



Observatório
Nacional

TESE DE DOUTORADO

ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DE DUAS POPULAÇÕES DE
PEQUENOS CORPOS: A DOS OBJETOS CRUZADORES DA ÓRBITA DE MARTE
E A DE OBJETOS EM ÓRBITA PRÓXIMA DA TERRA

JONATAN MICHIMANI GARCIA

RIO DE JANEIRO

2023

Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações

Observatório Nacional

Programa de Pós-Graduação

Tese de Doutorado

ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DE DUAS POPULAÇÕES DE
PEQUENOS CORPOS: A DOS OBJETOS CRUZADORES DA ÓRBITA DE MARTE
E A DE OBJETOS EM ÓRBITA PRÓXIMA DA TERRA

por

Jonatan Michimani Garcia

Tese submetida ao Corpo Docente do
Programa de Pós-graduação em Astronomia
do Observatório Nacional, como parte dos
requisitos necessários para a obtenção do Grau
de Doutor em Astronomia.

Orientador: Dra. Daniela Lazzaro

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Dezembro de 2023

M621

Michimani Garcia, Jonatan

Estudo das propriedades físicas de duas populações de pequenos corpos: a dos objetos cruzadores da órbita de Marte e a de objetos em órbita próxima da Terra [Rio de Janeiro] 2023. xx, 111 p. 29,7 cm: graf. il. tab.

Tese (doutorado) - Observatório Nacional - Rio de Janeiro, 2023.

1. objetos próximos da Terra. 2. cruzadores da órbita de Marte. 3. caracterização física. 4. propriedades de pequenos corpos. I. Observatório Nacional. II. Título.

CDU 000.000.000

“ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DE DUAS POPULAÇÕES DE
PEQUENOS CORPOS: A DOS OBJETOS CRUZADORES DA ÓRBITA DE MARTE
E A DE OBJETOS EM ÓRBITA PRÓXIMA DA TERRA”

JONATAN MICHIMANI GARCIA

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM ASTRONOMIA DO OBSERVATÓRIO NACIONAL COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR
EM ASTRONOMIA.

Aprovada por:

Dra. Daniela Lazzaro – ON, Brasil
(Orientador)

Dr. Julio Ignacio Bueno de Camargo – ON, Brasil

Dr. Fernando Virgílio Roig – ON, Brasil

Dr. Javier Licandro – IAC, Espanha

Dr. Ricardo Gil-Hutton – CASLEO, Argentina

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

7 DE DEZEMBRO DE 2023

Agradecimientos

- A mi orientadora, Dra. Daniela Lazzaro, quien apareció en mi vida un 14 de marzo de 2019, generosamente me aceptó como su alumno, guió mi investigación y con quien estaré eternamente agradecido.
- A mi familia: a mi padre, José Gerardo, a mi madre, María del Rocío, a mi hermano, Uzziel, y a mi hermana, Joyce.
- Al equipo del proyecto IMPACTON: Marçal, Wesley, Plícida, Filipe, Eduardo e Wesley. Por hacer posibles las observaciones y compartir sus conocimientos siempre que lo necesité.
- A todas las compañeras y compañeros que conocí en el Observatorio Nacional: Verónica, Fredi, Eduarda, Romualdo, Narcizo...
- A mis profesores durante el doctorado.
- Al ON y a su personal por proporcionar la infraestructura necesaria para llevar a cabo mi investigación.
- Al Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por la beca otorgada.
- A mis orientadores de maestría, José Ramón Valdés y José Guichard.
- A Brasil, por permitirme comenzar una nueva vida.
- A Dios, porque finalmente estamos haciendo las paces.

ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DE DUAS POPULAÇÕES DE
PEQUENOS CORPOS: A DOS OBJETOS CRUZADORES DA ÓRBITA DE MARTE
E A DE OBJETOS EM ÓRBITA PRÓXIMA DA TERRA

RESUMO

O estudo dos objetos que cruzam a órbita de Marte (MCs) e dos objetos próximos à Terra (NEOs) nos permite obter informações sobre os menores corpos do Sistema Solar devido à sua proximidade com a Terra. Neste trabalho, apresentamos os resultados das observações fotométricas de 16 MCs e observações espectroscópicas no visível de 43 NEOs recém-descobertos. Os espectros dos NEOs foram obtidos durante dezoito noites de observação entre outubro de 2020 e dezembro de 2021, utilizando o espectrógrafo Goodman High Throughput no Southern Astrophysical Research Telescope (SOAR) de 4,1 metros (Cerro Pachón, Chile). Encontramos uma distribuição taxonômica dominada por asteroides do tipo S, mas com um excesso de tipos A e D. Esse resultado está em conformidade com estudos recentes sobre a caracterização de NEOs e implica possíveis diferenças na distribuição taxonômica entre objetos “grandes” e “pequenos”, enfatizando a noção de uma população de NEOs não homogênea. Enquanto isso, a amostra de MCs foi observada no Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica (Itacuruba, Brazil) entre 2020, 2021 e 2022, utilizando o telescópio de 1,0 metros do projeto IMPACTON. O objetivo foi obter a caracterização fotométrica completa, incluindo o período de rotação, a amplitude da curva de luz, a classe taxonômica, a magnitude absoluta H e os parâmetros $G1$ e $G2$. Determinamos o período de rotação para 6 objetos, a classificação taxonômica para 11 objetos e construímos 14 curvas de fase. Os resultados taxonômicos revelaram diversidade de classes, e a análise das curvas de fase apresentou tendências diferentes quando comparadas com outras populações de pequenos corpos.

Jonatan Michimani Garcia

STUDY OF THE PHYSICAL PROPERTIES OF TWO POPULATIONS OF SMALL
BODIES: THE MARS-CROSSERS AND THE NEAR-EARTH OBJECTS

ABSTRACT

The study of Mars-crossers (MCs) and near-Earth objects (NEOs) allows us to gather information about the Solar System’s smallest bodies due to their proximity to Earth. In this work, we present the results of photometric observations of 16 MCs and visible spectroscopic observations of 43 newly discovered NEOs. The NEO spectra were obtained during eighteen observing runs between October 2020 and December 2021, using the Goodman High Throughput Spectrograph at the 4.1-m Southern Astrophysical Research telescope (Cerro Pachón, Chile). We found a taxonomic distribution dominated by S-type asteroids, but with an overabundance of A- and D-types. This result aligns with recent studies on NEOs characterization and implies possible differences in the taxonomic distribution between “large” and “small” objects, emphasizing the notion of a non-homogeneous NEO population. Meanwhile, the sample of MCs was observed at the Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica (Itacuruba, Brazil) between 2020, 2021, and 2022, using the 1.0-m telescope of the IMPACTON project. The objective was to obtain the complete photometric characterization, including the period of rotation, amplitude of the lightcurve, taxonomic class, absolute magnitude H , and $G1$ and $G2$ parameters. We determined the period of rotation for 6 objects, taxonomic classification for 11 objects, and constructed 14 phase curves. The taxonomic results revealed diversity in classes, and the analysis of the phase curves exhibited different trends when compared with other small body populations.

Lista de Figuras

1.1	Asteroides e planetas no espaço de fase semi-eixo maior vs inclinação e densidade (o amarelo representa a densidade numérica mais alta, o azul a mais baixa). Figura baseada em DEMEO e CARRY (2014).	2
1.2	Ilustração das órbitas características dos quatro subgrupos de NEOs.	3
1.3	Distribuição orbital dos diferentes grupos de NEOs e MCs no espaço excentricidade vs semieixo maior e periélio vs semieixo maior. Fonte: JPL.	4
1.4	Espaço semieixo maior vs excentricidade. Figura baseada em BOTTKE <i>et al.</i> (2002).	6
1.5	Distribuição orbital dos MCs no espaço inclinação vs semieixo maior. Os rótulos denotam os diferentes grupos descritos no texto. As duas curvas denotam a localização das ressonâncias seculares ν_6 e ν_{16} enquanto as linhas tracejadas correspondem às posições das ressonâncias médias 5:1, 4:1 e 3:1 com Júpiter. Figura baseada em MICHEL <i>et al.</i> (2000).	8
1.6	Vista esquemática da origem dos cruzadores de Marte e sua subsequente evolução para órbitas que cruzam a Terra. Figura retirada de MICHEL <i>et al.</i> (2000).	9
2.1	Sítio do <i>Southern Astrophysical Research Telescope</i> - SOAR. Fotografia: CTIO/NOIRLab/NSF/AURA/J. Fuentes.	13
2.2	(a) Distribuição dos NEOs observados em função do valor de sua magnitude absoluta H . (b) Distribuição, no espaço semieixo maior versus excentricidade, dos NEOs observados (pontos pretos). Em distintas cores no fundo, os objetos dos diversos grupos. Fonte: JPL Small-Body Database Query.	14
2.3	Distribuição dos diâmetros dos NEOs observados calculados levando em consideração o albedo médio de sua classe de acordo com MAINZER <i>et al.</i> (2011) (azul), MESQUITA (2022) (laranja) e DEMEO e CARRY (2013) (verde).	18
2.4	Espectros de refletância obtidos (pontos azuis), normalizados em $0,55 \mu\text{m}$, juntamente com a curva de classe espectral atribuída (pontos e linha pretos) e sua região de erro (rosa).	19
2.4	Continuação da figura 2.4.	20

2.4	Continuação da figura 2.4.	21
2.5	Distribuição dos NEOs observados em função da sua magnitude visual (a), ângulo de fase (b) e do valor absoluto da taxa angular de variação aparente em RA e DEC (c).	22
2.6	Distribuição taxonômica dos 43 NEOs observados.	23
2.7	Distribuição de massa da população dos NEOS comparada com a faixa de menor tamanho dentro do MB. A concordância da distribuição taxonômica dos NEOs com o MB interno e médio indica a parte interna do MB como a fonte dominante para o população NEO. Figura retirada de BINZEL <i>et al.</i> (2019).	26
2.8	Distribuição taxonômica dos NEOs observados por PERNA <i>et al.</i> (2018) em números absolutos (esquerda) e porcentagens relativas (direita). As distribuições para objetos menores que 100 m e para objetos na faixa de 100 – 300 m são mostradas separadamente. Figura retirada de PERNA <i>et al.</i> (2018).	27
2.9	Distribuição taxonômica dos NEOs do EARN em números absolutos (es- querda) e porcentagens relativas (direita). Figura retirada de PERNA <i>et al.</i> (2018).	27
2.10	Histograma de classes taxonômicas para 76 NEAs observados por PO- PESCU <i>et al.</i> (2019). Figura retirada de POPESCU <i>et al.</i> (2019).	28
2.11	Distribuição percentual de complexos taxonômicos e classes do levanta- mento de IEVA <i>et al.</i> (2020), juntamente com dados coletados de PERNA <i>et al.</i> (2018)), DEVOGÉLE <i>et al.</i> (2019), e a campanha MITHNEOS BIN- ZEL <i>et al.</i> (2019), mostrada de acordo com um limite H. Figura retirada de IEVA <i>et al.</i> (2020).	28
2.12	Histograma de magnitude absoluta e diâmetro do conjunto de dados MITH- NEOS de 976 NEOs. Os valores de H foram convertidos em diâmetros usando o albedo médio medido $p_v = 0,22$ do conjunto de dados. Figura retirada de MARSSET <i>et al.</i> (2022).	29
2.13	Distribuição de massa calculada para cada objeto com diâmetro igual ou superior a 50 km, utilizando seu albedo para determinar o tamanho e a densidade média (DEMEO e CARRY, 2013) para cada classe taxonômica. Figura retirada de DEMEO e CARRY (2014).	30
3.1	Distribuição para tipos taxonômicos encontrados na população NEO e MC. Figuras retirada de CARRY <i>et al.</i> (2016b) (a) e BINZEL <i>et al.</i> (2019)(b).	32
3.2	Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica - OASI. Fotografia: Site IMPACTON (http://impacton.on.br/).	33

3.3	Distribuição, no espaço semieixo maior versus excentricidade, dos MCs observados. Fonte: JPL Small-Body Database Query.	35
3.4	Curva de fase do objeto (7870) 1987 UP2.	39
3.5	(18284) Tsereteli.	40
3.6	(19877) 9086 P-L	41
3.7	(20786) 2000 RG62.	42
3.8	(20958) A900 MA.	43
3.9	(27995) 1997 WL2.	45
3.10	(46780) 1998 HH52.	47
3.11	(47834) 2000 EN114.	48
3.12	(49952) 1999 XH212.	49
3.13	(61343) 2000 PC5.	50
3.14	Curva de fase do objeto (66294) 1999 JS27.	50
3.15	(93751) 2000 WH1.	51
3.16	(106848) 2000 YP16.	52
3.17	(133090) 2003 MS9.	53
3.18	Curva de fase do objeto (133090) 2003 MS9.	54
3.19	Curva de fase do objeto (307162) 2002 DM9.	54
3.20	(133090) 2003 MS9.	56
3.21	Dependências do valor do efeito de oposição calculado como o aumento relativo da magnitude em $\alpha = 0,3^\circ$ em relação á extrapolação da parte linear da curva de fase (a) e como a razão entre a intensidade em $\alpha = 0,3^\circ$ e aquela em $\alpha < 5^\circ$ (b) versus albedo para asteróides de vários tipos. Figura retirada de BELSKAYA e SHEVCHENKO (2000).	60
3.22	(a) Relação dos parâmetros $G1$ e $G2$ com base em SHEVCHENKO <i>et al.</i> (2016). (b) Dependência da amplitude do efeito de oposição no albedo com base em BELSKAYA e SHEVCHENKO (2000).	62
3.23	(a) Relação dos parâmetros $G1$ e $G2$ com base em SHEVCHENKO <i>et al.</i> (2016). (b) Dependência da amplitude do efeito de oposição no albedo com base em BELSKAYA e SHEVCHENKO (2000). Em ambos os gráficos, os pontos cinzas representam dados de NEOs recuperados de ARCOVERDE <i>et al.</i> (2023) e IEVA <i>et al.</i> (2022).	63

Lista de Tabelas

1.1	Tipos dinâmicos e subgrupos de objetos próximos da Terra. Definições dos tipos dinâmicos com base na magnitude absoluta (H), Distância Mínima de Interseção da Órbita (MOID), semieixo maior (a), periélio (q) e afélio (Q). Fonte: JPL Center for NEO Studies (CNEOS).	4
1.2	Fração de cada região de origem para cada classe de NEO. Fonte: GREENSTREET <i>et al.</i> (2012).	7
2.1	Propriedades físicas e resultados para os NEOs observados.	17
3.1	Principais elementos orbitais dos MCs selecionados. Elementos orbitais na época 2459396,5 (2021-Jul-01.0) e magnitude absoluta. Fonte: JPL Small-Body Database.	34
3.2	Resumo dos parâmetros físicos derivados para cada MC observado,	57
A.1	Principais elementos orbitais dos NEOs observados na época 2459396,5 (2021-Jul-01,0) TDB. Fonte: JPL Small-Body Database Browser.	79
A.2	Circunstâncias observacionais dos NEOs observados. A tabela lista para cada objeto: sua designação, a data e a hora de início (UT), a magnitude visual (APmag), a massa de ar (a-mass), a taxa angular de mudança em RA e DEC aparentes ($d(RA)/dt$, $d(Dec)/dt$), a análoga solar e sua massa de ar.	81
A.3	Circunstâncias observacionais das curvas de luz observadas. Para cada asteroide é dado: a data de observação, a ascensão reta e declinação, a distância do asteroide à Terra (Δ) e ao Sol (r), a faixa de ângulos de fase (α) das observações, e a magnitude aparente (V).	83
A.4	Circunstâncias observacionais e magnitudes derivadas dos espectros fotométricos. A tabela lista: o nome do objeto observado, a data e hora de início, o filtro (F), a magnitude instrumental (mag) e seu erro (Δmag), a magnitude média (\overline{mag}) e seu erro ($\overline{\Delta mag}$), a magnitude média calibrada (\overline{mag}_c) e seu erro ($\overline{\Delta mag}_c$), e o ângulo da fase solar (α) no instante inicial de observação.	84

A.5 Circunstâncias observacionais e magnitudes derivadas das curvas de fase.
 A tabela lista: o nome do objeto observado, a data e hora de início, a magnitude reduzida (M_{red}), a magnitude reduzida média ($\overline{M_{red}}$), o erro da magnitude reduzida (ΔM_{red}), o erro médio da magnitude reduzida ($\overline{\Delta M_{red}}$), a distância à Terra (Δ) e ao Sol (r) e o ângulo da fase solar (α) no instante de observação. Fonte: JPL Horizons System. 90

Sumário

Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xvii
1 Introdução e Motivação	1
1.1 Definição de NEOs e MCs	2
1.2 A conexão NEO-MC	4
1.3 Propriedades físicas	8
2 Near-Earth Objects (NEOs)	11
2.1 Problemática dos “pequenos” x “grandes” asteroides	11
2.2 Observações e amostra	12
2.3 Aquisição e redução dos dados	13
2.4 Resultados	16
2.5 Discussão e conclusões	25
3 Mars-crossers (MCs)	31
3.1 Observações e amostra	33
3.2 Aquisição e redução de dados - Metodologia	34
3.3 Resultados	38
3.3.1 (7870) 1987 UP2	38
3.3.2 (18284) Tsereteli	38
3.3.3 (19877) 9086 P-L	39
3.3.4 (20786) 2000 RG62	41
3.3.5 (20958) A900 MA	42
3.3.6 (27995) 1997 WL2	44
3.3.7 (46780) 1998 HH52	44
3.3.8 (47834) 2000 EN114	46
3.3.9 (49952) 1999 XH212	46
3.3.10 (61343) 2000 PC5	49
3.3.11 (66294) 1999 JS27	49
3.3.12 (93751) 2000 WH1	50

3.3.13 (106848) 2000 YP16	51
3.3.14 (133090) 2003 MS9	52
3.3.15 (307162) 2002 DM9	54
3.3.16 (351068) 2003 TS13	55
3.4 Discussão dos resultados	58
4 Conclusões e perspectivas	65
Referências Bibliográficas	69
A Tabelas	79
B Artigos publicados originários do trabalho aqui apresentado	97

Capítulo 1

Introdução e Motivação

O estudo dos pequenos corpos do Sistema Solar tem sido amplamente reconhecido como de grande importância para uma melhor compreensão das condições nas quais ocorreu a formação planetária, bem como as fases iniciais de sua evolução. Essa população é considerada remanescente ou conta com os vestígios dos corpos primordiais que, em algum momento, se acumularam para formar os planetas, satélites e demais corpos (MORBIDELLI *et al.*, 2002b, DEMEO e CARRY, 2014, BINZEL *et al.*, 2015). Portanto, seu estudo pode fornecer informações sobre o gradiente de composição da nebulosa solar e os processos que governaram as fases iniciais da evolução em diferentes distâncias heliocêntricas, além de contribuir para o estudo de sistemas extra-solares.

De particular interesse são os objetos nas proximidades da órbita do nosso planeta, os NEOS (Near-Earth Objects) e os MCs (Mars-crossers), por serem considerados a fonte do constante influxo de material que impacta a superfície dos planetas internos. Estes corpos também estão relacionados ao transporte de água e outros materiais orgânicos, tanto para a Terra quanto para outros planetas, nas fases iniciais da formação, o que tem implicações no surgimento da vida na Terra (ALEXANDER *et al.*, 2012, MARTY, 2012, MARTY *et al.*, 2016).

Neste contexto, NEOs e MCs representam grandes oportunidades de estudo, tanto por motivos científicos quanto práticos (POPESCU *et al.*, 2019). Primeiramente, a caracterização física desses corpos é essencial para o desenvolvimento de modelos precisos de sua evolução orbital, incluindo efeitos não gravitacionais, como YORP, Yarkovsky (BINZEL *et al.*, 2015) além de intemperismo espacial, bem como para estabelecer conexões com suas regiões de origem (BOTTKÉ *et al.*, 2002, GREENSTREET *et al.*, 2012).

Por outro lado, essas populações são de grande interesse devido à possibilidade de impacto na Terra, sendo os NEOs os que apresentam maior probabilidade. O registro geológico de crateras em todo o planeta como, por exemplo, o evento K-T que ocorreu há cerca de 65 milhões de anos, devido ao impacto de um asteroide de cerca de 10 km de tamanho, e eventos mais recentes, como Tunguska e Chelyabinsk, demonstram que mesmo objetos muito pequenos, da ordem das dezenas de metros, podem produzir

efeitos consideráveis quando de sua explosão na atmosfera (NEMCHINOV *et al.*, 2008, EMEL'YANENKO *et al.*, 2013). Portanto, o estudo de suas propriedades físicas pode ajudar a desenvolver estratégias adequadas de mitigação.

Por fim, devido à proximidade desses corpos com a Terra (Fig. 1.1), eles se tornam alvos ideais para a exploração espacial e a mineração de asteroides. A reserva de água e metais raros presentes nos NEOs está chamando a atenção de agências governamentais e empresas privadas, representando uma alternativa aos recursos finitos do nosso planeta (ELVIS, 2013, SANCHEZ e MCINNES, 2013, COLVIN *et al.*, 2020). Não menos importante, à medida que se aproximam da Terra, tornam-se mais brilhantes e, portanto, mais fáceis de serem observados, o que possibilita seu estudo.

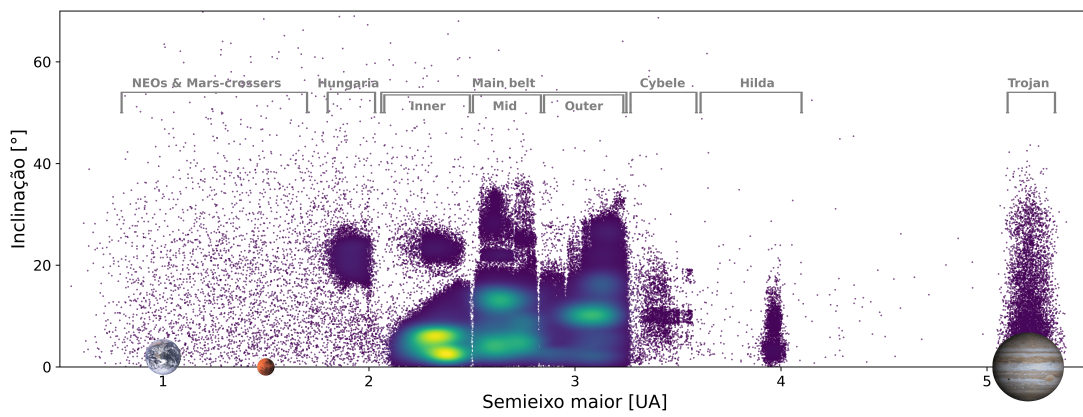


Figura 1.1: Asteroides e planetas no espaço de fase semi-eixo maior vs inclinação e densidade (o amarelo representa a densidade numérica mais alta, o azul a mais baixa). Figura baseada em DEMEO e CARRY (2014).

1.1 Definição de NEOs e MCs

Em termos de elementos orbitais, os NEOs são objetos, sejam eles asteroides ou cometas, que possuem uma distância periélica, q , menor do que 1,3 UA. Geralmente, esses objetos são divididos em 4 subgrupos, Apollo, Aten, Amor e Atira, com base em seus elementos orbitais: semi-eixo maior, a , distância ao periélio, q , e distância ao afélio, Q . Esses subgrupos recebem o nome de um elemento representativo de cada população (1862) Apollo, (1221) Amor, (2062) Aten e (163693) Atira, respectivamente (Figura 1.2). Além disso, quando um NEO tem uma órbita que pode chegar muito perto da Terra e é grande o suficiente para causar danos regionais significativos em caso de impacto, esse objeto é classificado como *Potentially Hazardous Asteroids* (PHA). Um PHA tem uma Distância Mínima de Interseção da Órbita da Terra (MOID) de 0,05 UA, ou menos, e uma magnitude absoluta (H) de 22,0, ou menos, ou que corresponde a um diâmetro de 190 metros, considerando um albedo de 0,14.

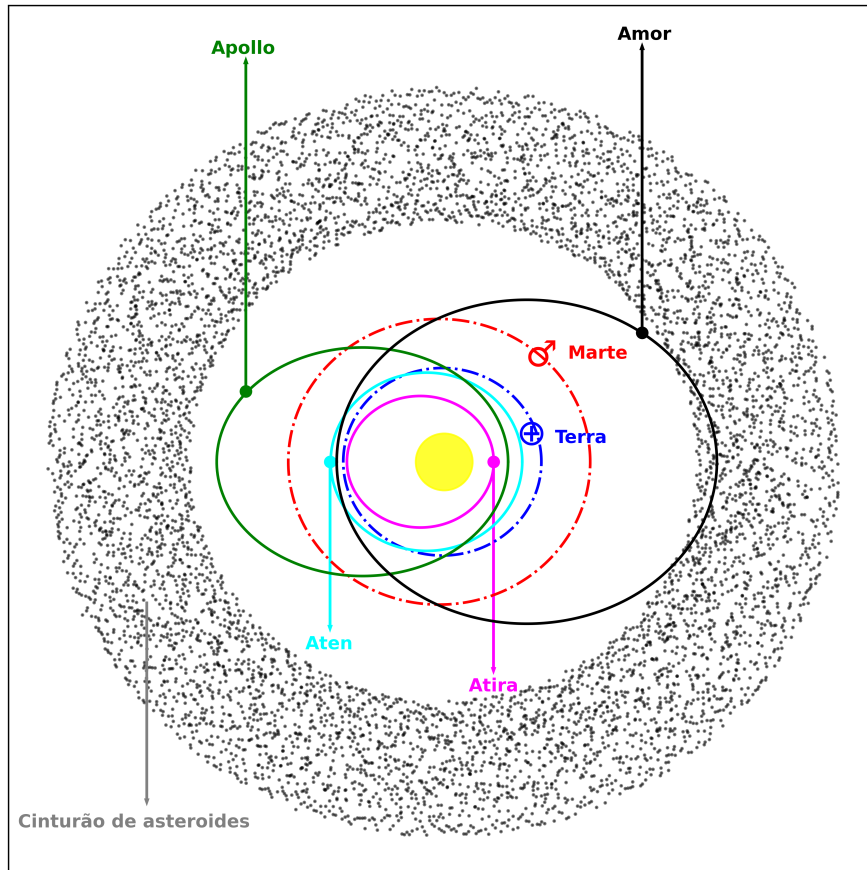


Figura 1.2: Ilustração das órbitas características dos quatro subgrupos de NEOs.

Por outro lado, um MC é um objeto cuja órbita cruza aquela de Marte. Em termos de seus elementos orbitais, os MCs são definidos por terem distância perihélica entre 1,3 e 1,666 UA e semieixo maior $a < 3,2$ UA, conforme especificado no *Jet Propulsion Lab Small-Body Database*¹. A Tabela 1.1 resume a definição de grupos de NEOs e MCs, enquanto a figura 1.3 mostra a distribuição orbital de ambos grupos.

De acordo com o Minor Planet Center² (MPC), até 15 de agosto de 2023, haviam sido identificados 32.447 NEOs, sendo 57 Atiras, 2.527 Atens, 16.616 Apollos e 13.247 Amors. Deste número de NEOs, 847 têm um diâmetro superior a 1,0 km, enquanto 2.349 são classificados como PHAs. Por outro lado, até essa data, o número de MCs conhecidos era de 24.318.

Vários trabalhos têm se dedicado a estimar o tamanho da população NEO (MAINZER *et al.*, 2011, HARRIS e D'ABRAMO, 2015, GRANVIK *et al.*, 2016). Um dos mais recentes, TRICARICO (2017), estima em 920 ± 10 objetos maiores que 1,0 km, o que corresponde a uma magnitude $H < 17,75$ e um albedo geométrico médio $p_V = 0,14$ (STUART e BINZEL, 2004). Além disso, TRICARICO (2017) calcula que existem cerca de $(7 \pm 2) \times 10^4$ NEOs com magnitude absoluta $H < 22,75$, correspondendo a objetos

¹https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/sbdb_query.html

²https://minorplanetcenter.net/db_searchy

com mais de 100 m de diâmetro. Por fim, para a população do menor tamanho, com $H < 30$, estimou-se um número de aproximadamente $(4 \pm 1) \times 10^8$ objetos. O tamanho da população de MCs ainda é desconhecido. De acordo com MICHEL *et al.* (2000), o número de MCs deve ser muito maior do que o de NEOs.

Tabela 1.1: Tipos dinâmicos e subgrupos de objetos próximos da Terra. Definições dos tipos dinâmicos com base na magnitude absoluta (H), Distância Mínima de Interseção da Órbita (MOID), semieixo maior (a), periélio (q) e afélio (Q). Fonte: JPL Center for NEO Studies (CNEOS).

Tipo	Definição
NEOs	Near-Earth Objects
	$q < 1,3$ UA
NEO: Apollos	NEOs cujas órbitas cruzam a da Terra, com semieixos maiores maiores que o da Terra. $a > 1,0$ UA; $q < 1,017$ UA
NEO: Atens	NEOs cujas órbitas cruzam a de a Terra, com semieixos maiores menores que o da Terra. $a < 1,0$ UA; $Q > 0,983$ UA
NEO: Amors	NEOs com órbitas externas á da Terra, mas internas á de Marte. $a > 1,0$ UA; $1,017$ UA $< q < 1,3$ UA
NEO: Atras	NEOs cujas órbitas estão inteiramente contidas na órbita da Terra. $a < 1,0$ UA; $Q < 0,983$ UA
NEO: PHA	Potentially Hazardous Asteroids $MOID \leq 0,05$ UA; $H \leq 22,0$
MCs	Mars-Crossers
	$1,3 \leq q \leq 1,666$

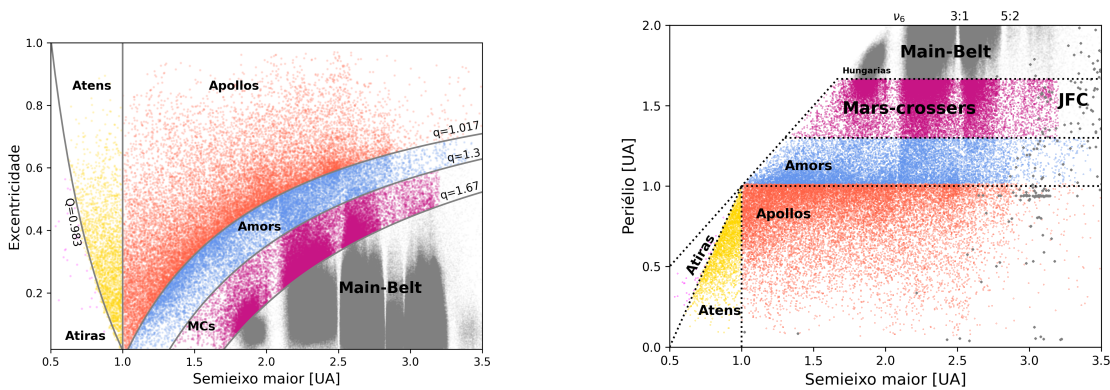


Figura 1.3: Distribuição orbital dos diferentes grupos de NEOs e MCs no espaço excentricidade vs semieixo maior e periélio vs semieixo maior. Fonte: JPL.

1.2 A conexão NEO-MC

As populações dos MCs e NEOs tem uma permanência na região de alguns 100 milhões de anos antes de colidirem com algum planeta, atingirem o Sol ou serem ejetados do Sistema Solar (GLADMAN *et al.*, 2000). Cálculos dinâmicos indicam que o tempo de vida orbital desses objetos é relativamente curto em termos da escala de tempo da formação

do Sistema Solar. Portanto, esta região deve ser continuamente reabastecida a partir de outras fontes, incluindo os grandes reservatórios de pequenos corpos. Acredita-se que regiões no Cinturão Principal (CP), bem como mais externas, repositórias de cometas, sejam os principais fornecedores (GRANVIK *et al.*, 2018).

Neste sentido, NEOs e MCs compartilham uma origem similar, sendo amplamente aceito que ambos seguiram um processo semelhante para alcançar sua localização atual na região entre as rbitas dos planetas rochosos. O cenário clássico descrito em BOTTKKE *et al.* (2002) sugere que a maior parte dos NEOs e MCs seja fragmentos de asteroides do CP, os quais foram injetados por colisão ou pelo efeito Yarkovsky em uma das muitas ressonâncias dentro do Cinturão, aumentando gradualmente suas excentricidades até que passaram a atingir a região das órbitas dos planetas terrestres. Os encontros subsequentes com esses planetas dispersaram os objetos por toda a zona onde agora os observamos, como NEOs ou MCs.

Além disso, os asteroides estão expostos ao ambiente espacial que pode alterar física e quimicamente as suas superfícies ao longo do tempo. Este processo, chamado de intemperismo espacial, atua em escalas de tempo curtas, < 1 Myr (VERNAZZA *et al.*, 2009).

Vários trabalhos tem sido dedicados a explorar o processo de migração de objetos do CP para o Sistema Solar interno. Em BOTTKKE *et al.* (2002), milhares de partículas de teste, colocadas em cinco distintas regiões de origem (Fig. 1.4), foram integradas numericamente por 1000 Myr. Quatro dessas regiões estão no CP ou adjacentes a ele, destacando a fonte intermediária IMC, que se localiza no espaço onde uma parte da MCs orbitam, enquanto a quinta está associada ao disco transneptuniano, mais especificamente:

- ressonância secular ν_6 ,
- ressonância de movimento médio 3:1,
- fonte intermediária de MCs (IMC),
- cinturão principal externo (OMB),
- cometas da família de Júpiter (JFC).

As integrações foram usadas para criar cinco distribuições de probabilidade (β) do tempo de residência em semieixo maior, excentricidade e inclinação. Estas distribuições mostram onde os NEOs de uma determinada fonte têm maior probabilidade estatística de estarem localizados.

O modelo de BOTTKKE *et al.* (2002) estima as contribuições das regiões de origem definidas para $H < 22$ da seguinte forma: $\beta_{\nu_6} = 0,37 \pm 0,08$, $\beta_{IMC} = 0,25 \pm 0,03$, $\beta_{3:1} = 0,23 \pm 0,09$, $\beta_{OMB} = 0,08 \pm 0,01$, e $\beta_{JFC} = 0,06 \pm 0,04$. Essas distribuições sugerem que aproximadamente 60% de todos os NEOs com $H < 22,0$ vêm do cinturão

interno, $\sim 24\%$ vêm do cinturão intermédio, $\sim 8\%$ do cinturão externo e $\sim 6\%$ vêm da região JFC.

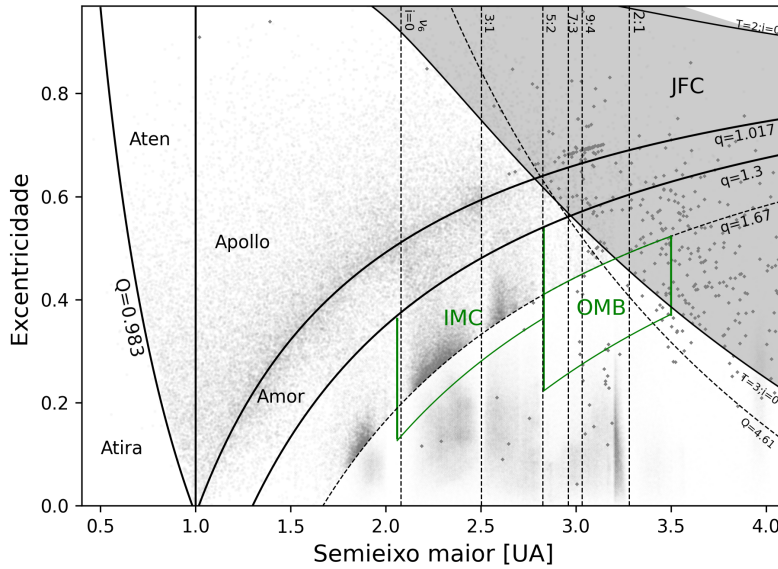


Figura 1.4: Espaço semieixo maior vs excentricidade. Figura baseada em BOTTKE *et al.* (2002).

Mais recentemente GREENSTREET *et al.* (2012), seguindo o do trabalho de BOTTKE *et al.* (2002), apresentaram uma nova integração numérica aproveitando o aumento do poder computacional. O modelo de distribuição orbital NEO com estatísticas mais abrangentes permite uma resolução mais precisa e reduz a incerteza. O modelo acompanha a evolução de aproximadamente 61.000 partículas de teste localizadas nas regiões fontes descritas na Fig. 1.4 ao longo de um intervalo de tempo entre 100 e 200 milhões de anos.

Os resultados são apresentados na Tabela 1.2 onde é dada a fração relativa de classes NEO, para cada região de origem, resultante da integração numérica realizada. Podemos observar que cada região de origem contribui com um número específico de objetos para cada classe NEO, o que sugere que a origem dos NEOs é diversificada, e como resultado, podemos esperar uma diversidade nas propriedades físicas desses corpos. Além disso, notamos que a fonte intermediária, IMC, relacionada aos objetos MCs é uma fonte importante para todos os grupos dinâmicos dos NEOs.

Por outro lado, MICHEL *et al.* (2000) realizaram uma exploração numérica da evolução dinâmica dos MCs, calculando a evolução ao longo de mais de 100 milhões de anos da amostra completa de cruzadores de Marte observados, até aquele momento, com até 5 km de diâmetro. Com base nos seus elementos orbitais, MICHEL *et al.* (2000) dividiram os MCs em diferentes grupos (Fig. 1.5) para distinguir diferentes comportamentos dinâmicos, tempos de vida e estados finais:

Tabela 1.2: Fração de cada região de origem para cada classe de NEO. Fonte: GREENSTREET *et al.* (2012).

	Atira	Aten	Apollo	Amor
% ν_6	$61,5 \pm 0,5$	$52,1 \pm 1,8$	$38,5 \pm 0,2$	$30,0 \pm 0,2$
% 3:1	$15,3 \pm 0,2$	$20,7 \pm 2,5$	$21,3 \pm 0,5$	$17,5 \pm 0,5$
% IMC	$23,2 \pm 0,7$	$27,2 \pm 0,7$	$24,5 \pm 0,2$	$32,4 \pm 0,8$
% OMC	0,0	0,0	$9,8 \pm 0,9$	$12,7 \pm 1,6$
% JFC	0,0	0,0	6,0	7,3
% Earth impact	—	$20,3 \pm 0,9$	$79,7 \pm 0,9$	—
% Venus impact	$16,5 \pm 0,1$	$19,8 \pm 0,6$	$63,7 \pm 0,5$	—
% Mercury impact	$13,1 \pm 0,2$	$26,4 \pm 0,2$	$57,3 \pm 0,9$	—

- MB são Mars-crossers com $a > 2,06$ UA, localização da ressonância 4:1 com Júpiter, e uma inclinação tal que estão abaixo da ressonância secular ν_6 ,
- HU tem $1,77 < a < 2,06$ UA e $i > 15^\circ$ (grupo dos Hungaria),
- PH têm $2,1 < a < 2,5$ UA, entre as ressonâncias 4:1 e 3:1 com Júpiter e estão situados acima da ressonância secular ν_6 (grupo dos Phocaea),
- MB2 tem $a > 2,5$ UA estando situados acima da ressonância secular ν_6 ,
- EV são objetos que cruzam Marte tendo o semieixo atual $a > 1,77$ UA, localização da ressonâncias 5:1 em Júpiter, ou $1,77 < a < 2,06$ UA, ou seja, entre as ressonância 5:1 e 4:1 com Júpiter e inclinação $i < 15^\circ$.

Com uma integração numérica de 100 Myr, MICHEL *et al.* (2000) demonstraram que a grande maioria dos corpos gradualmente aumenta sua excentricidade própria, exibindo um fenômeno de difusão caótica. Uma fração significativa se torna MCs. A origem dos MCs e sua subsequente evolução para a órbita NEAs é ilustrada na Figura 1.6. Basicamente os cruzadores de Marte HU, PH, MB e MB2 originam-se, respectivamente, dos asteroides que não cruzam as órbitas dos planetas nas populações Hungaria, Phocaea e do Cinturão Principal (acima e abaixo da ressonância ν_6). Esses asteroides, por sua vez, contribuem com uma fração dos cruzadores da Terra e dos cruzadores EV de Marte. As setas na Figura 1.6 indicam os principais fluxos entre as populações.

Assim, objetos pertencentes às famílias de Hungaria, Phocaea, MB acima e abaixo da ressonância secular ν_6 podem evoluir para objetos que cruzam a órbita de Marte. Para todos esse objetos, o mecanismo dominante para se tornarem NEAs é a injeção em uma ressonância como resultado de aproximações com Marte. MICHEL *et al.* (2000)

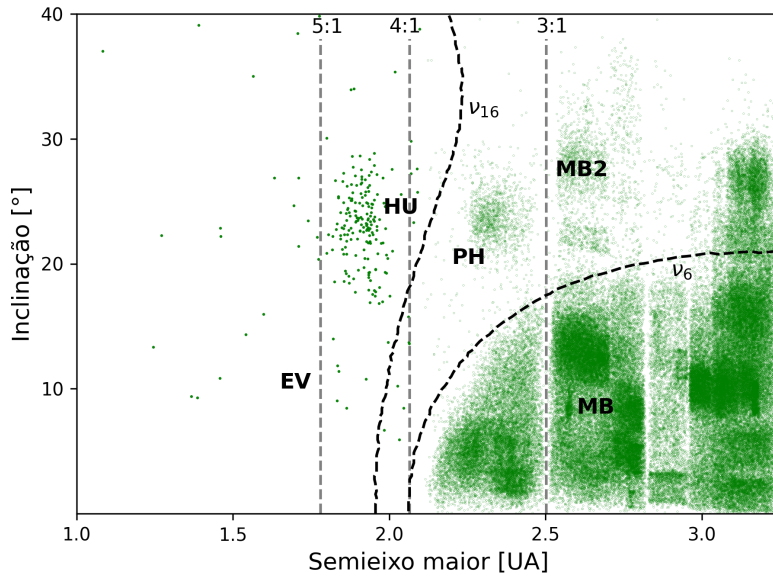


Figura 1.5: Distribuição orbital dos MCs no espaço inclinação vs semieixo maior. Os rótulos denotam os diferentes grupos descritos no texto. As duas curvas denotam a localização das ressonâncias seculares ν_6 e ν_{16} enquanto as linhas tracejadas correspondem às posições das ressonâncias médias 5:1, 4:1 e 3:1 com Júpiter. Figura baseada em MICHEL *et al.* (2000).

concluíram que os grupos MB, HU e PH parecem ser um importante reservatório de NEAs com mais de um quilômetro de diâmetro. No entanto, esses autores sugerem que os MCs são capazes de suprir apenas metade da população de *Earth-crossers* com diâmetros maiores que 5,0 km. Os asteróides evoluem para cruzar a órbita da Terra em uma escala de tempo média de cerca de 60 milhões de anos. Em seguida, eles podem alternar entre o status do cruzador da Terra e um cruzador apenas de Marte, evoluindo antes de colidir com o Sol ou ser ejetado para além da órbita de Saturno. Portanto, ainda existe uma ligação não conhecida entre os NEOs e suas fontes de origem enquanto, os MCs devem ser considerados uma espécie de fonte intermediária, que precisa ser mantida por populações de fontes muito maiores de objetos que não cruzam as órbitas dos planetas, como as famílias Hungaria, Phocaea e objetos do Cinturão Principal.

