación se presenta un análisis resumido de los perfiles que consideramos de mayor interés. En la subsección 6.1.1 se incluyen los resultados del centauro 2020 MK<sub>4</sub>, observado con los telescopios del IAC.

Para los objetos 29981, 54598, 90572, 515718 y 2015 BK<sub>22</sub> se obtuvo al menos un perfil con desviación, que podría ser indicio de leve actividad co-

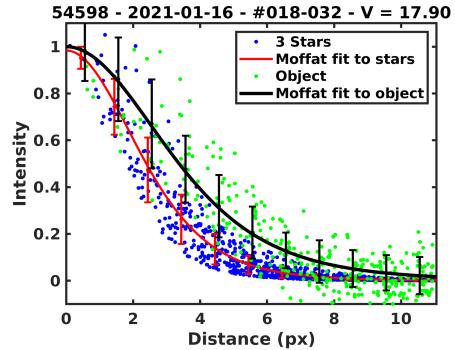
**Tabla 6.1:** Objetos seleccionados.

Objeto	Fecha	Telescopio	Mag. reducida	Mag. absoluta
29981	12/08/2002	VLT	$8.26 \pm 0.02$ $8.41 \pm 0.02$	8.70
54598	16/01/2021	IMPACTON	$6.37 \pm 0.25$	7.50
90572	02/09/2019	IMPACTON	$14.37 \pm 0.11$ $14.39 \pm 0.10$	13.80
499522	28/09/2019	IMPACTON	$6.47 \pm 0.24$	7.60
515718	23/10/2014	DES	$14.24 \pm 0.30$	14.10
2000 CN <sub>152</sub>	29/10/2017	DES	$13.78 \pm 0.11$	14.90
2014 OG <sub>392</sub>	27/11/2018	DES	$10.30 \pm 0.19$	10.80
2014 SS <sub>303</sub>	18/08/2014 29/10/2014	DES DES	$12.35 \pm 0.14$ $12.60 \pm 0.12$	13.90
2015 BK <sub>22</sub>	15/09/2020 09/10/2020 10/10/2020	IMPACTON IMPACTON IMPACTON	$16.08 \pm 0.09$ $16.09 \pm 0.13$ $15.98 \pm 0.27$ $16.04 \pm 0.24$	15.70
2016 YB <sub>13</sub>	25/09/2017	DES	$14.92 \pm 0.18$	15.60
259P	02/09/2017 25/09/2017	DES DES	$17.02 \pm 0.30$ $16.54 \pm 0.29$	18.90
311P	05/09/2013 08/09/2013 11/09/2013 13/09/2013 24/09/2013 29/09/2013	DES DES DES DES DES DES	$17.87 \pm 0.39$ $17.77 \pm 0.56$ $17.63 \pm 0.34$ $17.61 \pm 0.35$ $17.81 \pm 0.41$ $17.21 \pm 0.03$	19.20
P/2015 X <sub>6</sub>	18/11/2015	DES	$17.14 \pm 0.06$ $16.90 \pm 0.57$	16.10

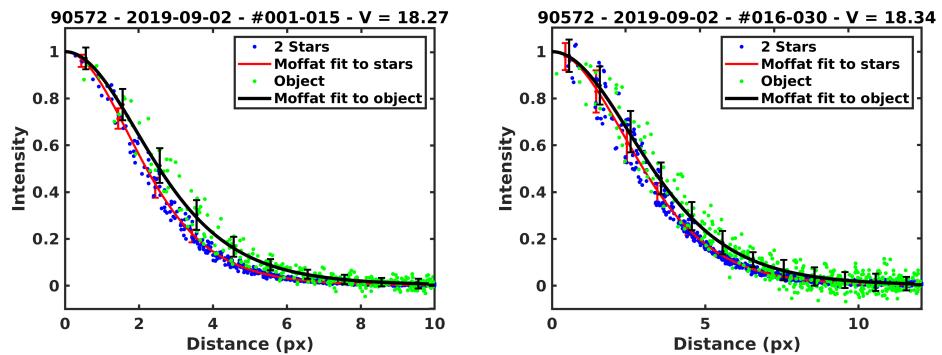
metaria (figuras 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 y 6.5 respectivamente). En el caso de 54598, además, la magnitud reducida se encontraba 1.1 magnitudes más brillante que la media.



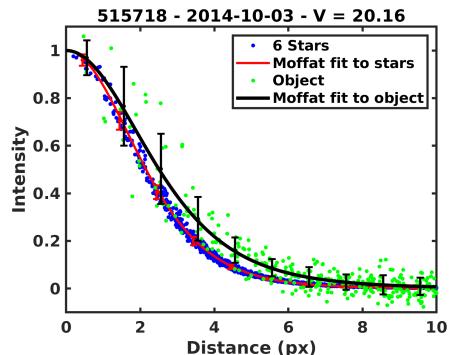
**Figura 6.1:** Perfiles de brillo de 29981.



**Figura 6.2:** Perfil de brillo de 54598.



**Figura 6.3:** Perfiles de brillo de 90572.

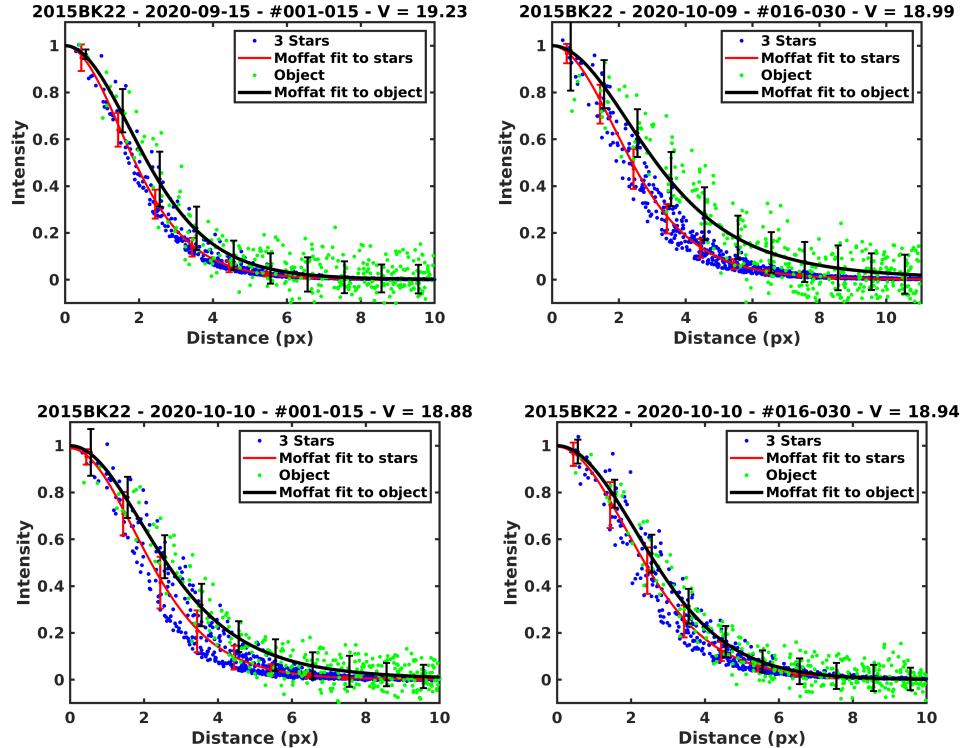


**Figura 6.4:** Perfil de brillo de 515718.

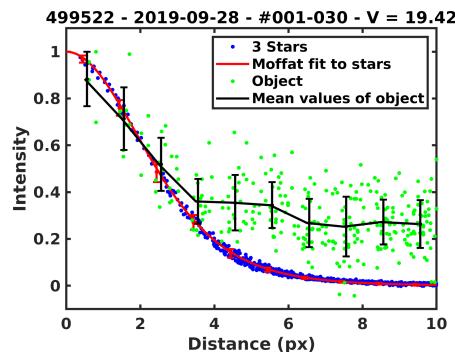
Para el objeto 499522 solamente se obtuvo un perfil de mala calidad (figura 6.6), ya que no se logró una SNR aceptable.

En el caso de 2014 OG<sub>392</sub> se puede ver un perfil con un ensanchamiento considerable, aunque con mucha dispersión (figura 6.7). Se constató que el mismo ya posee la clasificación de cometa. La actividad fue descubierta en imágenes

de archivo de julio y agosto de 2017, y se confirmó con observaciones de agosto de 2019 (Chandler et al. 2020) Nuestros datos correspondían a noviembre de 2018, entre los dos reportes de actividad existentes.



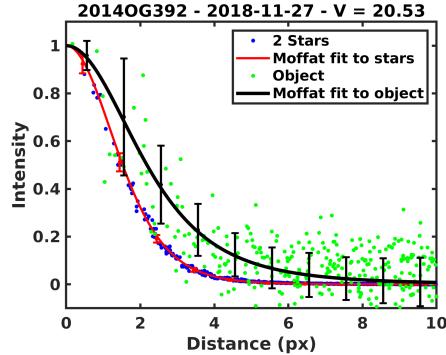
**Figura 6.5:** Perfiles de brillo de 2015 BK<sub>22</sub>.



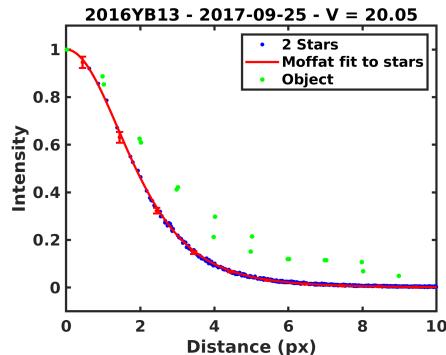
**Figura 6.6:** Perfil de brillo de 499522.

En el caso de 2016 YB<sub>13</sub>, aparecía en las imágenes del DES como una traza y fue analizado obteniéndose el perfil que luce en la figura 6.8, donde los valores de intensidad del objeto aparecen claramente separados del perfil estelar. La

magnitud reducida aparece apenas por debajo de la media, a menos de una magnitud.

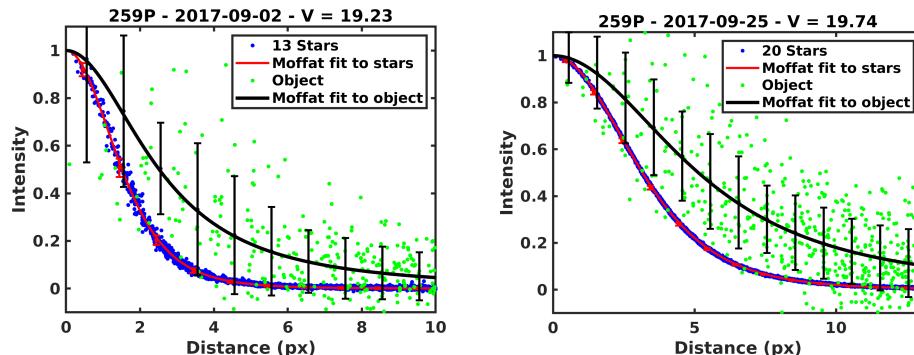


**Figura 6.7:** Perfiles de brillo de 2014 OG<sub>392</sub>.



**Figura 6.8:** Perfil de brillo de 2016 YB<sub>13</sub>

Los restantes perfiles ensanchados corresponden a los asteroides activados 259P, 311P y 2015 X<sub>6</sub>. En todos los casos se pudo comprobar la presencia de actividad (figuras 6.9, 6.10 y 6.11 respectivamente).



**Figura 6.9:** Perfiles de brillo de 259P.

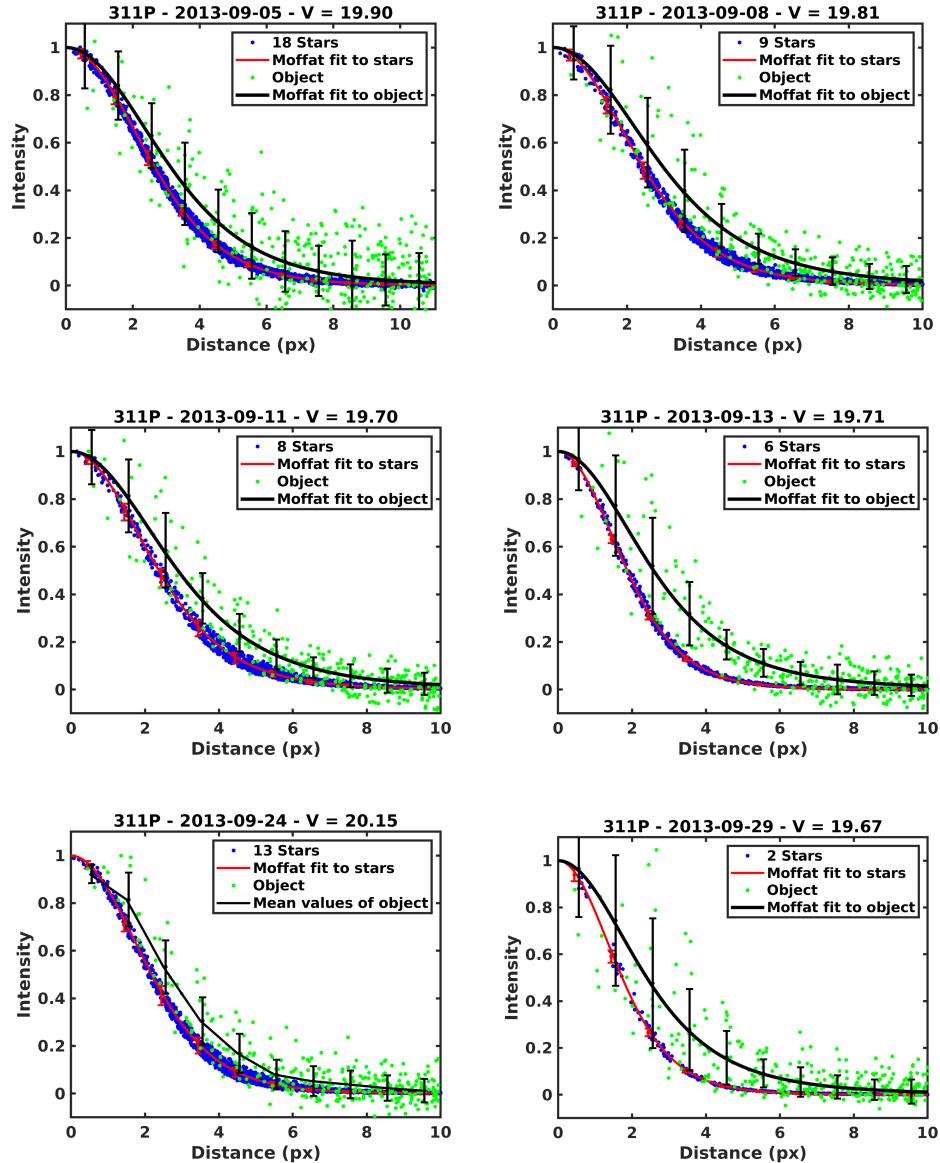


Figura 6.10: Perfiles de brillo de 311P.

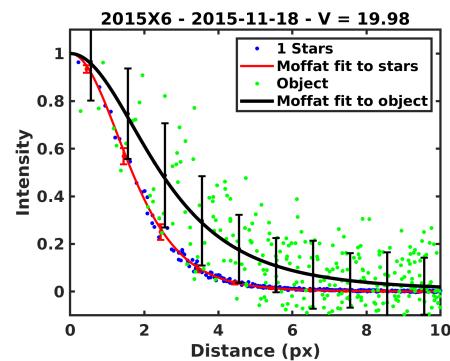


Figura 6.11: Perfil de brillo de P/2015 X6.

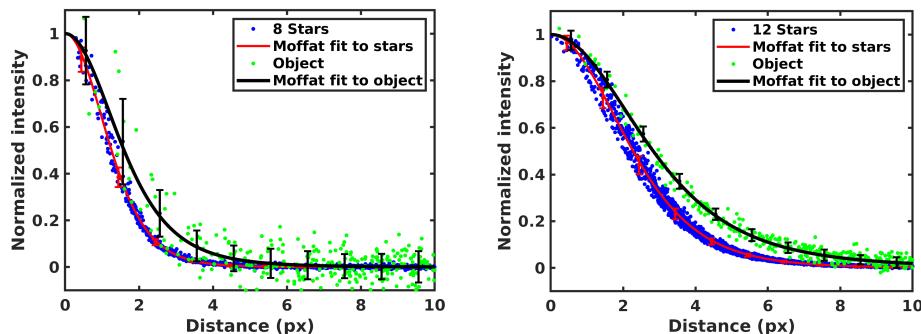
La actividad de 259P y 311P es coincidente con los reportes existentes. En el primer caso, estaba presente en imágenes del DES de setiembre de 2017, momento en que se observó su reactivación (Hsieh et al. 2017). Respecto al segundo también estaba en imágenes del DES, en este caso de setiembre de 2013; en ese mes se obtuvieron los primeros reportes de actividad (Bolin et al. 2013).

Por su parte P/2015 X<sub>6</sub> mostró un perfil ensanchado en imágenes del DES del 18 de noviembre de 2015; los primeros reportes de actividad de este objeto corresponden al 7 de diciembre de 2015 (Tubbiolo et al. 2015).

### 6.1.1. Centauro 2020 MK<sub>4</sub>

Este objeto fue descubierto el 24 de junio de 2020 (Bulger et al. 2020), con una órbita similar en tamaño y forma a la de 29P/Schwassmann-Wachmann 1 (centauro que se mantiene activo), con un semieje  $a = 6.16$  ua, excentricidad  $e = 0.022$  e inclinación  $i = 6.67^\circ$ .

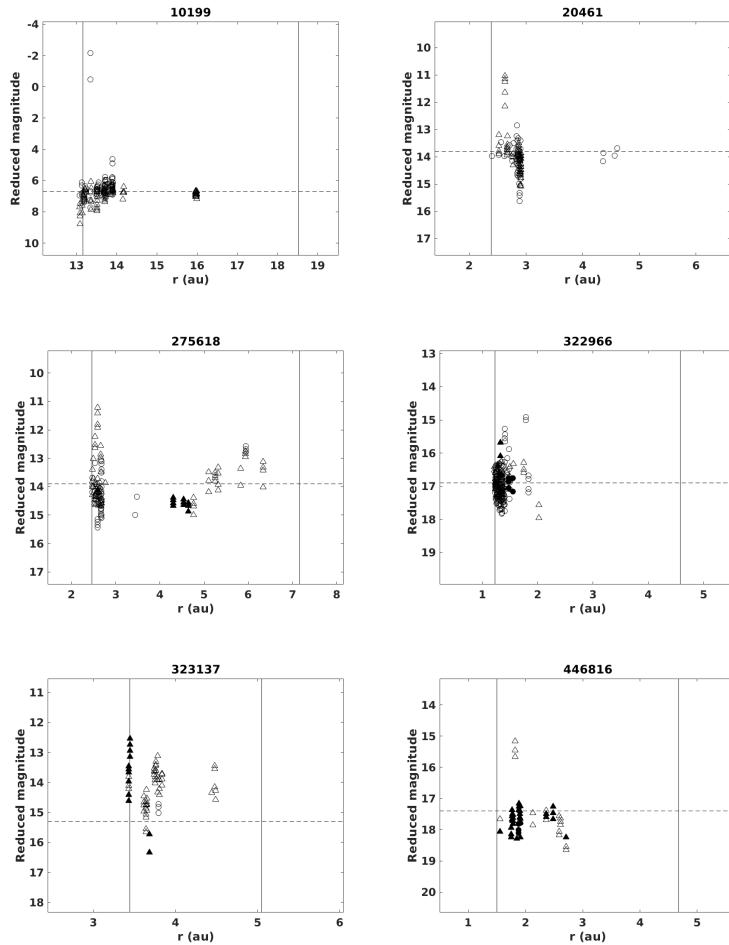
2020 MK<sub>4</sub> fue observado con los telescopios del IAC el 16 y 17 de julio de 2020, cuando se encontraba a una distancia heliocéntrica  $r = 6.23$  ua, distancia geocéntrica  $\Delta = 5.22$  ua y ángulo de fase  $\alpha = 1.3^\circ$ . Se trabajó con imágenes alineadas sobre el objeto y las estrellas y se realizaron los perfiles de brillo (figura 6.12). En el caso del día 16, no se logró una buena SNR para el objeto y el perfil presenta cierta dispersión. El día 17, observándolo con el telescopio JKT se logró mejorar la SNR y el perfil logrado es de muy buena calidad, presentando un ensanchamiento claro. Estos resultados fueron publicados en conjunto con un estudio fotométrico y dinámico del objeto (de la Fuente Marcos et al. 2021). Este trabajo puede encontrarse como anexo a esta tesis.



**Figura 6.12:** Perfiles de brillo de 2020 MK<sub>4</sub> la noche del 16/07/2020 (izquierda) y del 17/07/2020 (derecha).

## 6.2. Magnitud reducida

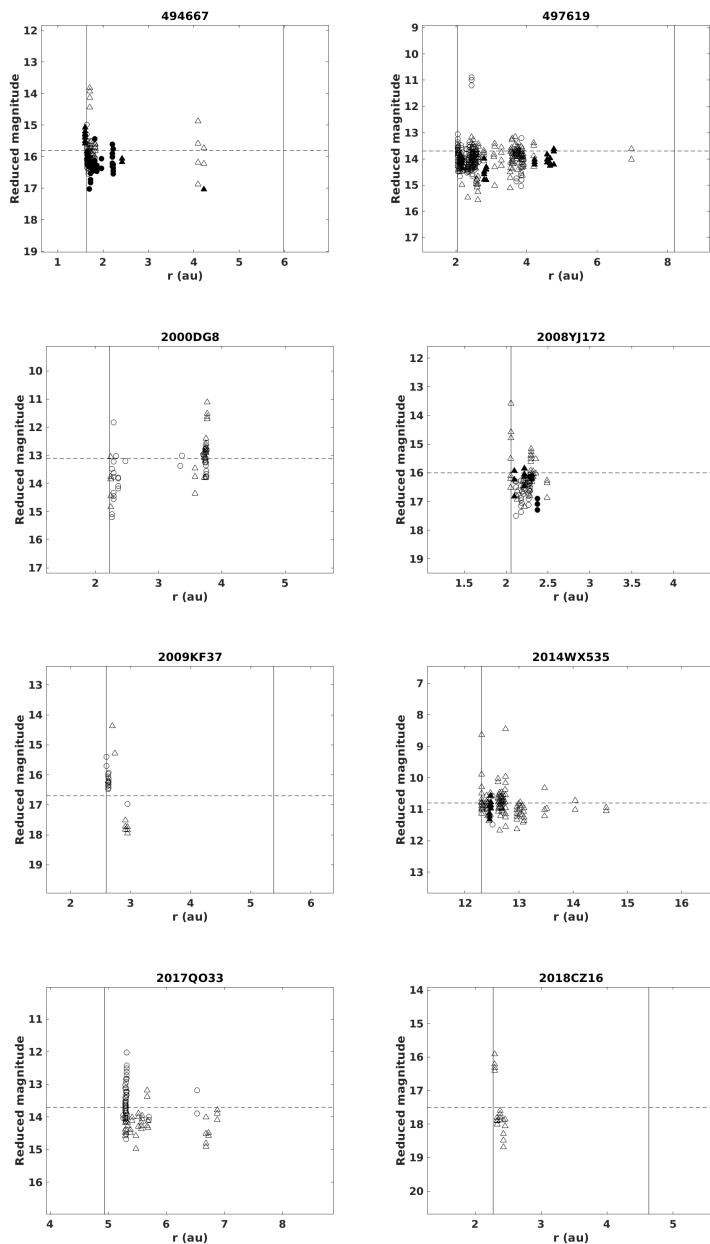
En primer lugar se revisaron los gráficos de magnitud reducida de todos los ACOs de nuestra lista y se separaron los que presentaron más de un reporte con abrillantamiento en los datos del MPC. Estos objetos pueden verse en las figuras 6.13 y 6.14.



**Figura 6.13:** Magnitud reducida en función de la distancia heliocéntrica para los ACOs 10199, 20461, 275618, 322966, 323137 y 446816.

Luego de un análisis de los resultados (inspección visual de los gráficos y revisión de los reportes), se pudo comprobar que de los 14 objetos seleccionados, nueve no presentaban indicios suficientes para considerarse que el objeto haya estado activo, ya que los reportes del MPC en los que el objeto aparecía con abrillantamiento correspondían a un mismo observador y una única noche, además de que en esa misma noche o en noches cercanas, otros observadores (o en algunos casos el mismo) habían reportado magnitudes cercanas a la media.

Fueron entonces descartados los ACOs: 10199, 20461, 446816, 494667, 497619, 2000 DG<sub>8</sub>, 2008 YJ<sub>172</sub> 2014 WX<sub>535</sub> y 2018 CZ<sub>16</sub>. Se presenta un análisis resumido de los restantes objetos. En todos los casos, las magnitudes listadas corresponden a magnitudes corregidas por distancia helio y geocéntrica, así como por ángulo de fase, por lo que son similares a las magnitudes absolutas  $H$  obtenidas del MPC.



**Figura 6.14:** Magnitud reducida en función de la distancia heliocéntrica para los ACOs 494667 497619, 2000 DG<sub>8</sub>, 2008 YJ<sub>172</sub>, 2009 KF<sub>37</sub>, 2014 WX<sub>535</sub>, 2017 QO<sub>33</sub> y 2018 CZ<sub>16</sub>.

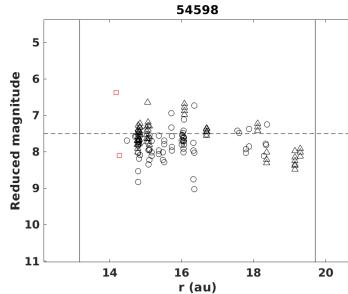
Los objetos 322966, 323137 y 2009 KF<sub>37</sub> presentaron apartamientos significativos de la magnitud absoluta H (que no podrían atribuirse a la rotación del objeto).

En el caso de 322966 los reportes corresponden a un solo observador, no habiendo otros reportes para las mismas fechas, mientras que para 2009 KF<sub>37</sub> se trata de dos reportes de observatorios diferentes, en años diferentes.

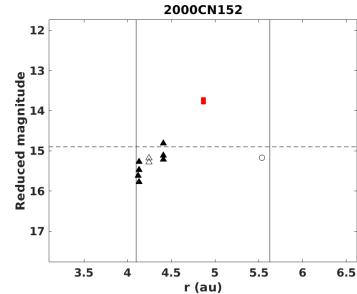
Respecto a 323137 se constató que ya posee la clasificación de cometa, con la denominación 282P. Este objeto, catalogado en un principio como asteroide, pertenece al cinturón externo y posee un parámetro de Tisserand  $T_J = 2.99$ . Fue observado activo en 2013 y se encontró que también tenía actividad en imágenes tomadas en marzo de 2012 (Bolin et al. 2013). De la gráfica de magnitud reducida se pueden ver tres picos de abrillantamiento respecto a la que figura como magnitud media, que corresponden a reportes realizados en los años 2001 (primeras observaciones del objeto), 2003 y 2004. En particular en julio de 2004 se reportaron magnitudes entre 12.54 y 13.14, siendo la magnitud absoluta del objeto  $H = 15.3$ .

Por su parte los objetos 275618 y 2017 QO<sub>33</sub>, si bien presentaban varios reportes del MPC en los que se obtuvo un valor de la magnitud con aumento de brillo, los mismos correspondían a un solo observatorio, cuando otros observadores habían reportado magnitudes próximas a la media para las mismas fechas.

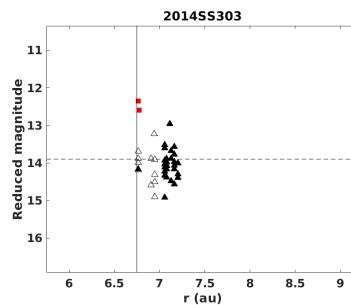
Por otra parte, se revisaron los gráficos en los que se incluyeron las observaciones realizadas durante este trabajo (donde nuestros datos figuran en las gráficas como cuadrados de color rojo). Tres casos se consideraron con apartamiento de la magnitud absoluta del MPC, teniendo en cuenta el error en magnitud calculado: 54598, 2000 CN<sub>512</sub> y 2014 SS<sub>303</sub> (figuras 6.15, 6.16 y 6.17 respectivamente), siendo el único caso que presentó además ensanchamiento del perfil el de 54598. El caso de 2000 CN<sub>512</sub> fue descartado debido a que el objeto se encuentra en el borde de la imagen, lo que puede haber ocasionado distorsión en los valores de flujo obtenidos.



**Figura 6.15:** Magnitud reducida de 54598.



**Figura 6.16:** Magnitud reducida de 2000 CN<sub>152</sub>.



**Figura 6.17:** Magnitud reducida de 2014 SS<sub>303</sub>.

### 6.3. Objetos no reducidos

Algunos de los objetos observados con el telescopio IMPACTON no pudieron ser reducidos efectivamente, esto es, no se logró obtener un perfil definido o no se llegó a registrar la presencia del objeto en las imágenes. La tabla 6.2 lista estos objetos, la fecha de observación, la magnitud estimada por el MPC y el motivo por el cual no se logró un perfil de brillo.

En los casos de 228862, 386968, 434762, 2013 QQ<sub>95</sub>, 2014 OG<sub>392</sub>, 2015 XW<sub>379</sub>, 2017 SW<sub>11</sub> y 331P, los objetos no se logran distinguir en las imágenes, debido a que se encuentran sobre la magnitud límite del instrumental (calculada a partir de la magnitud de completitud para el IMPACTON por Martino, 2017). El hecho de que no estén presentes en las imágenes también es un indicador de que los objetos no estaban activos en el momento de la observación, debido a que si así fuera, deberían tener un aumento en su magnitud.

Para el resto de los objetos, si bien se distinguen en las imágenes, las condiciones de observabilidad no permitieron lograr un perfil de brillo bien definido.

**Tabla 6.2:** Objetos observados con el IMPACTON de los cuales no se obtuvo perfil de brillo. La magnitud listada es la estimada por el MPC.

Objeto	Fecha	Magnitud	Causa
228862	07/04/2021	20.5	No se distingue el objeto.
318875	23/11/2019	20.1	Baja SNR.
386968	09/04/2021	20.2	No se distingue el objeto.
434762	28/09/2019	21.0	No se distingue el objeto.
469442	29/05/2020	20.4	Baja SNR.
472651	27/05/2020	20.4	Pocas imágenes / Baja SNR.
2006 BF <sub>208</sub>	15/12/2020	20.5	Baja SNR.
2006 XL <sub>5</sub>	19/12/2020	20.7	Baja SNR.
2013 QQ <sub>95</sub>	26/08/2019	20.9	No se distingue el objeto.
	22/09/2019	20.9	Se superpone con estrellas del campo.
2014 OG <sub>392</sub>	28/09/2019	20.8	No se distingue el objeto.
2015 XW <sub>379</sub>	09/04/2021	20.6	No se distingue el objeto.
2017 SW <sub>11</sub>	15/12/2020	20.4	Baja SNR.
	07/04/2021	20.7	No se distingue el objeto.
2019 SS <sub>79</sub>	15/12/2020	20.4	Se superpone con estrellas del campo.
331P	22/08/2020	20.6	No se distingue el objeto.
324P	29/05/2020	19.2	Se superpone con estrellas del campo.

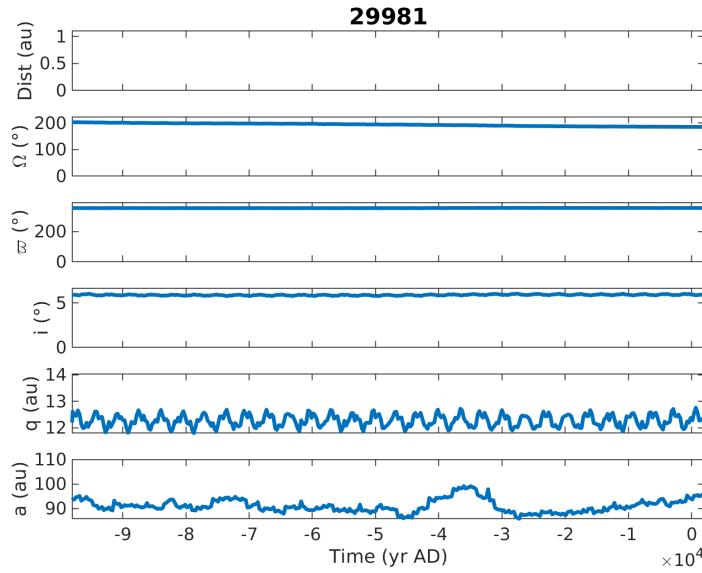
## 6.4. Integraciones

De los ocho ACOs que presentaron ensanchamiento se descartó que se tratará de actividad el caso de 499522 ya que los datos fueron obtenidos en malas condiciones de observabilidad. En el caso de 2014 OG<sub>392</sub> ya posee la clasificación de cometa. En los restantes seis casos de perfiles ensanchados (29981, 54598, 90572, 515718, 2015 BK<sub>22</sub> y 2016 YB<sub>13</sub>) no existen reportes previos de actividad. Para estos y para los ACOs que presentaron abrillantamiento en la magnitud reducida (322966, 2009 KF<sub>37</sub> y 2014 SS<sub>303</sub>) se realizaron integraciones numéricas cien mil años hacia el pasado, para analizar la dinámica de la historia pasada reciente y evaluar posibles transiciones que haya experimentado el objeto. Se graficaron semieje mayor ( $a$ ), distancia al perihelio ( $q$ ), inclinación ( $i$ ), argumento del perihelio ( $\bar{\omega}$ ), longitud del nodo ( $\Omega$ ) y distancia a los planetas gigantes (para esto se grafican los encuentros, a menos de 1 ua, como un punto de color azul para Júpiter, rojo para Saturno, verde para Urano y negro para Neptuno).

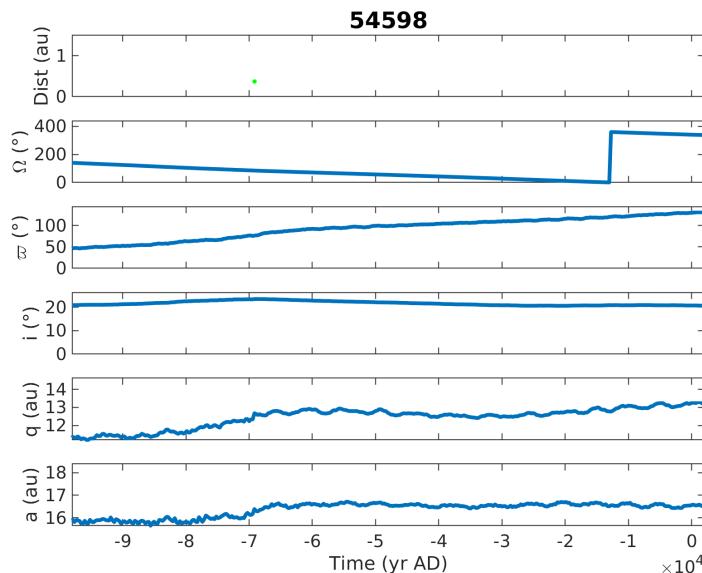
En los casos de 29981 (figura 6.18) y 54598 (figura 6.19) se trata de centauros que presentan evoluciones regulares sin encuentros con los planetas gigantes en el tiempo de integración (54598 presenta solamente un encuentro

con Urano).

322966 (figura 6.20) es un ACO de la familia de Júpiter que presenta una evolución orbital indistinguible de la de un cometa, teniendo múltiples encuentros con Júpiter y algunos con Saturno.

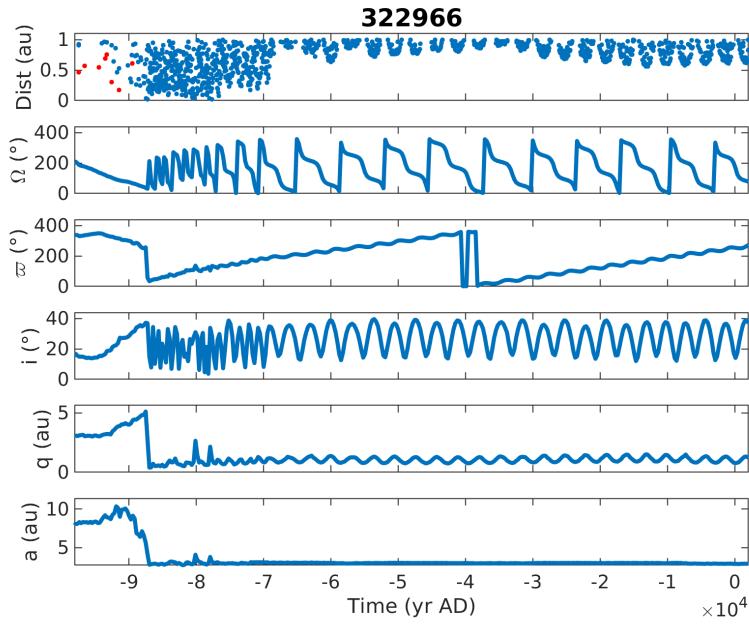


**Figura 6.18:** Evolución orbital de 29981. Se grafica semieje mayor ( $a$ ), distancia al perihelio ( $q$ ), inclinación ( $i$ ), longitud del perihelio ( $\bar{\omega}$ ), argumento del perihelio ( $\Omega$ ) y distancia a los planetas gigantes (si hay encuentros se grafican como un punto de color azul para Júpiter, rojo para Saturno, verde para Urano y negro para Neptuno)

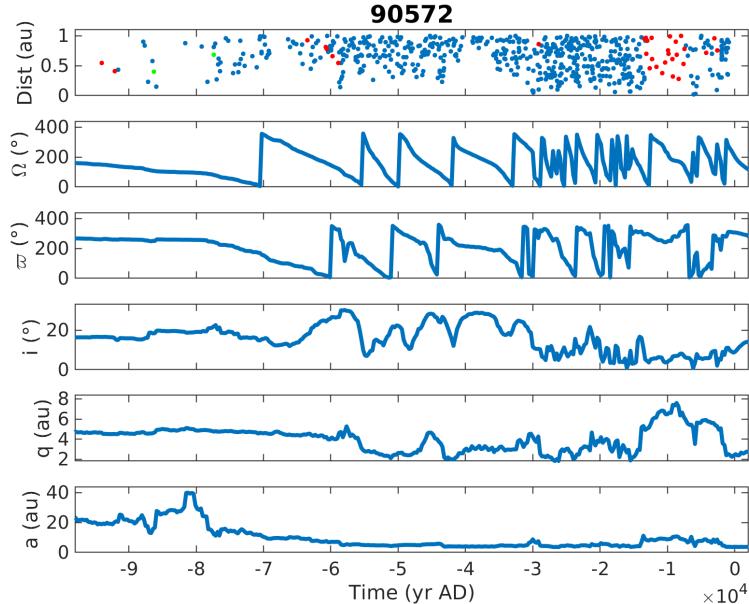


**Figura 6.19:** Evolución orbital de 54598.

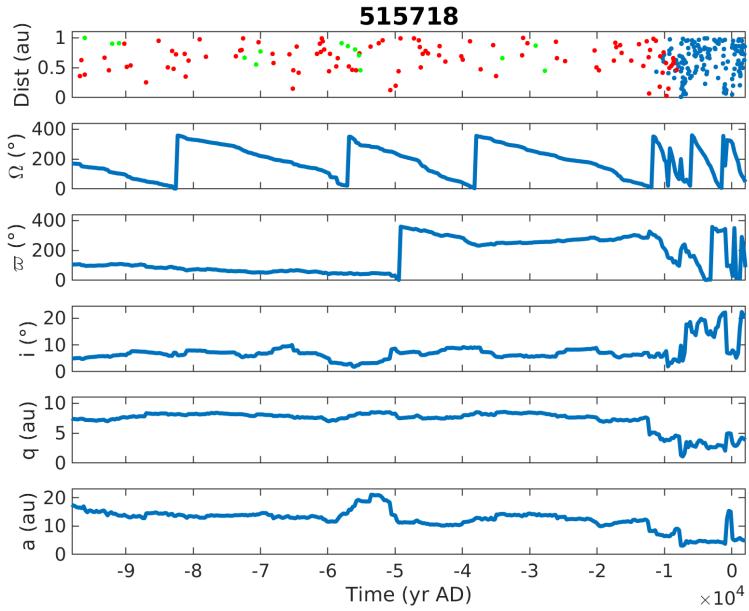
Los objetos 90572, 515718 y 2009 KF<sub>37</sub> (figuras 6.21, 6.22 y 6.23 respectivamente) tienen evoluciones dinámicas similares, son ACOs de la familia de Júpiter con órbitas cruzadoras caóticas; durante la evolución presentan múltiples encuentros con los planetas gigantes.



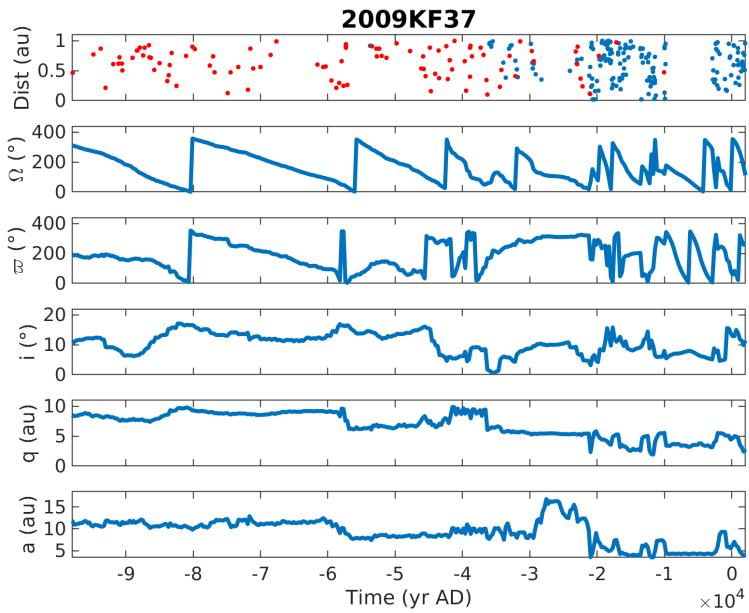
**Figura 6.20:** Evolución orbital de 322966.



**Figura 6.21:** Evolución orbital de 90572.

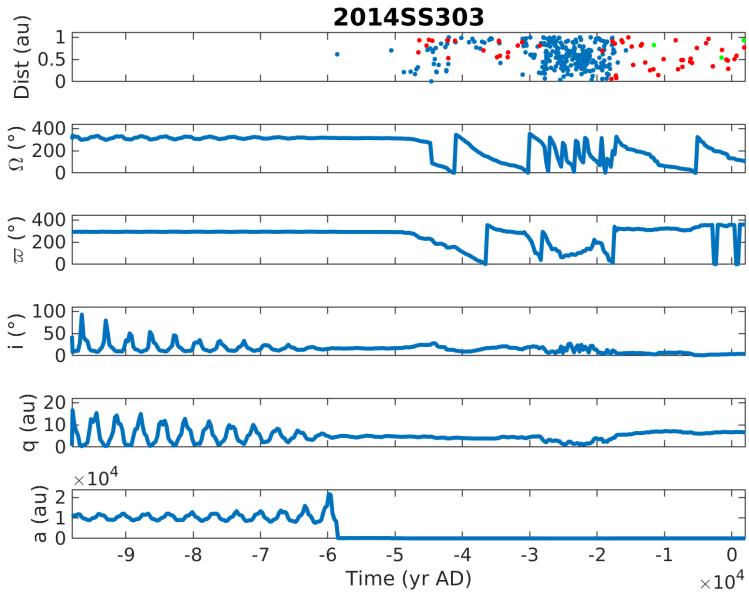


**Figura 6.22:** Evolución orbital de 515718.



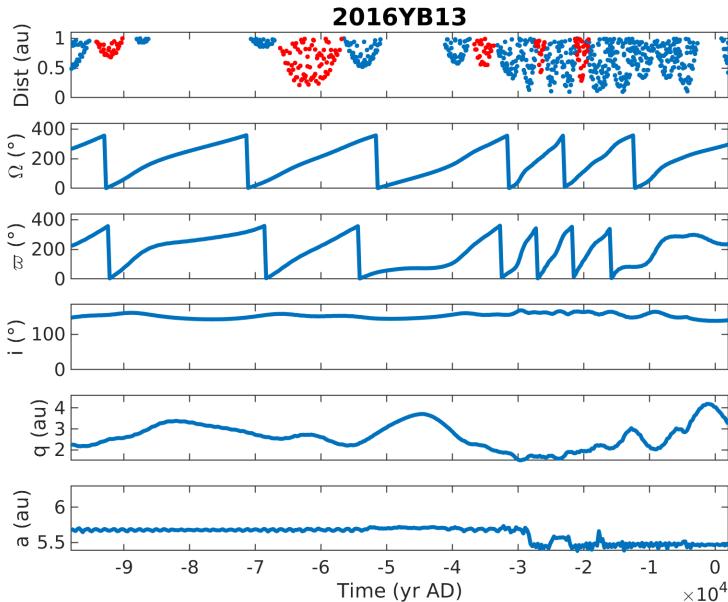
**Figura 6.23:** Evolución orbital de 2009 KF<sub>37</sub>.

Por su parte, 2014 SS<sub>303</sub> (figura 6.24) es un centauro pero con una evolución bastante caótica, propia de una dinámica claramente transicional.

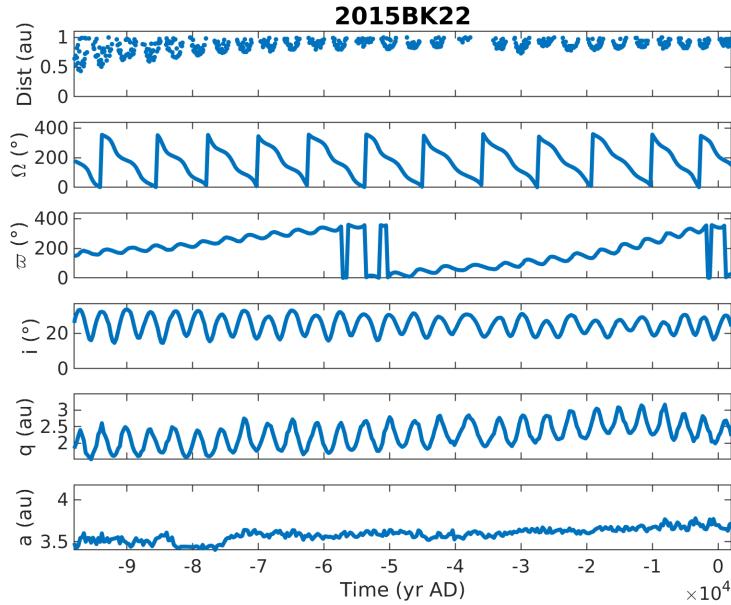


**Figura 6.24:** Evolución orbital de 2014 SS<sub>303</sub>.

Por último tenemos a 2016 YB<sub>13</sub> (figura 6.25) que es un ACO de tipo Halley y a 2015 BK<sub>22</sub> (figura 6.26) un ACO de la familia de Júpiter que no posee una órbita típicamente cometaria. Si bien este último tiene encuentros con Júpiter y un parámetro de Tisserand cercano a 3, tiene una órbita estable. Es un caso que perfectamente podría ser un asteroide escapado del cinturón principal.



**Figura 6.25:** Evolución orbital de 2016 YB<sub>13</sub>.



**Figura 6.26:** Evolución orbital de 2015 BK<sub>22</sub>.

## 6.5. Curvas de luz

De las curvas de luz obtenidas para cinco ACOs se pudieron determinar dos períodos de rotación, correspondientes a los ACOs 145485 y 494667, realizándose para ambos la curva de fase rotacional. Para ninguno de estos dos objetos se cuenta con período de rotación en la base de datos del JPL.

En el caso de 30512 la cantidad de datos era insuficiente, lográndose cubrir menos de medio período, por lo que si bien se logró estimar el período de rotación, el mismo se considera de baja calidad.

Para los restantes objetos (6144 y 52007) se obtuvieron curvas planas con cambios de aproximadamente 0.2 magnitudes, no pudiendo determinarse un período de rotación.

# Capítulo 7

## Conclusiones y discusión

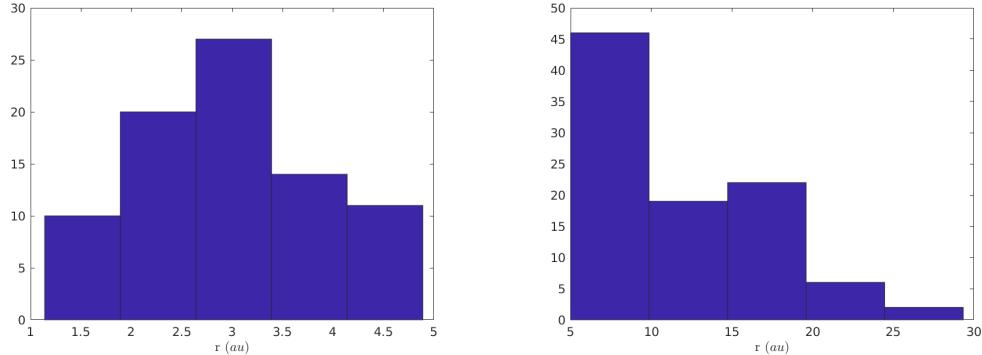
El objetivo de este trabajo era realizar un monitoreo de la posible actividad en asteroides en órbitas cometarias y asteroides activados. Se partió de un conjunto de datos analizados durante la tesis de licenciatura y se trabajó de manera de extender la lista de objetos reducidos para lograr una muestra significativa. Para esto, se trabajó con imágenes obtenidas de distintas bases de datos, así como con nuevas observaciones realizadas entre los años 2019 y 2021. El análisis de las conclusiones se divide según las dos poblaciones de objetos estudiadas: asteroides en órbitas cometarias en la sección 7.1 y asteroides activados en la sección 7.2.

### 7.1. Asteroides en órbitas cometarias

Según el criterio utilizado en este trabajo, existen un total de 705 objetos con la clasificación de asteroides en órbitas cometarias, de los cuales 384 son ACOs de la familia de Júpiter, 115 se encuentran en órbitas tipo Halley y 206 son centauros.

Se lograron obtener perfiles de brillo de 133 ACOs, generando un total acumulado (incluyendo los objetos analizados en la tesis de licenciatura) de 160. 92 corresponden a ACOs de la Familia de Júpiter, 50 a Centauros y 18 son tipo Halley. De esta manera se logró aumentar la muestra de los objetos analizados de 7 % a 23 %. La figura 7.1 muestra histogramas de distancia heliocéntrica ( $r$ ) de los objetos estudiados en este trabajo, al momento de la observación (separados en dos categorías: distancias heliocéntricas menores o mayores a 5 ua).

Como indicadores de actividad se utilizaron dos: i) desviaciones en el perfil de brillo respecto al perfil estelar; ii) aumento significativo de la magnitud reducida del objeto.



**Figura 7.1:** Histograma de distancias heliocéntricas de los ACOs observados: entre 0 y 5 ua (izquierda) y de más de 5 ua (derecha).

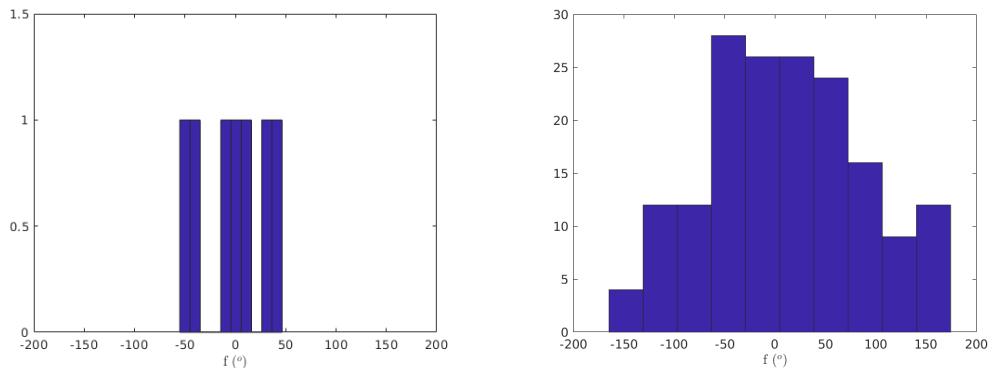
Del total de 133 ACOs de los que se obtuvieron perfiles, siete presentaron desviación en los mismos que no pudo ser explicada por factores externos como condiciones de observabilidad, baja SNR, etc. Se trata de los ACOs 29981, 54598, 90572, 515718, 2014 OG<sub>392</sub>, 2015 BK<sub>22</sub> y 2016 YB<sub>13</sub>. Uno de estos asteroides ya posee también la denominación de cometa: C/2014 OG<sub>392</sub> (PANSTARRS).