1.3 Propriedades físicas

Depois de fornecer uma visão geral dos pequenos corpos do Sistema Solar, definir as populações de MC e NEO, e destacar a importância de estudar essas populações, nos aprofundaremos na conexão NEO-MC pois com sua origem e evolução comuns, existe a necessidade de estudá-los em paralelo

Nesse contexto, a obtenção de diversas propriedades físicas dos NEOs e MCs abre um amplo campo de estudo. A caracterização física desses objetos pode ser obtida medindo

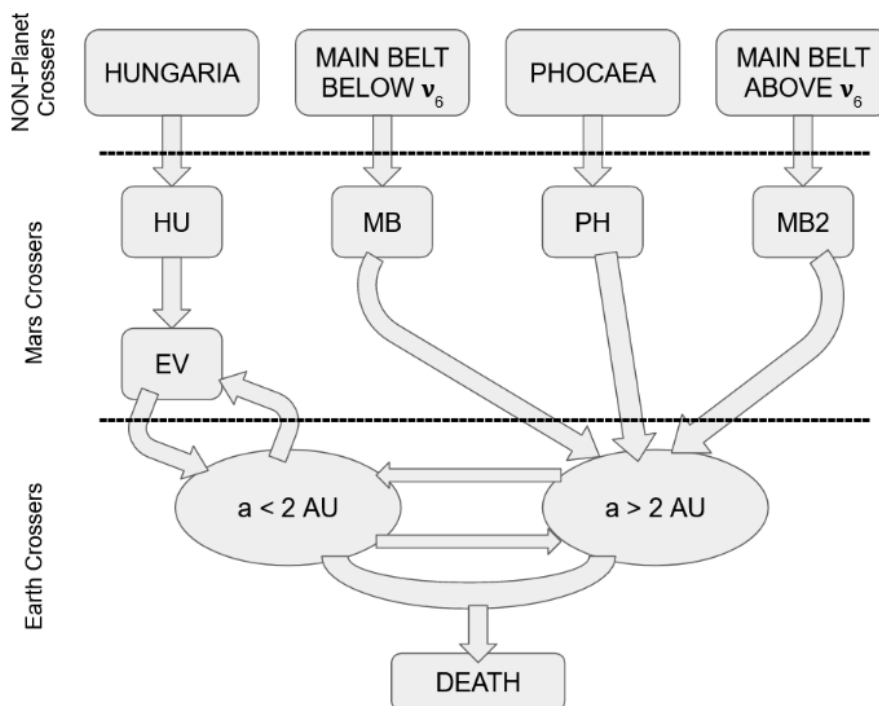


Figura 1.6: Vista esquemática da origem dos cruzadores de Marte e sua subsequente evolução para órbitas que cruzam a Terra. Figura retirada de MICHEL *et al.* (2000).

a luz refletida por eles, em várias faixas de comprimento de onda, através de observações feitas com diferentes tipos de detectores, incluindo fotômetros, espectrógrafos e polarímetros. A fotometria CCD na região visível nos possibilita obter informações como a determinação da órbita do objeto (astrometria), período de rotação, forma, direção do eixo de rotação, propriedades de reflexão de sua superfície e composição (PRAVEC e HARRIS, 2000, KAASALAINEN *et al.*, 2002, MUINONEN *et al.*, 2002, 2010). Além disso, a espectroscopia nos permite determinar a composição mineralógica da superfície do corpo, sobretudo nas regiões visível e infravermelho próximo, VINIR (GAFFEY *et al.*, 2002).

No caso da fotometria, uma vez que o brilho do objeto é transformado em um sistema de magnitude padronizado, podemos utilizar a variação da magnitude ao longo do tempo para obter sua curva de luz. O processamento da curva de luz nos permite ajustar um período de rotação. O período de rotação de pequenos corpos, resultado de colisões e efeitos não gravitacionais, pode ser medido através de um ajuste de Fourier da curva de luz. Esse período pode fornecer informações sobre a força de coesão interna do objeto, que, por sua vez, está relacionada com a sua estrutura interna (HOLSAPPLE, 2007). Com uma grande quantidade de períodos de rotação disponíveis na literatura, tornou-se possível realizar estudos estatísticos das distribuições de rotação. Essas análises estatísticas ajudam a compreender a evolução colisional das diversas populações.

Por outro lado, usando a variação da magnitude em relação ao ângulo de fase solar (o ângulo formado entre o Sol, o alvo observado e o observador), é possível construir uma

curva de fase. As curvas de fase, caracterizadas por parâmetros de função de fase, oferecem informações sobre o brilho intrínseco do objeto e auxiliam na inferência de características, como diâmetro e albedo. Finalmente, o espectro fotométrico é obtido medindo a luz que passa através de filtros óticos. Tal espectro mostra como a refletância varia com o comprimento de onda e está diretamente relacionada à composição da superfície do objeto. O comportamento do espectro, portanto, pode ser usado para derivar uma classificação taxonômica.

Já na espectroscopia, a medição da refletância em função do comprimento de onda resulta em um espectro. A análise do espectro permite inferir a composição mineralógica superficial do objeto. Além disso, a comparação do espectro obtido com outros espectros de laboratório ou observações de meteoritos possibilita identificar uma série de características de absorção que são diagnósticas da classe de composição do objeto tais como silicato, carbonáceo, metálico, etc. (BUS e BINZEL, 2002).

O número de pequenos corpos do Sistema Solar descobertos está constantemente aumentando. Nas últimas décadas, diversos programas têm se dedicado tanto à detecção quanto a obtenção de propriedades físicas desses objetos. Por exemplo, no caso dos NEOs, a taxa de detecção diminuiu significativamente à medida que o tamanho dos objetos diminuiu, indo de quase 100% para os objetos de tamanho quilométrico a quase 0% para os objetos na faixa do metro. Isso representa uma população de vários milhões de corpos TRICARICO (2017). No entanto, em relação aos NEOs com caracterização física conhecida, a estimativa global é de cerca de 15% (IEVA *et al.* 2014, 2018), e esse número está em constante declínio devido à alta taxa de descoberta por parte dos diversos mapeamentos sistemáticos em andamento.

O objetivo do presente trabalho é contribuir para a melhor compreensão da origem e evolução das diversas populações de pequenos corpos do Sistema Solar através da determinação de propriedades físicas de objetos selecionados das populações NEO e MC usando observações em diferentes comprimentos de onda.

No Capítulo 2, apresentamos os resultados das observações espectroscópicas na faixa visível de 43 “pequenos” NEOs recém descobertos. No Capítulo 3 estão dados os parâmetros físicos de MCs obtidos usando observações fotométricas. Cada um desses capítulos possui sua própria metodologia e discussão dos resultados. Finalmente, no Capítulo 4, apresentamos conclusões gerais e discutimos perspectivas futuras. As publicações resultantes deste trabalho são apresentados no Apêndice B.

Capítulo 2

Near-Earth Objects (NEOs)

2.1 Problemática dos “pequenos” x “grandes” asteroides

No capítulo anterior, destacou-se a importância do estudo de objetos em órbita próxima à Terra. Também foi mencionado que o número de pequenos corpos descobertos supera aquele dos com caracterização física. Uma estimativa geral da caracterização física dos NEOs conhecidos está em torno de 15% (IEVA *et al.*, 2014, 2018). No que diz respeito à caracterização espectral dos NEOs, ela foi determinada apenas para cerca de mil objetos (SERGEYEV e CARRY, 2021) por mapeamentos como SINEO, NEOSHIELD2, MANOS, MITHNEOS e diversos outros trabalhos. Considerando a população conhecida de NEOs, a fração com classificação taxonômica determinada cai de $\sim 1/3$ para $\sim 1/10$ para objetos de tamanho $> 1,0$ km e menores que 300 m, respectivamente (PERNA *et al.*, 2018).

Com o objetivo de contribuir para diminuir o déficit na caracterização física da população NEO, diversos estudos têm sido realizados nos últimos anos. POPESCU *et al.* (2019) teve como objetivo caracterizar espectralmente uma amostra de NEOs “grandes”, na faixa de tamanho de $\sim 0,25 - 5,5$ km. Seus resultados indicam que a distribuição taxonômica corresponde à da parte interna do Cinturão de asteróides (BINZEL *et al.*, 2015, BINZEL *et al.*, 2019, CARRY *et al.*, 2016a) com uma abundância de mais de 50% de objetos do complexo Q/S. Eles também encontraram uma porção significativa de objetos nos complexos C e X e muito poucos presentes em classes como tipo B, A e D.

A população oposta de NEOs, ou seja, dos objetos “pequenos” foi estudada por PERNA *et al.* (2018), considerando corpos com magnitude absoluta $H > 20,0$. Nesta população, embora a distribuição ainda seja dominada pelo complexo S, é observada uma superabundância de objetos tipo A, ricos em olivina, e tipos D, ricos em componentes orgânicos. Esta descoberta pode estar relacionada com a evolução dinâmica de pequenos corpos do Cinturão Principal (DEMEO e CARRY, 2014), ou com a classificação taxonômica dos NEOs devido a fenômenos que afetam sua superfície e espectros, como intemperismo es-

pacial e avermelhamento de fase, ou pode representar uma diferença real nas propriedades químicas de pequenos corpos (não detectada no Cinturão Principal).

Para investigar mais detalhadamente esta população, ou seja, dos NEOs “pequenos”, decidimos caracterizar espectralmente objetos recentemente descobertos na faixa de tamanho sub-km, ou seja, tendo uma magnitude absoluta $\geq 20,0$. Para atingir tal objetivo foi apresentada e aprovada uma proposta denominada *Uncovering the “small” asteroid population* no telescópio SOAR de 4,1 m (Cerro Pachon, Chile). Classificando com *Long Program*, começou no segundo semestre de 2020 e terminou no segundo semestre de 2022. Os resultados apresentados a seguir são das primeiras 18 noites de observação das quase 30 noites no total.

Na próxima seção (2.2) são dadas as características do telescópio SOAR e a descrição da amostra selecionada. Na seção 2.3 encontra-se a metodologia seguida para obter os resultados apresentados na seção 2.4. Discutimos nossas descobertas e algumas conclusões na seção 2.5. Vale ressaltar que um artigo com estes resultados foi publicado na revista *MNRAS* e se encontra no Apêndice B.

2.2 Observações e amostra

As observações foram possíveis graças ao *Southern Astrophysical Research Telescope* (SOAR), localizado no Cerro Pachón, nos Andes chilenos (Fig. 2.1), cerca de 0,4 km a nordeste do telescópio Gemini Sul. O SOAR pode fornecer imagens em comprimentos de onda do óptico ao infravermelho próximo, tanto para imagens quanto para observações espectroscópicas. SOAR tem um espelho primário de 4,1 m com modelo óptico f/16.63 Ritchey-Chrétien e uma montagem altazimutal. O telescópio é um projeto conjunto do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação do Brasil (MCTIC/LNA), NOIRLab da *National Science Foundation* (NSF), da Universidade da Carolina do Norte em Chapel Hill (UNC) e da *Michigan State University* (MSU).

Para realizar as observações apresentadas neste trabalho, o telescópio foi equipado com o espectrógrafo *Goodman*, a *Red Camera* que é um *backside illuminated* CCD. A dimensão da câmera é de 4096 x 4112 píxeis de 15 μm . A configuração do instrumento incluía uma fenda longa de 1,5” de largura além do filtro de bloqueio GG-455. O espectrógrafo *Goodman* também foi equipado com uma grade de 400 linhas por mm. Esta configuração cobre o intervalo espectral entre 0,500 e 0,905 μm com uma resolução $R \sim 1.850$ e uma dispersão de 0,0001 μm por pixel sem binagem.

Os limites do *tracking* do telescópio são: o objeto não estar no zênite, ter elevação máxima e mínima de 88° e 15° , respectivamente, e taxas de *tracking* não sidereal em declinação e ascensão reta menores que ± 2.700 arcsec/hora e ± 180 segundos de RA/hora, respectivamente.

Os objetos observados foram selecionados com base em dois critérios: (a) priorizar



Figura 2.1: Sítio do *Southern Astrophysical Research Telescope* - SOAR. Fotografia: CTIO/NOIRLab/NSF/AURA/J. Fuentes.

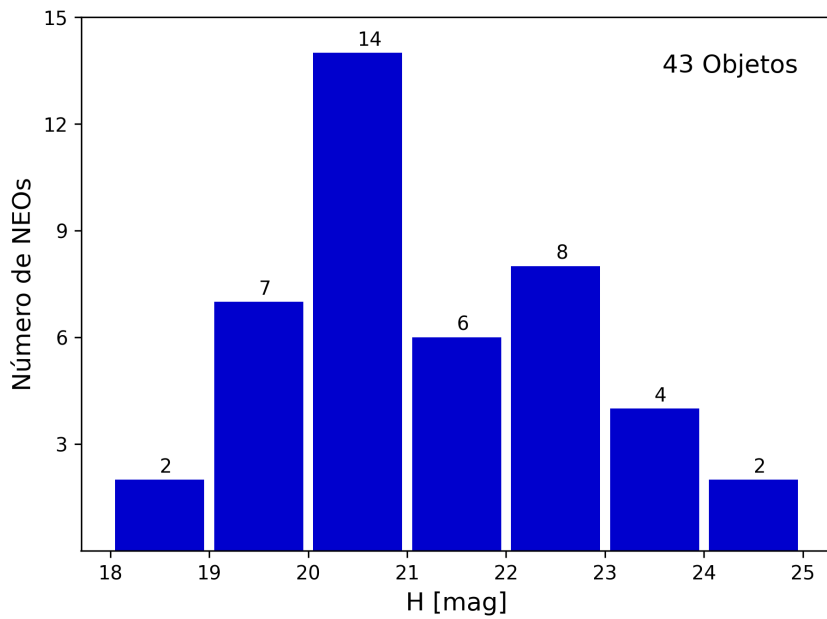
NEOS recém-descobertos, como pode ser verificado pela designação provisória dos objetos observados (Tabela 2.1 e no apêndice A), e (b) o valor de sua magnitude absoluta ser, sempre que possível, superior a 20,0. Com esta segunda restrição limitamos a observação a objetos “pequenos”, ou seja, que, de acordo com seu albedo, poderiam ter um diâmetro na ordem de centenas de metros. Na Figura 2.2a é dada a distribuição dos objetos observados em função de sua magnitude absoluta.

É importante mencionar que os objetos que preenchem nossos requisitos representam alguns desafios observacionais, principalmente sua alta magnitude visual e rápido movimento. Além disso, a curta janela de observação durante a sua aproximação à Terra nos obrigou a escolher objetos recém-descobertos nos dias anteriores a cada data de observação.

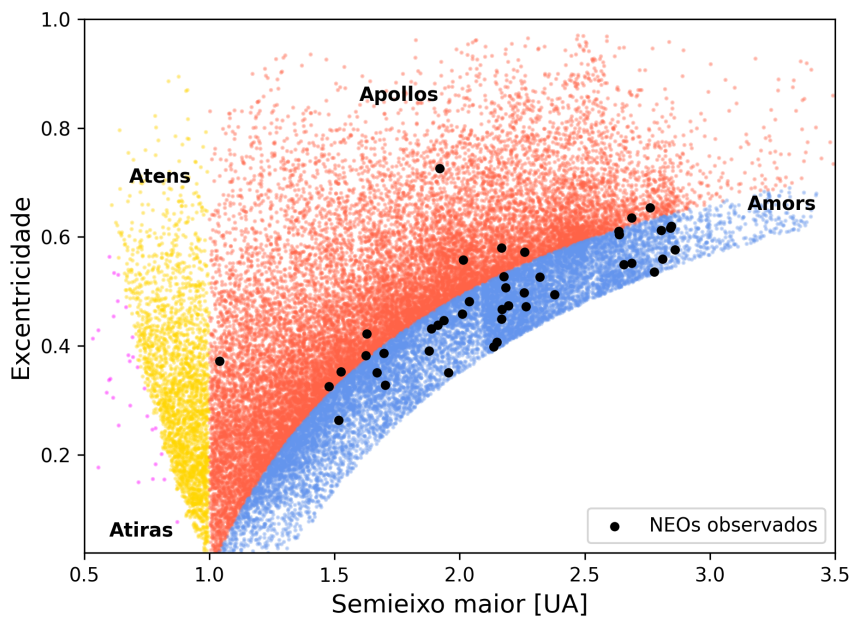
No apêndice A, Tabela A.1, listamos a designação dos objetos selecionados junto com seus principais elementos orbitais e classificação orbital enquanto, na figura 2.2b, é mostrada sua localização no espaço semieixo maior versus excentricidade. No fundo da figura, está representado cada um dos subgrupos de NEOs.

2.3 Aquisição e redução dos dados

A aquisição de dados foi feita durante dezoito noites de observação, entre outubro de 2020 e dezembro de 2021. Uma vez selecionados os objetos e conhecendo seus parâmetros observacionais, pudemos planejar e programar o horário ideal da noite para observar determinado objeto seguido, no melhor dos casos, pela observação de uma estrela análoga solar. Antes de iniciar a noite de observação, sempre foram feitas as imagens de calibração



(a)



(b)

Figura 2.2: (a) Distribuição dos NEOs observados em função do valor de sua magnitude absoluta H . (b) Distribuição, no espaço semieixo maior versus excentricidade, dos NEOs observados (pontos pretos). Em distintas cores no fundo, os objetos dos diversos grupos. Fonte: JPL Small-Body Database Query.

(*bias e internal lamp flats (Quartz)*), assim como as exposições com as lâmpadas HgAr-Ne (mercúrio-argônio-néon).

Dependendo da magnitude visual e das taxas de movimento em ascensão reta (RA) e declinação (DEC) ($d(\text{RA})/dt$ ["/hr] e $d(\text{DEC})/dt$ ["/hr], respectivamente), cada objeto foi observado até três vezes com exposições entre 600 e 1.800 s. Por outro lado, as análogas solares foram observadas em diferentes massas de ar ao longo de cada noite. A fim de reduzir os efeitos da refração diferencial atmosférica, a fenda foi orientada ao longo do ângulo paralático.

Após a aquisição das imagens, utilizamos os pacotes de software IRAF e scripts implementados em PYTHON para realizar a redução dos dados. O procedimento, em termos gerais, incluiu:

- subtração de bias (`zerocombine` e `ccdproc`),
- correção de flat normalizado (`flatcombine`, `longslit.response` e `ccdproc`),
- extração do espectro (`apall`),
- correção por extinção atmosférica (`extinction`),
- calibração de comprimento de onda usando as linhas de emissão das lâmpadas HgAr-Ne (`identify` e `dispcor`),
- divisão do espectro de objetos individuais por uma análoga solar com massa de ar semelhante (`sarith`). Realizamos diversas observações das análogas solares ao longo da noite de forma a evitar grandes diferenças na massa de ar.

Por fim, foi feita a normalização em $0,55 \mu\text{m}$ para obter o espectro de refletância assim como um *rebinned* nos dados para melhorar a relação sinal-ruído (onde obtivemos o valor mediano cada vinte $0,0001 \mu\text{m}$), dependendo da quantidade de ruído de cada espectro, feito com uma série de *scripts* em PYTHON.

Após o planejamento, observação e obtenção dos espectros o próximo passo foi obter informações sobre a composição da superfície. Por tanto, os espectros foram classificados taxonomicamente usando o esquema definido por Bus-DeMeo (DEMEO *et al.*, 2009), que compreende 25 classes diferentes. Nesta etapa usamos a ferramenta online M4AST (POPESCU *et al.*, 2012). Para um determinado espectro, M4AST encontra a correspondência mais próxima dos modelos padrão da taxonomia Bus-DeMeo, por meio de uma abordagem de distância espectral (teste χ^2). A ferramenta aceita arquivos individuais para cada objeto que se pretende classificar. Também inspecionamos visualmente todas as soluções fornecidas pela ferramenta M4AST e selecionamos aquela que mais se aproximava de cada espectro.

Finalmente, para estimar o diâmetro equivalente, foi usada a equação 2.1 dada por HARRIS e HARRIS (1997), para o qual usamos valores da magnitude H obtidos do MPC¹ e o albedo visual médio (p_V) de cada classe Bus-DeMeo, conforme dado por MAINZER *et al.* (2011).

$$D = \frac{1.329}{\sqrt{p_V}} 10^{-\frac{H}{5}} \quad (2.1)$$

O diâmetro calculado é apenas uma estimativa e carrega um erro ao classificar taxonomicamente e ao atribuir o albedo. Neste ponto é importante mencionar as diferenças que existem no valor médio de albedo, para cada classe taxonômica, encontradas na literatura. Por exemplo DEMEO e CARRY (2013) calcularam valores médios ligeiramente diferentes para cada classe taxonômica, bem como, mais recentemente, também MESQUITA (2022). Porém, para manter a concordância com trabalhos anteriores, utilizamos os albedos dados em MAINZER *et al.* (2011). A figura 2.3 mostra a variação dos diâmetros obtidos utilizando os diferentes valores de albedo dados pelos autores acima e embora não sejam observadas diferenças significativas, é importante ressaltar que essas discrepâncias podem afetar uma análise estatística mais aprofundada.

As propriedades físicas e os resultados para os objetos observados são apresentados na Tabela 2.1, onde é dada a data de observação, a magnitude absoluta H , a classificação taxonômica, o albedo médio adotado, o diâmetro calculado e o parâmetro de Tisserand com Jupiter. As circunstâncias observacionais são dadas no Apêndice A, na Tabela A.2, onde para cada objeto é apresentada a sua designação provisória, a data e hora de início da observação UT, a magnitude visual aparente, a massa de ar, o ângulo de fase, a taxa de variação angular em RA e DEC aparente, o tempo de exposição, a estrela análoga solar utilizada e sua massa de ar no instante da observação. Os espectros de refletância resultantes são apresentados na Figura 2.4 (pontos azuis), juntamente com a curva da classe espectral atribuída e sua barra de erro (pontos e linhas pretas e região sombreada em rosa).

2.4 Resultados

Através da metodologia descrita acima, conseguimos classificar taxonomicamente um número significativo de espectros de “pequenos” NEOs recentemente descobertos. O programa observacional teve duração de 18 noites quando 43 objetos, descobertos em 2019, 2020 e 2021, foram observados e seus espectros de refletância na faixa visível (0,500-0,905 μm) obtidos pela primeira vez. Conforme dado na Tabela A.1 e mostrado na Figura 2.2b os NEOs observados pertencem aos subgrupos Amor e Apollo com 32 e 11 objetos, respectivamente. Entre estes, quatro objetos do subgrupo Apollo são PHAs: 2020 XK7, 2021

¹<https://www.minorplanetcenter.net/data>

Tabela 2.1: Propriedades físicas e resultados para os NEOs observados.

Objeto	Data	H [mag]	Tax.	Albedo	Diâmetro [m]	T _{Jupiter}
2019 GQ3	2020-out-11	20,75	Q	0,227	197,50	4,175
2020 ME5	2020-out-10	20,4	A	0,191	252,97	3,507
2020 OC8	2020-nov-06	20,76	A	0,191	214,33	3,806
2020 RM6	2020-out-11	24,9	S	0,211	30,30	3,100
2020 RP4	2020-out-11	23,6	A	0,191	57,95	4,169
2020 SK5	2020-out-11	23,0	O	0,339	57,34	3,045
2020 TG3	2020-dez-19	22,5	Sq	0,243	85,27	2,975
2020 TG4	2021-fev-17	20,0	Ch	0,058	551,93	3,130
2020 TT7	2020-dez-17	22,27	S	0,211	101,73	4,130
2020 UZ3	2020-nov-06	20,32	B	0,120	331,13	3,338
2020 WZ1	2020-dez-17	20,4	D	0,048	504,63	5,581
2020 XK7	2021-fev-17	19,5	Ch	0,058	694,84	3,607
2021 BA1	2021-mar-23	22,66	A	0,191	89,34	3,375
2021 CN4	2021-mar-22	20,47	A	0,191	244,95	3,330
2021 CX5	2021-mar-22	24,29	D	0,048	84,13	4,234
2021 GM4	2021-jun-12	21,81	Sa	0,367	95,33	3,119
2021 GX16	2021-jun-13	21,66	A	0,191	141,60	3,148
2021 JH2	2021-ago-16	19,34	S	0,211	392,15	3,483
2021 JJ9	2021-jun-14	22,29	O	0,339	79,52	3,871
2021 JT5	2021-jun-13	20,76	Q	0,227	196,60	3,702
2021 JW17	2021-jun-14	20,14	A	0,191	285,15	3,371
2021 KD1	2021-jun-13	20,88	D	0,048	404,55	2,979
2021 KQ7	2021-ago-16	19,98	Xk	0,095	435,24	3,335
2021 LH9	2021-set-26	20,1	Xk	0,095	411,84	3,547
2021 LN15	2021-ago-17	20,23	D	0,048	545,73	3,449
2021 MG1	2021-dez-02	18,14	D	0,048	1.428,82	2,889
2021 MO1	2021-dez-01	18,47	S	0,211	585,40	3,030
2021 NF1	2021-ago-17	19,8	S	0,211	317,29	3,604
2021 NK3	2021-ago-17	21,3	Sr	0,266	141,63	3,586
2021 NM39	2021-set-26	20,3	S	0,211	252,03	3,645
2021 OX1	2021-set-26	19,7	A	0,191	349,20	3,098
2021 PC10	2021-set-27	22,34	Sv	0,309	81,39	4,451
2021 PE10	2021-set-26	20,7	Sv	0,309	173,22	3,535
2021 PR2	2021-set-26	22,5	Sq	0,243	85,27	3,840
2021 PT6	2021-set-26	21,22	K	0,130	210,19	2,972
2021 QB3	2021-set-27	23,78	X	0,047	107,53	4,500
2021 QK5	2021-set-27	19,23	Sr	0,243	367,41	3,766
2021 RC10	2021-set-27	23,84	S	0,211	49,36	3,377
2021 SR3	2021-dez-01	22,71	Q	0,227	80,09	3,499
2021 TJ4	2021-dez-02	21,96	Sq	0,243	109,34	3,680
2021 TV7	2021-dez-01	22,79	B	0,120	106,17	2,993
2021 UG3	2021-dez-03	21,52	D	0,048	301,28	4,079
2021 UU5	2021-dez-03	19,19	Sq	0,243	391,55	3,303

Notas. A tabela lista para cada objeto: sua designação, data de observação, magnitude absoluta (H), tipo taxonômico determinado de acordo com o taxonomia Bus-DeMeo (DEMEO *et al.*, 2009), albedo médio da classe segundo MAINZER *et al.* (2011), diâmetro equivalente computado e parâmetro de Tisserand com Jupiter.

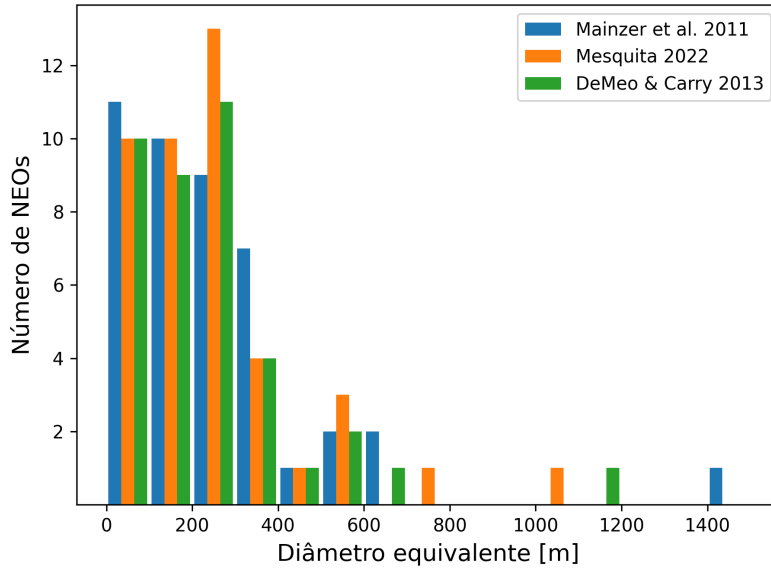


Figura 2.3: Distribuição dos diâmetros dos NEOs observados calculados levando em consideração o albedo médio de sua classe de acordo com MAINZER *et al.* (2011) (azul), MESQUITA (2022) (laranja) e DEMEO e CARRY (2013) (verde).

GM4, 2021 MG1 e 2021 UU5. A mediana da magnitude absoluta da amostra é de 20,76, correspondendo a um diâmetro equivalente médio entre 200 e 400 metros, dependendo do albedo.

Ao analisarmos nossos espectros e as circunstâncias observacionais, notamos que a qualidade dos espectros foi afetada por vários fatores. Primeiro pela magnitude visual, bem como pela taxa angular aparente em RA e DEC. Ambos fatores representam um desafio ao observar, mas são inevitáveis no caso de “pequenos” NEOs. Para nossa amostra calculamos um valor mediano de magnitude visual de 19,45 (Fig. 2.5a) e taxas angulares absolutas de 134,95 ["/hr] e 113,50 ["/hr] em RA e DEC, respectivamente (Fig. 2.5c). Além disso, no caso de objetos fracos observados em más condições de céu, nossos espectros apresentam um padrão de *fringing* que, no entanto, não impacta muito a classificação taxonômica, uma vez que é semelhante em todos os comprimentos de onda. O ângulo de fase solar, α , no momento da observação é outro parâmetro importante que afeta o espectro de refletância. A mediana do ângulo de fase foi de 31,28° com o menor valor de 6,49°, para o objeto 2020 NF1, e o maior, de 109,05°, para 2021 GM4. A maior parte da nossa amostra está abaixo de um valor de 50,0° (Fig. 2.5b) logo podemos concluir que nossa amostra não está contaminada por observações em alto ângulo de fase. Tal contaminação seria devida a espectros obtidos em grandes ângulos de fase, quando ocorre o fenômeno denominado de avermelhamento de fase. Na Figura 2.5 mostramos a distribuição dos objetos observados em função dos fatores mencionados anteriormente, magnitude visual, ângulo de fase e taxa angular de mudança absoluta aparente em RA e

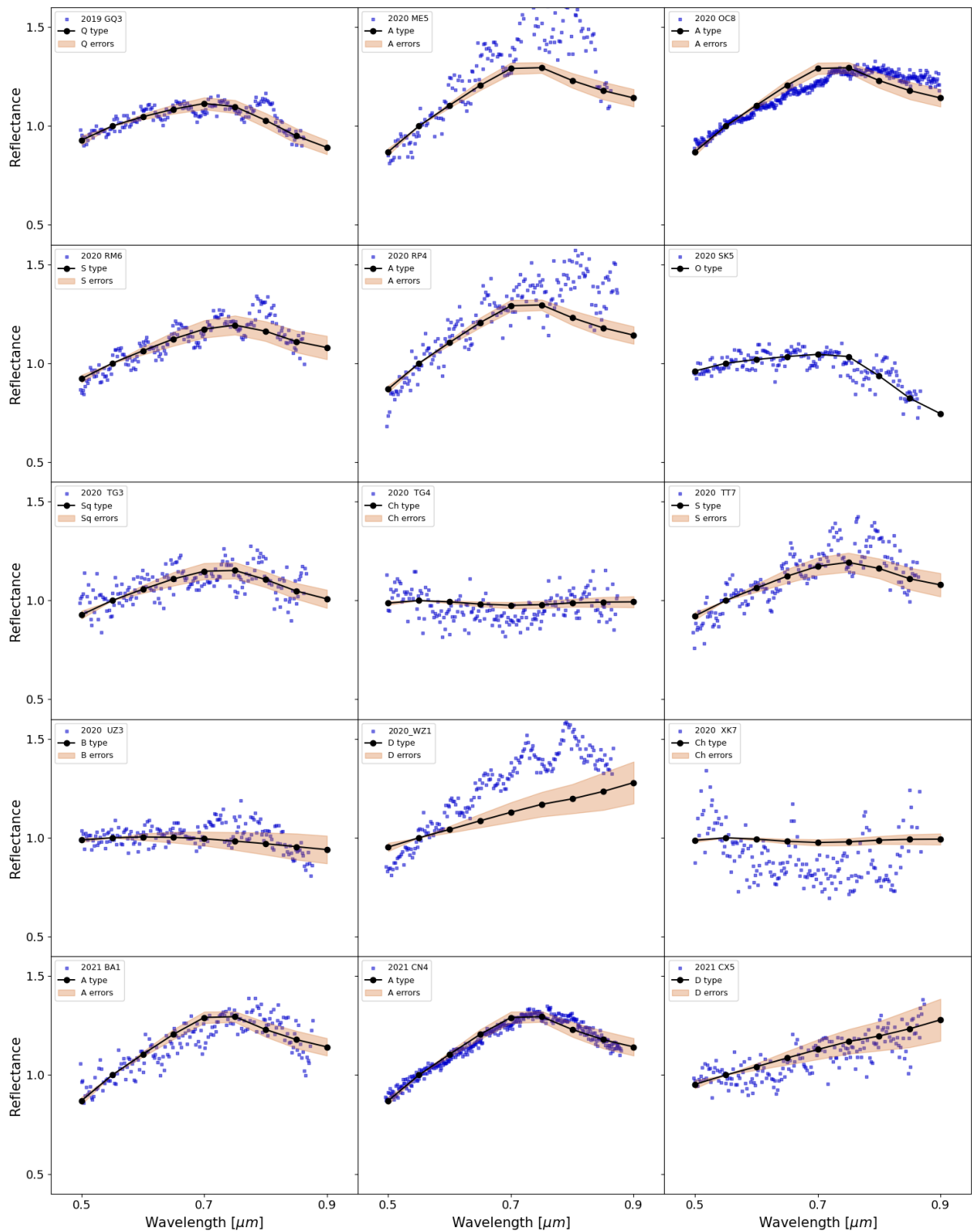


Figura 2.4: Espectros de refletância obtidos (pontos azuis), normalizados em $0,55 \mu\text{m}$, juntamente com a curva de classe espectral atribuída (pontos e linha pretos) e sua região de erro (rosa).

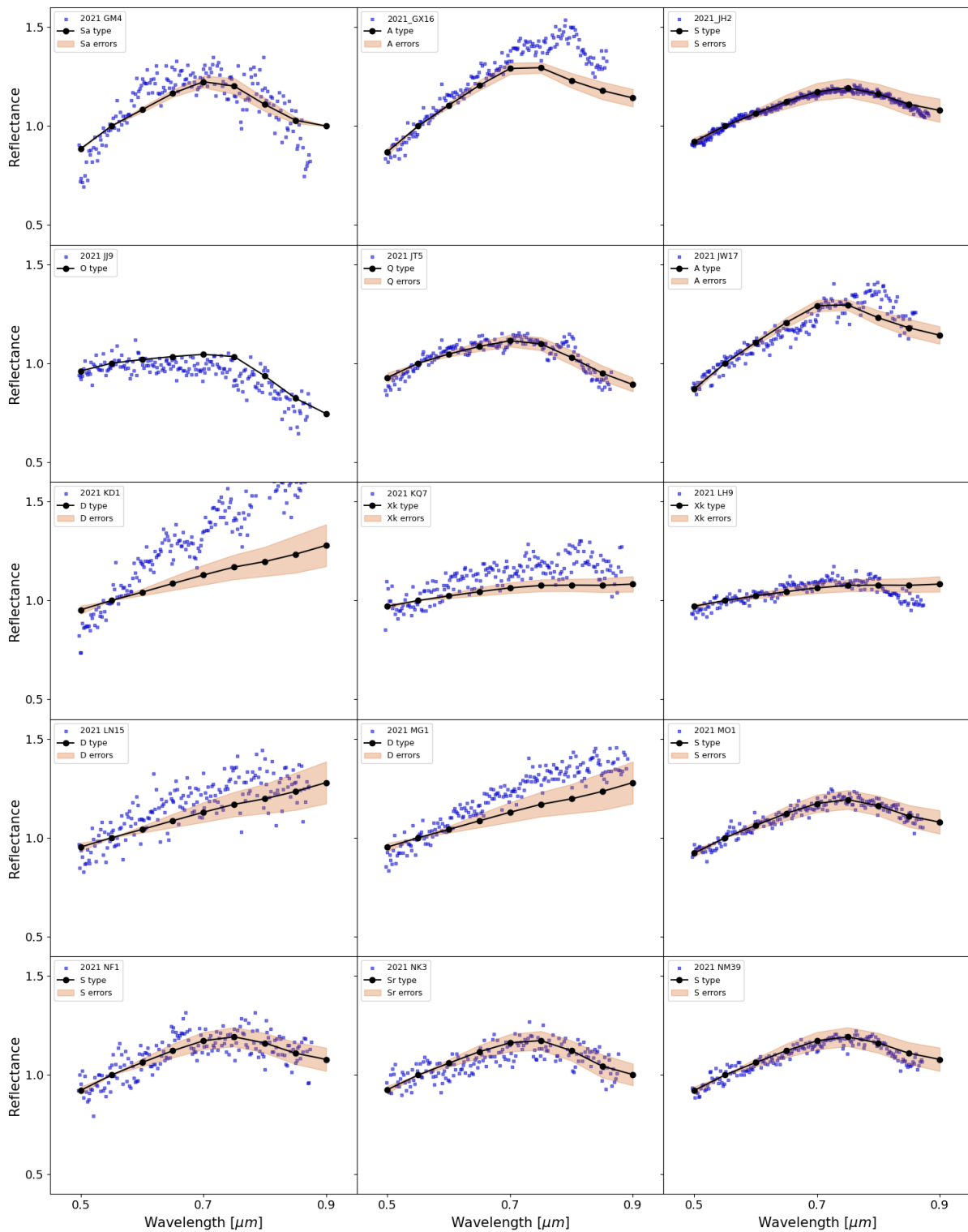


Figura 2.4: Continuação da figura 2.4.

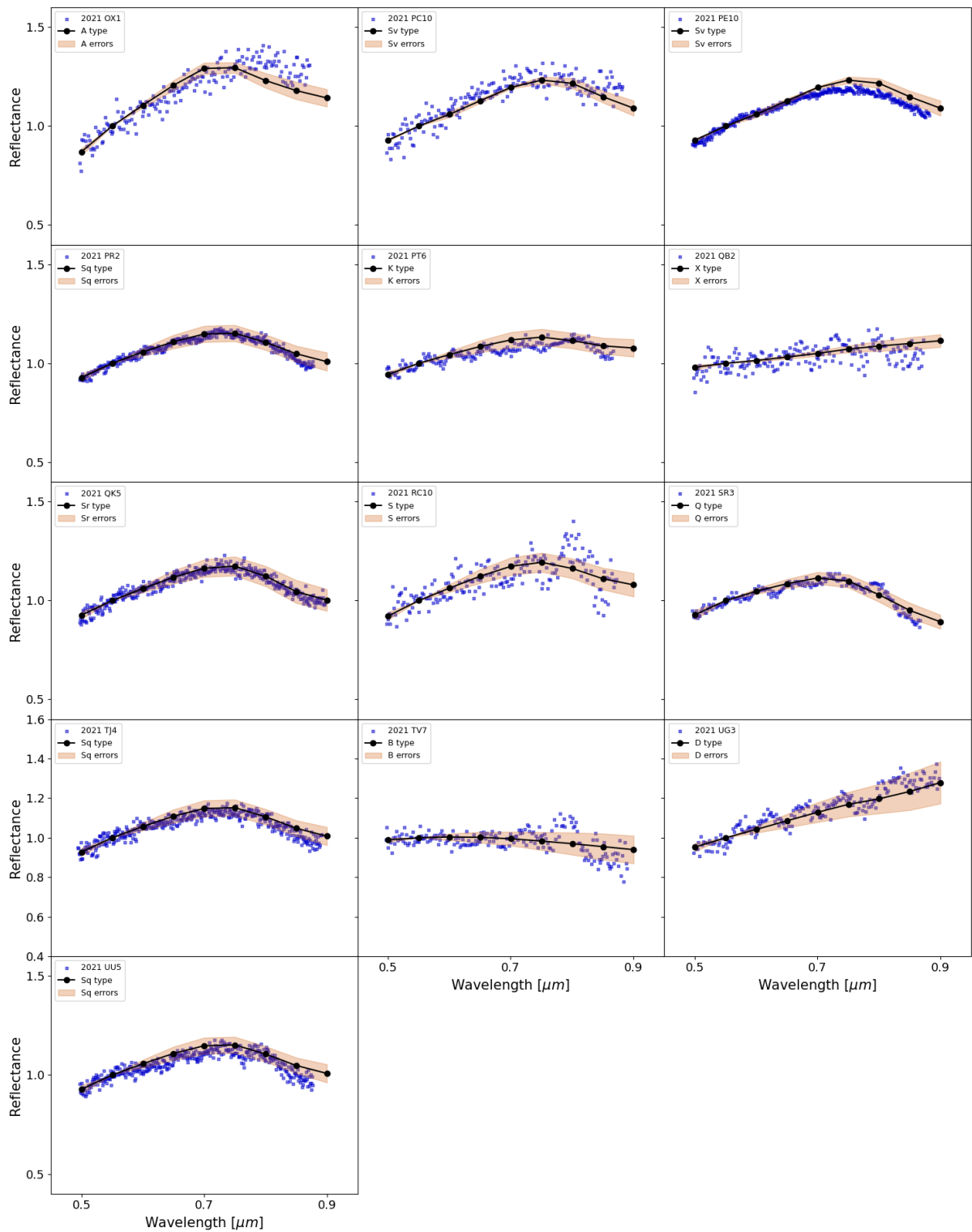


Figura 2.4: Continuação da figura 2.4.

DEC.

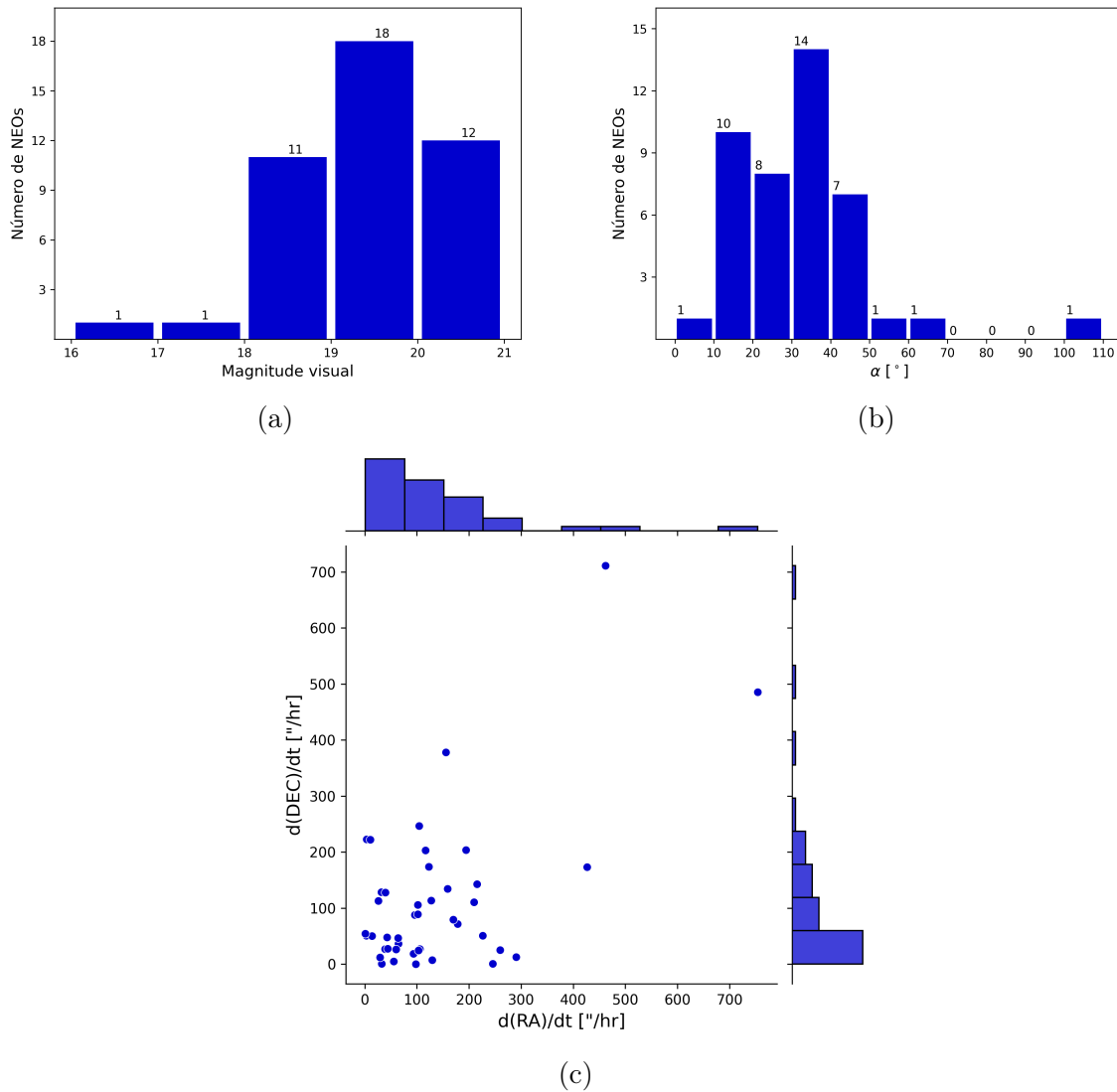


Figura 2.5: Distribuição dos NEOs observados em função da sua magnitude visual (a), ângulo de fase (b) e do valor absoluto da taxa angular de variação aparente em RA e DEC (c).

Com o objetivo de aumentar a significância da análise ao comparar nossa amostra com outros *surveys*, agrupamos os objetos classificados como tipo Sq-, Sr-, Sa- e Sv, na classe S, aqueles classificados como tipo Xk na classe X, e os dois tipo B na classe C. Como pode ser visto nas Figuras 2.6a e 2.6b, 16 NEOs se enquadram na classe S, o que representa quase 40% de nossa amostra, enquanto 4, quase 10%, pertencem à classe C. Um grande número de objetos foi classificado como tipo A, 8, e tipo D, 6, representando 19% e 14% da amostra, respectivamente. Os demais NEOs observados foram classificados como tipo Q e X, três objetos cada, como tipo O e tipo B, dois, e como tipo K, apenas um.

A distribuição taxonômica de nossa amostra de NEOs é portanto, dominada pelo complexo S com uma grande fração de objetos do tipo A e, em menor extensão, do

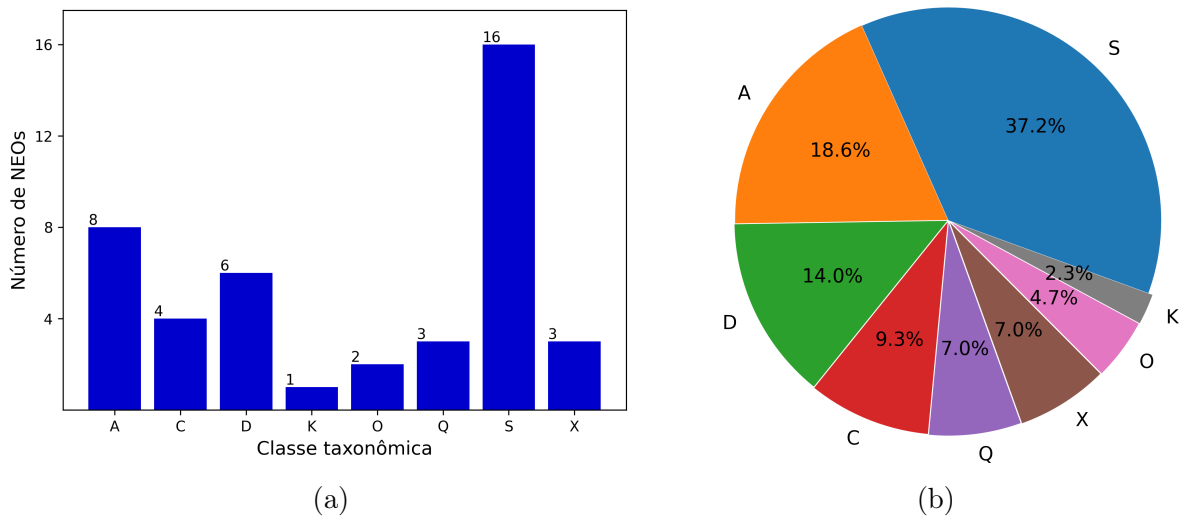


Figura 2.6: Distribuição taxonômica dos 43 NEOs observados.

tipo D. Este resultado é interessante considerando que no Cinturão Principal a fração de objetos do tipo A é consideravelmente menor (DEMEO e CARRY, 2014).

Tal discrepância na distribuição taxonômica dos tipo A pode estar relacionada à composição, principalmente olivina, que tem a característica de ser frágil e assim estando presente apenas em objetos pequenos. Isso, somado ao fato que, pelo menos atualmente, não é possível observar objetos no CP na faixa de metros, pode explicar a diferença entre as frações do tipo A. Existe também a possibilidade de uma classificação incorreta de alguns de nossos objetos devido ao ruído nos espectros e/ou ao efeito de avermelhamento de fase. Ambos efeitos poderiam diminuir a fração do objetos tipo A em nossa amostra, conciliando-a com a do CP. É importante mencionar que na taxonomia Bus-DeMEO a classe A requer a parte do infravermelho próximo dos espectros, de modo que alguns dos nossos tipos A podem, de fato, ser tipo S.

Em relação aos NEOs membros dos dois grupos, Amor e Apollo, a diferença é que todos os tipos A são encontrados no primeiro e nenhum no segundo. Por outro lado, a fração de tipos D e outras classes é semelhante entre os dois grupos. No entanto, é importante ter em mente que estamos lidando com apenas 11 Apollo, e qualquer estatística pode estar prejudicada pelos pequenos números.

Cinco NEOs entre a amostra — 2020 TG3, 2021 KD1, 2021 MG1, 2021 PT6 e 2021 TV7 — têm um parâmetro de Tisserand com Júpiter, T_J , menor que 3 (ver Tabela 2.1). Uma vez que se considera que valores para T_J menores ou iguais a 3 correspondem a objetos em órbitas cometárias, esses objetos são particularmente interessantes. Entre estes, apenas um objeto, 2020 TG3, é classificado como do tipo Sq, não sendo, portanto consistente com material cometário. Um NEO, 2021 PT6, é classificado como tipo K, composição associada a meteoritos condritos carbonáceos, especialmente CO e CV (DE-

MEO *et al.*, 2022) e compatível com uma origem cometária. Dois objetos, 2021 KD1 e 2021 MG1, são classificados como D e um, 2021 TV7, como tipo B. Os tipos D são consistentes com uma origem cometária. Os tipos B também poderiam ser classificados erroneamente como tipos D na presença de uma coma de poeira como mostrado por RONDÓN-BRICEÑO *et al.* (2017) usando um modelo de refletância e provando que tal coma em torno de objetos do tipo D pode diminuir sua inclinação espectral, tornando-os compatíveis com o tipo C ou X. Um efeito semelhante dos espectros D para C e P foi encontrado em experimentos de laboratório de intemperismo espacial em condritos carbonáceos (LANTZ *et al.*, 2018, HASEGAWA *et al.*, 2022a) assim como em observações do espectro do asteroide (596) Scheila, que sofreu um impacto em 2010, e experimentou um aumento em sua inclinação espectral passando do tipo T para o tipo D (HASEGAWA *et al.*, 2022b). Se esse for o caso, o objeto 2021 TV7 também poderia ser do tipo D, aumentando a fração de NEOs desta classe em nossa amostra. Portanto, apenas um objeto entre os cinco NEOs observados não apresenta composição compatível com uma origem cometária. Em um trabalho recente SIMION *et al.* (2021) estudou uma grande amostra de NEOs com $T_J \leq 3.1$ e encontrou uma mistura de composições, desde silicatadas (S, A, Q) até carbonáceas (C, B) e um aumento na fração de objetos semelhantes a silicatos quando $T_J \geq 2,8$, que é o caso de todos os nossos NEOs com um parâmetro Tisserand joviano baixo.

Em comparação com outros trabalhos (por exemplo, NEOSHIELD2, MANOS, MITH-NEOS) nossa amostra apresenta uma fração menor de Q-, apenas dois, e nenhum tipo V. Esta discrepância pode dever-se ao pequeno tamanho da nossa amostra, ao pequeno tamanho dos nossos NEOs ou a um erro de classificação. No caso dos tipos V a pequena amostra é provavelmente a explicação, uma vez que sua fração é pequena, mesmo nos grandes *surveys*. Em relação ao tipo Q, uma classificação incorreta é possível, uma vez que nossos espectros têm um ruído maior em comprimentos de onda acima de $\sim 0,7 \mu\text{m}$, o que poderia levar a que mais objetos fossem classificados como S em vez de Q. No entanto, não podemos desconsiderar a possibilidade de que a menor fração do tipo Q em nossa amostra indique diferenças reais na distribuição taxonômica de acordo com o tamanho do objeto, como será discutido a seguir.

Quanto ao diâmetro equivalente nossa amostra tem um valor mediano de 210,19 m, sendo o menor objeto, 2020 RM6, com 25,0 m e o maior, 2021 MG1, com 1.428,82 m. Nas figuras 2.3, 2.5, 2.6a e 2.6b e mostramos a distribuição dos objetos observados em relação a vários parâmetros, também examinamos os valores medianos do ângulo de fase, diâmetro e taxa angular de mudança aparentes em RA e DEC encontrando valores semelhantes e nenhuma tendência entre os objetos das diferentes taxonomias.

2.5 Discussão e conclusões

É digno de nota mencionar que qualquer estudo comparativo entre populações de asteróides tem várias restrições. Em primeiro lugar a completeza. Como mencionado no primeiro capítulo, entre uma população esperada de milhões de pequenos objetos em nosso Sistema Solar, há uma limitação de completeza em sua descoberta e, em maior grau, em sua caracterização física. Outro problema é o bias observacional. Para qualquer levantamento é mais fácil observar objetos maiores e mais brilhantes. Apesar dessas limitações, algumas tendências na distribuição taxonômica da população de NEOs podem ser identificadas, conforme demonstrado por diversos trabalhos.

Por exemplo, PERNA *et al.* (2018) obteve espectros, na faixa visível, bem como a classificação taxonômica de 147 objetos com $H \geq 20$. Foi encontrada uma predominância de objetos do complexo S semelhante à do CP (Fig. 2.8). A fim de melhor restringir seus resultados, esses autores também realizaram uma comparação com os dados do *European Asteroid Research Node* (EARN) de propriedades físicas de NEOs (Fig. 2.9). A diferença mais significativa está entre os tipos A e D. Em PERNA *et al.* (2018) essas classes representam 5, 48 e 6, 85%, respectivamente, em comparação com uma amostra aleatória de 147 objetos do EARN (o mesmo tamanho da amostra dos autores), onde são representados na proporção de 0, 47 e 1, 38%. Ao comparar esta distribuição com a dos grandes NEOs e do Cinturão Principal, a abundância de tipos A, ricos em olivina, pode ter implicação no amplamente conhecido “missing olivine problem”, ou seja, escassez de objetos ricos em olivina. Além disso, o grande número de tipo D, muito raros entre os objetos do Cinturão Principal, pode ser devido, à natureza frágil desses corpos carbonáceos, o que favorece a sua fragmentação. Esta hipótese poderia indicar que pequenos objetos D no Cinturão à medida que se tornam NEOS se quebram em objetos ainda menores, resultando em uma população D maior entre os objetos próximos à Terra. PERNA *et al.* (2018) destacam que esse resultado pode implicar numa maior relevância dessa população no envio de material orgânico para a Terra em seus estágios iniciais.

Por outro lado, BINZEL *et al.* (2019) reportaram propriedades espectrais para mais de 1.000 NEOs e 300 MCs observando que todas as classes taxonômicas reconhecidas no Cinturão Principal são identificadas entre os NEOs (Fig. 2.7). No cinturão interno, o complexo S domina sendo $\sim 50\%$ da amostra, enquanto os tipos B e C são cerca de 15%. De toda a amostra, os tipos D representam $\sim 3\%$, os tipos X $\sim 10\%$, os tipos V $\sim 5\%$ e os tipos Q $\sim 5 - 10\%$. Os resultados de BINZEL *et al.* (2019) também indicam compatibilidade entre a população NEO em geral e o subconjunto de PHAs. No entanto, BINZEL *et al.* (2019) enfatiza que seus dados e análises estão limitados devido ao diâmetro mediano da amostra, com apenas 10% sendo de objetos menores que 150m.

POPESCU *et al.* (2019) obtiveram o espectro de 76 NEOs com tamanhos na faixa de $\sim 0.25 - 5.5$ km. Os autores encontraram concordância com resultados anteriores, onde \sim

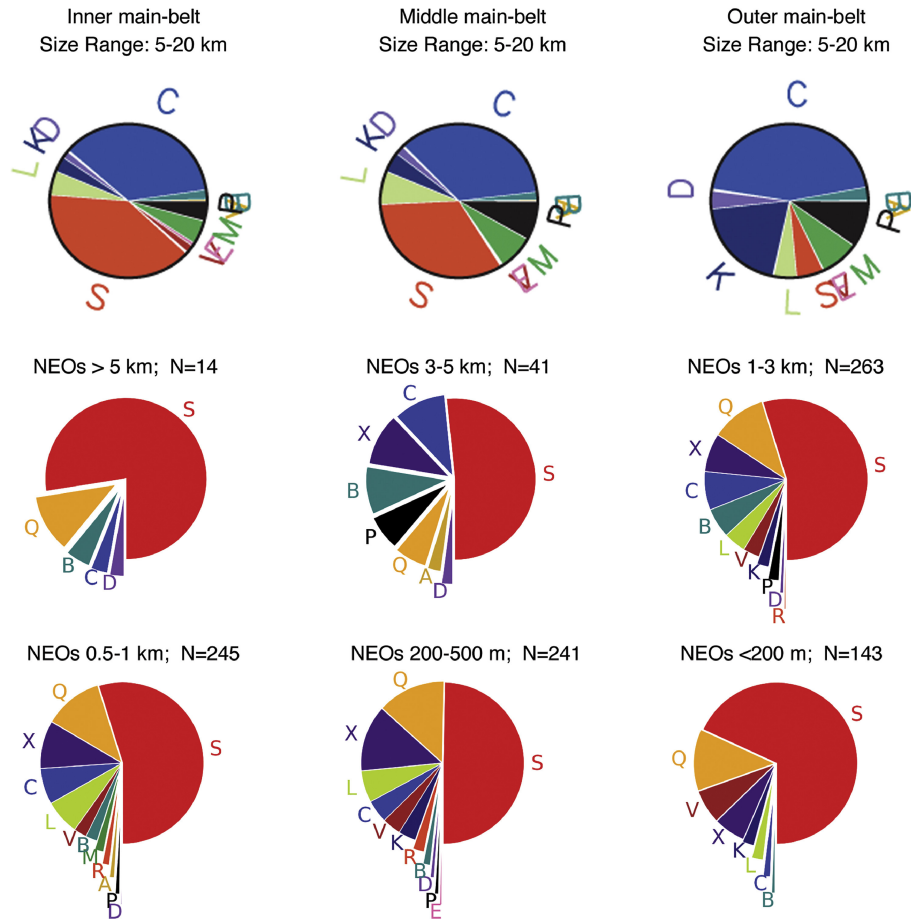


Figura 2.7: Distribuição de massa da população dos NEOS comparada com a faixa de menor tamanho dentro do MB. A concordância da distribuição taxonômica dos NEOs com o MB interno e médio indica a parte interna do MB como a fonte dominante para a população NEO. Figura retirada de BINZEL *et al.* (2019).

58% dos objetos pertencem ao complexo Q/S, $\sim 21\%$ ao complexo B/C e cerca de $\sim 10\%$ a diversas classes (Fig. 2.10). Essas porcentagens coincidem com as do Cinturão Principal interno, conforme descrito por GRADIE e TEDESCO (1982) e DEMEO e CARRY (2014). Só um pequeno número de tipos V e B foi encontrado, bem como apenas dois tipos A e nenhum tipo D.

Mais recentemente, IEVA *et al.* (2020) obtiveram a classificação taxonômica de 51 “small” NEOs usando observações fotométricas. Esses resultados, junto com dados coletados da literatura, foram então analisados chegando a uma amostra de 1.081 NEOs (Fig. 2.11). A principal conclusão foi de que, embora a maioria dos objetos pertença ao complexo S, há uma fração maior de tipo C e A entre os NEOS com diâmetros menores.

No trabalho de MARSSET *et al.* (2022) são apresentados espectros no infravermelho próximo de uma amostra de 420 objetos obtidos pelo *MIT-Hawaii Near-Earth Object Spectroscopic Survey* (MITHNEOS). Este conjunto de dados, combinado com dados da literatura, foi então usado para estudar a distribuição taxonômica da população de *debiased* NEOs e compará-la com a de regiões do Cinturão Principal fontes de NEOs. Uma con-

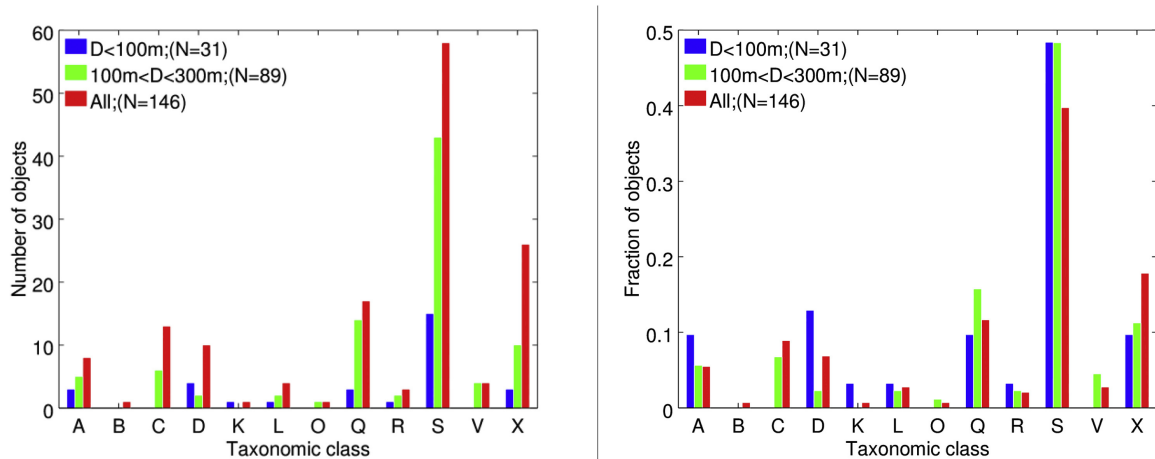


Figura 2.8: Distribuição taxonômica dos NEOs observados por PERNA *et al.* (2018) em números absolutos (esquerda) e porcentagens relativas (direita). As distribuições para objetos menores que 100 m e para objetos na faixa de 100 – 300 m são mostradas separadamente. Figura retirada de PERNA *et al.* (2018).

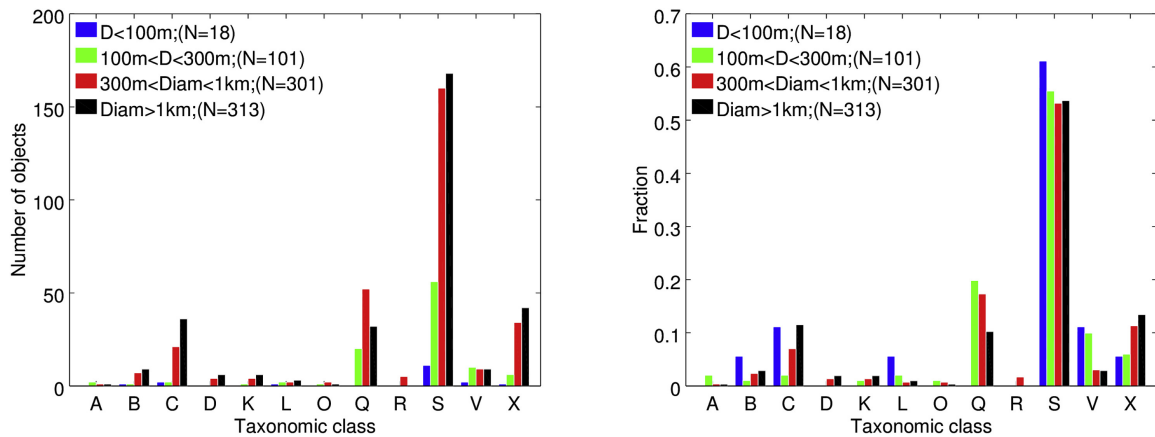


Figura 2.9: Distribuição taxonômica dos NEOs do EARN em números absolutos (esquerda) e porcentagens relativas (direita). Figura retirada de PERNA *et al.* (2018).

clusão que merece destaque foi que a distribuição observada entre os NEOs é compatível com a de suas regiões de origem e não há grandes desvios entre as populações “grandes” e “pequenas”. No entanto, a maioria do conjunto observado de NEOs tem uma magnitude absoluta menor do que 20, com uma fração muito pequena com H maior que 22,5 (Figura 2.12). MARSSET *et al.* (2022) também observaram uma superabundância de objetos tipo D entre os NEOs, em acordo com PERNA *et al.* (2018), bem como uma escassez de tipos V provenientes da ressonância μ_6 . Para explicar tal superabundância observada de tipo D entre os NEOs foram apresentadas algumas hipóteses: primeiro a presença de uma grande população não observada de tipo D de pequeno diâmetro no Cinturão Principal, segundo o efeito do *space weathering* (LANTZ *et al.*, 2018, HASEGAWA *et al.*, 2022a) transformando os tipo C ou P em tipo D-, e o fato do tipo D na região NEO ser mais frágil ou quebradiço (PERNA *et al.*, 2018). Embora o seu tamanho menor possa torná-los mais difíceis de estudar, a sua proximidade com a Terra no momento da sua observação per-

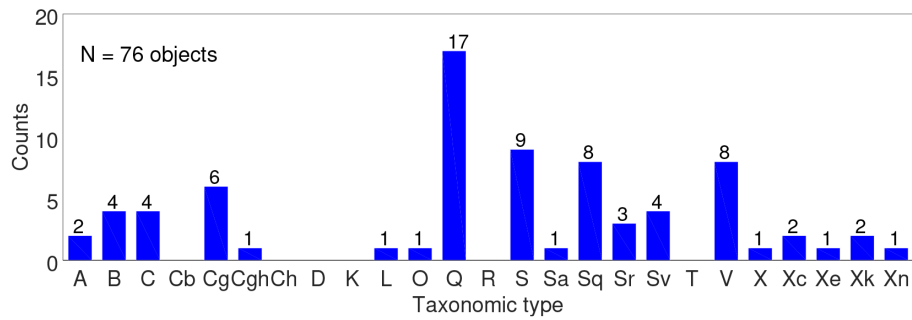


Figura 2.10: Histograma de classes taxonômicas para 76 NEAs observados por POPESCU *et al.* (2019). Figura retirada de POPESCU *et al.* (2019).

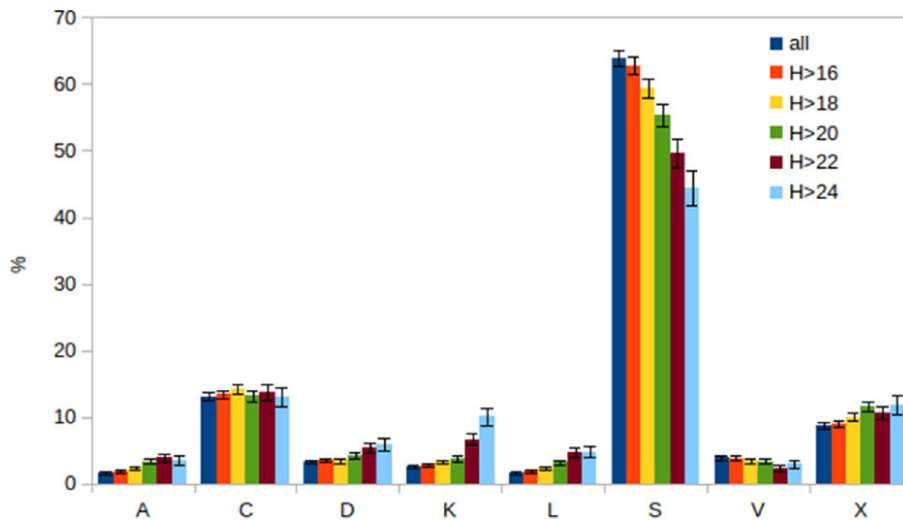


Figura 2.11: Distribuição percentual de complexos taxonômicos e classes do levantamento de IEVA *et al.* (2020), juntamente com dados coletados de PERNA *et al.* (2018), DEVOGÉLE *et al.* (2019), e a campanha MITHNEOS BINZEL *et al.* (2019), mostrada de acordo com um limite H. Figura retirada de IEVA *et al.* (2020).

mite que sejam estudados. Como mostrado por RONDÓN-BRICEÑO *et al.* (2017) outra possível explicação poderia ser a presença de uma coma de poeira fina. Vale ressaltar que em nosso conjunto de dados, cinco NEOs possuem parâmetro de Tisserand menor que 3, o que é indicativo de origem cometária, e quatro possuem espectros compatíveis com tal origem de acordo com trabalhos anteriores como SIMION *et al.* (2021).

Os resultados obtidos em uma amostra de 43 pequenos NEOS, com diâmetro médio entre 200 e 400 m, confirmam os obtidos anteriormente por PERNA *et al.* (2018) e IEVA *et al.* (2020), tendendo a indicar diferenças significativas na distribuição taxonômica de acordo com o tamanho. Note-se que um resultado semelhante para o Cinturão Principal já foi obtido por DEMEO e CARRY (2014), mostrando que a distribuição da composição muda com os tamanhos dos corpos (Fig. 2.13). Mais importante, os objetos menores apresentam uma maior diversificação taxonômica do que os maiores. No entanto, no caso do Cinturão Principal os menores objetos observados estão na faixa de 5 a 10 km, enquanto os NEOs, especialmente os amostrados no presente trabalho, são de cerca de 200

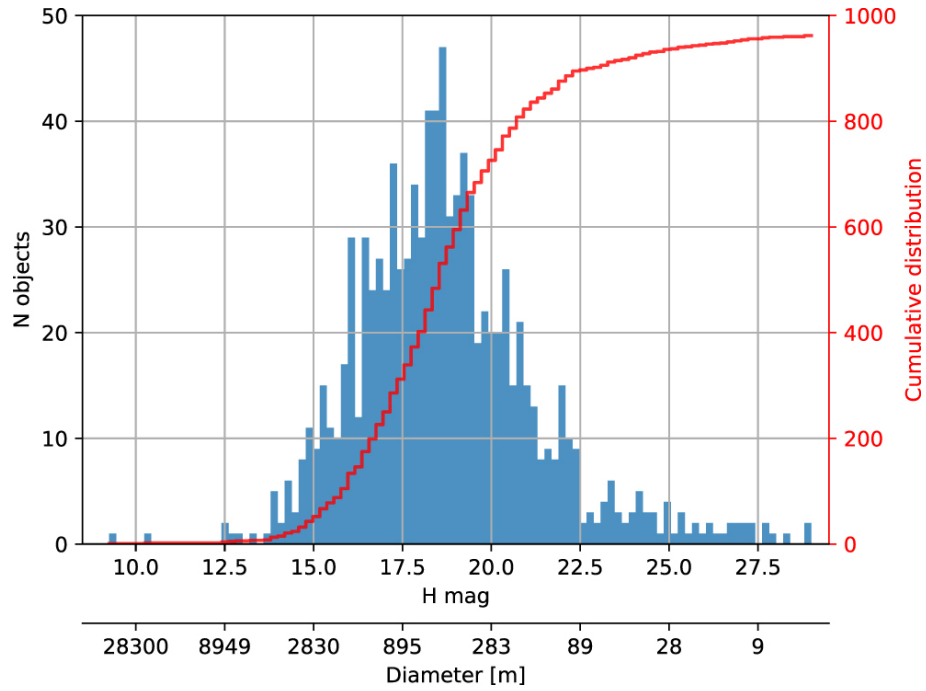


Figura 2.12: Histograma de magnitude absoluta e diâmetro do conjunto de dados MITH-NEOS de 976 NEOs. Os valores de H foram convertidos em diâmetros usando o albedo médio medido $p_v = 0,22$ do conjunto de dados. Figura retirada de MARSSET *et al.* (2022).

m. Esta pode ser a razão para encontrar uma alta porcentagem de objetos raros (difícil de detectar e observar) no Cinturão Principal. Vale ressaltar que um comportamento semelhante foi obtido recentemente por ARCOVERDE *et al.* (2023) ao tentar usar curvas de fase para derivar a classificação taxonômica dos NEOs. Verificou-se que mesmo entre os asteróides do Cinturão Principal, a distribuição dos parâmetros da curva de fase muda com o tamanho dos objetos e que, no caso de corpos pequenos, não é possível derivar a classificação taxonômica de suas curvas de fase.

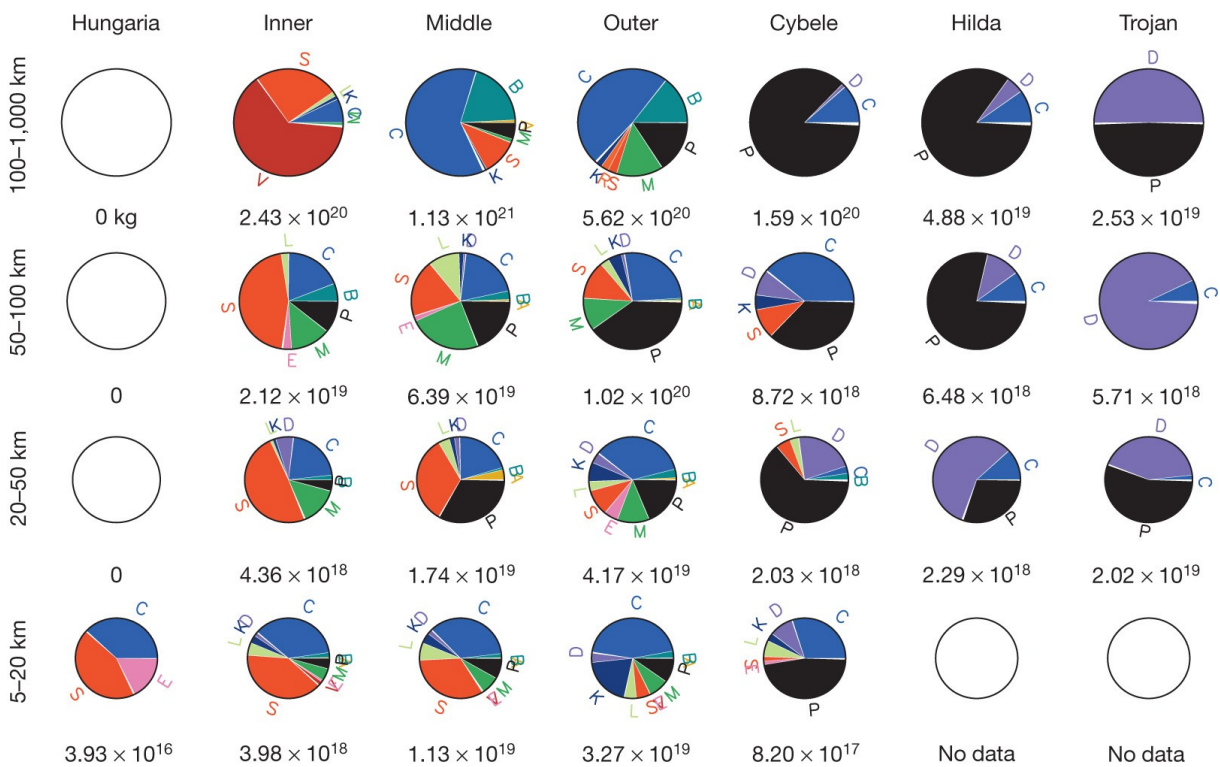


Figura 2.13: Distribuição de massa calculada para cada objeto com diâmetro igual ou superior a 50 km, utilizando seu albedo para determinar o tamanho e a densidade média (DEMEO e CARRY, 2013) para cada classe taxonômica. Figura retirada de DEMEO e CARRY (2014).

Capítulo 3

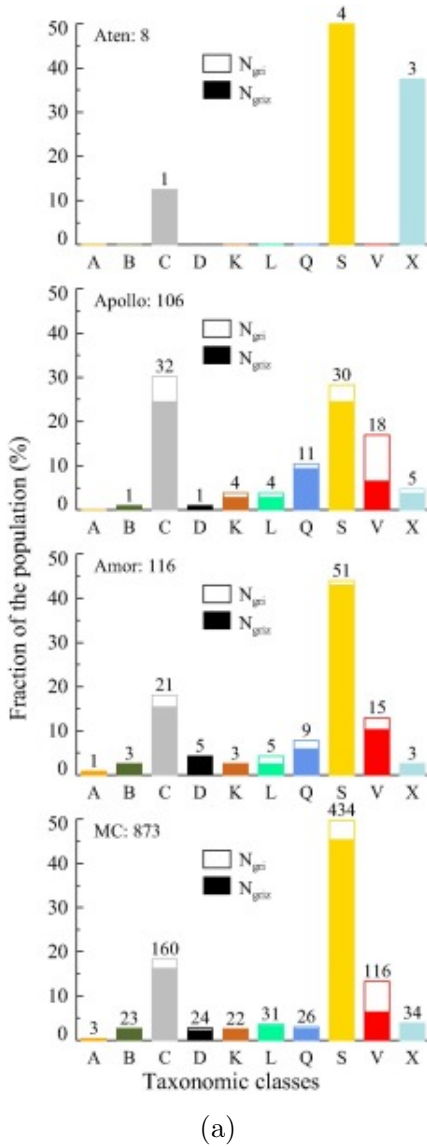
Mars-crossers (MCs)

Assim como a população de NEOs, o estudo dos Mars-crossers têm sido reconhecido como de grande importância para compreender melhor as condições e fases iniciais da evolução planetária. NEOs e MCs são considerados os corpos progenitores do constante fluxo de material que impacta a superfície dos planetas terrestres. Portanto, a caracterização física desses corpos é fundamental para o desenvolvimento de modelos que descrevem sua evolução orbital, incluindo efeitos não gravitacionais, como o efeito YORP e Yarkovsky (BINZEL *et al.*, 2015). Além disso, o estudo dos parâmetros físicos dos MCs pode ser combinado a estudos dinâmicos (MIGLIORINI *et al.*, 1998, MICHEL *et al.*, 2000, MORBIDELLI *et al.*, 2002a, GRANVIK *et al.*, 2016) visando identificar suas regiões de origem no Cinturão de Asteroides.

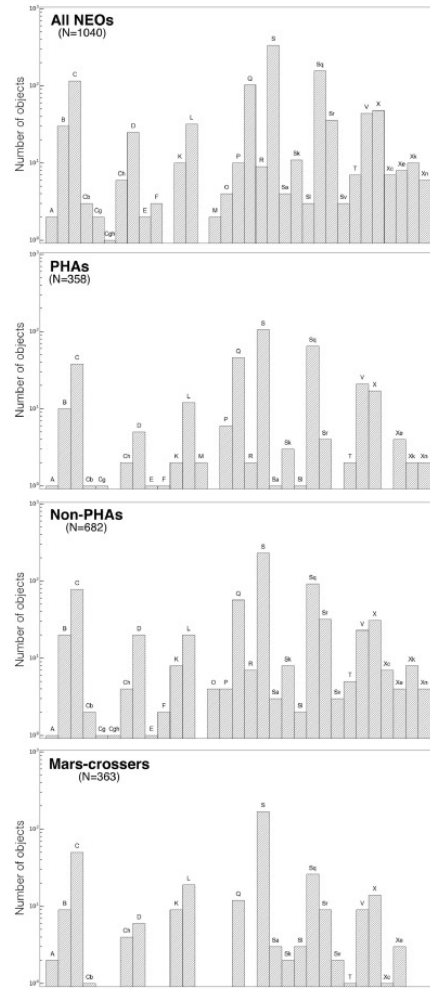
Devido ao fato dos MCs estarem mais distantes da Terra do que os NEOs e, portanto, serem alvos menos acessíveis para observação, eles têm recebido menos atenção em termos de estudos. Isto se reflete no fato de que, até o momento, não existe uma estimativa precisa do tamanho desta população. Assim como os NEOs, apenas uma pequena fração dos mais de 25.000 MCs descobertos até agora teve seus parâmetros físicos deduzidos.

Dentre os trabalhos dedicados ao estudo desta população, podemos mencionar os seguintes: LAZZARO *et al.* (2004), DE LEÓN *et al.* (2010), SANCHEZ *et al.* (2013), CARRY *et al.* (2016b), ALÍ-LAGOA e DELBO' (2017), BINZEL *et al.* (2019), WLODARCZYK (2021). Os trabalhos de ALÍ-LAGOA e DELBO' (2017) e CARRY *et al.* (2016b) concentraram seus esforços na caracterização de uma grande amostra utilizando fotometria, ou seja, dados do WISE/NEOWISE e imagens SDSS respectivamente. O primeiro trabalho visou fornecer diâmetros e albedos enquanto o segundo a classificação taxonômica. Em BINZEL *et al.* (2019) são apresentados e analisados espectros de mais de mil NEOs e MCs, mostrando que, embora haja uma diversidade maior na distribuição taxonômica entre NEOs do que entre os MCs, todas as classes encontradas, entre os cruzadores de Marte também são encontradas entre os objetos próximos à Terra (Figura 3.1). Tal constatação indica a importância do estudo comparativo de estas populações.

Para investigar a população MC com mais detalhes, realizamos a caracterização foto-



(a)



(b)

Figura 3.1: Distribuição para tipos taxonômicos encontrados na população NEO e MC. Figuras retirada de CARRY *et al.* (2016b) (a) e BINZEL *et al.* (2019)(b).

métrica de uma amostra de objetos que não possuíam propriedades físicas relatadas na literatura e eram visíveis a partir do Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica - OASI. Desde 2011, o OASI (código MPC Y28, DE PRA *et al.* (2013)) vem operando uma campanha observacional contínua visando a caracterização de uma grande amostra de NEOs, objetos do Cinturão Principal e outros pequenos corpos (RONDÓN *et al.*, 2020). O presente programa observacional foi desenvolvido ao longo de 2020, 2021 e 2022 e foi executado pela equipe de observadores do projeto IMPACTON.

Na seção a seguir são descritas as principais características do telescópio OASI, utilizado em nosso estudo, e a seleção dos alvos. Na seção 3.2 é dada a metodologia seguida para derivar os parâmetros físicos. Apresentamos nossos resultados na seção 3.3 os quais são então discutidos na seção 3.4.

3.1 Observações e amostra

Localizado no município de Itacuruba-PE na região do semiárido brasileiro, o Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica (OASI) do projeto Iniciativa de Mapeamento e Pesquisa de Asteroides nas Cercanias da Terra no Observatório Nacional (IMPACTON) conta com um telescópio com um espelho principal de 1,0 m de diâmetro, sendo a montagem do tipo alto-azimutal e o sistema óptico um Cassegrain clássico. A câmera CCD disponível é o modelo PL4240 de 2048 x 2048 pixels, com pixels de 13,5 x 13,5 μm . O telescópio tem acoplada uma roda de filtros, através da qual os filtros B, V, R e I do sistema de Johnson e os filtros u' , g' , r' , i' , z' do sistema SDSS estão disponíveis (RONDÓN *et al.*, 2020). O telescópio tem uma precisão do apontamento $< 12''$ RMS para altitudes $> 20^\circ$ e precisão de guiagem $< 0.6''$ RMS em 5 minutos. O OASI tem o código Y28, Nova Itacuruba, do *Minor Planet Center* (DE PRA *et al.*, 2013).



Figura 3.2: Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica - OASI. Fotografia: Site IMPACTON (<http://impacton.on.br/>).

Para obter a nossa amostra, procuramos objetos que fossem observáveis a partir do sítio OASI, durante vários meses e cuja magnitude visual não excedesse 18 mag, para obter uma boa relação sinal-ruído. Após termos uma lista preliminar de objetos, buscamos esses objetos na literatura para confirmar quais parâmetros físicos foram determinados para cada objeto, pois nosso objetivo foi obter a maior quantidade de parâmetros físicos. Para atingir este objetivo, foram utilizadas várias ferramentas disponibilizadas pelo Minor Planet Center e JPL entre outros. Uma vez os objetos selecionados, seus parâmetros de observação junto com outros dados foram reportados ao coordenador de observações do projeto IMPACTON o qual atribuiu tempo de observação durante as campanhas mensais.

Tabela 3.1: Principais elementos orbitais dos MCs selecionados. Elementos orbitais na época 2459396,5 (2021-Jul-01.0) e magnitude absoluta. Fonte: JPL Small-Body Database.

Número	Nome	e	a [UA]	q [UA]	i [°]	H [mag]
7870	1987 UP2	0,272580	2,241726	1,630676	3,502977	13,85
18284	Tsereteli	0,251621	2,209119	1,653257	4,282918	14,83
19877	9086 P-L	0,310517	2,231043	1,538267	4,863131	16,79
20786	2000 RG62	0,245416	2,196715	1,657604	6,856612	14,76
20958	A900 MA	0,295830	2,328981	1,639999	8,161311	14,48
27995	1997 WL2	0,272655	2,122544	1,543821	3,461885	15,13
46780	1998 HH52	0,238192	2,155181	1,641834	7,118684	14,58
47834	2000 EN114	0,313224	2,382427	1,636193	23,637173	13,83
49952	1999 XH212	0,232555	2,162720	1,659769	3,645507	15,74
61343	2000 PC5	0,268023	2,247402	1,645046	9,116713	15,58
66294	1999 JS27	0,337646	2,433448	1,611802	1,150598	15,54
93751	2000 WH1	0,319289	2,368697	1,612397	25,685917	15,22
106848	2000 YP16	0,331713	2,020910	1,350548	3,329504	16,88
133090	2003 MS9	0,383603	2,347682	1,447103	2,304630	16,05
307162	2002 DM9	0,420746	2,779022	1,609760	28,697452	14,16
351068	2003 TS13	0,394092	2,617823	1,586159	7,895640	16,04

Na tabela 3.1 listamos o número e nome dos objetos selecionados juntamente com seus elementos orbitais, semieixo maior, a , excentricidade, e , inclinação, i , distância periélio, q , bem como sua magnitude H . Na Fig. 3.3 é mostrada a localização da nossa amostra no espaço semieixo maior versus excentricidade.

3.2 Aquisição e redução de dados - Metodologia

A obtenção de dados foi realizada durante as campanhas mensais de observação ao longo dos anos de 2020, 2021 e 2022 no OASI. Todos os meses foram propostos um ou dois objetos a serem observados e foram fornecidos ao coordenador de observação que atribuiu um horário durante as noites da campanha. Obviamente, como em qualquer programa de observação, ficamos sempre limitados pelo clima e pelo desempenho do telescópio. Cada vez que propusemos um alvo, solicitamos que ele fosse observado com diversas técnicas para obter o máximo de parâmetros físicos, em particular:

- Para o período de rotação, planejamos observar o objeto no filtro R (sistema Johnson), já que é o padrão de observações fotométricas para o período, por várias horas contínuas durante dias consecutivos com o telescópio no rastreamento sideral.
- Para o espectro fotométrico, são obtidas imagens do objeto selecionado e de uma estrela de comparação no sistema *Sloan Digital Survey* (SDSS) usando os filtros

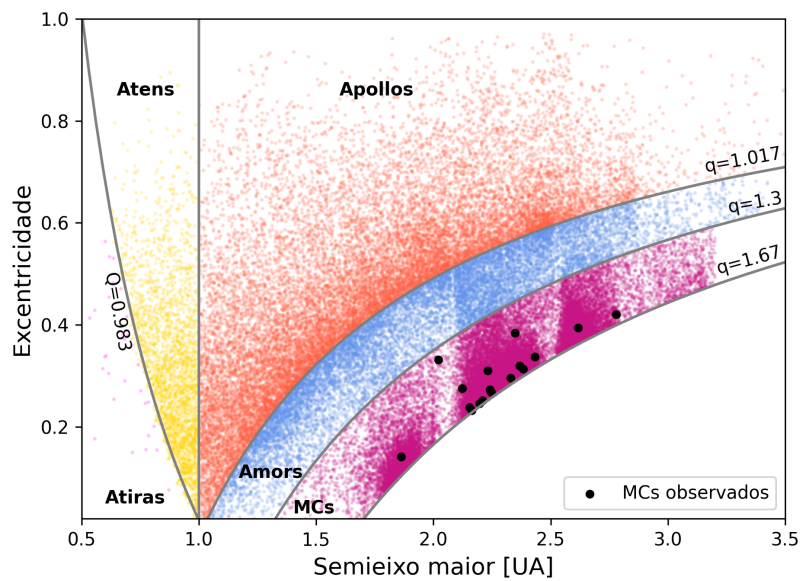


Figura 3.3: Distribuição, no espaço semieixo maior versus excentricidade, dos MCs observados. Fonte: JPL Small-Body Database Query.

g'r'i'z'. Geralmente, algumas imagens em diferentes massas de ar são suficientes.

- Para curva de fase, são obtidas imagens do MC selecionado e de uma estrela de comparação (do catálogo *Landolt*) nos filtros R e V do sistema Johnson.

Para obter a curva de fase e o espectro fotométrico, o telescópio poderia estar em rastreamento sideral, a menos que o movimento relativo do objeto contra o céu fosse muito alto; neste caso, mudamos para rastreamento não sideral, para manter a maior parte do sinal do objeto dentro da abertura enquanto faz a fotometria. Para os três tipos de observação descritos acima, adquirimos imagens de calibração (*bias*, *flat* e *dark*). Após a aquisição das imagens, foram utilizados pacotes do software **IRAF**, *scripts* implementados em **PYTHON** e o *software* **MPO CANOPUS** para reduzir os dados. Sempre que possível, recorreremos também ao *pipeline* do projeto IMPACTON. O processo de redução incluiu:

- a subtração de *dark* (*darkcombine* e *ccdproc*) e correção por *flat* (*flatcombine* e *ccdproc*),

No tratamento de imagens visando obter o período de rotação, após as correções por *Dark* e *Flat*, utilizamos o software **MPO CANOPUS**, desenvolvido para obter a magnitude diferencial do asteroide em cada imagem, o processo neste software é bastante *user friendly* e provou ser confiável.

Por outro lado, quando tratamos imagens para obter o espectro fotométrico, após as correções básicas utilizamos tanto o *pipeline* do grupo IMPACTON quanto o **MPO**

CANOPUS para obter a magnitude instrumental do asteroide e da(s) estrela(s) do catálogo. Uma vez obtidas estas primeiras magnitudes, transformamos então em magnitudes calibradas e cores para cada filtro SDSS.

Finalmente, para obter as magnitudes reduzidas da curva de fase, após a correção por *Dark* e *Flat*, utilizamos o *pipeline* **IMPACTON** e o **MPO CANOPUS** para obter as magnitudes instrumentais e alguns *scripts* em **PYTHON** para calcular a magnitude calibrada e reduzida.