Del estudio de la magnitud reducida, se obtuvieron cinco objetos que presentaron desviaciones significativas: 54598, 322966, 323137, 2009 KF<sub>37</sub> y 2014 SS<sub>303</sub>. Uno de los cuales también posee la clasificación de cometa: 282P (323137).

De los objetos estudiados en la licenciatura, también se había encontrado un caso de actividad que ya poseía la denominación de cometa: P/2015 PD<sub>229</sub> ISON-Cameron.

La figura 7.2 muestra histogramas de anomalía verdadera ( $f$ ) de los objetos con y sin indicios de actividad observados en este trabajo. Los objetos con indicios de actividad se encuentran próximos al perihelio, con  $f$  entre  $-50^\circ$  y  $50^\circ$ . No obstante, como se observa en la figura 7.2b, el pico en la distribución de  $f$  de los objetos observados también se encuentra en el rango  $[-50^\circ, 50^\circ]$ , por lo cual no podemos descartar que los objetos con indicios de actividad se encuentren próximos al perihelio producto de un bias de selección. Cabe remarcar que el pico cercano al perihelio en la distribución de objetos observados

se debe a que en ese momento se encuentran más brillantes y por tanto son priorizados en la selección.



**Figura 7.2:** Histograma de anomalías verdaderas de los ACOs observados: con indicios de actividad (izquierda) y sin indicios de actividad (derecha).

En resumen, doce objetos de los estudiados (incluyendo el trabajo de licenciatura) presentaron desviación en su perfil de brillo y/o en su magnitud reducida, de los cuales tres ya poseen la clasificación de cometa. Siete son ACOs de la Familia de Júpiter, cuatro son Centauros y uno se encuentra en una órbita tipo Halley.

Las observaciones fueron realizadas en diferentes anomalías verdaderas, aunque mayormente en la región perihélica, encontrándose un porcentaje muy bajo de objetos activos o con indicios de actividad, lo que descartaría una transición lenta de activos a inertes. Por lo tanto, esta población de asteroides en órbitas cometarias estaría formada principalmente de objetos que: i) son cometas totalmente inertes (donde la transición de activo a completamente inactivo es brusca); ii) son asteroides escapados del cinturón principal.

Una población que podría contribuir a este conjunto de objetos dinámicamente similar a los cometas de la familia de Júpiter y que se muestran inactivos, son los asteroides Hildas. En los trabajos de Di Sisto et al. (2003) y Di Sisto et al. (2005) los Hildas, en resonancia 3:2 con Júpiter y poseedores de gran cantidad de volátiles, son estudiados como una fuente probable más de los JFC (además de la principal fuente que es la región transneptuniana, y los troyanos). Los Hildas que logran escapar de la resonancia están controlados dinámicamente por Júpiter y su comportamiento se parece al de los JFC. De hecho existe un conjunto de cometas denominados tipo “cuasi-Hilda” (Kresak, 1979; Tancredi et al. 1990), con características orbitales similares a los

asteroides Hildas, pero inestables.

Además, para Di Sisto et al. (2019), algunos troyanos que escapan de la zona de estabilidad podrían llegar a contribuir a los ACOs, aunque las contribuciones son menores que a otras poblaciones.

Otra población que podría contribuir son los NEAs. De acuerdo al estudio de J. A. Fernández et al. (2014), quienes analizaron el comportamiento dinámico de un conjunto de NEAs que se acercan mucho o cruzan la órbita de Júpiter, la mayoría de estos se mueve en órbitas asteroidales típicas, pero un grupo pequeño presentan órbitas muy inestables, parecidas a los JFC. Los autores concluyen que estos objetos podrían ser cometas inactivos. Los NEAs también fueron estudiados por J. A. Fernández y Sosa (2015), donde se encuentra que si bien los JFC “típicos” en órbitas inestables probablemente vienen de la región transneptuniana, existe un grupo menor de JFC en órbitas de asteroides que puede provenir del cinturón de asteroides, como los NEAs.

La posibilidad de que se trate de cometas totalmente inactivos también es evaluada en diversos estudios, tanto observacionales como modelado de la evolución física. Cabe destacar los trabajos observacionales de Y. R. Fernández et al. (2005) y F. DeMeo y Binzel (2008), en los que se estudiaron muestras de algunas decenas de ACOs. El primero de estos trabajos encontró que un alto porcentaje presenta albedos bajos, de tipo cometario. Ambos estiman que hay un porcentaje (4-8 %) de los NEOs que tiene las propiedades físicas y dinámicas de cometas originarios del Sistema Solar exterior. Licandro et al. (2008) también estudiaron un conjunto de ACOs, teniendo la mayoría de estos un espectro similar a los núcleos cometarios y a los asteroides del cinturón exterior. Además, observaron que los NEOs en órbitas cometarias presentan una fracción importante de asteroides escapados del cinturón interior, de acuerdo a sus características espectrales. Por su parte Kim et al. (2014) también encontraron un alto porcentaje de ACOs con albedos bajos, consistentes con núcleos cometarios. Por último, Licandro et al. (2016) y Licandro et al. (2018) analizaron albedos y propiedades espectrales de un conjunto de ACOs seleccionados con el mismo criterio que en nuestro trabajo, concluyendo también que son físicamente compatibles con núcleos cometarios.

De los ACOs observados en esta tesis, encontramos que hay 14 que tienen realizada la clasificación por tipo taxonómico, siendo 12 de éstos de tipo D (Ivezic et al. 2001; Bus y Binzel, 2002; Ivezic et al. 2005; Carvano et al. 2010). Ninguno de los que seleccionamos por tener ensanchamiento en su perfil o

desviación en la magnitud reducida posee clasificación taxonómica.

En lo que respecta al modelado físico, cabe destacar el trabajo de Rickman et al. (1990) donde se simula la formación de un manto de polvo estable en cometas de corto período. Los tamaños típicos de estos mantos son del orden de centímetros y pueden sufrir pequeñas grietas debido por ejemplo a colisiones, abriendo regiones activas y manteniendo al cometa en un estado de baja actividad. Igualmente, estos modelos muestran que se podrían formar costras perdurables, especialmente en objetos con distancias perihélicas mayores a 2 ua y con núcleos de varios kilómetros de diámetro.

A pesar de que según los trabajos observacionales mencionados existiría un alto porcentaje de ACOs que de acuerdo a sus características físicas podrían ser núcleos cometarios, se detectaron muy pocos casos de actividad. Se trata de una población de la que se esperaría al menos un residuo de actividad.

En un estudio realizado por Díaz y Gil-Hutton (2008), se analiza la posibilidad de activación de los ACOs debido a impactos, si tuvieran volátiles subsuperficiales, encontrando los autores un exceso en el número de candidatos a cometas durmientes con respecto a lo esperado, lo que indicaría que la población de ACOs contiene objetos que no son cometas en un estado durmiente.

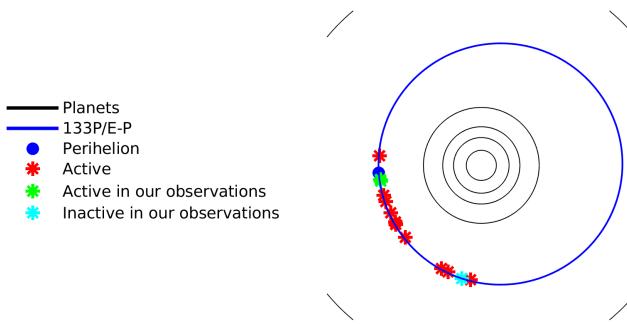
De acuerdo a nuestro estudio, del total de objetos de la familia de Júpiter (JFC activos + ACOs-JF) que son aproximadamente 1000, tendríamos 600 activos y casi 400 inactivos, donde se descarta una transición lenta de activo a inactivo.

Nuestros resultados indican que dentro de la población de ACOs-JF podría haber una fracción mayoritaria de asteroides escapados, con algunos pocos casos de cometas durmientes. Para poder llegar a una conclusión mas definitiva, se requiere un análisis en profundidad de las rutas dinámicas desde el cinturón principal a la dinámica caótica de los ACOs, sus contribuciones relativas según las poblaciones, y la comparación espectroscópica entre los ACOs-JF y las poblaciones origen. De esta forma sabríamos si el flujo proveniente del cinturón principal podría dar cuenta de la población observada, tomando en cuenta además los bias observacionales en el descubrimiento de estos objetos. Este trabajo excede los alcances de esta tesis.

## 7.2. Asteroides activados

Con respecto a los asteroides activados, el criterio utilizado arroja un total de 31 objetos. Se obtuvieron perfiles de siete de estos, alcanzando un total acumulado de diez, lo que representa un 32 % de los objetos conocidos. De los siete estudiados en este trabajo, tres presentaron perfiles ensanchados.

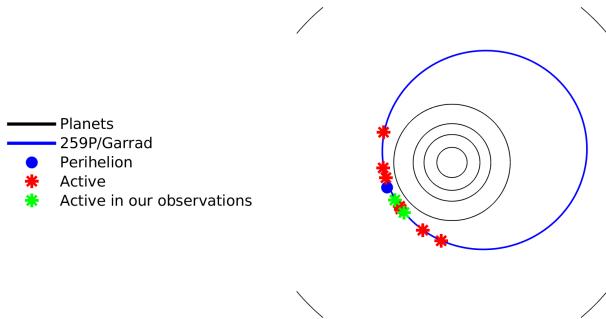
133P se encontraba presente en imágenes de julio de 2007, momento en el que se estaba observando su segundo episodio de actividad. Sin embargo, no mostró ensanchamiento en sus perfiles ni una disminución en su magnitud reducida. Este resultado es coincidente con el obtenido por Hsieh et al. (2010) quienes analizaron imágenes de la reactivación y encontraron que si bien el objeto se encontraba activo, el FWHM de su perfil de brillo era consistente con el FWHM estelar durante esas observaciones, lo que implica que el objeto no presentaba una coma, o la misma era muy compacta (inferior a 1''), lo que corresponde a un diámetro lineal de 1200 km). La figura 7.3 muestra la órbita del objeto con su perihelio, así como los lugares donde se observó actividad; se incluyen las observaciones analizadas en nuestro trabajo. Las anomalías verdaderas para las distintas fechas donde el objeto fue observado activo pueden verse en el apéndice 5.



**Figura 7.3:** Órbita de 133P. Las líneas negras representan las órbitas de los planetas, la línea azul la órbita del objeto, el círculo azul su perihelio, los asteriscos rojos los lugares en donde se ha observado actividad, los asteriscos verdes las observaciones realizadas durante este trabajo en las que se constató actividad y los celestes las que no se constató. La vista es desde el polo eclíptico norte, por lo que el desplazamiento de los objetos en su órbita es en sentido anti-horario.

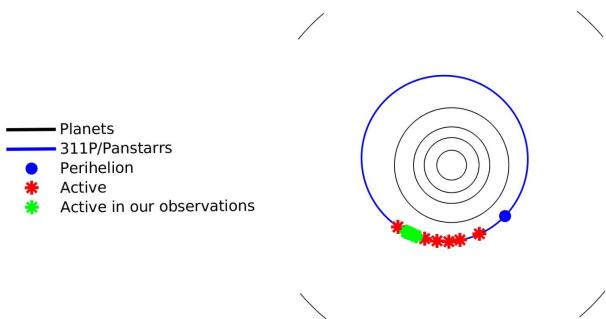
259P estaba presente en imágenes de archivo de setiembre de 2017, fecha que está dentro del rango de tiempo en que se observó su reactivación (Hsieh

et al. 2017). La figura 7.4 muestra la órbita del objeto y los diferentes reportes de actividad, incluyendo la actividad detectada en estas imágenes.



**Figura 7.4:** Órbita de 259P indicando los episodios de actividad.

En el caso de 311P, se pudo detectar su actividad en varias imágenes entre el 5 y el 29 de setiembre de 2013. Los primeros reportes de actividad de 311P son de mediados de agosto del mismo año (Bolin et al. 2013). Su órbita, donde se indica la actividad, luce en la figura 7.5.

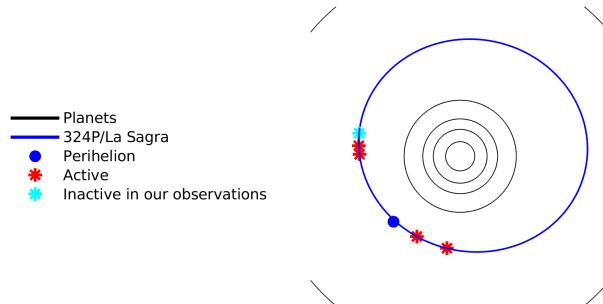


**Figura 7.5:** Órbita de 311P indicando los episodios de actividad.

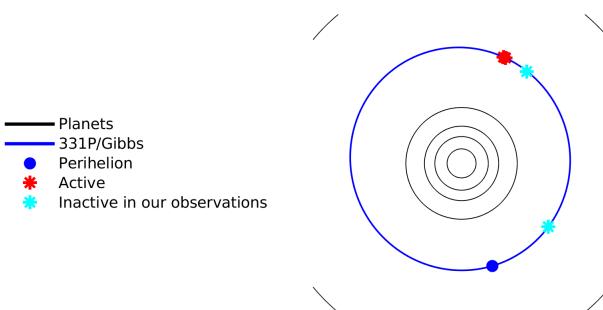
Los asteroides activados 324P, 331P y 354P no se mostraron activos en nuestras observaciones. El primero de estos fue observado un mes antes de su reactivación. Las observaciones de 331P y 354P no fueron coincidentes con una reactivación. Las gráficas de sus órbitas se muestran en las figuras 7.6, 7.7 y 7.8.

Por último, P/2015 X<sub>6</sub> estaba presente en imágenes del DES del 18 de noviembre de 2015, donde se lo observa activo. Lo que corresponde a algunos días antes de los primeros reportes de actividad que son del 7 de diciembre de

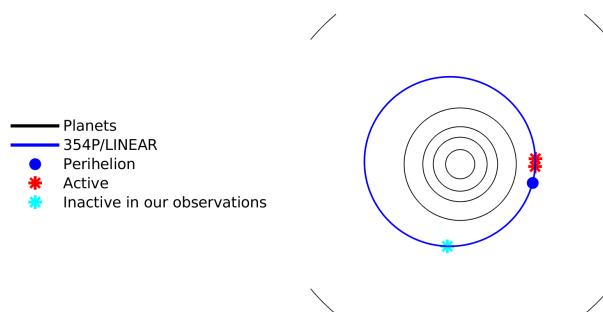
2015 (Tubbiolo et al. 2015). En la figura 7.9 pueden verse los distintos puntos donde se observó la actividad.



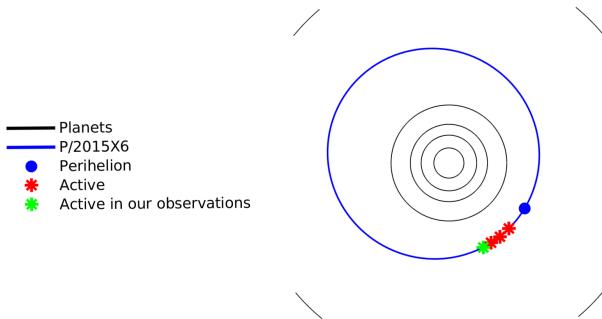
**Figura 7.6:** Órbita de 324P indicando los episodios de actividad.



**Figura 7.7:** Órbita de 331P indicando los episodios de actividad.



**Figura 7.8:** Órbita de 354P indicando los episodios de actividad.



**Figura 7.9:** Órbita de P/2015 X<sub>6</sub> indicando los episodios de actividad.

La tabla 7.1 resume las observaciones realizadas indicando su coincidencia o no en el tiempo y en el espacio con los episodios de actividad conocidos. En varios de los casos, nuestras observaciones correspondían a las mismas regiones de la órbita donde se observó actividad. Para los objetos con perfiles ensanchados, los datos disponibles correspondían a los períodos temporales donde estos ya habían sido observados activos, destacándose el caso de P/2015 X<sub>6</sub>, donde se logró extender el período activo, ya que las imágenes del DES son anteriores a los primeros reportes disponibles.

Pudimos observar que los episodios de actividad son muy restringidos en el tiempo y que no siempre vuelven a ocurrir en la misma región de la órbita. Esto en cierta forma cuestiona la idea de que la recurrencia de los episodios de actividad esté asegurada (lo que pone en cuestión la hipótesis de sublimación que existe para algunos de estos objetos).

**Tabla 7.1:** Observaciones de asteroides activados.

Objeto	Fecha	Observaciones
133P	07/2007	Activo en misma región durante pasaje activo.
	08/2019	Inactivo en región donde estuvo activo.
259P	09/2017	Activo en misma región durante pasaje activo.
311P	09/2013	Activo en misma región durante pasaje activo.
324P	04/2015	Inactivo en misma región un mes antes de pasaje activo.
331P	12/2015	Inactivo en región sin actividad.
	03/2017	Inactivo próximo a región donde estuvo activo en 2012.
354P	04/2015	Inactivo en región sin actividad.
2015 X <sub>6</sub>	11/2015	Activo en misma región 3 semanas antes de pasaje activo.

### 7.3. Consideraciones finales

Si bien se logró extender considerablemente la muestra de objetos estudiados, y esto nos permite tener un panorama más completo de los objetos transicionales, entendemos que existen actualmente varias preguntas abiertas que podrían abordarse como trabajo futuro.

Entre las posibles líneas de trabajo a desarrollar se encuentra el análisis de los diferentes mecanismos que dan lugar a la activación de los objetos estudiados. Por otra parte, consideramos que también es necesario profundizar el estudio de las rutas dinámicas de escape de los objetos del cinturón principal de asteroides hacia la región de los ACOs. Además, sería deseable continuar monitoreando los asteroides activados, así como algunos ACOs que presentaron niveles bajos de actividad, en especial cuando se encuentran con bajas anomalías verdaderas.

Finalmente, los resultados preliminares de la reciente misión NASA-DART al sistema binario Dydimos-Dimorphos muestran que se generó un asteroide activado artificial, tal como fue propuesto por (Tancredi et al. 2022). La duración del aumento de brillo respecto de la magnitud pre-impacto y la evolución de la cola de polvo nos permitirá entender mejor el proceso de activación de un asteroide. Será necesario revisar las hipótesis sobre los procesos de activación en función de estos resultados.

# Bibliografía

- Ahn, C. P., Alexandroff, R., Allende Prieto, C., Anderson, S. F., Anderton, T., Andrews, B. H., Aubourg, É., Bailey, S., Balbinot, E., Barnes, R., et al. (2012). The Ninth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey: First Spectroscopic Data from the SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 203(2), 21.
- Alvarez-Candal, A. (2013). SDSS photometry of asteroids in cometary orbits. *Astronomy and Astrophysics*, 549, A34.
- Alvarez-Candal, A., y Roig, F. (2005). The role of the resonant “stickiness” in the dynamical evolution of Jupiter family comets. En Z. Knežević y A. Milani (Eds.), *IAU Colloq. 197: Dynamics of Populations of Planetary Systems* (pp. 205-208).
- Appenzeller, I., Fricke, K., Fürting, W., Gässler, W., Häfner, R., Harke, R., Hess, H. .-, Hummel, W., Jürgens, P., Kudritzki, R. .-, Mantel, K. .-, Meisl, W., Muschielok, B., Nicklas, H., Rupprecht, G., Seifert, W., Stahl, O., Szeifert, T., y Tarantik, K. (1998). Successful commissioning of FORS1 - the first optical instrument on the VLT. *The Messenger*, 94, 1-6.
- Astrometry.net. (s.f.). Servicio de calibración astrométrica [<http://astrometry.net/>, último acceso 01-02-2021].
- Banda-Huarca, M. (2020). *Astrometria, predição de ocultações estelares e exploração de dados fotométricos de DES para TNOs e centauros em preparação ao LSST* (Tesis de Doctorado). Observatório Nacional. Rio de Janeiro, Brasil.
- Belskaya, I. N., Bagnulo, S., Barucci, M. A., Muinonen, K., Tozzi, G. P., Fornasier, S., y Kolokolova, L. (2010). Polarimetry of Centaurs (2060) Chiron, (5145) Pholus and (10199) Chariklo. *Icarus*, 210(1), 472-479.

- Bertin, E. (2006). Automatic Astrometric and Photometric Calibration with SCAMP. En C. Gabriel, C. Arviset, D. Ponz y S. Enrique (Eds.), *Astronomical Data Analysis Software and Systems XV* (p. 112).
- Bertin, E., y Arnouts, S. (1996). SExtractor: Software for source extraction. *Astronomy and Astrophysics*, 317, 393-404.
- Bodewits, D., Kelley, M. S., Li, J. .-, Landsman, W. B., Besse, S., y A'Hearn, M. F. (2011). Collisional Excavation of Asteroid (596) Scheila. *Astrophysical Journal, Letters*, 733(1), Artículo L3, L3.
- Bolin, B., Denneau, L., Veres, P., Hsieh, H., Micheli, M., Wainscoat, R., Wells, L., Skiff, B., y Williams, G. V. (2013). Comet P/2003 BM\_80 = (323137) 2003 BM\_80. *Central Bureau Electronic Telegrams*, 3559, 1.
- Bulger, J., Chambers, K., Lowe, T., Schultz, A., y Willman, M. (2020). 2020 MK4. *Minor Planet Electronic Circulars*, 2020-N36.
- Bus, S. J., y Binzel, R. P. (2002). Phase II of the Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey. A Feature-Based Taxonomy. *Icarus*, 158(1), 146-177.
- Calabretta, M., y Greisen, E. (2002). Representations of World Coordinates in FITS. *Astronomy and Astrophysics*, 216, 571.
- Carvano, J. M., Hasselmann, P. H., Lazzaro, D., y Mothé-Diniz, T. (2010). SDSS-based taxonomic classification and orbital distribution of main belt asteroids. *Astronomy and Astrophysics*, 510, Artículo A43, A43.
- Chandler, C. O., Kueny, J. K., Trujillo, C. A., Trilling, D. E., y Oldroyd, W. J. (2020). Cometary Activity Discovered on a Distant Centaur: A Nonaqueous Sublimation Mechanism. *Astrophysical Journal, Letters*, 892(2), Artículo L38, L38.
- CTIO. (s.f.). Cerro Tololo Inter-American Observatory [<http://www.ctio.noao.edu/>, Último acceso 01-02-2021].
- de la Fuente Marcos, C., de la Fuente Marcos, R., Licandro, J., Serra-Ricart, M., Martino, S., de León, J., Chaudry, F., y Alarcón, M. R. (2021). The active centaur 2020 MK4. *Astronomy and Astrophysics*, 649, Artículo A85, A85.

- DeMeo, Fornasier, S., Barucci, M. A., Perna, D., Protopapa, S., Alvarez-Candal, A., Delsanti, A., Doressoundiram, A., Merlin, F., y de Bergh, C. (2008). Visible and Near-infrared Colors of TNOs from the Second ESO Large Program. *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #40*, 40, Artículo 47.05, 47.05.
- DeMeo, F., y Binzel, R. P. (2008). Comets in the near-Earth object population. *Icarus*, 194(2), 436-449.
- DES. (2013). Dark Energy Survey [<https://www.darkenergysurvey.org>, último acceso 01-02-2021].
- Di Sisto, R. P., Brunini, A., Dirani, L. D., y Orellana, R. B. (2003). Hilda family contribution to the Jupiter Family Comets (JFC). *Boletin de la Asociacion Argentina de Astronomia La Plata Argentina*, 46, 11-12.
- Di Sisto, R. P., Brunini, A., Dirani, L. D., y Orellana, R. B. (2005). Hilda asteroids among Jupiter family comets. *Icarus*, 174(1), 81-89.
- Di Sisto, R. P., Fernández, J. A., y Brunini, A. (2009). On the population, physical decay and orbital distribution of Jupiter family comets: Numerical simulations. *Icarus*, 203(1), 140-154.
- Di Sisto, R. P., Ramos, X. S., y Gallardo, T. (2019). The dynamical evolution of escaped Jupiter Trojan asteroids, link to other minor body populations. *Icarus*, 319, 828-839.
- Díaz, C. G., y Gil-Hutton, R. (2008). Collisional activation of asteroids in cometary orbits. *Astronomy and Astrophysics*, 487(1), 363-367.
- Doressoundiram, A., Barucci, M. A., Tozzi, G. P., Poulet, F., Boehnhardt, H., de Bergh, C., y Peixinho, N. (2005). Spectral characteristics and modeling of the trans-neptunian object (55565) 2002 AW<sub>197</sub> and the Centaurs (55576) 2002 GB<sub>10</sub> and (83982) 2002 GO<sub>9</sub>: ESO Large Program on TNOs and Centaurs., 53(14-15), 1501-1509.
- Elst, E. W., Pizarro, O., Pollas, C., Ticha, J., Tichy, M., Moravec, Z., Offutt, W., y Marsden, B. G. (1996). Comet P/1996 N2 (Elst-Pizarro). *IAU Circulars*, 6456, 1.
- ESO. (s.f.). European Southern Observatory [<https://www.eso.org/>, último acceso 01-02-2021].

- Everhart, E. (1985). An efficient integrator that uses Gauss-Radau spacings. En A. Carusi y G. B. Valsecchi (Eds.), *IAU Colloq. 83: Dynamics of Comets: Their Origin and Evolution* (p. 185).
- Fabbiano, G. (2017). International Virtual Observatory Alliance: the standards organization for data interoperability in astronomy. *United Nations, Italy Workshop on the Open Universe Initiative*.
- Fernández, J. A., y Sosa, A. (2015). Jupiter family comets in near-Earth orbits: Are some of them interlopers from the asteroid belt? *Planetary Space Science*, 118, 14-24.
- Fernández, J. A., Sosa, A., Gallardo, T., y Gutiérrez, J. N. (2014). Assessing the physical nature of near-Earth asteroids through their dynamical histories. *Icarus*, 238, 1-12.
- Fernández, Y. R., Jewitt, D. C., y Sheppard, S. S. (2005). Albedos of Asteroids in Comet-Like Orbits. *Astronomical Journal*, 130(1), 308-318.
- Gaia Collaboration, Prusti, T., de Bruijne, J. H. J., Brown, A. G. A., Vallenari, A., Babusiaux, C., Bailer-Jones, C. A. L., Bastian, U., et al. (2016). The Gaia mission. *Astronomy and Astrophysics*, 595, A1.
- Geem, J., Ishiguro, M., Bach, Y. P., Kuroda, D., Naito, H., Hanayama, H., Kim, Y., Kwon, Y. G., Jin, S., Sekiguchi, T., Okazaki, R., Vauban, J. J., Imai, M., Oono, T., Futamura, Y., Takagi, S., Sato, M., Kuramoto, K., y Watanabe, M. (2021). A polarimetric study of asteroids in comet-like orbits. *arXiv e-prints*, Artículo arXiv:2111.00151, arXiv:2111.00151.
- Giommi, P., y Pollock, A. (2017). Status of the Open UNiverse initiative. *United Nations, Italy Workshop on the Open Universe Initiative*.
- González-Fernández, C., Hodgkin, S. T., Irwin, M. J., González-Solares, E., Koposov, S. E., Lewis, J. R., Emerson, J. P., Hewett, P. C., Yoldaş, A. K., y Riello, M. (2017). The VISTA ZYJHKs photometric system: calibration from 2MASS. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 474(4), 5459-5478.
- Gustafson, B. A. S. (1989). Geminid meteoroids traced to cometary activity on Phaethon. *Astronomy and Astrophysics*, 225(2), 533-540.

- Gwyn, S. D. J., Hill, N., y Kavelaars, J. J. (2012). SSOS: A Moving-Object Image Search Tool for Asteroid Precovery. *Publications of the ASP*, 124, 579.
- Henden, A. A., Templeton, M., Terrell, D., Smith, T. C., Levine, S., y Welch, D. (2016). VizieR Online Data Catalog: AAVSO Photometric All Sky Survey (APASS) DR9 (Henden+, 2016). *VizieR Online Data Catalog*, II/336.
- Howell, S. B. (2000). *Handbook of CCD Astronomy*.
- Hsieh, H. H. (2014). Main-Belt Comets as Tracers of Ice in the Inner Solar System. En N. Haghīghipour (Ed.), *Formation, Detection, and Characterization of Extrasolar Habitable Planets* (pp. 212-218).
- Hsieh, H. H. (2017). Asteroid-comet continuum objects in the solar system. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A*, 375(2097).
- Hsieh, H. H., y Haghīghipour, N. (2016). Potential Jupiter-Family comet contamination of the main asteroid belt. *Icarus*, 277, 19-38.
- Hsieh, H. H., Ishiguro, M., Kim, Y., Knight, M. M., Lin, Z.-Y., Micheli, M., Moskovitz, N., Sheppard, S. S., Thirouin, A., y Trujillo, C. (2017). The Reactivations of Main-Belt Comets 238P/READ, 259P/Garradd, and 288P/(300163) 2006 VW139. *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #49*, 49, Artículo 305.10, 305.10.
- Hsieh, H. H., y Jewitt, D. (2006). A Population of Comets in the Main Asteroid Belt. *Science*, 312(5773), 561-563.
- Hsieh, H. H., Jewitt, D., Lacerda, P., Lowry, S. C., y Snodgrass, C. (2010). The return of activity in main-belt comet 133P/Elst-Pizarro. *Monthly Notices of the RAS*, 403(1), 363-377.
- Hsieh, H. H., Jewitt, D. C., y Fernández, Y. R. (2004). The Strange Case of 133P/Elst-Pizarro: A Comet among the Asteroids. *Astronomical Journal*, 127(5), 2997-3017.
- IAC. (s.f.). Instituto Astrofísico de Canarias [<https://www.iac.es/>], último acceso 01-02-2021].

- Ivezic, Z., Juric, M., Lupton, R. H., Tabachnik, S., Quinn, T., y SDSS Collaboration. (2005). SDSS Moving Object Catalog. *NASA Planetary Data System*, Artículo EAR-A-I0035-3-SDSSMOC-V2.0, EAR-A-I0035-3-SDSSMOC-V2.0.
- Ivezic, Ž., Tabachnik, S., Rafikov, R., Lupton, R. H., Quinn, T., Hammergren, M., Eyer, L., Chu, J., Armstrong, J. C., Fan, X., Finlator, K., Geballe, T. R., Gunn, J. E., Hennessy, G. S., Knapp, G. R., Leggett, S. K., Munn, J. A., Pier, J. R., Rockosi, C. M., ... SDSS Collaboration. (2001). Solar System Objects Observed in the Sloan Digital Sky Survey Commissioning Data. *Astronomical Journal*, 122(5), 2749-2784.
- IVOA. (2002). *International Virtual Observatory Alliance* [<http://www.ivoa.net>, último acceso 01-02-2021].
- Jenniskens, P. (2008). Meteoroid streams that trace to candidate dormant comets. *Icarus*, 194(1), 13-22.
- Jewitt, D., Hsieh, H., y Agarwal, J. (2015). The Active Asteroids. En *Asteroids IV* (pp. 221-241).
- Jewitt, D., y Luu, J. (1989). A CCD Portrait of Comet P/Tempel 2. *Astronomical Journal*, 97, 1766.
- Jewitt, D. (2012). The Active Asteroids. *Astronomical Journal*, 143(3), 66.
- Jewitt, D., Weaver, H., Agarwal, J., Mutchler, M., y Drahus, M. (2010). A recent disruption of the main-belt asteroid P/2010A2. *Nature*, 467(7317), 817-819.
- Jordi, C., Hog, E., Brown, A. G. A., Lindegren, L., Bailer-Jones, C. A. L., Carrasco, J. M., Knude, J., Straizys, V., Bruijne, J. H. J. D., Claeskens, J. F., Drimmel, R., Figueras, F., Grenon, M., Kolka, I., Perryman, M. A. C., Tautvaisiene, G., Vansevicius, V., Willemsen, P. G., Bridzius, A., ... Smette, A. (2006). The design and performance of the Gaia photometric system. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 367(1), 290-314.
- JPL-Horizons. (s.f.). Servicio de Efemérides [<https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi>. último acceso 01-02-2021].

- Kim, Y., Ishiguro, M., y Usui, F. (2014). Physical Properties of Asteroids in Comet-like Orbits in Infrared Asteroid Survey Catalogs. *Astrophysical Journal*, 789(2), 151.
- Kresak, L. (1979). Dynamical interrelations among comets and asteroids. En T. Gehrels y M. S. Matthews (Eds.), *Asteroids* (pp. 289-309).
- Lang, D., Hogg, D. W., Mierle, K., Blanton, M., y Roweis, S. (2010). Astrometry.net: Blind Astrometric Calibration of Arbitrary Astronomical Images. *Astronomical Journal*, 139(5), 1782-1800.
- Licandro, J., Ali-Lagoa, V., Tancredi, G., y Fernández, Y. (2016). Size and albedo distributions of asteroids in cometary orbits using WISE data. *Astronomy and Astrophysics*, 585, A9.
- Licandro, J., Alvarez-Candal, A., de León, J., Pinilla-Alonso, N., Lazzaro, D., y Campins, H. (2008). Spectral properties of asteroids in cometary orbits. *Astronomy and Astrophysics*, 481(3), 861-877.
- Licandro, J., Popescu, M., de León, J., Morate, D., Vaduvescu, O., De Prá, M., y Ali-Laoga, V. (2018). The visible and near-infrared spectra of asteroids in cometary orbits. *Astronomy Astrophysics*, 618, A170.
- Lomb, N. R. (1976). Least-Squares Frequency Analysis of Unequally Spaced Data. *Astrophysics and Space Science*, 39(2), 447-462.
- Lorin, O., y Rousselot, P. (2007). Search for cometary activity in three Centaurs [(60558) Echeclus, 2000 FZ<sub>53</sub> and 2000 GM<sub>137</sub>] and two trans-Neptunian objects [(29981) 1999 TD<sub>10</sub> and (28978) Ixion]., 376(2), 881-889.
- Luu, J. X. (1992). High resolution surface brightness profiles of near-earth asteroids. *Icarus*, 97, 276-287.
- Marsden, B. G. (1970). On the Relationship between Comets and Minor Planets. *Astrophysical Journal*, 75, 206.
- Martino, S. (2017). *Monitoreo de actividad residual en ACOs y asteroides activados* (Tesis de licenciatura). Universidad de la República. Montevideo, Uruguay.

- Martino, S., Tancredi, G., Monteiro, F., Lazzaro, D., y Rodrigues, T. (2019). Monitoring of Asteroids in Cometary Orbits and Active Asteroids. *Planetary and Space Science*, 166, 135-148.
- Moffat, A. F. J. (1969). A Theoretical Investigation of Focal Stellar Images in the Photographic Emulsion and Application to Photographic Photometry. *Astronomy and Astrophysics*, 3, 455.
- Mommert, M. (2017). PHOTOMETRYPipeline: An automated pipeline for calibrated photometry. *Astronomy and Computing*, 18, 47-53.
- Monet, D. G., Levine, S. E., Casian, B., y et al. (2002). VizieR Online Data Catalog: The USNO-B1.0 Catalog (Monet+ 2003). *VizieR Online Data Catalog*, I/284.
- OASI. (2011). Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica [<http://extranet.on.br/impacton/>, último acceso 01-02-2021].
- Ochsenbein, F., et al. (1996). The VizieR database of astronomical catalogues.
- Pravec, P., Harris, A. W., y Michalowski, T. (2002). Asteroid Rotations. En *Asteroids III* (pp. 113-122).
- Rickman, H., Fernández, J. A., y Gustafson, B. A. S. (1990). Formation of stable dust mantles on short-period comet nuclei. *Astronomy and Astrophysics*, 237(2), 524-535.
- Romon-Martin, J., Barucci, M. A., de Bergh, C., Doressoundiram, A., Peixinho, N., y Poulet, F. (2002). Observations of Centaur 8405 Asbolus: Searching for Water Ice. *Icarus*, 160(1), 59-65.
- Russell, C. T., Aroian, R., Arghavani, M., y Nock, K. (1984). Interplanetary Magnetic Field Enhancements and Their Association with the Asteroid 2201 Oljato. *Science*, 226(4670), 43-45.
- Scargle, J. D. (1982). Studies in astronomical time series analysis. II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. *Astrophysical Journal*, 263, 835-853.
- Sesar, B., Stuart, J. S., Ivezić, Ž., Morgan, D. P., Becker, A. C., y Woźniak, P. (2011). Exploring the Variable Sky with LINEAR. I. Photometric

- Recalibration with the Sloan Digital Sky Survey. *Astrophysical Journal*, 142(6), Artículo 190, 190.
- Simion, G., Popescu, M., Licandro, J., Vaduvescu, O., y de León, J. (2020). Spectral characterization of near-Earth asteroids on cometary orbits. *European Planetary Science Congress*, Artículo EPSC2020-351, EPSC2020-351.
- Skrutskie, M. F., Cutri, R. M., Stiening, R., Weinberg, M. D., Schneider, S., Carpenter, J. M., Beichman, C., Capps, R., Chester, T., Elias, J., Huchra, J., Liebert, J., Lonsdale, C., Monet, D. G., Price, S., Seitzer, P., Jarrett, T., Kirkpatrick, J. D., Gizis, J. E., ... Wheelock, S. (2006). The Two Micron All Sky Survey (2MASS). *Astronomical Journal*, 131(2), 1163-1183.
- Tancredi, G., Fernández, J. A., Rickman, H., y Licandro, J. (2000). A catalog of observed nuclear magnitudes of Jupiter family comets. *Astronomy and Astrophysics*, 346, 73-90.
- Tancredi, G., Lindgren, M., y Rickman, H. (1990). Temporary satellite capture and orbital evolution of Comet P/Helin-Roman-Crockett. *Astronomy and Astrophysics*, 239(1-2), 375-380.
- Tancredi, G., y Rickman, H. (1992). The Evolution of Jupiter Family Comets Over 2000 Years. En S. Ferraz-Mello (Ed.), *Chaos, Resonance, and Collective Dynamical Phenomena in the Solar System* (p. 269). Kluwer Academic Publishers.
- Tancredi, G. (2014). A criterion to classify asteroids and comets based on the orbital parameters. *Icarus*, 234, 66-80.
- Tancredi, G., Fernández, J. A., Rickman, H., y Licandro, J. (2006). Nuclear magnitudes and the size distribution of Jupiter family comets. *Icarus*, 182(2), 527-549.
- Tancredi, G., Liu, P.-Y., Campo-Bagatin, A., Moreno, F., y Dominguez, B. (2022). Lofting of low speed ejecta produced in the DART experiment and production of a dust cloud. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*.

- Tonry, J. L., Denneau, L., Heinze, A. N., Stalder, B., Smith, K. W., Smartt, S. J., Stubbs, C. W., Weiland, H. J., y Rest, A. (2018). ATLAS: A High-cadence All-sky Survey System. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 130(988), 064505.
- Tonry, J. L., Stubbs, C. W., Lykke, K. R., Doherty, P., Shivvers, I. S., Burgett, W. S., Chambers, K. C., Hodapp, K. W., Kaiser, N., Kudritzki, R.-P., Magnier, E. A., Morgan, J. S., Price, P. A., y Wainscoat, R. J. (2012). THE Pan-STARRS1 PHOTOMETRIC SYSTEM. *The Astrophysical Journal*, 750(2), 99.
- Tozzi, G.-P., Bagnulo, S., Barucci, M. A., Belskaya, I. N., Fornasier, S., y Mottola, S. (2012). Search For Coma In Centaurs (2060) Chiron, (5145) Pholus And (10199) Chariklo. *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts #44*, 44, Artículo 310.15, 310.15.
- Tubbiolo, A. F., Bressi, T. H., Wainscoat, R. J., Wells, L., Micheli, M., Gibson, B., Goggia, T., Primak, N., Schultz, A., Willman, M., Chambers, K., Chastel, S., Denneau, L., Flewelling, H., Huber, M., Lilly, E., Magnier, E., Waters, C., Weryk, R., ... Williams, G. V. (2015). Comet P/2015 x6 (panstarrs). *Minor Planet Electronic Circulars*, 2015-X180.
- Vaduvescu, O., Popescu, M., Comsa, I., Paraschiv, A., Lacatus, D., Sonka, A., Tudorica, A., Birlan, M., Suciu, O., Char, F., Constantinescu, M., Badescu, T., Badea, M., Vidican, D., y Oprisceanu, C. (2013). Mining the ESO WFI and INT WFC archives for known Near Earth Asteroids. Mega-Precovrey software. *Astronomische Nachrichten*, 334, 718-728.
- van Dokkum, P. G. (2001). Cosmic-Ray Rejection by Laplacian Edge Detection. *Publications of the ASP*, 113(789), 1420-1427.
- VanderPlas, J. T. (2018). Understanding the Lomb-Scargle Periodogram. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 236(1), 16.
- VLT. (s.f.). Very Large Telescope [<https://www.eso.org/public/spain/teles-instr/paranal-observatory/vlt/>, último acceso 01-02-2021].
- Ye, Q.-Z., Brown, P. G., y Pokorný, P. (2016). Dormant comets among the near-Earth object population: a meteor-based survey. *Monthly Notices of the RAS*, 462(4), 3511-3527.

# Glosario

**Ángulo de fase** Ángulo Sol-Objeto-Tierra.

**Anomalía verdadera** En una órbita elíptica, ángulo Objeto-Foco-Periastro.

Sirve para identificar la posición del objeto a lo largo de la órbita.

**Ascensión recta** Una de las coordenadas ecuatoriales utilizada para localizar astros en la esfera celeste. Equivalente a la longitud terrestre. Se mide en horas a partir del Punto Aries (una de las intersecciones de la eclíptica y el ecuador celeste).

**Astrometría** Medida de la posición de los astros en la esfera celeste.

**Bias** Imagen de calibración tomada para eliminar el ruido de lectura del detector. Se toma con el obturador cerrado y tiempo de exposición cero.

**Dark** Imagen de calibración tomada para eliminar el ruido de la corriente oscura. Se toma con el obturador cerrado y tiempo de exposición igual al de las imágenes de ciencia.

**Declinación** La otra coordenada ecatorial utilizada para localizar astros en la esfera celeste. Equivalente a la latitud terrestre. Se mide en grados a partir del ecuador celeste (positivo hacia el polo celeste norte y negativo hacia el polo celeste sur).

**Distancia geocéntrica** Distancia de un objeto a la Tierra.

**Distancia heliocéntrica** Distancia de un objeto al Sol.

**Efeméride** Posición de un objeto en la esfera celeste para un momento dado.

**Elongación** Ángulo Sol-Tierra-Objeto.

**Flat** Imagen de calibración para eliminar la diferencia de sensibilidad entre píxeles. Consiste en una imagen de una superficie uniformemente iluminada o del cielo en el momento del crepúsculo.

**Fotometría** Técnica de medida del brillo de los astros.

**Magnitud** Unidad de medida del brillo de los cuerpos celestes.

**Periastro** Punto de una órbita elíptica donde la distancia de los cuerpos es mínima.

**Perihelio** Punto de una órbita elíptica donde la distancia al Sol es mínima.

# **APÉNDICES**

# Scripts

Se detalla a continuación el nombre de cada repositorio, los scripts que contiene cada uno y sus principales funciones.

## **objects\_selection**

GitLab: [https://gitlab.com/silvia2m21/objects\\_selection/](https://gitlab.com/silvia2m21/objects_selection/)

Realiza todo el proceso de selección de ACOs y AAs a partir de las bases de datos de asteroides y cometas. Contiene los siguientes scripts:

- **configuration\_example**: ejemplo de archivo de configuración.
- **main**: menu principal con opciones.
- **create\_dirs**: genera todos los directorios donde se guardarán los archivos.
- **fortran\_compiler**: compila archivos fortran necesarios para las integraciones.
- **download\_elements**: descarga bases de datos de asteroides (MPC) y cometas (JPL).
- **create\_elements**: genera los elementos orbitales de los objetos con órbitas precisas. Utiliza `j_date` que transforma la época en formato del MPC a fecha juliana.
- **include\_missing\_comets**: incluye elementos de objetos con doble clasificación que no se encuentran en la base del JPL.
- **criterion**: aplica el criterio de clasificación.
- **find\_acos**: genera archivos con los elementos orbitales de los ACOs.
- **create\_names**: genera archivos con número, nombre y packed name de los ACOs.
- **integration**: realiza integraciones numéricas.

- **encounters**: elimina objetos que no tienen encuentros.
- **find\_acos\_final**: genera archivo final con ACOs seleccionados de acuerdo al criterio.
- **web\_table**: genera tabla para subir a la web.

Los archivos de fortran necesarios para las integraciones se encuentran en el repositorio dentro de la carpeta **fortran\_files**, mientras que otros archivos necesarios están presentes en la carpeta **other\_files**.

## **web\_acos**

GitLab: <https://gitlab.com/silvia2m21/web-acos/>

Página web que contiene información sobre los ACOs. Se genera una lista que es actualizada regularmente y se puede descargar en formato **csv**.

- **config**: archivo de configuración.
- **run**: archivo para levantar la web.
- **app**: carpeta que contiene los scripts **models** y **views** donde se configuran los elementos de la tabla de ACOs y la carpeta **templates** que contiene el índice de la web.

## **ephemeris**

GitLab: <https://gitlab.com/silvia2m21/ephemeris/>

Genera archivo **csv** con listado de efemérides de ACOs y AAs para la fecha y observatorio ingresados en la configuración. Requiere lista de objetos obtenida luego de correr **objects\_selection**.

- **configuration\_example**: ejemplo de archivo de configuración.
- **main**: menú principal.
- **ephemeris\_generator**: generador de efemérides. Se aplican los criterios para filtrar los objetos de acuerdo a condiciones de observabilidad y magnitud límite del instrumental.

## **data\_reduction**

GitLab: [https://gitlab.com/silvia2m21/data\\_reduction/](https://gitlab.com/silvia2m21/data_reduction/)

Realiza el procesamiento de las imágenes y genera datos en formato legible para trabajar en MatLab.

- `configuration_example`: ejemplo de archivo de configuración.
- `main`: menú principal con opciones.
- `download_elements`: descarga elementos orbitales de la base de datos del MPC.
- `pre_calibrate`: genera imágenes máster bias, dark y flat.
- `list_header_time`: genera listado de los archivos a procesar, necesarios para los siguientes scripts.
- `calibrate_list`: calibra las imágenes de ciencia.
- `align_images`: alinea imágenes sobre las estrellas y sobre el objeto y genera imágenes suma. Utiliza los scripts `asteroids_ephemrate` y `comets_ephemrate` para cálculo de velocidades, y el script `run_cosmics` que utiliza funciones de la implementación en Python del algoritmo de Van Dokkum (`cosmic.py`), de Malte Tewes.
- `pre_photometry`: genera tablas en formato legible para MatLab, con datos fotométricos y de coordenadas en la imagen de las estrellas de referencia y el objeto.

## **magni**

GitLab: <https://gitlab.com/silvia2m21/magni/>

Analiza datos fotométricos reportados en el MPC y agrega datos calculados en las imágenes analizadas en este proyecto.

- `configuration_example`: archivo con ejemplo de configuración.
- `main`: menú principal.
- `magnitudes`: genera tablas con datos de magnitudes de observaciones reportadas al MPC, para realizar gráficos de magnitud reducida vs. distancia heliocéntrica. Realiza los cálculos de magnitud reducida y aplica correcciones de color.
- `observations`: genera datos similares para nuestras observaciones.
- `plots.m`: realiza las gráficas de magnitud reducida vs. distancia heliocéntrica utilizando las tablas generadas en Python. Guarda los gráficos en archivos .png.

## **photometry**

GitLab: <https://gitlab.com/silvia2m21/photometry/>

Parte de los archivos generados con el repositorio `data_reduction` y genera perfiles de brillo y cálculos de magnitud.

- `centroid`: realiza el cálculo del centroide del objeto y las estrellas de referencia.
- `profiles`: realiza perfiles de brillo de un conjunto de estrellas y superpone el perfil de brillo del objeto. Realiza cálculos de magnitud visual junto con su error. Guarda los gráficos en archivos `.png`.

# Datos observacionales

A continuación se presenta información observacional de los objetos para cada fecha de observación.  $\Delta$  es la distancia geocéntrica,  $r$  la distancia heliocéntrica,  $\alpha$  el ángulo de fase y  $f$  la anomalía verdadera.