Após o processo de fotometria procedeu-se à obtenção das propriedades físicas. Primeiramente tratamos a fotometria diferencial e a curva de luz obtida. A curva de luz de um objeto é como seu brilho varia ao longo do tempo. No caso dos asteroides, assume-se que esta variação se deva principalmente à sua rotação. O período de rotação e a amplitude podem ser obtidos ajustando a curva de luz a uma série de Fourier (HARRIS *et al.*, 1989), conforme dado na equação 3.1, onde α é o ângulo de fase solar, ϕ é o ângulo de fase rotacional, $V(\phi)$ é a magnitude calculada em um ângulo de fase α e t , A_l e B_l são os coeficientes de Fourier, P é o período de rotação e t_0 é o tempo do ponto zero das observações:

$$V(\phi) = A_0 + \sum_{l=1}^n [A_l \sin(2\pi l \phi) + B_l \cos(2\pi l \phi)]; \quad (3.1)$$

$$\phi = \left(\frac{t - t_0}{P} \right)$$

Os períodos e curvas de luz apresentados neste trabalho foram obtidos utilizando o **MPO CANOPUS**.

Por outro lado, a curva da fase mostra como o brilho de um asteroide varia com a mudança da iluminação solar em relação ao observador. É conhecido que esta curva exhibe um aumento acentuado em pequenos ângulos de fase denominado de *opposition surge* e um comportamento linear em grandes ângulos de fase. Este comportamento não linear é atribuído a dois fenômenos: *shadow-hiding* e *coherent backscattering* (HAPKE, 1990, 1993, 2002).

O sistema fotométrico, denominado modelo $H - G1 - G2$ (MUINONEN *et al.*, 2010), adotado pela IAU em 2012 modela a curva de fase sendo expresso pela equação 3.2, onde $H(\alpha)$ é a magnitude reduzida de um objeto localizado a 1 UA do Sol e da Terra, H_0 a magnitude absoluta e $G1$ e $G2$ os parâmetros de inclinação. A magnitude absoluta é definida como o brilho de um asteroide a 1 UA do Sol e da Terra em $\alpha = 0^\circ$. Os parâmetros de inclinação $G1$ e $G2$ descrevem a forma da curva de fase e estão relacionados ao albedo da superfície. O modelo, expresso pela equação 3.2, é ajustada aos dados pelo método dos mínimos quadrados:

$$\begin{aligned}
H(\alpha) &= H_0 - 2.5 \log[G1\Phi_1(\alpha) + G2\Phi_2(\alpha) + (1 - G1 - G2)\Phi_3(\alpha)], \\
\Phi_1(\alpha) &= 1 - \frac{6\alpha}{\pi}, \\
\Phi_2(\alpha) &= 1 - \frac{8\alpha}{\pi}, \\
\Phi_3(\alpha) &= \exp(-4\pi \tan^{2/3}(\frac{\alpha}{2}))
\end{aligned} \tag{3.2}$$

onde H_0 , $G1$ e $G2$ são os parâmetros do modelo, as funções Φ_1 e Φ_2 estão relacionadas à parte linear da curva de fase enquanto Φ_3 está associado ao efeito de oposição (essas funções são dadas para $\alpha < 30^\circ$). Este modelo está implementado on-line no *Online calculator for H, G1, G2 photometric system*¹ e os resultados mostrados abaixo foram obtidos utilizando esta ferramenta.

Por último, o espectro fotométrico mostra como a refletância varia com o comprimento de onda, que está diretamente relacionado à composição da superfície do objeto. Para derivar o espectro dos MCs observados, o primeiro passo foi transformar as medidas de cor $(m_g - m_r)_A$, $(m_r - m_i)_A$ and $(m_r - m_z)_A$ no sistema SDSS normalizando o fluxo para o filtro r e removendo as cores solares $(m_g - m_r)_\odot$, $(m_r - m_i)_\odot$ e $(m_r - m_z)_\odot$ ² (equação 3.3). Este é o mesmo procedimento utilizado por CARVANO, J. M. *et al.* (2010) para derivar um esquema para a classificação de asteroides do catálogo SLOAN-MOC4 na taxonomia de Bus, e produzindo modelos para as classes identificadas. Assim, comparamos cada um dos nossos espectros com esses modelos e derivamos a classificação taxonômica dos MC, usando o melhor ajuste qui-quadrado (χ^2):

$$\begin{aligned}
f_x &= \frac{\left(\frac{f_x}{f_r}\right)_A}{\left(\frac{f_x}{f_r}\right)_\odot} = 10^{-0.4C_{x-r}}, \\
C_{x-r} &= (m_x - m_r)_A - (m_x - m_r)_\odot
\end{aligned} \tag{3.3}$$

Ao fazer a transformação de magnitude instrumental para reduzida, no caso das curvas de fase, e de cores e refletâncias, para o caso do espectro fotométrico, calculamos o erro por propagação da incerteza. Por fim, para calcular o diâmetro utilizamos a equação 3.4 (HARRIS e LAGERROS, 2002) onde o albedo visual é obtido diretamente da literatura ou inferido a partir dos valores médios da classe taxonômica do objeto dados por MAINZER *et al.* (2011):

$$\bar{D} = \frac{1.340 * 10^{-\frac{1}{5}(H_{0R}+V-R)}}{\sqrt{P_v}} \tag{3.4}$$

Na próxima seção descrevemos, para cada objeto, as propriedades físicas obtidas.

¹<https://psr.it.helsinki.fi/HG1G2/>

²<http://www.sdss.org/dr12/algorithms/ugrizvegasun/>

3.3 Resultados

Derivamos propriedades fotométricas para 16 MCs, ou seja, (7870) 1987 UP2, (18284) Tsereteli, (19877) 9086 PL, (20786) 2000 RG62, (20958) A900 MA, (27995) 1997 WL2, (46780) 1998 HH52, (47834) 2000 EN114, (49952) 1999 XH212, (49952) 1999 02 DM9 e (351068) 2003 TS13. A seguir são apresentados os resultados para cada objeto separadamente.

Para cada objeto são descritas as propriedades físicas derivadas. Quando derivamos o período de rotação, mostramos a curva de luz junto com o melhor ajuste de Fourier aos nossos dados. No caso do espectro fotométrico mostramos as magnitudes observadas, convertidas em refletância, normalizadas no filtro r, indicadas por pontos pretos com barras de erro correspondentes conectadas pela linha preta, enquanto os modelos da classificação taxonômica de CARVANO, J. M. *et al.* (2010) com menor valor qui-quadrado (χ^2) pela linha tracejada vermelha e/ou azul. Por fim, para a curva de fase mostramos o gráfico das magnitudes obtidas e seu melhor ajuste. Todas as circunstâncias observacionais são apresentadas no Apêndice A, Tabelas A.3, A.4 e A.5, enquanto as propriedades físicas obtidas estão resumidas na Tabela 3.2.

3.3.1 (7870) 1987 UP2

Observações fotométricas do objeto (7870) 1987 UP2, foram realizadas no OASI entre Janeiro e Março de 2022, com o objetivo de construir sua curva de fase. Tais observações permitiram obter magnitudes em ângulos de fase variando de $2,7^\circ$ a $13,9^\circ$. A curva de fase dada na figura 3.4 apresenta um comportamento completamente linear, sem efeito de oposição. As oscilações das magnitudes em torno do ajuste pode ser consequência de uma grande amplitude de curva de luz, indicativo de uma forma alongada do corpo. Para corrigir tal efeito, as magnitudes fotométricas precisam ser corrigidas pela rotação. Entretanto, como não foi possível obter a curva de luz nem o período de rotação, utilizamos os dados disponíveis para encontrar o melhor ajuste à curva de fase. A magnitude absoluta derivada e os parâmetros de inclinação para este objeto são: $H_{0R} = 13,908 \pm 0,053$, $G1 = 0,240 \pm 0,000$ e $G2 = 0,759 \pm 0,064$.

Também, calculamos um diâmetro $\bar{D} = 3,310$ km usando a equação (3.4) com a magnitude absoluta acima deduzida e um albedo visual $p_V = 0,288 \pm 0,115$, dado por ALÍ-LAGO e DELBO' (2017).

3.3.2 (18284) Tsereteli

O espectro fotométrico deste objeto foi obtido a partir de observações realizadas em 5 de abril de 2022 e é dado na Figura 3.5a. O teste do qui-quadrado (χ^2), aplicado aos modelos do esquema taxonômico de CARVANO, J. M. *et al.* (2010), indica que o tipo D se ajusta

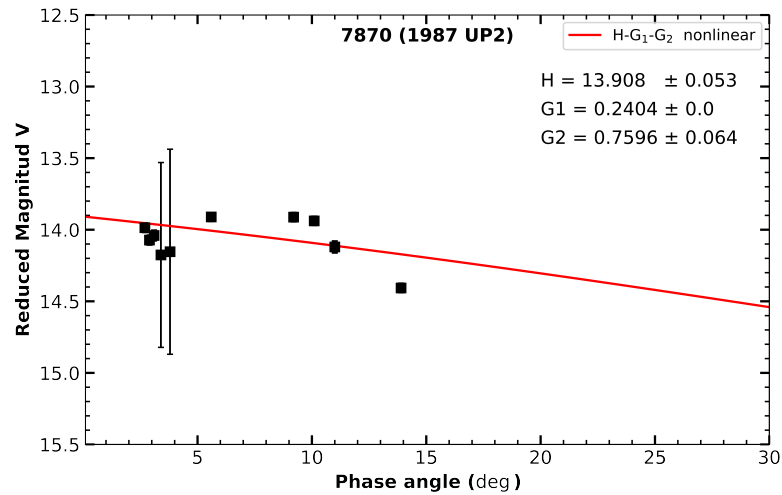


Figura 3.4: Curva de fase do objeto (7870) 1987 UP2.

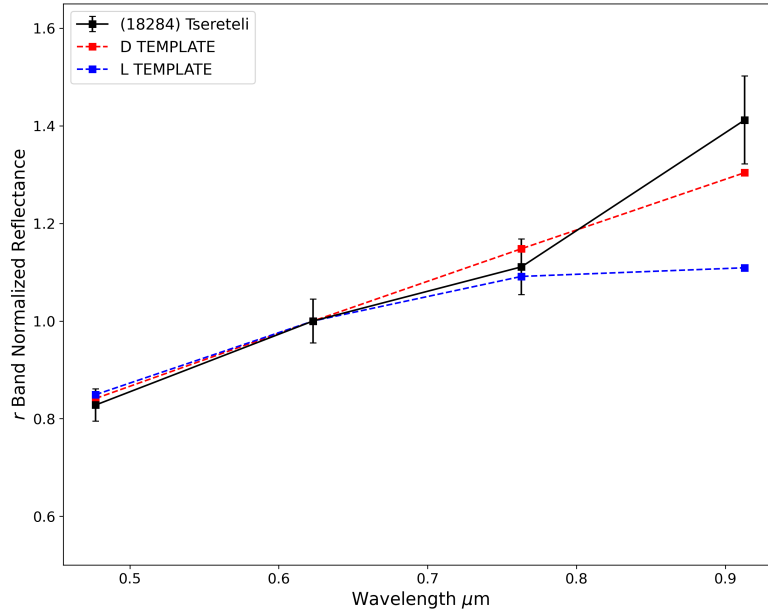
melhor ao espectro ($\chi^2 = 0,010$). A Figura 3.5a também mostra o segundo menor valor de χ^2 correspondente ao tipo L ($\chi^2 = 0,083$). Ressalta-se o grande erro no filtro z , o que pode introduzir incerteza na classificação sendo, portanto, necessárias novas observações para confirmar a classificação obtida. Não há outra classificação taxonômica relatada na literatura para este objeto.

Por outro lado, para a curva de fase realizamos observações entre março e abril de 2022, a fim de obter magnitudes em ângulos de fase variando de $2,3^\circ$ a $3,6^\circ$ como pode ser visto na Fig. 3.5b. As magnitudes estão em um curto intervalo de ângulo de fase não permitindo obter uma curva mais completa. Todas as observações estão próximas da oposição, mas faltam informações além de 20° . (18284) Tsereteli é um bom alvo para observações futuras para obter uma curva mais densa e um melhor ajuste. A magnitude absoluta derivada e os parâmetros de inclinação para este objeto são: $H_{0R} = 14,523 \pm 0,059$, $G1 = 0,834 \pm 0,028$ e $G2 = 0,064 \pm 0,050$.

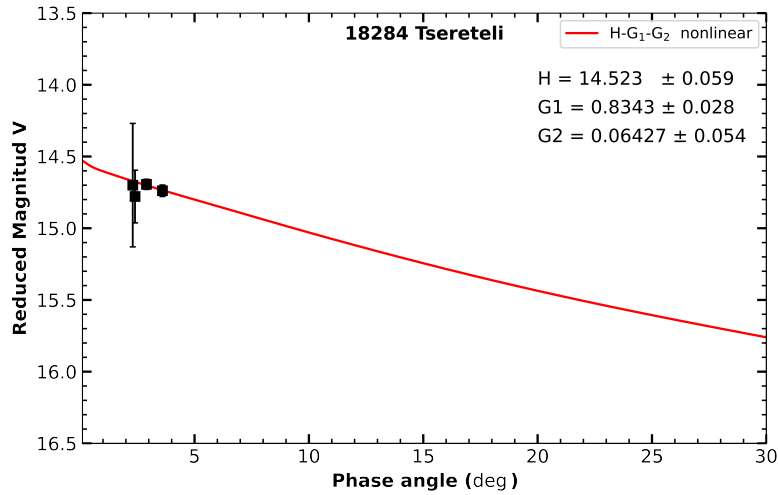
Finalmente, calculamos o diâmetro $\bar{D} = 6,158$ km (equação 3.4) com a magnitude absoluta acima obtida e um albedo visual $p_V = 0,048 \pm 0,025$, dado em MAINZER *et al.* (2011), correspondente ao valor médio da classe taxonômica D.

3.3.3 (19877) 9086 P-L

Foi possível obter espectros do objeto (19877) 9086 P-L em setembro 23 e 25 de 2020, apresentados nas Figuras 3.6a e 3.6b. Ao classificar taxonomicamente o objeto, para o primeiro dia de observação, obtivemos os menores valores de χ^2 para as classes Q ($\chi^2 = 0,010$) e O ($\chi^2 = 0,019$). Ao classificar o espectro do segundo dia, notamos um erro muito alto na magnitude do filtro z e, portanto, decidiu-se excluir esta magnitude e traçar as classes Q e O obtidas do primeiro espectro e plotá-las ao longo das magnitudes restantes do segundo espectro. Com uma simples inspeção visual pode se notar que ambas



(a) Espectro fotométrico.

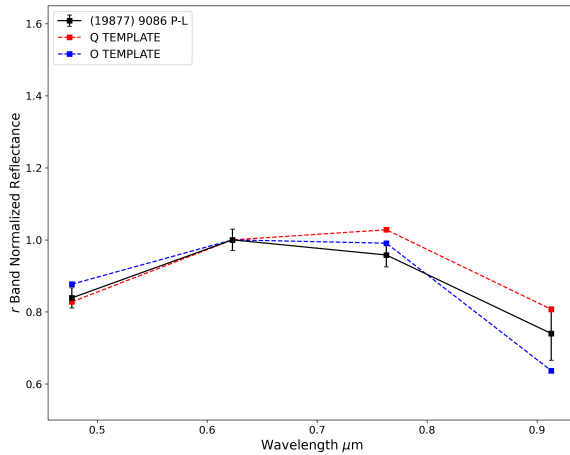


(b) Curva de fase.

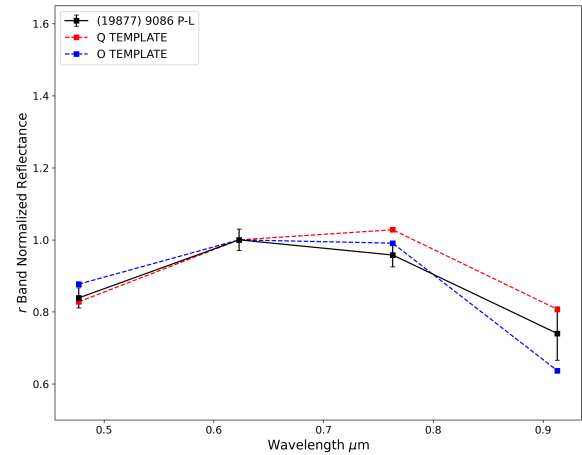
Figura 3.5: (18284) Tsereteli.

classes mostram um bom acordo. Não foi encontrada outra classificação taxonômica na literatura para (19877) 9086 P-L.

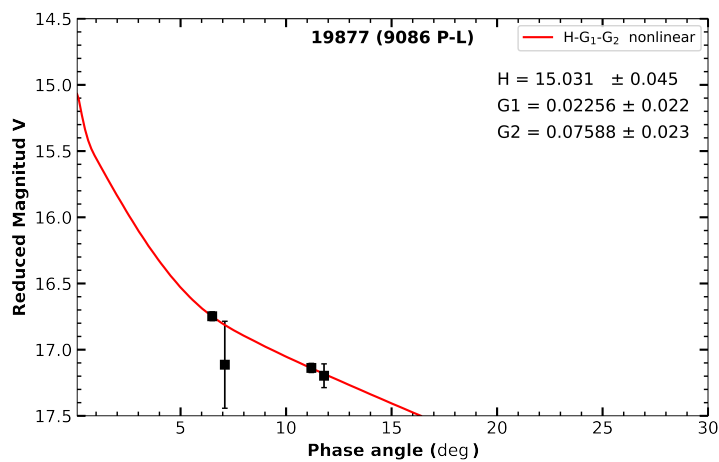
Para a curva de fase, foram realizadas observações fotométricas do objeto (19877) 9086 P-L entre setembro e outubro de 2020. A variação do ângulo de fase foi de $11,8^\circ$ a $7,1^\circ$ como pode ser visto na Fig. 3.6c. A magnitude absoluta encontrada e os parâmetros de inclinação para este objeto são: $H_{0R} = 15,031 \pm 0,045$, $G1 = 0,022 \pm 0,022$ e $G2 = 0,075 \pm 0,023$. O ajuste obtido mostra um efeito de oposição significativo, mesmo que a curva careça de informação em $\alpha < 5^\circ$. Também faltam informações em ângulos de fase $\alpha > 20^\circ$. Assim, o resultado obtido está sujeito a uma grande incerteza que deve ser considerada, sendo necessárias mais observações para obter um melhor ajuste.



(a) Espectro fotométrico set. 23.



(b) Espectro fotométrico set. 25.



(c) Curva de fase.

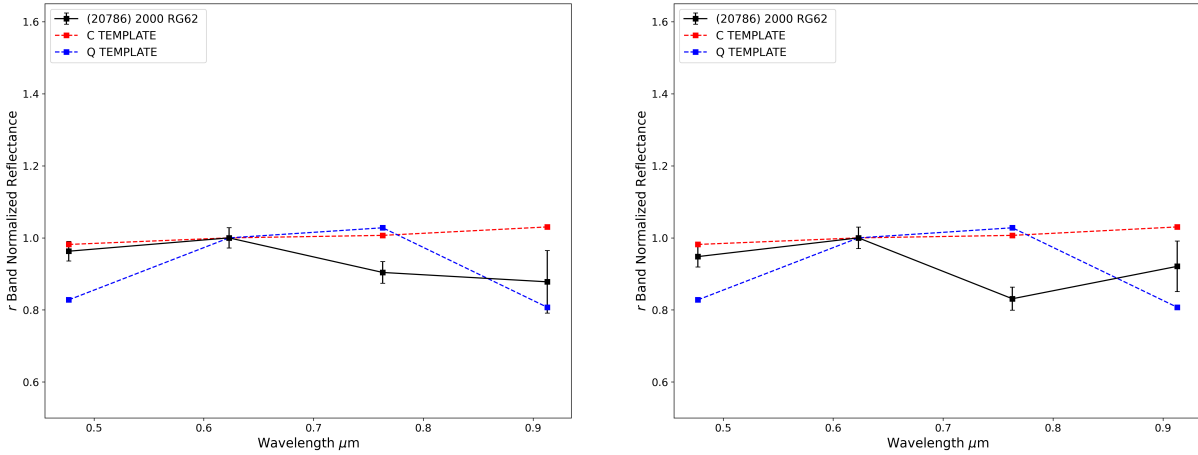
Figura 3.6: (19877) 9086 P-L

Para calcular o diâmetro (equação 3.4) foi usada a magnitude absoluta acima obtida e um albedo visual $p_V = 0,227$, dado em MAINZER *et al.* (2011), correspondente ao valor médio da classe taxonômica Q. O valor do diâmetro obtido foi $\bar{D} = 2,072$ km.

3.3.4 (20786) 2000 RG62

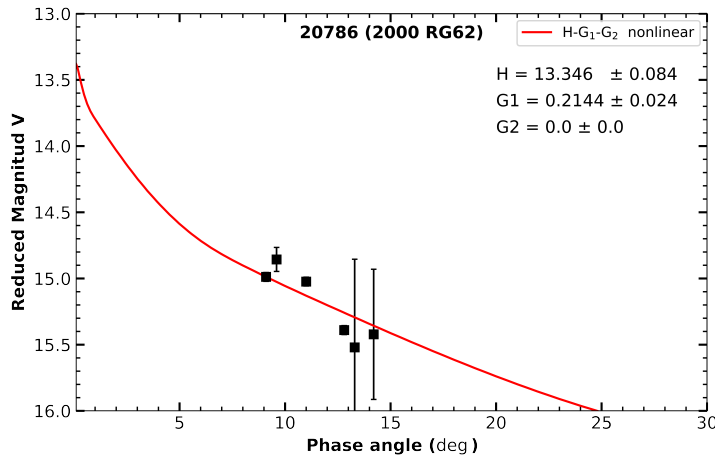
Os espectros fotométricos do objeto (20786) 2000 RG62 foram derivados de observações realizadas em 25 e 27 de abril de 2022 (Figuras 3.7a e 3.7b). Na data do 25 de abril as duas classes taxonômicas que apresentam os menores valores de χ^2 são C ($\chi^2 = 0,033$) e Q ($\chi^2 = 0,043$). Também em abril 27, as mesmas classes taxonômicas se ajustam melhor ao espectro obtido, sendo C ($\chi^2 = 0,043$) e Q ($\chi^2 = 0,071$). Os *templates* de ambas classes são dadas nas Figuras 3.7a e 3.7b ao longo dos espectros do objeto. Não foi encontrada outra classificação taxonômica na literatura para este objeto.

A curva de fase para este MC foi derivada de observações realizadas no OASI durante várias noites entre abril e maio de 2022, quando o ângulo de fase solar do asteroide



(a) Espectro fotométrico abr. 25.

(b) Espectro fotométrico abr. 27.



(c) Curva de fase.

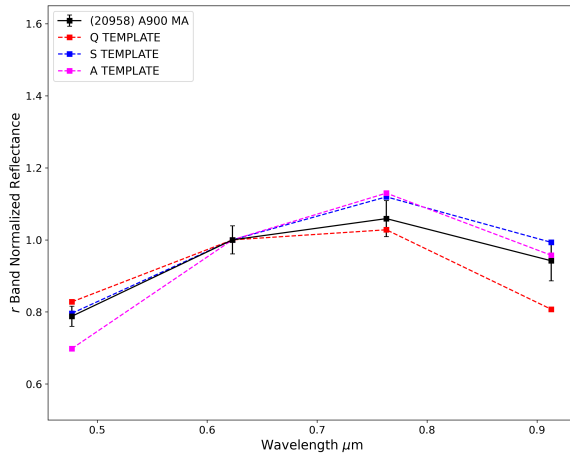
Figura 3.7: (20786) 2000 RG62.

variava entre $9,3^\circ$ e $14,3^\circ$. A Fig. 3.7c mostra as magnitudes obtidas derivando os valores $H_{0R} = 13,346 \pm 0,084$, $G1 = 0,214 \pm 0,024$ e $G2 = 0,000 \pm 0,000$. Assim como no objeto anterior, a curva de fase de (20786) 2000 RG62 apresenta boa cobertura na região linear, mas faltam magnitudes na região próxima à oposição e em grandes ângulos de fase. É de notar que, a curva apresenta um considerável efeito de oposição. Enfatizamos a necessidade de mais observações para completar a curva aumentando segurança quanto ao resultado obtido.

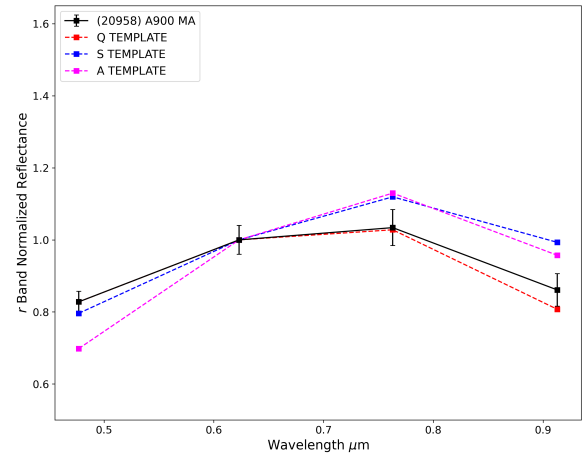
Levando em consideração a magnitude absoluta encontrada e o valor médio do albedo $p_V = 0,050 \pm 0,006$ da classe taxonômica C (MAINZER *et al.*, 2011), encontramos um diâmetro $\bar{D} = 10,864$ km.

3.3.5 (20958) A900 MA

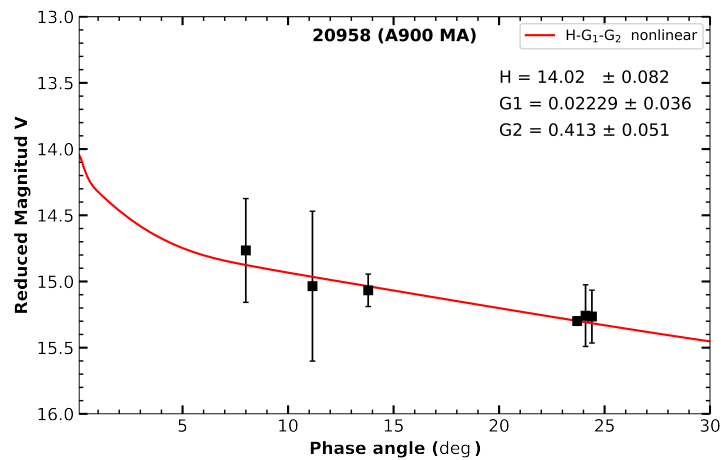
Usando magnitudes obtidas em julho 15 e 17 de 2021, determinamos espectros fotométricos para este asteróide. Nas Figuras 3.8a e 3.8b são fornecidos os espectros derivados



(a) Espectro fotométrico jul. 15.



(b) Espectro fotométrico jul. 17.



(c) Curva de fase.

Figura 3.8: (20958) A900 MA.

junto com as correspondências dos *templates* mais próximas. De acordo com o teste χ^2 do dia 15 de julho as classes S ($\chi^2 = 0,005$), A ($\chi^2 = 0,016$) e Q ($\chi^2 = 0,025$) são as que melhor ajustam, enquanto no dia 17 de julho as classes Q ($\chi^2 = 0,003$), S ($\chi^2 = 0,025$) e A ($\chi^2 = 0,041$) também apresentam os valores de χ^2 mais baixos. Através da inspeção visual consideramos que (20958) A900 MA melhor se encaixa na classe Q. Nenhuma outra classificação taxonômica foi encontrada na literatura.

As magnitudes no filtro R-Johnson foram obtidas para este MC em noites de julho, agosto e setembro de 2021, abrangendo um intervalo em ângulos de fase solar entre $8,0^\circ$ e $24,4^\circ$. A curva de fase obtida é dada na Fig. 3.8c na qual são mostradas as magnitudes observadas. O valor da magnitude absoluta obtida foi $H_{0R} = 14,020 \pm 0,082$ com $G1 = 0,022 \pm 0,036$ e $G2 = 0,413 \pm 0,051$.

Além disso, calculamos um diâmetro equivalente $\bar{D} = 2,986$ km com a magnitude absoluta deduzida e um albedo visual $p_V = 0,315 \pm 0,131$, dado por NUGENT *et al.* (2015).

3.3.6 (27995) 1997 WL2

O único período de rotação dado no LCDB (WARNER *et al.*, 2009) para este pequeno corpo é de Behrend et al (2021), que relatou um período de $9,229 \pm 0,001$ h com amplitude de 0,49 mag. O resultado obtido com observações de maio e junho de 2021 no OASI mostram um período de $9,235 \pm 0,001$ h com amplitude de 0,50 mag. A curva de luz de dois picos resultante é consistente com o valor publicado anteriormente em período e amplitude. A curva de luz composta e o periodograma são mostrados nas Figuras 3.9a e 3.9b. Este resultado foi publicado em MICHIMANI *et al.* (2022).

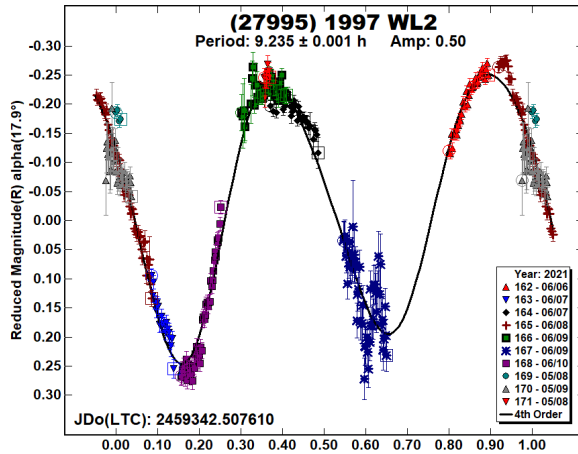
Espectros do objeto (27995) 1997 WL2 foram obtidos em junho 7 de 2021 com algumas horas de diferença (Figuras 3.9c e 3.9d). Ao classificar taxonomicamente, o primeiro espectro obtivemos os menores valores de χ^2 para as classes Q ($\chi^2 = 0,014$) e S ($\chi^2 = 0,019$). Ao classificar o segundo espectro notamos um erro muito alto na magnitude do filtro z , e excluimos esta magnitude traçando as classes Q e S, obtidas do primeiro espectro e com as magnitudes restantes conforme feito para o objeto (19877) 9086 P-L. Através de uma inspeção visual pode se notar que ambas classes mostram um bom acordo. Vale mencionar que CARRY *et al.* (2016b) encontraram uma classificação do tipo S para este objeto, o que está de acordo com nossos resultados.

As observações deste objeto durante várias noites de maio e junho de 2021 permitiram-nos obter magnitudes, no filtro R-Johnson, entre 1,7 e 21,8 graus em ângulos de fase, representando uma cobertura considerável. Na Fig. 3.9e são mostradas as magnitudes obtidas e seu melhor ajuste. A curva de fase mostra magnitudes em ângulos pequenos e grandes, embora em ângulos próximos a 20° haja uma dispersão entre os valores de magnitude, o que pode ser devido à amplitude de 0,50 mag encontrada e, portanto, uma correção por curva de luz pode ser necessária. O ajuste obtido com os dados disponíveis resultou em uma magnitude absoluta $H_{0R} = 14,480 \pm 0,072$ com $G1 = 0,812 \pm 0,055$ e $G2 = 0,000 \pm 0,003$.

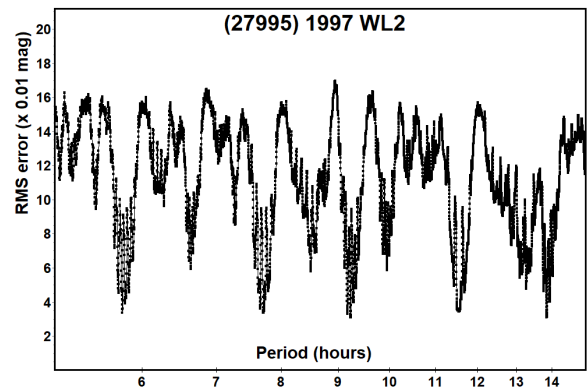
Para calcular o diâmetro foi usada a equação (2.1) com a magnitude absoluta obtida acima e um albedo visual $p_V = 0,211 \pm 0,068$, dado por MAINZER *et al.* (2011), correspondente ao valor médio da classe taxonômica S. O valor do diâmetro obtido foi $\bar{D}^* = 3,200$ km.

3.3.7 (46780) 1998 HH52

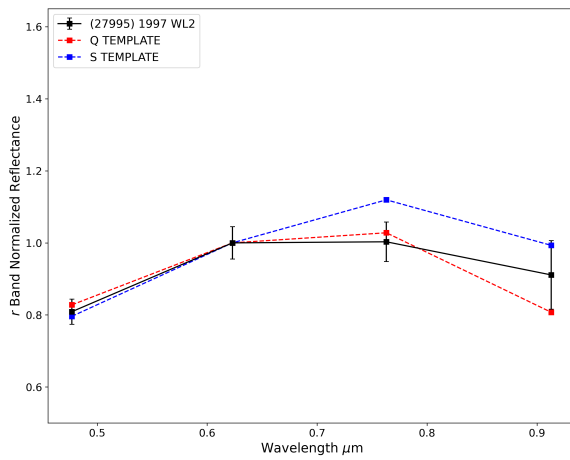
O período de rotação relatado anteriormente no LCDB (WARNER *et al.*, 2009) para este Mars-crosser (Pravec et al., 2021web) mostra o valor $P = 3,612 \pm 0,0008$ h e amplitude 0,09 mag. Nossas observações nos dias 12, 13 e 14 de novembro de 2021 se ajustam melhor a um período $P = 3,611 \pm 0,002$ h e uma amplitude de 0,13 mag, estando em bom acordo com o relatado anteriormente. A curva de luz e o periodograma são mostrados nas Figuras 3.10a e 3.10b e este resultado se encontra publicado em MICHIMANI *et al.* (2022).



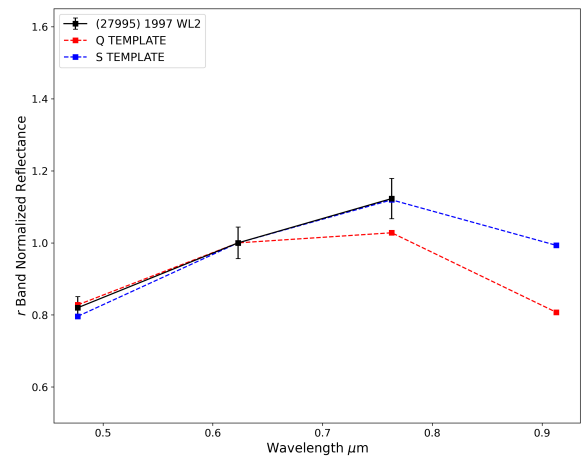
(a) Curva de luz.



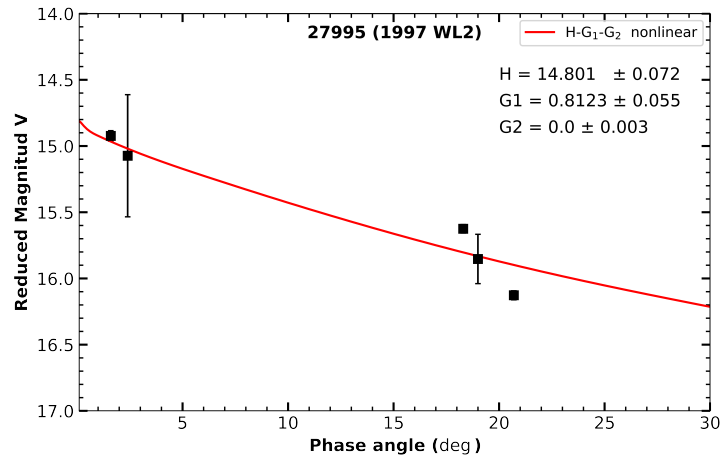
(b) Periodograma.



(c) Espectro fotométrico jun. 7 a.



(d) Espectro fotométrico jun. 7 b.



(e) Curva de fase.

Figura 3.9: (27995) 1997 WL2.

Conseguimos obter o espectro fotométrico para este objeto usando magnitudes obtidas em dezembro 12 e 13 de 2021. A Fig. 3.10c mostra os espectros derivados. Comparando os espectros obtidos nos dois dias com os diversos *templates* do esquema taxonômico CARVANO, J. M. *et al.* (2010), mostrados nas Figuras 3.10c e 3.10d, o tipo L apresentou

menor valor de $\chi^2 = 0,012$ e $\chi^2 = 0,019$, respectivamente. Uma inspeção visual permitiu concluir que o tipo L se ajusta bem ao espectros. Nenhuma outra classificação taxonômica foi encontrada na literatura.

Magnitudes reduzidas foram obtidas para este MC ao longo de várias noites de outubro, novembro e dezembro de 2021, com uma variação do ângulo de fase entre $2,2^\circ$ a $21,0^\circ$. A curva de fase obtida é dada na figura 3.10e. A magnitude absoluta derivada foi $H_{0R} = 14.073 \pm 0.077$ com $G1 = 0.000 \pm 0.032$ e $G2 = 0.480 \pm 0.043$. A curva de fase mostra boa cobertura perto da oposição e em ângulos acima de 15° . O efeito de oposição é bastante perceptível. Devido à pequena dispersão do ajuste obtido, os valores de H_{0R} , $G1$ e $G2$ apresentam pequenos erros.

O diâmetro foi calculado usando a magnitude absoluta obtida acima e um albedo visual $p_V = 0,149 \pm 0,066$, dado por MAINZER *et al.* (2011), correspondente ao valor médio da classe taxonômica L. O valor do diâmetro obtido foi $\bar{D} = 4,177$ km.

3.3.8 (47834) 2000 EN114

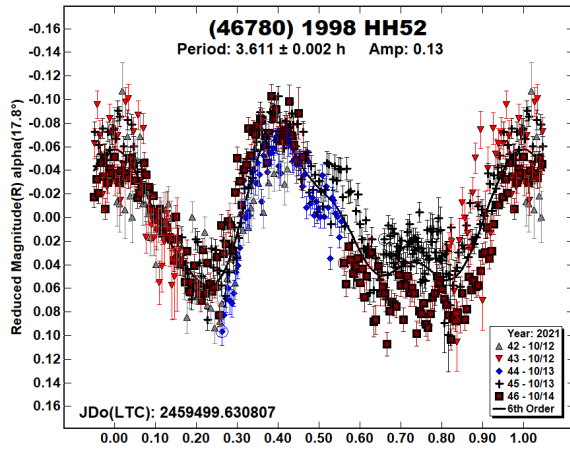
Os espectros fotométricos deste MC foram obtidos a partir de observações realizadas, em setembro e outubro de 2020 e são mostrados nas Figuras 3.11a e 3.11b. O teste χ^2 , aplicado aos *templates* do esquema taxonômico de CARVANO, J. M. *et al.* (2010), indica que o tipo L, melhor se ajusta ao espectro ($\chi^2 = 0,004$). Nas figuras também mostramos o *template* S correspondente ao segundo menor valor de $\chi^2 = 0,001$. Não há outra classificação taxonômica relatada na literatura para este objeto.

Por outro lado, para a curva de fase, também realizamos observações fotométricas de (47834) 2000 EN114 entre setembro e outubro de 2020, a fim de obter magnitudes em ângulos de fase variando entre $15,1^\circ$ e $26,2^\circ$ como pode ser visto na Fig. 3.11c. A magnitude absoluta derivada e os parâmetros de inclinação para este objeto são: $H_{0R} = 14,006 \pm 0,043$, $G1 = 0,089 \pm 0,089$ e $G2 = 0,709 \pm 0,074$. Embora a curva mostre um efeito de oposição, é importante lembrar que as observações utilizadas para encontrar este ajuste não incluem nenhuma magnitude abaixo de $5,0^\circ$ e cobrem apenas a parte linear da curva de fase. Portanto o resultado obtido deve ser utilizado com cuidado. Mais observações são necessárias para completar a curva e melhorar o ajuste.

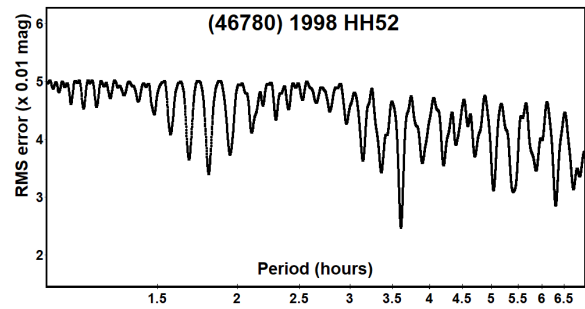
Finalmente, calculamos o diâmetro equivalente $\bar{D}^* = 4,700$ km usando a magnitude absoluta acima obtida e um albedo visual $p_V = 0,199 \pm 0,025$, dado em ALÍ-LAGOA e DELBO' (2017).

3.3.9 (49952) 1999 XH212

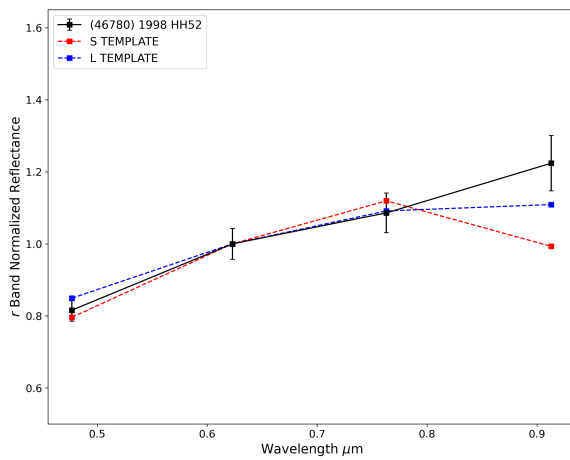
Foi possível obter espectros do objeto (49952) 1999 XH212 em 7 e 10 setembro de 2021. Esses espectros são apresentados nas Figuras 3.12a e 3.12b. Ao classificar taxonomicamente, para o primeiro dia de observação, obtivemos os menores valores de χ^2 para as



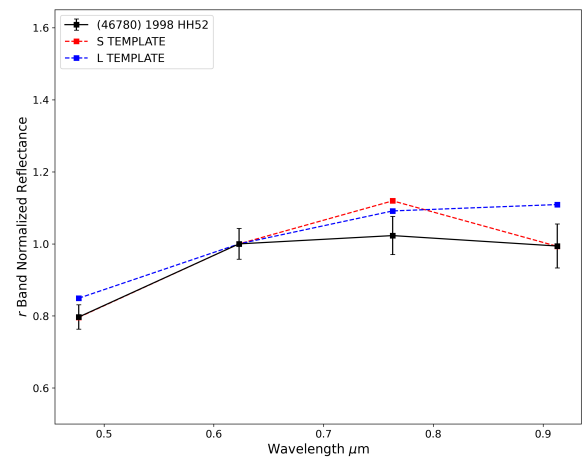
(a) Curva de luz.



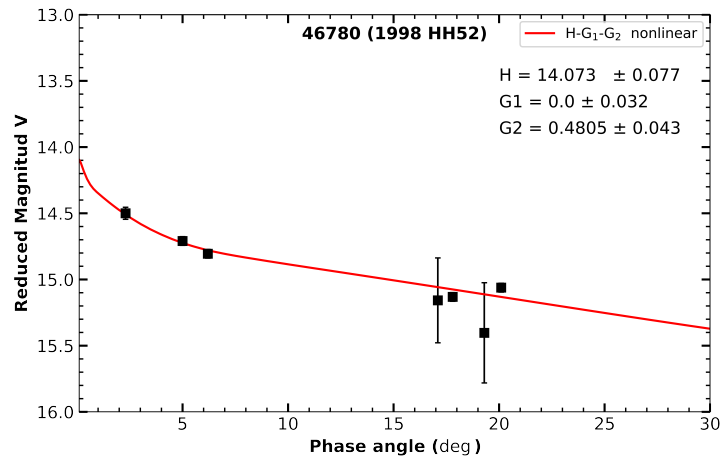
(b) Periodograma.



(c) Espectro fotométrico dez. 12.



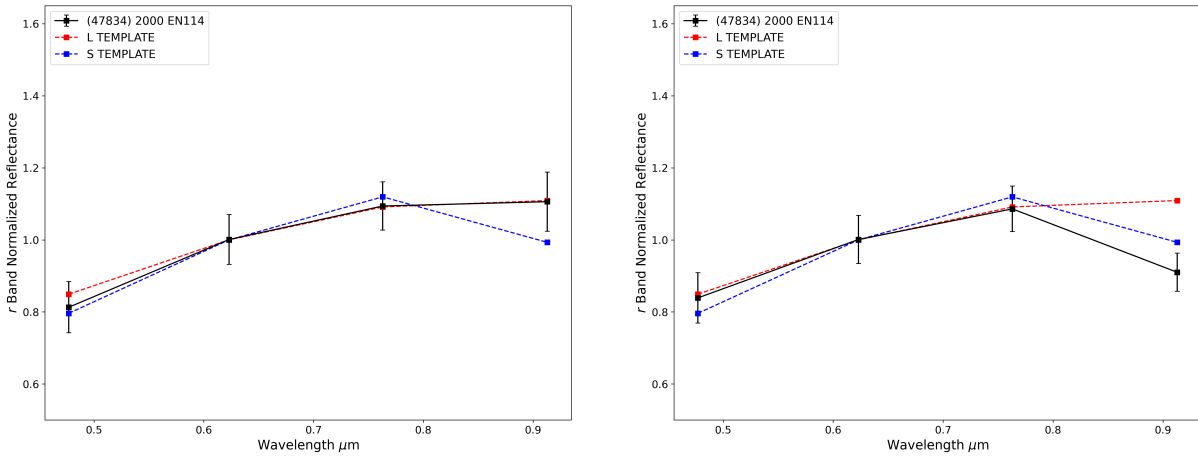
(d) Espectro fotométrico dez. 13.