Objeto	Fecha	$\Delta$	$r$	$\alpha$	$f$	Objeto	Fecha	$\Delta$	$r$	$\alpha$	$f$
944	13/09/16	5.45	5.96	8.8	226.2	63252	07/11/16	5.50	6.40	4.0	44.8
	30/09/17	3.20	3.92	11.2	254.6	70032	25/02/01	7.13	7.87	5.1	63.0
2060	11/09/13	16.62	17.62	0.5	152.5		22/08/17	3.95	4.62	10.3	190.9
	21/10/14	17.22	17.95	2.2	156.8		14/09/17	3.71	4.60	6.4	192.8
	29/09/15	17.24	18.19	1.0	160.3		12/10/17	3.59	4.58	1.7	195.1
	18/10/15	17.40	18.21	1.9	160.5	83982	14/07/07	14.01	14.74	2.8	37.9
	01/11/15	17.57	18.21	2.4	160.6	85490	18/04/07	5.27	5.69	9.6	162.5
	26/09/16	17.43	18.41	0.6	163.8	87555	29/09/13	26.28	27.27	0.3	102.9
	05/10/16	17.47	18.41	1.1	163.9		28/10/13	26.54	27.33	1.3	103.1
	05/11/16	17.80	18.43	2.4	164.2		22/09/16	28.34	29.34	0.2	109.8
	26/10/17	17.80	18.60	1.9	167.6	90572	28/09/13	3.07	3.83	10.9	113.8
	09/11/17	17.98	18.60	2.4	167.7		02/10/13	3.04	3.84	10.1	114.3
	28/09/19	17.81	18.81	0.2	174.2		13/11/13	2.98	3.93	5.0	119.4
5164	23/11/19	1.23	2.22	2.5	300.8		01/12/13	3.11	3.96	8.2	121.5
6144	05/07/16	3.27	4.19	6.8	92.2		23/08/19	1.92	2.92	4.2	44.3
	09/09/18	5.14	6.08	3.9	152.0		03/09/19	1.97	2.94	7.1	46.6
	19/10/18	5.20	6.13	3.5	154.1		13/09/20	3.12	3.76	12.9	109.3
	09/11/18	5.42	6.16	6.5	155.3	95626	24/03/04	19.65	20.61	0.8	288.6
	28/09/19	5.52	6.44	3.8	171.4	118624	09/03/21	4.33	3.79	4.0	306.6
	30/11/19	5.74	6.47	6.3	174.4	119039	18/08/14	4.54	5.24	8.6	153.3
8405	13/06/01	6.20	7.16	3.0	332.0		18/11/14	4.63	5.31	8.2	159.9
10199	04/02/08	13.30	13.40	4.2	32.5		29/05/20	2.43	3.32	9.8	10.9
20898	21/08/20	3.65	4.40	9.6	121.5	120061	04/02/08	10.94	11.08	5.1	16.8
29981	05/09/00	11.46	12.38	2.1	9.6	145485	03/11/15	1.55	2.43	13.2	42.6
	12/08/02	12.80	13.14	4.2	30.3		04/12/15	1.59	2.54	7.4	51.6
30512	05/07/16	2.48	3.14	15.8	73.2	145486	30/11/10	7.71	8.29	5.7	7.9
44594	08/09/13	19.34	20.34	0.2	304.4	145627	22/09/20	6.39	7.02	6.6	233.3
	14/10/14	18.97	19.85	1.4	309.2	187661	16/10/17	17.60	17.74	3.2	71.1
	23/10/15	18.57	19.42	1.6	314.1		15/09/18	17.63	18.24	2.6	75.4
	07/11/15	18.73	19.40	2.2	314.2	196256	05/09/07	2.99	3.46	15.9	224.4
	26/08/16	18.21	19.09	1.6	318.3		21/09/07	3.11	3.37	17.2	226.2
	22/09/16	18.06	19.06	0.2	318.6	210718	03/10/14	1.84	2.82	5.3	287.3
	28/09/19	17.16	18.13	0.8	335.0		15/11/14	1.83	2.67	13.6	297.2
	30/11/19	17.45	18.09	2.4	336.0		10/12/14	2.01	2.59	20.1	303.5
	16/01/21	17.89	17.87	3.2	342.5	237838	26/09/16	3.85	4.84	1.9	229.7
52007	08/08/16	2.90	3.45	15.4	323.3	248590	11/01/16	1.35	1.45	40.9	272.2
	03/09/16	2.59	3.42	10.9	327.6		12/02/16	1.09	1.14	52.5	296.4
	30/10/16	2.46	3.37	7.8	337.5		10/10/20	1.55	2.21	23.3	242.4
52872	14/04/11	6.37	7.22	4.5	81.2	250112	21/09/08	7.80	8.65	3.8	349.9
54598	13/09/20	14.20	14.28	4.0	302.4	275618	09/03/21	1.90	2.70	14.6	316.5
	16/01/21	13.49	14.19	2.9	304.9	281371	20/09/08	10.97	11.69	3.5	297.4
55576	09/03/03	14.33	15.19	1.9	1.0	322713	20/11/19	1.42	2.32	12.5	93.8
60558	12/09/16	5.43	6.30	4.9	40.9	322966	21/10/17	1.40	2.05	25.9	95.3
	04/10/16	5.35	6.34	1.4	42.5	323137	09/03/21	2.65	3.56	7.6	322.2

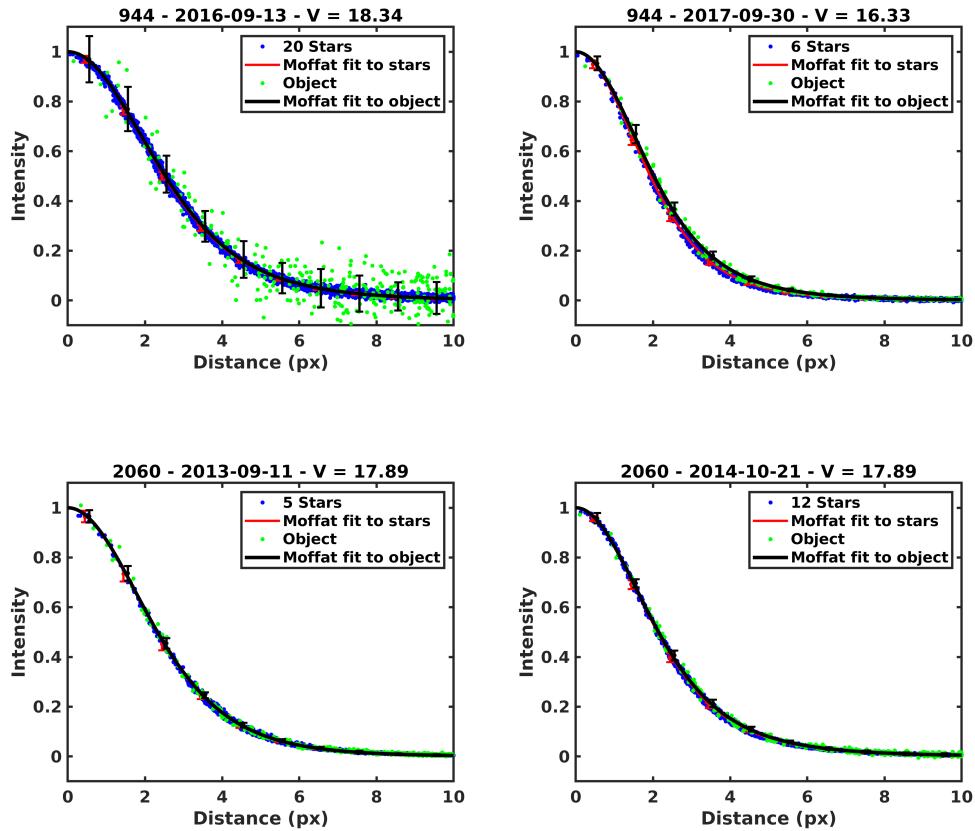
Objeto	Fecha	$\Delta$	$r$	$\alpha$	$f$	Objeto	Fecha	$\Delta$	$r$	$\alpha$	$f$
332685	02/09/15	6.82	7.69	4.1	43.5		05/12/16	2.53	3.00	18.1	338.4
	01/10/16	7.52	8.45	2.8	62.8	2007 VH <sub>305</sub>	22/11/08	7.85	8.64	4.2	330.4
	07/11/16	7.70	8.53	3.9	64.4	2009 UA <sub>17</sub>	10/09/18	2.50	3.47	5.1	272.0
	31/10/17	8.39	9.34	1.8	78.5		01/10/18	2.39	3.38	1.9	275.4
	15/11/17	8.48	9.37	2.7	79.1	2009 VD <sub>78</sub>	25/09/17	3.06	3.48	16.0	316.3
	05/01/18	9.20	9.49	5.8	80.9		17/10/17	3.26	3.45	16.8	319.9
347784	04/09/14	2.15	3.02	11.2	110.3		15/11/18	2.51	3.38	9.1	31.2
349933	29/05/20	6.21	7.11	4.07	42.9	2010 ER <sub>22</sub>	18/01/21	1.73	2.64	10.2	49.3
366186	21/08/20	1.81	2.63	15.5	37.4	2010 RP <sub>80</sub>	18/08/15	0.57	1.57	9.1	287.9
371522	19/08/14	3.82	4.50	10.4	293.7	2011 LA <sub>19</sub>	18/11/16	0.95	1.57	36.6	84.0
	16/09/14	3.58	4.48	6.4	296.7	2012 PD <sub>26</sub>	08/09/13	10.64	11.65	0.5	52.7
406803	21/08/20	1.62	2.61	5.6	264.7	2012 PV <sub>45</sub>	26/09/16	17.05	17.84	2.1	326.9
459971	09/09/16	7.06	8.00	2.8	76.7		27/09/17	16.76	17.59	1.9	332.7
	01/10/16	7.07	8.07	0.6	77.7		22/10/17	17.04	17.57	2.8	333.1
	25/11/16	7.69	8.24	5.9	80.1		26/11/18	17.28	17.36	3.3	339.5
465293	10/09/13	2.97	3.92	5.8	236.1	2013 KZ <sub>18</sub>	15/10/14	18.22	18.85	2.4	354.0
471339	14/10/14	9.53	10.40	2.8	305.0	2013 NS <sub>11</sub>	14/01/15	2.48	2.88	19.3	31.2
472265	02/09/13	9.70	10.63	2.2	332.4	2013 NT <sub>33</sub>	19/10/18	17.60	18.56	0.8	308.3
	21/10/14	9.48	10.40	2.0	346.1	2013 RN <sub>30</sub>	30/09/13	7.28	8.24	2.0	342.1
	13/11/14	9.60	10.40	3.4	346.7	2014 OG <sub>392</sub>	27/11/18	9.85	10.28	5.1	323.1
487496	02/10/14	2.45	3.43	4.7	7.8	2014 SS <sub>303</sub>	18/08/14	5.97	6.76	5.7	0.9
	03/11/14	2.51	3.44	6.6	13.5	2014 TK <sub>34</sub>	18/08/14	4.28	4.89	10.1	308.9
494667	07/07/16	1.11	1.70	34.8	333.8	2014 VF <sub>40</sub>	20/09/14	2.27	2.86	18.3	293.6
	03/10/16	0.86	1.70	26.0	24.3		02/11/14	1.85	2.70	13.3	304.5
499522	28/09/19	19.18	20.18	0.3	254.4		11/12/14	1.84	2.58	17.2	314.7
501585	20/11/19	4.29	5.00	8.6	30.5	2014 WY <sub>359</sub>	24/09/14	2.48	3.33	10.6	295.5
503273	28/08/17	6.24	7.04	5.3	326.1		29/10/14	2.24	3.21	4.2	302.0
	22/10/17	6.00	6.96	2.5	329.6	2015 BK <sub>22</sub>	15/09/20	1.38	2.23	17.5	347.5
	21/11/19	5.84	6.81	1.8	22.8		09/10/20	1.32	2.22	14.3	356.3
504160	26/08/16	4.57	5.31	8.0	235.9		16/01/21	2.06	2.31	25.2	30.1
	05/11/16	4.18	5.05	6.1	241.0	2015 BV <sub>512</sub>	18/11/14	1.22	1.33	45.3	345.8
515718	23/10/14	3.18	4.17	1.9	302.4	2015 BW <sub>524</sub>	03/01/15	5.04	5.71	7.7	290.7
	21/11/14	3.26	4.13	7.5	305.9	2015 KM <sub>119</sub>	11/09/16	2.22	2.97	15.0	13.2
523673	03/09/19	18.86	19.85	0.6	291.1	2015 PJ <sub>311</sub>	01/12/18	8.67	9.51	3.3	72.2
523710	25/08/16	17.97	18.96	0.7	345.4	2015 PO <sub>324</sub>	08/10/15	1.60	2.57	7.0	6.3
	26/09/16	18.14	18.95	1.8	345.9		28/12/15	2.18	2.66	20.5	28.6
	06/11/16	18.67	18.93	2.9	346.5	2015 RK <sub>245</sub>	30/09/15	2.08	3.07	3.0	322.1
523720	23/08/19	15.93	16.93	0.4	333.4	2015 RR <sub>235</sub>	05/12/15	1.84	2.64	15.1	71.8
523727	23/08/19	22.26	23.21	0.8	238.7	2015 TN <sub>178</sub>	06/02/16	3.39	3.23	16.9	298.3
523729	03/10/14	11.05	12.03	0.9	349.9	2015 TS <sub>350</sub>	14/11/14	5.04	5.52	9.4	33.9
523734	07/12/17	18.33	18.87	2.5	350.6		12/01/16	7.17	7.26	7.8	67.6
523739	28/11/18	11.01	11.24	4.9	51.8	2015 UH <sub>67</sub>	04/09/15	5.96	6.66	6.6	0.5
523797	27/09/17	10.19	11.09	2.4	27.2		17/10/15	5.68	6.66	1.4	3.1
	21/10/17	10.50	11.13	4.1	28.1		06/11/15	5.73	6.67	3.1	4.3
	29/09/18	11.00	11.77	3.3	39.5	2015 VA <sub>53</sub>	23/09/15	1.78	2.68	11.6	72.3
527443	21/09/08	10.2	11.16	1.6	86.3		04/10/15	1.81	2.74	9.3	74.9
	30/09/14	14.06	14.63	3.3	130.7		16/11/15	2.25	3.00	14.0	84.1
	31/10/14	13.88	14.67	2.4	131.2	2015 VV <sub>1</sub>	04/09/14	7.85	8.37	6.1	19.3
	21/11/14	13.89	14.70	2.3	131.5		25/11/14	7.61	8.46	3.5	23.5
	15/12/15	14.46	15.18	2.6	137.5	2015 XX <sub>351</sub>	07/11/16	1.79	2.62	14.3	53.9
540205	10/11/17	2.96	3.60	13.3	326.8	2015 YY <sub>18</sub>	05/12/16	3.71	4.51	8.1	66.1
	14/12/17	3.07	3.54	15.1	332.7	2016 BJ <sub>81</sub>	12/03/18	4.80	5.51	7.8	45.9
1999 LE <sub>31</sub>	24/09/16	8.63	9.34	4.5	226.9	2016 ED <sub>85</sub>	22/08/20	0.58	1.46	31.8	275.4
	31/12/16	8.84	9.11	6.0	229.8		14/09/20	0.31	1.24	36.2	291.0
	30/08/17	7.91	8.49	5.8	237.6	2016 EJ <sub>196</sub>	17/08/17	1.80	2.71	11.5	72.2
	07/12/17	7.79	8.22	6.3	241.1		08/09/17	1.92	2.79	12.3	77.2
	29/11/18	6.86	7.17	7.6	256.0	2016 KX <sub>4</sub>	14/10/17	1.92	2.67	16.5	50.7
	24/08/19	5.45	6.33	5.0	270.6		18/11/17	2.04	2.85	13.7	59.6
2000 CN <sub>152</sub>	29/10/17	4.01	4.87	6.4	99.5	2016 NG <sub>39</sub>	14/12/17	3.01	3.72	11.7	107.9
2000 XO <sub>8</sub>	22/10/17	0.50	1.48	12.1	6.4		17/01/18	3.44	3.92	13.4	111.8
2002 XF <sub>46</sub>	29/09/13	3.40	4.33	5.6	214.4	2016 NX	12/09/16	0.44	1.36	30.2	34.1
2004 RT <sub>109</sub>	17/09/18	0.68	1.67	5.9	347.1	2016 PM <sub>1</sub>	26/08/16	1.44	2.28	18.0	88.4
	30/11/18	1.23	1.73	33.7	28.6		22/10/16	1.89	2.64	16.8	102.6
2005 CR <sub>16</sub>	19/12/20	2.70	3.48	11.2	323.2	2016 PN <sub>66</sub>	25/10/16	1.99	2.90	9.4	3.0
2005 NP <sub>82</sub>	07/04/21	2.83	3.41	15.2	46.3		19/12/16	2.72	2.97	19.3	17.9
2005 XR <sub>132</sub>	09/03/21	1.39	2.27	14.6	36.9	2016 US <sub>109</sub>	30/11/16	1.10	1.96	19.4	26.0
2006 BF <sub>208</sub>	09/03/21	2.29	3.06	13.6	349.6		03/02/17	2.13	2.31	25.2	53.4
2006 UA <sub>150</sub>	21/08/20	2.09	3.09	2.7	311.3	2016 VF <sub>1</sub>	15/12/14	7.17	7.49	7.3	291.3
2007 UL <sub>147</sub>	15/08/16	2.41	3.17	14.1	315.3	2016 WP <sub>51</sub>	09/09/16	1.47	2.25	20.3	353.2
	09/09/16	2.17	3.12	7.6	320.3	2016 YB <sub>13</sub>	25/09/17	2.53	3.25	14.0	10.4
	01/10/16	2.08	3.08	1.8	324.7	2017 MZ <sub>4</sub>	16/08/17	2.25	3.25	9.3	16.5
	19/11/16	2.35	3.02	15.7	334.9	2017 QO <sub>33</sub>	26/09/16	5.50	6.49	1.6	298.7

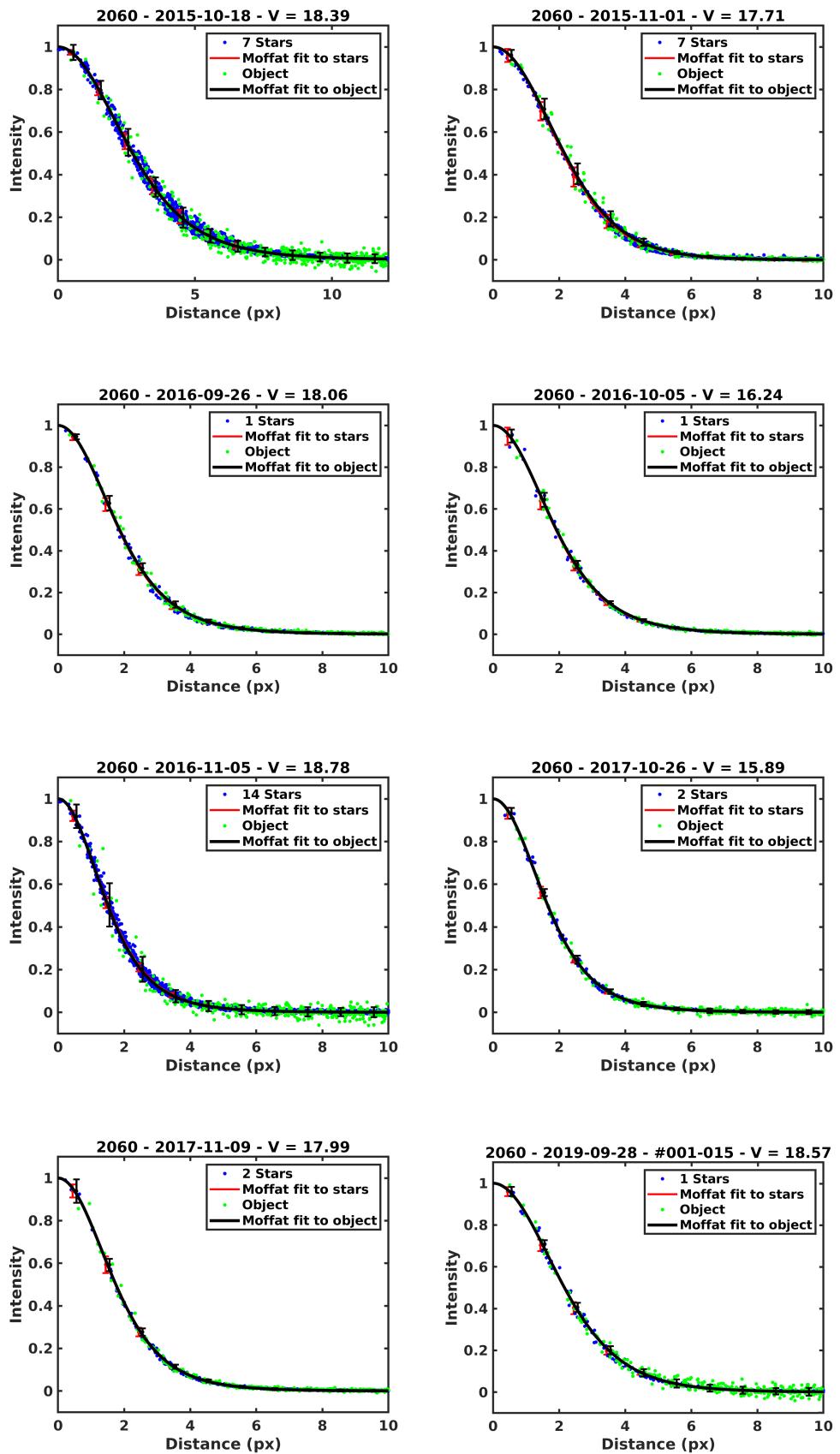
<b>Objeto</b>	<b>Fecha</b>	$\Delta$	$r$	$\alpha$	$f$	<b>Objeto</b>	<b>Fecha</b>	$\Delta$	$r$	$\alpha$	$f$
2017 RG <sub>16</sub>	05/10/16	5.51	6.45	3.2	299.3	2017 RJ <sub>16</sub>	13/07/07	1.63	2.64	3.5	3.3
	28/10/16	6.95	7.25	7.6	343.2		24/08/19	2.25	2.97	15.8	76.0
	27/09/17	6.29	7.13	4.7	6.9		25/09/17	1.13	1.85	28.1	24.0
	22/10/17	6.47	7.15	6.1	8.7		29/09/13	1.16	2.09	13.7	287.2
	24/08/19	7.77	8.57	4.4	50.1		12/10/13	1.23	2.07	19.3	291.5
	11/10/17	0.55	1.49	21.2	329.2		09/11/13	1.46	2.04	27.0	301.1
	09/09/16	5.31	6.26	3.5	324.8		08/06/16	1.60	2.34	20.8	228.4
2017 WW <sub>14</sub>	18/11/16	5.46	6.10	7.4	330.5	324P	18/04/15	2.55	2.77	21.2	305.8
2017 YL <sub>2</sub>	10/11/16	3.41	4.29	6.7	259.3	331P	15/12/15	2.90	1.95	6.0	37.1
2018 AS <sub>18</sub>	26/08/18	2.27	2.58	22.9	76.6	354P	27/03/17	2.21	3.07	11.1	126.2
2018 LN <sub>6</sub>	19/10/18	1.04	2.03	4.5	69.2	P/2015 X <sub>6</sub>	24/08/19	1.57	2.23	23.6	275.4
	06/11/18	1.20	2.13	12.5	75.6		18/11/15	1.43	2.36	11.1	323.3
2018 RR <sub>2</sub>	24/09/16	8.51	9.17	4.9	305.8						
	02/10/16	8.57	9.15	5.3	306.1						
2019 KN <sub>19</sub>	21/08/20	2.10	3.09	4.9	29.7						
2019 UH <sub>12</sub>	11/09/18	7.20	7.91	5.4	0.7						
2019 WV <sub>2</sub>	29/11/18	4.30	4.70	11.5	275.2						
2020 MK <sub>4</sub>	16/07/20	5.22	6.23	1.3	149.3						

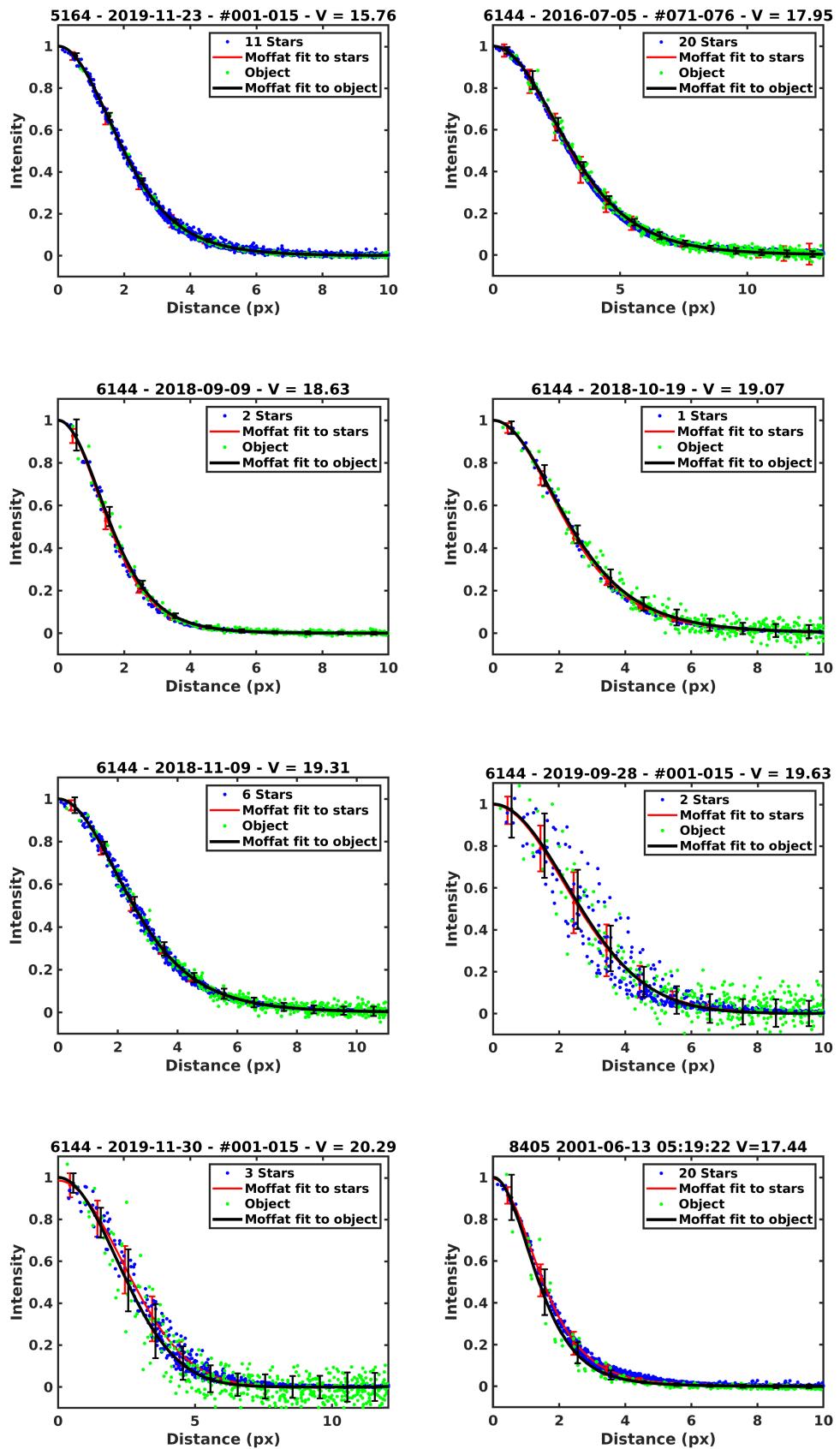
# Perfiles fotométricos

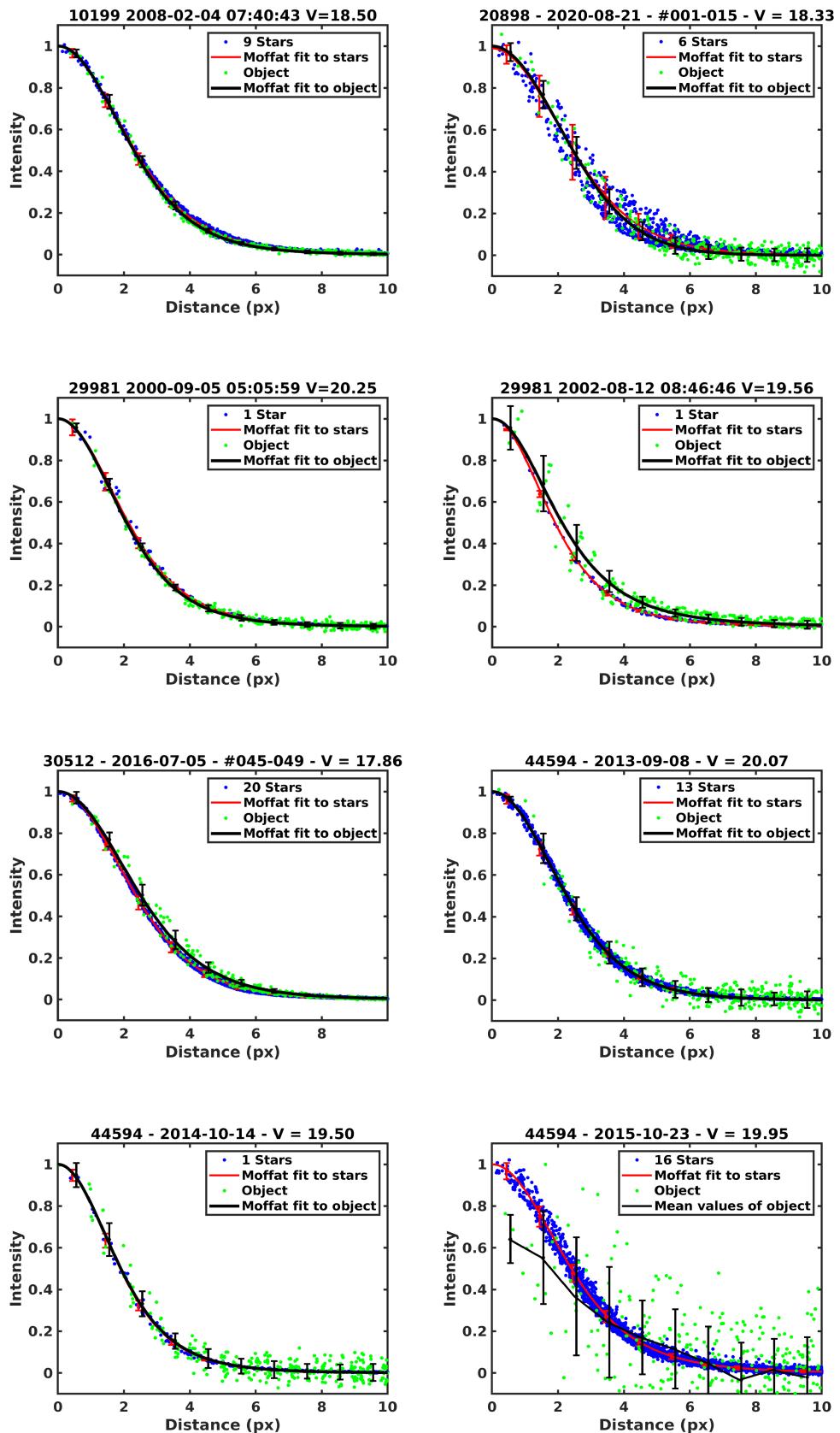
En este apéndice se presentan todos los perfiles de brillo realizados, ordenados por nombre del objeto, haciendo la distinción entre ACO y AA.

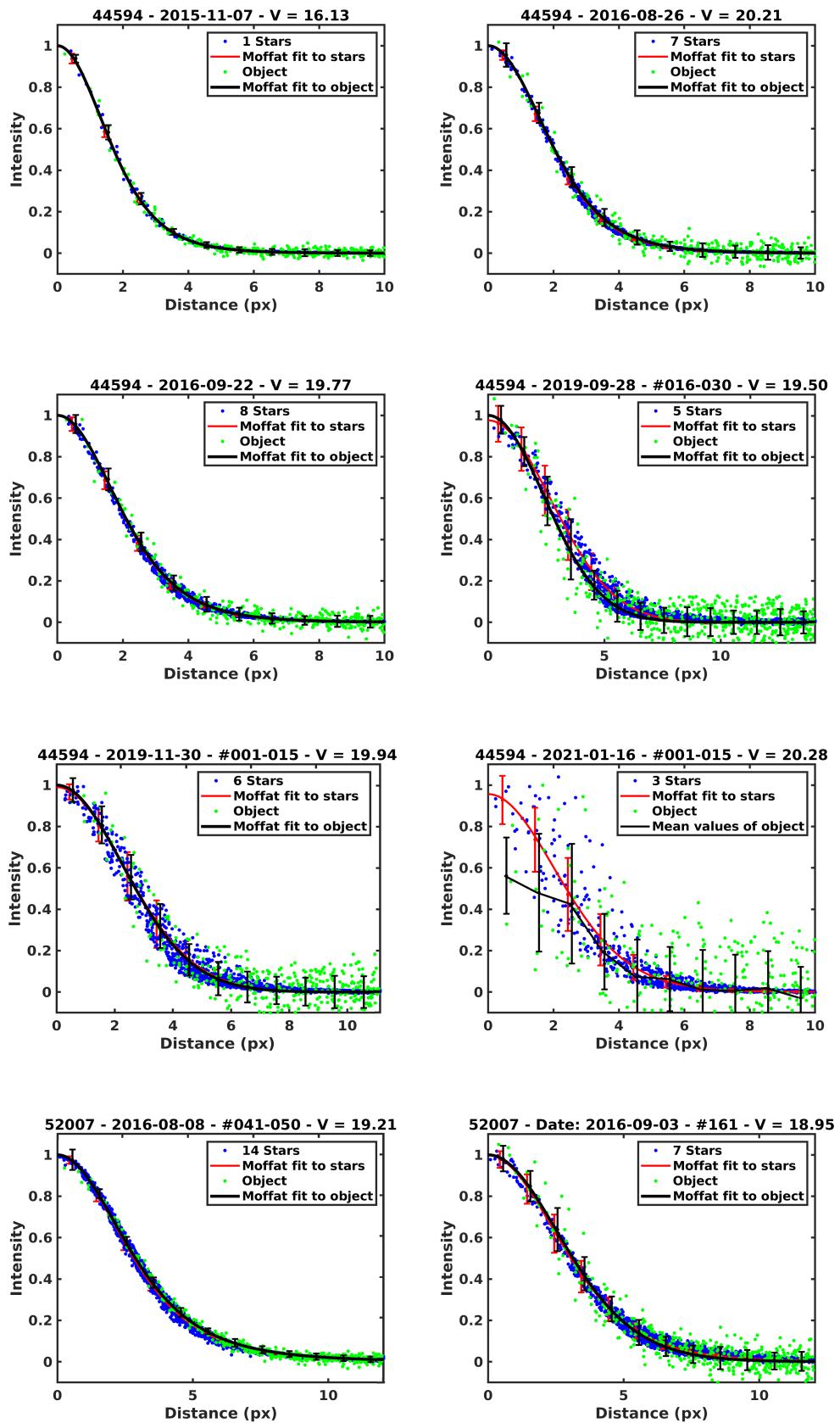
## ACOs

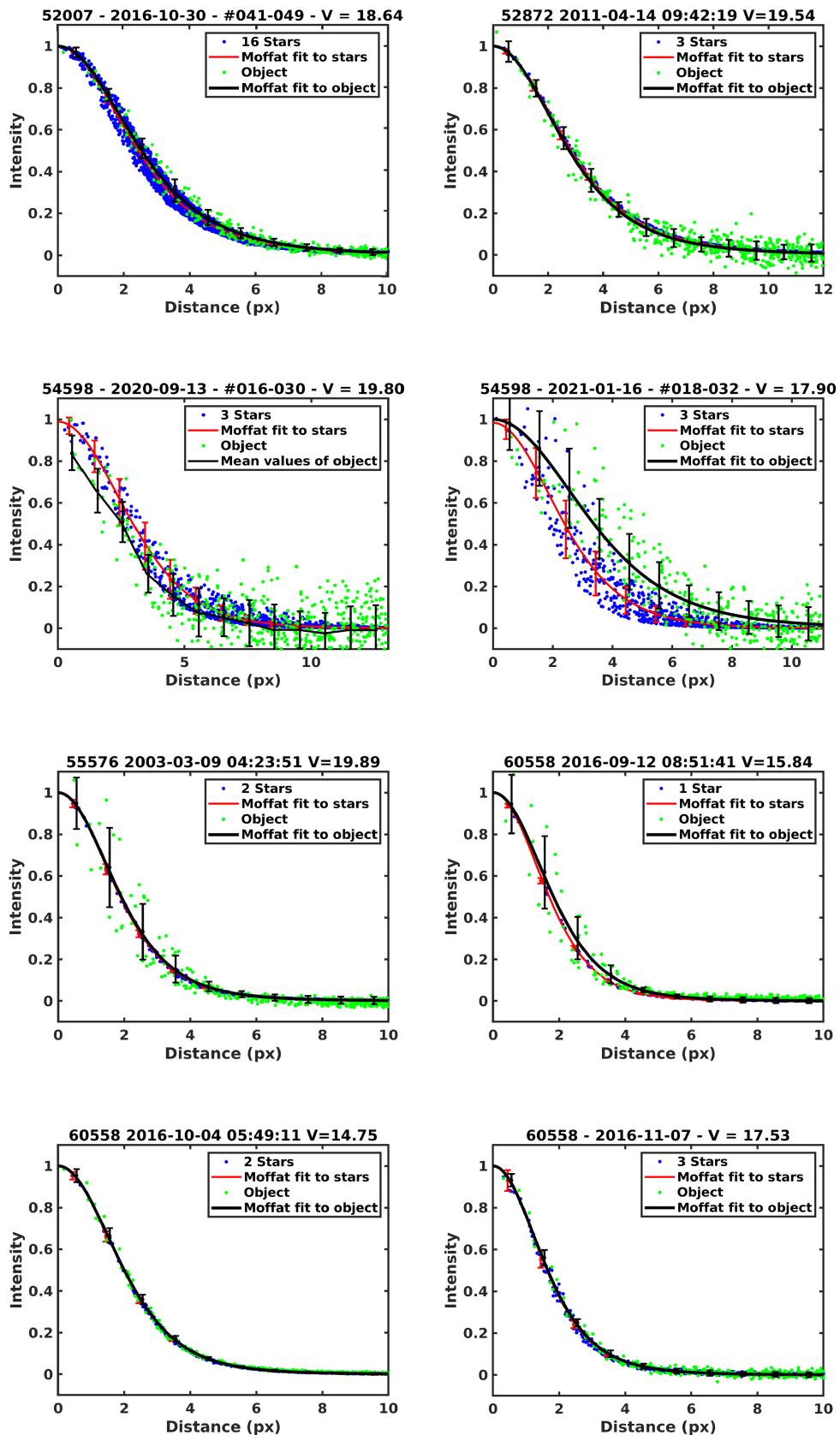


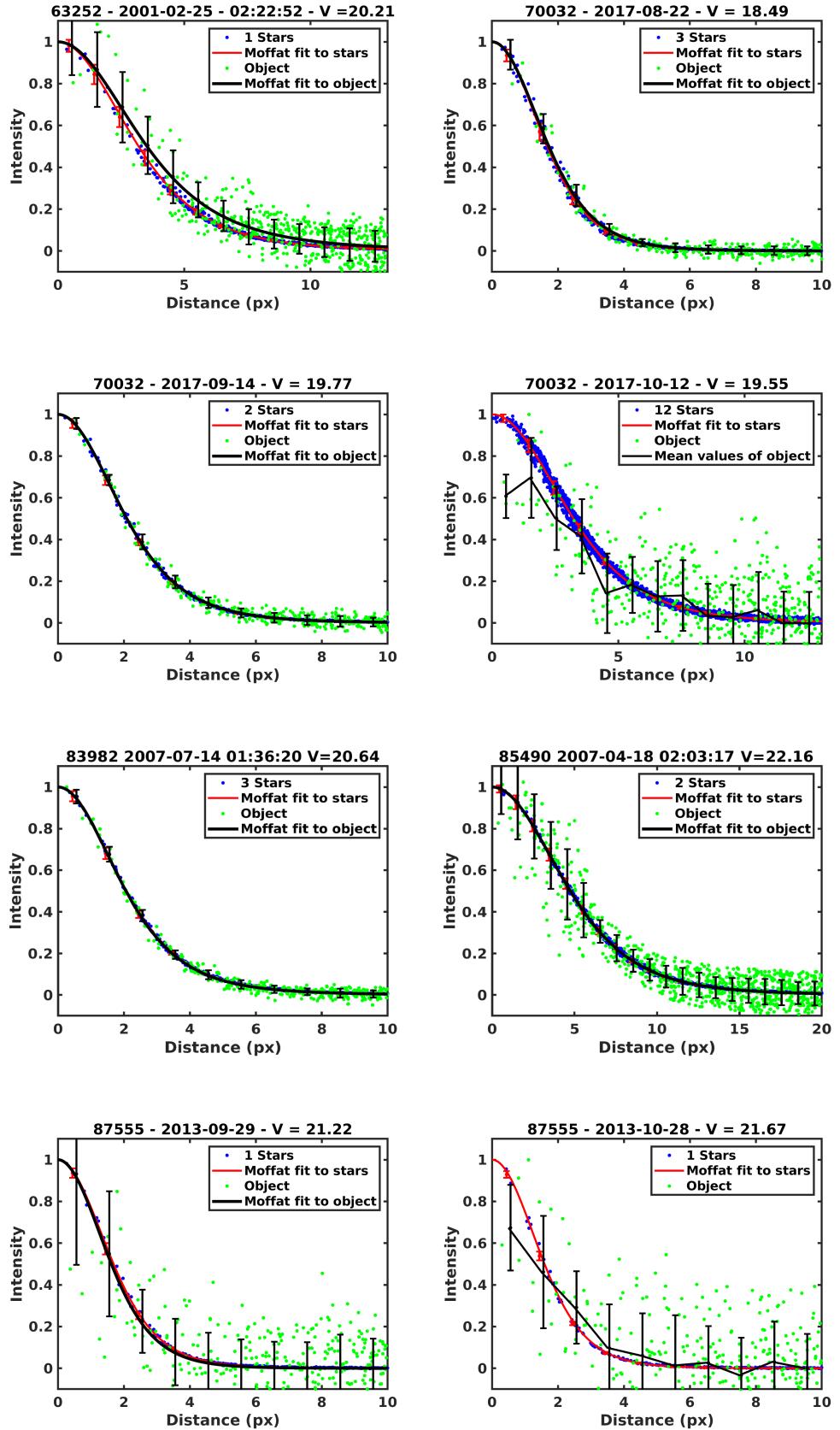


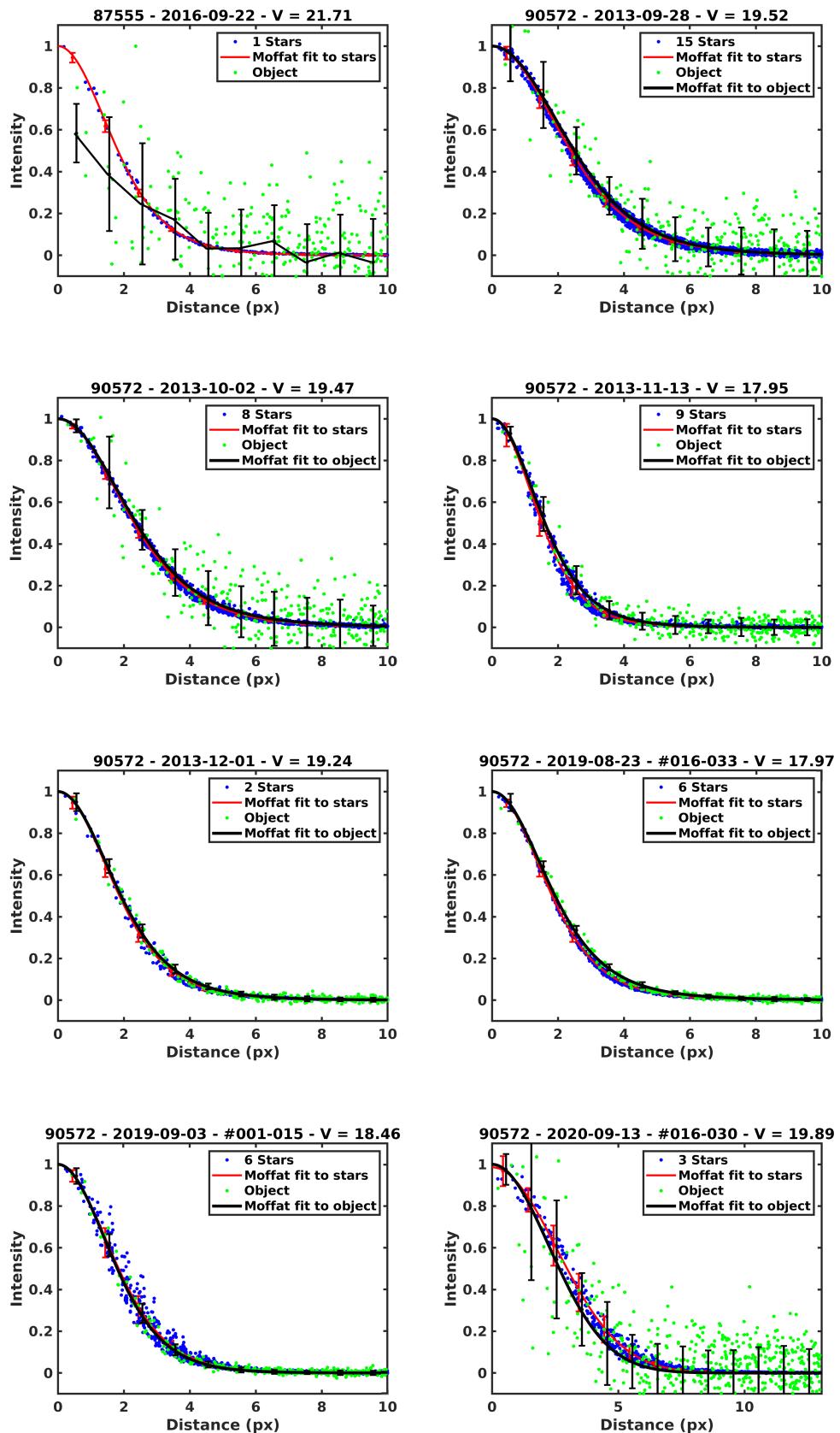


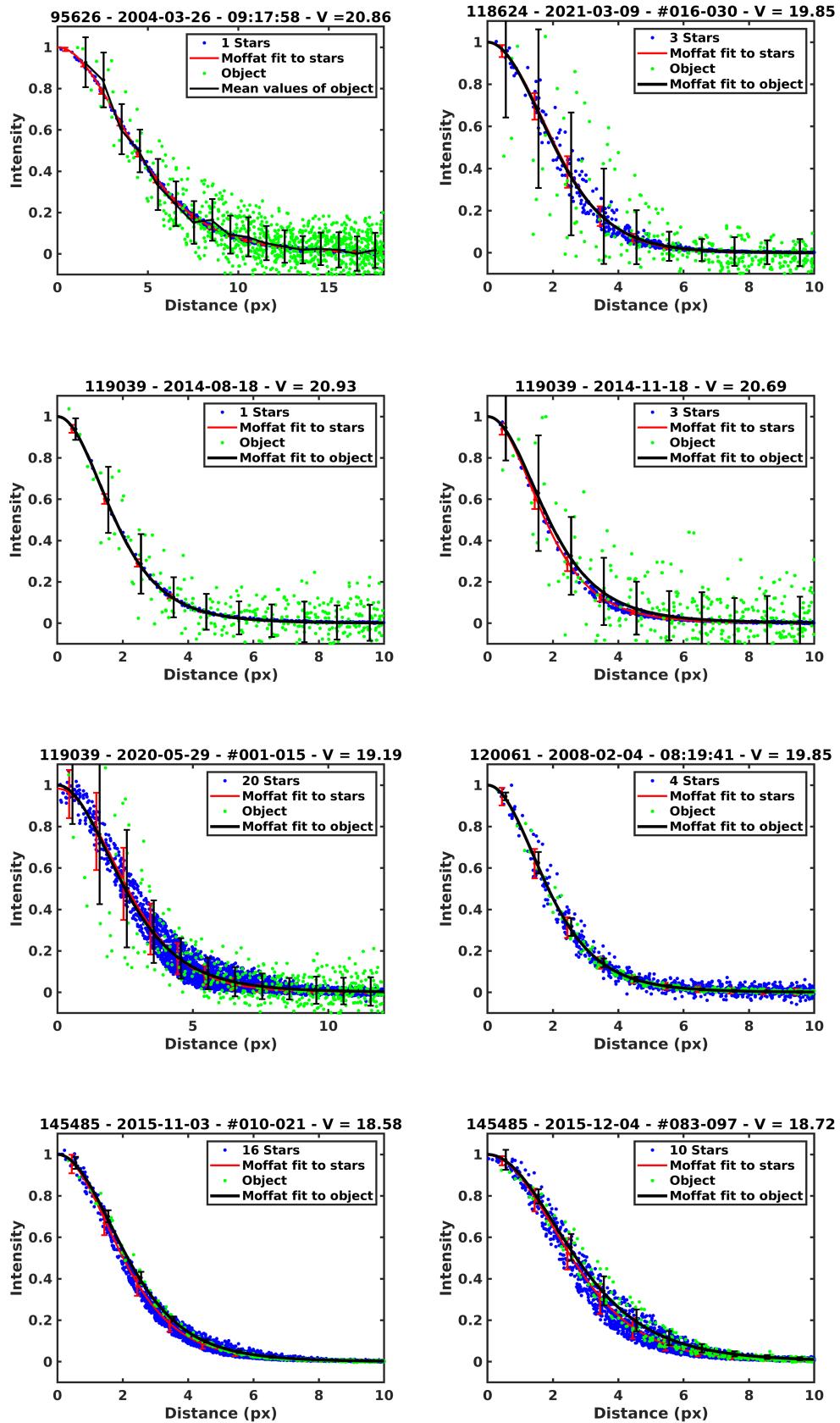


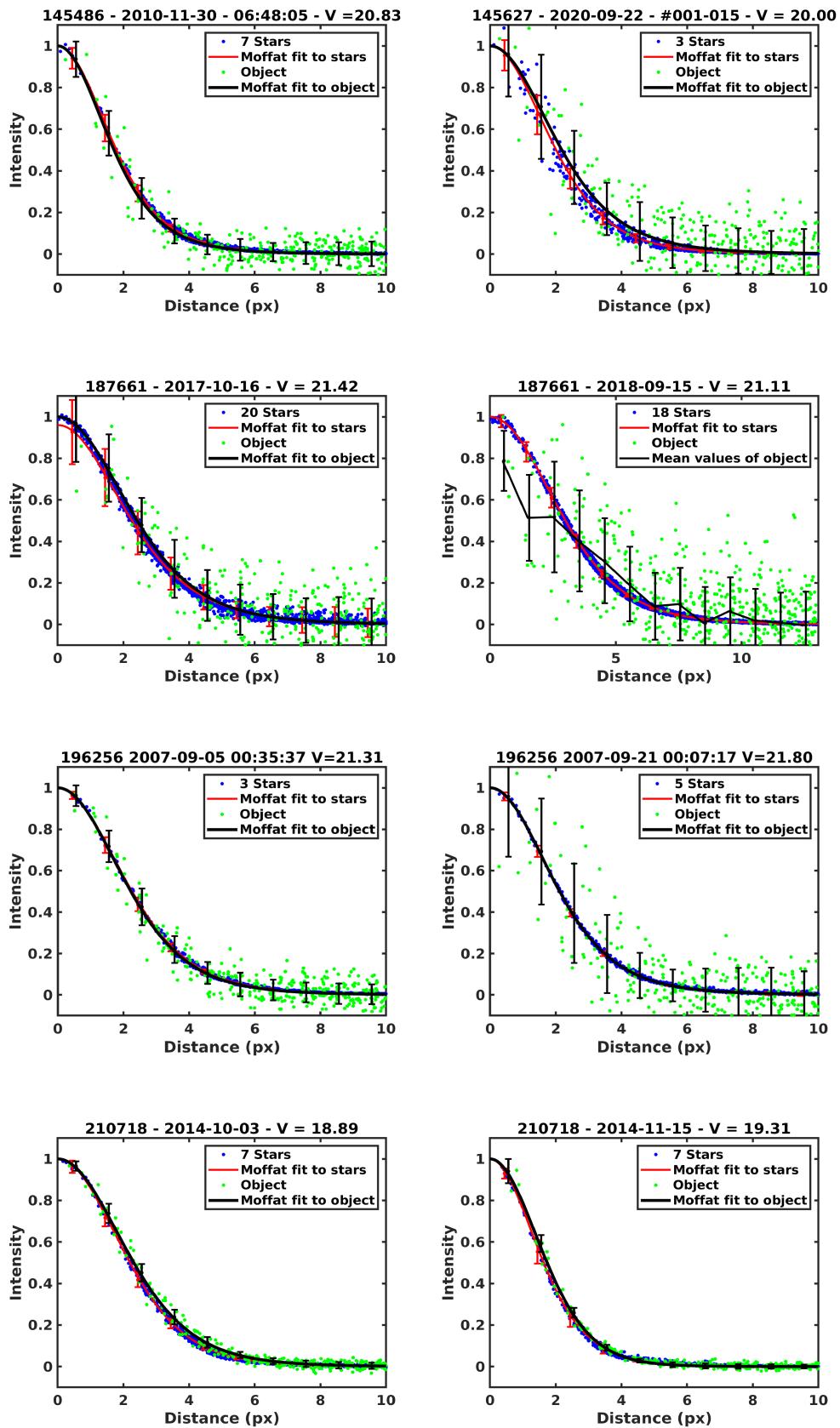


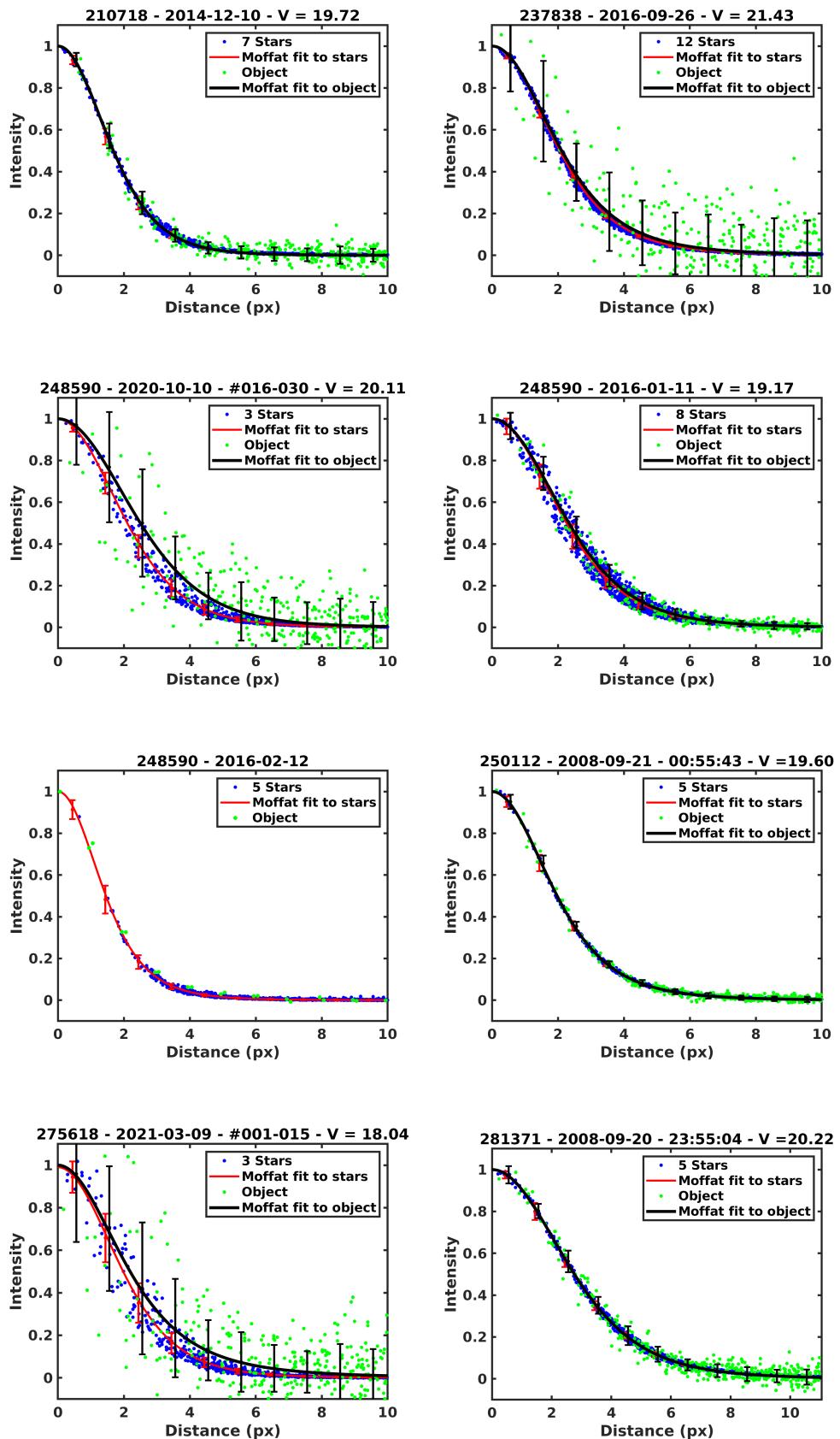


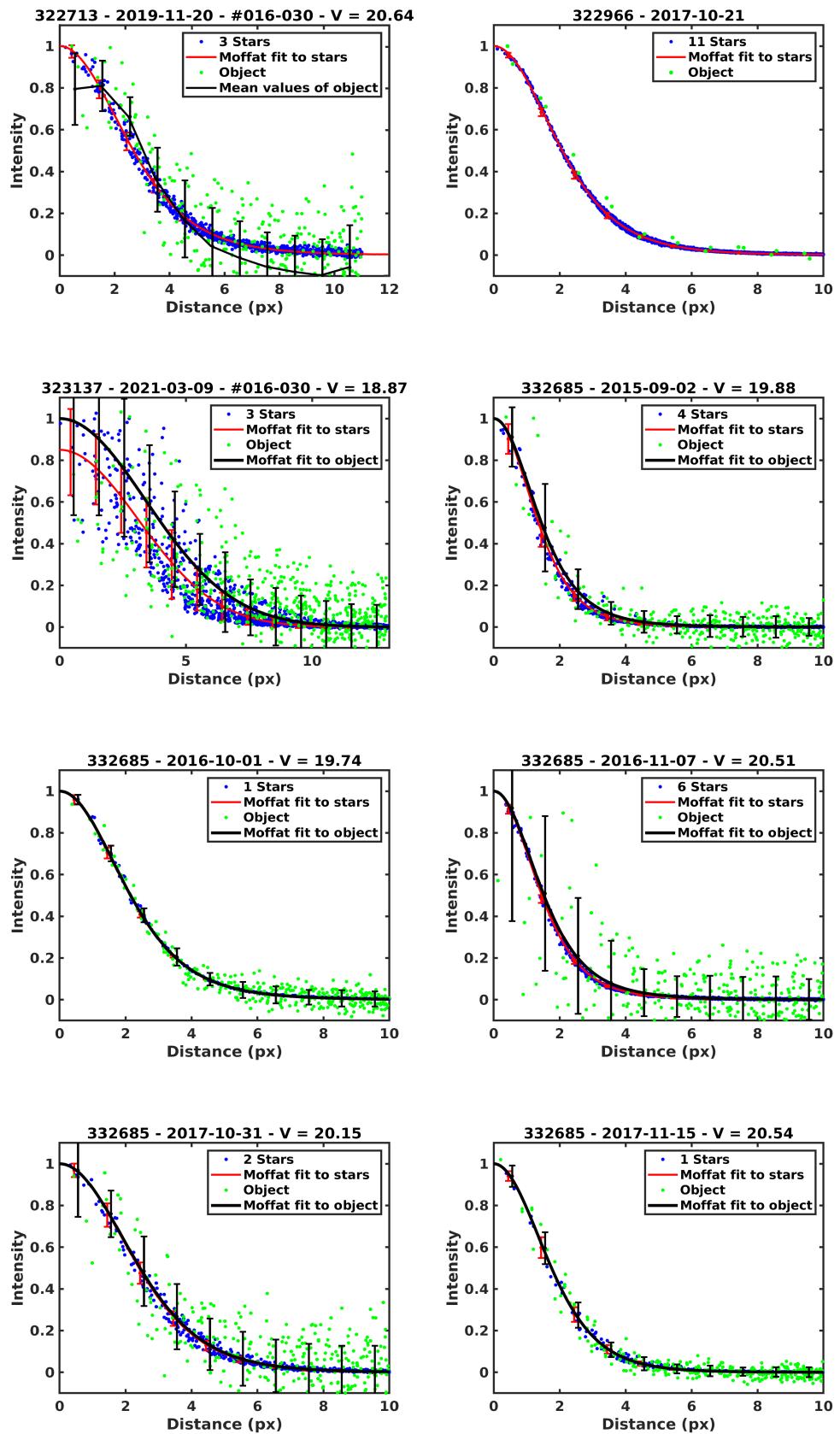


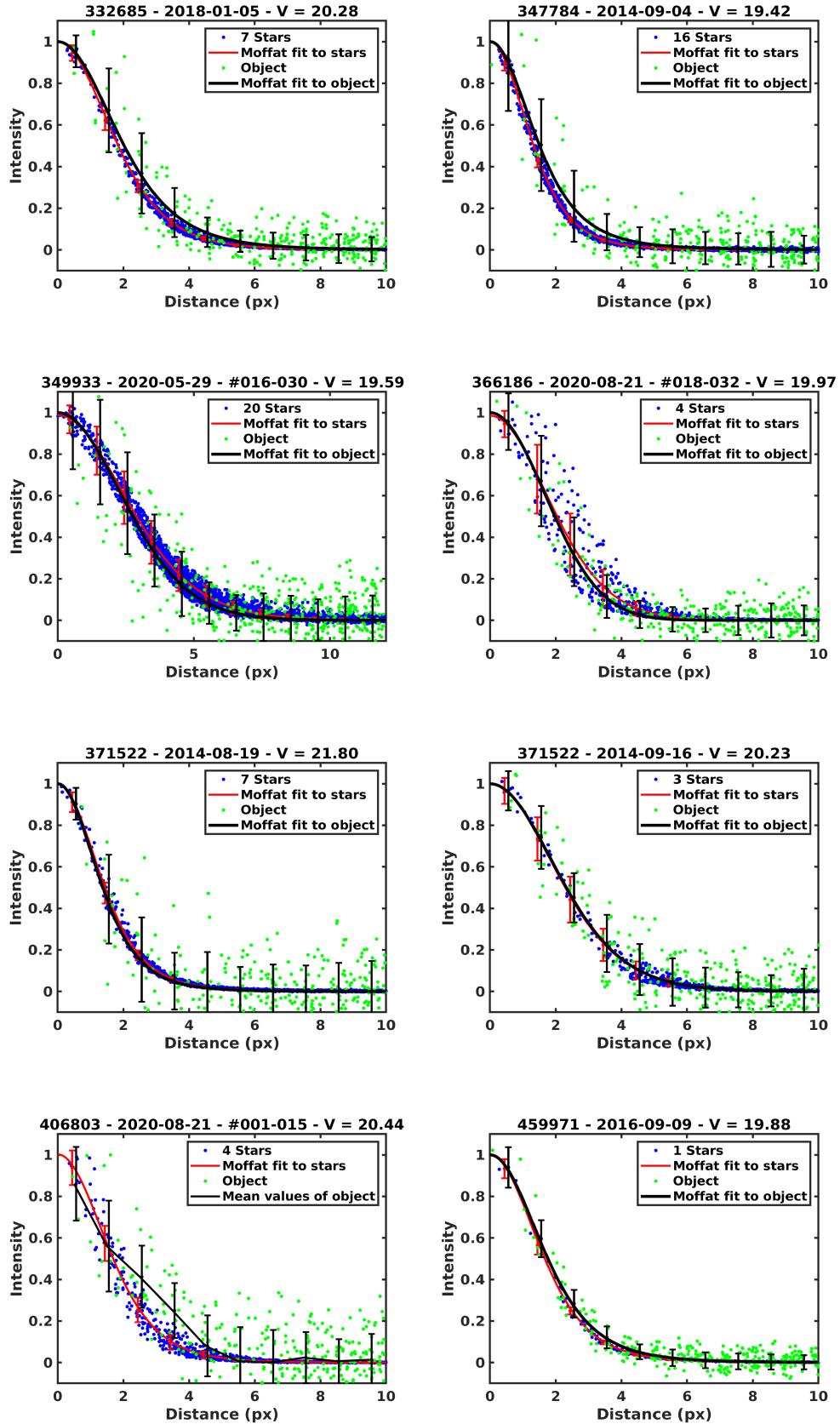


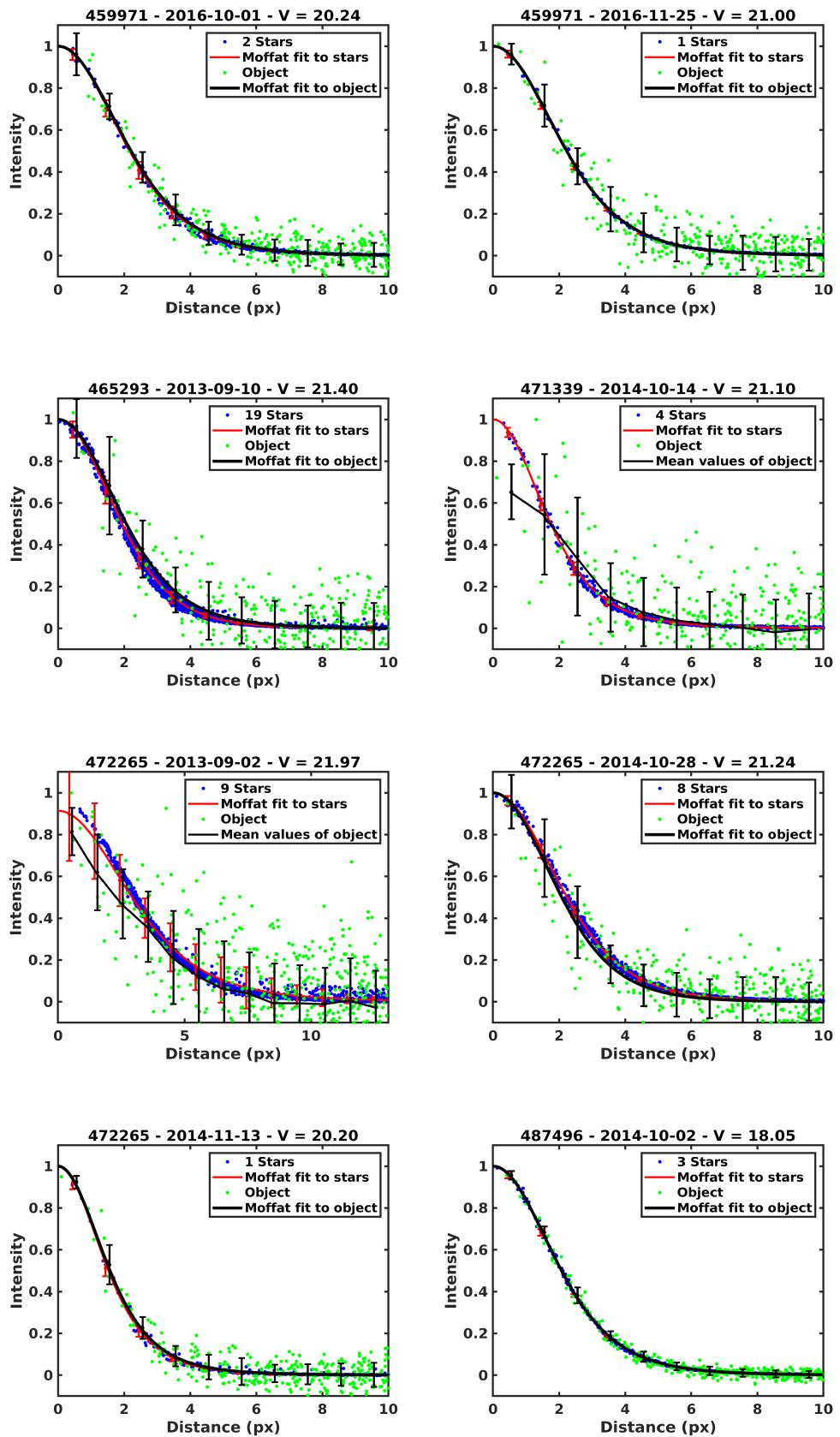


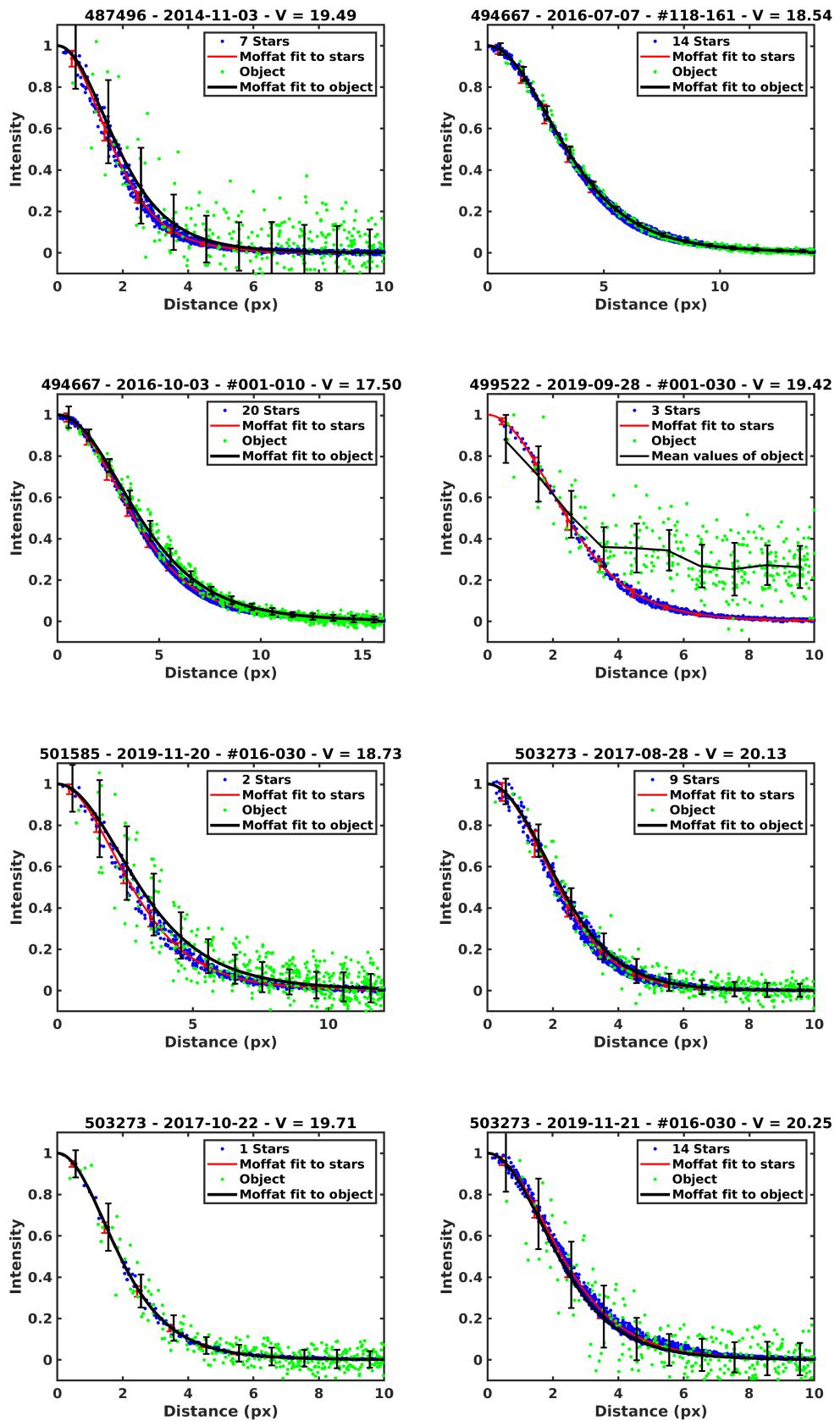


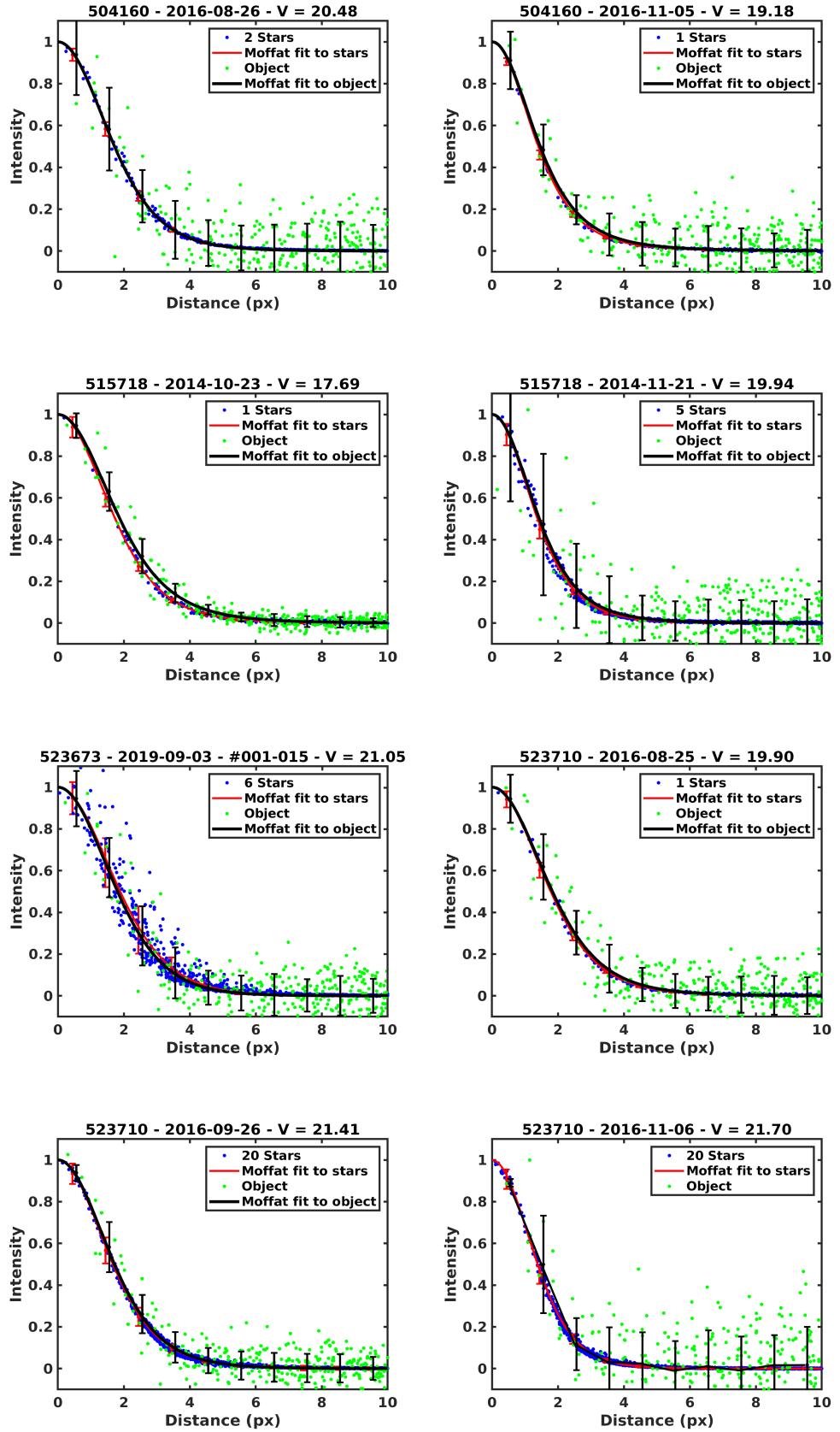


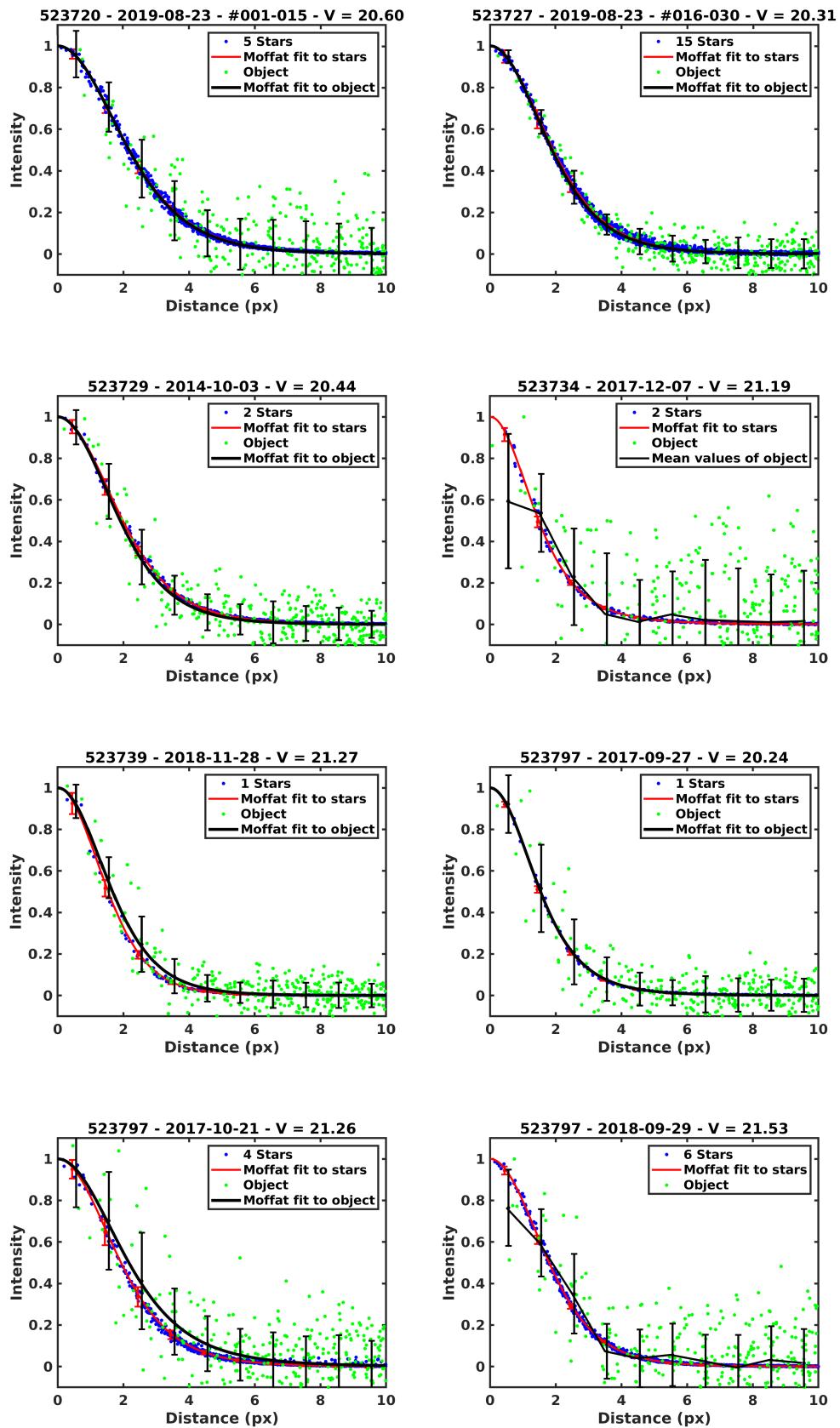


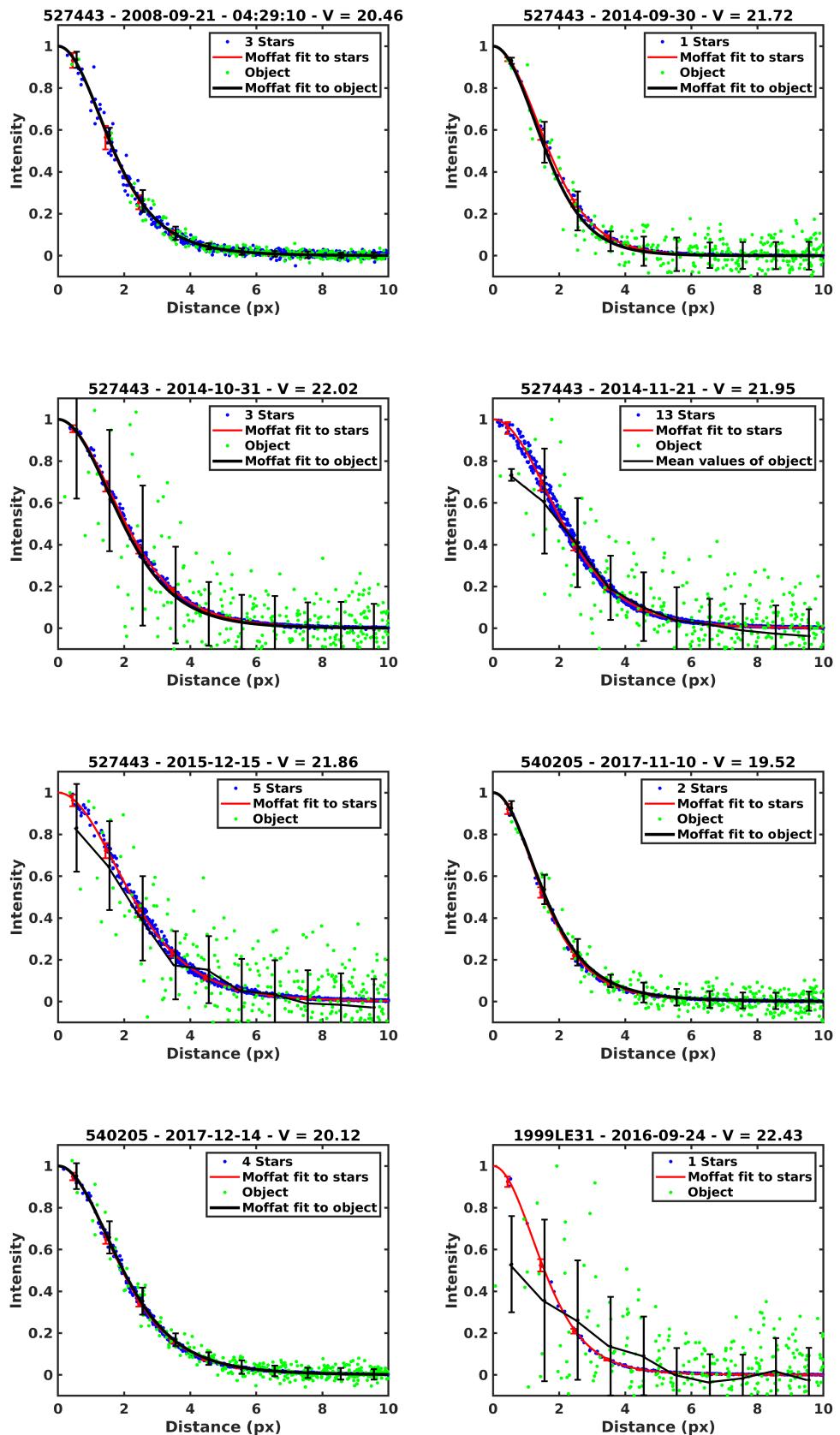


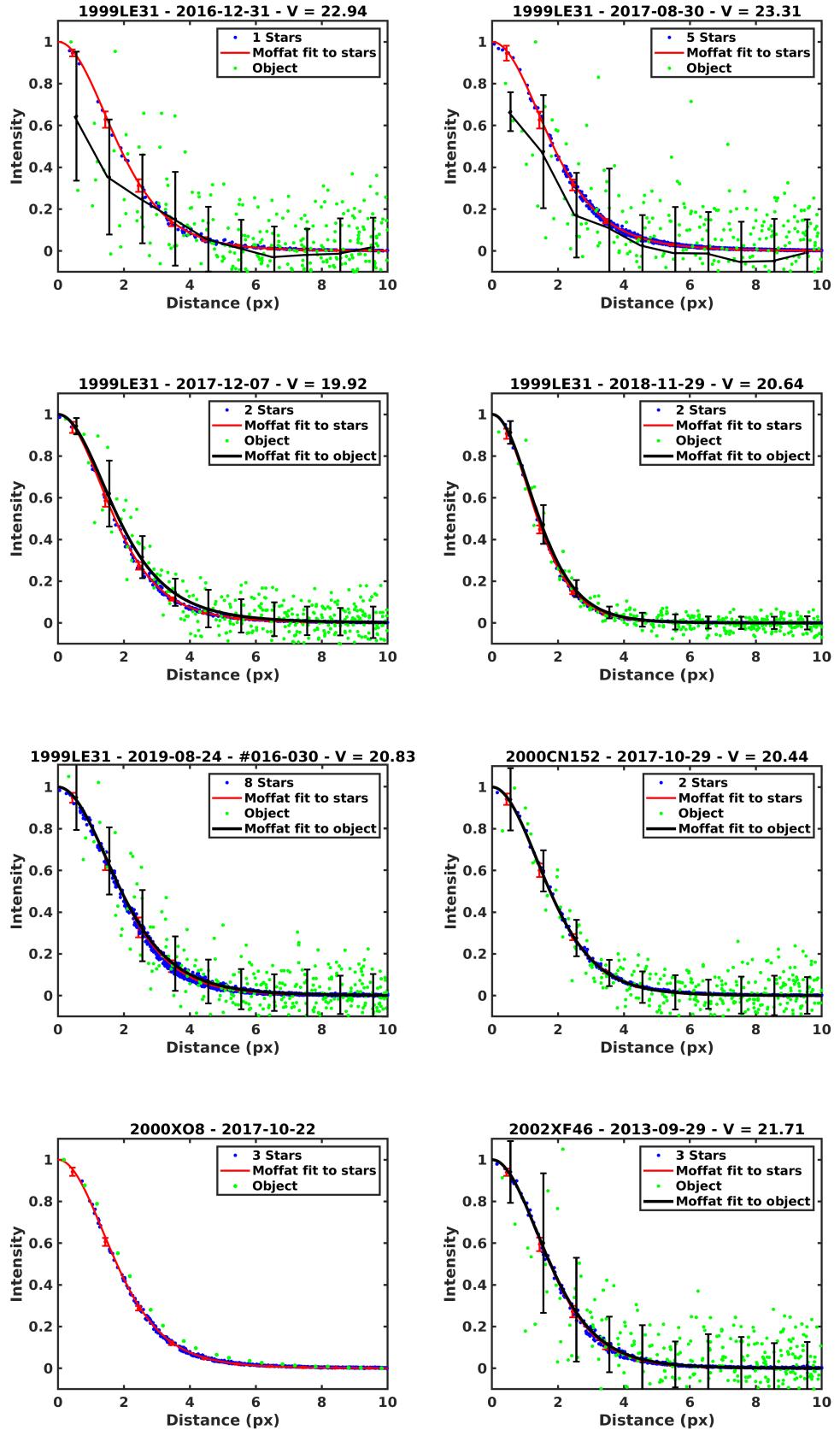


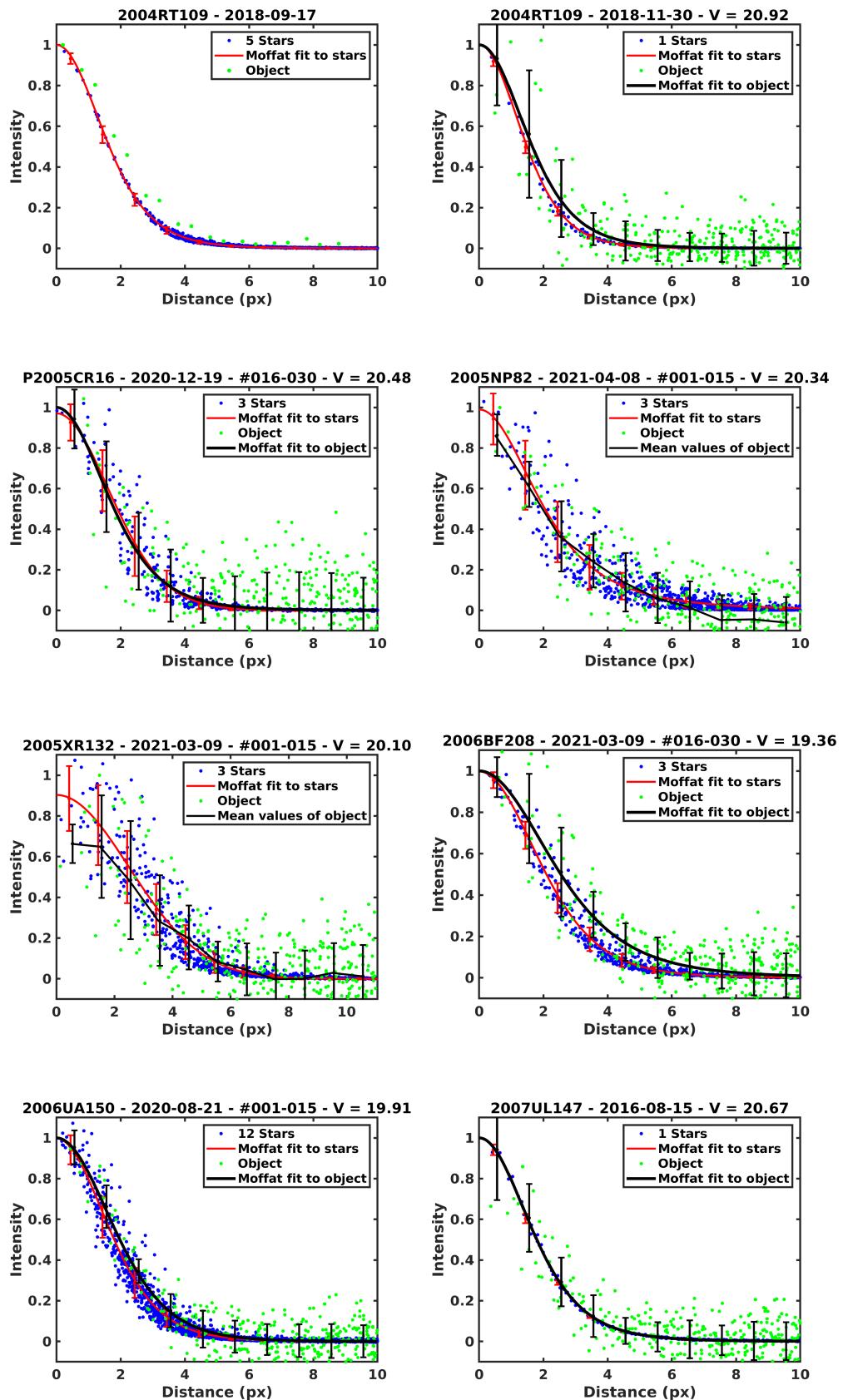


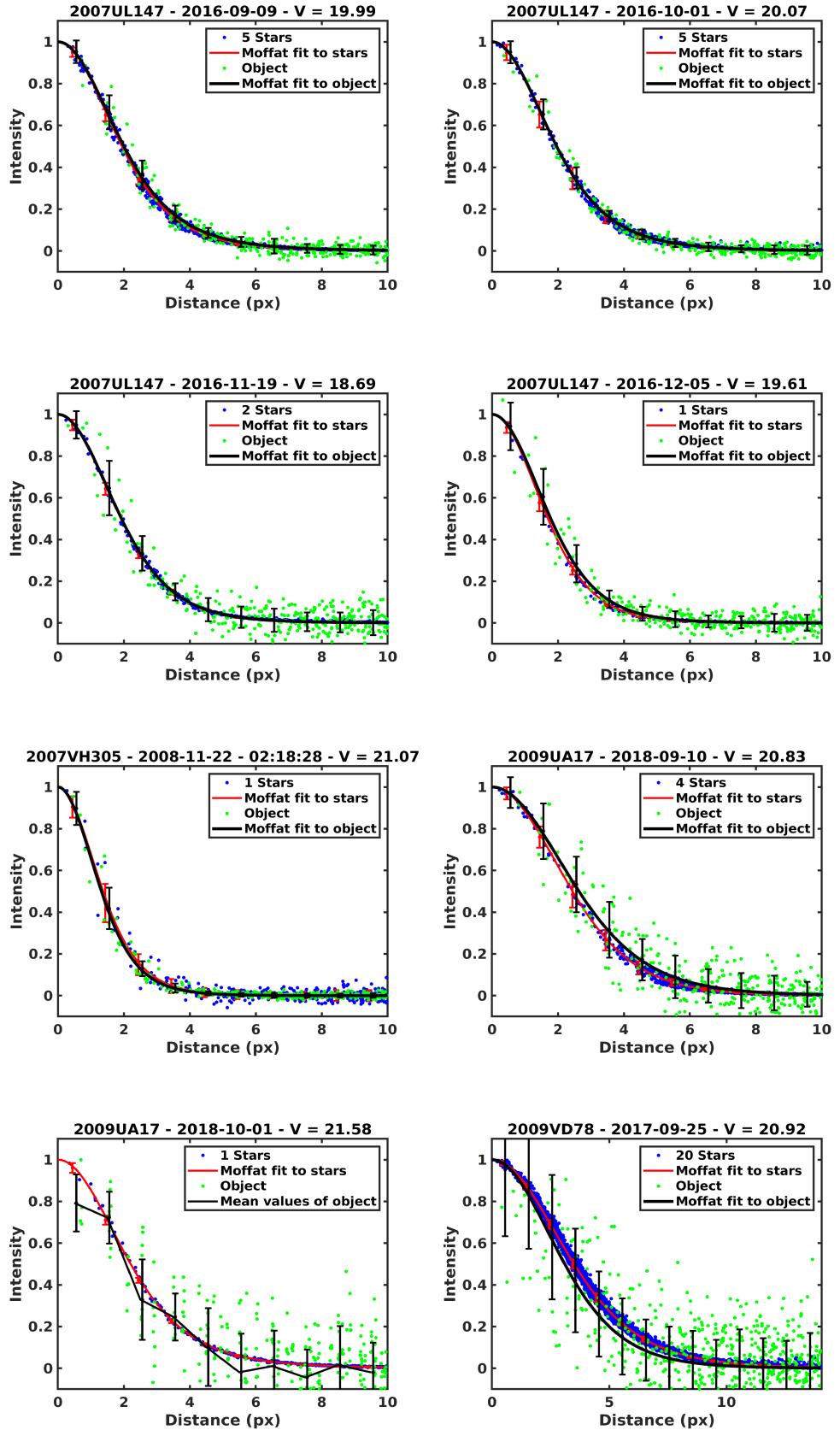


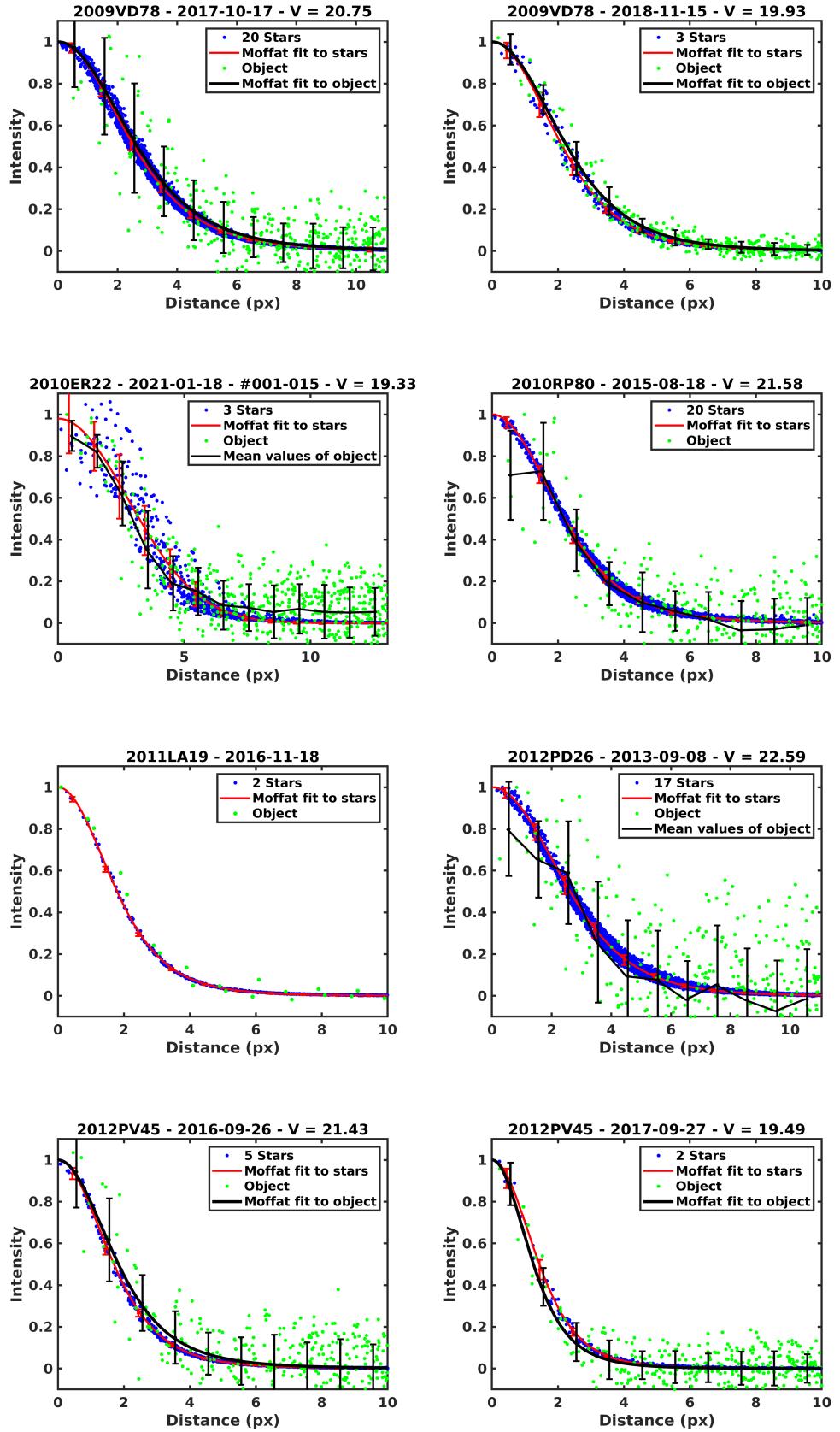


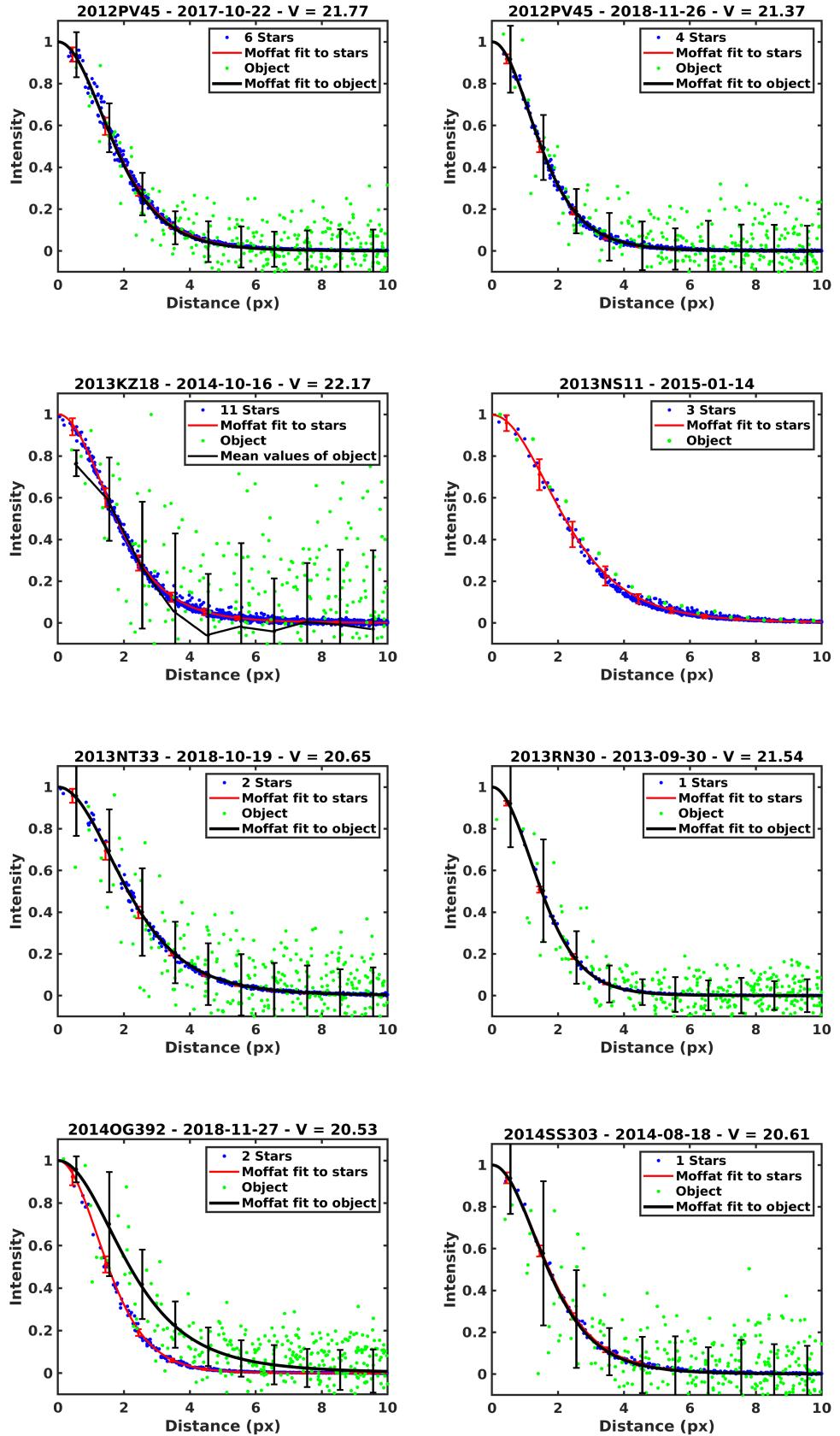


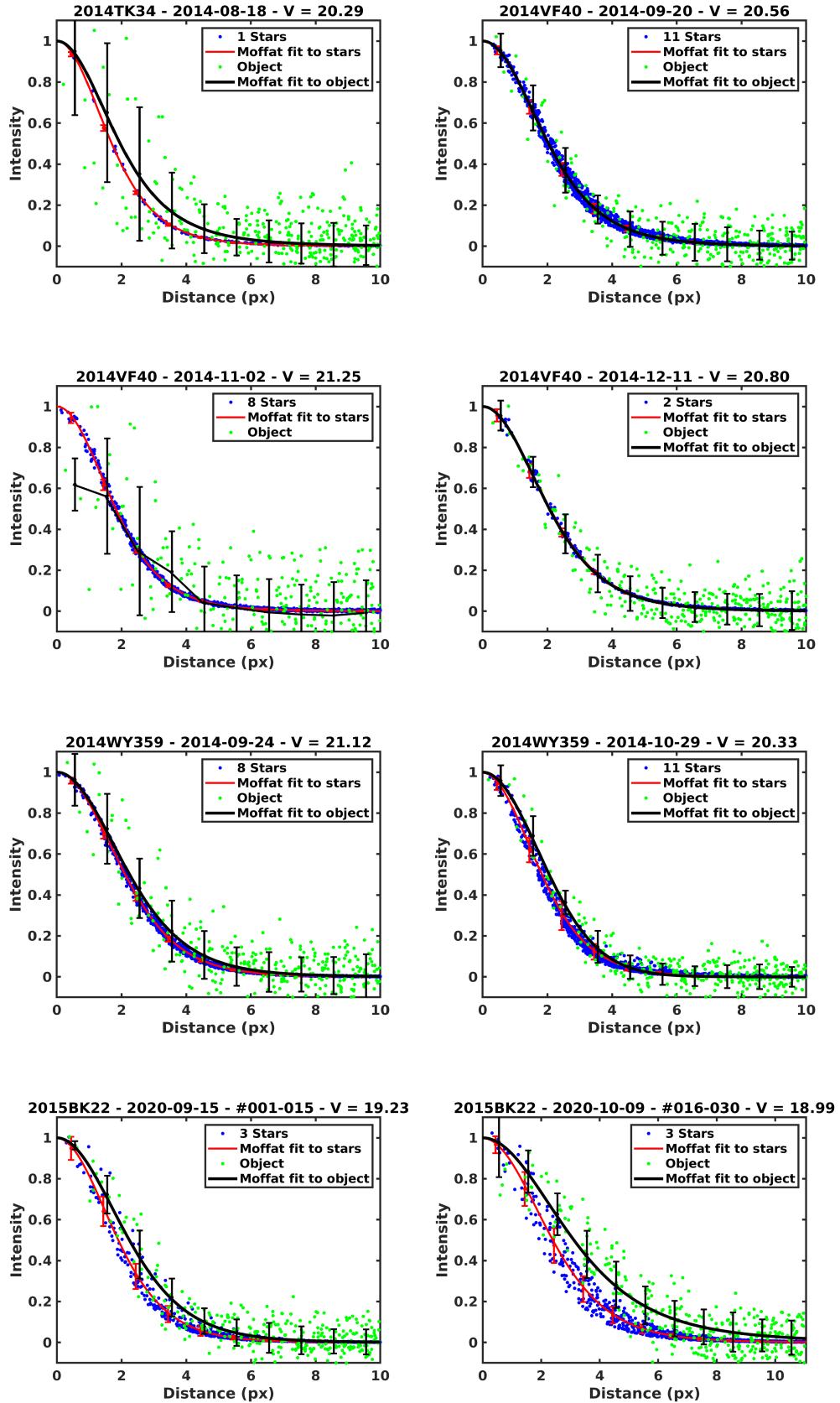


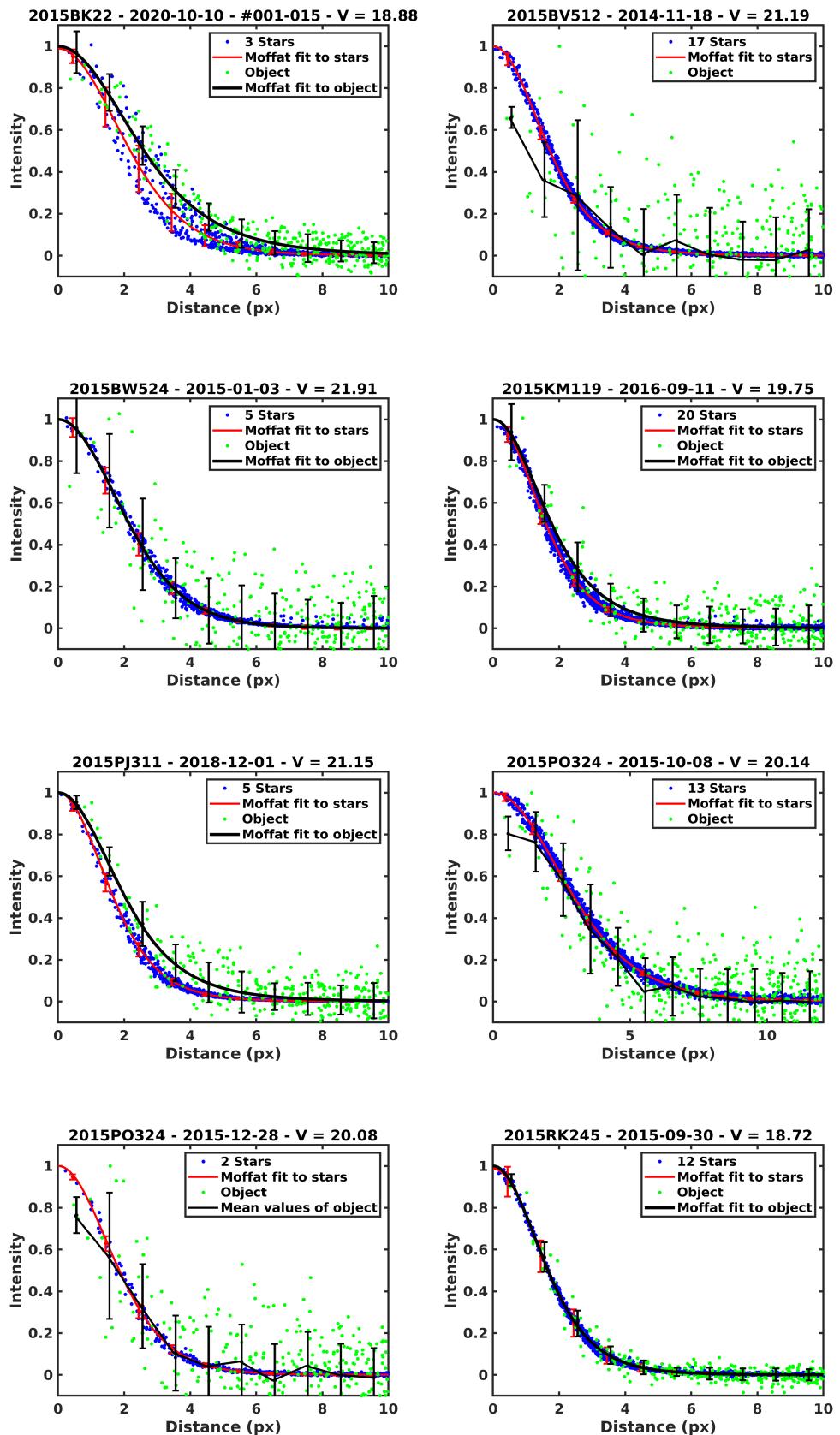


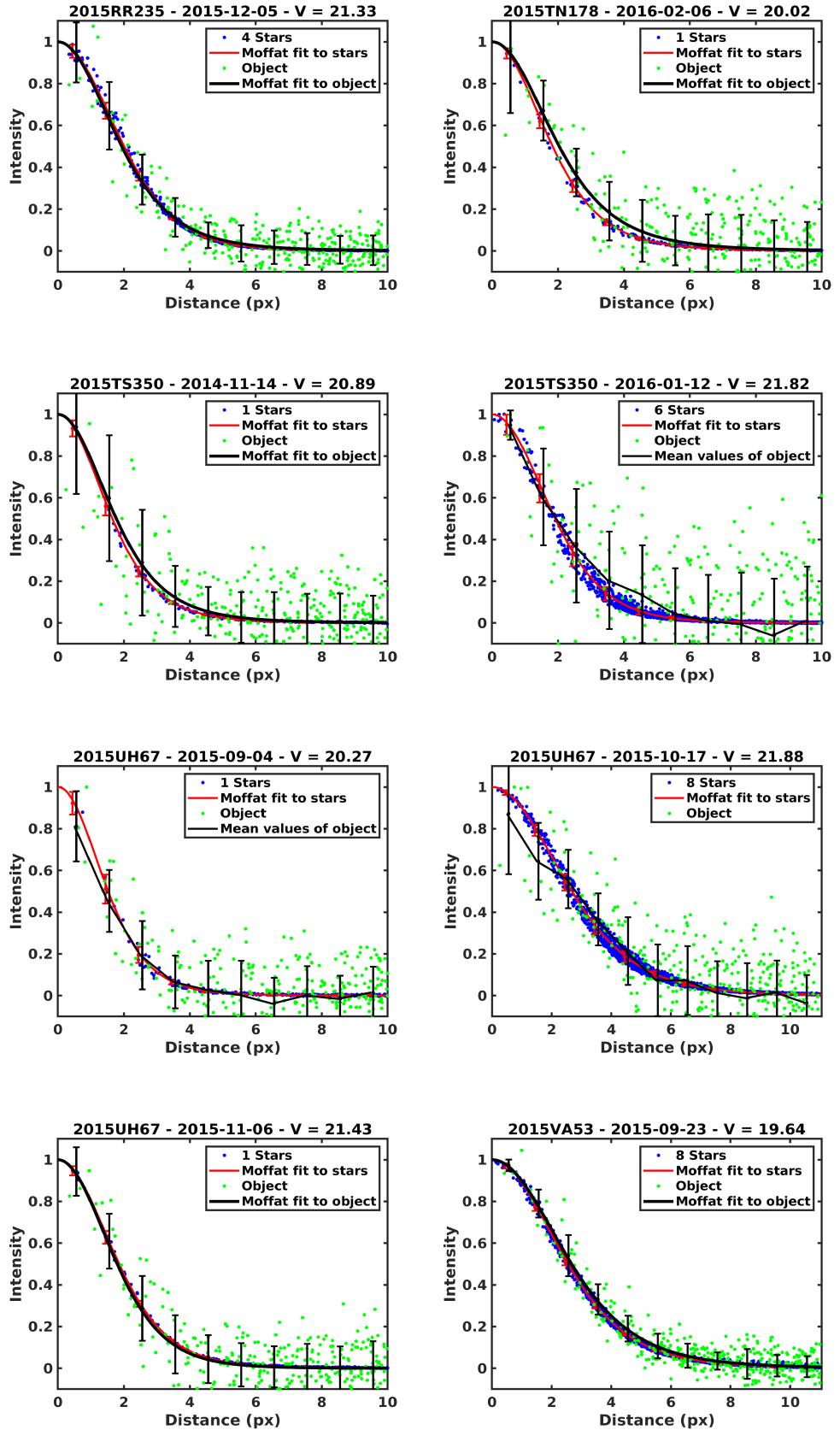


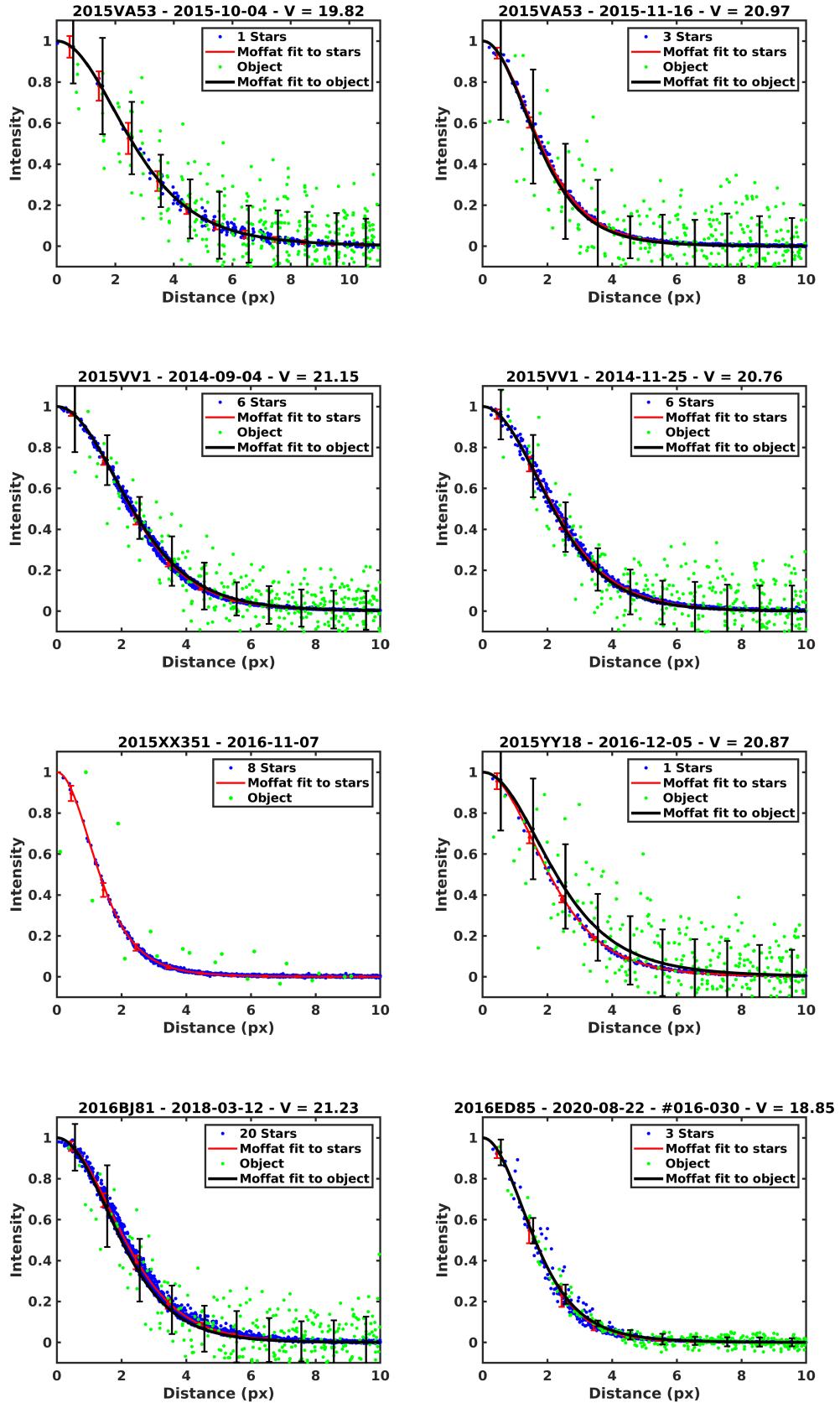


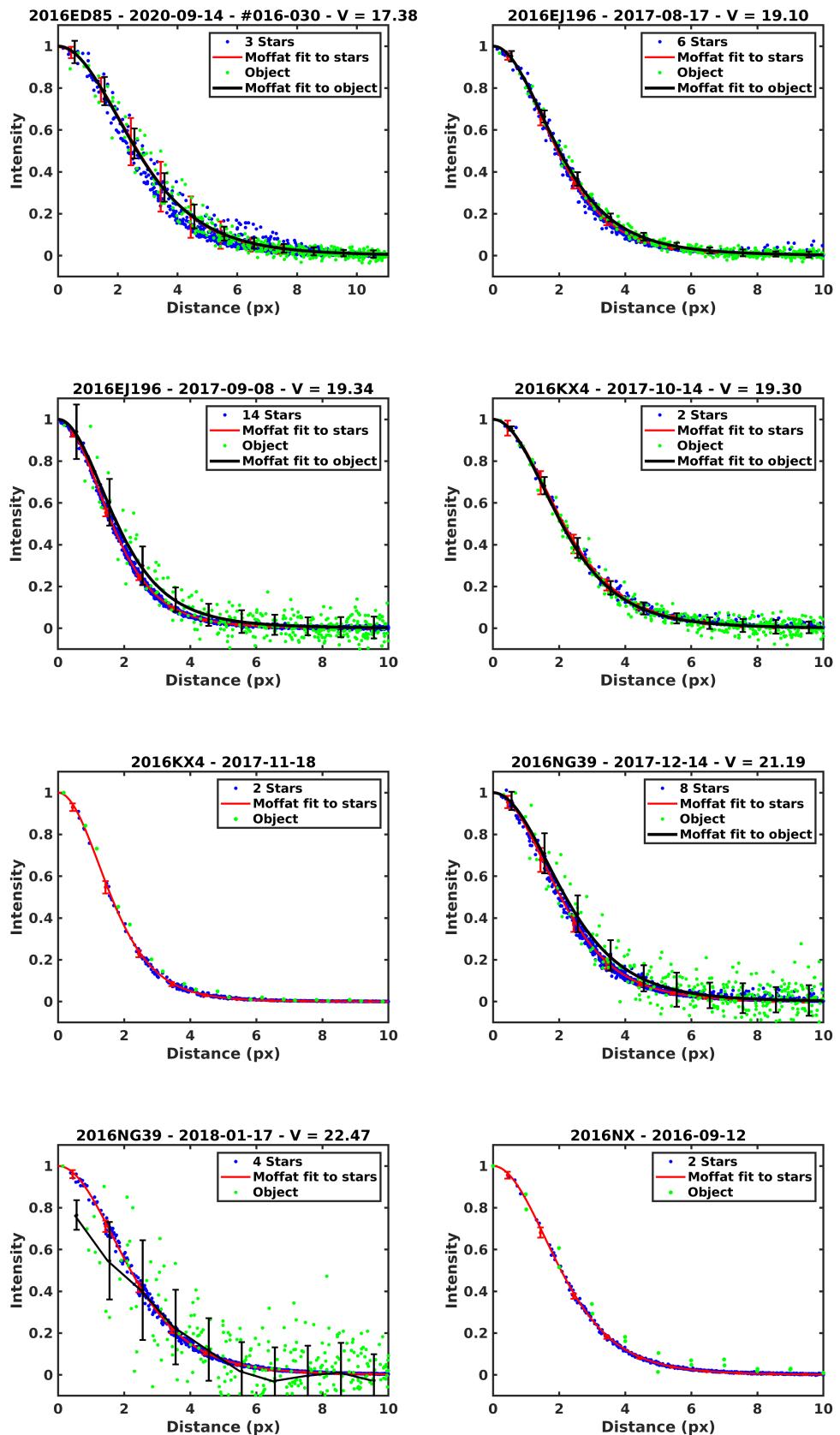


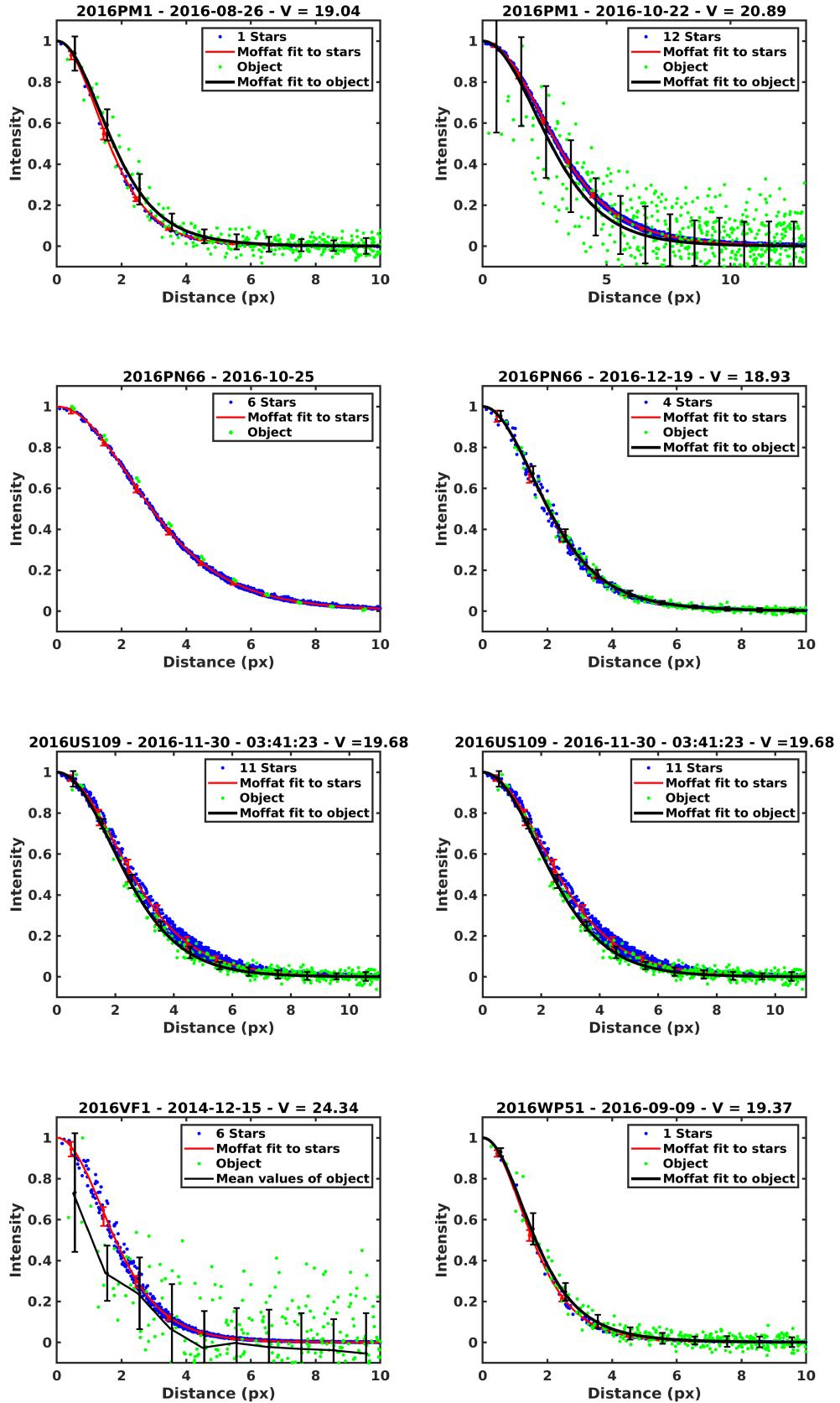


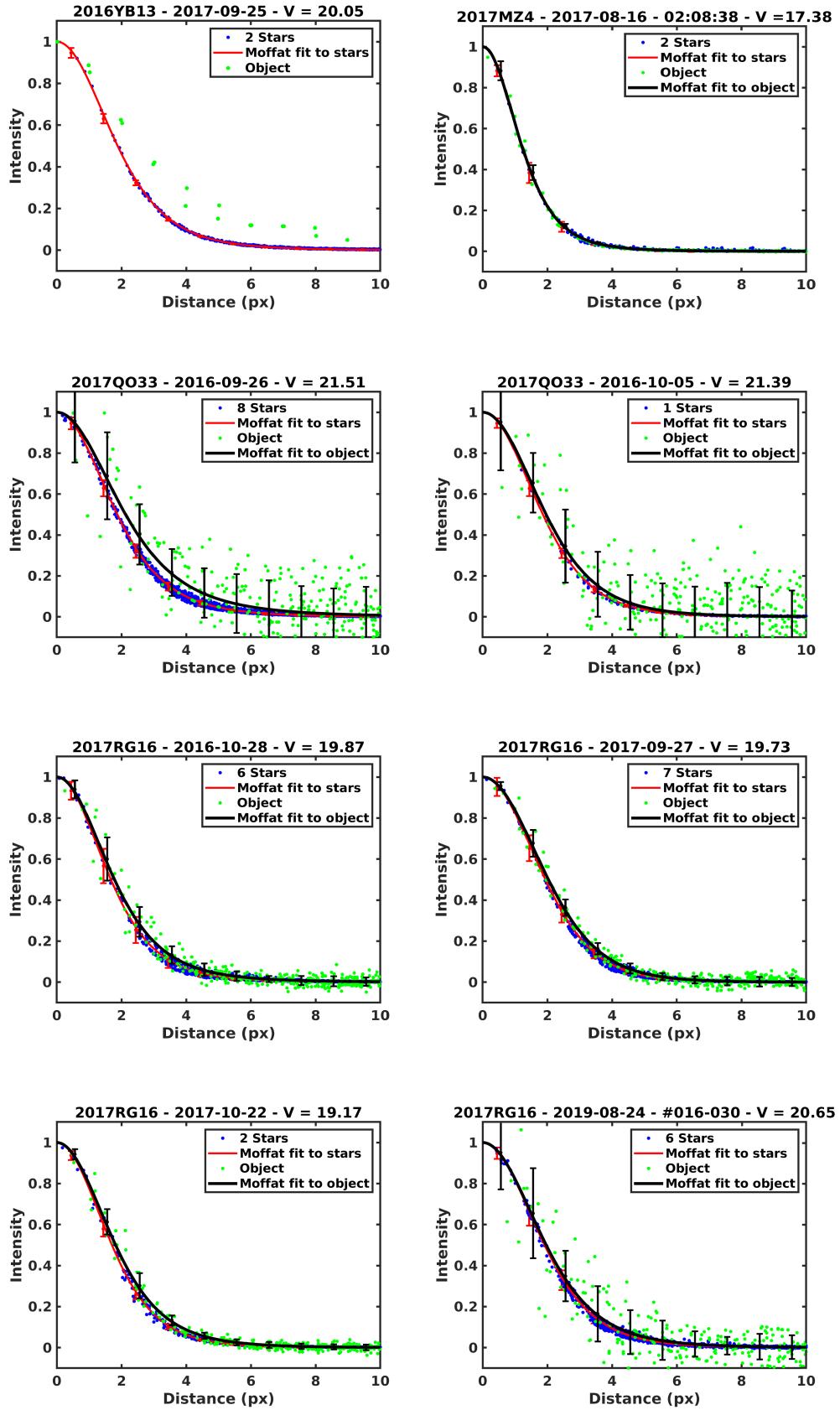


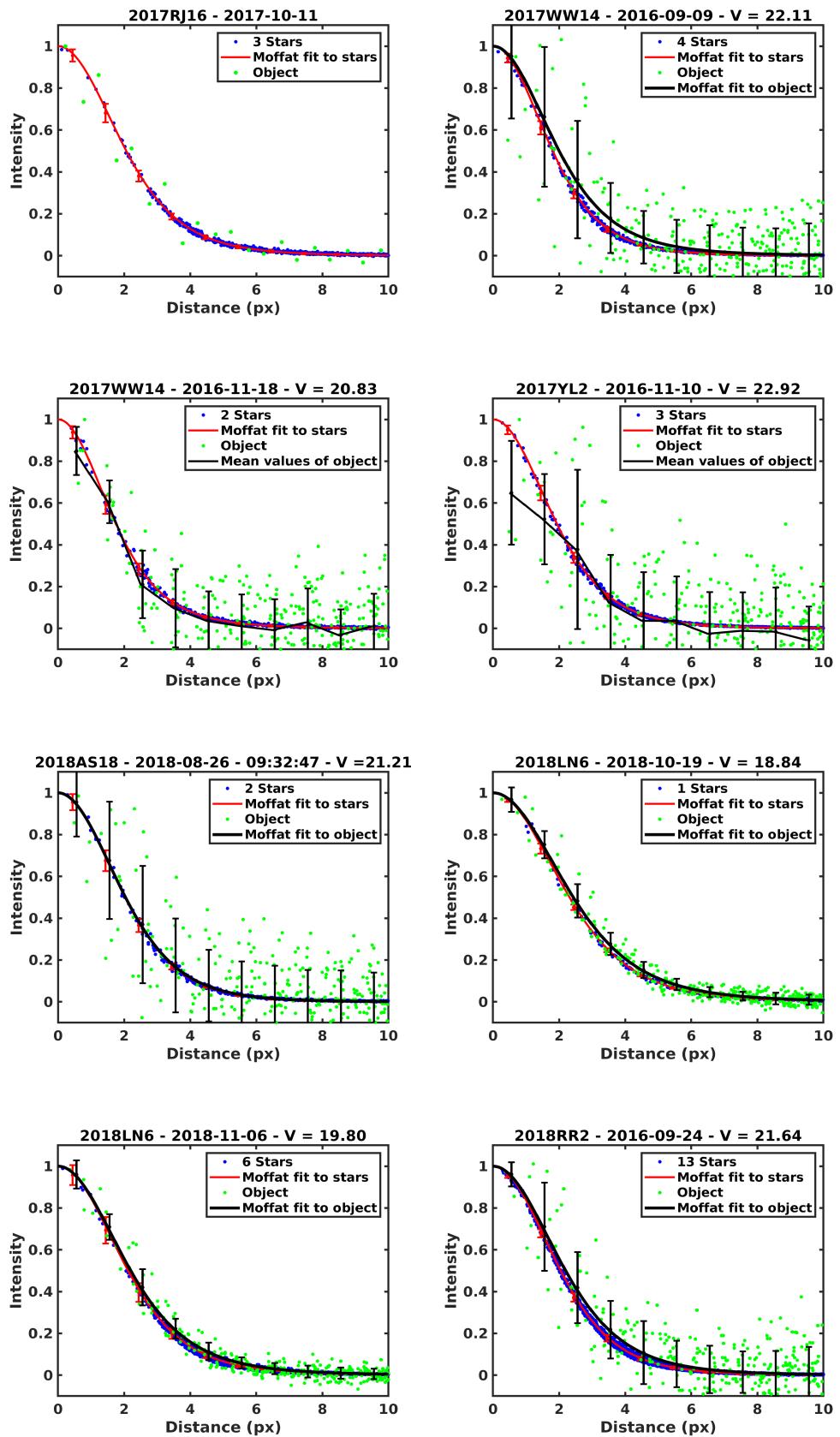


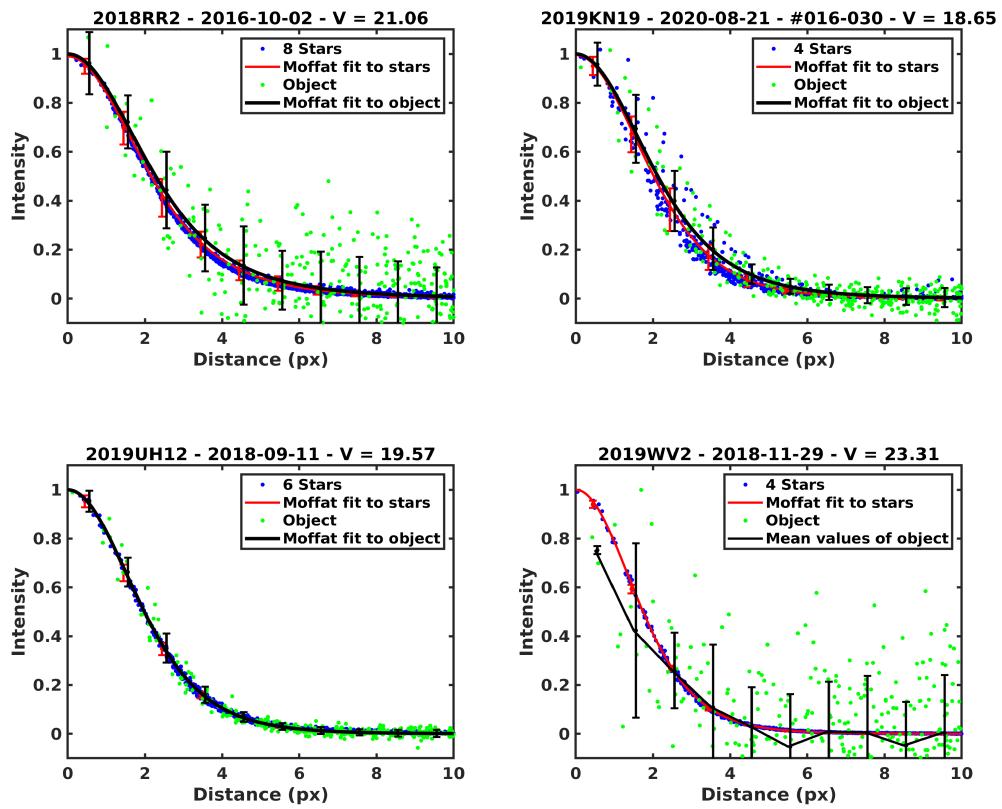




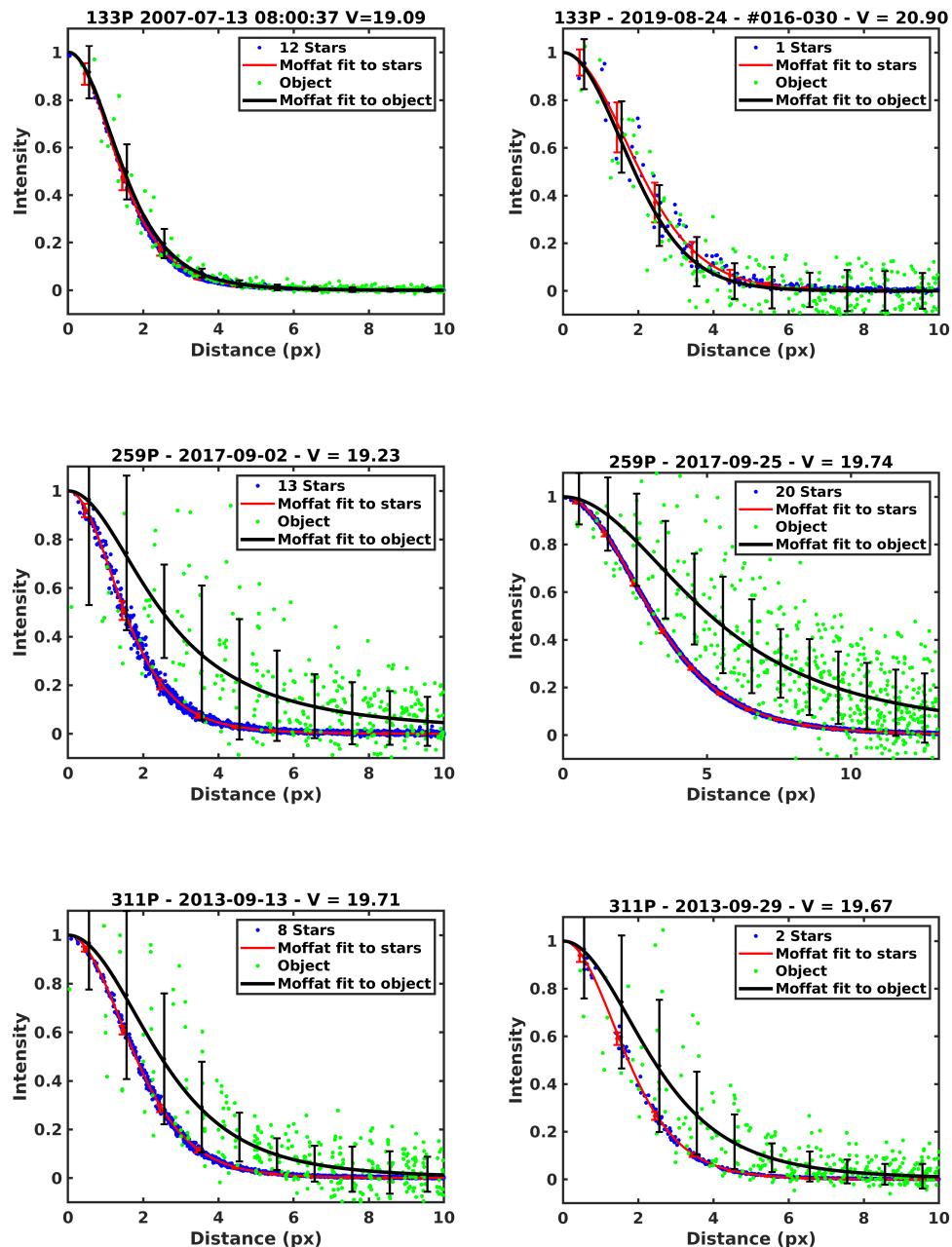


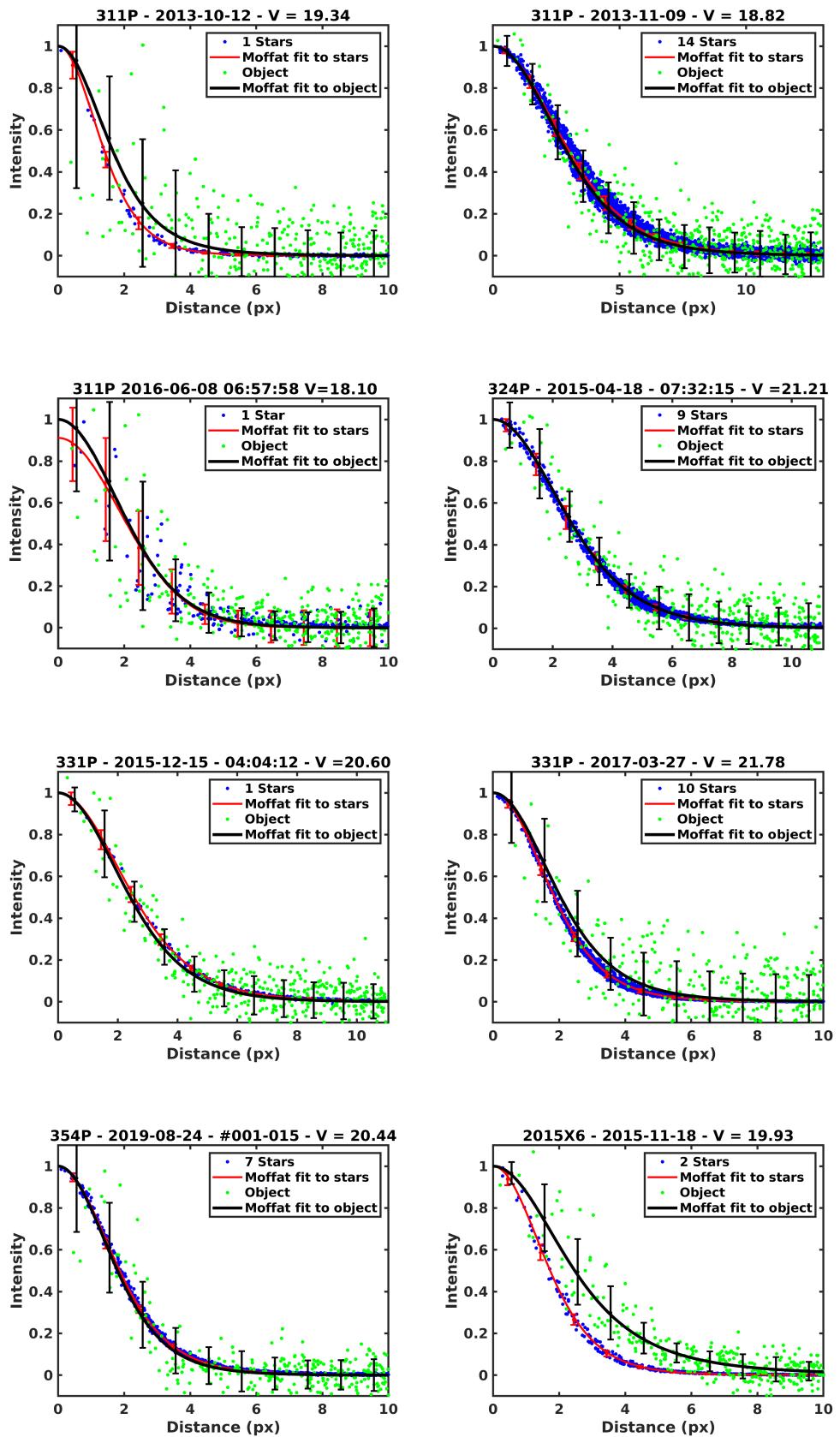






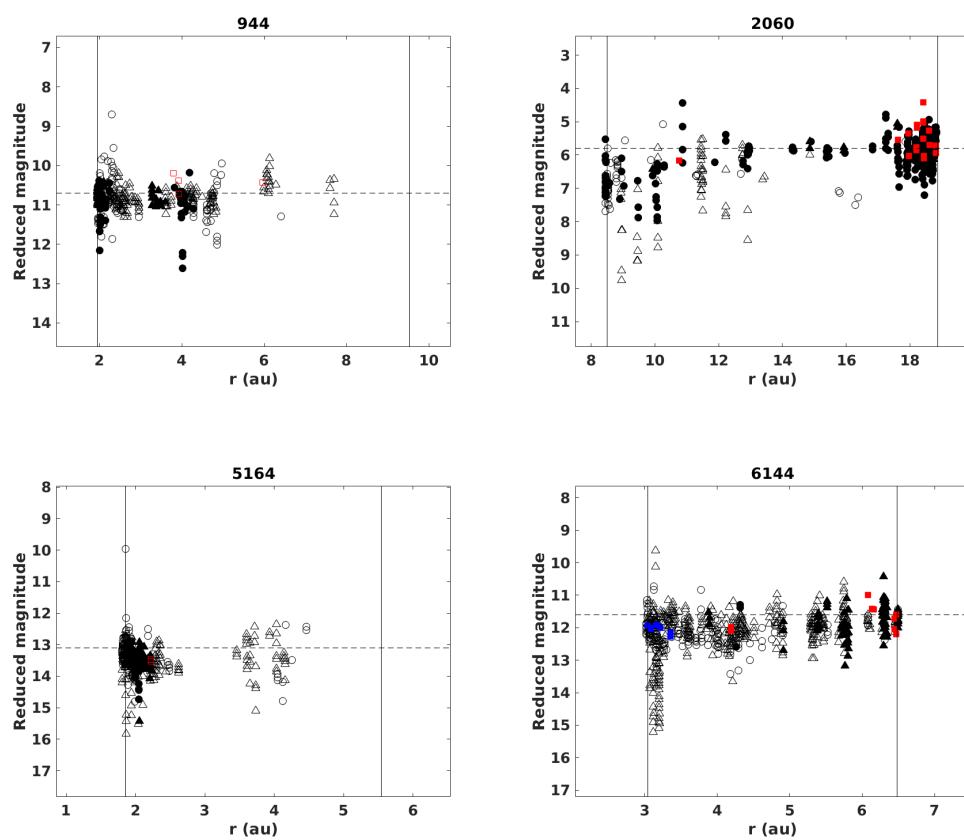
# AAs

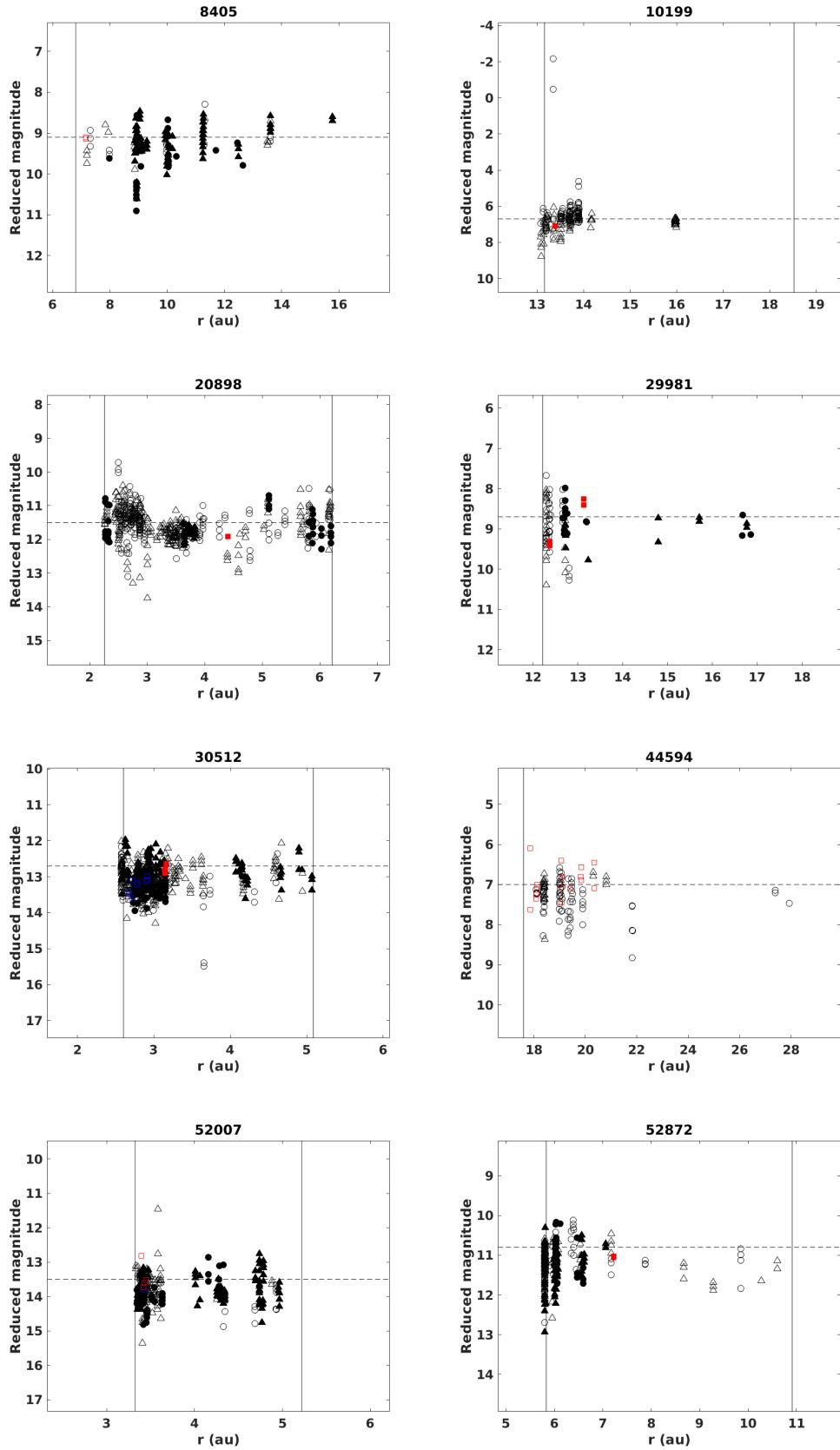


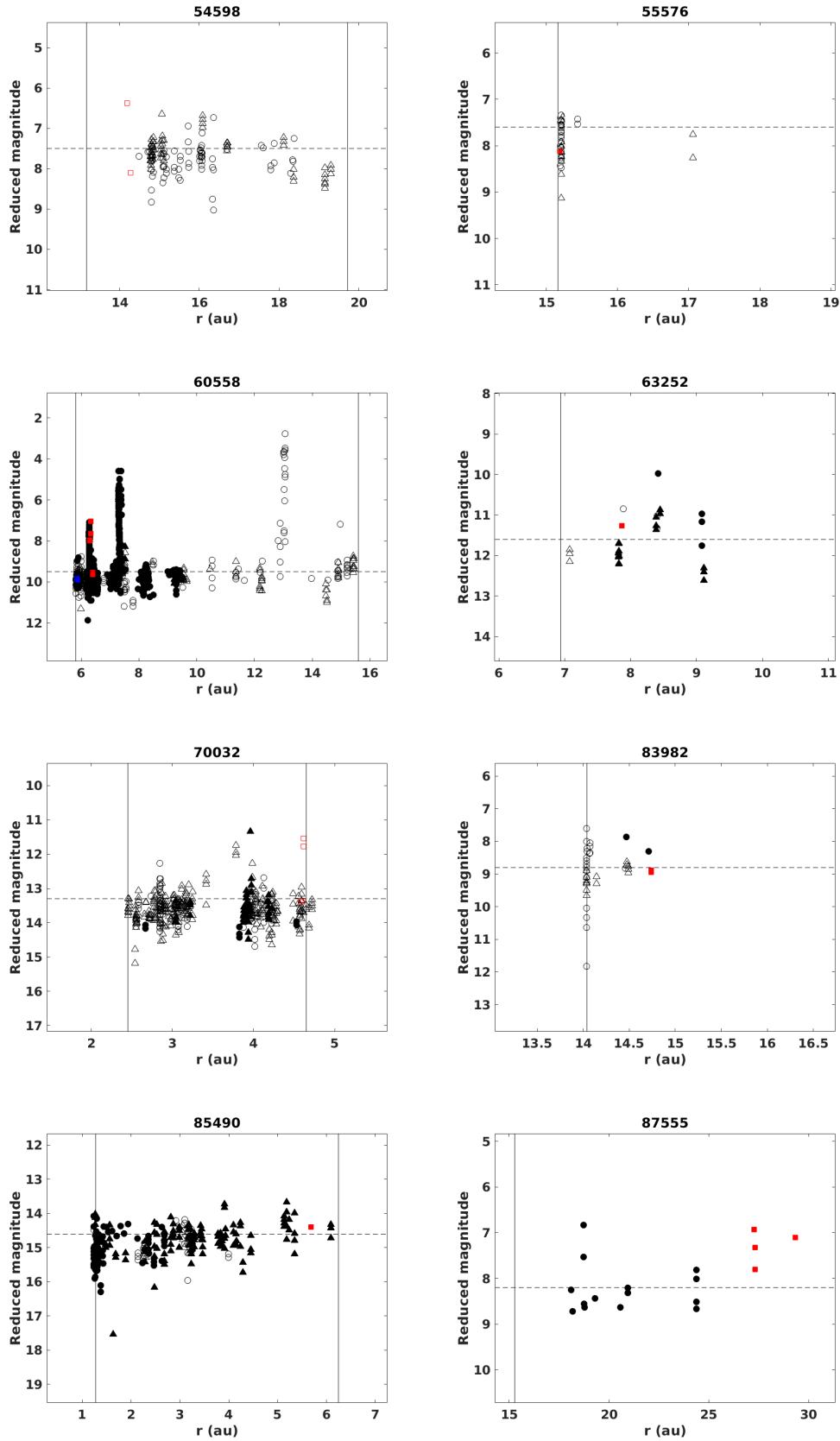


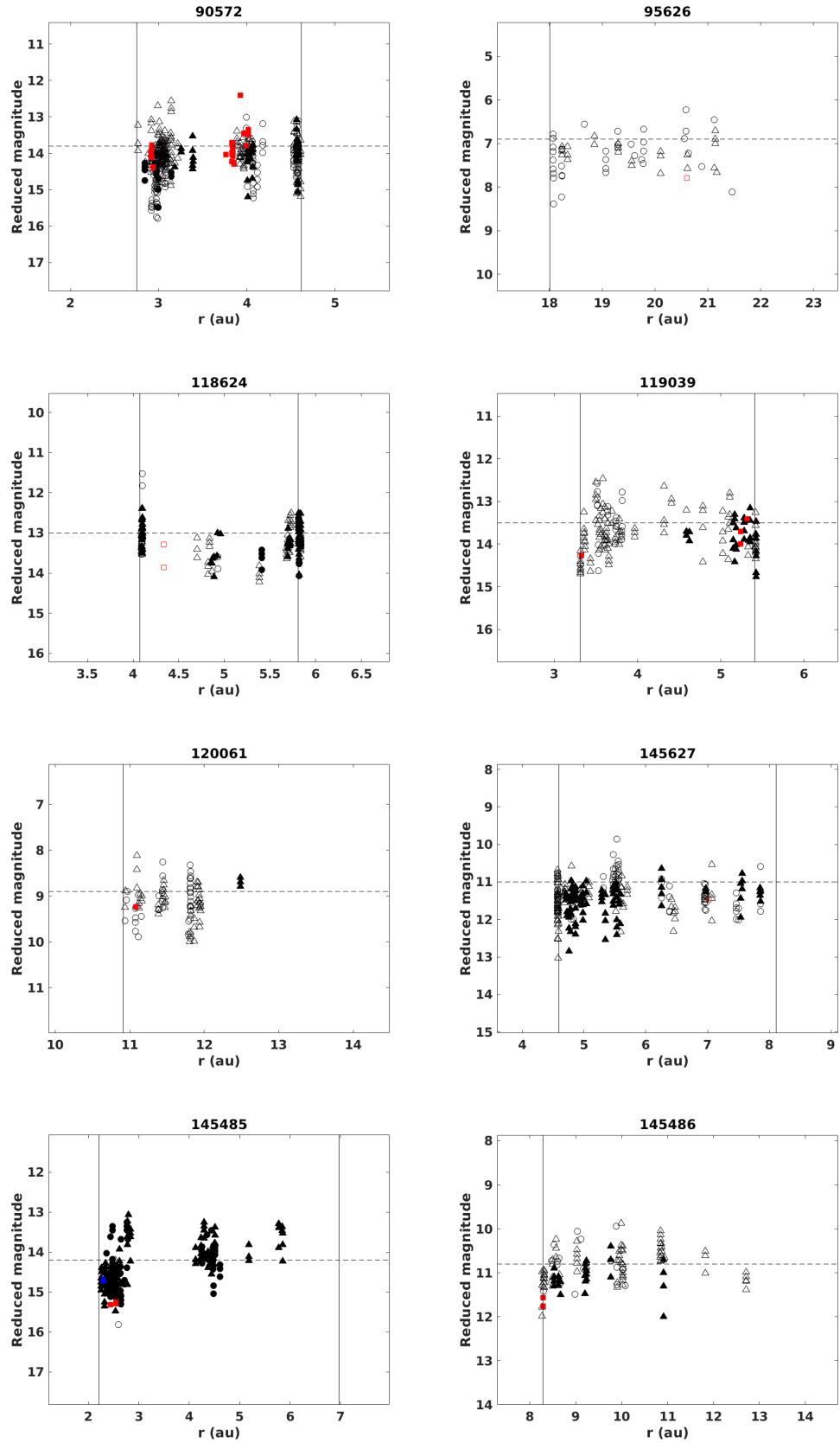
# Gráficos de magnitud reducida

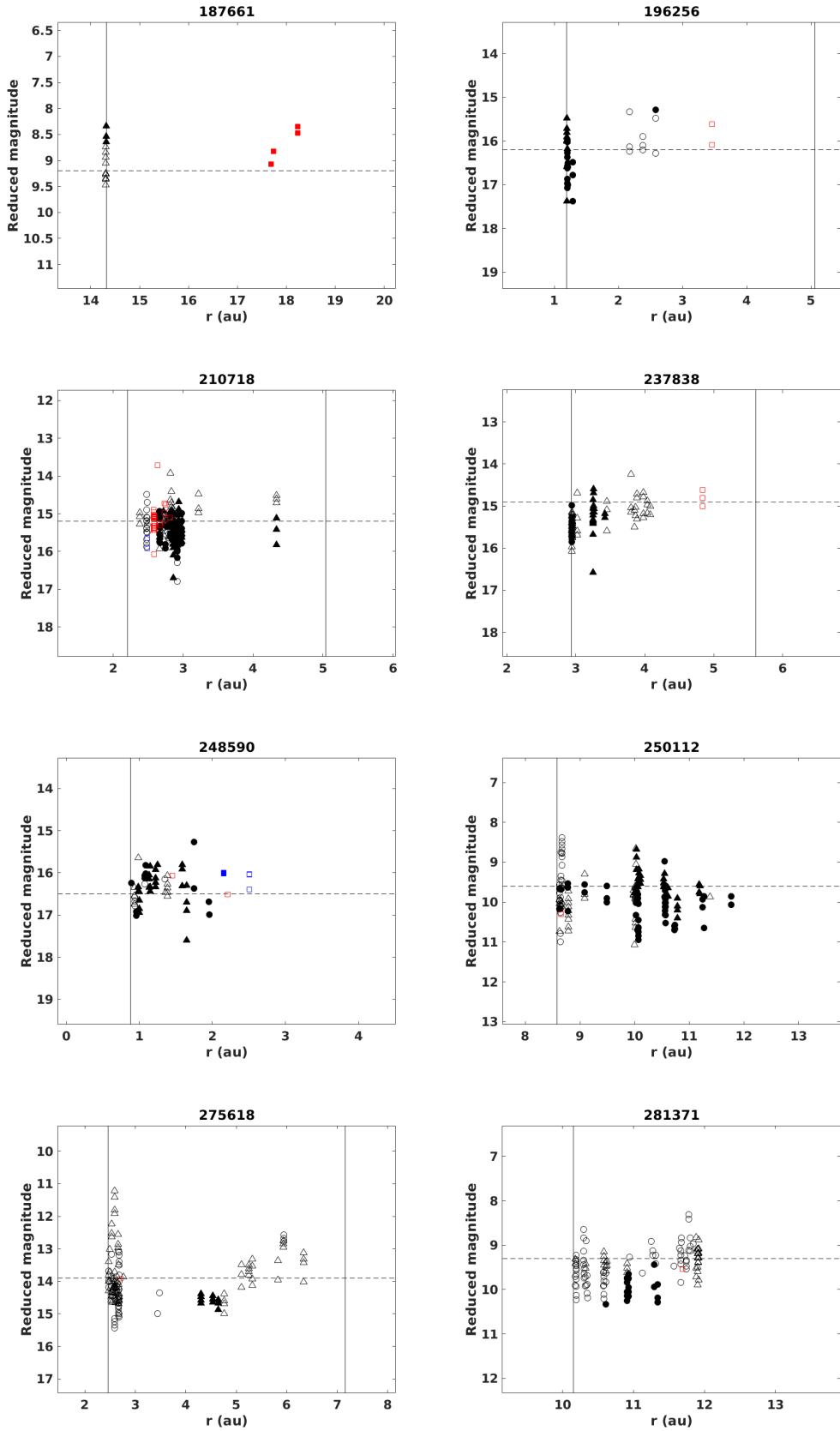
## ACOs

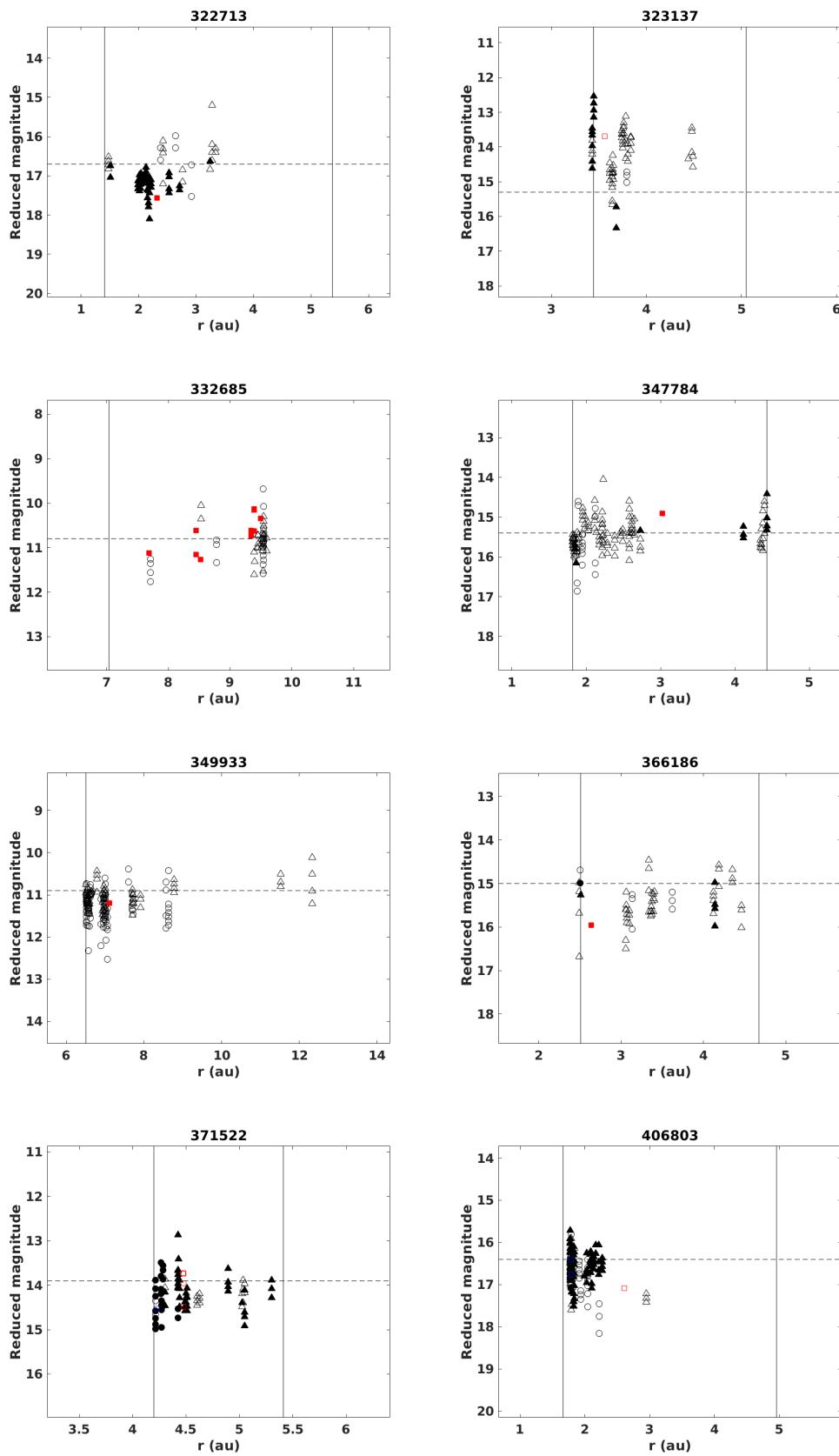


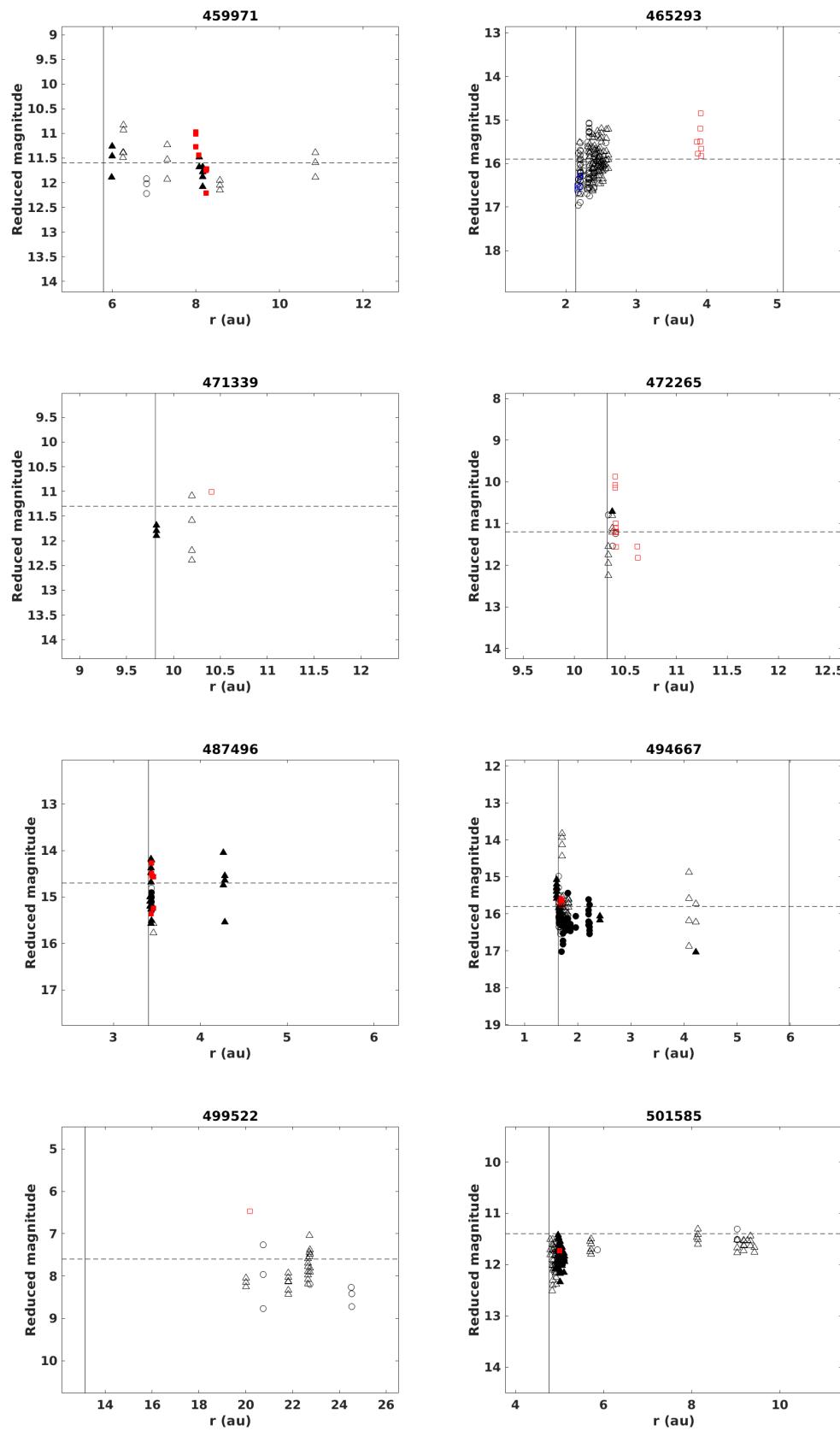


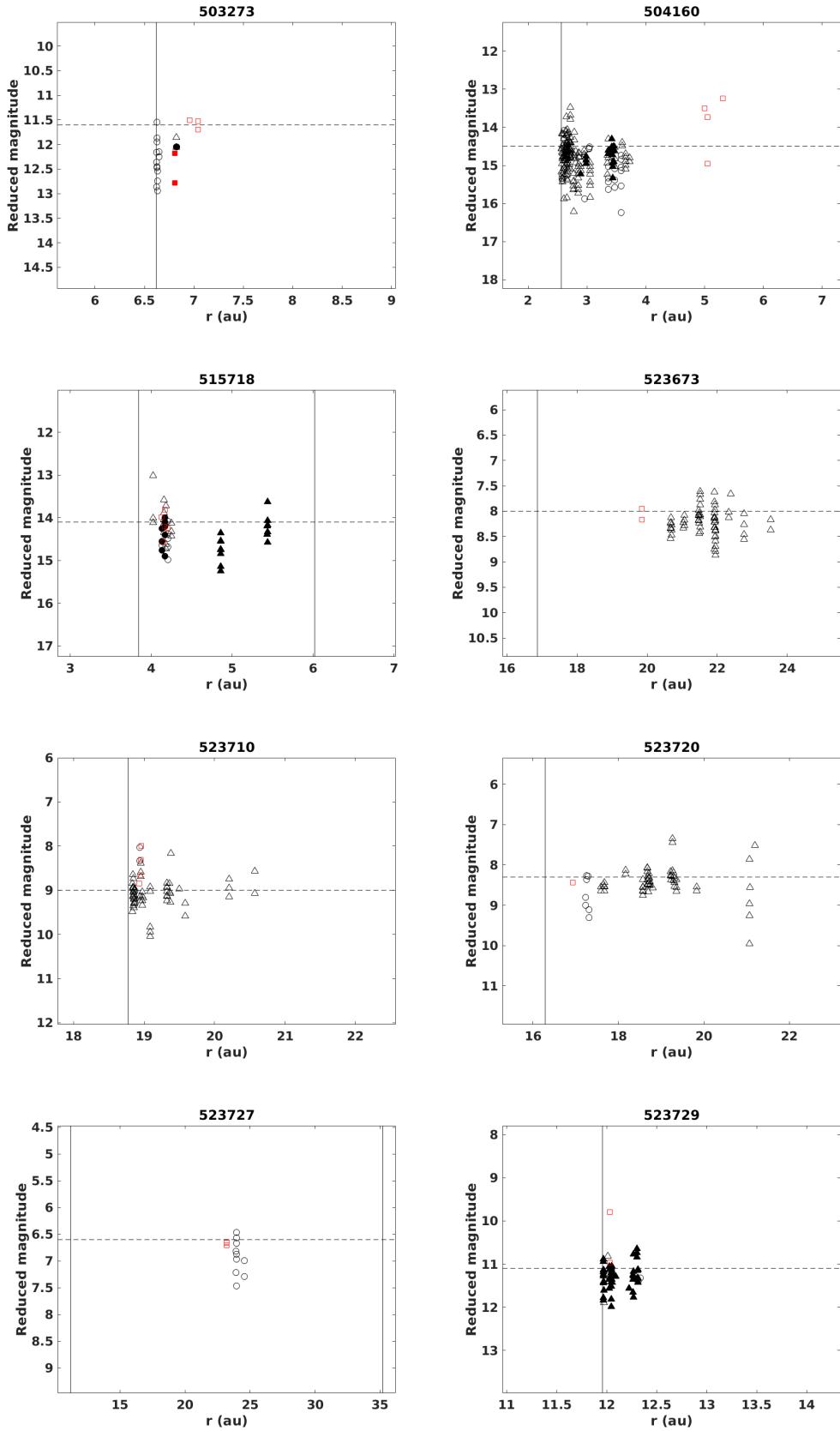


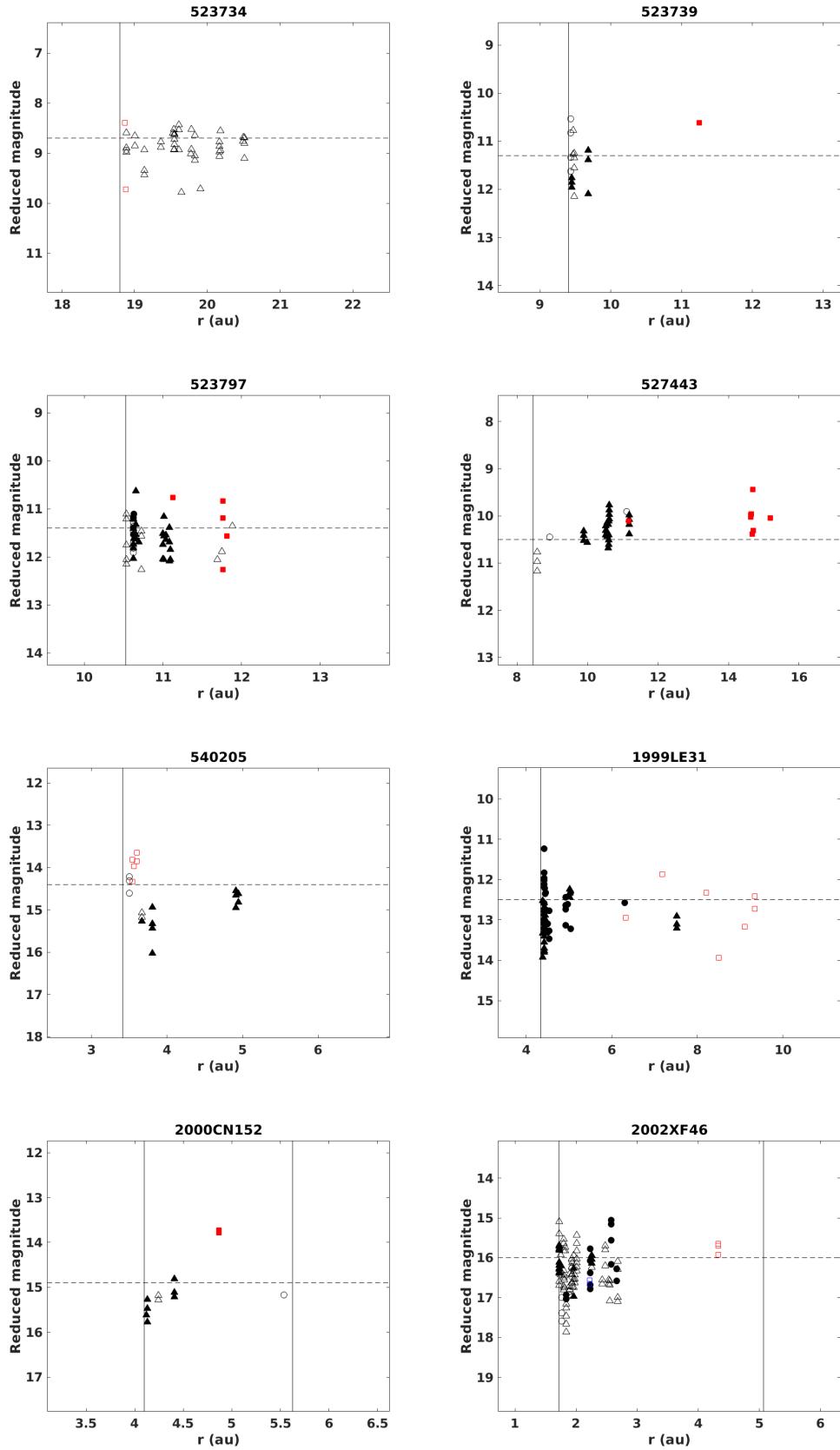


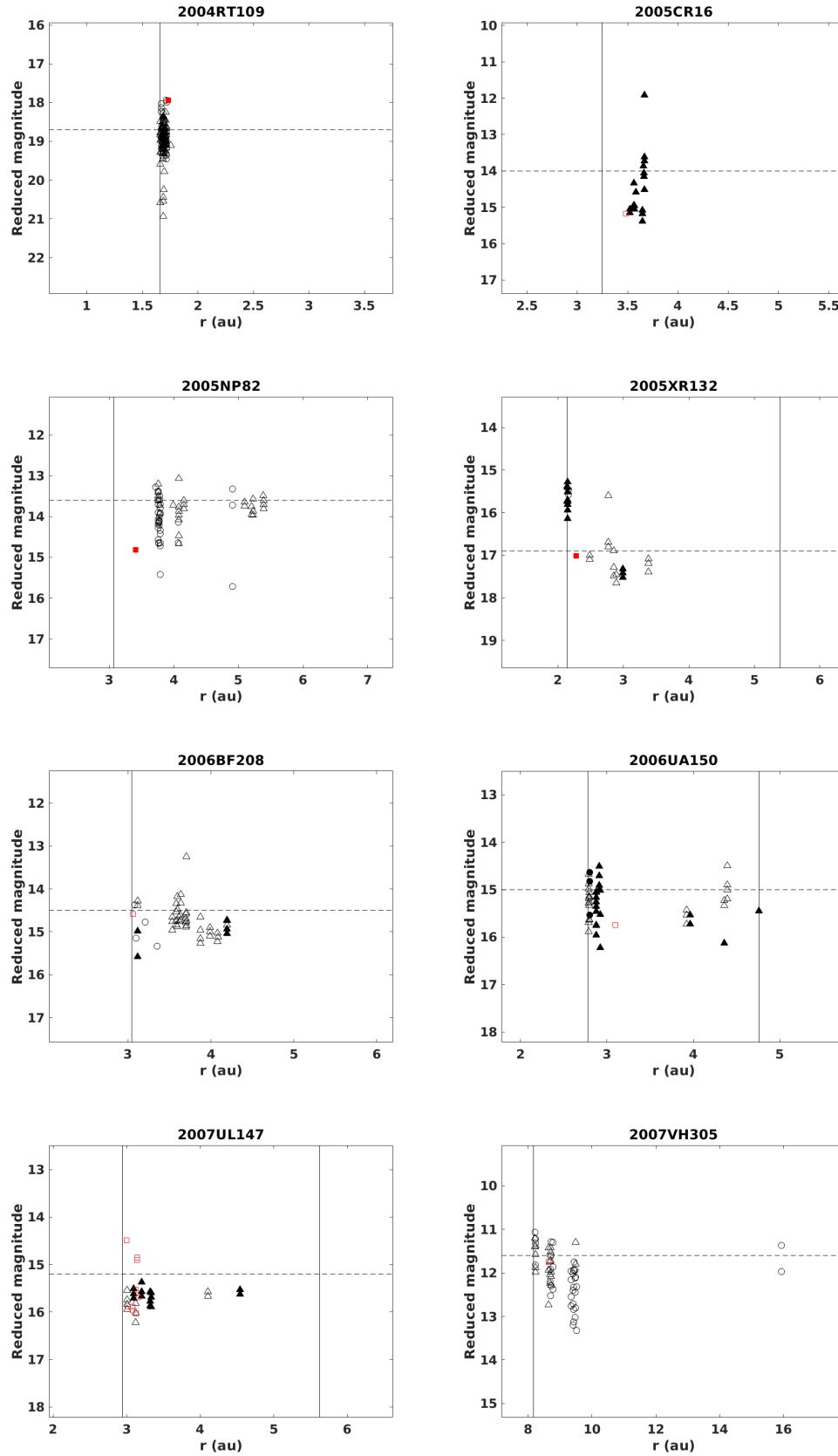


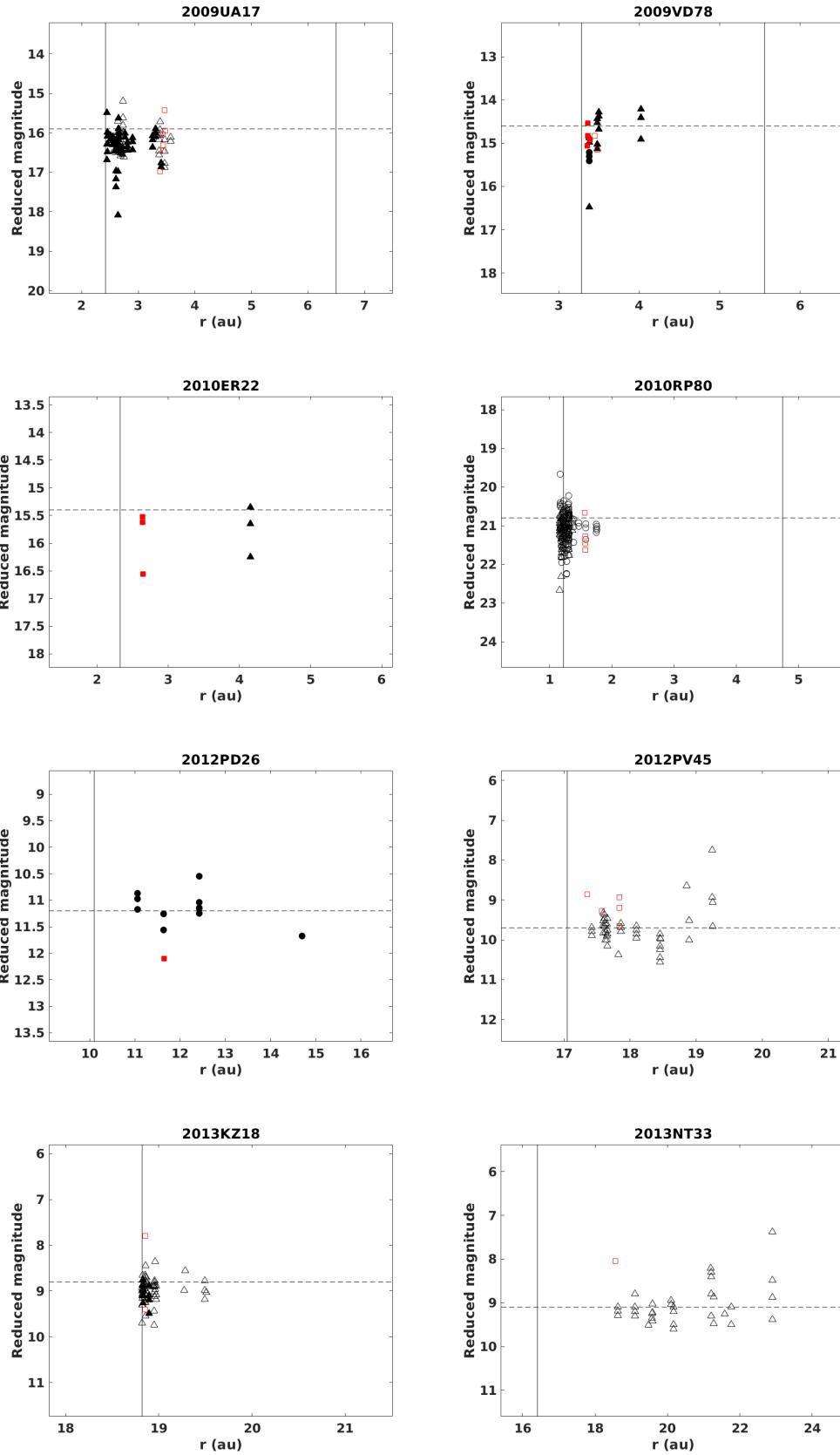


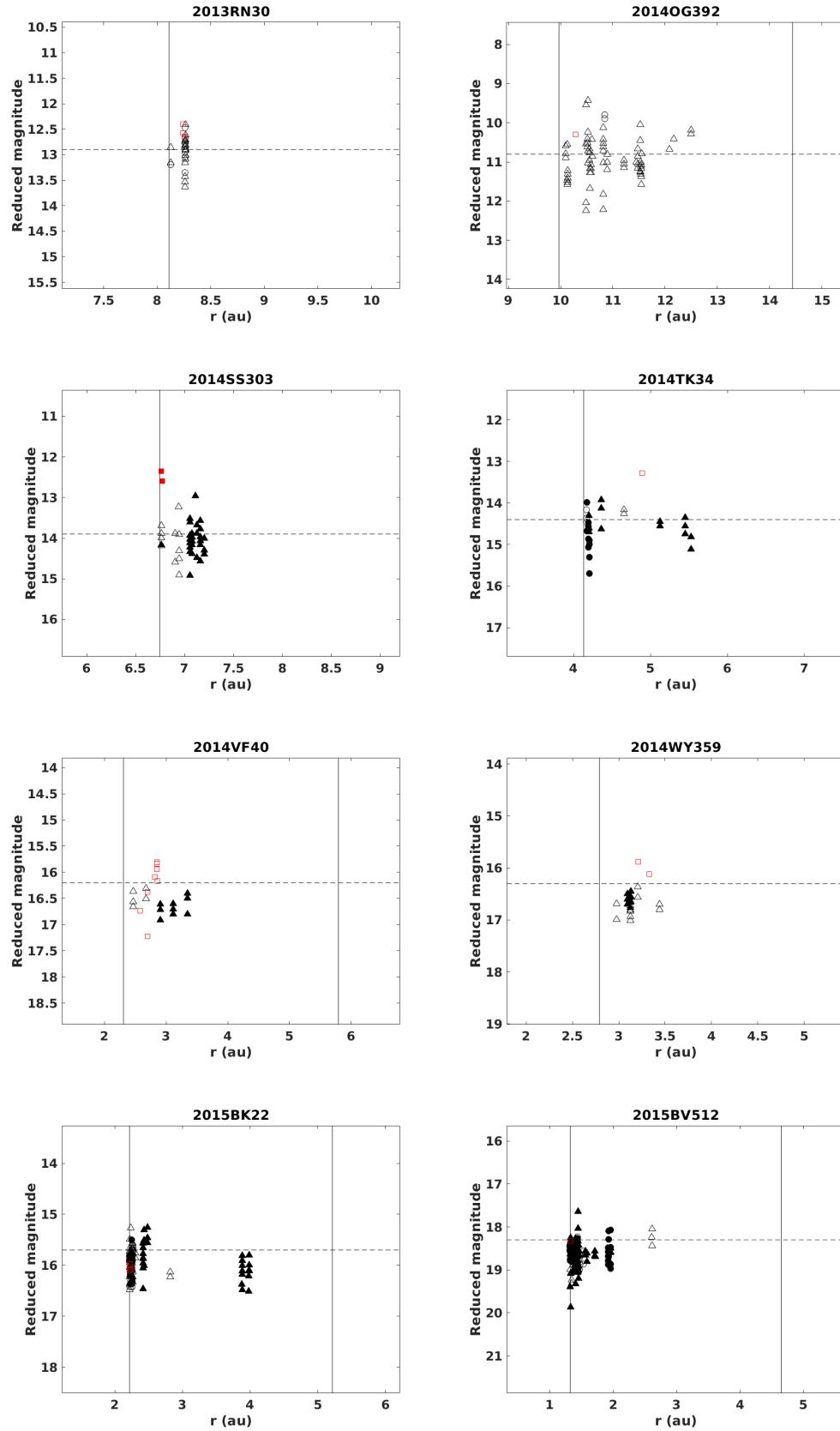


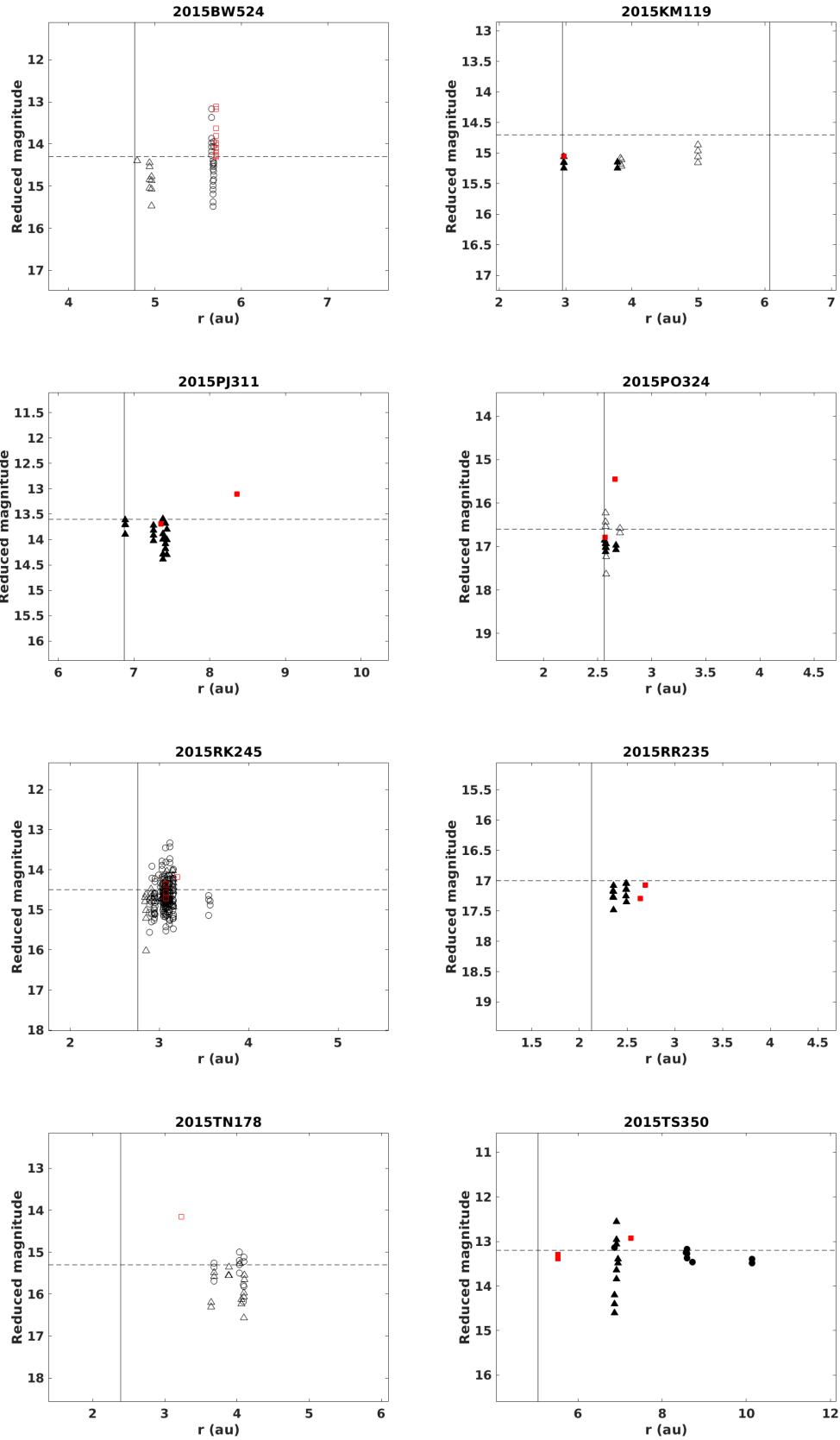


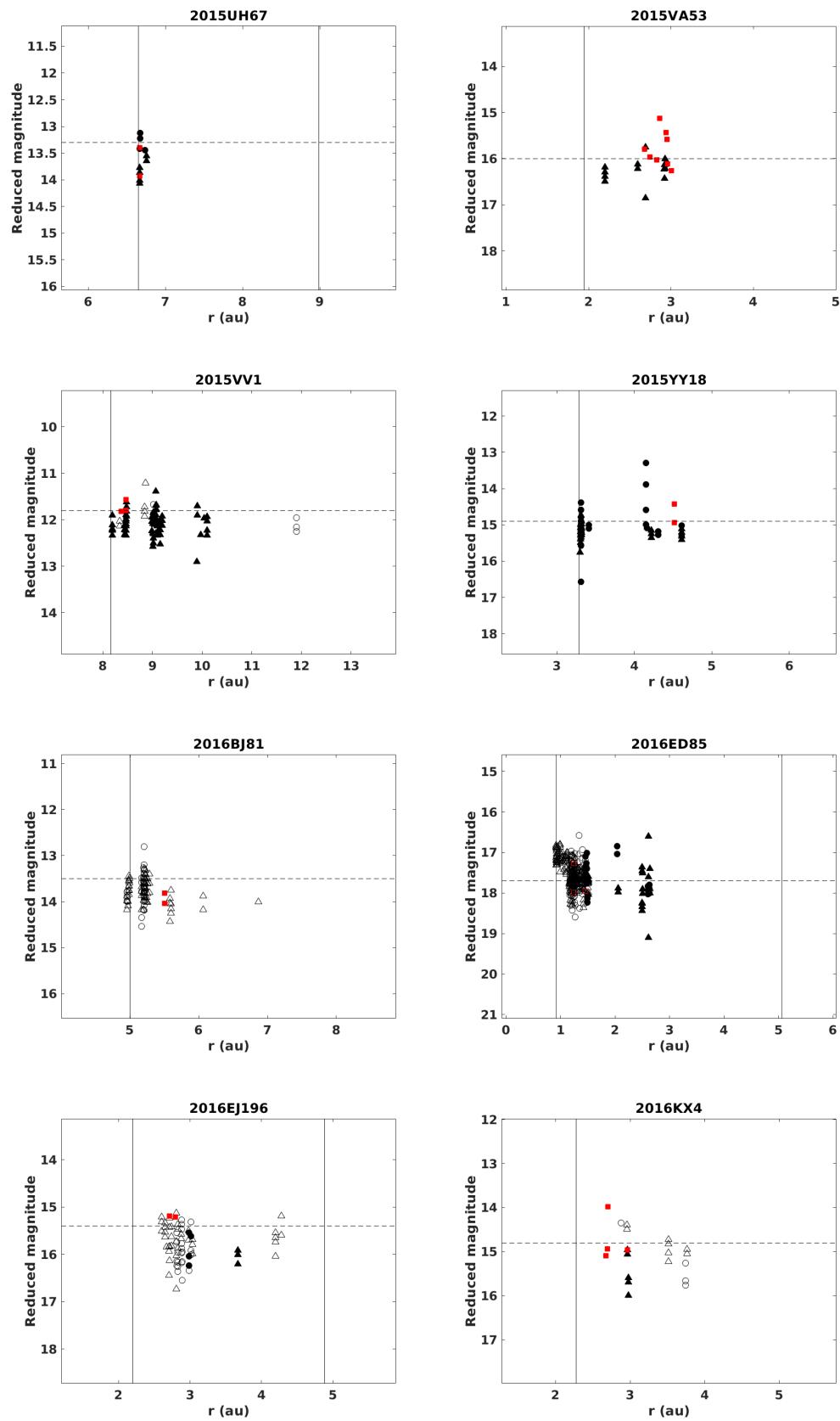


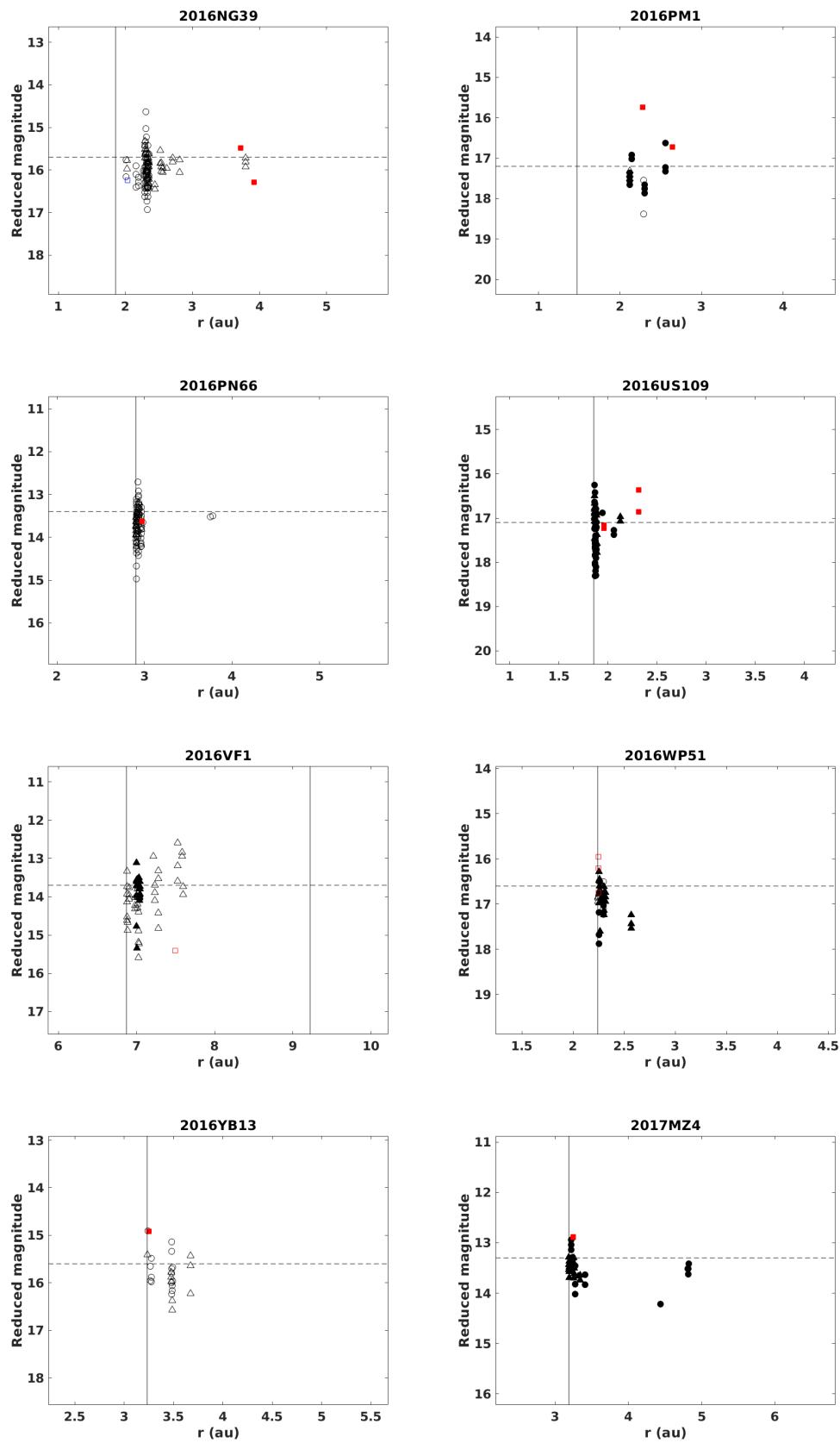


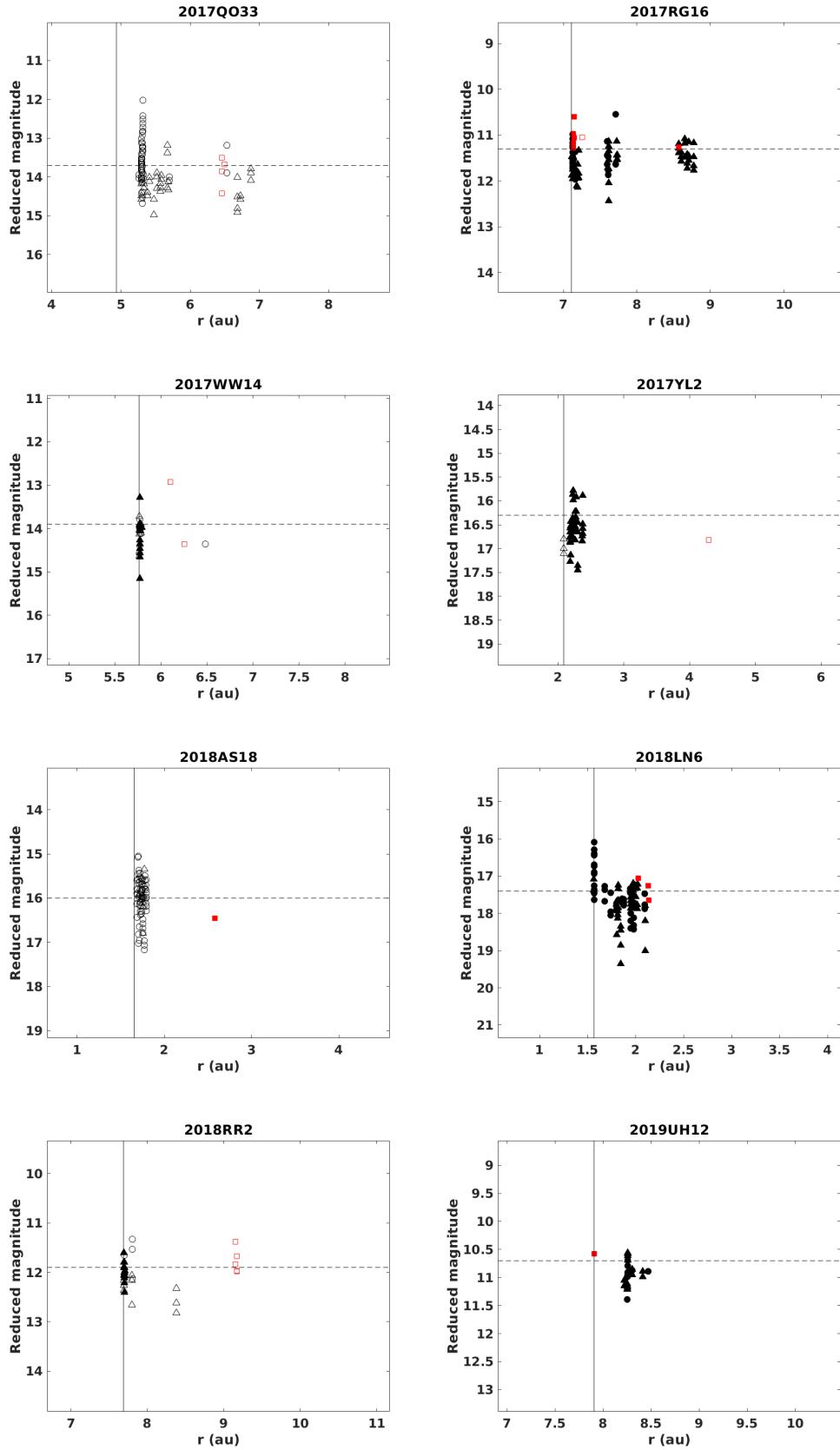


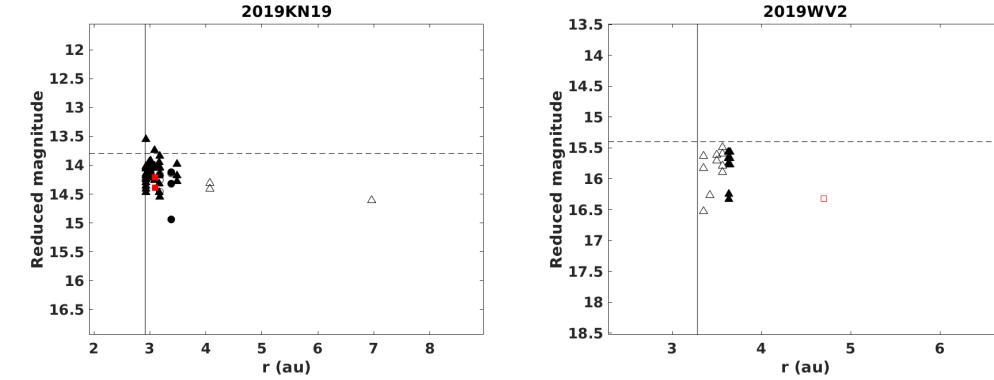




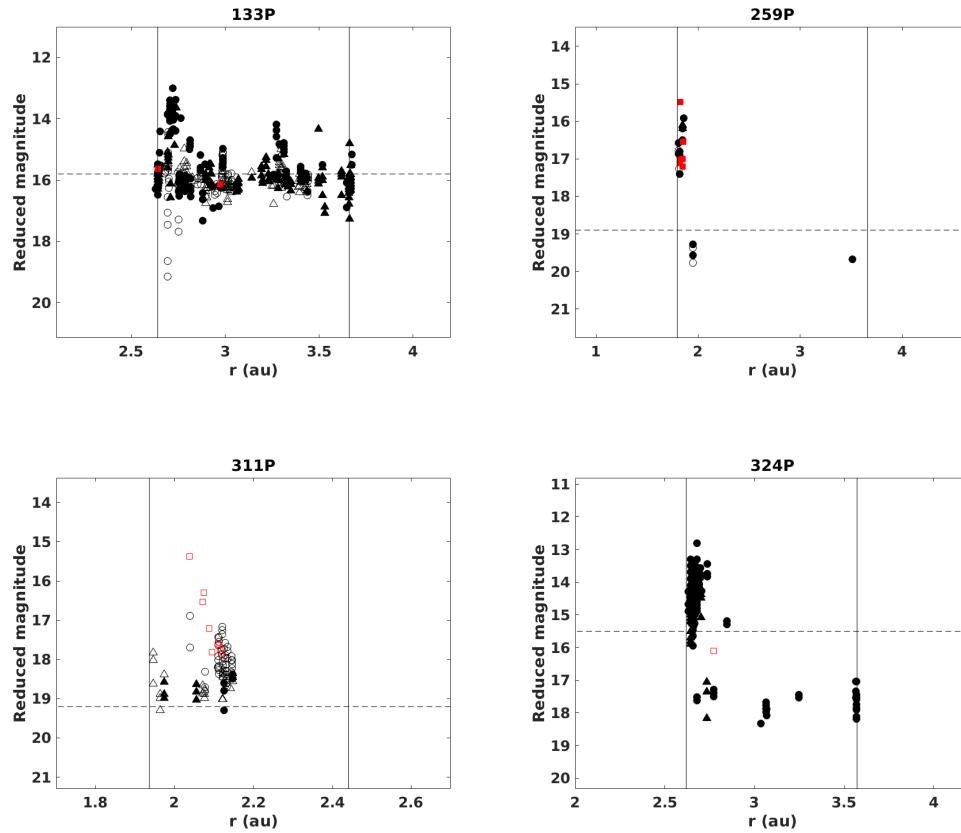


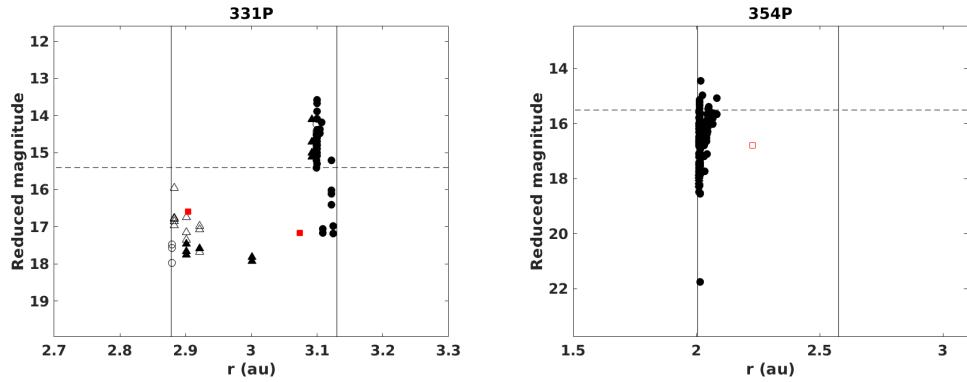






## AAs





# Datos asteroides activados

En este apéndice se incluyen los datos de observaciones activas de AAs utilizados en las gráficas del capítulo 7.

Objeto	Fecha	f
133P	14/07/96	21.5
	07/08/96	27.4
	18/09/96	37.4
	19/08/02	63.1
	07/09/02	67.1
	05/11/02	79.0
	19/05/07	349.8
	17/07/07	4.4
	18/08/07	12.3
259P	02/09/07	15.9
	02/09/08	18.2