(e) Curva de fase.

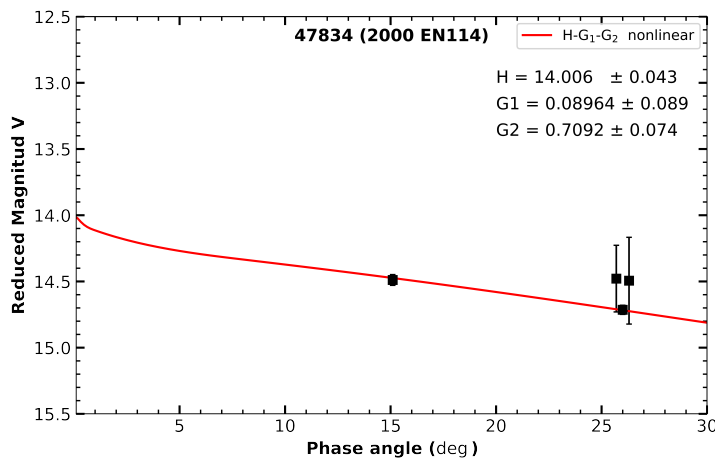
Figura 3.10: (46780) 1998 HH52.

classes Q ($\chi^2 = 0,009$) e S ($\chi^2 = 0,017$). Ao classificar o espectro do segundo dia, notamos um erro muito alto na magnitude do filtro z , o qual foi excluído. A análise visual com os *templates* das classes Q e S obtidas do primeiro espectro permitiu concluir que ambas classes mostram um bom acordo. Não foi encontrada outra classificação taxonômica na



(a) Espectro fotométrico set. 2020.

(b) Espectro fotométrico out. 2020.



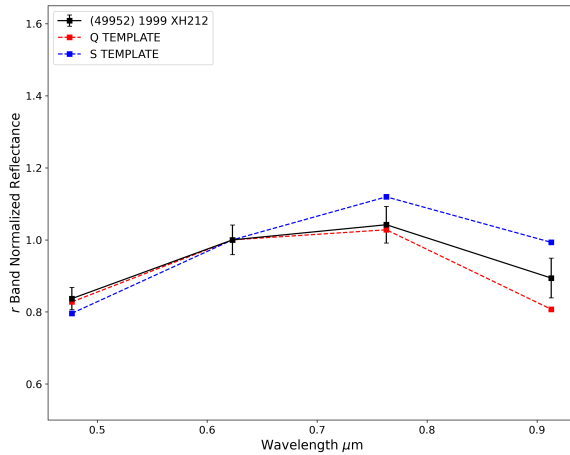
(c) Curva de fase.

Figura 3.11: (47834) 2000 EN114.

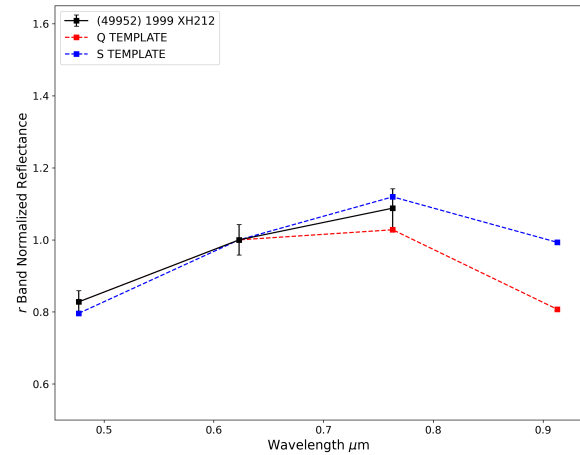
literatura para (49952) 1999 XH212.

Para a curva de fase, também realizamos observações fotométricas de (49952) 1999 XH212 entre julho, agosto e setembro de 2021, a fim de obter magnitudes em ângulos de fase variando de $1,9^\circ$ a $19,5^\circ$ como pode ser visto na Fig. 3.12c. A magnitude absoluta derivada e os parâmetros de inclinação para este objeto são: $H_{0R} = 15,331 \pm 0,012$, $G1 = 0,000 \pm 0,001$ e $G2 = 1,000 \pm 0,000$. Embora neste caso tenhamos magnitudes em ângulos abaixo de $5,0^\circ$ e acima de $15,0^\circ$, pode-se perceber que a dispersão das magnitudes em relação ao ajuste é bastante elevada. Isso pode ser devido à possível forma alongada do objeto. Neste caso são necessárias mais observações para obter magnitudes em diferentes ângulos de fase e também obter uma curva de luz e obter um melhor ajuste. O resultado apresentado, portanto, deve ser utilizado com cuidado devido às incertezas.

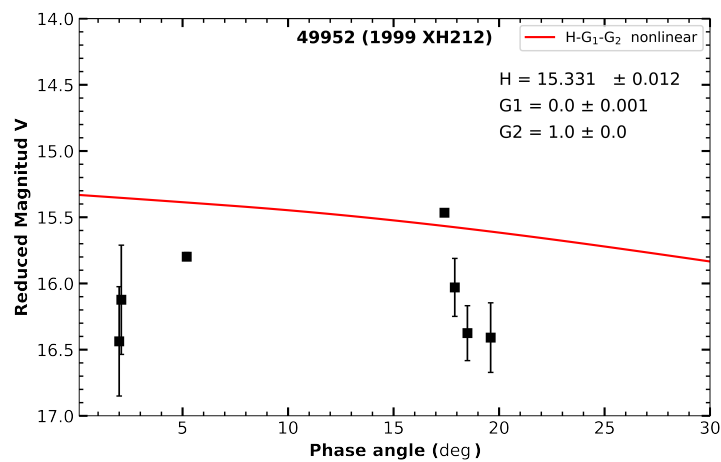
Por fim, o diâmetro foi calculado usando a magnitude absoluta obtida acima e um albedo visual $p_V = 0,227$, dado por MAINZER *et al.* (2011), correspondente ao valor médio da classe taxonômica Q. O valor do diâmetro obtido foi $\bar{D}^* = 2.100$ km.



(a) Espectro fotométrico set. 7.



(b) Espectro fotométrico set. 10.



(c) Curva de fase.

Figura 3.12: (49952) 1999 XH212.

3.3.10 (61343) 2000 PC5

Uma pesquisa no *Asteroid Lightcurve Photometry Database* (WARNER *et al.*, 2009) não encontrou nenhum período relatado anteriormente para este asteroide. Com nossas observações foi possível derivar um período $P = 2,828 \pm 0,002$ h a partir de observações adquiridas em 27 e 28 de junho de 2020. A curva de luz tem uma amplitude de 0,24 mag e exibe dois máximos e dois mínimos por ciclo rotacional. A curva de fase rotacional e o periodograma são mostrados nas Figuras 3.13a e 3.13b, sendo que este resultado foi publicado em MICHIMANI *et al.* (2022).

3.3.11 (66294) 1999 JS27

A curva de fase do asteroide (66294) 1999 JS27 contém apenas algumas magnitudes obtidas em junho e julho de 2022 e em um intervalo de ângulo de fase solar entre $1,0^\circ$ e $16,2^\circ$, conforme mostrado na Fig. 3.14. O melhor ajuste para nosso conjunto de dados fornece o valor $H_{0R} = 14,605 \pm 0,117$, $G1 = 0,1918 \pm 0,117$ e $G2 = 0,157 \pm 0,072$. Com esses

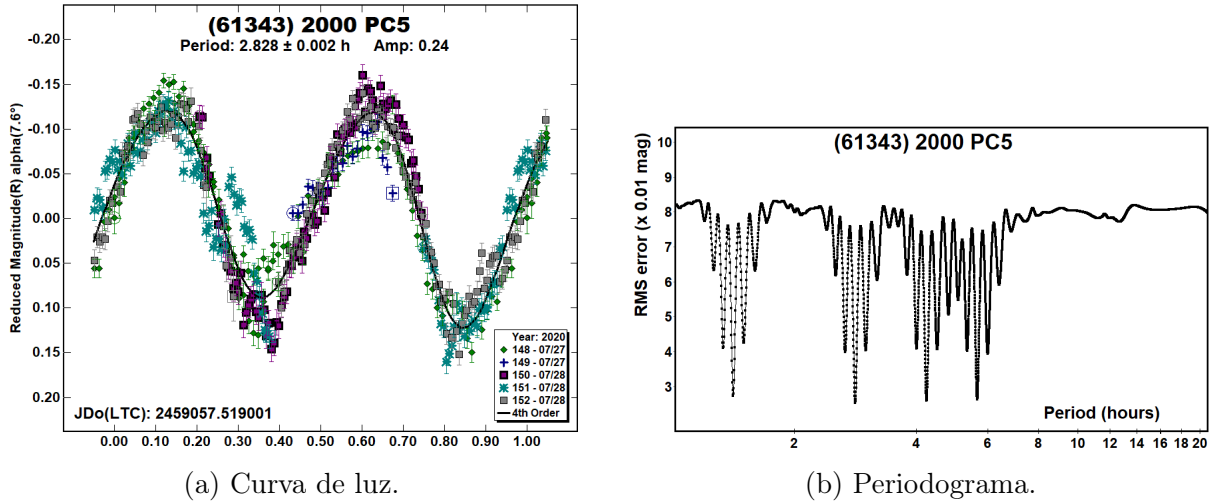


Figura 3.13: (61343) 2000 PC5.

valores calculamos um diâmetro equivalente $\bar{D}^* = 3,200$ km usando a magnitude absoluta deduzida e um albedo visual $p_V = 0,250$, dado por ALÍ-LAGOA e DELBO' (2017). Embora a curva mostre um claro efeito de oposição, a curva precisa de mais dados no intervalo da região linear $\alpha > 5^\circ$.

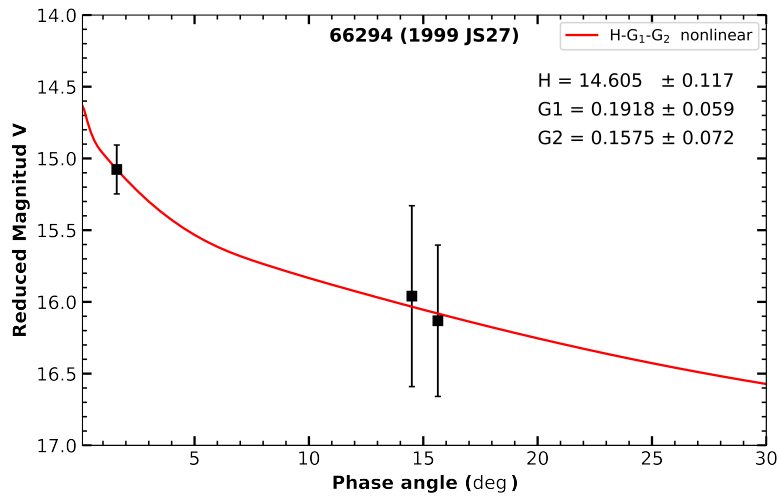


Figura 3.14: Curva de fase do objeto (66294) 1999 JS27.

3.3.12 (93751) 2000 WH1

O espectro fotométrico deste objeto foi obtido a partir de observações realizadas em 18 de novembro de 2022, Fig 3.15a. O teste chi-quadrado (χ^2), aplicado aos *templates* do esquema taxonômico de CARVANO, J. M. *et al.* (2010), indica que o tipo D melhor se ajusta ao espectro ($\chi^2 = 0,037$). A figura 3.15a também mostra os segundo menor valor de χ^2 correspondentes ao *template* L ($\chi^2 = 0,150$). Não há outra classificação taxonômica relatada na literatura para este objeto.

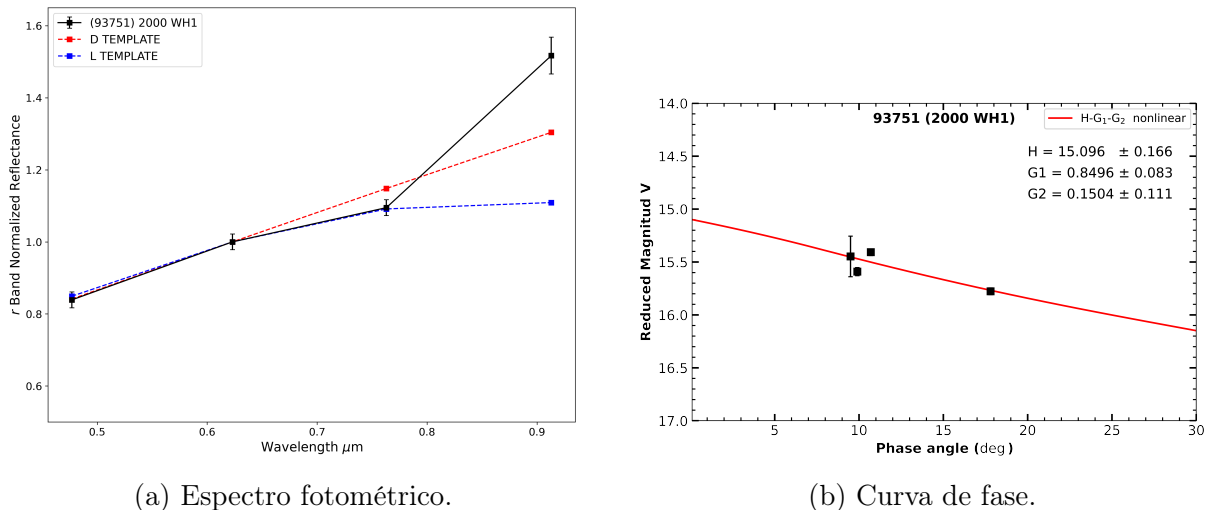


Figura 3.15: (93751) 2000 WH1.

Observações fotométricas do objeto (93751) 2000 WH1, foram realizadas no OASI entre outubro e novembro de 2022, com o objetivo de construir a curva de fase. Tais observações permitiram obter magnitudes em ângulos de fase variando de $7,1^\circ$ a $18,0^\circ$, na Fig. 3.15b. A magnitude absoluta derivada e os parâmetros de inclinação para este objeto são: $H_{OR} = 15,096 \pm 0,166$ com $G1 = 0,849 \pm 0,083$ e $G2 = 0,150 \pm 0,111$. Devido aos poucos pontos, e ausentes na região linear, estes resultado tem erros significativos.

Calculamos um diâmetro $\bar{D} = 4,700$ km usando a magnitude absoluta deduzida e um albedo visual $p_V = 0,048 \pm 0,025$, dado em MAINZER *et al.* (2011), correspondente ao valor médio da classe taxonômica D.

3.3.13 (106848) 2000 YP16

Uma pesquisa no *Asteroid Lightcurve Database* (WARNER *et al.*, 2009) não encontrou nenhum período relatado anteriormente para este MC. Este objeto foi observado várias noites em janeiro e fevereiro de 2021. Nossa análise fotométrica nos permitiu derivar um período rotacional de $2,199 \pm 0,002$ h. A curva de luz mostra uma forma binodal bem definida e uma amplitude máxima baixa de 0,08 mag. A *phased rotational lightcurve* e o periodograma são mostrados nas Figuras 3.16a e 3.16b, e este resultado foi publicado em MICHIMANI *et al.* (2023).

O período encontrado coloca o asteroide logo acima da chamada *spin barrier*, de cerca de $P = 2,200$ (PRAVEC e HARRIS, 2000), o que pode ter implicações importantes na estrutura interna deste objeto e acreditamos que este MC seja um alvo interessante para observações futuras.

Não conseguimos derivar o tipo taxonômico e nem o diâmetro para o objeto (106848) 2000 YP16.

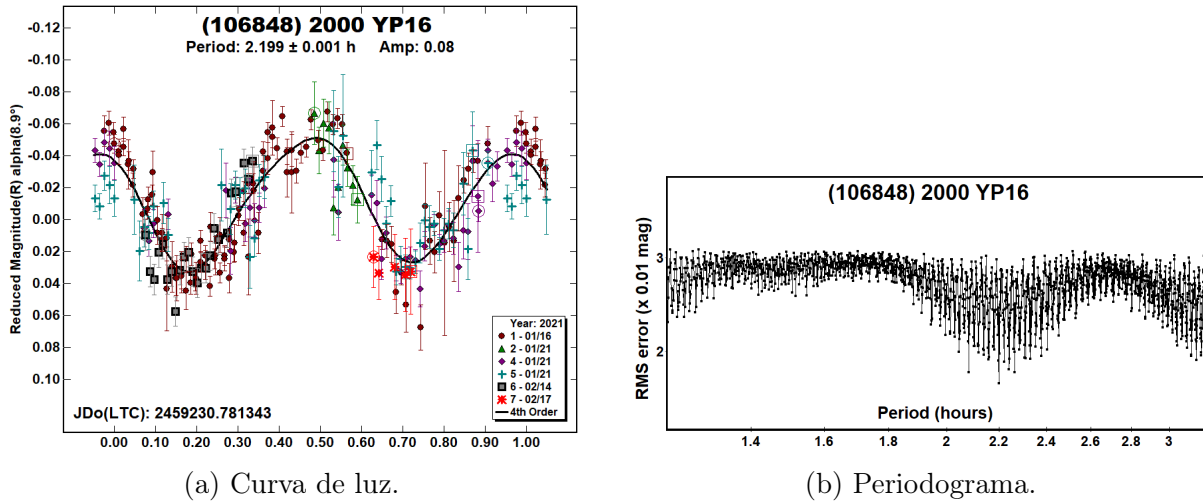


Figura 3.16: (106848) 2000 YP16.

3.3.14 (133090) 2003 MS9

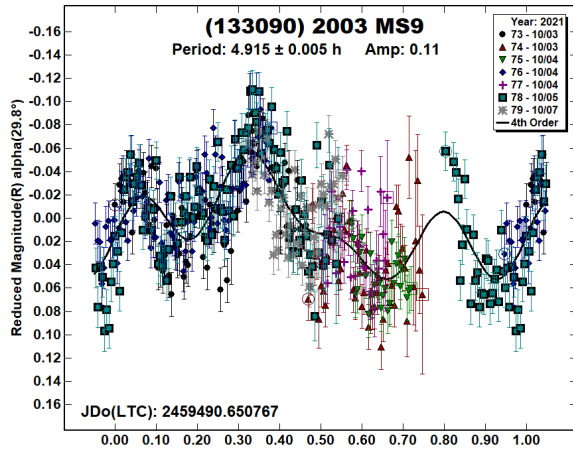
Nenhum período de rotação foi encontrado no LCDB (WARNER *et al.*, 2009) para este pequeno corpo. Para obter o melhor ajuste possível, agrupamos as observações em dois conjuntos. Primeiro ajustamos um período com base nos dados observados ao longo de quatro noites em outubro de 2021. Esses dados mostraram um período de $4,915 \pm 0,005$ h com amplitude de 0,11 mag. A seguir, ajustamos os dados adquiridos em três noites de dezembro do mesmo ano e encontramos um período de $4,90 \pm 0,01$ com amplitude de 0,13 mag. Dada a pequena variação de amplitude entre as curvas de luz com dados de outubro e dezembro, realizamos então um novo ajuste incluindo todos os dados. O período encontrado foi de $4,914 \pm 0,001$ h com amplitude de 0,10 mag. A curva de luz e o periodograma são mostrados nas Figuras 3.17a, 3.17b, 3.17c e 3.17d e este resultado foi publicado em MICHIMANI *et al.* (2023).

Espectros do objeto (133090) 2003 MS9 foram obtidos em 12 e 13 de outubro de 2021, apresentados nas Figuras 3.17e e 3.17f. Ao classificar taxonomicamente o espectro do primeiro dia de observação, obtivemos os menores valores de χ^2 para as classes D ($\chi^2 = 0,037$) e L ($\chi^2 = 0,150$). As mesmas classes taxonômicas também ajustam melhor ao espectro obtido em outubro 13, isto é, D ($\chi^2 = 0,019$) e Q ($\chi^2 = 0,070$). Não foi encontrada outra classificação taxonômica na literatura para este objeto.

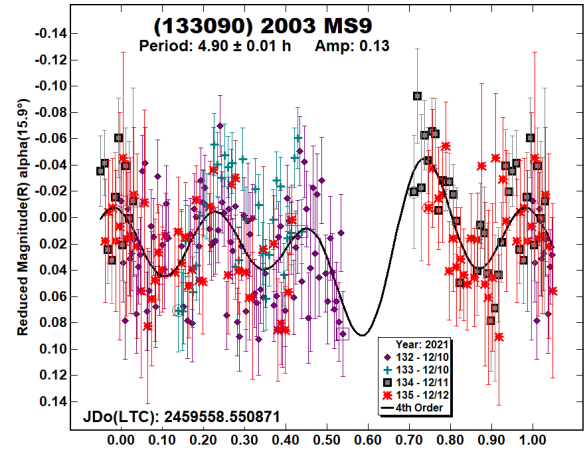
As observações deste objeto durante várias noites de outubro e novembro de 2021 permitiram-nos obter magnitudes, no filtro R-Johnson, entre $5,0^\circ$ e $29,4^\circ$ em ângulos de fase, uma faixa de cobertura considerável. Embora sem dados na região $\alpha < 5,0^\circ$, pode ser apreciado o efeito de oposição. Na Fig. 3.18 são mostradas as magnitudes observadas e seu melhor ajuste. A magnitude absoluta derivada foi $H_{0R} = 15,820 \pm 0,057$ com $G1 = 0,2527 \pm 0,064$ e $G2 = 0,427 \pm 0,066$.

O diâmetro foi calculado usando a magnitude absoluta obtida acima e um albedo

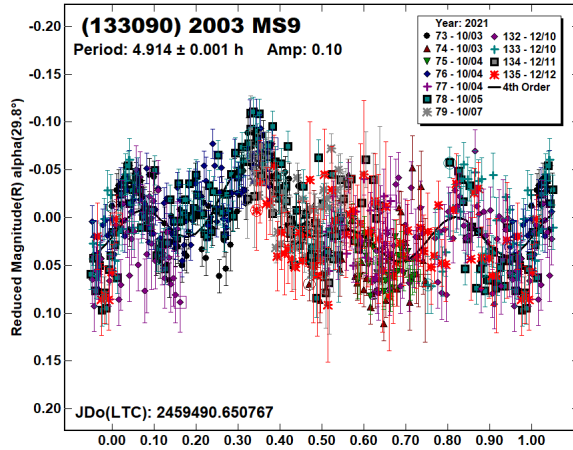
visual $p_V = 0,048 \pm 0,002$, dado por MAINZER *et al.* (2011), correspondente ao valor médio da classe taxonômica D. O valor do diâmetro obtido foi $\bar{D} = 3,425$ km.



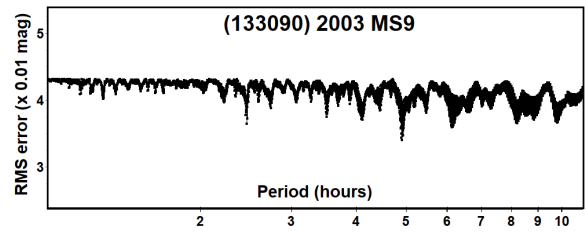
(a) Curva de luz out. 2021



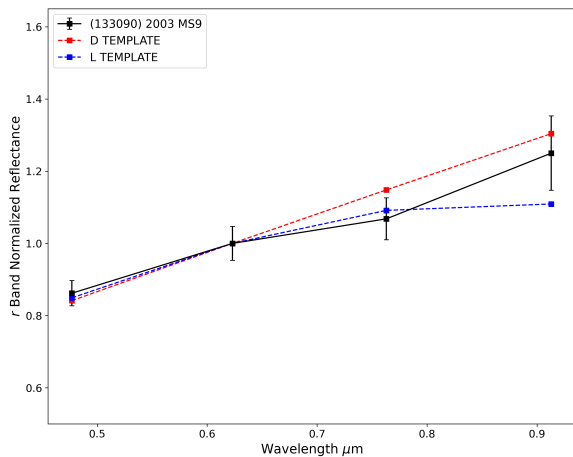
(b) Curva de luz dez. 2021



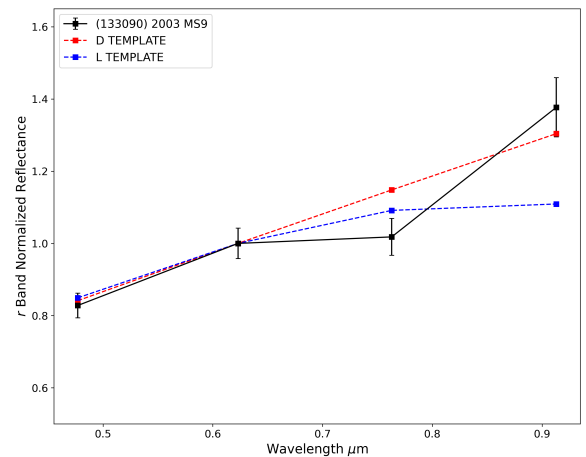
(c) Curva de luz out. - dez. 2021.



(d) Periodograma



(e) Espectro fotométrico dez. 12.



(f) Espectro fotométrico dez. 13.

Figura 3.17: (133090) 2003 MS9.

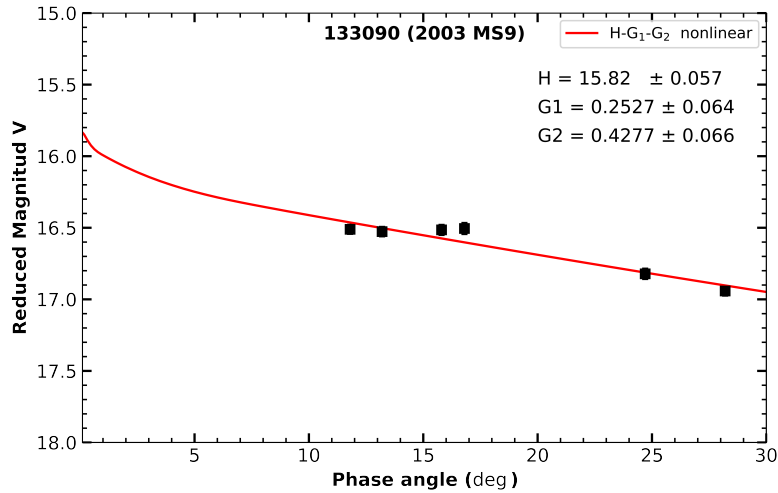


Figura 3.18: Curva de fase do objeto (133090) 2003 MS9.

3.3.15 (307162) 2002 DM9

A curva de fase do asteróide (307162) 2002 DM9 contém magnitudes obtidas em março de 2021 e em uma faixa de fase solar entre $0,7^\circ$ e $6,4^\circ$. Estas são mostrados na Fig. 3.19. O melhor ajuste para nosso conjunto de dados fornece o valor $H_{0R} = 13,614 \pm 0,040$, $G1 = 0,043 \pm 0,035$ e $G2 = 0,464 \pm 0,037$. Vale resaltar que as magnitudes obtidas se encontram apenas na região do efeito de oposição, sem pontos na região linear. Além disso, calculamos um diâmetro equivalente $\bar{D} = 6,253$ km, usando a magnitude absoluta deduzida e um albedo visual $p_V = 0,120 \pm 0,022$ da classe taxonômica B, dado por MAINZER *et al.* (2011). A classe taxonômica do objeto foi derivada por CARRY *et al.* (2016b).

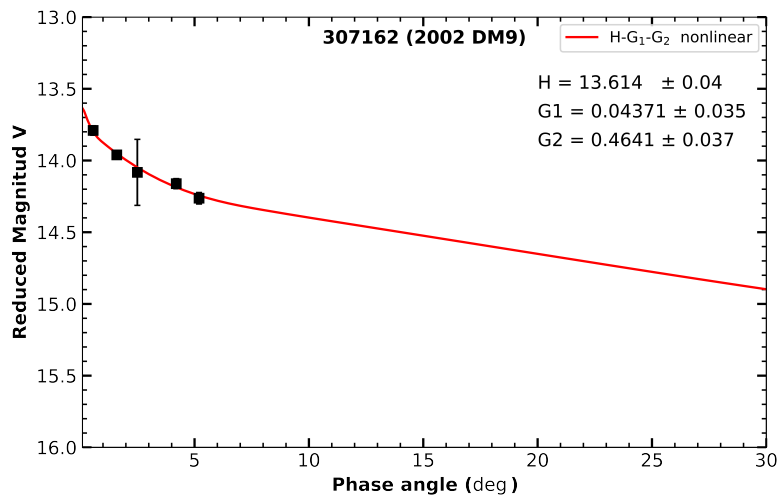


Figura 3.19: Curva de fase do objeto (307162) 2002 DM9.

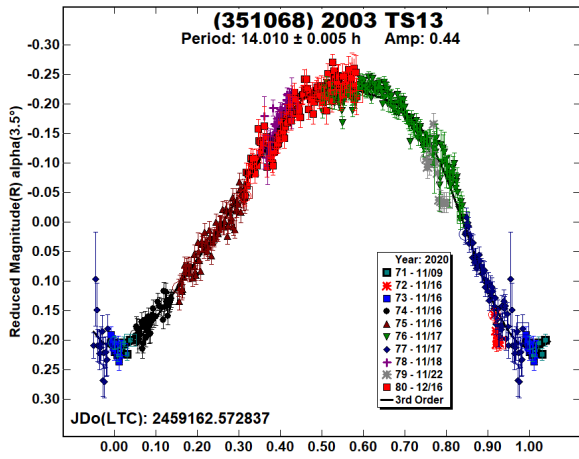
3.3.16 (351068) 2003 TS13

Uma pesquisa no *Asteroid Lightcurve Database* (WARNER *et al.*, 2009) não encontrou nenhum período relatado anteriormente para este MC. Nossa análise usando as observações fotométricas realizadas durante várias noites em novembro e dezembro de 2020 indica um possível período de $P = 14,010 \pm 0,005$ h e uma amplitude de 0,44 mag. O verdadeiro período pode ser cerca de 28 horas, o dobro do nosso resultado já que o periodograma mostra um segundo mínimo RMS entre 25 e 30 horas. Não foi possível seguir este MC por tempo suficiente para derivar uma curva de luz bimodal completa, então nosso resultado é baseado no melhor ajuste para uma curva de luz monomodal. A curva de luz e o periodograma são mostrados nas figuras 3.20a e 3.20b e estão publicados em MICHIMANI *et al.* (2022).

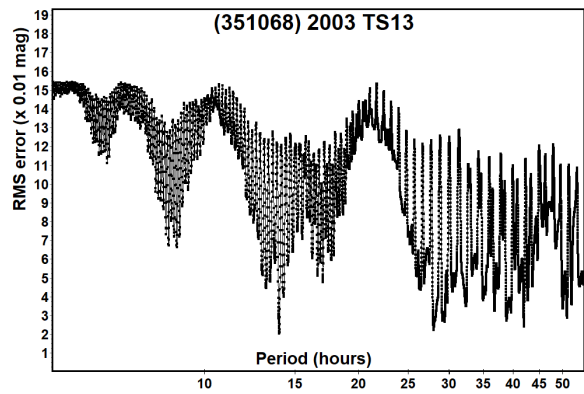
O espectro fotométrico deste objeto foi obtido a partir de observações realizada em novembro de 2021 e é mostrado na Fig 3.20c. Na figura mostramos as magnitudes observadas, normalizadas no filtro r, indicadas por pontos pretos com barras de erro correspondentes conectadas pela linha preta. O teste χ^2 , aplicado aos *templates* do esquema taxonômico de CARVANO, J. M. *et al.* (2010), indica que o tipo Q, melhor se ajusta ao espectro ($\chi^2 = 0,001$). Não há outra classificação taxonômica relatada na literatura para este objeto.

Magnitudes reduzidas foram obtidas para este MC ao longo de várias noites de novembro e dezembro de 2020. O ângulo de fase tem variação entre $1,7^\circ$ e $15,8^\circ$ e a curva de fase obtida é dada na figura 3.20d. A magnitude absoluta derivada foi $H_{0R} = 15,314 \pm 0,043$ com $G_1 = 0,000 \pm 0,000$ e $G_2 = 0,348 \pm 0,020$. Devido à grande amplitude da curva de luz alguns pontos estão fora do ajuste, mas de orma geral temos um bom ajuste.

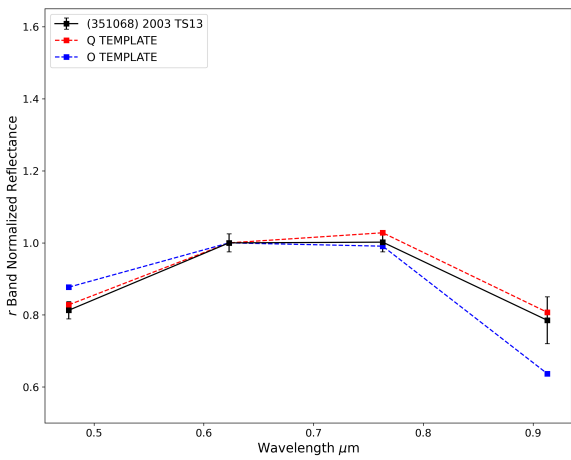
O diâmetro foi calculado usando a magnitude absoluta obtida acima e um albedo visual $p_B = 0,227 \pm 0,000$, dado por MAINZER *et al.* (2011), correspondente ao valor médio da classe taxonômica Q. O valor do diâmetro obtido foi $\bar{D} = 1,966$ km.



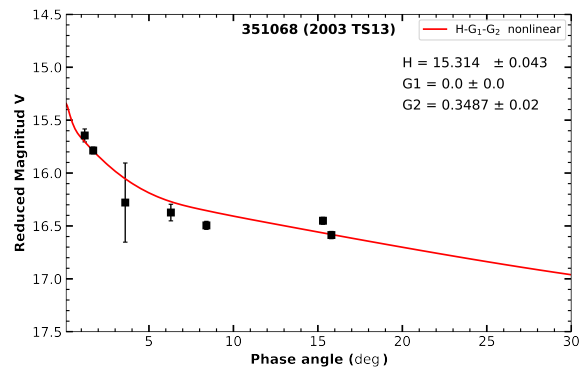
(a) Curva de luz.



(b) Periodograma.



(c) Espectro fotométrico.



(d) Curva de fase.

Figura 3.20: (133090) 2003 MS9.

Tabela 3.2: Resumo dos parâmetros físicos derivados para cada MC observado,

MC	P [h]	A [mag]	Tx	H_{0R}	$V - R$	G_1	G_2	albedo	D [km]
(7870) 1987 UP2	—	—	—	$13,908 \pm 0,053$	$0,4795$	$0,2404 \pm 0,0000$	$0,7596 \pm 0,0640$	$0,288$	$3,310$
(18284) Tsereteli	—	—	D	$14,523 \pm 0,059$	$0,4619$	$0,8343 \pm 0,0280$	$0,0642 \pm 0,0540$	$0,048$	$6,158$
(19877) 9086 P-L	—	—	Q	$15,031 \pm 0,045$	$0,6320$	$0,0225 \pm 0,0220$	$0,0758 \pm 0,0230$	$0,227$	$2,072$
(27995) 1997 WL2	$9,235 \pm 0,001$	$0,50 \pm 0,02$	S	$14,801 \pm 0,072$	—	$0,8123 \pm 0,0550$	$0,0000 \pm 0,0030$	$0,211$	$3,200^*$
(46780) 1998 HH52	$3,611 \pm 0,002$	$0,13 \pm 0,01$	S	$14,073 \pm 0,077$	$0,5145$	$0,0000 \pm 0,0320$	$0,4805 \pm 0,0430$	$0,149$	$4,177$
(47834) 2000 EN114	—	—	L	$14,006 \pm 0,043$	—	$0,0896 \pm 0,0890$	$0,7092 \pm 0,0740$	$0,199$	$4,700^*$
(49952) 1999 XH212	—	—	Q	$15,331 \pm 0,012$	—	$0,0000 \pm 0,0010$	$1,0000 \pm 0,0000$	$0,227$	$2,400^*$
(61343) 2000 PC5	$2,828 \pm 0,002$	$0,24 \pm 0,01$	—	—	—	—	—	—	—
(66294) 1999 JS27	—	—	—	$14,605 \pm 0,117$	—	$0,1918 \pm 0,1170$	$0,1575 \pm 0,0720$	$0,250$	$3,200^*$
(93751) 2000 WH1	—	—	D	$15,096 \pm 0,166$	$0,4755$	$0,8496 \pm 0,0830$	$0,1504 \pm 0,1110$	$0,048$	$4,700$
(106848) 2000 YP16	$2,199 \pm 0,001$	$0,08 \pm 0,01$	—	—	—	—	—	—	—
(133090) 2003 MS9	$4,914 \pm 0,001$	$0,10 \pm 0,02$	D	$15,820 \pm 0,057$	$0,4385$	$0,2527 \pm 0,0640$	$0,4277 \pm 0,0660$	$0,048$	$3,425$
(307162) 2002 DM9	—	—	—	$13,614 \pm 0,040$	$0,3430$	$0,0437 \pm 0,0350$	$0,4641 \pm 0,0370$	$0,120$	$6,253$
(351068) 2003 TS13	$14,010 \pm 0,005$	$0,44 \pm 0,02$	Q	$15,314 \pm 0,043$	$0,4635$	$0,0000 \pm 0,0000$	$0,3487 \pm 0,0200$	$0,227$	$1,966$

Para cada MC é dado o período de rotação P , amplitude da curva de luz A , classe taxonômica Tx , H_{0R} magnitude absoluta no filtro R , cor $V - R$, parâmetros G_1 e G_2 , albedo e diâmetro \bar{D} . Quando o valor do diâmetro é seguido por *, o diâmetro foi calculado usando a equação 2.1 caso contrário a equação 3.4 foi usada,

3.4 Discussão dos resultados

Conseguimos observar 16 MCs ao longo de 2020, 2021 e 2022 com o objetivo de realizar uma caracterização completa usando observações fotométricas para acompanhar as variações de brilho com a rotação, comprimento de onda e ângulo de fase solar. Tentamos, para cada alvo selecionado, construir sua curva de luz, seu espectro fotométrico e sua curva de fase.

Os resultados obtidos estão resumidos na tabela 3.2, onde para cada MC é dado, quando foi possível obter: o período de rotação, P , a amplitude da curva de luz A , a classe taxonômica, Tx , a magnitude absoluta no filtro R , H_{OR} , a cor ($V - R$), os parâmetros de inclinação, $G1$ e $G2$ e diâmetro \bar{D} . Ao calcular o diâmetro quando o albedo não foi encontrado na literatura, utilizamos o albedo médio da classe taxonômica derivado, conforme dado em MAINZER *et al.* (2011).

Como todo programa de observacional, dependemos das condições climáticas e do desempenho do telescópio para alcançar os melhores resultados possíveis e, infelizmente não conseguimos a caracterização completa para todos os alvos. No caso do período de rotação, embora tenham sido obtidas muitas curvas de luz, nem sempre foi possível ajustar uma série de Fourier com um RMS confiável. Donde os poucos períodos dados na tabela 3.2. Com a curva de fase, a magnitude absoluta H e a cor $V - R$ derivadas, estimamos o tamanho dos objetos sendo que toda amostra tem diâmetro superior a 1,0 km, com valor mediano de 3,368 km.

Notamos que os MCs observados têm períodos de rotação na faixa entre 2,199 e 28,02h e as curvas de luz correspondentes têm amplitudes entre 0,02 mag e 0,50 mag. O objeto (106848) 2000 YP16 apresenta o período mais curto e, como mencionado anteriormente, acreditamos ser um alvo interessante para novas observações já que este período se encontra no limite dos chamados *fast-rotators* de 2,200 h (MONTEIRO *et al.*, 2020; SÁNCHEZ e SCHEERES, 2020). Por outro lado, o objeto (351068) 2003 TS13 apresentou o período mais longos, 28,020h e pertence aos *slow-rotators* ou seja, $P > 12,0h$ (MARCINIAK *et al.*, 2019). O restante dos alvos se encontram entre os limites dos rotadores lentos e rápidos. O maior valor de amplitude pertence ao objeto (27995) 1997 WL2 e o objeto (133090) 2003 MS9 apresentou a menor amplitude o que dificultou o cálculo do seu período. Vale aqui ser ressaltado que todos os períodos foram publicados em MICHIMANI *et al.* (2022) e MICHIMANI *et al.* (2023) dados no Apêndice B.

Os parâmetros $G1$ e $G2$ obtidos do ajuste da curva de fase, juntamente com o albedo e a taxonomia, têm sido estudados visando obter informações adicionais sobre a composição dos pequenos corpos. Nesse contexto, SHEVCHENKO *et al.* (2016), utilizando dados próprios e da literatura, analisaram objetos selecionados do Cinturão Principal de diferentes tipos taxonômicos, com o objetivo de investigar possíveis correlações. Os autores identificaram uma forte correlação linear (coeficiente de correlação de

0,95), previamente observada por MUINONEN *et al.* (2010), entre G_1 e G_2 dada por $G_2 = 0,535(\pm 0,011) - 0,635(\pm 0,020)G_1$, mas excluindo os tipos E e D do ajuste. A partir da análise realizada, SHEVCHENKO *et al.* (2016) concluíram que os parâmetros G_1 e G_2 não podem ser utilizados para definir a classe taxonômica de um objeto, mas permitem separar classes de albedo similar. Outra forma de estudar o comportamento da curva de fase é por meio da amplitude do efeito de oposição. No trabalho de BELSKAYA e SHEVCHENKO (2000) são apresentadas algumas técnicas de análise de curvas de fase, e uma delas é a forma como a amplitude do efeito de oposição se comporta em relação ao albedo de acordo com a classe taxonômica. Utilizando a metodologia abordadas pelos autores, o cálculo da amplitude do efeito de oposição pode ser feito pela seguinte equação:

$$AOE = M(\alpha = 0,3^\circ) - M(\text{linear}), \quad (3.5)$$

que é definida como o aumento relativo de magnitude em um ângulo de fase de $0,3^\circ$ ($M(\alpha = 0,3^\circ)$) em comparação com a extrapolação da parte linear da curva ($M(\text{linear})$), com a extrapolação da parte linear variando de acordo com a referência utilizada. Como a região do efeito de oposição é definida como a parte não linear da curva de fase, o ângulo de fase que indica o início desse comportamento varia de acordo com alguns autores ($\alpha < 7^\circ$, MUINONEN *et al.* (2010), $\alpha < 6^\circ$, CARBOGNANI *et al.* (2019), $\alpha < 5^\circ$, BELSKAYA e SHEVCHENKO (2000)). Dessa forma, BELSKAYA e SHEVCHENKO (2000) utilizaram dados para 33 asteroides com taxonomia, albedo e curvas de fase bem determinados, e analisaram a relação da amplitude do efeito de oposição versus o albedo, como mostra a Figura 3.21, encontrando que a amplitude do efeito de oposição diminui tanto para objetos escuros, das classes C e D, quanto para objetos de alto albedo, classe E. Por outro lado, a maior amplitude do efeito de oposição ocorre com objetos de albedo moderado, cerca de 20%, ou seja, das classes S e M. Isso mostra que os objetos se agrupam em regiões específicas no gráfico de acordo com a classe taxonômica variando de uma forma não monotônica.