	26/04/17	315.5
	30/06/17	332.9
	18/07/17	352.0
	17/09/17	20.4
	17/11/17	44.1
	22/12/17	59.7
311P	15/08/13	272.7
	10/09/13	281.0
	18/10/13	293.6
	13/11/13	302.5
	08/12/13	311.4
	31/12/13	319.8
	11/02/14	335.4
324P	15/09/10	20.2
	01/12/10	38.7
	22/05/15	313.4
	13/06/15	318.5
331P	22/03/12	140.3
	27/03/12	140.5
354P	07/01/10	12.4
	23/01/10	18.2
2015 X <sub>6</sub>	07/12/15	328.8
	30/12/15	335.7
	25/01/16	343.5

## **ANEXOS**

# The active centaur 2020 MK<sub>4</sub>★

C. de la Fuente Marcos<sup>1</sup>, R. de la Fuente Marcos<sup>2</sup>, J. Licandro<sup>3,4</sup>, M. Serra-Ricart<sup>3,4</sup>, S. Martino<sup>5</sup>, J. de León<sup>3,4</sup>, F. Chaudry<sup>3,4</sup>, and M. R. Alarcón<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> Universidad Complutense de Madrid, Ciudad Universitaria, E-28040 Madrid, Spain

<sup>2</sup> AEGORA Research Group, Facultad de Ciencias Matemáticas, Universidad Complutense de Madrid, Ciudad Universitaria, E-28040 Madrid, Spain

<sup>3</sup> Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), C/ Vía Láctea s/n, E-38205 La Laguna, Tenerife, Spain

<sup>4</sup> Departamento de Astrofísica, Universidad de La Laguna, E-38206 La Laguna, Tenerife, Spain

<sup>5</sup> Departamento de Astronomía, Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Iguá 4225, 11400, Montevideo, Uruguay

Received 7 August 2020 / Accepted 4 April 2021

## ABSTRACT

**Context.** Centaurs go around the Sun between the orbits of Jupiter and Neptune. Only a fraction of the known centaurs have been found to display comet-like features. Comet 29P/Schwassmann-Wachmann 1 is the most remarkable active centaur. It orbits the Sun just beyond Jupiter in a nearly circular path. Only a handful of known objects follow similar trajectories.

**Aims.** We present photometric observations of 2020 MK<sub>4</sub>, a recently found centaur with an orbit not too different from that of 29P, and we perform a preliminary exploration of its dynamical evolution.

**Methods.** We analyzed broadband Cousins *R* and Sloan *g'*, *r'*, and *i'* images of 2020 MK<sub>4</sub> acquired with the Jacobus Kapteyn Telescope and the IAC80 telescope to search for comet-like activity and to derive its surface colors and size. Its orbital evolution was studied using direct *N*-body simulations.

**Results.** Centaur 2020 MK<sub>4</sub> is neutral-gray in color and has a faint, compact comet-like coma. The values of its color indexes,  $(g' - r') = 0.42 \pm 0.04$  and  $(r' - i') = 0.17 \pm 0.04$ , are similar to the solar ones. A lower limit for the absolute magnitude of the nucleus is  $H_g = 11.30 \pm 0.03$  mag which, for an albedo in the range of 0.1–0.04, gives an upper limit for its size in the interval (23, 37) km. Its orbital evolution is very chaotic and 2020 MK<sub>4</sub> may be ejected from the Solar System during the next 200 kyr. Comet 29P experienced relatively close flybys with 2020 MK<sub>4</sub> in the past, sometimes when they were temporary Jovian satellites.

**Conclusions.** Based on the analysis of visible CCD images of 2020 MK<sub>4</sub>, we confirm the presence of a coma of material around a central nucleus. Its surface colors place this centaur among the most extreme members of the gray group. Although the past, present, and future dynamical evolution of 2020 MK<sub>4</sub> resembles that of 29P, more data are required to confirm or reject a possible connection between the two objects and perhaps others.

**Key words.** minor planets, asteroids: general – minor planets, asteroids: individual: 2020 MK<sub>4</sub> – comets: general – comets: individual: 29P/Schwassmann-Wachmann 1 – techniques: photometric – methods: numerical

## 1. Introduction

Centaurs go around the Sun following unstable paths between the orbits of Jupiter and Neptune (see for example Di Sisto & Brunini 2007; Chandler et al. 2020). While only a small fraction of the known centaurs have been found to exhibit cometary activity in the form of moderately intense eruptions, one object has managed to remain continuously active since its discovery nearly a century ago, experiencing semi-regular and comparatively very bright outbursts (see for example Jewitt 2009; Guibert-Lepoutre 2012). This object is 29P/Schwassmann-Wachmann 1 which orbits at a distance between 5.7 AU and 6.3 AU from the Sun, beyond the region where water-ice sublimates efficiently (see for example Jewitt 2009; Guibert-Lepoutre 2012; Wierzchos & Womack 2020). Its current orbit (see Table 1) is rather unusual among those of minor bodies located beyond Jupiter as it has both low eccentricity,  $e = 0.0448$ , and low inclination,

$i = 9^\circ 39$ . On June 24, 2020, J. Bulger, K. Chambers, T. Lowe, A. Schultz, and M. Willman observing with the 1.8-m Ritchey-Chretien telescope of the Pan-STARRS Project (Kaiser & Pan-STARRS Project Team 2004) from Haleakala, discovered a close orbital relative of 29P, 2020 MK<sub>4</sub>, at an apparent magnitude  $w$  of 19.8 (Drummond et al. 2020). Its latest orbit determination is shown in Table 1.