Entretanto, para utilizar essa metodologia é necessário ter disponibilizado os dados que compõem a curva de fase, para assim realizar uma extrapolação da parte linear. Contudo, com o uso do modelo de três parâmetros $H - G_1 - G_2$ podemos utilizar uma relação entre os parâmetros de inclinação da curva, desenvolvida por MUINONEN *et al.* (2010), e encontrar a amplitude do efeito de oposição a partir da equação 3.6:

$$\zeta - 1 = \frac{1 - G_1 - G_2}{G_1 + G_2} \quad (3.6)$$

Onde $\zeta - 1$ é a amplitude do efeito de oposição e ζ é o chamado *enhancement factor*. Dessa forma, é possível comparar a amplitude do efeito de oposição de nossos dados com dados da literatura que possuam curvas de fase determinadas com o ajuste de três parâmetros. Portanto, com o objetivo de realizar uma abordagem mais completa de nossas

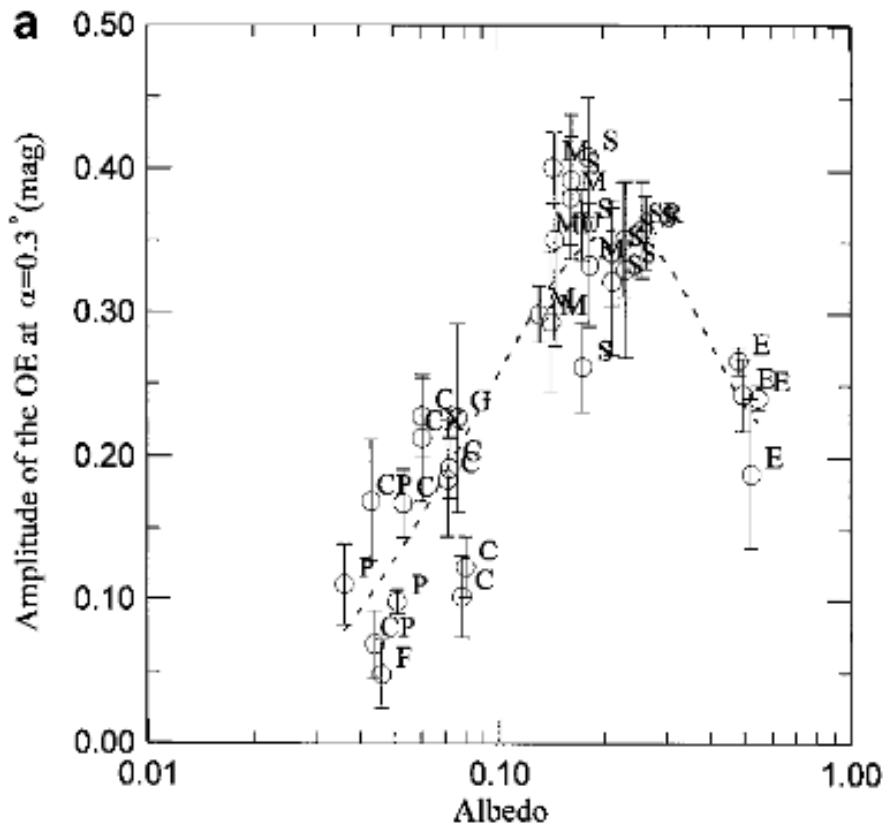


Figura 3.21: Dependências do valor do efeito de oposição calculado como o aumento relativo da magnitude em $\alpha = 0,3^\circ$ em relação á extrapolação da parte linear da curva de fase (a) e como a razão entre a intensidade em $\alpha = 0,3^\circ$ e aquela em $\alpha < 5^\circ$ (b) versus albedo para asteroides de vários tipos. Figura retirada de BELSKAYA e SHEVCHENKO (2000).

curvas de fase, primeiramente analisaremos o comportamento no espaço de fase $G1$ vs $G2$, e posteriormente a distribuição da amplitude do efeito de oposição de acordo com o albedo.

Na Figura 3.22a é apresentado o espaço $G1$ vs $G2$ para os dados de SHEVCHENKO *et al.* (2016), representados por pontos em cinza, e aqueles dos MC aqui obtidos, pontos coloridos, juntamente com a classe taxonômica de cada objeto. A linha tracejada representa o ajuste mencionado acima, que não inclui os objetos das classes E e D. Podemos notar que apenas alguns valores encontrados para os MC seguem a correlação encontrada por SHEVCHENKO *et al.* (2016). É o caso dos objetos (18284) Tsereteli e (93751) 2000 WH1, ambos da classe D, assim como o objeto (43780) 1998 HH52, classe S. No entanto, o objeto (133090) 2003 MS9, também classificado como D, está localizado mais próximo da região dos S. Por outro lado, os quatro objetos do tipo Q, (19877) 9086 P-L, (20958) A900MA, (49952) 1999 XH212 e (351068) 2003 TS13, se encontram bem espalhados e longe da região dos tipos S. O mesmo ocorre com os objetos (47834) 2000 EN114, tipo L, (27995) 1997 WL2, tipo S, e (20786) 2000 RG62, tipo C.

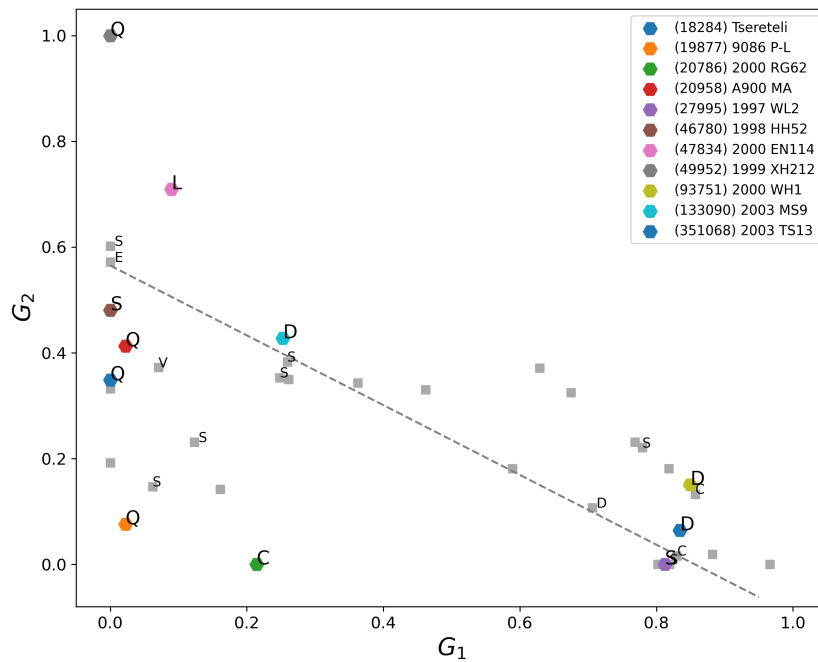
Para melhor entender nossos resultados, resolvemos também analisar a amplitude do efeito de oposição para aqueles MC que tem albedo dado na literatura. Na figura 3.22a os

MC são representados por pontos coloridos enquanto os dados de BELSKAYA e SHEVCHENKO (2000) em cinza. Novamente, alguns de nossos MC seguem as tendências descritas por BELSKAYA e SHEVCHENKO (2000) e outros não. Vale mencionar o caso do MC (49952) 1999 XH212, classificado como do tipo Q, que, assim como no espaço $G1$ vs $G2$, se localiza muito longe dos demais objetos das classes S e M. Isso é facilmente explicado verificando sua curva de fase (3.12c) a qual apresenta um ajuste muito ruim, apesar de ter uma boa cobertura em angulo de fase, devido provavelmente a uma amplitude da curva de luz muito grande. Logo, os valores do ajuste devem estar errados e mais dados são necessários. É também interessante o caso do MC (47834) 200 EN114, classificado como do tipo L e com albedo relativamente baixo (0,199), mas que tanto na Fig. 3.22a quanto Fig. 3.22b, aparece com valores de $G1$, $G2$ e amplitude do efeito de oposição mais compatíveis com objetos da classe E. Vale aqui ressaltar que a curva de fase deste objeto tem magnitudes apenas na região linear (e poucos!) sem valores na região do efeito de oposição.

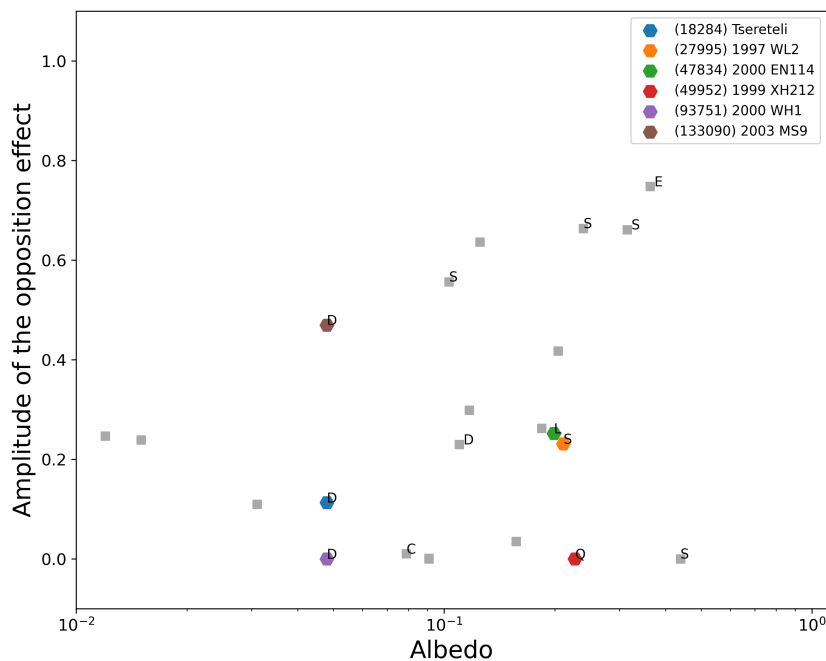
Recentemente ARCOVERDE *et al.* (2023) analisaram uma grande amostra de curvas de fase de NEO mostrando que não apresentam as correlações apresentadas por SHEVCHENKO *et al.* (2016). A principal conclusão desse trabalho foi de que as diferenças ocorrem por se tratar de amostras com objetos de tamanho muito distinto. No caso dos objetos do Cinturão Principal analisados por SHEVCHENKO *et al.* (2016) o tamanho médio foi de 94km enquanto os NEOs têm diâmetro na ordem de 1km e nossos MCs em torno de 3,3km. Ou seja, o tamanho dos MCs é mais compatível com aquele dos NEOs do que com os objetos do Cinturão Principal. Portanto, resolvemos comparar os nossos resultados utilizando os dados de NEOs apresentados em IEVA *et al.* (2022) e ARCOVERDE *et al.* (2023) para explorar as dependências em $G1$, $G2$ e albedo.

Na Figura 3.23a, é mostrado o espaço $G1$ vs $G2$ com os dados dos NEOs, representados por pontos em cinza e, quando disponível, sua classe taxonômica, e os nossos MCs, representados por pontos coloridos. A linha tracejada representa o ajuste linear dado em SHEVCHENKO *et al.* (2016), incluída aqui apenas para fins de comparação. Conforme pode ser observado, a maioria dos NEOs assim como dos MCs está bem espalhada em relação à correlação obtida com objetos do Cinturão Principal. O mesmo se aplica para o gráfico amplitude do efeito de oposição vs. albedo, Figura 3.23b. Ao compararmos nossos dados com os dados disponíveis dos NEOs notamos, primeiramente, a falta de informação disponível, o que torna difícil chegar a qualquer conclusão. Claramente a amostra de objetos de tamanho menor do que 5km, é ainda muito pequena impossibilitando obter conclusões definitivas, mas tudo indica que deve existir uma dependência no tamanho para o caso dos ajustes das curvas de fase. Outra possibilidade é de essa diferença seja resultante de efeitos não gravitacionais que afetam a superfícies desses corpos durante sua migração para o Sistema Solar interno.

Dentre os dezesseis objetos estudados, determinamos a classificação taxonômica, uti-



(a)



(b)

Figura 3.23: (a) Relação dos parâmetros G_1 e G_2 com base em SHEVCHENKO *et al.* (2016). (b) Dependência da amplitude do efeito de oposição no albedo com base em BELSKAYA e SHEVCHENKO (2000). Em ambos os gráficos, os pontos cinzas representam dados de NEOs recuperados de ARCOVERDE *et al.* (2023) e IEVA *et al.* (2022).

lizando o espectro fotométrico, para 11 MCs. Destes, quatro objetos foram classificados como da classe Q, (19877) 9086 PL, (20958) A900 MA, (49952) 1999 XH212 e (351068) 2003 TS13, três objetos da classe D, (18284) Tsereteli, (93751) 2000 WH1 e (133090) 2003 MS9, dois objetos do tipo S (27995) 1997 WL2 e (46780) 1998 HH52. Os MCs (20786) 2000 RG62 e (47834) 2000 EN114 foram classificados como da classe C e L, respectivamente. Apesar da pequena amostra, a qual impossibilita qualquer estudo estatístico confiável, podemos dizer que foi encontrado um número bastante significativo de objetos da classe D, o que não seria esperado. Vale mencionar que em BINZEL *et al.* (2019) foram identificados menos do que 10 MC do tipo D numa amostra de 363 objetos, ou seja, da ordem de 3%. Por outro lado, em CARRY *et al.* (2016b), foram encontrados 24 MC do tipo D numa amostra de 206 objetos, ou seja, mais do que 10%. Essas percentagens são bem menores do que em nossa amostra onde cerca de 40% dos MC são do tipo D. Entretanto, se considerarmos que os objetos (18284) Tsereteli e (93751) 2000 WH1, classificados como tipo D, apresentam grandes erros no filtro z o que poderia levar a uma classificação incorreta, então nossos resultados se tornam mais compatíveis com aqueles dos demais autores. Claro que, conforme já mencionado acima, estamos lidando com estatística de pequenos números, a qual não tem confiabilidade nenhuma. Por fim, vale mencionar que em nossa análise espectroscópica de pequenos NEOs (cap. 2) também encontramos uma quantidade superior ao esperado de objetos do tipo D. Essas descobertas precisam ser melhor quantificadas já que podem ter implicações importantes sobre o transporte de material orgânico para a Terra.

Capítulo 4

Conclusões e perspectivas

O principal objetivo do presente estudo foi obter uma melhor compreensão das similaridades e/ou diferenças presentes entre as populações de objetos em órbita próxima da Terra (NEOs) e de cruzadores da órbita de Marte (MC), através da determinação de algumas propriedades físicas para amostras selecionadas de objetos. Para tanto foram utilizadas tanto observações espectroscópicas em telescópio de médio porte (4m, SOAR, Chile) quanto observações fotométricas, em telescópio dedicado de pequeno porte (1m, OASI, Brasil). No caso das observações espectroscópicas, estas tiveram como objetivo a determinação da composição superficial, ou classificação taxonômica, de pequenos NEOs. As observações fotométricas, por outro lado, permitiram determinar o espectro fotométrico, a curva de luz e a curva de fase de MC obtendo assim uma caracterização tanto da composição superficial, quanto da rotação, da magnitude absoluta e da estrutura da superfície.

Pela primeira vez foram obtidos os espectros e a classificação taxonômica para 43 pequenos NEOs (Capítulo 2), com diâmetro entre 200 e 400 metros. Isso foi possível graças à metodologia adotada de observar estes objetos logo após sua descoberta, quando a sua aproximação com a Terra os torna suficientemente brilhantes, magnitudes visuais entre 19 e 20, para ser possível obter seu espectro com um sinal/ruído suficiente para sua classificação taxonômica. É importante ressaltar que nesta faixa de tamanhos, estamos observando os menores corpos do Sistema Solar como um todo. Menor do que estes, apenas os meteoros os quais, entretanto, por falta de previsibilidade, não permitem realizar observações continuadas de um mesmo objeto. A classificação taxonômica da nossa amostra de NEOs revelou uma abundância de composições consideradas “raras” no Cinturão Principal, em particular, das classes A e D. Esse resultado pode indicar uma distribuição de composições distinta entre os NEOs e os objetos do Cinturão Principal, considerado a região de proveniência dos NEOs. Outra possibilidade é de que a distribuição de composição seja dependente do tamanho. Como nossas técnicas observacionais ainda não permitem observar uma amostra significativa de corpos com diâmetro de centenas de metros no Cinturão Principal, é possível que as composições “raras” estejam presentes, mas apenas

nos menores corpos, impossíveis de serem observados. Isso indicaria que a distribuição de composições depende do tamanho dos objetos da amostra. Vale ser ressaltado que resultado similar foi obtido em ARCOVERDE *et al.* (2023) através da análise de curvas de fase e por PERNA *et al.* (2018) em uma amostra de também pequenos NEOs.

No que se refere às observações fotométricas de MC (Capítulo 3), estas permitiram a determinação de diversas propriedades físicas para uma amostra de 16 objetos. Neste caso, o diâmetro médio dos objetos da amostra foi superior a 3 quilômetros, o qual é grande, quando comparado com os NEOs, mas é pequeno para o Cinturão Principal. Para cada objeto tentamos obter sua curva de luz, para derivar o período de rotação e indicação da forma, sua curva de fase, para obter a magnitude absoluta e indicação sobre as propriedades superficiais e, por fim, seu espectro fotométrico, em quatro filtros, permitindo ter sua classificação taxonômica. Infelizmente, não foi possível obter todo o conjunto de propriedades para toda a amostra, mas resultados importantes foram alcançados. Em particular observamos que a distribuição de composições é similar à da região interna do Cinturão Principal, reforçando a hipótese de ser seu local de origem, assim como também se assemelha à da população dos NEOs, com um número significativo de objetos da classe D (3 objetos). Ao comparar os MCs com a população do Cinturão Principal, observamos que, pelo menos no espaço G1 vs G2 e no espaço albedo vs amplitude de efeito de oposição, eles são governados por diferentes correlações.

Como contribuição principal do presente trabalho devemos ressaltar a determinação de diversas propriedades físicas para objetos de populações que tem um enorme déficit com relação a sua descoberta. Ao todo analisamos 43 NEOs e 16 MC, que são amostras significativas para ambas as populações estudadas. Entretanto, essas amostras ainda são pequenas, em particular a dos MC, para poder obter resultados estatisticamente significativos e robustos sobre similaridades e diferenças que ajudem a correlacionar estas duas populações. Vale mencionar, que no caso dos NEOs, foram obtidos espectros para outros cerca de 50 pequenos objetos, ainda não reduzidos e analisados, os quais devem permitir confirmar os resultados aqui descritos e melhor entender a influência do tamanho na distribuição de composição destes corpos. Quanto aos MC, mais observações serão necessárias para complementar e aumentar a amostra aqui obtida. Entretanto, é importante ressaltar de que os resultados aqui apresentados representam um aumento significativo no conhecimento das propriedades físicas desta população e devem ser objeto de publicação por sua relevância.

Como em qualquer estudo observacional, não podemos deixar de mencionar as limitações encontradas. Claro a primeira sendo as condições meteorológicas adversas, isso particularmente no caso do OASI, e de observações que requerem longos intervalos de tempo ao longo de vários meses. No caso dos pequenos NEOs, a principal limitação a ser mencionada é quanto à disponibilidade de tempo em grandes/médios telescópios. Nosso projeto no SOAR, apesar de ter sido aprovado como “Long Program”, se estendeu por apenas por

26 noites, entre 2020 e 2023, resultando na observação de uma centena de pequenos NEOs. Comparado com os milhares de NEOs conhecidos, esse número ainda é muito pequeno!

Por fim, gostaríamos de enfatizar a importância da pesquisa contínua em pequenos corpos. A determinação das propriedades físicas destes objetos e suas distintas populações permite ter as condições de contorno para elaborar modelos cada vez mais aprimorados sobre a formação e evolução do Sistema Solar como um todo.

Referências Bibliográficas

- ALEXANDER, C. M. O., BOWDEN, R., FOGEL, M. L., et al., 2012, “The Provenances of Asteroids, and Their Contributions to the Volatile Inventories of the Terrestrial Planets”, *Science*, v. 337, n. 6095, pp. 721–723. doi: 10.1126/science.1223474. Disponível em: <<https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.1223474>>.
- ALÍ-LAGOVA, V., DELBO’, M., 2017, “Sizes and albedos of Mars-crossing asteroids from WISE/NEOWISE data”, *Astron. Astrophys.*, 603:A55. doi: 10.1051/0004-6361/201629917.
- ARCOVERDE, P., RONDÓN, E., MONTEIRO, F., et al., 2023, “Physical properties of NEOs derived from their phase curves”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 523, n. 1 (jul.), pp. 739–757. doi: 10.1093/mnras/stad1486.
- BELSKAYA, I., SHEVCHENKO, V., 2000, “Opposition Effect of Asteroids”, *Icarus*, v. 147, n. 1, pp. 94–105. ISSN: 0019-1035. doi: <https://doi.org/10.1006/icar.2000.6410>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103500964108>>.
- BINZEL, R. P., REDDY, V., DUNN, T. L., 2015, “The Near-Earth Object Population: Connections to Comets, Main-Belt Asteroids, and Meteorites”. In: *Asteroids IV*, University of Arizona Press, pp. 243–256. doi: 10.2458/azu_uapress_9780816532131-ch013.
- BINZEL, R. P., DEMEO, F. E., TURTELBOOM, E. V., et al., 2019, “Compositional distributions and evolutionary processes for the near-Earth object population: Results from the MIT-Hawaii Near-Earth Object Spectroscopic Survey (MITH-NEOS)”, *Icarus*, v. 324 (maio), pp. 41–76. doi: 10.1016/j.icarus.2018.12.035.
- BINZEL, R., DEMEO, F., TURTELBOOM, E., et al., 2019, “Compositional distributions and evolutionary processes for the near-Earth object population: Results from the MIT-Hawaii Near-Earth Object Spectroscopic Survey (MITH-NEOS)”, *Icarus*, v. 324, pp. 41–76. ISSN: 0019-1035. doi: <https://doi.org/>

- 10.1016/j.icarus.2018.12.035. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103518302124>>.
- BOTTKE, W. F., MORBIDELLI, A., JEDICKE, R., et al., 2002, “Debiased Orbital and Absolute Magnitude Distribution of the Near-Earth Objects”, *Icarus*, v. 156, n. 2, pp. 399–433. ISSN: 0019-1035. doi: <https://doi.org/10.1006/icar.2001.6788>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103501967880>>.
- BUS, S. J., BINZEL, R. P., 2002, “Phase II of the Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey. A Feature-Based Taxonomy”, *Icarus*, v. 158, n. 1 (jul.), pp. 146–177. doi: 10.1006/icar.2002.6856.
- CARBOGNANI, A., CELLINO, A., CAMINITI, S., 2019, “New phase-magnitude curves for some main belt asteroids, fit of different photometric systems and calibration of the albedo - Photometry relation”, *Planetary and Space Science*, v. 169, pp. 15–34. ISSN: 0032-0633. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pss.2019.02.009>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003206331830285X>>.
- CARRY, B., SOLANO, E., EGGL, S., et al., 2016a, “Spectral properties of near-Earth and Mars-crossing asteroids using Sloan photometry”, *Icarus*, v. 268, pp. 340–354. ISSN: 0019-1035. doi: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.12.047>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103515006132>>.
- CARRY, B., SOLANO, E., EGGL, S., et al., 2016b, “Spectral properties of near-Earth and Mars-crossing asteroids using Sloan photometry”, *Icarus*, v. 268 (apr), pp. 340–354. doi: 10.1016/j.icarus.2015.12.047. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016%2Fj.icarus.2015.12.047>>.
- CARVANO, J. M., HASSELMANN, P. H., LAZZARO, D., et al., 2010, “SDSS-based taxonomic classification and orbital distribution of main belt asteroids”, *A&A*, v. 510, pp. A43. doi: 10.1051/0004-6361/200913322. Disponível em: <<https://doi.org/10.1051/0004-6361/200913322>>.
- COLVIN, T. J., CRANE, K., LAL, B., 2020, “Assessing the economics of asteroid-derived water for propellant”, *Acta Astronautica*, v. 176, pp. 298–305. ISSN: 0094-5765. doi: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.05.029>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S009457652030312X>>.
- DE LEÓN, J., LICANDRO, J., SERRA-RICART, M., et al., 2010, “Observations, compositional, and physical characterization of near-Earth and Mars-crosser

- asteroids from a spectroscopic survey”, *Astron. Astrophys.*, 517:A23. doi: 10.1051/0004-6361/200913852.
- DE PRA, M., LAZZARO, D., CARVANO, J., et al., 2013, “Minor Planet Observations [Y28 OASI, Nova Itacuruba]”, *Minor Planet Circulars*, 82716:4.
- DEMEO, F. E., CARRY, B., 2014, “Solar System evolution from compositional mapping of the asteroid belt”, *Nature*, v. 505, n. 7485 (jan.), pp. 629–634. doi: 10.1038/nature12908.
- DEMEO, F. E., CARRY, B., 2014, “Solar System evolution from compositional mapping of the asteroid belt”, *Nature*, v. 505, n. 7485 (jan), pp. 629–634. doi: 10.1038/nature12908. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/nature12908>>.
- DEMEO, F. E., CARRY, B., 2013, “The taxonomic distribution of asteroids from multi-filter all-sky photometric surveys”, *Icarus*, v. 226, n. 1 (set.), pp. 723–741. doi: 10.1016/j.icarus.2013.06.027.
- DEMEO, F., CARRY, B., 2013, “The taxonomic distribution of asteroids from multi-filter all-sky photometric surveys”, *Icarus*, v. 226, n. 1 (sep), pp. 723–741. doi: 10.1016/j.icarus.2013.06.027. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2013.06.027>>.
- DEMEO, F. E., BINZEL, R. P., SLIVAN, S. M., et al., 2009, “An extension of the Bus asteroid taxonomy into the near-infrared”, *Icarus*, v. 202, n. 1, pp. 160–180. ISSN: 0019-1035. doi: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2009.02.005>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103509000554>>.
- DEMEO, F. E., BURT, B. J., MARSSET, M., et al., 2022, “Connecting asteroids and meteorites with visible and near-infrared spectroscopy”, *Icarus*, 380:114971. doi: 10.1016/j.icarus.2022.114971.
- DEVOGÉLE, M., MOSKOVITZ, N., THIROUIN, A., et al., 2019, “Visible Spectroscopy from the Mission Accessible Near-Earth Object Survey (MANOS): Taxonomic Dependence on Asteroid Size”, *The Astronomical Journal*, v. 158, n. 5 (oct), pp. 196. doi: 10.3847/1538-3881/ab43dd. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.3847/1538-3881/ab43dd>>.
- ELVIS, M., 2013, “Prospecting Asteroid Resources”. In: Badescu, V. (Ed.), *Asteroids: Prospective Energy and Material Resources*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 81–129, Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-642-39244-3. doi: 10.1007/978-3-642-39244-3_4.

- EMEL'YANENKO, V. V., POPOVA, O. P., CHUGAI, N. N., et al., 2013, “Astronomical and physical aspects of the Chelyabinsk event (February 15, 2013)”, *Solar System Research*, v. 47, n. 4, pp. 240–254. doi: 10.1134/S0038094613040114. Disponível em: <<https://doi.org/10.1134/S0038094613040114>>.
- GAFFEY, M. J., CLOUTIS, E. A., KELLEY, M. S., et al., 2002, “Mineralogy of Asteroids”. In: *Asteroids III*, University of Arizona Press, pp. 183–204.
- GLADMAN, B., MICHEL, P., FROESCHLÉ, C., 2000, “The Near-Earth Object Population”, *Icarus*, v. 146, n. 1, pp. 176–189. ISSN: 0019-1035. doi: <https://doi.org/10.1006/icar.2000.6391>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103500963917>>.
- GRADIE, J., TEDESCO, E., 1982, “Compositional Structure of the Asteroid Belt”, *Science*, v. 216, n. 4553 (jun.), pp. 1405–1407. doi: 10.1126/science.216.4553.1405.
- GRANVIK, M., MORBIDELLI, A., JEDICKE, R., et al., 2016, “Super-catastrophic disruption of asteroids at small perihelion distances”, *Nature*, v. 530, n. 7590 (fev.), pp. 303–306. doi: 10.1038/nature16934.
- GRANVIK, M., MORBIDELLI, A., JEDICKE, R., et al., 2018, “Debiased orbit and absolute-magnitude distributions for near-Earth objects”, *Icarus*, v. 312 (set.), pp. 181–207. doi: 10.1016/j.icarus.2018.04.018.
- GREENSTREET, S., NGO, H., GLADMAN, B., 2012, “The orbital distribution of Near-Earth Objects inside Earth’s orbit”, *Icarus*, v. 217, n. 1, pp. 355–366. ISSN: 0019-1035. doi: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2011.11.010>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103511004374>>.
- HAPKE, B., 1990, “Coherent backscatter and the radar characteristics of outer planet satellites”, *Icarus*, v. 88, n. 2 (dez.), pp. 407–417. doi: 10.1016/0019-1035(90)90091-M.
- HAPKE, B., 1993, *Theory of reflectance and emittance spectroscopy*. Cambridge, Massachusetts, Cambridge University Press.
- HAPKE, B., 2002, “Bidirectional Reflectance Spectroscopy. 5. The Coherent Backscatter Opposition Effect and Anisotropic Scattering”, *Icarus*, v. 157, n. 2 (jun.), pp. 523–534. doi: 10.1006/icar.2002.6853.
- HARRIS, A. W., LAGERROS, J. S. V., 2002, “Asteroids in the Thermal Infrared”. In: *Asteroids III*, University of Arizona Press, pp. 205–218.

- HARRIS, A. W., YOUNG, J. W., BOWELL, E., et al., 1989, “Photoelectric observations of asteroids 3, 24, 60, 261, and 863”, *Icarus*, v. 77, n. 1 (jan.), pp. 171–186. doi: 10.1016/0019-1035(89)90015-8.
- HARRIS, A. W., D’ABRAMO, G., 2015, “The population of near-Earth asteroids”, *Icarus*, v. 257, pp. 302–312. ISSN: 0019-1035. doi: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.05.004>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103515002067>>.
- HARRIS, A. W., HARRIS, A. W., 1997, “On the Revision of Radiometric Albedos and Diameters of Asteroids”, *Icarus*, v. 126, n. 2, pp. 450–454. ISSN: 0019-1035. doi: <https://doi.org/10.1006/icar.1996.5664>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001910359695664X>>.
- HASEGAWA, S., DEMEO, F. E., MARSSET, M., et al., 2022a, “Spectral Evolution of Dark Asteroid Surfaces Induced by Space Weathering over a Decade”, *The Astrophysical Journal Letters*, v. 939, n. 1 (oct), pp. L9. doi: 10.3847/2041-8213/ac92e4. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.3847/2041-8213/ac92e4>>.
- HASEGAWA, S., MARSSET, M., DEMEO, F. E., et al., 2022b, “The Appearance of a "Fresh" Surface on 596 Scheila as a Consequence of the 2010 Impact Event”, *The Astrophysical Journal Letters*, v. 924, n. 1 (jan), pp. L9. doi: 10.3847/2041-8213/ac415a. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.3847/2041-8213/ac415a>>.
- HOLSAPPLE, K. A., 2007, “Spin limits of Solar System bodies: From the small fast-rotators to 2003 EL61”, *Icarus*, v. 187, n. 2, pp. 500–509. ISSN: 0019-1035. doi: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2006.08.012>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103506002776>>.
- IEVA, S., DOTTO, E., PERNA, D., et al., 2014, “Low delta-V near-Earth asteroids: A survey of suitable targets for space missions”, *A&A*, v. 569 (sep), pp. A59. doi: 10.1051/0004-6361/201322283.
- IEVA, S., DOTTO, E., EPIFANI, E. M., et al., 2018, “Photometric survey of 67 near-Earth objects”, *A&A*, v. 615, pp. A127. doi: 10.1051/0004-6361/201732154. Disponível em: <<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201732154>>.
- IEVA, S., DOTTO, E., MAZZOTTA EPIFANI, E., et al., 2020, “Extended photometric survey of near-Earth objects”, *Astron. Astrophys.*, 644:A23. doi: 10.1051/0004-6361/202038968.

- IEVA, S., ARCOVERDE, P., RONDÓN, E., et al., 2022, “A comprehensive study of the opposition effect on 15 NEOs”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 513, n. 2 (jun.), pp. 3104–3112. doi: 10.1093/mnras/stac1117.
- KAASALAINEN, M., MOTTOLA, S., FULCHIGNONI, M., 2002, “Asteroid Models from Disk-integrated Data”. In: *Asteroids III*, University of Arizona Press, pp. 139–150.
- LANTZ, C., BINZEL, R., DEMEO, F., 2018, “Space weathering trends on carbonaceous asteroids: A possible explanation for Bennu’s blue slope?” *Icarus*, v. 302, pp. 10–17. ISSN: 0019-1035. doi: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.11.010>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103517305845>>.
- LAZZARO, D., ANGELI, C., CARVANO, J., et al., 2004, “S3OS2: the visible spectroscopic survey of 820 asteroids”, *Icarus*, v. 172, n. 1, pp. 179–220. ISSN: 0019-1035. doi: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2004.06.006>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103504002003>>. Special Issue: Cassini-Huygens at Jupiter.
- MAINZER, A., GRAV, T., BAUER, J., et al., 2011, “NEOWISE Observations of Near-Earth Objects: Preliminary Results”, *Astrophys. J.*, 743(2):156. doi: 10.1088/0004-637X/743/2/156.
- MARCINIAK, A., ALÍ-LAGOVA, V., MÜLLER, T. G., et al., 2019, “Thermal properties of slowly rotating asteroids: results from a targeted survey”, *Astron. Astrophys.*, 625:A139. doi: 10.1051/0004-6361/201935129.
- MARSSET, M., DEMEO, F. E., BURT, B., et al., 2022, “The Debaised Compositional Distribution of MITHNEOS: Global Match between the Near-Earth and Main-belt Asteroid Populations, and Excess of D-type Near-Earth Objects”, *Astron. J.*, 163(4):165. doi: 10.3847/1538-3881/ac532f.
- MARTY, B., 2012, “The origins and concentrations of water, carbon, nitrogen and noble gases on Earth”, *Earth and Planetary Science Letters*, v. 313-314 (jan), pp. 56–66. doi: 10.1016/j.epsl.2011.10.040.
- MARTY, B., AVICE, G., SANO, Y., et al., 2016, “Origins of volatile elements (H, C, N, noble gases) on Earth and Mars in light of recent results from the ROSETTA cometary mission”, *Earth and Planetary Science Letters*, v. 441, pp. 91–102. ISSN: 0012-821X. doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.02.031>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012821X16300486>>.

- MESQUITA, W., 2022, *Estudo sobre a origem dos NEOs a partir da análise da distribuição de classes taxonômicas*. Tese de Mestrado, Observatório Nacional, feb.
- MICHEL, P., MIGLIORINI, F., MORBIDELLI, A., et al., 2000, “The Population of Mars-Crossers: Classification and Dynamical Evolution”, *Icarus*, v. 145, n. 2 (jun.), pp. 332–347. doi: 10.1006/icar.2000.6358.
- MICHIMANI, J., LAZZARO, D., RONDÓN, E., et al., 2022, “Photometry and Light-curve Analysis of Four Mars-crossing Asteroids”, *Minor Planet Bulletin*, v. 49, n. 4 (out.), pp. 272–273.
- MICHIMANI, J., LAZZARO, D., MONTEIRO, F., et al., 2023, “Photometry and Light-curve Analysis of Two Mars-Crossing Asteroids: (106848) 2000 YP16 and (133090) 2003 MS9”, *Minor Planet Bulletin*, v. 50, n. 3 (jul.), pp. 200–201.
- MIGLIORINI, F., MICHEL, P., MORBIDELLI, A., et al., 1998, “Origin of Multikilometer Earth- and Mars-Crossing Asteroids: A Quantitative Simulation”, *Science*, v. 281 (set.), pp. 2022. doi: 10.1126/science.281.5385.2022.
- MONTEIRO, F., SILVA, J. S., TAMAYO, F., et al., 2020, “Shape model and spin direction analysis of PHA (436724) 2011 UW158: a large superfast rotator”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 495, n. 4 (jul.), pp. 3990–4005. doi: 10.1093/mnras/staa1401.
- MORBIDELLI, A., BOTTKÉ, W. F., J., FROESCHLÉ, C., et al., 2002a, “Origin and Evolution of Near-Earth Objects”. In: *Asteroids III*, University of Arizona Press, pp. 409–422, a.
- MORBIDELLI, A., BOTTKÉ, W. F., J., FROESCHLÉ, C., et al., 2002b, “Origin and Evolution of Near-Earth Objects”. In: *Asteroids III*, University of Arizona Press, pp. 409–422, b.
- MUINONEN, K., PIIRONEN, J., SHKURATOV, Y. G., et al., 2002, “Asteroid Photometric and Polarimetric Phase Effects”. In: *Asteroids III*, University of Arizona Press, pp. 123–138.
- MUINONEN, K., BELSKAYA, I. N., CELLINO, A., et al., 2010, “A three-parameter magnitude phase function for asteroids”, *Icarus*, v. 209, n. 2 (out.), pp. 542–555. doi: 10.1016/j.icarus.2010.04.003.
- MUINONEN, K., BELSKAYA, I. N., CELLINO, A., et al., 2010, “A three-parameter magnitude phase function for asteroids”, *Icarus*, v. 209, n. 2, pp. 542–555. ISSN: 0019-1035. doi: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2010.04.003>.

Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001910351000151X>>.

- NEMCHINOV, I., SHUVALOV, V., SVETSOV, V., 2008, “Main Factors of Hazards Due to Comets and Asteroids”. In: Adushkin, V., Nemchinov, I. (Eds.), *Catastrophic Events Caused by Cosmic Objects*, Springer Netherlands, pp. 1–89, Dordrecht. ISBN: 978-1-4020-6452-4. doi: 10.1007/978-1-4020-6452-4_1.
- NUGENT, C. R., MAINZER, A., MASIERO, J., et al., 2015, “NEOWISE Reactivation Mission Year One: Preliminary Asteroid Diameters and Albedos”, *Astrophys. J.*, 814(2):117. doi: 10.1088/0004-637X/814/2/117.
- PERNA, D., BARUCCI, M., FULCHIGNONI, M., et al., 2018, “A spectroscopic survey of the small near-Earth asteroid population: Peculiar taxonomic distribution and phase reddening”, *Planetary and Space Science*, v. 157 (aug), pp. 82–95. doi: 10.1016/j.pss.2018.03.008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016%2Fj.pss.2018.03.008>>.
- POPESCU, M., BIRLAN, M., NEDELCU, D. A., 2012, “Modeling of asteroid spectra - M4AST”, *A&A*, v. 544, pp. A130. doi: 10.1051/0004-6361/201219584. Disponível em: <<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201219584>>.
- POPESCU, M., VADUVESCU, O., DE LEÓN N, J., et al., 2019, “Near-Earth asteroids spectroscopic survey at Isaac Newton Telescope”, *Astron. Astrophys.*, v. 627 (jul), pp. A124. doi: 10.1051/0004-6361/201935006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1051%2F0004-6361%2F201935006>>.
- PRAVEC, P., HARRIS, A. W., 2000, “Fast and Slow Rotation of Asteroids”, *Icarus*, v. 148, n. 1 (nov.), pp. 12–20. doi: 10.1006/icar.2000.6482.
- RONDÓN, E., LAZZARO, D., RODRIGUES, T., et al., 2020, “OASI: A Brazilian Observatory Dedicated to the Study of Small Solar System Bodies—Some Results on NEO’s Physical Properties”, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 132(1012):065001. doi: 10.1088/1538-3873/ab87a7.
- RONDÓN-BRICEÑO, E., CARVANO, J. M., LORENZ-MARTINS, S., 2017, “A study of the effects of faint dust comae on the spectra of asteroids”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 468, n. 2 (03), pp. 1556–1566.
- SANCHEZ, J.-P., MCINNES, C. R., 2013, “Available Asteroid Resources in the Earth’s Neighbourhood”. In: Badescu, V. (Ed.), *Asteroids: Prospective Energy and Material Resources*, Springer Berlin, Heidelberg, pp. 439–458. doi: 10.1007/978-3-642-39244-3_18.

- SANCHEZ, J. A., MICHELSEN, R., REDDY, V., et al., 2013, “Surface composition and taxonomic classification of a group of near-Earth and Mars-crossing asteroids”, *Icarus*, v. 225, n. 1, pp. 131–140. ISSN: 0019-1035. doi: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2013.02.036>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0019103513001334>>.
- SÁNCHEZ, P., SCHEERES, D. J., 2020, “Cohesive regolith on fast rotating asteroids”, *Icarus*, 338:113443. doi: [10.1016/j.icarus.2019.113443](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2019.113443).
- SERGEYEV, A. V., CARRY, B., 2021, “A million asteroid observations in the Sloan Digital Sky Survey”, *A&A*, v. 652, pp. A59. doi: [10.1051/0004-6361/202140430](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140430). Disponível em: <<https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140430>>.
- SHEVCHENKO, V. G., BELSKAYA, I. N., MUINONEN, K., et al., 2016, “Asteroid observations at low phase angles. IV. Average parameters for the new H, G1, G2 magnitude system”, *Planetary and Space Science*, v. 123, pp. 101–116. ISSN: 0032-0633. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pss.2015.11.007>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032063315003566>>. SI:ACM Interrelated.
- SIMION, N. G., POPESCU, M., LICANDRO, J., et al., 2021, “Spectral properties of near-Earth objects with low-Jovian Tisserand invariant”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 508, n. 1 (09), pp. 1128–1147. ISSN: 0035-8711. doi: [10.1093/mnras/stab2561](https://doi.org/10.1093/mnras/stab2561). Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/mnras/stab2561>>.
- STUART, J. S., BINZEL, R. P., 2004, “Bias-corrected population, size distribution, and impact hazard for the near-Earth objects”, *Icarus*, v. 170, n. 2 (ago.), pp. 295–311. doi: [10.1016/j.icarus.2004.03.018](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2004.03.018).
- TRICARICO, P., 2017, “The near-Earth asteroid population from two decades of observations”, *Icarus*, v. 284 (mar), pp. 416–423. doi: [10.1016/j.icarus.2016.12.008](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.12.008). Disponível em: <<https://doi.org/10.1016%2Fj.icarus.2016.12.008>>.
- VERNAZZA, P., BINZEL, R. P., ROSSI, A., et al., 2009, “Solar wind as the origin of rapid reddening of asteroid surfaces”, *Nature*, v. 458, n. 7241 (abr.), pp. 993–995. doi: [10.1038/nature07956](https://doi.org/10.1038/nature07956).
- WARNER, B. D., HARRIS, A. W., PRAVEC, P., 2009, “The asteroid lightcurve database”, *Icarus*, v. 202, n. 1 (jul.), pp. 134–146. doi: [10.1016/j.icarus.2009.02.003](https://doi.org/10.1016/j.icarus.2009.02.003).
- WLODARCZYK, I., 2021, “Orbital evolution of Mars-crossing asteroids”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 500, n. 3 (jan.), pp. 3569–3578. doi: [10.1093/mnras/staa3566](https://doi.org/10.1093/mnras/staa3566).

Apêndice A

Tabelas

Tabela A.1: Principais elementos orbitais dos NEOs observados na época 2459396,5 (2021-Jul-01,0) TDB. Fonte: JPL Small-Body Database Browser.

Objeto	e	a [UA]	q [UA]	i [°]	Classe orbital
2019 GQ3	0,42234	1,62862	0,94078	14,87276	Apollo
2020 ME5	0,47382	2,19446	1,15468	6,75888	Amor
2020 OC8	0,43818	1,91321	1,07487	4,85868	Amor
2020 RM6	0,61052	2,63519	1,02634	3,33657	Amor
2020 RP4	0,35109	1,66886	1,08293	7,57376	Amor
2020 SK5	0,63550	2,68708	0,97943	2,82613	Apollo
2020 TG3	0,61963	2,84499	1,08212	9,10756	Amor
2020 TG4	0,55239	2,68686	1,20265	5,32758	Amor
2020 TT7	0,32837	1,70216	1,14321	6,85288	Amor
2020 UZ3	0,57968	2,16660	0,91064	20,38463	Apollo
2020 WZ1	0,37186	1,04145	0,65417	45,23939	Apollo
2020 XK7	0,55792	2,01345	0,89009	8,06860	Apollo [PHA]
2021 BA1	0,52673	2,32006	1,09799	1,26340	Amor
2021 CN4	0,44668	1,93666	1,07157	9,88131	Amor
2021 CX5	0,38237	1,62549	1,00394	1,79353	Apollo
2021 GM4	0,35246	1,52655	0,98849	5,23717	Apollo [PHA]
2021 GX16	0,54916	2,65586	1,19736	5,82073	Amor
2021 JH2	0,52700	2,17732	1,02986	6,59513	Amor
2021 JJ9	0,39086	1,87872	1,14439	5,24906	Amor
2021 JT5	0,60450	2,63822	1,04341	14,43668	Amor
2021 JW17	0,49744	2,25734	1,13444	21,11669	Amor
2021 KD1	0,57690	2,86081	1,21040	16,89160	Amor
2021 KQ7	0,49412	2,37882	1,20337	12,64742	Amor
2021 LH9	0,44918	2,16655	1,19336	6,33550	Amor

Continuação da Tabela A.1

Objeto	e	a [UA]	q [UA]	i [°]	Classe orbital
2021 LN15	0,47263	2,26496	1,19445	7,84515	Amor
2021 MG1	0,65386	2,76040	0,95548	24,26078	Apollo [PHA]
2021 MO1	0,55988	2,81126	1,23729	14,46963	Amor
2021 NF1	0,39851	2,13580	1,28466	6,40194	Amor
2021 NK3	0,40702	2,14881	1,27420	7,35003	Amor
2021 NM39	0,48191	2,03792	1,05580	4,73500	Amor
2021 OX1	0,53550	2,77697	1,28988	6,86432	Amor
2021 PC10	0,26329	1,51751	1,11796	11,13409	Amor
2021 PE10	0,46721	2,16991	1,15610	4,82142	Amor
2021 PR2	0,43110	1,88680	1,07339	4,44661	Amor
2021 PT6	0,61188	2,80567	1,08891	15,81512	Amor
2021 QB3	0,32533	1,47723	0,99664	6,48196	Apollo
2021 QK5	0,35062	1,95622	1,27031	15,61095	Amor
2021 RC10	0,57194	2,25888	0,96691	2,36397	Apollo
2021 SR3	0,50678	2,18451	1,07743	0,67014	Amor
2021 TJ4	0,45875	2,00987	1,08782	9,00140	Amor
2021 TV7	0,61684	2,84227	1,08903	2,15175	Amor
2021 UG3	0,38632	1,69800	1,04201	15,63976	Amor
2021 UU5	0,72573	1,92111	0,52689	44,93685	Apollo [PHA]
Fim da Tabela A.1					

Tabela A.2: Circunstâncias observacionais dos NEOs observados. A tabela lista para cada objeto: sua designação, a data e a hora de início (UT), a magnitude visual (APmag), a massa de ar (a-mass), a taxa angular de mudança em RA e DEC aparentes ($d(RA)/dt$, $d(Dec)/dt$), a análoga solar e sua massa de ar.