The size and shape of the orbit of 2020 MK<sub>4</sub> are not too different from those of the orbit of 29P. Prior to the discovery of 2020 MK<sub>4</sub>, the two closest orbital relatives of 29P (see Table 1) were the comets P/2008 CL94 (Lemmon) with a semi-major axis,  $a = 6.171$  AU (29P has 5.9930 AU),  $e = 0.1194$ , and  $i = 8^\circ 35$  (Scotti et al. 2009; Kulyk et al. 2016; Wong et al. 2019) and P/2010 TO20 (LINEAR-Grauer) with  $a = 5.6006$  AU,  $e = 0.0887$ , and  $i = 2^\circ 64$  (Grauer et al. 2011a; Spahr et al. 2011; Piani et al. 2011; Grauer et al. 2011b; Emel'yanenko et al. 2013; Lacerda 2013). On the other hand, the announcement MPEC<sup>1</sup> of 2020 MK<sub>4</sub> also showed a significant increase in brightness over the course of nearly a month which could be consistent with that of an active centaur (Drummond et al.

Send offprint requests to: C. de la Fuente Marcos, e-mail: nbplanet@ucm.es

\* Based on observations made with the 1m Jacobus Kapteyn Telescope (JKT) at Observatorio del Roque de los Muchachos in La Palma and the 82cm telescope of the Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC80) at Observatorio del Teide in Tenerife (Canary Islands, Spain).

<sup>1</sup> <https://www.minorplanetcenter.net/mpec/K20/K20N36.html>

**Table 1.** Values of the heliocentric Keplerian orbital elements and their respective  $1\sigma$  uncertainties of comets 29P/Schwassmann-Wachmann 1, P/2008 CL94 (Lemmon), and P/2010 TO20 (LINEAR-Grauer), and centaur 2020 MK<sub>4</sub>.

Orbital parameter	29P/Schwassmann-Wachmann 1	P/2008 CL94 (Lemmon)	P/2010 TO20 (LINEAR-Grauer)	2020 MK <sub>4</sub>
Semimajor axis, $a$ (AU)	= $5.99579143 \pm 0.0000004$	$6.1706 \pm 0.0002$	$5.6012 \pm 0.0003$	$6.15875 \pm 0.00007$
Eccentricity, $e$	= $0.04437627 \pm 0.0000002$	$0.11941 \pm 0.00008$	$0.088533 \pm 0.000005$	$0.0220 \pm 0.0002$
Inclination, $i$ (°)	= $9.382089 \pm 0.000002$	$8.34819 \pm 0.00010$	$2.63909 \pm 0.00012$	$6.66716 \pm 0.00010$
Longitude of the ascending node, $\Omega$ (°)	= $312.595345 \pm 0.000011$	$33.4617 \pm 0.0004$	$43.9656 \pm 0.0008$	$2.344 \pm 0.002$
Argument of perihelion, $\omega$ (°)	= $50.20600 \pm 0.00002$	$82.05 \pm 0.02$	$251.89 \pm 0.03$	$176.2 \pm 0.2$
Mean anomaly, $M$ (°)	= $176.60347 \pm 0.00002$	$54.801 \pm 0.011$	$82.78 \pm 0.03$	$112.7 \pm 0.2$
Perihelion distance, $q$ (AU)	= $5.72972056 \pm 0.00000013$	$5.4337 \pm 0.0004$	$5.1053 \pm 0.0002$	$6.0230 \pm 0.0010$
Aphelion distance, $Q$ (AU)	= $6.26186229 \pm 0.0000004$	$6.9074 \pm 0.0002$	$6.0971 \pm 0.0003$	$6.29447 \pm 0.00007$
Absolute magnitude, $H$ (mag)	= $8.6 \pm 1.0$	$8.5 \pm 0.4$	$5.9 \pm 0.4$	$11.4 \pm 0.6$

**Notes.** The orbit determination of comet 29P/Schwassmann-Wachmann 1 was computed by S. Naidu, it is referred to as epoch JD 2455844.5 (2011-Oct-10.0) TDB (Barycentric Dynamical Time, J2000.0 ecliptic and equinox), and it is based on 33010 observations with a data-arc span of 8729 days (solution date, 2021-Feb-02 23:49:37 PST). The orbit determination of comet P/2008 CL94 (Lemmon) is referred to as epoch JD 2454769.5 (2008-Oct-30.0) TDB and it is based on 61 observations with a data-arc span of 491 days (solution date, 2020-Nov-11 10:56:31 PST). The orbit determination of comet P/2010 TO20 (LINEAR-Grauer) is referred to as epoch JD 2455832.5 (2011-Sep-28.0) TDB and it is based on 58 observations with a data-arc span of 776 days (solution date, 2020-Nov-11 10:56:01 PST). The orbit determination of 2020 MK<sub>4</sub> is referred to as epoch JD 2459000.5 (2020-May-31.0) TDB and it is based on 108 observations with a data-arc span of 147 days (solution date, 2020-Dec-28 03:38:37 PST). Source: JPL's SBDB.

2020).<sup>2</sup> These two properties, an orbit similar to that of 29P and a possible rapid brightness increase, led us to investigate further. In this work, we study the nature (asteroidal versus cometary) of 2020 MK<sub>4</sub> using photometry and perform a preliminary exploration of its past, present, and future dynamical evolution. In Sect. 2, we describe the observations acquired and in Sect. 3, we present the results of our analysis. In Sect. 4, we explore the dynamical evolution of 2020 MK<sub>4</sub> and compare it with that of 29P and related objects. Our findings are discussed in Sect. 5. Finally, our conclusions are summarized in Sect. 6.

## 2. Observations

We obtained CCD images of 2020 MK<sub>4</sub> with the 0.82 m IAC80 telescope at Teide Observatory on July 16 and July 24, 2020 and also with the 1.0 m JKT<sup>3</sup> telescope operated by the South-eastern Association for Research in Astronomy (SARA, Keel et al. 2017) on July 17, 2020. We used CAMELOT-2 (in Spanish, “CAmara MEjorada Ligera del Observatorio del Teide”-2)<sup>4</sup> with the IAC80<sup>5</sup> telescope, a camera with an e2V 231-84 4K×4K pixels CCD, a 0.336 arcsec pixel<sup>-1</sup> plate scale, and a 12.3×12.3 effective field of view. With the JKT, we used a 2K×2K pixels ANDOR Ikon-L 2048 CCD camera with a 0.34 arcsec pixel<sup>-1</sup> plate scale and a 11.6×11.6 field of view.

On July 16 and with the IAC80, we obtained a series of images (exposure times of 120 s each) using the Cousins  $R$  filter between 1:04 and 2:19 UT. On July 17 and with the JKT, we obtained a series of 93 images (exposure times of 90 s each) using the Sloan  $r'$  filter between 0:13 and 2:37 UT. Finally, between July 23, 23:01 UT and July 24, 00:54 UT, with the IAC80, we obtained a series of images (exposure times of 300 s each) using

the Sloan  $g'$ ,  $r'$ , and  $i'$  filters (12 images in the  $r'$ , four in the  $g'$ , and four in the  $i'$ -band, doing four series of  $r'$ ,  $g'$ ,  $r'$ ,  $i'$ ,  $r'$  images). We used sidereal tracking and the individual exposure time — in particular the first two nights — was selected to ensure that the movement of the comet was smaller than the value of the seeing to avoid traces. Images were bias and flat-field corrected (using sky flats). Observational circumstances are summarized in Table 2. On July 24, we also observed the Landolt standard field star Mark A (Landolt 1992) to derive an absolute photometric calibration.

## 3. Results

### 3.1. Cometary-like activity

During the analysis of the images of 2020 MK<sub>4</sub>, we immediately noticed that the full width at half maximum (FWHM) of the point spread function (PSF) of 2020 MK<sub>4</sub> was systematically wider than that of the stars during the first two nights of observations, suggesting the presence of a faint, compact cometary-like coma. In order to determine if the object was active, we made a direct comparison of its surface brightness profile with the profiles of the stars in the field. We applied the following steps. First, we aligned the images so that the stars were all lined up and stacked onto one another. A set of bright stars in the combined image was selected and, for these stars, the intensity versus distance to centroid was extracted, normalized to the maximum, and combined to retrieve a high signal-to-noise ratio (S/N) stellar profile. In a second step, all the images were realigned, so then 2020 MK<sub>4</sub> was lined up and then combined (see Fig. 1). The profile of the object was subsequently extracted from the combined image and normalized. Finally, the resulting stellar profile and that of the object were fitted with a Moffat function and plotted together to compare them. In Fig. 2, we show the analysis of the profile of the combined images obtained on July 16 and 17. During both nights, the brightness profile of 2020 MK<sub>4</sub> was significantly wider, indicating that 2020 MK<sub>4</sub> had a coma.

We also used the image with a higher S/N obtained on July 17 to check if the difference between the object and star profile could be due to the proper motion of the object. In an attempt to see the coma, we subtracted the image of a bright star from

<sup>2</sup> An extensive search for precovery images of 2020 MK<sub>4</sub> carried out by S. Deen confirmed its absence down to  $z < 22$  mag around its expected location near perihelion back in 2016 (<https://groups.io/g/mpml/message/35875>).

<sup>3</sup> <http://www.ing.iac.es/astronomy/telescopes/jkt/>

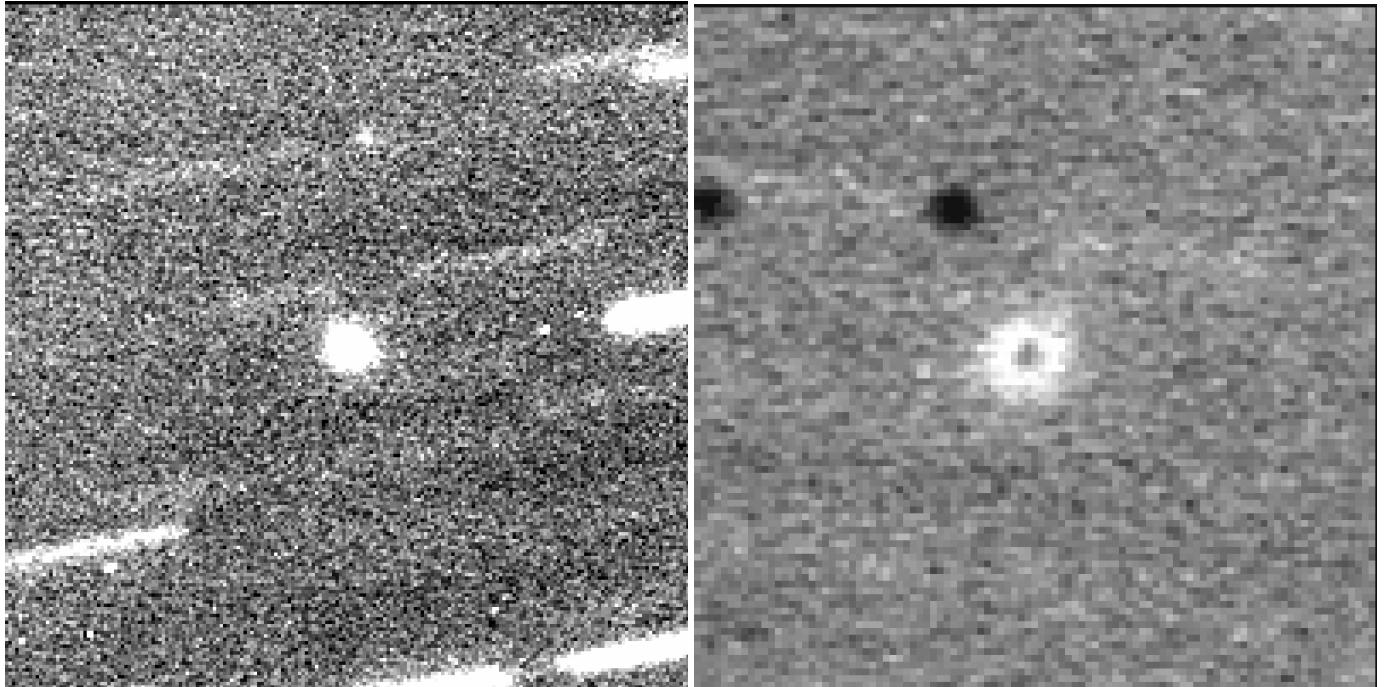
<sup>4</sup> <http://research.iac.es/00CC/iac-managed-telescopes/iac80/camelot2-2/>

<sup>5</sup> <http://research.iac.es/00CC/iac-managed-telescopes/iac80/>

**Table 2.** Circumstances of observation of centaur 2020 MK<sub>4</sub>.

Date	Tel.	UT-range (h:m)	X	$r_h$ (AU)	$\Delta$ (AU)	$\alpha$ (°)	$\theta_\odot$ (°)	$\theta_{-v}$ (°)	Filters
July 16	IAC80	01:04 – 02:19	1.80 – 1.85	6.228	5.220	1.3	322.5	255.3	R
July 17	JKT	00:13 – 02:37	1.80 – 1.96	6.228	5.220	1.2	329.8	255.3	r'
July 23/24	IAC80	23.01 – 00:54	1.80 – 2.15	6.229	5.223	1.4	23.2	255.7	g', r', i'

**Notes.** Information includes the date, airmass (X), heliocentric ( $r_h$ ) and geocentric ( $\Delta$ ) distances, phase angle ( $\alpha$ ), position angle of the projected anti-Solar direction ( $\theta_\odot$ ), and the position angle of the projected negative heliocentric velocity vector ( $\theta_{-v}$ ). Orbital values have been taken from JPL’s HORIZONS system and they are the averages within the indicated UT-range.



**Fig. 1.** Observations of 2020 MK<sub>4</sub>. *Left panel:* Image of 2020 MK<sub>4</sub> obtained on July 17, 2020 with the JKT telescope. This image is a combination of 93 images (exposure time of 90 s each), realigned so 2020 MK<sub>4</sub> was lined up. The field is 68''×68''; north is up, and east is to the left. *Right panel:* Image combined on the comet minus the same combination of images centered on a bright star. Both images were sky subtracted and normalized to the peak before subtraction. It is important to notice that there is a circular residual compatible with the presence of a compact faint coma around 2020 MK<sub>4</sub>. In this case, the field of view is 34''×34''. The coma has a diameter of about 4.1'' or 15 500 km at the geocentric distance indicated in Table 2.

the combined image in which the stars were aligned from that of 2020 MK<sub>4</sub> in the combined image for which 2020 MK<sub>4</sub> was lined up. In order to do that, we subtracted the sky value and normalized the images to the brightness peak of the object and star profile, respectively, carefully aligning the object and star, and we subtracted the star image. The result of this procedure is shown in Fig. 1. The resulting image presents an almost perfectly circular, but doughnut-shaped residual. This corresponds to the expected shape of a compact coma and not to the effect of the proper motion of the object that would produce residuals only in the direction of the motion. Therefore, we conclude that 2020 MK<sub>4</sub> was active at the time of the observations.

### 3.2. Photometry and colors

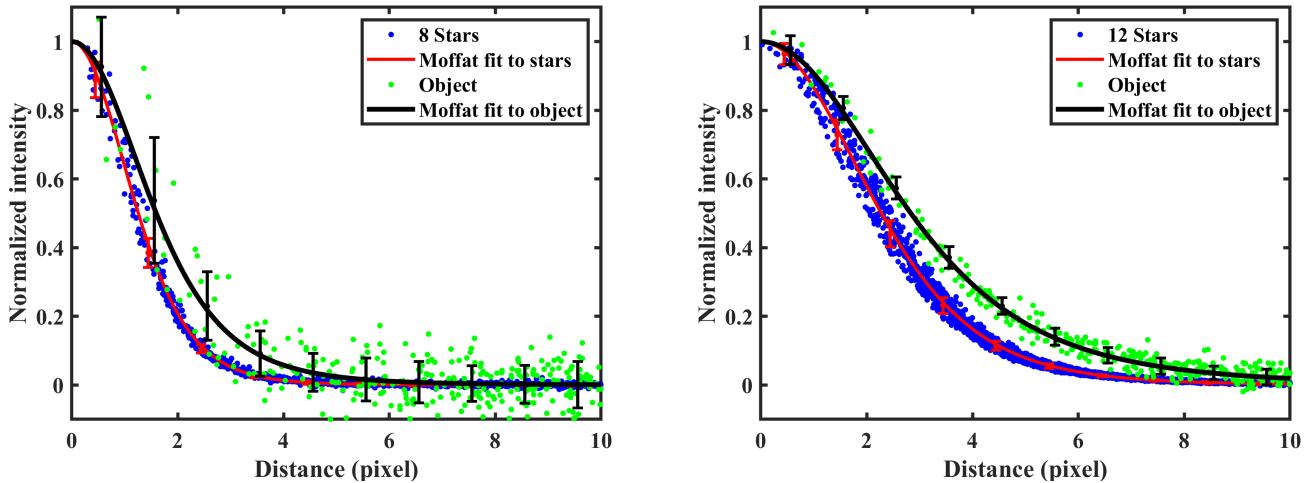
In order to derive a limit for the absolute magnitude and obtain the colors of the object, we did aperture photometry of the combined images for each night using standard tasks in the Image

Reduction and Analysis Facility (IRAF).<sup>6</sup> We followed a procedure similar to the one described in Licandro et al. (2019). We used an aperture diameter equivalent to the object’s FWHM. We obtained the absolute calibration using field stars with Sloan  $g'$ ,  $r'$ , and  $i'$  magnitudes determined in the Pan-STARRS catalogue<sup>7</sup> and, on July 24, also using the flux calibrated Landolt stars in the field of the star Mark A and the transformation equations from Bilir et al. (2005) and Rodgers et al. (2006) when needed. We obtained a magnitude of  $r' = 18.73 \pm 0.07$ ,  $r' = 18.88 \pm 0.03$ , and  $r' = 18.84 \pm 0.03$  on July 16, 17, and 24, respectively, and the colors  $(g' - r') = 0.42 \pm 0.04$  and  $(r' - i') = 0.17 \pm 0.04$  on July 24.

Using Eq. (1) from Jewitt & Luu (2019), we derived a lower limit for the absolute magnitude of 2020 MK<sub>4</sub>,  $H_g = 11.30 \pm 0.03$  mag. Assuming a value of the visible geometric albedo between 0.1 and 0.04, this value of  $H_g$  provides an up-

<sup>6</sup> IRAF is distributed by the National Optical Astronomy Observatory, which is operated by the Association of Universities for Research in Astronomy, Inc., under a cooperative agreement with the National Science Foundation.

<sup>7</sup> <https://catalogs.mast.stsci.edu/panstarrs/>



**Fig. 2.** Profile analysis of the combined images of 2020 MK<sub>4</sub> obtained on July 16 (left panel) and July 17 (right panel). Each plot contains the values of the normalized intensity as a function of the distance from the centroid (in pixels) for the stars (blue dots), the Moffat fit for the stars (red line), values of normalized intensity for the object (green dots), and the Moffat fit for the object (black line). Red bars correspond to the stars while black bars correspond to the object, and they are placed in the middle of the interval; an artificial offset in the x-axis was introduced to avoid overlapping symbols. It is important to notice that the profile of 2020 MK<sub>4</sub> is significantly wider both nights, confirming that 2020 MK<sub>4</sub> shows clear signs of cometary-like activity.

per limit for the radius of the nucleus of the object,  $R_N$ , between 23 km and 37 km. Using this value of  $H_g$  and assuming that this is the real absolute magnitude of the centaur, the apparent magnitude of 2020 MK<sub>4</sub> during June 2020 could have been 19.0 mag <  $r'$  < 18.8 mag. However, the observed brightness reported by Pan-STARRS in Drummond et al. (2020) shows that the object was 1 or 2 magnitudes fainter, with values around 21 mag (in  $w$ ) early in June and 19.9 mag at the end of the month, indicative of an activation around early June or perhaps earlier than that.

In order to make an approximate evaluation of the relative contribution of the nucleus to the total flux in the used aperture, we subtracted a bright field star of known  $r'$  magnitude from the comet images as we did above. In this case, we first scaled the star to  $r' = 20.73, 19.73$ , and 19.53 magnitude (in other words, 2.0, 1.0, and 0.8 magnitudes fainter than that of the comet). The normalized radial profiles of the resulting images are shown in Fig. 3 together with the profile of a simulated isotropic coma (thick, black curve). The profile of an isotropic coma was generated using the *mkobject* task of IRAF, a  $1/\rho$  profile for the coma, and a Moffat profile with the same parameters obtained from the field stars to simulate the seeing. Figure 3 suggests that the nuclear magnitude is  $\sim 0.8\text{--}1.0$  mag fainter than the limit we obtained, that is  $H_g \sim 12.30$  mag, and thus the nucleus contributes about 66% to 52% of the total flux in the used aperture. If the nucleus is brighter than 19.53 mag, then a “hole” in the comet’s profile should appear at the center; if it is fainter, then the coma profile should be much more compact than the isotropic assumption. Our results suggest a value of  $R_N$  between 15 km and 23 km.

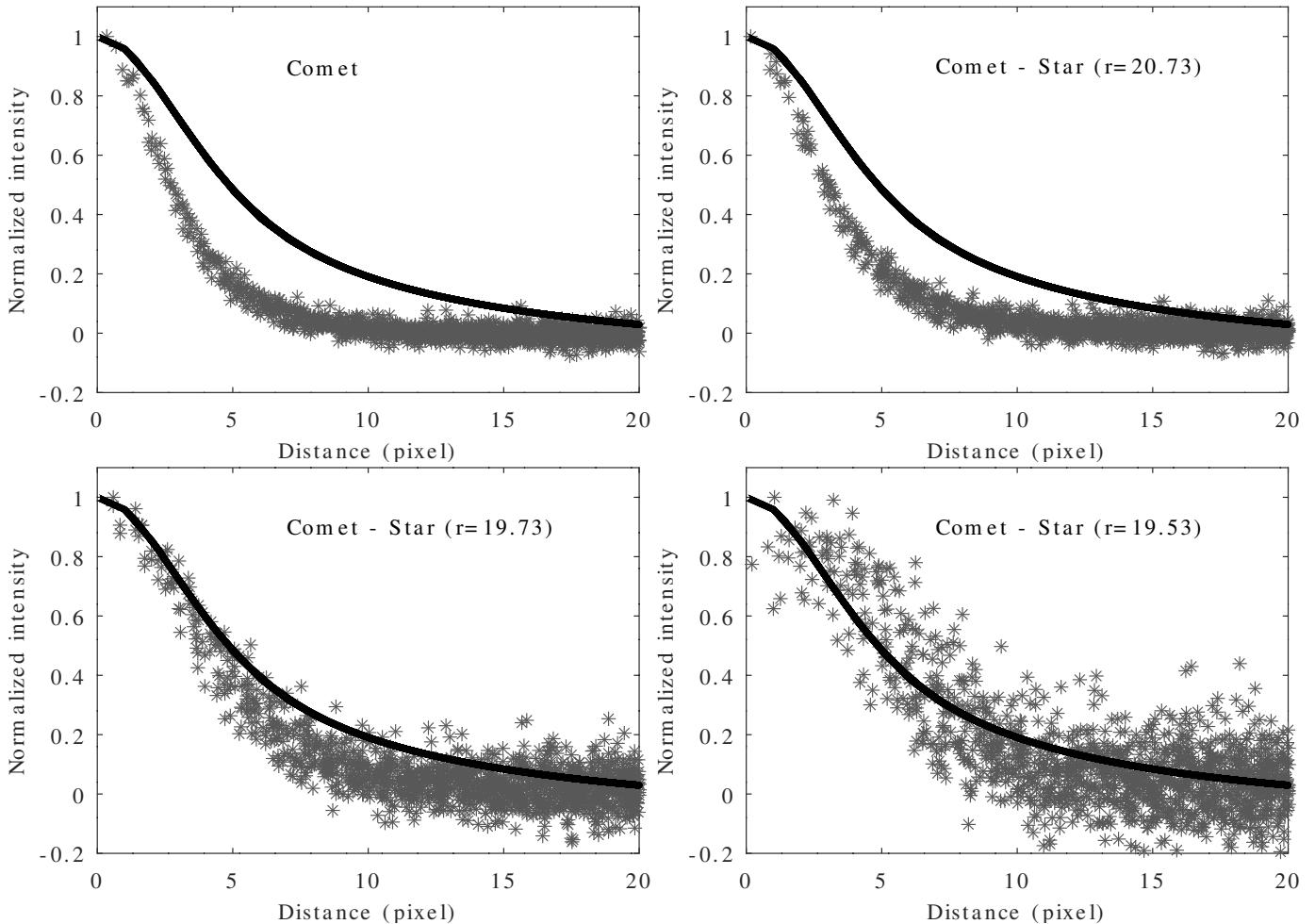
On the other hand, we noticed that the colors of 2020 MK<sub>4</sub> are similar to the solar ones<sup>8</sup>. The colors of 2020 MK<sub>4</sub> correspond to those of the members of the group of the gray centaurs (see Peixinho et al. 2003; Tegler et al. 2003, 2008, 2016); in fact, it is perhaps one of the less red centaurs discovered thus

far. It is well known that centaur objects exhibit a peculiar physical property and that their visual colors divide the population into two distinct groups: gray and red centaurs. The colors of 2020 MK<sub>4</sub> are also consistent with those observed in other active centaurs; they all belong to the gray population, with the exception of (523676) 2013 UL<sub>10</sub>, a red centaur (Mazzotta Epifani et al. 2018). Melita & Licandro (2012) showed that the different thermal reprocessing on the surface of bodies of the red group on one side and the active and gray groups on the other is responsible for the observed bimodality in the distribution of the surface colors of the centaurs; the color distribution of the gray centaurs is similar to that of comet nuclei because gray centaurs likely had cometary activity. As we discussed above, the flux in the used aperture is not just due to the brightness of the nucleus, but to the nucleus plus the dust coma. The coma can contribute with  $\sim 50\%$  of the total flux and this can also have some effect on the measured color. In any case and in order to blue a red centaur so that it almost has a neutral color, the intrinsic color of the coma should be unusually blue. However, it is clear that once its active nature has been confirmed, further observations with a higher S/N are needed to understand the behavior of this centaur better.

#### 4. Context and orbital evolution

Centaur 2020 MK<sub>4</sub> has been confirmed as active, but we still have a question regarding the similarity between its orbit and that of comet 29P/Schwassmann-Wachmann 1 and related objects (see Table 1). The characterization of its orbital context requires the study of the present-day orbital architecture of the sample of known objects that populate this region of the orbital parameter space. Here, such a study is carried out by exploring the distributions of mutual nodal distances and orientations in space. In order to analyze the results, we produced histograms using the Matplotlib library (Hunter 2007) with sets of bins computed using NumPy (van der Walt et al. 2011; Harris et al. 2020) by applying the Freedman and Diaconis rule (Freedman & Diaconis 1981); kernel density estimations were carried out using the Python library SciPy (Virtanen et al. 2020).

<sup>8</sup> Solar colors are  $(g' - r') = 0.44 \pm 0.02$ ,  $(r' - i') = 0.11 \pm 0.02$ , and  $(i' - z') = 0.02 \pm 0.03$  (see <https://www.sdss.org/dr12/algorithms/ugrizvegasun/>).



**Fig. 3.** Evaluating the coma of 2020 MK<sub>4</sub>. Normalized radial profile of the combined images of 2020 MK<sub>4</sub> obtained on July 17 minus a star profile of a different brightness (the assumed nucleus) together with the normalized radial profile of an isotropic coma (thick, black curve, see text). *Upper-left panel:* The profile of the comet. *Upper-right panel:* The profile of the comet minus that of a nucleus (a star) of  $r'=20.73$  mag. *Bottom-left panel:* The profile of the comet minus that of a nucleus of  $r'=19.73$  mag. *Bottom-right panel:* The profile of the comet minus that of a nucleus of  $r'=19.53$  mag. It is important to notice that the coma that remains once a nucleus of  $r'=19.53$  mag has been subtracted resembles what an isotropic coma should look like.

On the other hand, the assessment of the past, present, and future orbital evolution of 2020 MK<sub>4</sub> should be based on the statistical analysis of results from a representative sample of  $N$ -body simulations. Here, such calculations were carried out using a direct  $N$ -body code implemented by Aarseth (2003) that is publicly available from the website of the Institute of Astronomy of the University of Cambridge.<sup>9</sup> This software uses the Hermite integration scheme described by Makino (1991). Results from this code compare well with those from Laskar et al. (2011) among others, as extensively discussed by de la Fuente Marcos & de la Fuente Marcos (2012).

The initial conditions used in our calculations come from the orbit determination in Table 1 which has been released by Jet Propulsion Laboratory's Solar System Dynamics Group Small-Body Database (JPL's SSDG SBDB).<sup>10</sup> Input data used in our orbital context analysis and in our simulations were obtained from JPL's HORIZONS online solar system data and ephemeris computation service (Giorgini 2011, 2015).<sup>11</sup> Most data were retrieved from JPL's SBDB and HORIZONS using tools provided

by the Python package Astroquery (Ginsburg et al. 2019). Although the orbit determination still needs to be improved (the orbital size and shape are relatively good, but the orientation in space is still somewhat uncertain), particularly when compared with that of 29P in Table 1, we believe that it is good enough to reach some robust conclusions given the nature of our calculations. In addition to studying some representative orbits, we performed longer calculations that applied the Monte Carlo using the Covariance Matrix (MCCM) methodology described by de la Fuente Marcos & de la Fuente Marcos (2015) in which a Monte Carlo process generates control or clone orbits (3000) based on the nominal orbit, but adding random noise on each orbital element by making use of the covariance matrix, which was also retrieved from JPL's SSDG SBDB.

#### 4.1. Orbital context

Here, we focus on the sample of objects with  $a \in (5.4, 7)$  AU,  $e < 0.15$ , and  $i < 10^\circ$  that includes the four objects in Table 1 and eight other known small bodies that follow this type of low-eccentricity, low-inclination orbit located just beyond that of Jupiter: 2011 FS<sub>53</sub>, 2012 BS<sub>76</sub>, 2014 EB<sub>132</sub>, 2014 EF<sub>115</sub>,

<sup>9</sup> <http://www.ast.cam.ac.uk/~sverre/web/pages/nbody.htm>

<sup>10</sup> <https://ssd.jpl.nasa.gov/sbdb.cgi>

<sup>11</sup> <https://ssd.jpl.nasa.gov/?horizons>

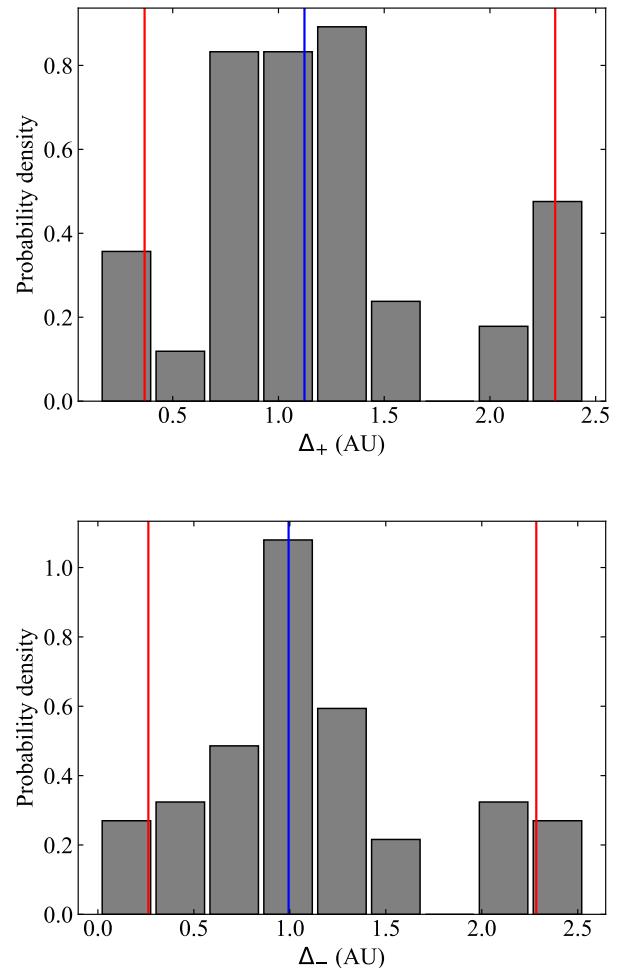
2014 EM<sub>120</sub>, 2014 EO<sub>68</sub>, 2014 EW<sub>77</sub>, and 2016 AK<sub>51</sub>. Unfortunately, all of them have very poor orbit determinations based on about a dozen observations and spanning data arcs of 2 to 18 days. The distribution of mutual nodal distances (their absolute values) was computed as described in Appendix A, using data from JPL's SSDG SBDB. A small mutual nodal distance implies that the objects might experience close flybys, but this must be confirmed by using  $N$ -body simulations.

Our sample produced 66 pairs of mutual nodal distances,  $\Delta_{\pm}$  (the results for each pair come from a set of  $10^4$  pairs of virtual objects as described in Appendix A). The distribution of mutual nodal distances for the ascending mutual nodes is shown in the upper panel of Fig. 4 and the one corresponding to the descending mutual nodes is displayed in the bottom panel of Fig. 4. These distributions were computed using mean values and uncertainties in the orbit determinations as described in Appendix A. The first percentile of the distribution in  $\Delta_+$  is equal to 0.22 AU and the one of  $\Delta_-$  is 0.04 AU. The first percentile is often considered as the statistically significant boundary to select severe outliers.

When considering the 66 pairs of mutual nodal distances, two clear outliers emerge: For 29P and 2020 MK<sub>4</sub>  $\Delta_+ = 0.1536 \pm 0.0005$  AU (median, and the 16th and 84th percentiles) and for 29P and P/2010 TO20 (LINEAR-Grauer)  $\Delta_- = 0.0083 \pm 0.0003$  AU. In both cases, it is statistically unlikely that the small values of the mutual nodal distances could be accidental (see Fig. 5) and some type of connection must exist, be it in the form of resonant forces or a true physical relationship in which both objects come from a disrupted parent body. If disruption events are the cause of the small mutual nodal distances, two of them may be required to explain the observed values. The distributions of angular distances between pairs of orbital poles and perihelia were computed as described in Appendix B using data from JPL's SSDG SBDB. The orientations in space of the orbits of these objects are compatible with those coming from a continuous uniform distribution (average and standard deviation values, see Fig. 6, upper panel) of angular distances between pairs of orbital poles and perihelia.

It may be argued that our choice of parameter boundaries to select the sample of minor bodies that follow 29P-like orbits is somewhat artificial. Roberts & Muñoz-Gutiérrez (2021) have studied the dynamics of small bodies that go around the Sun between the orbits of Jupiter and Saturn. In their work, it is argued that all of these bodies have orbits similar to that of comet 29P. They call this group the “near centaurs” or NCs that have values of the perihelion distance  $q > 5.204$  AU and the aphelion distance  $Q \in (5.6, 9.583)$  AU. JPL's SSDG SBDB shows that this group includes 42 objects; after discarding all the fragments of comet D/1993 F2 (Shoemaker-Levy 9), and 2004 VP<sub>112</sub> and 2007 TB<sub>434</sub> because their orbit determinations are very uncertain, our working sample includes 19 objects. This NC sample does not include P/2010 TO20 (LINEAR-Grauer) nor most of the objects in our previous sample with the exception of 2011 FS<sub>53</sub>, because their perihelia are shorter, but it does include the other three objects in Table 1.

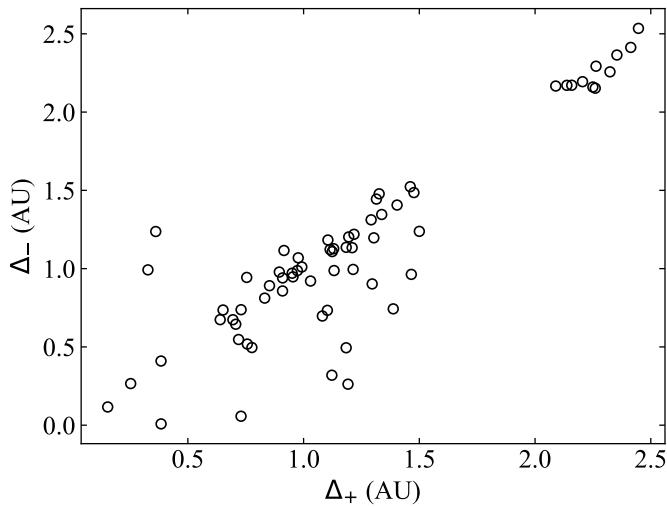
If we repeat the previous analysis for these NCs, we obtain Figs. 7 and 8. For this sample, the first percentile of the distribution in  $\Delta_+$  is equal to 0.015 AU and the one of  $\Delta_-$  is 0.040 AU. When considering the 171 pairs of mutual nodal distances (see Fig. 8), four clear outliers emerge: For 29P and (494219) 2016 LN<sub>8</sub>  $\Delta_- = 0.003090 \pm 0.000002$  AU, for 2015 UH<sub>67</sub> and P/2005 T3 (Read)  $\Delta_- = 0.03 \pm 0.02$  AU, for P/2008 CL94 (Lemmon) and P/2011 C2 (Gibbs)  $\Delta_+ = 0.0096 \pm 0.0005$  AU, and for P/2008 CL94 (Lemmon) and P/2015 M2 (PANSTARRS)  $\Delta_+ =$



**Fig. 4.** Distribution of mutual nodal distances. *Upper panel:* For the ascending mutual nodes of the sample of 12 small bodies following orbits similar to that of 29P. The median is shown in blue and the 5th and 95th percentiles are in red. *Bottom panel:* For the descending mutual nodes of the same sample. In the histogram, we use bins computed using the Freedman and Diaconis rule (Freedman & Diaconis 1981) and counts to form a probability density so the area under the histogram will sum to one.

$0.0047 \pm 0.0004$  AU. Although Roberts & Muñoz-Gutiérrez (2021) argue that most of these objects are partly subjected to various mean-motion resonances with the giant planets, such small values of  $\Delta_{\pm}$  are suggestive of an interacting population in which fragmentation events may be taking place during outburst episodes.

Additional evidence along this line of reasoning comes from the study of the distributions of angular distances between pairs of orbital poles and perihelia defined by the angles  $\alpha_p$  and  $\alpha_q$  (computed as described in Appendix B, see Fig. 6, bottom panel), and the difference in time of perihelion passage,  $\Delta T_q$ . The first percentiles of these distributions are 2°68, 5°64, and 0.062 yr, respectively. Outlier pairs are as follows: 2013 SO<sub>107</sub> and 2014 HY<sub>195</sub> with  $\alpha_p = 2^\circ 252 \pm 0^\circ 003$ , 39P/Oterma and P/2005 S2 (Skiff) with  $\alpha_q = 5^\circ 51 \pm 0^\circ 12$ , 39P/Oterma and P/2005 T3 (Read)  $\alpha_q = 1^\circ 2^{+0^\circ 5}_{-0^\circ 3}$ , P/2005 T3 (Read) and P/2008 CL94 (Lemmon) with  $\alpha_p = 2^\circ 236 \pm 0^\circ 011$ , 2015 UH<sub>67</sub> and 2020 MK<sub>4</sub> with  $\Delta T_q = 0.013^{+0.010}_{-0.008}$  yr, and 2020 MK<sub>4</sub> and P/2015 M2 (PANSTARRS) with  $\Delta T_q = 0.053 \pm$



**Fig. 5.** Mutual nodal distances of objects in 29P-like orbits. *Upper panel*: 66 pairs of mutual nodal distances. *Bottom panel*: Gaussian kernel density estimation of the same data.

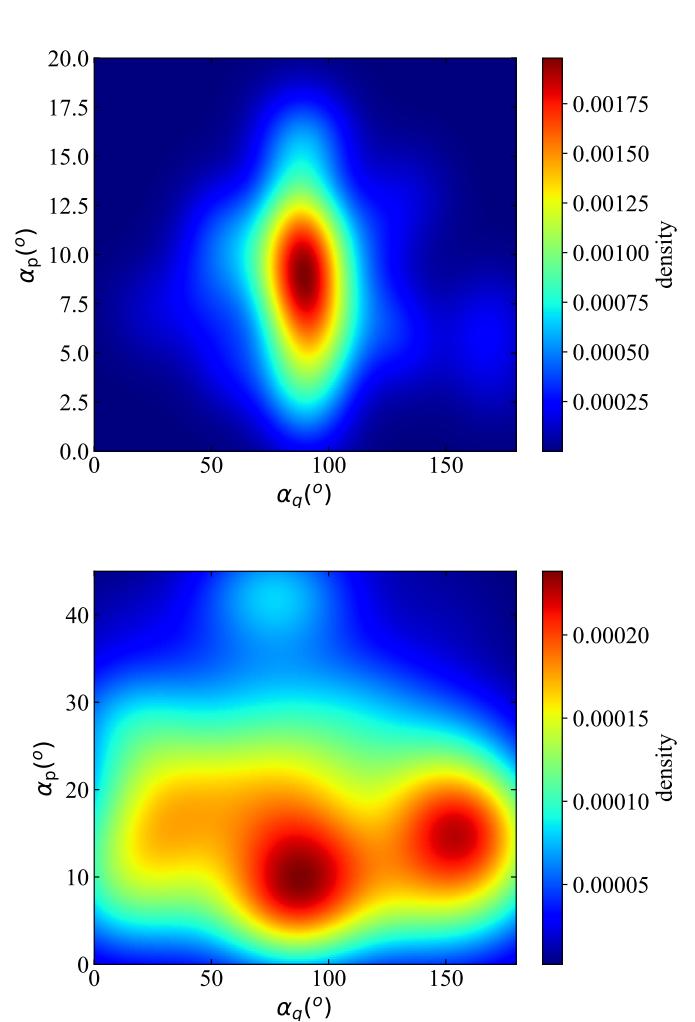
0.010 yr. Some of these objects have highly correlated orbits in terms of their orientation in space and timing, which are difficult to explain by chance or mean-motion resonances alone.

#### 4.2. Current dynamical status

Minor body 2020 MK<sub>4</sub> goes around the Sun between the orbits of Jupiter and Neptune, so it is a centaur. It has a current value of the Tisserand's parameter,  $T_J$  (Murray & Dermott 1999), of 3.005; therefore, and following Levison & Duncan (1997), it cannot be a Jupiter-family comet because the value is not in the interval (2, 3), even if we account for the uncertainties. In contrast, 29P has a value of the Tisserand parameter of 2.984 and it has remained consistently under 3.0 since its discovery back in 1927. In this context, the Tisserand parameter, which is a quasi-invariant, is given by the expression:

$$T_J = \frac{a}{a_J} + 2 \cos i \sqrt{\frac{a_J}{a} (1 - e^2)}, \quad (1)$$

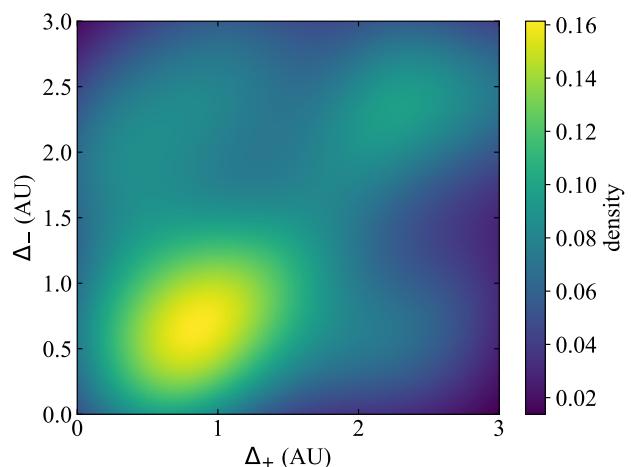
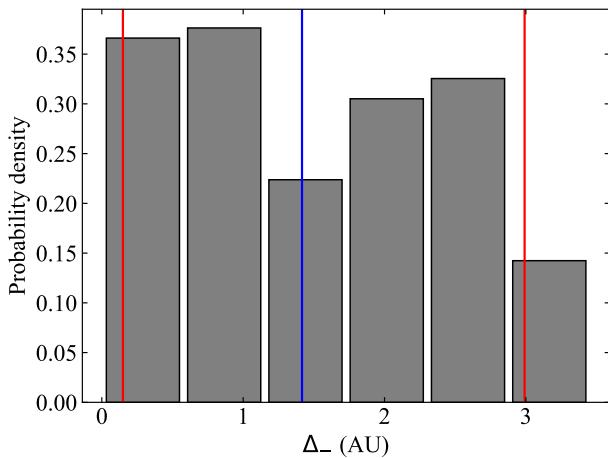
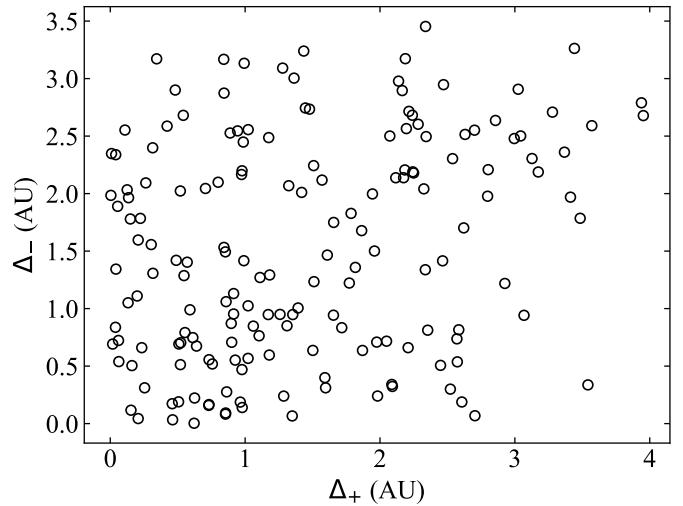
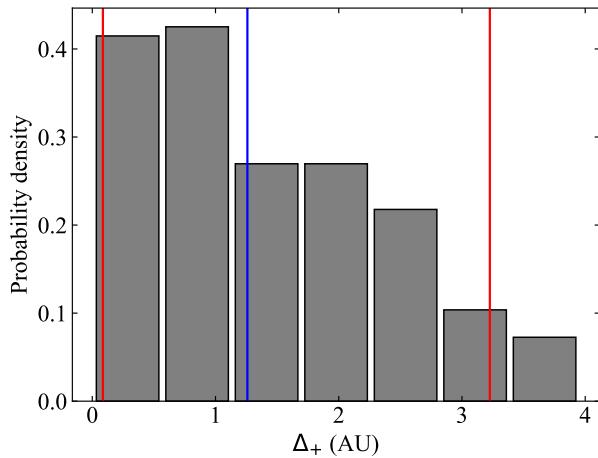
where  $a$ ,  $e$ , and  $i$  are the semimajor axis, eccentricity, and inclination of the orbit of the minor body under study, respectively, and  $a_J$  is the semimajor axis of the orbit of Jupiter (Murray & Dermott 1999). The functional form of this parameter makes it



**Fig. 6.** Orientations in space of the orbits. *Upper panel*: Gaussian kernel density estimation for the 66 pairs of 29P-like orbits. *Bottom panel*: Gaussian kernel density estimation for the 171 pairs of NC orbits.

robust against relatively large variations in the values of the relevant orbital parameters, which helps its application to objects with rather chaotic orbital evolutions.

The panels on the right-hand side of Figure 9 show the short-term evolution of relevant parameters of representative control orbits with Cartesian vectors separated by  $\pm 3\sigma$  and  $\pm 9\sigma$  from the nominal values in Table C.1. The orbital evolution is very chaotic and some instances lead to ejections integrating into the past (not shown) and towards the future. Ejections are the result of very close encounters with Jupiter and other giant planets, but also with the Sun following episodes similar to those described in de la Fuente Marcos et al. (2015) for comet 96P/Machholz 1. Close encounters with Jupiter drive the very chaotic short-term behavior observed in the panels on the left in Fig. 9. The evolution of  $T_J$  (bottom panels) shows that 2020 MK<sub>4</sub> is unlikely to become a long-term member of the Jupiter-family comet dynamical class for control orbits in the  $\pm 3\sigma$  range, both in the past and the future. However, control orbits more separated from the nominal one,  $\pm 9\sigma$ , show extended lengthy incursions inside the Jupiter-family comet orbital domain (the value of  $T_J$  librates, see bottom panels in Fig. 9). The bottom panel of Figure 10 shows that 29P has a much lower probability of being a long-term member of the Jupiter-family comet group (the control orbits are based on the data in Table C.2). In general terms, the or-



**Fig. 7.** Distribution of mutual nodal distances. *Upper panel:* For the ascending mutual nodes of the sample of 19 NCs. The median is shown in blue and the 5th and 95th percentiles are in red. *Bottom panel:* For the descending mutual nodes of the same sample. In the histogram, we use bins computed using the Freedman and Diaconis rule (Freedman & Diaconis 1981) and counts to form a probability density so the area under the histogram will sum to one.

bital evolution displayed in Figs. 9 and 10 is similar and nearly equally chaotic (readers are encouraged to compare the evolution of  $a$ ,  $e$ , and  $i$  in both figures); this is the standard dynamical behavior for objects in these orbits (see for example Grazier et al. 2019).

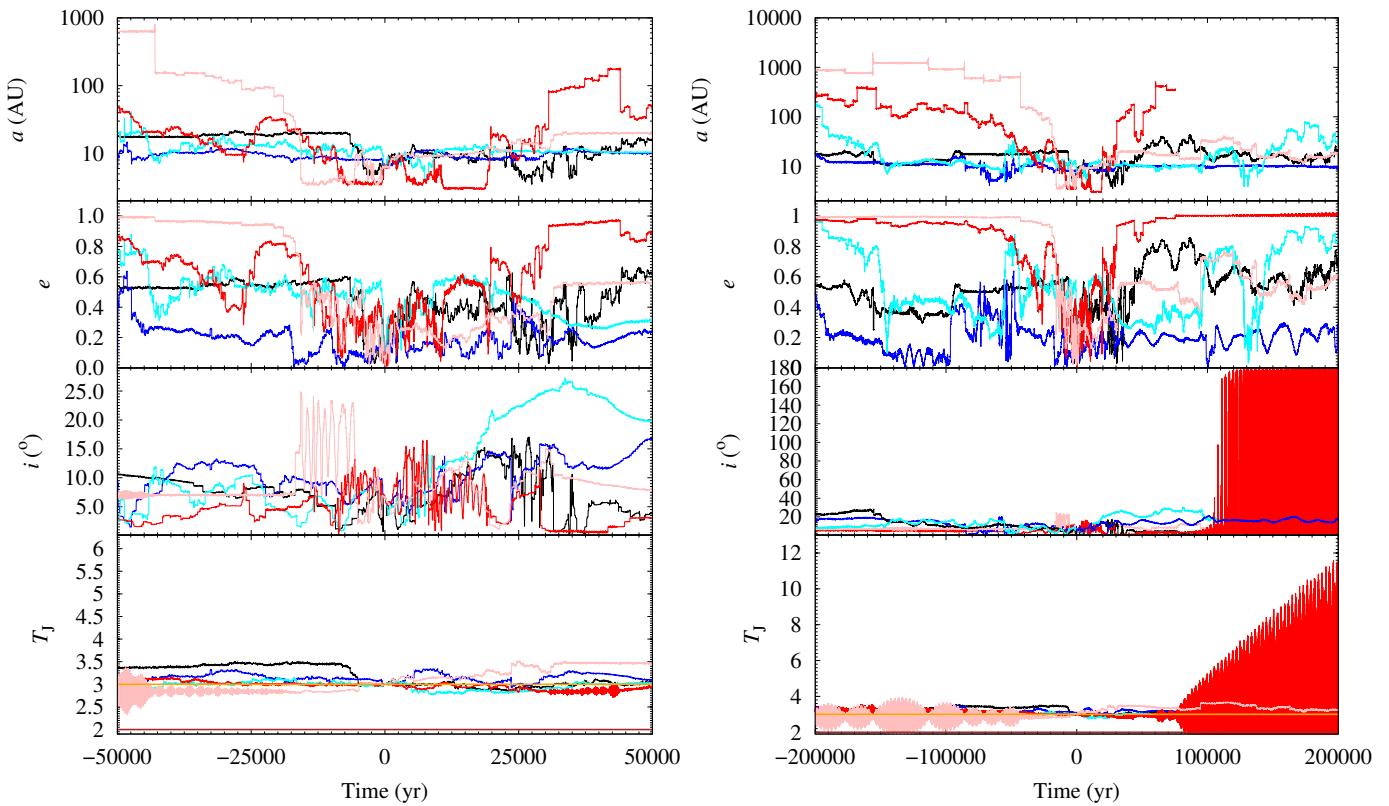
Figure 11 shows the shorter-term evolution of relevant parameters of representative orbits for all the objects in Table 1. Both 29P and 2020 MK<sub>4</sub> are not currently experiencing very close encounters with Jupiter and Saturn, but P/2008 CL94 (Lemmon) approaches Jupiter inside the Hill radius of the planet and P/2010 TO20 (LINEAR-Grauer) does the same for both Jupiter and Saturn.