Objeto	Data UT _{començo}	APmag	a-mass	α [°]	$d(RA)/dt$ $d(DEC)/dt$	Exp. [s]	Análoga Solar (a-mass)
2019 GQ3	2020-out-11 08:43:11	19,090	2,166	30,1572	3,553 -222,810	1.200	HIP 94698 (1,046)
2020 ME5	2020-out-10 04:37:35,855	19,730	1,330	46,2403	93,352 18,94900	3x1.200	HIP 107095 (1,170)
2020 OC8	2020-nov-06 05:19:14,740	18,285	1,600	47,1265	245,708 -0,56041	1.200	HIP 118319 (1,080)
2020 RM6	2020-out-11 07:34:46,837	18,903	1,525	21,8043	753,779 485,6641	2x600	HIP 94698 (1,046)
2020 RP4	2020-out-11 03:50:14,644	19,980	1,600	12,8961	-10,729 222,4918	3x1.200	HIP 94698 (1,046)
2020 SK5	2020-out-11 01:20:19,925	20,105	1,370	13,1427	95,989 87,83817	3x1.200	HIP 94698 (1,046)
2020 TG3	2020-dez-19 08:03:03,034	20,464	1,163	40,8312	105,733 -26,8606	1.200	HIP 33033 (1,030)
2020 TG4	2021-fev-17 02:50:00,965	20,314	1,275	25,5446	55,522 4,815114	1.200	HIP 57366 (1,320)
2020 TT7	2020-dez-17 01:18:07,850	20,358	1,360	31,2868	38,543 27,18619	3x1.200	HIP 27779 (1,080)
2020 UZ3	2020-nov-06 03:17:51,120	18,912	1,088	40,4511	-215,067 142,6355	1.200	HIP 118319 (1,080)
2020 WZ1	2020-dez-17 03:48:17,350	19,908	1,270	16,8954	-194,083 -204,005	3x1.200	HIP 27779 (1,080)
2020 XK7	2021-fev-17 08:44:11,763	18,223	1,134	38,4382	158,974 -134,802	600	HIP 57366 (1,320)
2021 BA1	2021-mar-23 04:42:51,556	18,965	1,465	18,0050	209,766 -110,839	1.200	HIP 57833 (1,110)
2021 CN4	2021-mar-22 09:13:33,587	17,759	1,172	36,9586	123,1063 173,8004	1.200	HIP 71559 (1,270)
2021 CX5	2021-mar-22 00:58:05,052	18,061	1,077	43,6637	461,941 -711,033	1.200	HIP 71559 (1,270)
2021 GM4	2021-jun-12 23:55:58,928	20,28	1,960	109,0518	-178,037 -71,6313	1.200+900	HIP 78425 (1,17253)
2021 GX16	2021-jun-13 05:17:29,821	19,960	1,286	27,2948	97,668 0,394907	1.200	HIP 78425 (1,17253)
2021 JH2	2021-ago-16 08:35:58,392	16,491	1,039	66,2982	-155,704 377,9913	900	HIP 109675 (1,041)
2021 JJ9	2021-jun-14 05:58:42,731	19,313	1,232	20,2599	169,627 79,88961	900	HIP 78425 (1,17253)
2021 JT5	2021-jun-13 06:00:51,147	19,055	1,615	26,6521	2,823 -50,9849	2x1.200	HIP 78425 (1,17253)
2021 JW17	2021-jun-14 00:42:05,637	20,039	1,050	27,4253	-101,637 -106,062	900	HIP 78425 (1,17253)
2021 KD1	2021-jun-13 08:56:03,275	20,051	2,040	38,4981	101,761 -88,9644	2x600+900	HIP7 8425 (1,17253)
2021 KQ7	2021-ago-16 07:57:29,509	19,804	1,056	47,6158	42,859 47,90507	1.200	HIP 109675 (1,041)
2021 LH9	2021-set-26 00:00:46,485	19,488	1,360	34,6486	102,718 24,69725	2x1.200	HIP 106356 (1,423)
2021 LN15	2021-set-17 05:08:44,699	18,447	1,121	14,4805	25,710 112,7735	900	HIP 109675 (1,093)
2021 MG1	2021-set-02	19,454	1,096	39,6783	-64,088	1.200	HIP 15776

Continuação da Tabela A.2

Objeto	Data UT _{começo}	APmag	a-mass	α [°]	d(RA)/dt d(DEC)/dt	Exp. [s]	Análoga Solar (a-mass)
	04:10:19,720				36,52772		(1,090)
2021 MO1	2021-set-01	19,618	1,707	32,9860	63,787	1.200	HIP 9197
	01:16:48,811				46,57079		(1,791)
2021 NF1	2021-ago-17	18,468	1,120	6,9983	13,755	900	HIP 109675
	04:18:32,165				-50,3644		(1,093)
2021 NK3	2021-ago-17	20,117	1,375	20,5311	43,522	1.200	HIP 116262
	05:57:43,039				-27,9470		(1,330)
2021 NM39	2021-set-26	19,060	1,30	38,1553	1,093	2x1.200	HIP 106102
	04:49:02,560				-54,6026		(1,697)
2021 OX1	2021-set-26	19,780	1,461	30,9644	32,303	1.500	HIP 111838
	06:20:37,282				1,024326		(1,522)
2021 PC10	2021-set-27	20,031	1,220	36,2548	127,344	2x1.200	HIP 94154
	06:06:38,428				-113,683		(1,307)
2021 PE10	2021-set-26	19,331	1,190	41,2859	129,469	2x1.200	HIP 96379
	01:11:46,481				-7,42005		(1,428)
2021 PR2	2021-set-26	18,082	1,105	18,6029	290,643	2x900	HIP 111063
	03:32:25,026				12,47196		(1,034)
2021 PT6	2021-set-26	19,342	1,285	17,8461	116,130	2x1.500	HIP 4117
	07:07:12,464				-203,017		(1,402)
2021 QB3	2021-set-27	20,274	1,109	36,2755	-29,123	1.200	HIP 9496
	08:32:11,908				12,128910		(1,290)
2021 QK5	2021-set-27	19,293	1,475	39,6561	31,441	2x1.200	HIP 113688
	04:36:07,465				128,3874		(1,603)
2021 RC10	2021-set-27	20,167	1,780	17,4251	59,913	1.200	HIP 113688
	03:17:33,447				-26,2689		(1,603)
2021 SR3	2021-dez-01	18,553	1,390	13,0210	226,214	2x1.200	HIP 19767
	02:51:33,632				51,03979		(1,810)
2021 TJ4	2021-dez-02	19,123	1,155	38,8269	104,220	2x900	HIP 15776
	01:14:22,729				246,8394		(1,082)
2021 TV7	2021-dez-01	19,492	1,322	26,2510	259,361	1.200	HIP 9911
	02:06:38,066				25,25317		(1,157)
2021 UG3	2021-dez-03	20,614	1,321	17,2693	-39,561	1.800	HIP 16169
	02:29:10,852				128,1865		(1,100)
2021 UU5	2021-dez-03	18,749	1,361	54,2756	-426,824	1.200	HIP 8455
	03:32:31,932				173,4930		(1,240)
Fim da Tabela A.2							

Tabela A.3: Circunstâncias observacionais das curvas de luz observadas. Para cada asteroide é dado: a data de observação, a ascensão reta e declinação, a distância do asteroide à Terra (Δ) e ao Sol (r), a faixa de ângulos de fase (α) das observações, e a magnitude aparente (V).

Número	Nome	Data	A.R.	DEC	Δ	r	α	V
			[hr:mn:sg]	[dec am asec]	[UA]	[UA]	[°]	[mag]
(27995)	1997 WL2	2021 05 08	15 16 00,9	-15 04 35	0,826	1,834	2,4	16,4
		2021 05 09	15 14 54,8	-15 02 53	0,822	1,831	2,0	16,4
		2021 06 06	14 45 55,4	-14 39 18	0,797	1,744	17,8	16,9
		2021 06 07	14 45 13,3	-14 40 09	0,799	1,741	18,4	16,9
		2021 06 08	14 44 33,5	-14 41 10	0,801	1,738	19,0	16,9
		2021 06 09	14 43 56,0	-14 42 21	0,803	1,735	19,6	17,0
		2021 06 10	14 43 20,9	-14 43 42	0,805	1,732	20,2	17,0
(46780)	1998 HH52	2021 10 12	03 10 16,8	+16 38 41	0,746	1,681	17,9	16,1
		2021 10 13	03 09 37,7	+16 44 26	0,743	1,683	17,3	16,0
		2021 10 14	03 08 56,2	+16 50 06	0,740	1,684	16,6	16,0
(61343)	2000 PC5	2020 07 27	19 34 56,3	-22 48 57	0,664	1,670	7,5	16,4
		2020 07 28	19 34 18,2	-23 02 34	0,665	1,669	8,2	16,4
(106848)	2000 YP16	2021 01 16	08 29 43,4	+12 32 20	0,393	1,370	9,0	16,2
		2021 01 21	08 27 50,9	+11 53 05	0,383	1,364	6,4	16,0
		2021 02 14	08 20 37,6	+09 47 52	0,383	1,350	16,0	16,4
		2021 02 17	08 20 52,7	+09 39 13	0,389	1,351	17,9	16,5
(133090)	2003 MS9	2021 10 03	03 39 14,8	+21 04 56	0,619	1,489	29,8	17,3
		2021 10 04	03 39 48,1	+21 03 40	0,616	1,491	29,3	17,2
		2021 10 05	03 40 18,2	+21 02 11	0,614	1,493	28,8	17,2
		2021 10 07	03 41 08,4	+20 58 29	0,609	1,497	27,8	17,2
		2021 12 10	03 10 30,0	+15 49 00	0,780	1,712	15,9	17,6
		2021 12 11	03 10 23,6	+15 47 10	0,789	1,716	16,4	17,7
		2021 12 12	03 10 19,5	+15 45 33	0,798	1,720	16,9	17,7
(351068)	2003 TS13	2020 11 09	03 57 24,3	+20 33 58	0,720	1,696	8,5	17,1
		2020 11 16	03 52 13,9	+19 08 52	0,731	1,717	3,6	16,9
		2020 11 17	03 51 28,0	+18 56 50	0,733	1,721	2,9	16,9
		2020 11 18	03 50 42,2	+18 44 52	0,736	1,724	2,3	16,9
		2020 11 22	03 47 41,3	+17 58 05	0,749	1,737	1,3	16,8
		2020 12 16	03 36 06,8	+14 27 49	0,900	1,822	15,3	18,0

Fim da Tabela A.3

Tabela A.4: Circunstâncias observacionais e magnitudes derivadas dos espectros fotométricos. A tabela lista: o nome do objeto observado, a data e hora de início, o filtro (F), a magnitude instrumental (mag) e seu erro (Δmag), a magnitude média (\overline{mag}) e seu erro ($\overline{\Delta mag}$), a magnitude média calibrada ($\overline{mag_c}$) e seu erro ($\overline{\Delta mag_c}$), e o ângulo da fase solar (α) no instante inicial de observação.

Objeto	Data	UT	F	mag	Δmag	\overline{mag}	$\overline{\Delta mag}$	$\overline{mag_c}$	$\overline{\Delta mag_c}$	α [°]
(18284)	2022-04-05	01:18:48	g	20,8047	0,0413	20,4639	0,0310	18,2395	0,019	2,4
Tsereteli	2022-04-05	01:27:48	g	20,2924	0,0262					
	2022-04-05	01:39:39	g	20,2948	0,0254					
	2022-04-05	01:45:35	r	19,6909	0,0182	19,7174	0,0181	17,5735	0,016	
	2022-04-05	01:30:47	r	19,7009	0,0184					
	2022-04-05	01:42:37	r	19,7606	0,0178					
	2022-04-05	01:21:54	i	20,1338	0,0267	20,0829	0,0257	17,3415	0,020	
	2022-04-05	01:33:45	i	20,0415	0,0254					
	2022-04-05	01:45:35	i	20,0736	0,0251					
	2022-04-05	01:24:53	z	22,3512	0,1565	21,2948	0,0535	17,0615	0,045	
	2022-04-05	01:36:43	z	21,0688	0,0828					
	2022-04-05	01:48:34	z	20,4645	0,0623					
(19877)	2020-09-23	00:21:06	g	19,7365	0,0197	19,6995	0,0194	18,5923	0,021	12,5
9086 P-L	2020-09-23	00:31:37	g	19,7156	0,0235					
	2020-09-23	00:42:08	g	19,7088	0,0174					
	2020-09-23	00:52:39	g	19,6374	0,0170					
	2020-09-23	00:13:15	r	19,0893	0,0117	19,1540	0,0135	17,9513	0,021	
	2020-09-23	00:23:45	r	19,1752	0,0141					
	2020-09-23	00:34:16	r	19,1887	0,0156					
	2020-09-23	00:44:47	r	19,1630	0,0129					
	2020-09-23	00:15:52	i	19,5323	0,0172	19,5894	0,0184	17,8793	0,030	
	2020-09-23	00:26:23	i	19,6290	0,0198					
	2020-09-23	00:36:53	i	19,6535	0,0195					
	2020-09-23	00:47:24	i	19,5428	0,0172					
	2020-09-23	00:18:31	z	21,0199	0,0555	21,0767	0,0602	18,1243	0,104	
	2020-09-23	00:29:02	z	21,4027	0,0729					
	2020-09-23	00:39:33	z	21,1416	0,0570					
	2020-09-23	00:50:02	z	20,7427	0,0557					
	2020-09-25	00:35:23	g	19,4047	0,0179	19,4357	0,0174	18,4915	0,029	11,2
	2020-09-25	00:45:54	g	19,4851	0,0181					
	2020-09-25	00:56:24	g	19,4256	0,0168					
	2020-09-25	01:06:55	g	19,4274	0,0156					
	2020-09-25	00:38:02	r	18,8983	0,0107	18,9075	0,0102	17,8535	0,019	
	2020-09-25	00:48:33	r	18,9200	0,0104					
	2020-09-25	00:59:02	r	18,8866	0,0097					
	2020-09-25	01:09:32	r	18,9254	0,0101					
	2020-09-25	00:40:40	i	19,2581	0,0143	19,2750	0,0143	17,7265	0,024	
	2020-09-25	00:51:10	i	19,2878	0,0150					
	2020-09-25	01:01:41	i	19,2616	0,0141					
	2020-09-25	01:12:12	i	19,2928	0,0141					
	2020-09-25	00:43:19	z	20,5366	0,0480	20,3269	0,0435	17,2835	0,044	
	2020-09-25	00:53:49	z	20,3027	0,0397					
	2020-09-25	01:04:20	z	20,1366	0,0451					
	2020-09-25	01:14:49	z	20,3320	0,0414					
(20789)	2022-04-25	02:29:48	g	19,5392	0,0155	19,8757	0,0291	17,1953	0,014	14,2
2000 RG62	2022-04-25	02:36:21	g	19,4436	0,0133					
	2022-04-25	02:42:53	g	19,4509	0,0137					
	2022-04-25	02:49:26	g	21,0693	0,0740					
	2022-04-25	02:31:27	r	18,9832	0,0131	19,2168	0,0185	16,7033	0,018	
	2022-04-25	02:38:00	r	19,3153	0,0200					
	2022-04-25	02:44:32	r	19,1761	0,0170					

Continuação da Tabela A.4

Objeto	Data	UT	F	mag	Δmag	\overline{mag}	$\overline{\Delta mag}$	$\overline{mag_c}$	$\overline{\Delta mag_c}$	α [°]
	2022-04-25	02:51:04	r	19,3926	0,0239					
	2022-04-25	02:33:06	i	19,8087	0,0457	19,8335	0,0363	16,6933	0,030	
	2022-04-25	02:39:38	i	19,5013	0,0242					
	2022-04-25	02:46:11	i	20,0398	0,0370					
	2022-04-25	02:59:16	i	19,9844	0,0385					
	2022-04-25	02:47:50	z	21,2798	0,1490	20,6313	0,1040	16,6933	0,103	
	2022-04-25	02:54:22	z	20,5398	0,0976					
	2022-04-25	03:00:55	z	20,0743	0,0656					
	2022-04-27	05:03:49	g	20,5327	0,0325	20,4313	0,0318	17,1041	0,023	13,2
	2022-04-27	05:12:20	g	20,1556	0,0322					
	2022-04-27	05:20:50	g	20,4160	0,0314					
	2022-04-27	05:29:21	g	20,6212	0,0314					
	2022-04-27	05:05:57	r	20,1979	0,0257	19,5569	0,0162	16,5951	0,014	
	2022-04-27	05:14:28	r	19,4371	0,0142					
	2022-04-27	05:22:58	r	19,4766	0,0148					
	2022-04-27	05:31:29	r	19,1160	0,0103					
	2022-04-27	05:08:06	i	20,6309	0,0432	20,4165	0,0363	16,6771	0,038	
	2022-04-27	05:16:36	i	20,6060	0,0412					
	2022-04-27	05:25:07	i	20,0273	0,0270					
	2022-04-27	05:33:37	i	20,4018	0,0338					
	2022-04-27	05:18:45	z	21,3525	0,0734	21,2241	0,0838	16,5291	0,079	
	2022-04-27	05:35:45	z	21,0958	0,0942					
(20958)	2021-07-15	02:34:09	g	17,8884	0,0046	18,2417	0,0069	16,3373	0,011	9,0
A900 MA	2021-07-15	02:37:49	g	19,1033	0,0138					
	2021-07-15	02:44:19	g	17,8805	0,0042					
	2021-07-15	03:32:19	g	18,0991	0,0052					
	2021-07-15	02:39:17	r	17,2395	0,0029	17,4106	0,0068	15,617	0,007	
	2021-07-15	02:45:48	r	17,2352	0,0027					
	2021-07-15	03:33:48	r	17,6183	0,0039					
	2021-07-15	03:40:18	r	17,5495	0,0042					
	2021-07-15	06:20:56	i	18,5875	0,0066	19,4186	0,0170	15,4373	0,008	8,9
	2021-07-15	06:26:37	i	18,8190	0,0083					
	2021-07-15	06:33:08	i	19,7248	0,0165					
	2021-07-15	06:39:38	i	20,5331	0,0367					
	2021-07-15	06:28:25	z	20,2256	0,0280	20,9502	0,0536	15,5443	0,042	
	2021-07-15	06:34:56	z	21,9054	0,1052					
	2021-07-15	06:41:27	z	21,1456	0,0541					
	2021-07-15	06:47:57	z	20,5243	0,0274					
	2021-07-17	01:13:25	g	17,9054	0,0067	17,8464	0,0070	16,4104	0,012	8,0
	2021-07-17	01:19:15	g	17,8584	0,0072					
	2021-07-17	01:25:06	g	17,8145	0,0073					
	2021-07-17	01:30:57	g	17,8073	0,0071					
	2021-07-17	01:14:53	r	17,2563	0,0041	17,2351	0,0039	15,7444	0,008	
	2021-07-17	01:20:44	r	17,2283	0,0040					
	2021-07-17	01:26:34	r	17,2299	0,0039					
	2021-07-17	01:32:25	r	17,2259	0,0039					
	2021-07-17	01:16:22	i	17,6227	0,0067	17,6233	0,0068	15,5894	0,010	
	2021-07-17	01:22:12	i	17,6269	0,0071					
	2021-07-17	01:28:03	i	17,6168	0,0069					
	2021-07-17	01:33:53	i	17,6280	0,0065					
	2021-07-17	01:17:50	z	18,5211	0,0248	18,7102	0,02447	15,7694	0,025	
	2021-07-17	01:23:41	z	18,5900	0,0257					
	2021-07-17	01:29:31	z	18,8299	0,0279					
	2021-07-17	01:35:22	z	18,8998	0,0195					
(27995)	2021-06-07	00:57:00	g	19,4066	0,0153	19,4426	0,0161	17,9629	0,022	18,4
1997 WL2	2021-06-07	01:03:31	g	19,4145	0,0166					18,5
	2021-06-07	01:10:02	g	19,4788	0,0157					

Continuação da Tabela A.4

Objeto	Data	UT	F	mag	Δmag	\overline{mag}	$\overline{\Delta mag}$	$\overline{mag_c}$	$\overline{\Delta mag_c}$	α [°]
	2021-06-07	01:16:33	g	19,4705	0,0170					
	2021-06-07	00:58:39	r	18,7755	0,0107	18,8254	0,0105	17,2719	0,019	
	2021-06-07	01:05:10	r	18,8240	0,0105					
	2021-06-07	01:11:40	r	18,8667	0,0106					
	2021-06-07	01:18:11	r	18,8357	0,0103					
	2021-06-07	01:00:17	i	19,1481	0,0167	19,2328	0,0167	17,1499	0,025	
	2021-06-07	01:06:48	i	19,2629	0,0170					
	2021-06-07	01:13:19	i	19,1940	0,0161					
	2021-06-07	01:19:50	i	19,3265	0,0172					
	2021-06-07	01:01:55	z	20,2408	0,0575	20,4134	0,0534	17,2379	0,100	
	2021-06-07	01:08:26	z	20,4078	0,0514					
	2021-06-07	01:14:57	z	20,2655	0,0537					
	2021-06-07	01:21:28	z	20,7397	0,0510					
	2021-06-07	22:03:43	g	19,3429	0,0147	19,2511	0,0134	17,4814	0,016	19,0
	2021-06-07	22:10:14	g	19,2042	0,0128					
	2021-06-07	22:16:45	g	19,2380	0,0132					
	2021-06-07	22:23:15	g	19,2196	0,0130					
	2021-06-07	22:05:21	r	18,6054	0,0113	18,5803	0,0106	16,8044	0,012	
	2021-06-07	22:11:52	r	18,5530	0,0105					
	2021-06-07	22:18:23	r	18,5685	0,0104					
	2021-06-07	22:24:54	r	18,5943	0,0104					
	2021-06-07	22:07:00	i	18,9871	0,0137	18,9680	0,0135	16,5604	0,019	
	2021-06-07	22:13:30	i	18,9518	0,0135					
	2021-06-07	22:20:01	i	18,9437	0,0133					
	2021-06-07	22:26:32	i	18,9894	0,0137					
	2021-06-07	22:08:38	z	20,0142	0,0517	20,0199	0,0460	16,3694	0,049	
	2021-06-07	22:15:09	z	19,9277	0,0424					
	2021-06-07	22:21:40	z	20,0631	0,0430					
	2021-06-07	22:28:11	z	20,0746	0,0472					
(46780)	2021-10-12	02:39:14	g	19,4712	0,0172	19,4142	0,0165	16,9369	0,016	17,8
1998 HH52	2021-10-12	02:44:19	g	19,3896	0,0165					
	2021-10-12	02:49:23	g	19,4295	0,0165					
	2021-10-12	02:54:27	g	19,3668	0,0161					
	2021-10-12	02:41:45	r	18,8311	0,0118	18,7818	0,0115	16,2549	0,013	
	2021-10-12	02:46:50	r	18,8110	0,0115					
	2021-10-12	02:51:54	r	18,7526	0,0114					
	2021-10-12	02:56:58	r	18,7328	0,0114					
	2021-10-12	02:40:32	i	19,2240	0,0182	19,1163	0,01792	16,0479	0,019	
	2021-10-12	02:45:36	i	19,1392	0,0183					
	2021-10-12	02:50:40	i	19,0953	0,0180					
	2021-10-12	02:55:45	i	19,0070	0,0172					
	2021-10-12	02:43:03	z	19,9015	0,0539	19,9964	0,0566	15,8979	0,045	
	2021-10-12	02:48:07	z	20,0191	0,0561					
	2021-10-12	02:53:12	z	19,9200	0,0565					
	2021-10-12	02:58:16	z	20,1452	0,0602					
	2021-10-13	00:34:59	g	18,7066	0,0182	18,6665	0,0166	16,8802	0,025	17,2
	2021-10-13	00:39:24	g	18,6573	0,0177					
	2021-10-13	00:43:48	g	18,6527	0,0150					
	2021-10-13	00:48:12	g	18,6497	0,0155					
	2021-10-13	00:37:11	r	17,9566	0,0116	17,9237	0,0106	16,1732	0,015	
	2021-10-13	00:41:35	r	17,9261	0,0105					
	2021-10-13	00:45:59	r	17,9059	0,0105					
	2021-10-13	00:50:23	r	17,9065	0,0100					
	2021-10-13	00:36:07	i	18,4496	0,0121	18,4033	0,0117	16,0302	0,02	
	2021-10-13	00:40:31	i	18,3978	0,0115					
	2021-10-13	00:44:55	i	18,3836	0,0119					
	2021-10-13	00:49:19	i	18,3825	0,0114					

Continuação da Tabela A.4

Objeto	Data	UT	F	mag	Δmag	\overline{mag}	$\overline{\Delta mag}$	$\overline{mag_c}$	$\overline{\Delta mag_c}$	α [°]
	2021-10-13	00:38:18	z	19,6791	0,0333	19,6340	0,0312	16,0422	0,043	
	2021-10-13	00:42:42	z	19,6475	0,0314					
	2021-10-13	00:47:06	z	19,5882	0,0294					
	2021-10-13	00:51:31	z	19,6213	0,0309					
(47834)	2020-09-11	04:48:41	g	19,7695	0,0240	20,0061	0,0314	17,5240	0,080	15,2
2000 EN114	2020-09-11	04:59:12	g	20,5639	0,0485					
	2020-09-11	05:09:41	g	19,6849	0,0218					
	2020-09-11	04:51:20	r	18,9414	0,0139	19,2208	0,0178	16,8450	0,046	
	2020-09-11	05:01:49	r	19,4616	0,0218					
	2020-09-11	05:12:20	r	19,2595	0,0178					
	2020-09-11	04:53:58	i	19,2727	0,0214	19,3601	0,0219	16,6290	0,048	
	2020-09-11	05:04:29	i	19,4475	0,0224					
	2020-09-11	04:56:37	z	20,2987	0,0618	20,5084	0,0599	16,5780	0,063	
	2020-09-11	05:07:06	z	20,7181	0,0580					
	2020-10-18	01:41:05	g	19,6550	0,0227	19,6592	0,0239	17,6634	0,078	26,0
	2020-10-18	01:48:36	g	19,6813	0,0254					
	2020-10-18	01:56:05	g	19,6608	0,0231					
	2020-10-18	02:03:37	g	19,6400	0,0244					
	2020-10-18	01:42:43	r	19,0666	0,0138	19,0618	0,0148	17,0204	0,042	
	2020-10-18	01:50:15	r	19,0739	0,0146					
	2020-10-18	01:57:44	r	19,0570	0,0158					
	2020-10-18	02:05:15	r	19,0497	0,0152					
	2020-10-18	01:44:23	i	19,3900	0,0229	19,4278	0,0227	16,8124	0,047	
	2020-10-18	01:51:53	i	19,4093	0,0223					
	2020-10-18	01:59:22	i	19,4796	0,0239					
	2020-10-18	02:06:53	i	19,4323	0,0219					
	2020-10-18	01:46:31	z	20,1862	0,0563	20,5185	0,1654	16,9654	0,042	
	2020-10-18	01:54:00	z	20,1954	0,0561					
	2020-10-18	02:01:30	z	20,8628	0,0554					
	2020-10-18	02:09:01	z	20,8297	0,0494					
(49952)	2021-09-07	22:19:49	g	19,4055	0,0178	19,4563	0,0172	17,9841	0,015	18,4
1999 XH212	2021-09-07	22:26:59	g	19,4867	0,0174					
	2021-09-07	22:34:09	g	19,4592	0,0175					
	2021-09-07	22:41:20	g	19,4738	0,0163					
	2021-09-07	22:21:37	r	18,8393	0,0113	18,8750	0,0112	17,3301	0,010	
	2021-09-07	22:28:47	r	18,8861	0,0111					
	2021-09-07	22:35:58	r	18,8912	0,0114					
	2021-09-07	22:43:08	r	18,8836	0,0112					
	2021-09-07	22:23:25	i	19,3349	0,0180	19,3002	0,0179	17,1681	0,015	
	2021-09-07	22:30:36	i	19,2430	0,0183					
	2021-09-07	22:37:46	i	19,2693	0,0173					
	2021-09-07	22:44:56	i	19,3539	0,0181					
	2021-09-07	22:25:14	z	20,9080	0,0568	20,6125	0,0559	17,3131	0,042	
	2021-09-07	22:32:24	z	20,2295	0,0561					
	2021-09-07	22:39:34	z	20,6264	0,0595					
	2021-09-07	22:46:45	z	20,6864	0,0512					
	2021-09-10	01:29:02	g	19,7191	0,0202	19,7164	0,0202	18,0798	0,016	19,6
	2021-09-10	01:36:12	g	19,6998	0,0204					
	2021-09-10	01:43:23	g	19,7303	0,0201					
	2021-09-10	01:23:40	r	19,0411	0,0130	19,0684	0,0130	17,4148	0,012	
	2021-09-10	01:30:50	r	19,0595	0,0125					
	2021-09-10	01:38:01	r	19,0832	0,0136					
	2021-09-10	01:45:11	r	19,0900	0,0132					
	2021-09-10	01:32:38	i	19,4340	0,0193	19,4356	0,0204	17,2038	0,018	
	2021-09-10	01:39:49	i	19,4159	0,0191					
	2021-09-10	01:47:00	i	19,4569	0,0203					
	2021-09-10	01:27:16	z	20,4125	0,0856	20,4569	0,0767	17,0408	0,043	

Continuação da Tabela A.4

Objeto	Data	UT	F	mag	Δmag	\overline{mag}	$\overline{\Delta mag}$	$\overline{mag_c}$	$\overline{\Delta mag_c}$	α [°]
	2021-09-10	01:34:27	z	20,4475	0,0811					
	2021-09-10	01:41:37	z	20,4246	0,0675					
	2021-09-10	01:48:48	z	20,5433	0,0728					
(93751)	2022-11-18	04:19:43	g	18,6941	0,0133	18,9074	0,0232	17,3477	0,017	7,2
2000 WH1	2022-11-18	05:15:25	g	18,8337	0,0217					7,3
	2022-11-18	05:21:55	g	18,8999	0,0229					
	2022-11-18	05:28:26	g	18,9723	0,0265					
	2022-11-18	05:34:56	g	19,0168	0,0269					
	2022-11-18	05:41:27	g	19,0282	0,0279					
	2022-11-18	05:17:03	r	18,1870	0,0096	18,2494	0,0104	16,7067	0,012	
	2022-11-18	05:23:34	r	18,2167	0,0097					
	2022-11-18	05:30:04	r	18,2771	0,0113					
	2022-11-18	05:36:35	r	18,2713	0,0102					
	2022-11-18	05:43:05	r	18,2952	0,0116					
	2022-11-18	05:18:41	i	18,5249	0,0141	18,5306	0,0157	16,4887	0,015	
	2022-11-18	05:25:12	i	18,5399	0,0146					
	2022-11-18	05:31:42	i	18,6194	0,0159					
	2022-11-18	05:38:13	i	18,6396	0,0174					
	2022-11-18	05:44:43	i	18,6295	0,0169					
	2022-11-18	05:20:20	z	19,0019	0,0377	19,2663	0,0443	16,0937	0,027	
	2022-11-18	05:26:50	z	19,0723	0,0379					
	2022-11-18	05:33:21	z	19,4660	0,0468					
	2022-11-18	05:39:51	z	19,4018	0,0517					
	2022-11-18	05:46:22	z	19,3896	0,0477					
(133090)	2021-10-12	05:23:28	g	20,5409	0,0516	20,4437	0,0429	18,1391	0,021	24,7
2003 MS9	2021-10-12	05:30:32	g	20,4211	0,0467					
	2021-10-12	05:37:37	g	20,3830	0,0363					
	2021-10-12	05:44:41	g	20,4298	0,0372					
	2021-10-12	05:26:59	r	19,9828	0,0302	19,8581	0,0253	17,5171	0,016	
	2021-10-12	05:34:03	r	19,8180	0,0266					
	2021-10-12	05:41:08	r	19,8265	0,0237					
	2021-10-12	05:48:12	r	19,8054	0,0207					
	2021-10-12	05:25:16	i	20,4326	0,0519	20,2068	0,0427	17,3281	0,026	
	2021-10-12	05:32:20	i	20,2104	0,0451					
	2021-10-12	05:39:24	i	20,0668	0,0411					
	2021-10-12	05:46:28	i	20,1176	0,0328					
	2021-10-12	05:28:47	z	21,3704	0,1093	21,3984	0,1129	17,1381	0,072	
	2021-10-12	05:35:51	z	21,1642	0,0949					
	2021-10-12	05:42:55	z	21,6606	0,1347					
	2021-10-13	01:14:11	g	19,6395	0,0252	19,5936	0,0266	18,2346	0,022	24,2
	2021-10-13	01:22:35	g	19,5687	0,0287					
	2021-10-13	01:30:59	g	19,6214	0,0278					
	2021-10-13	01:39:23	g	19,5848	0,0247					
	2021-10-13	01:18:22	r	18,9665	0,0144	18,9679	0,0143	17,5696	0,14	
	2021-10-13	01:26:46	r	18,9682	0,0148					
	2021-10-13	01:35:10	r	18,9982	0,0147					
	2021-10-13	01:43:35	r	18,9390	0,0134					
	2021-10-13	01:16:18	i	19,3638	0,0197	19,4117	0,0209	17,4306	0,018	
	2021-10-13	01:24:42	i	19,3275	0,0209					
	2021-10-13	01:33:07	i	19,5486	0,0227					
	2021-10-13	01:41:31	i	19,4071	0,0204					
	2021-10-13	01:20:30	z	20,5201	0,0850	20,4561	0,0684	17,6192	0,038	
	2021-10-13	01:28:54	z	20,3700	0,0640					
	2021-10-13	01:37:18	z	20,9562	0,0675					
	2021-10-13	01:45:42	z	19,9781	0,0573					
(351068)	2020-11-16	00:14:23	g	19,3503	0,0120	19,3564	0,0119	17,8644	0,02	3,6
2003 TS13	2020-11-16	00:21:33	g	19,3633	0,0121					

Continuação da Tabela A.4

Objeto	Data	UT	F	mag	Δmag	\overline{mag}	$\overline{\Delta mag}$	$\overline{mag_c}$	$\overline{\Delta mag_c}$	α [°]
	2020-11-16	00:28:43	g	19,3527	0,0120					
	2020-11-16	00:35:54	g	19,3595	0,0117					
	2020-11-16	00:16:11	r	18,7492	0,0086	18,7715	0,0084	17,1894	0,015	
	2020-11-16	00:23:21	r	18,7766	0,0082					
	2020-11-16	00:30:31	r	18,7787	0,0089					
	2020-11-16	00:37:42	r	18,7815	0,0082					
	2020-11-16	00:17:59	i	19,2090	0,0143	19,1933	0,0134	17,0684	0,023	
	2020-11-16	00:25:09	i	19,1992	0,0130					
	2020-11-16	00:32:19	i	19,1850	0,0136					
	2020-11-16	00:39:30	i	19,1803	0,0130					
	2020-11-16	00:19:47	z	20,7987	0,0527	20,6511	0,0498	17,2954	0,086	
	2020-11-16	00:26:57	z	20,7157	0,0471					
	2020-11-16	00:34:07	z	20,7677	0,0542					
	2020-11-16	00:41:18	z	20,3226	0,0452					
Fim da Tabela A.4										

Tabela A.5: Circunstâncias observacionais e magnitudes derivadas das curvas de fase. A tabela lista: o nome do objeto observado, a data e hora de início, a magnitude reduzida (M_{red}), a magnitude reduzida média ($\overline{M_{red}}$), o erro da magnitude reduzida (ΔM_{red}), o erro médio da magnitude reduzida ($\overline{\Delta M_{red}}$), a distância à Terra (Δ) e ao Sol (r) e o ângulo da fase solar (α) no instante de observação. Fonte: JPL Horizons System.

Object	Data	UT	M_{red}	$\overline{M_{red}}$	ΔM_{red}	$\overline{\Delta M_{red}}$	Δ [UA]	r [UA]	α [°]
(7870) 1987 UP2	2022-02-01	04:09:09,701	13,9026	13,9111	0,0325	0,0325	2,197	1,226	5,6
		04:10:51,83	13,9301		0,0327				
		04:12:34,04	13,9136		0,0325				
		04:14:16,25	13,9086		0,0325				
	2022-02-05	03:29:55,98	14,1407	14,1538	0,7161	0,7161	1,231	2,211	3,8
		03:30:48,14	14,1676		0,7161				
		03:31:40,43	14,1341		0,7160				
		03:32:32,72	14,1740		0,7161				
		03:33:24,96	14,1525		0,7161				
	2022-02-06	04:17:50,18	14,1249	14,1761	0,6420	0,6455	1,233	2,214	3,4
		04:18:52,33	14,1539		0,6420				
		04:19:54,55	14,1573		0,6478				
		04:20:56,77	14,2248		0,6478				
		04:21:58,91	14,2195		0,6478				
	2022-02-06	22:53:08,10	14,0353	14,0401	0,0372	0,0378	2,216	1,234	3,1
		22:55:20,12	14,0465		0,0384				
		22:57:44,32	14,0450		0,0372				
		22:59:56,34	14,0278		0,0390				
	2022-02-07	22:47:47,47	14,0915	14,0724	0,0360	0,0350	2,219	1,236	2,9
		22:49:59,49	14,0528		0,0350				
		22:54:08,49	14,0593		0,0350				
		22:56:20,51	14,0855		0,0350				
	2022-02-08	22:59:30,07	13,9571	13,9856	0,0341	0,0341	2,222	1,239	2,7
		23:01:42,26	13,9986		0,0341				
		23:03:54,46	13,9775		0,0341				
		23:07:08,60	13,9936		0,0341				
	2022-02-26	04:45:02,70	13,8920	13,9121	0,0329	0,0332	2,276	1,327	9,2
		04:50:14,78	13,9324		0,0331				
		04:55:26,86	13,9061		0,0332				
		05:00:38,93	13,9180		0,0335				
	2022-02-28	02:08:39,06	13,9336	13,9383	0,0329	0,0329	2,282	1,341	10,1
		02:10:41,23	13,9431		0,0329				
		02:12:43,40	13,9496		0,0329				
		02:14:45,65	13,9214		0,0329				
	2022-03-02	02:39:05,73	14,1070	14,1203	0,0366	0,0422	2,288	1,356	11,0
		02:40:48,02	14,1492		0,0406				
		02:42:30,24	14,1337		0,0439				
		02:44:12,45	14,0560		0,0461				
	2022-03-09	01:34:43,04	14,4309	14,4069	0,0343	0,0338	2,309	1,420	13,9
		01:38:55,85	14,4059		0,0340				
01:43:08,65		14,4024	0,0336						
01:47:21,55		14,4079	0,0336						
(18284) Tsereteli	2022-04-01	00:42:30,00	14,7718	14,7386	0,0382	0,0400	1,379	2,372	3,6
		00:48:41,78	14,7249		0,0394				
		00:54:54,51	14,7523		0,0406				
		01:01:06,90	14,2889		0,1278				
	2022-04-03	00:30:54,57	14,7040	14,6940	0,0356	0,0354	1,371	2,366	2,9
		00:37:06,78	14,7033		0,0356				
		00:43:18,91	14,6733		0,0352				
		00:49:31,03	14,6848		0,0352				

Continuação da Tabela A.5

Object	Data	UT	M_{red}	\overline{M}_{red}	ΔM_{red}	$\overline{\Delta M}_{red}$	Δ [UA]	r [UA]	α [°]					
(19877) 9086 P-L	2022-04-05	00:48:45,19	14,7305	14,7789	0,1882	0,1837	1,364	2,362	2,4					
		00:54:23,53	14,6344		0,1860									
		00:59:35,67	14,7840		0,1842									
		01:04:47,79	14,8162		0,1808									
		01:09:59,92	14,7971		0,1792									
	2022-04-07	01:27:19,55	14,1847	14,6998	0,03520	0,4303	1,358	2,356	2,3					
		03:09:16,58	14,1701		0,4286									
		03:12:48,73	14,1711		0,4286									
		03:16:20,76	14,1853		0,4286									
		03:19:52,72	14,1737		0,4328									
	2020-09-24	03:59:14,99	17,1896	17,1970	0,0892	0,0898	0,555	1,54	11,8					
		04:01:16,99	17,1782		0,0892									
		04:03:19,00	17,1759		0,0901									
		04:07:24,00	17,2096		0,0901									
		04:09:25,99	17,2163		0,0901									
04:11:28,00		17,2126	0,0901											
2020-09-24		23:35:00,00	17,1434		17,1377					0,0348	0,0346	0,553	1,539	11,2
		23:37:02,09	17,1319							0,0344				
2020-10-18		04:00:22,06	16,7875		16,7473					0,0342	0,0338	1,542	0,551	6,5
		04:03:14,08	16,7535							0,0337				
	04:06:06,10	16,7410	0,0338											
2020-10-18	04:08:58,04	16,7202	17,1137	0,0338	0,3286	0,553	1,543	7,1						
	02:40:43,99	17,1100		0,3187										
	02:43:16,00	17,1221		0,3216										
	02:45:48,00	17,1412		0,3216										
(20786) 2000 RG62	2022-04-25	03:33:18,17	15,4309	15,4217	0,4918	0,4917	0,957	1,906	14,2					
		03:34:50,84	15,4068		0,4917									
		03:36:23,51	15,4331		0,4917									
		03:37:56,18	15,4221		0,4917									
		03:39:28,84	15,4157		0,4917									
	2022-04-27	03:25:23,98	15,5291	15,5202	0,6655	0,6655	0,943	1,9	13,3					
		03:26:56,15	15,5274		0,6655									
		03:28:28,31	15,5263		0,6655									
		03:30:00,48	15,5085		0,6655									
		03:31:32,61	15,5100		0,6655									
2022-04-28	01:24:52,32	15,3772	15,3898	0,0338	0,0338	1,897	0,936	12,8						
	01:29:04,35	15,3969		0,0338										
	01:33:16,38	15,3827		0,0338										
	01:37:28,67	15,3997		0,0338										
2022-05-01	23:39:33,29	15,0164	15,0234	0,0328	0,0328	1,887	0,911	11,0						
	23:43:57,76	15,0083		0,0328										
	23:48:22,23	15,0304		0,0328										
	23:52:50,24	15,0494		0,0328										
2022-05-05	05:07:07,95	14,7880	14,8561	0,0903	0,0909	0,893	1,87	9,6						
	05:08:40,18	14,9255		0,0904										
	05:10:12,52	14,7940		0,0912										
	05:11:44,76	14,8168		0,0912										
	05:13:16,98	14,9561		0,0913										
2022-05-06	04:57:28,42	15,0034	14,9879	0,0340	0,0337	1,875	0,888	9,1						
	05:00:40,57	14,9941		0,0333										
	05:03:52,73	14,9817		0,0335										
	05:07:04,80	14,9629		0,0380										
(20958) A900 MA	2021-07-17	03:07:49,90	14,7641	14,7656	0,3919	0,391946	0,645	1,651	8,0					
		03:09:12,15	14,7559		0,3919									