#### 4.3. Future orbital evolution

Figure 9 shows that 2020 MK<sub>4</sub> is not unlikely to leave the Solar System within the next 200 kyr. However, close encounters with Jupiter may lead to an eventual collision with the giant planet. A similar picture, but less extreme, emerges for 29P when considering Fig. 10 and is consistent with the previous work by Nes-

lušan et al. (2017), Sarid et al. (2019), and Roberts & Muñoz-Gutiérrez (2021). Longer calculations carried out using MCCM to generate control orbits of 2020 MK<sub>4</sub> (see Fig. 12, right-hand side panel) yield a value for the probability of ejection from the Solar System during the next 0.5 Myr of  $0.48 \pm 0.03$  (average and standard deviation). These results are robust as they remain consistent between orbit determinations.

The bottom right panels of Figure 11 show that the future evolution of 2020 MK<sub>4</sub> becomes more chaotic a few hundred years into the future when it will start experiencing close encounters under the Hill radius with Jupiter. Nearly 700 yr into the future, it will start experiencing close encounters under the Hill radius with Saturn as well and the overall orbital evolution will become even more chaotic. A similar behavior is observed for 29P (see Fig. 11, upper left panels). P/2008 CL94 is far more engaged with Jupiter, interacting at a close range now and in the future, but it will remain fairly detached from Saturn (see Fig. 11, upper right panels). P/2010 TO20 remains strongly perturbed by Jupiter and is slightly less affected by Saturn (see Fig. 11, bottom left panels), although close encounters with both planets seem to drive its very chaotic orbital evolution. All these objects have a significant probability of leaving the Solar System in the relatively near future.



**Fig. 9.** Short-term evolution of relevant parameters of 2020 MK<sub>4</sub>. *Left panels*: focus on a shorter time window but correspond to the same data shown in the right-hand side panels. *Right panels*: evolution of the semimajor axis,  $a$  (upper panels), of the nominal orbit (in black) as described by the orbit determination in Table 1 and those of control orbits or clones with Cartesian vectors separated  $+3\sigma$  (in blue),  $-3\sigma$  (in cyan),  $+9\sigma$  (in red), and  $-9\sigma$  (in pink) from the nominal values in Table C.1. The second from the top panels show the evolution of the eccentricity,  $e$ , for the same sample of control orbits. The second from the bottom panels display the inclination,  $i$ . The bottom panels show the variations of the Tisserand's parameter,  $T_J$  and include the boundary references 2 (in brown) and 3 (in orange). The output time-step size is 20 yr, the origin of time is epoch 2459000.5 TDB.

#### 4.4. Past orbital evolution: Possible origin

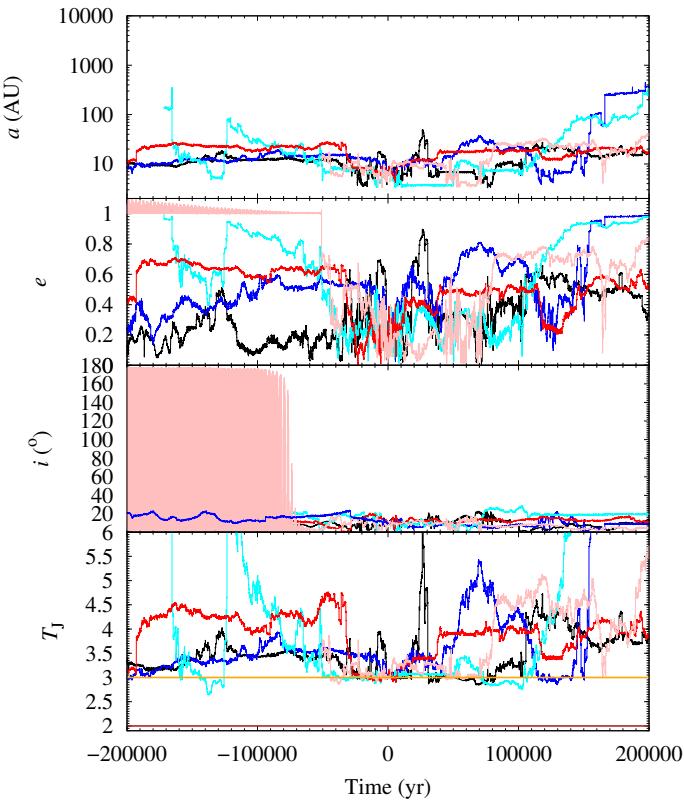
The key unknowns to determine are the origin of 2020 MK4 and whether 2020 MK4 and 29P, and perhaps other objects, are related. Figures 9 and 10 show that there is a clear resemblance between the past orbital evolution of both objects, but this does not imply a physical relationship as the evolutions are both very chaotic. An exploration of this scenario requires the analysis of a large set of  $N$ -body simulations integrating backwards in time for this pair. The statistical study of minimum approach distances may help in supporting or rejecting a scenario in which 2020 MK<sub>4</sub> could be a fragment of 29P.

Using a sample of 20 000 pairs of Gaussianly distributed control orbits based on the Cartesian vectors in Tables C.1 and C.2 and integrated backwards in time for 5 000 yr (a similar sample integrated for 10 000 yr produces nearly the same results), we have studied how the distribution is for minimum approach distances and also the relative position of Jupiter during such close encounters. The top panel of Figure 13 shows the distribution; the median and the 16th and 84th percentiles of the minimum approach distance distribution are  $0.27^{+0.21}_{-0.15}$  AU. Our calculations show that close encounters between these objects under one Lunar distance are possible (the closest flyby was at about 363 000 km), but the most surprising result is that the probability of this pair experiencing a close encounter (following the distribution in Fig. 13, top panel) while 2020 MK<sub>4</sub> has a negative Jovicentric energy is 2.7% and most of these temporary captures were within 100 Jovian radii. About 63% of close encounters

take place within 1 Hill radius of Jupiter. The distribution of the durations of many of these capture events is shown in Fig. 14 (top panel and second panel from the top). Comet 29P tends to experience slightly longer captures than 2020 MK<sub>4</sub>.

In general, (temporary or long-term) capture (by Jupiter) is a very low probability event. On the other hand, the fact that close encounters between 2020 MK<sub>4</sub> and 29P may have taken place when one or both of these objects were temporary satellites of Jupiter opens the door to an alternative dynamical scenario for the origin of 2020 MK<sub>4</sub>, that of a release by 29P with the gravitational assistance of Jupiter during a capture episode. Such a scenario has been observed in the past, for example the tidal disruption suffered by comet Shoemaker-Levy 9 in 1992 (see for example Nakano et al. 1993). Comet Shoemaker-Levy 9 was a Jovian satellite prior to impact (Benner 1994; Benner & McKinnon 1995). With the available data, an origin for 2020 MK<sub>4</sub> during a tidal (or binary) disruption event triggered by Jupiter on 29P cannot be excluded. Binary comets are rare, but they are known to exist (Agarwal et al. 2017, 2020); comet 288P/(300163) 2006 VW<sub>139</sub> could even be a triple (Kim et al. 2020).

In order to gain a better understanding of the role of Jupiter on the evolution of the objects shown in Table 1, we performed a similar study for the pairs P/2008 CL94 (Lemmon) and 2020 MK<sub>4</sub> as well as P/2010 TO20 (LINEAR-Grauer) and 2020 MK<sub>4</sub>. The middle and bottom panels of Figure 13 summarize our results that use initial conditions from Tables C.3 and C.4. Close flybys when one or both members of the pair were temporary satellites of Jupiter are found in both cases with re-



**Fig. 10.** Short-term evolution of relevant parameters of comet 29P/Schwassmann-Wachmann 1. Similar to Fig. 9 but for data in Table C.2. The output time-step size is 20 yr, the origin of time is epoch 2459000.5 TDB.

spective probabilities of 0.023 and 0.026. The distributions of the durations of the observed temporary capture events are displayed in Fig. 14. For comparison, the jovicentric orbital periods of known satellites of Jupiter range from slightly above 7 h (for Metis) to 2.17 yr (for S/2003 J 23).<sup>12</sup>

The topic of temporary capture of cometary objects by Jupiter has already been studied in the past (see for example Carusi & Valsecchi 1981). Most known Jovian satellites have orbital periods close to 2 yr and move along very elongated and inclined paths (Sheppard & Jewitt 2003) so the objects discussed here may not complete one revolution around Jupiter before returning to interplanetary space. Following Fedorets et al. (2017), we may consider these episodes as linked to temporarily-captured flybys, not temporarily-captured orbiters. Although temporarily-captured orbiter episodes in which the object completes one orbit around the planet are also possible.

As for the possible past orbital evolution of 2020 MK<sub>4</sub> neglecting the possibility that it may have had an origin within the 29P-P/2008 CL94-P/2010 TO20 cometary complex, the results of longer integrations using MCCM to generate initial conditions indicate (see Fig. 12, left panel) that the probability of 2020 MK<sub>4</sub> having been captured from interstellar space during the past 0.5 Myr could be  $0.49 \pm 0.04$ . This result together with the previous one for the probability of ejection indicate that the orbital evolution of 2020 MK<sub>4</sub> was as unstable in the past as it will be in the future.

## 5. Discussion

The origin of objects, such as 2020 MK<sub>4</sub>, was thought to be in the trans-Neptunian or Edgeworth-Kuiper belt (see for example Fernandez 1980; Levison & Duncan 1997), but it is now generally accepted that this population may have its source in the scattered belt (see for example Di Sisto et al. 2009; Brasser & Wang 2015; Di Sisto & Rossignoli 2020; Roberts & Muñoz-Gutiérrez 2021); however, it is also important to consider the analysis in Grazier et al. (2018). Although cometary activity (either continuous or in the form of outbursts) has been detected at 30.7 AU for C/1995 O1 (Hale-Bopp) (Szabó et al. 2011), at 28.1 AU for 1P/Halley (Hainaut et al. 2004), and at 23.7 AU for C/2017 K2 (PANSTARRS) (Jewitt et al. 2017), so far no member of the trans-Neptunian belt (cold or scattered) has been recognized as active (see for example Cabral et al. 2019). In addition to comets, the only group of distant minor bodies that includes known active objects is that of the centaurs.

According to JPL’s SBDB search engine, as of March 5, 2021, there have been 547 known centaurs (objects with orbits between Jupiter and Neptune,  $5.5 \text{ AU} < a < 30.1 \text{ AU}$ ). The list of known active centaurs maintained by Y. R. Fernández<sup>13</sup> includes 34 objects, not counting (523676) 2013 UL<sub>10</sub> (Mazzotta Epifani et al. 2018) and the one discussed here, 2020 MK<sub>4</sub>. Therefore, about 6.6% of the known centaurs have been observed at some point losing mass and displaying a cometary physical appearance. Not counting 29P/Schwassmann-Wachmann 1, the first active centaur to be identified as such was 95P/Chiron (Hartmann et al. 1990). Outbursts are sometimes associated with the ejection of sizable fragments, as in the case of 174P/Echeclus (see for example Rousselot 2008; Kareta et al. 2019).

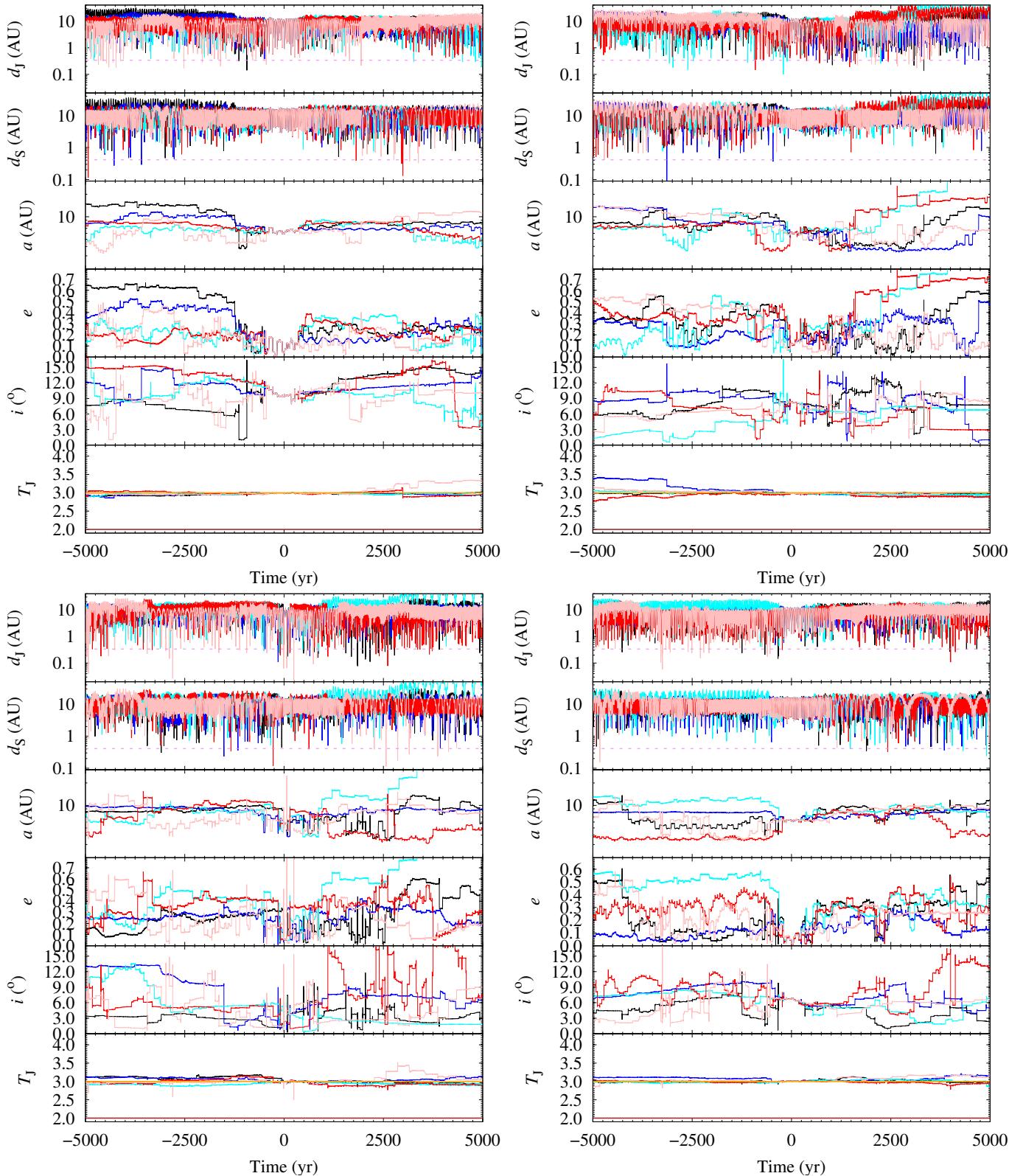
Figure 11 shows that the objects in Table 1 had a very chaotic dynamical past and that their future orbital evolution will be equally chaotic, including very close encounters with Jupiter and perhaps also Saturn. In addition, Fig. 13 indicates that these objects may have experienced relatively close mutual flybys and in some cases such close encounters may have taken place when one or both of the objects involved were temporarily trapped by Jupiter’s gravitational pull, as shown in Fig. 14. Therefore, Jupiter plays a central role in the dynamics of this group of objects.

In general, our results indicate that the evolution of these minor bodies can only be reliably predicted a few thousand years into the past or the future, which is consistent with the conclusions in the extensive study of Roberts & Muñoz-Gutiérrez (2021). Although Roberts & Muñoz-Gutiérrez (2021) argue that mean-motion resonances with the giant planets may stabilize some of the orbits in this region and they provide some examples, for the set of objects studied here, resonant behavior fails to appear or at least its strength is not enough to mitigate their chaotic orbital evolution. The dynamical behavior observed is compatible with that of the centaurs experiencing generalized diffusion as discussed by Bailey & Malhotra (2009). In addition, relatively close and recurrent encounters between these objects are possible, and they are not impeded by resonances. Temporary captures by Jupiter of these objects are also recurrent (see Fig. 15).

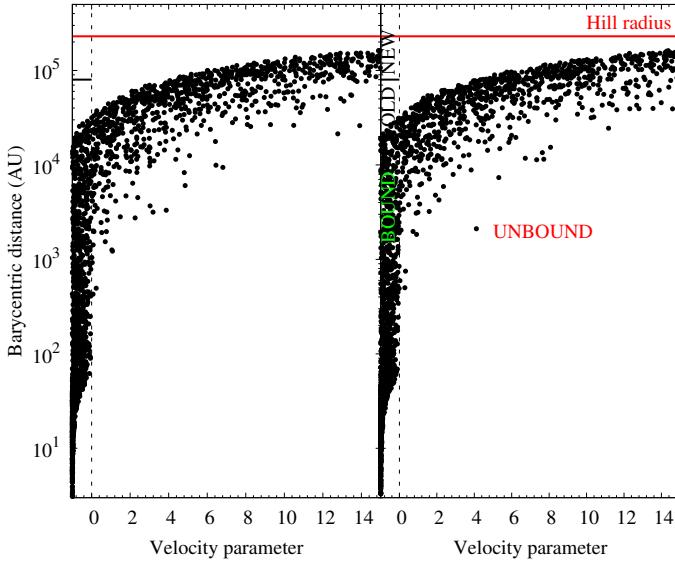
The orbital context analysis presented in Sect. 4.1 opens the possibility to close encounters between objects of this dynamical class as the mutual nodal distances are small. This theoretical possibility is confirmed by our  $N$ -body simulations, which indicate that close approaches at distances on the order of  $10^5 \text{ km}$  (or

<sup>12</sup> <https://minorplanetcenter.net/mpec/K21/K21BD6.html>

<sup>13</sup> <https://physics.ucf.edu/~yfernandez/cometlist.html#ce>



**Fig. 11.** Short-term evolution of relevant parameters of comets 29P/Schwassmann-Wachmann 1, P/2008 CL94 (Lemmon), and P/2010 TO20 (LINEAR-Grauer), and centaur 2020 MK<sub>4</sub>. Results for 29P are shown in the upper left panels, those of P/2008 CL94 are displayed in the upper right panels, the bottom left panels show those of P/2010 TO20, and the bottom right panels focus on 2020 MK<sub>4</sub>. For each set of panels, we show the evolution of the distances to Jupiter (top panel) and Saturn (second to top) of the nominal orbit (in black) as described by the corresponding orbit determination in Table 1 and those of control orbits or clones with Cartesian vectors separated  $+3\sigma$  (in blue),  $-3\sigma$  (in cyan),  $+9\sigma$  (in red), and  $-9\sigma$  (in pink) from the nominal values in Appendix C. The Hill radii of Jupiter, 0.338 AU, and Saturn, 0.412 AU, is shown in red. The third panel from the top shows the evolution of the semimajor axis,  $a$ . The third panel from the bottom shows the evolution of the eccentricity,  $e$ , for the same sample of control orbits. The second panel from the bottom displays the inclination,  $i$ . The bottom panel shows the variations in Tisserand's parameter,  $T_J$ , and includes the boundary references 2 (in brown) and 3 (in orange). The output time-step size is 1 yr, and the origin of time is epoch 2459000.5 TDB.

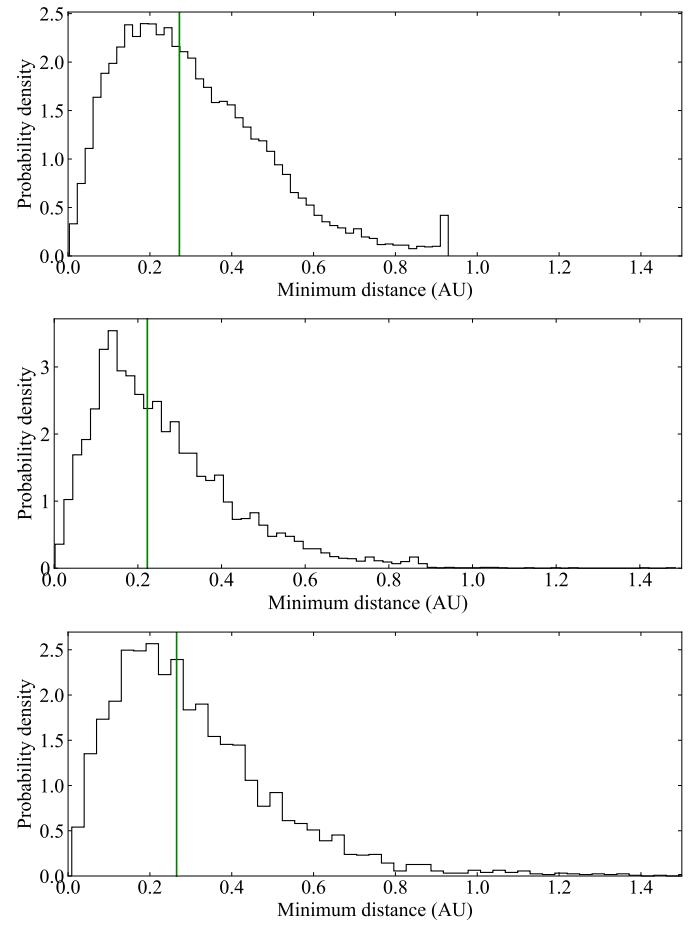


**Fig. 12.** Past and future of 2020 MK<sub>4</sub>. Values of the barycentric distance as a function of the velocity parameter 0.5 Myr into the past (left panel) and future (right panel) for 3000 control orbits of 2020 MK<sub>4</sub>. The velocity parameter is the difference between the barycentric and escape velocities at the computed barycentric distance in units of the escape velocity. Positive values of the velocity parameter identify control orbits that could be the result of capture (left panel) or lead to escape (right panel). The thick black line corresponds to the aphelion distance  $-a(1+e)$ , limiting case  $e = 1$ —that defines the domain of dynamically old comets with  $a^{-1} > 2.5 \times 10^{-5}$  AU<sup>-1</sup> (see Królikowska & Dybczyński 2017); the thick red line marks the radius of the Hill sphere of the Solar System (see for example Chebotarev 1965).

$10^{-3}$  AU) are indeed possible. However, this is the typical size of the coma of comet 29P when in outburst (see for example Trigo-Rodríguez et al. 2008) and this has the potential for a physical interaction between material in the comae of these objects during close encounters. This issue has never been considered before in the literature and it may accelerate the erosion rate of a cometary object as one active object may periodically penetrate the nebulous envelope of another and both experience mutual enhanced surface bombardment episodes.

Although our dynamical results cannot determine the origin of any of the objects studied in the scattered belt, they uncover an alternative or perhaps complementary scenario that may lead to increasing the population of objects following 29P-like orbits, that of the in situ production of these objects thanks to interactions with Jupiter of some precursor bodies. The existence of pairs of objects with small values of their mutual nodal distances and correlated orbits discussed in Sect. 4.1 provides additional support to this scenario when considering the very short dynamical lifetimes of these bodies.

As for the nature of the cometary-like activity of 2020 MK<sub>4</sub> presented in this paper, it seems to be irregular, not continuous. The data<sup>14</sup> available from the Minor Planet Center (MPC, Rudenko 2016; Hernandez et al. 2019)<sup>15</sup> indicate that its apparent magnitude went from  $G = 21.12$  mag on June 15, 2020, to  $G = 18.1$  mag on July 10, 2020, returning to  $G = 22.5$  mag by November 9, 2020. The data from the MPC suggest that the outburst may have stopped at some time between early September and November. Irregular activity is often found among centaurs



**Fig. 13.** Distribution of minimum approach distances. *Upper panel:* For the pair 29P/Schwassmann-Wachmann 1 and 2020 MK<sub>4</sub>. *Middle panel:* For the pair P/2008 CL94 (Lemmon) and 2020 MK<sub>4</sub>. *Bottom panel:* For the pair P/2010 TO20 (LINEAR-Grauer) and 2020 MK<sub>4</sub>. Median values are displayed as vertical green lines. The bins were computed using the Freedman and Diaconis rule implemented in NumPy (van der Walt et al. 2011; Harris et al. 2020). In the histogram, we use counts to form a probability density so the area under the histogram will sum to one.

(Jewitt 2009). Follow-up observations of this centaur are necessary to understand the nature of its activity.

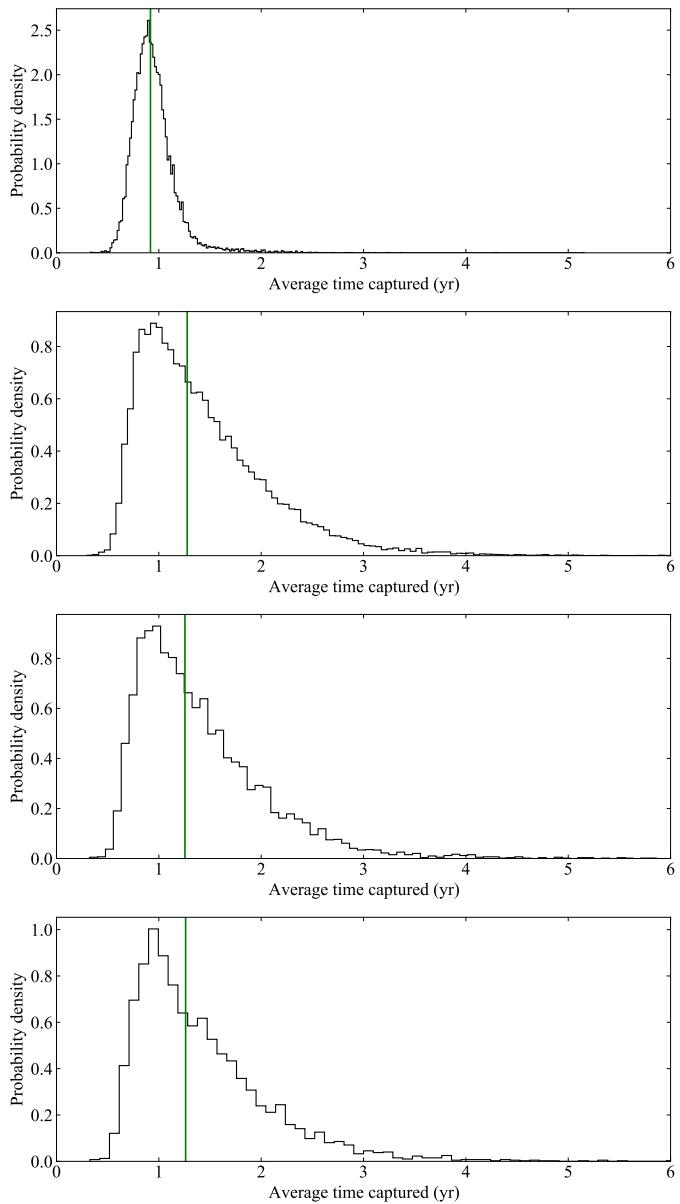
## 6. Conclusions

In this paper, we have presented observations of 2020 MK<sub>4</sub> obtained with JKT and IAC80 which we have used to establish the active status of this centaur and to derive its colors. Its current orbital context has been outlined and its past, present, and future orbital evolution has been explored using direct  $N$ -body simulations. The object was originally selected to carry out this study because its orbit determination resembles that of comet 29P/Schwassmann-Wachmann 1 (see Table 1) and its first published observations hinted at an ongoing outburst event. Our conclusions can be summarized as follows.

1. We show that the PSF of 2020 MK<sub>4</sub> is nonstellar and this confirms the presence of cometary-like activity in the form of a conspicuous coma.
2. Centaur 2020 MK<sub>4</sub> is neutral-gray in color. The values of its color indexes,  $(g' - r') = 0.42 \pm 0.04$  and  $(r' - i') = 0.17 \pm 0.04$ , are similar to the solar ones. These values are typical for active centaurs.

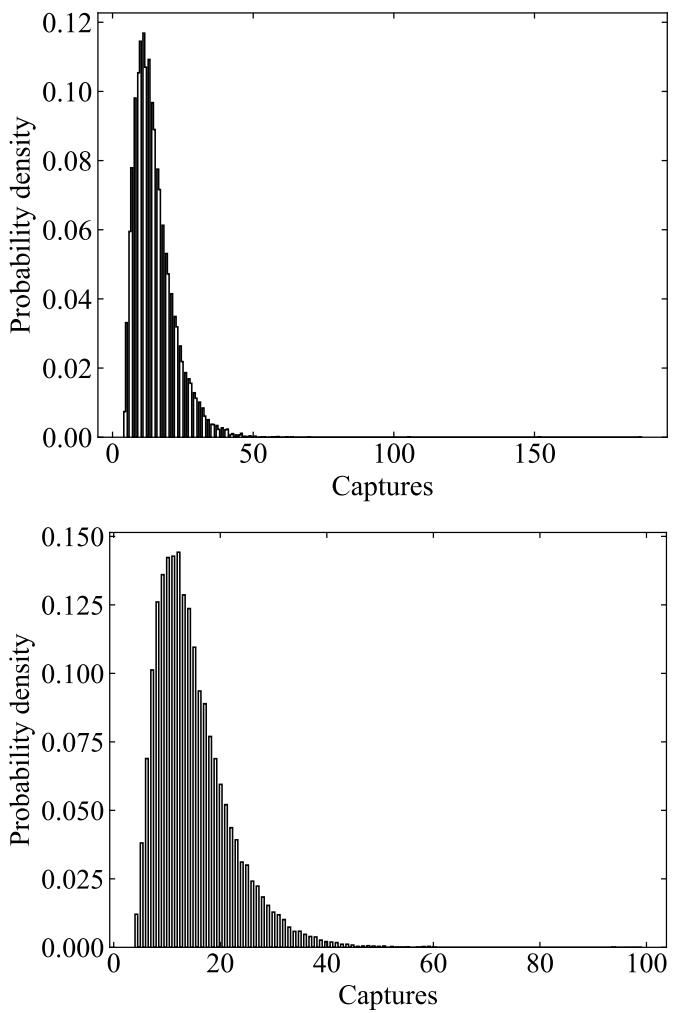
<sup>14</sup> [https://www.minorplanetcenter.net/db\\_search/show\\_object?utf8=%E2%9C%93&object\\_id=2020+MK4](https://www.minorplanetcenter.net/db_search/show_object?utf8=%E2%9C%93&object_id=2020+MK4)

<sup>15</sup> <https://minorplanetcenter.net>



**Fig. 14.** Distribution of average durations of temporary captures by Jupiter. *Upper panel:* For 2020 MK<sub>4</sub>, 29P/Schwassmann-Wachmann 1 (*second to upper panel*), P/2008 CL94 (Lemmon) (*second to bottom panel*), and P/2010 TO20 (LINEAR-Grauer) (*bottom panel*). Median values are displayed as vertical green lines. The bins were computed using the Freedman and Diaconis rule implemented in NumPy (van der Walt et al. 2011; Harris et al. 2020). In the histogram, we use counts to form a probability density so the area under the histogram will sum to one.

3. A lower limit for the absolute magnitude of the nucleus of 2020 MK<sub>4</sub> is  $H_g = 11.30 \pm 0.03$  mag which, for an albedo in the range of 0.1–0.04, gives an upper limit for its size in the interval (23, 37) km.
4. The orbital evolution of 2020 MK<sub>4</sub> is very chaotic and it may eventually be ejected from the Solar System. It had a very chaotic dynamical past as well.
5. Both 2020 MK<sub>4</sub> and 29P may have been recurrent transient Jovian satellites. This also applies to P/2008 CL94 (Lemmon) and P/2010 TO20 (LINEAR-Grauer).
6. Although the past, present, and future dynamical evolution of 2020 MK<sub>4</sub> resembles that of 29P, a more robust orbit de-



**Fig. 15.** Distribution of the number of capture events by Jupiter per simulation. *Upper panel:* For 2020 MK<sub>4</sub> and for comet 29P/Schwassmann-Wachmann 1 (*bottom panel*). The bins were computed using the Freedman and Diaconis rule implemented in NumPy (van der Walt et al. 2011; Harris et al. 2020). In the histogram, we use counts to form a probability density so the area under the histogram will sum to one.

termination is needed to confirm or reject a possible relation between the two objects.

7. Our analyses suggest that active minor bodies may experience close encounters in which they traverse each other's comae, experimenting mutual enhanced surface bombardment which may accelerate the erosion rate of these objects. Our analyses confirm that penetrating encounters in which 2020 MK<sub>4</sub> may travel across the coma of comet 29P are possible.

In summary, and based on the analysis of visible CCD images of 2020 MK<sub>4</sub>, we confirm the presence of a coma of material around a central nucleus. Its surface colors place this centaur among the most extreme members of the gray group. Although the past, present, and future dynamical evolution of 2020 MK<sub>4</sub> resembles that of 29P, more data are required to confirm or reject a possible connection between the two objects and perhaps others.

*Acknowledgements.* We thank the referee for her/his constructive and detailed report that included very helpful suggestions regarding the presentation of this paper and the interpretation of our results. CdLM and RdLM thank S. J. Aarseth for providing one of the codes used in this research, A. I. Gómez de Castro for

providing access to computing facilities, and S. Deen for extensive comments on the existence of precovery images of 2020 MK4. Part of the calculations and the data analysis were completed on the Brigit HPC server of the ‘Universidad Complutense de Madrid’ (UCM), and we thank S. Cano Alsúa for his help during this stage. This work was partially supported by the Spanish ‘Ministerio de Economía y Competitividad’ (MINECO) under grant ESP2017-87813-R. JdL acknowledges support from MINECO under the 2015 Severo Ochoa Program SEV-2015-0548. This article is based on observations made with the IAC80 telescope operated on the island of Tenerife by the Instituto de Astrofísica de Canarias in the Spanish Observatorio del Teide and on observations obtained with the 1m JKT telescope operated by the Southeastern Association for Research in Astronomy ([saraobservatory.org](http://saraobservatory.org)) in the Spanish Observatorio del Roque de los Muchachos on the island of La Palma. In preparation of this paper, we made use of the NASA Astrophysics Data System, the ASTRO-PH e-print server, and the MPC data server.

## References

- Aarseth, S. J. 2003, Gravitational N-Body Simulations
- Agarwal, J., Jewitt, D., Mutchler, M., Weaver, H., & Larson, S. 2017, *Nature*, 549, 357
- Agarwal, J., Kim, Y., Jewitt, D., et al. 2020, *A&A*, 643, A152
- Bailey, B. L. & Malhotra, R. 2009, *Icarus*, 203, 155
- Benner, L. A. M. 1994, PhD thesis, Washington University.
- Benner, L. A. M. & McKinnon, W. B. 1995, *Icarus*, 118, 155
- Bilir, S., Karaali, S., & Tuncel, S. 2005, *Astronomische Nachrichten*, 326, 321
- Brasser, R. & Wang, J. H. 2015, *A&A*, 573, A102
- Cabral, N., Guilbert-Lepoutre, A., Fraser, W. C., et al. 2019, *A&A*, 621, A102
- Carusi, A. & Valsecchi, G. B. 1981, *A&A*, 94, 226
- Chandler, C. O., Kueny, J. K., Trujillo, C. A., Trilling, D. E., & Oldroyd, W. J. 2020, *ApJ*, 892, L38
- Chebotarev, G. A. 1965, *Soviet Ast.*, 8, 787
- de la Fuente Marcos, C. & de la Fuente Marcos, R. 2012, *MNRAS*, 427, 728
- de la Fuente Marcos, C. & de la Fuente Marcos, R. 2015, *MNRAS*, 453, 1288
- de la Fuente Marcos, C., de la Fuente Marcos, R., & Aarseth, S. J. 2015, *MNRAS*, 446, 1867
- Di Sisto, R. P. & Brunini, A. 2007, *Icarus*, 190, 224
- Di Sisto, R. P., Fernández, J. A., & Brunini, A. 2009, *Icarus*, 203, 140
- Di Sisto, R. P. & Rossignoli, N. L. 2020, *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 132, 36
- Drummond, J., Bulger, J., Chambers, K., et al. 2020, *Minor Planet Electronic Circulars*, 2020-N36
- Emel'yanenko, V. V., Emel'yanenko, N. Y., Naroenkov, S. A., & Andreev, M. V. 2013, *Solar System Research*, 47, 189
- Fedorets, G., Granvik, M., & Jedicke, R. 2017, *Icarus*, 285, 83
- Fernandez, J. A. 1980, *MNRAS*, 192, 481
- Freedman, D. & Diaconis, P. 1981, *Zeitschrift für Wahrscheinlichkeitstheorie und Verwandte Gebiete*, 57, 453
- Ginsburg, A., Sipőcz, B. M., Brasseur, C. E., et al. 2019, *AJ*, 157, 98
- Giorgini, J. 2011, in *Journées Systèmes de Référence Spatio-temporels* 2010, ed. N. Capitaine, 87–87
- Giorgini, J. D. 2015, in *IAU General Assembly*, Vol. 29, 2256293
- Grauer, A. D., Sostero, G., Melville, I., et al. 2011a, *Central Bureau Electronic Telegrams*, 2867, 1
- Grauer, A. D., Sostero, G., Melville, I., et al. 2011b, *IAU Circ.*, 9235, 1
- Grazier, K. R., Castillo-Rogez, J. C., & Horner, J. 2018, *AJ*, 156, 232
- Grazier, K. R., Horner, J., & Castillo-Rogez, J. C. 2019, *MNRAS*, 490, 4388
- Guilbert-Lepoutre, A. 2012, *AJ*, 144, 97
- Hainaut, O. R., Delsanti, A., Meech, K. J., & West, R. M. 2004, *A&A*, 417, 1159
- Harris, C. R., Millman, K. J., van der Walt, S. J., et al. 2020, *Nature*, 585, 357–362
- Hartmann, W. K., Tholen, D. J., Meech, K. J., & Cruikshank, D. P. 1990, *Icarus*, 83, 1
- Hernandez, S., Hankey, M., & Scott, J. 2019, in *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, Vol. 233, American Astronomical Society Meeting Abstracts #233, 245.03
- Hunter, J. D. 2007, *Computing in Science and Engineering*, 9, 90
- Jewitt, D. 2009, *AJ*, 137, 4296
- Jewitt, D., Hui, M.-T., Mutchler, M., et al. 2017, *ApJ*, 847, L19
- Jewitt, D. & Luu, J. 2019, *ApJ*, 886, L29
- Kaiser, N. & Pan-STARRS Project Team. 2004, in *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, Vol. 204, American Astronomical Society Meeting Abstracts #204, 97.01
- Kareta, T., Sharkey, B., Noonan, J., et al. 2019, *AJ*, 158, 255
- Keel, W. C., Oswalt, T., Mack, P., et al. 2017, *PASP*, 129, 015002
- Kim, Y., Agarwal, J., & Jewitt, D. 2020, in *AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts*, Vol. 52, AAS/Division for Planetary Sciences Meeting Abstracts, 217.01
- Królikowska, M. & Dybczyński, P. A. 2017, *MNRAS*, 472, 4634
- Kulyk, I., Korsun, P., Rousselot, P., Afanasiev, V., & Ivanova, O. 2016, *Icarus*, 271, 314
- Lacerda, P. 2013, *MNRAS*, 428, 1818
- Landolt, A. U. 1992, *AJ*, 104, 340
- Laskar, J., Fienga, A., Gastineau, M., & Manche, H. 2011, *A&A*, 532, A89
- Levison, H. F. & Duncan, M. J. 1997, *Icarus*, 127, 13
- Licandro, J., de la Fuente Marcos, C., de la Fuente Marcos, R., et al. 2019, *A&A*, 625, A133
- Makino, J. 1991, *ApJ*, 369, 200
- Mazzotta Epifani, E., Dotto, E., Ieva, S., et al. 2018, *A&A*, 620, A93
- Melita, M. D. & Licandro, J. 2012, *A&A*, 539, A144
- Murray, C. D. & Dermott, S. F. 1999, *Solar system dynamics*
- Nakano, S., Kobayashi, T., Meyer, E., et al. 1993, *IAU Circ.*, 5800, 1
- Neslušan, L., Tomko, D., & Ivanova, O. 2017, *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*, 47, 7
- Peixinho, N., Doressoundiram, A., Delsanti, A., et al. 2003, *A&A*, 410, L29
- Piani, F., Ceschia, M., Pettarin, E., et al. 2011, *Minor Planet Electronic Circulars*, 2011-U41
- Roberts, A. C. & Muñoz-Gutiérrez, M. A. 2021, *Icarus*, 358, 114201
- Rodgers, C. T., Canterna, R., Smith, J. A., Pierce, M. J., & Tucker, D. L. 2006, *AJ*, 132, 989
- Rousselot, P. 2008, *A&A*, 480, 543
- Rudenko, M. 2016, in *Asteroids: New Observations, New Models*, ed. S. R. Chesley, A. Morbidelli, R. Jedicke, & D. Farnocchia, Vol. 318, 265–269
- Sailenfest, M., Fouchard, M., Tommei, G., & Valsecchi, G. B. 2017, *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 129, 329
- Sarid, G., Volk, K., Steckloff, J. K., et al. 2019, *ApJ*, 883, L25
- Scotti, J. V., Bressi, T. H., Spahr, T. B., et al. 2009, *Minor Planet Electronic Circulars*, 2009-F28
- Sheppard, S. S. & Jewitt, D. C. 2003, *Nature*, 423, 261
- Spahr, T., Williams, G. V., & Grauer, A. D. 2011, *Central Bureau Electronic Telegrams*, 2867, 2
- Szabó, G. M., Sárneczky, K., & Kiss, L. L. 2011, *A&A*, 531, A11
- Tegler, S. C., Bauer, J. M., Romanishin, W., & Peixinho, N. 2008, *Colors of Centaurs*, ed. M. A. Barucci, H. Boehnhardt, D. P. Cruikshank, A. Morbidelli, & R. Dotson, 105
- Tegler, S. C., Romanishin, W., & Consolmagno, G. J. 2003, *ApJ*, 599, L49
- Tegler, S. C., Romanishin, W., Consolmagno, G. J., & J., S. 2016, *AJ*, 152, 210
- Trigo-Rodríguez, J. M., García-Melendo, E., Davidsson, B. J. R., et al. 2008, *A&A*, 485, 599
- van der Walt, S., Colbert, S. C., & Varoquaux, G. 2011, *Computing in Science and Engineering*, 13, 22
- Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., et al. 2020, *Nature Methods*, 17, 261
- Wierzchos, K. & Womack, M. 2020, *AJ*, 159, 136
- Wong, I., Mishra, A., & Brown, M. E. 2019, *AJ*, 157, 225

## Appendix A: Mutual nodal distances and uncertainty estimates

The mutual nodal distance between two Keplerian trajectories with a common focus can be written as follows (see eqs. 16 and 17 in Sainlenfest et al. 2017):

$$\Delta_{\pm} = \frac{a_2 (1 - e_2^2)}{1 \pm e_2 \cos \varpi_2} - \frac{a_1 (1 - e_1^2)}{1 \pm e_1 \cos \varpi_1}, \quad (\text{A.1})$$

where for prograde orbits the "+" sign refers to the ascending node and the "−" sign to the descending one, and

$$\cos \varpi_1 = \frac{-\cos \omega_1 (\sin i_1 \cos i_2 - \cos i_1 \sin i_2 \cos \Delta\Omega) + \sin \omega_1 \sin i_2 \sin \Delta\Omega}{\sqrt{1 - (\cos i_2 \cos i_1 + \sin i_2 \sin i_1 \cos \Delta\Omega)^2}} \quad (\text{A.2})$$

and

$$\cos \varpi_2 = \frac{\cos \omega_2 (\sin i_2 \cos i_1 - \cos i_2 \sin i_1 \cos \Delta\Omega) + \sin \omega_2 \sin i_1 \sin \Delta\Omega}{\sqrt{1 - (\cos i_2 \cos i_1 + \sin i_2 \sin i_1 \cos \Delta\Omega)^2}}, \quad (\text{A.3})$$

with  $\Delta\Omega = \Omega_2 - \Omega_1$ , and  $a_j$ ,  $e_j$ ,  $i_j$ ,  $\Omega_j$ , and  $\omega_j$  ( $j = 1, 2$ ) are the orbital elements of the orbits involved. In order to obtain the actual distributions of  $\Delta_{\pm}$ , we generated sets of orbital elements for the virtual objects using data from JPL's SBDB. For example, the value of the semimajor axis of a virtual object was computed using the expression  $a_v = a + \sigma_a r_i$ , where  $a$  is the semimajor axis,  $\sigma_a$  is the standard deviation, and  $r_i$  is a (pseudo) random number with a normal distribution computed using NumPy (van der Walt et al. 2011; Harris et al. 2020). In order to calculate statistically relevant values of  $\Delta_{\pm}$ , we computed median and 16th and 84th percentiles from a set of  $10^4$  pairs of virtual objects for each pair.

## Appendix B: Angular distances between pairs of orbital poles and perihelia

In order to understand the context of the orientations in space of the 29P-like orbits, we study the line of apsides of their paths and the projection of their orbital poles onto the plane of the sky. In heliocentric ecliptic coordinates, the longitude and latitude of an object at perihelion,  $(l_q, b_q)$ , are given by the following expressions:  $\tan(l_q - \Omega) = \tan \omega \cos i$  and  $\sin b_q = \sin \omega \sin i$  (see for example Murray & Dermott 1999). On the other hand, the ecliptic coordinates of the pole are  $(l_p, b_p) = (\Omega - 90^\circ, 90^\circ - i)$ . The angular distances between pairs of orbital poles and perihelia (see Fig. 6) are given by the angles  $\alpha_q$  and  $\alpha_p$ :

$$\cos \alpha_q = \cos b_{q2} \cos b_{q1} \cos(l_{q2} - l_{q1}) + \sin b_{q2} \sin b_{q1} \quad (\text{B.1})$$

and

$$\cos \alpha_p = \cos b_{p2} \cos b_{p1} \cos(l_{p2} - l_{p1}) + \sin b_{p2} \sin b_{p1}, \quad (\text{B.2})$$

where the sets of orbital elements for the virtual objects were generated and the uncertainties were computed as described above.

## Appendix C: Input data

Here, we include the barycentric Cartesian state vectors of the four objects in Table 1. These vectors and their uncertainties were used to carry out the calculations discussed above and to generate the figures that display the time evolution of the various

**Table C.1.** Barycentric Cartesian state vector of 2020 MK<sub>4</sub>: Components and associated  $1\sigma$  uncertainties.

Component	value	$\pm 1\sigma$	uncertainty
X (AU)	=	$2.476823027013801 \times 10^{+0}$	$\pm 2.63888043 \times 10^{-5}$
Y (AU)	=	$-5.649556533725540 \times 10^{+0}$	$\pm 5.00052909 \times 10^{-5}$
Z (AU)	=	$-6.724625273177226 \times 10^{-1}$	$\pm 6.68127413 \times 10^{-6}$
$V_x$ (AU/d)	=	$6.344171798287663 \times 10^{-3}$	$\pm 5.52645958 \times 10^{-7}$
$V_y$ (AU/d)	=	$2.598886274097145 \times 10^{-3}$	$\pm 1.15080359 \times 10^{-6}$
$V_z$ (AU/d)	=	$2.738174058059657 \times 10^{-4}$	$\pm 1.27180464 \times 10^{-7}$

**Notes.** Data are referred to as epoch 2459000.5, 31-May-2020 00:00:00.0 TDB (J2000.0 ecliptic and equinox). Source: JPL's SBDB.

**Table C.2.** Barycentric Cartesian state vector of comet 29P/Schwassmann-Wachmann 1: Components and associated  $1\sigma$  uncertainties.

Component	value	$\pm 1\sigma$	uncertainty
X (AU)	=	$4.820127849857867 \times 10^{+0}$	$\pm 2.26195239 \times 10^{-7}$
Y (AU)	=	$3.096547270522562 \times 10^{+0}$	$\pm 2.26291332 \times 10^{-7}$
Z (AU)	=	$9.315292658149408 \times 10^{-1}$	$\pm 1.80747737 \times 10^{-7}$
$V_x$ (AU/d)	=	$-3.818139825384470 \times 10^{-3}$	$\pm 2.98663624 \times 10^{-10}$
$V_y$ (AU/d)	=	$6.187940318090741 \times 10^{-3}$	$\pm 1.63227588 \times 10^{-10}$
$V_z$ (AU/d)	=	$2.243304452195744 \times 10^{-4}$	$\pm 2.29798018 \times 10^{-10}$

**Notes.** Data are referred to as epoch 2459000.5, 31-May-2020 00:00:00.0 TDB (J2000.0 ecliptic and equinox). Source: JPL's SBDB.

**Table C.3.** Barycentric Cartesian state vector of comet P/2008 CL94 (Lemmon): Components and associated  $1\sigma$  uncertainties.

Component	value	$\pm 1\sigma$	uncertainty
X (AU)	=	$1.459836826464546 \times 10^{+0}$	$\pm 2.48312839 \times 10^{-3}$
Y (AU)	=	$5.336008875429940 \times 10^{+0}$	$\pm 8.60065292 \times 10^{-4}$
Z (AU)	=	$5.352334095577819 \times 10^{-1}$	$\pm 3.08664106 \times 10^{-4}$
$V_x$ (AU/d)	=	$-7.484540791199146 \times 10^{-3}$	$\pm 4.84686920 \times 10^{-7}$
$V_y$ (AU/d)	=	$1.42307412837227 \times 10^{-3}$	$\pm 3.12580298 \times 10^{-6}$
$V_z$ (AU/d)	=	$7.781756239073725 \times 10^{-4}$	$\pm 3.54702110 \times 10^{-7}$

**Notes.** Data are referred to as epoch 2459000.5, 31-May-2020 00:00:00.0 TDB (J2000.0 ecliptic and equinox). Source: JPL's SBDB.

**Table C.4.** Barycentric Cartesian state vector of comet P/2010 TO20 (LINEAR-Grauer): Components and associated  $1\sigma$  uncertainties.

Component	value	$\pm 1\sigma$	uncertainty
X (AU)	=	$-2.760378798588101 \times 10^{+0}$	$\pm 1.87330516 \times 10^{-3}$
Y (AU)	=	$-4.981877686502737 \times 10^{+0}$	$\pm 5.04623641 \times 10^{-4}$
Z (AU)	=	$-7.533566693101323 \times 10^{-2}$	$\pm 7.13336260 \times 10^{-5}$
$V_x$ (AU/d)	=	$6.530991396932470 \times 10^{-3}$	$\pm 1.34995329 \times 10^{-6}$
$V_y$ (AU/d)	=	$-3.198756786861413 \times 10^{-3}$	$\pm 1.72833828 \times 10^{-6}$
$V_z$ (AU/d)	=	$-2.946577560510802 \times 10^{-4}$	$\pm 2.25495604 \times 10^{-8}$

**Notes.** Data are referred to as epoch 2459000.5, 31-May-2020 00:00:00.0 TDB (J2000.0 ecliptic and equinox). Source: JPL's SBDB.

orbital parameters and the histograms of the close encounters of pairs of objects. For example, a new value for the  $X$ -component of the state vector was computed as  $X_c = X + \sigma_X r$ , where  $r$  is an univariate Gaussian random number, and  $X$  and  $\sigma_X$  are the mean value and its  $1\sigma$  uncertainty in the corresponding table.