Continuação da Tabela A.5

Object	Data	UT	M_{red}	\overline{M}_{red}	ΔM_{red}	$\overline{\Delta M}_{red}$	Δ [UA]	r [UA]	α [°]
		03:10:34,39	14,7599		0,3919				
		03:11:56,70	14,7685		0,3919				
		03:13:18,95	14,7796		0,3919				
	2021-08-09	05:03:16,34	15,2553	15,0354	0,5559	0,5661	0,685	1,6780	11,16
		05:05:47,04	15,4301		0,5631				
		05:08:17,73	14,7589		0,5666				
		05:07:02,48	15,1925		0,5667				
		05:09:33,36	14,7679		0,5702				
		05:10:48,81	14,8078		0,5738				
	2021-08-11	02:51:28,95	15,4891	15,5057	0,4685	0,4726	0,697	1,682	12,7
		02:54:20,98	15,4795		0,4726				
		02:57:13,13	15,5004		0,4726				
		03:00:05,29	15,5537		0,4768				
	2021-08-13	03:40:54,31	15,0664	15,0664	0,1222	0,1224	0,707	1,685	13,8
		03:42:06,57	15,0738		0,1222				
		03:43:18,82	15,0667		0,1222				
		03:44:31,15	15,0586		0,1232				
	2021-09-06	02:10:33,71	15,2970	15,2985	0,0326	0,0326	1,729	0,854	23,7
		02:13:25,91	15,3000		0,0326				
		02:16:18,19	15,2912		0,0326				
		02:19:10,21	15,3237		0,0326				
	2021-09-06	23:55:46,51	15,2493	15,2582	0,2314	0,2330	0,862	1,732	24,1
		23:58:38,73	15,2552		0,2336				
		00:01:30,91	15,2669		0,2336				
		00:04:23,06	15,2612		0,2336				
	2021-09-08	00:29:31,32	15,2541	15,2650	0,1995	0,1995	0,87	1,734	24,4
		00:32:23,47	15,2720		0,1995				
		00:35:15,70	15,2677		0,1996				
		00:38:07,92	15,2665		0,1995				
(27995)	2021-05-08	00:17:19,29	15,0505	15,0735	0,4725	0,4612	0,826	1,834	2,4
1997 WL2		00:19:31,38	15,0476		0,4687				
		00:21:43,50	15,0709		0,4650				
		00:23:55,59	15,0735		0,4612				
	2021-05-09	22:07:50,04	14,9587	14,9237	0,0507	0,0399	1,827	0,818	1,6
		22:08:52,25	14,9227		0,0420				
		22:09:54,46	14,9177		0,0378				
		22:10:56,66	14,9247		0,0378				
	2021-06-06	22:40:07,47	15,6368	15,6251	0,0326	0,0326	1,741	0,798	18,3
		22:41:40,09	15,6488		0,0326				
		22:43:12,37	15,6018		0,0324				
		22:44:45,08	15,6133		0,0326				
	2021-06-07	23:27:36,06	16,6513	15,8529	0,1886	0,1862	0,801	1,738	19,0
		23:29:08,35	15,6241		0,1855				
		23:30:40,64	15,4876		0,1854				
		23:32:13,07	15,6488		0,1854				
	2021-06-08	23:22:24,69	16,2010	16,3689	0,6695	0,6644	0,8030	1,735	19,6
		23:23:57,05	16,2013		0,6630				
		23:25:29,34	16,7177		0,6632				
		23:27:01,68	16,4561		0,6631				
		23:28:34,18	16,2683		0,6630				
	2021-06-09	23:11:11,45	17,0593	16,8984	0,6606	0,6604	0,805	1,732	20,2
		23:12:23,76	16,8048		0,6603				
		23:13:36,17	16,9595		0,6604				
		23:14:48,57	16,7697		0,6604				
	2021-06-10	22:18:04,26	16,1265	16,1272	0,0343	0,0343	1,729	0,807	20,7
		22:19:16,66	16,1405		0,0343				

Continuação da Tabela A.5

Object	Data	UT	M_{red}	\overline{M}_{red}	ΔM_{red}	$\overline{\Delta M}_{red}$	Δ [UA]	r [UA]	α [$^{\circ}$]
		22:20:29,06	16,1279		0,0343				
		22:21:41,64	16,1180		0,0343				
	2021-06-12	23:06:49,94	15,4848	15,5029	0,0706	0,0705	0,813	1,723	21,9
		23:08:32,17	15,5023		0,0706				
		23:10:14,37	15,4934		0,0706				
		23:11:56,52	15,5019		0,0707				
		23:13:38,72	15,5318		0,0706				
(46780)	2021-10-12	02:54:37,29	15,1637	15,1317	0,0331	0,0332	1,681	0,745	17,8
1998 HH52		02:57:09,36	15,1362		0,0332				
		02:59:41,51	15,1272		0,0332				
		03:02:13,74	15,1192		0,0335				
	2021-10-13	04:22:08,56	15,1612	15,1578	0,3205	0,3205	0,742	1,683	17,1
		04:23:10,81	15,1509		0,3205				
		04:24:12,97	15,1436		0,3205				
		04:25:15,19	15,1678		0,3205				
		04:26:17,39	15,1652		0,3205				
	2021-10-29	04:03:59,44	14,8020	14,8058	0,0328	0,0331	1,7079	0,7220	6,2
		04:06:11,46	14,8130		0,0338				
		04:08:27,28	14,7835		0,0324				
		04:10:39,47	14,8095		0,0335				
	2021-10-30	22:35:16,48	14,7275	14,7093	0,0330	0,0330	1,711	0,722	5,0
		22:37:28,67	14,7120		0,0330				
		22:39:40,69	14,7065		0,0330				
		22:41:52,88	14,6840		0,0330				
	2021-11-09	01:25:51,33	14,5008	14,5001	0,0453	0,0453	0,738	1,7280	2,3
		01:26:43,49	14,5060		0,0453				
		01:27:35,66	14,4964		0,0453				
		01:28:27,83	14,5035		0,0453				
		01:29:20,05	14,4940		0,0453				
	2021-12-08	00:04:15,94	15,0957	15,4029	0,3771	0,3783	0,902	1,79	19,3
		00:07:28,04	15,1067		0,3771				
		00:10:40,14	16,0061		0,3807				
	2021-12-10	00:09:12,09	15,0491	15,0618	0,0338	0,0338	1,795	0,919	20,1
		00:10:44,19	15,0566		0,0338				
		00:12:16,47	15,0671		0,0338				
		00:13:48,66	15,1089		0,0384				
(47834)	2020-09-11	02:43:06,44	14,4190	14,4889	0,0467	0,0408	1,2343	2,144	15,1
2000 EN114		02:45:38,40	14,4540		0,0418				
		02:48:10,39	14,5306		0,0399				
		02:50:42,37	14,5237		0,0366				
	2020-10-16	22:51:50,00	14,4769	14,4786	0,2515	0,2515	1,337	2,014	25,7
		22:54:42,00	14,4765		0,2515				
		22:57:34,00	14,4826		0,2515				
		23:00:26,00	14,4776		0,2515				
	2020-10-18	02:23:53,08	14,7142	14,7140	0,0345	0,0345	1,343	2,010	26,0
		02:25:05,14	14,7147		0,0345				
		02:26:17,11	14,7137		0,0345				
		02:27:29,08	14,7087		0,0345				
	2020-10-18	23:51:05,99	14,5152	14,4943	0,3216	0,3274	1,348	2,007	26,3
		23:52:57,99	14,4975		0,3216				
		23:54:50,00	14,4867		0,3216				
		23:56:41,99	14,4636		0,3216				
		00:29:49,99	14,4914		0,3390				
(49952)	2021-07-14	05:56:36,31	15,4586	15,4658	0,0149	0,0151	0,756	1,713	17,41
1999 XH212		05:57:58,49	15,4732		0,0152				
		05:59:20,75	15,4708		0,0153				

Continuação da Tabela A.5

Object	Data	UT	M_{red}	\overline{M}_{red}	ΔM_{red}	$\overline{\Delta M}_{red}$	Δ [UA]	r [UA]	α [°]
		06:00:42,99	15,4809		0,0155				
		06:02:05,29	15,4502		0,0150				
		06:03:27,53	15,4606		0,0149				
	2021-08-02	05:18:37,12	15,7980	0,0324	0,0324	0,676	1,686	5,2	
		05:20:09,31	15,7992		0,0324				
	2021-08-09	04:44:41,33	16,7702	16,1232	0,4093	0,4126	0,667	1,68	2,1
		04:47:05,72	16,0698		0,4126				
		04:49:30,12	15,8074		0,4125				
		04:51:54,51	15,8455		0,4161				
	2021-08-12	03:16:25,67	16,4371	0,4271	0,4271	0,664	1,677	2,0	
		03:19:17,77	16,5171		0,4271				
		03:22:09,86	16,4499		0,4271				
		03:25:02,03	16,7353		0,4271				
	2021-09-07	00:48:36,90	15,9796	16,0299	0,2187	0,2187	0,712	1,661	17,9
		00:50:09,14	15,9907		0,2187				
		00:51:41,30	15,9922		0,2187				
		00:53:13,52	15,9959		0,2186				
		00:54:45,69	16,1911		0,2188				
	2021-09-08	02:24:18,39	16,3882	16,3751	0,2052	0,2074	0,717	1,661	18,5
		02:25:50,61	16,3837		0,2070				
		02:27:22,84	16,3781		0,2070				
		02:28:55,06	16,3465		0,2088				
		02:30:27,28	16,3790		0,2089				
	2021-09-10	02:12:42,38	16,3975	16,4091	0,2617	0,2627	0,725	1,661	19,6
		02:14:24,58	16,4297		0,2617				
		02:16:06,80	16,4241		0,2618				
		02:17:49,00	16,3759		0,2641				
		02:19:31,23	16,4186		0,2640				
(66294) 1999 JS27	2022-06-25	03:30:53,17	16,1316	0,5338	0,5276	0,64	1,6179	15,64	
		03:32:25,58	16,1565		0,5338				
		04:27:53,16	16,1364		0,5235				
		04:31:05,30	16,1080		0,5235				
		04:34:17,40	16,1155		0,5235				
	2022-06-27	04:11:28,54	15,9774	15,9598	0,6304	0,6304	0,633	1,617	14,5
		04:12:20,76	15,9436		0,6304				
		04:13:13,00	15,9613		0,6304				
		04:14:05,17	15,9526		0,6304				
		04:14:57,34	15,9641		0,6304				
	2022-07-21	23:59:33,29	15,0873	15,0770	0,1731	0,1704	0,598	1,614	1,6
		00:03:05,39	15,0718		0,1717				
		00:06:37,47	15,0785		0,1690				
		00:10:09,52	15,0705		0,1677				
(93751) 2000 WH1	2022-10-22	01:52:32,67	15,7663	15,7768	0,0325	0,0325	1,643	0,705	17,8
		01:53:54,93	15,7833		0,0325				
		01:55:17,09	15,7808		0,0325				
		01:56:39,26	15,7728		0,0325				
	2022-11-02	07:03:31,10	15,5824	15,5909	0,0356	0,0385	1,661	0,686	9,9
		07:06:03,25	15,5994		0,0371				
		07:08:35,31	15,6039		0,0400				
		07:11:07,64	15,5194		0,0435				
	2022-11-18	03:55:41,99	15,7027	15,6830	0,3806	0,3865	0,715	1,693	7,2
		03:58:53,95	15,6744		0,3836				
		04:02:06,01	15,6695		0,3899				
		04:05:18,17	15,6855		0,3925				
	2022-11-22	00:51:01,90	15,3762	15,4474	0,1765	0,1971	0,732	1,702	9,5
		00:54:13,98	15,3711		0,1765				

Continuação da Tabela A.5

Object	Data	UT	M_{red}	\overline{M}_{red}	ΔM_{red}	$\overline{\Delta M}_{red}$	Δ [UA]	r [UA]	α [$^{\circ}$]
		00:57:26,10	15,3691		0,1765				
		01:00:38,17	15,3994		0,1765				
		04:38:33,97	15,7210		0,2794				
	2022-11-23	23:42:38,70	15,4212	15,4071	0,0322	0,0324	1,706	0,742	10,7
		23:43:40,82	15,4079		0,0324				
		23:44:43,03	15,4064		0,0324				
		23:45:45,24	15,3009		0,0338				
(133090)	2021-10-06	02:08:19,53	16,9187	16,9417	0,0344	0,0344	1,495	0,610	28,2
2003 MS9		02:11:31,68	16,9382		0,0344				
		02:14:43,75	16,9452		0,0344				
		02:17:55,91	16,9712		0,0344				
	2021-10-12	05:04:03,96	16,8171	16,8217	0,0396	0,0385	1,509	0,598	24,7
		05:07:36,07	16,8351		0,0402				
		05:11:08,27	16,8262		0,0373				
		05:14:40,30	16,7821		0,0358				
	2021-10-29	02:01:26,71	16,5301	16,5267	0,0352	0,0352	1,556	0,587	13,2
		02:04:18,82	16,5355		0,0352				
		02:07:42,72	16,4977		0,0416				
		02:14:31,05	16,5234		0,0352				
	2021-10-30	23:42:34,64	16,5054	16,5108	0,0341	0,0341	1,562	0,589	11,8
		23:45:26,84	16,5094		0,0341				
		23:48:32,16	16,5124		0,0341				
		23:52:21,04	16,5122		0,0338				
	2021-12-10	01:16:19,89	16,5150	16,5150	0,0376	0,0376	0,780	1,712	15,8
		01:17:52,07	16,5095		0,03715				
	2021-12-12	01:06:07,14	16,5063	16,5051	0,0411	0,0412	0,797	1,720	16,8
		01:08:39,37	16,5253		0,0405				
(307162)	2021-03-09	00:45:29,63	14,2608	14,2631	0,0408	0,0398	2,403	1,425	5,2
2002 DM9		00:49:41,83	14,2888		0,0394				
		00:53:53,95	14,2653		0,0397				
		00:58:06,06	14,2608		0,0399				
	2021-03-11	00:42:01,58	14,1603	14,1615	0,0352	0,0350	2,3938	1,4098	4,2
		00:45:13,65	14,1628		0,0350				
		00:48:25,71	14,1800		0,0350				
		00:51:37,78	14,1198		0,0350				
	2021-03-14	04:53:38,42	14,0280	14,0825	0,2178	0,2300	1,388	2,3788	2,5
		04:56:50,50	14,0516		0,2178				
		05:00:02,57	14,0385		0,2197				
		05:03:14,63	14,0637		0,2216				
		06:06:10,12	14,2308		0,2732				
	2021-03-16	00:39:06,42	13,9608	0,026156	0,0259	1,377	2,37	1,6	
		00:41:59,51	13,9740		0,026106				
		00:44:31,76	13,9600		0,025859				
		00:47:03,95	13,9507		0,025636				
	2021-03-18	04:32:37,08	13,8133	13,7906	0,0330	0,0330	1,365	2,36	0,57
		04:34:49,26	13,8169		0,0326				
		04:37:01,47	13,7679		0,0358				
		04:39:13,63	13,7373		0,0334				
(351068)	2020-11-09	04:06:06,00	16,4818	16,4947	0,0375	0,0380	0,72	1,697	8,4
2003 TS13		04:12:17,99	16,5109		0,0378				
		04:18:30,00	16,4986		0,0383				
		04:24:41,99	16,4874		0,0385				
	2020-11-12	02:46:19,00	16,3830	16,3732	0,0785	0,0785	0,723	1,706	6,3
		02:52:30,99	16,3460		0,0785				
		02:58:43,00	16,3679		0,0785				
		03:04:54,99	16,3958		0,0786				

Continuação da Tabela A.5

Object	Data	UT	M_{red}	\overline{M}_{red}	ΔM_{red}	$\overline{\Delta M}_{red}$	Δ [UA]	r [UA]	α [°]
	2020-11-15	23:16:48,00	16,5637	16,2791	0,3945	0,3740	0,731	1,717	3,6
		23:23:00,00	16,2723		0,3802				
		23:29:11,99	16,2174		0,3658				
		23:35:24,00	16,0631		0,3555				
	2020-11-19	23:42:40,78	15,6913	15,6446	0,0699	0,0611	1,730	0,742	1,2
		23:46:12,80	15,7208		0,1035				
		23:49:45,78	15,5978		0,0523				
		23:53:17,80	15,2178		0,0425				
	2020-11-22	22:29:59,56	15,7824	15,7871	0,0344	0,0343	1,739	0,7528	1,7
		22:33:31,50	15,7917		0,0344				
		22:37:03,53	15,7957		0,0343				
		22:40:35,55	15,7615		0,0340				
	2020-12-15	22:44:43,52	16,4812	16,4509	0,0348	0,0344	1,822	0,899	15,3
		22:50:55,56	16,4352		0,0344				
		22:57:07,60	16,4392		0,0344				
		23:03:19,55	16,4627		0,0344				
	2020-12-17	00:18:36,89	16,5709	16,5862	0,0344	0,0344	1,8263	0,9084	15,8
		00:24:48,93	16,6015		0,0344				
		00:31:00,88	16,5609		0,0344				
		00:37:12,92	16,6144		0,0344				
Fim da Tabela A.5									

Apêndice B

Artigos publicados originários do
trabalho aqui apresentado

PHOTOMETRY AND LIGHTCURVE ANALYSIS OF FOUR MARS-CROSSING ASTEROIDS

Jonatan Michimani, Daniela Lazzaro, Eduardo Rondón, Filipe Monteiro, Plicida Arcoverde, Marçal Evangelista-Santana, Wesley Pereira, Wesley Mesquita, Roberto Souza, Teresinha Rodrigues.
 Observatório Nacional, COAA,
 Rua Gal. José Cristino 77, 20921-400
 Rio de Janeiro, Brazil
 jonatangarcia@on.br

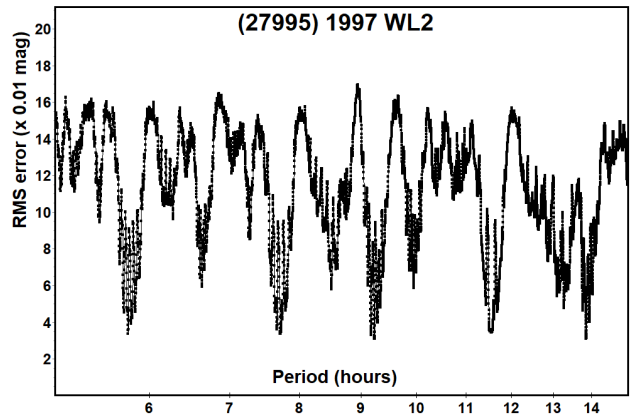
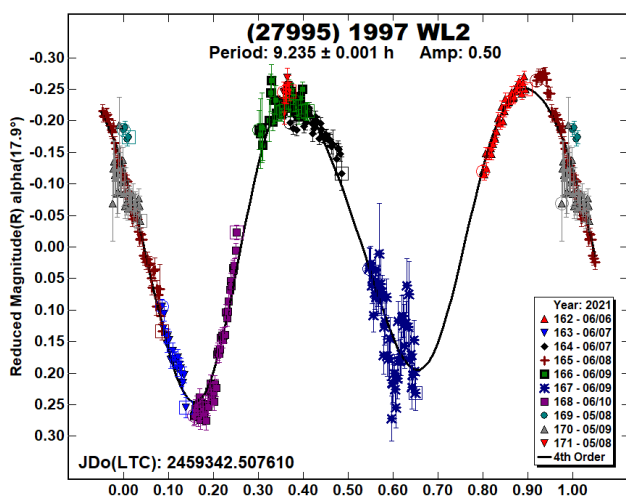
(Received: 2022 May 31)

Rotational periods of four Mars-crossing asteroids (MCs) were determined from lightcurves acquired at the Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica (MPC Y28, OASI) between 2020 July to 2021 October.

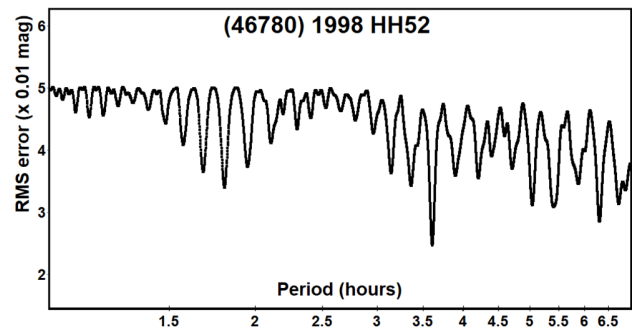
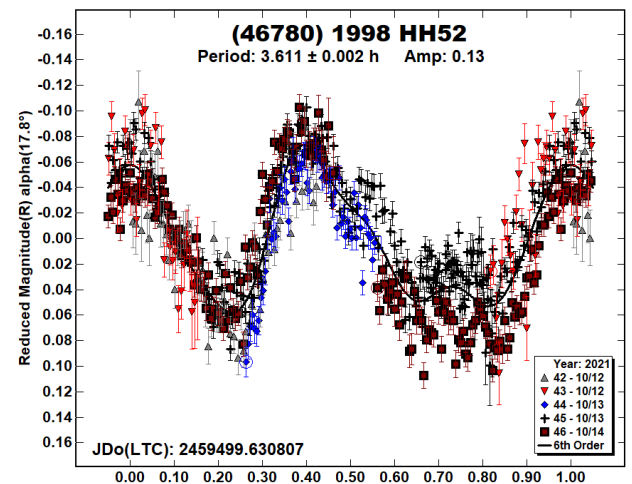
CCD photometric observations of four Mars-crossers were made at the Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica (MPC code Y28) between 2020 July and 2021 October. Images were obtained with the 1.0-m *f*/8 telescope of the IMPACTON project and an FLI PL424 CCD camera (2048×2048 pixels) set to 2×2 binning (Rondón et al., 2020) and Johnson-Cousins R filter. The raw images were calibrated with dark and flat frames. *MPO Canopus* (Warner, 2017) was used for magnitude measurement, Fourier analysis (Harris et al., 1989), and to produce the final lightcurve.

The observational circumstances for each observed object are given in Table I along with the results, which are discussed individually below. The phased rotational lightcurve and the periodogram are shown for each object.

(27995) 1997 WL2. The only previously reported rotational period in the LCDB (Warner et al. 2009) for this small Solar System body is from Behrend et al. (2021web), who reported a period of 9.229 ± 0.001 h with 0.49 mag amplitude. Our results used observations from 2021 May and June and showed a period of 9.235 ± 0.001 h with an amplitude of 0.50 mag. The resulting two-peaked lightcurve is consistent with the previously published value both in period and amplitude.



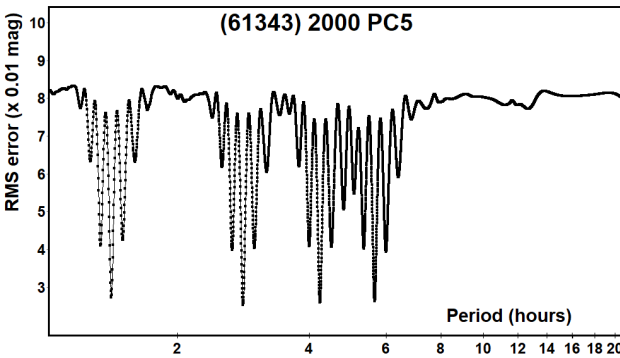
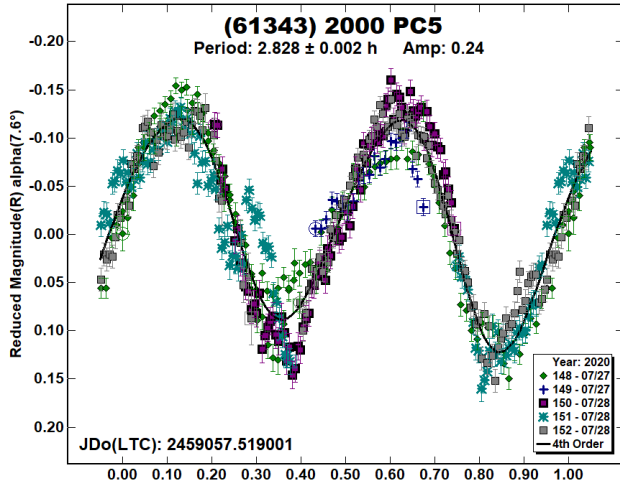
(46780) 1998 HH52. One previously reported period in the LCDB for this Mars-crosser (Pravec et al., 2021web) showed $P = 3.6122 \pm 0.0008$ h and amplitude 0.09 mag. Our observations from 2021 November 12, 13, and 14 best fit a rotational period of 3.611 ± 0.002 h and an amplitude of 0.13 mag. Our result is in concordance with the one previously reported.



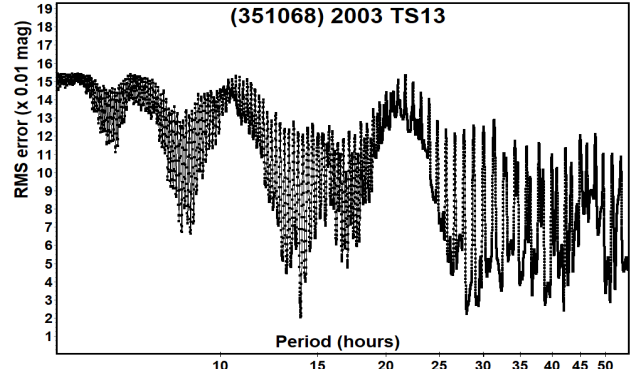
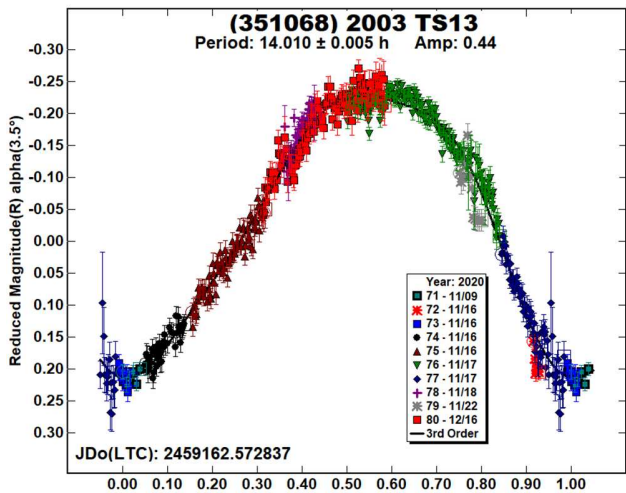
(61343) 2000 PC5. A search in the Asteroid Lightcurve Photometry Database did not find any previously reported result for this asteroid. It was possible to derive a rotational period of 2.828 ± 0.002 h from observations acquired on 2020 June 27 and 28. The lightcurve has an amplitude of 0.24 mag and displays two maxima and two minima per rotational cycle.

Number	Name	yyyy mm/dd	Phase	L _{PAB}	B _{PAB}	Period(h)	P.E.	Amp	A.E.
27995	1997 WL2	2021 05/08-06/10	*2.0, 20.7	229	2	9.235	0.001	0.50	0.02
46780	1998 HH52	2021 10/12-10/14	17.0	40	0	3.611	0.002	0.13	0.01
61343	2000 PC5	2020 07/27-07/28	8.0	295	-1	2.828	0.002	0.24	0.01
351068	2003 TS13	2020 11/16-12/16	*3.0, 15.0	58	-1	14.010	0.005	0.44	0.02

Table I. Observing circumstances and results. The phase angle is given for the first and last date. If preceded by an asterisk, the phase angle reached an extrema during the period. L_{PAB} and B_{PAB} are the approximate phase angle bisector longitude/latitude at mid-date range (see Harris et al., 1984).



(351068) 2003 TS13. A search in the LCDB (Warner et al., 2009) did not find any previously reported period for this object. Our analysis using the photometric observations carried over several nights in 2020 November and December indicate a possible period of 14.010 ± 0.005 h with an amplitude of 0.44 h.



The true period might be about 28 h, or double our result; the periodogram shows a second RMS minima between 25 and 30 h. It was not possible to follow this Mars-crosser long enough to derive a “full” bimodal lightcurve, so our result is based on the best fit to a monomodal lightcurve.

Acknowledgements

The authors acknowledge CNPq, CAPES and FAPERJ for supporting this work through diverse fellowships and grants, and are grateful to the IMPACTON team, in particular, A. Santiago and J. dos Santos, for the technical support at OASI.

References

Behrend, R. et al. (2021 web). Observatoire de Genève web site. http://obswww.unige.ch/~behrend/page_cou.html

Harris, A.W.; Young, J.W.; Scaltriti, F.; Zappala, V. (1984). “Lightcurves and phase relations of the asteroids 82 Alkmeone and 444 Ggyptis.” *Icarus* 57, 251-258.

Harris, A.W.; Young, J.W.; Bowell, E.; Martin, L.J.; Millis, R.L.; Poutanen, M.; Scaltriti, F.; Zappala, V.; Schober, H.J.; Debehogne, H.; Zeigler, K.W. (1989). “Photoelectric Observations of Asteroids 3, 24, 60, 261, and 863.” *Icarus* 77, 171-186.

Pravec, P. et al. (2021 web). Photometric Survey for Asynchronous Binary Asteroids web site. <https://www.asu.cas.cz/~asteroid/binastphotsurvey.htm>

Rondón, E.; Lazzaro, D.; Rodrigues, T.; Carvano, J.M.; Roig, F.; Monteiro, F.; Arcoverde, P.; Medeiros, H.; Silva, J.; Jasmim, F.; de Prá, M.; Hasselmann, P.; Ribeiro, A.; Dávalos, J.; Souza, R. (2020). “OASI: A Brazilian Observatory Dedicated to the Study of Small Solar System Bodies-Some Results of NEOs Physical Properties.” *PASP* 132, 065001.

Warner, B.D.; Harris, A.W.; Pravec, P. (2009). “The Asteroid Lightcurve Database.” *Icarus* 202, 134-146. Updated 2021 Dec. <http://www.minorplanet.info/lightcurvedatabase.html>

Warner, B.D. (2017). *MPO Canopus* Software, version 10.7.11.1, BDW Publishing. <http://www.bdwpublishing.com>

PHOTOMETRY AND LIGHTCURVE ANALYSIS OF TWO MARS-CROSSING ASTEROIDS: (106848) 2000 YP16 AND (133090) 2003 MS9

Jonatan Michimani, Daniela Lazzaro, Filipe Monteiro, Eduardo Rondón, Plicida Arcoverde, Marçal Evangelista-Santana, Wesley Pereira, Wesley Mesquita, Tatiane Corrêa, Roberto Souza, Teresinha Rodrigues
 Observatório Nacional, COAA,
 Rua Gal. José Cristino 77, 20921-400,
 Rio de Janeiro, Brasil.
 jonatangarcia@on.br

(Received: 2023 March 22)

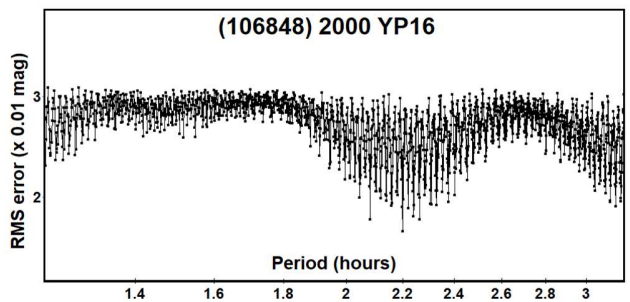
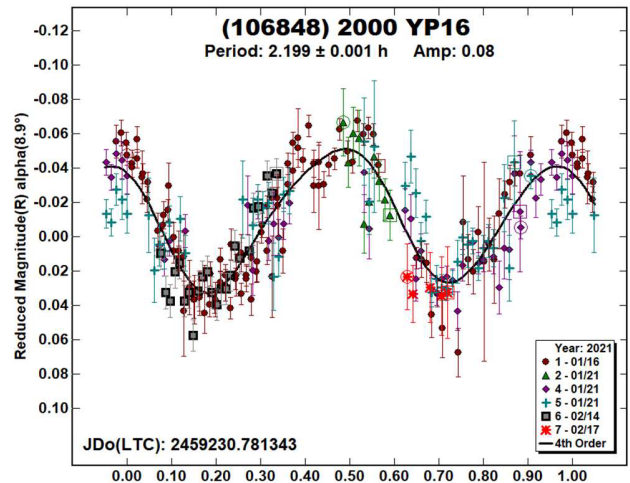
Lightcurves and rotational periods for Mars-Crossing asteroids (106848) 2000 YP16 and (133090) 2003 MS9 were obtained at the Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica (MPC code Y28, OASI) in 2021 January-February and October-December, respectively.

CCD photometric observations of two Mars-crossers (MCs) were made at the Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica (MPC Y28) between 2021 January-February and October-December. Images were obtained with the 1.0m f/8 telescope of the IMPACTON project and an FLI PL424 CCD camera (2048×2048 pixels) set to 2×2 binning (Rondón et al., 2020) and Johnson-Cousins R filter. The reduction process included calibration of raw images with dark and flat frames via IRAF. MPO Canopus (Warner, 2017) was used for brightness measurements, Fourier analysis (Harris et al., 1989) and to produce the final lightcurves.

Table I shows the date of the observations for each object, as well as the derived rotation period and amplitude of the lightcurve. Individual results are discussed below. The phased rotational lightcurve and the periodogram are shown for each object.

(106848) 2000 YP16. A search in the Asteroid Lightcurve Database (LCDB; Warner et al., 2009) did not find any previously reported period for this MC. This object was observed over several nights in 2021 January and February. Our photometric analysis allowed us to derive a rotational period of 2.199 ± 0.002 h. The lightcurve shows a well-defined bimodal shape and a low maximum amplitude of 0.08 mag.

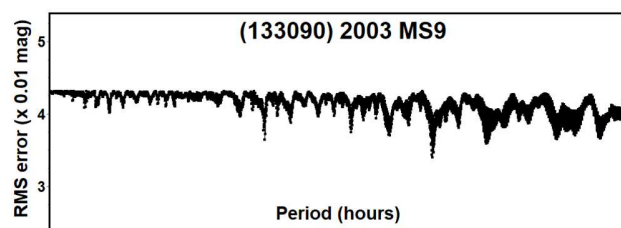
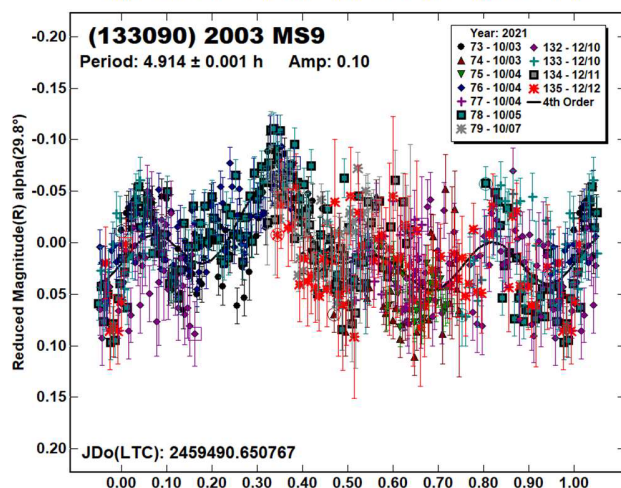
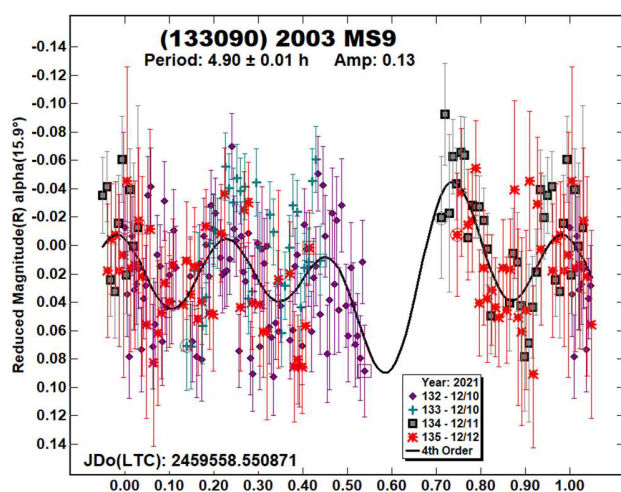
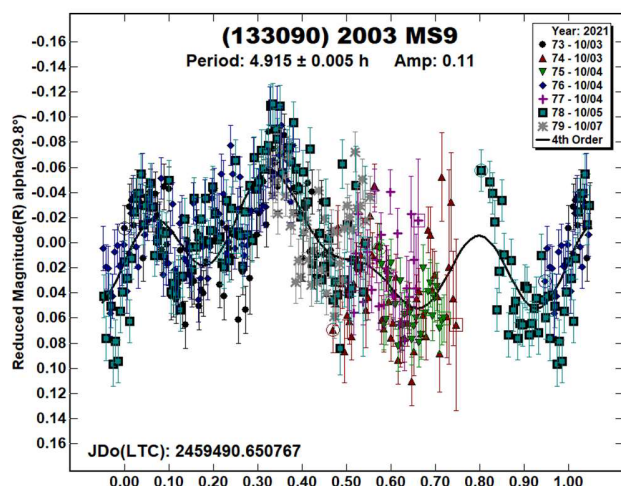
The period found places the asteroid just above the so-called “spin barrier,” of about $P = 2.2$ h (Pravec and Harris 2000), which might have implications of the cohesive forces of the object (gravitationally-bound or strength-bound). In order to clarify the nature of the object, we believe this MC is an interesting target for future observations.



(133090) 2003 MS9. No rotational period has been found in the LCDB (Warner et al., 2009) for this object. In order to get the best possible fit, we grouped the observations into two sets. First, we adjusted a period based on the data obtained over four nights in October 2021. This data showed a period of 4.915 ± 0.005 h and an amplitude of 0.11 mag. Next, we fit the data acquired over three nights in December of the same year and found a period of 4.90 ± 0.01 h with an amplitude of 0.13 mag. Given the small variation in amplitude between the lightcurves with data in October and December, we then performed a new fit including all the data. The period found and the one adopted for this paper is 4.914 ± 0.001 h and an amplitude of 0.10 mag. We present the three fits below.

Number	Name	2021 mm/dd	Phase	L _{PAB}	B _{PAB}	Period(h)	P.E.	Amp	A.E.	U
106848	2000 YP16	01/16-02/17	* 8.4, 18.4	131	-2	2.199	0.002	0.08	0.01	2+
133090	2003 MS9	10/03-12/12	*29.4, 17.3	48	0	4.914	0.001	0.10	0.02	2

Table I. Observing circumstances and results. The phase angle is given for the first and last date. If preceded by an asterisk, the phase angle reached an extrema during the period. L_{PAB} and B_{PAB} are the approximate phase angle bisector longitude/latitude at mid-date range (see Harris et al., 1984).



Acknowledgements

The authors acknowledge CNPq, CAPES and FAPERJ for supporting this work through diverse fellowships and grants. Support by CNPq (proc. 310964/2020-2) and FAPERJ (proc. E-26/201.001/2021) is acknowledged by D.L. Technical support at OASI is also recognized, in particular, A. Santiago and J. dos Santos.

References

Harris, A.W.; Young, J.W.; Scaltriti, F.; Zappala, V. (1984). "Lightcurves and phase relations of asteroids 82 Alkmene and 444 Gyptis." *Icarus* **57**, 251-258.

Harris, A.W.; Young, J.W.; Bowell, E.; Martin, L.J.; Millis, R.L.; Poutanen, M.; Scaltriti, F.; Zappala, V.; Schober, H.J.; Debehogne, H.; Zeigler, K.W. (1989). "Photoelectric Observations of Asteroids 3, 24, 60, 261 and 863." *Icarus* **77**, 171-186.

Pravec, P., Harris, A.W. (2000). "Fast and Slow Rotation of Asteroids." *Icarus* **148**, 12-20.

Rondón, E.; Lazzaro, D.; Rodrigues, T.; Carvano, J.M.; Roig, F.; Monteiro, F.; Arcoverde, P.; Medeiros, H.; Silva, J.; Jasmin, F.; de Prá, M.; Hasselmann, P.; Ribeiro, A.; Dávalos, J.; Souza, R. (2020). "OASI: A Brazilian Observatory Dedicated to the Study of Small Solar System Bodies - Some Results of NEOs Physical Properties." *PASP* **132**, 065001.

Warner, B.D.; Harris, A.W.; Pravec, P. (2009). "The Asteroid Lightcurve Database." *Icarus* **202**, 134-146. Updated 2016 Sep. <http://www.minorplanet.info/lightcurvedatabase.html>

Warner, B.D. (2017). *MPO Canopus* Software, version 10.7.11.1, BDW Publishing. <http://www.bdwpublishing.com>

The ‘small’ asteroid population: a spectroscopic survey

Jonatan Michimani ¹★, Eduardo Rondón ¹★, Davide Perna,² Simone Ieva ², Elisabetta Dotto,² Elena Mazzotta Epifani,² Antonella Barucci ³, Vasiliki Petropoulou² and Daniela Lazzaro ¹★

¹Observatório Nacional, Rua Gal. José Cristino 77, 20921-400 Rio de Janeiro, Brazil

²INAF – Osservatorio Astronomico di Roma, Via Frascati 33, I-00078, Monte Porzio Catone, Italy

³LESIA, Observatoire de Paris, PSL Research University, CNRS, Univ. Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, UPMC Univ., Paris 06, Sorbonne Universités, 5 Place J. Janssen, F-92195 Meudon Principal Cedex, France

Accepted 2023 September 14. Received 2023 September 14; in original form 2023 July 15

ABSTRACT

The study of near-Earth objects (NEOs) allow us to obtain information on the Solar system smallest bodies due to their closeness to Earth. In this work, we present the results of visible spectroscopic observations of 43 small and newly discovered NEOs, obtained during eighteen observing runs between October 2020 and December 2021, using the Goodman High Throughput Spectrograph at the 4.1-m Southern Astrophysical Research telescope (Cerro Pachón, Chile). We found a taxonomic distribution dominated by S-type asteroids but with an overabundance of A- and D-types. This result is in agreement with recent works on NEOs’ characterization and has implications for possible differences in the taxonomic distribution of ‘large’ and ‘small’ objects and emphasizes the idea of a non-homogeneous NEO population.

Key words: methods: observational – techniques: spectroscopic – minor planets, asteroids: general.

1 INTRODUCTION

The study of small Solar system bodies has been widely recognized of much importance to better understand the conditions in which planetary formation took place, as well as the early stages of its evolution. This population is considered to be the leftovers or remnants of the building blocks that once accreted to form the planets (Morbidelli et al. 2002; DeMeo & Carry 2014; Binzel, Reddy & Dunn 2015). Of particular interest are the near-Earth objects (NEOs), which are considered to be the parent bodies of the constant influx of material impacting the surface of planets, and have been linked to the transport of water and other organic materials, both to Earth and to other planets, during the early stages of the formation with strong implications in the emergence of life (Alexander et al. 2012; Marty 2012; Marty et al. 2016). The physical characterization of such bodies, thus, is fundamental in developing accurate models for their orbital evolution including non-gravitational effects such as YORP (Yarkovsky-O’Keefe-Radzievskii-Paddack) and Yarkovsky and space weathering (Binzel et al. 2015) as well as to link them to their source regions (Bottke et al. 2002; Greenstreet, Ngo & Gladman 2012).

The NEOs population is also of much interest due to the possibility of objects impacting the Earth. The geological record of craters across the Earth and more recent events, like Tunguska and Chelyabinsk, have shown that the risk is real (Nemchinov, Shuvalov & Svetsov 2008; Emel’yanenko et al. 2013). Only the study of their physical properties can help developing adequate mitigation strategies. On the other hand, their closeness to Earth make them optimal targets

for space exploration and for asteroid mining, as alternative to the planet’s finite resources (Elvis 2013; Colvin, Crane & Lal 2020). Moreover, as they approach the Earth they become brighter and, therefore, easier to be observed allowing the study of the smallest Solar system bodies.

Over the last decades, several programmes have focused on both the detection and the physical characterization of NEOs. As expected, detection completion diminishes drastically with size, going from almost 100 per cent in the kilometre range to nearly 0 per cent in the metre range, which accounts for a population of several million bodies (Tricarico 2017). On the other hand, an overall estimate of NEOs with known physical characterization is at around 15 per cent (Ieva et al. 2014, 2018), and this number is steadily decreasing due to the very high discovery rate of several ongoing surveys. Regarding the spectral characterization of NEOs in the visible and near-infrared (NIR) wavelength, it has been determined only for about a thousand of objects (Sergeyev & Carry 2021) by surveys such as SINEO, NEOSHIELD2, MANOS, and MIT-Hawaii Near-Earth Object Spectroscopic Survey (MITHNEOS) and diverse works (Binzel et al. 2004, 2019; Lazzarin et al. 2005; Lazzarin, Magrin & Marchi 2008; de León et al. 2010; Perna et al. 2018; Devogèle et al. 2019; Ieva et al. 2020; Marsset et al. 2022). Considering the known NEOs population the fraction with determined taxonomic classification drops from $\sim 1/3$ to $\sim 1/10$ for km-sized and smaller than 300 m objects, respectively (Perna et al. 2018).

In order to increase the knowledge on the composition distribution of NEOs and contribute to decrease the deficit in the physical characterization of this population, several studies have been carried on in recent years. Popescu et al. (2019) aimed to spectrally characterize a sample of ‘large’ NEOs, in the ~ 0.25 –5.5 km size range. Their result indicate that the taxonomic distribution corresponds to that of the inner part of the asteroid belt (Binzel et al. 2015, 2019; Carry et al.

* E-mail: Jonatangarcia@on.br (JM); erondon@on.br (ER); lazzaro@on.br (DL)

2016;) with an abundance of over 50 per cent of Q/S-complex objects. They also found a significant portion of objects in the C- and X-complexes and very few present, or no traces, in end-member classes such as B-, A-, and D-type. The opposite NEOs population, i.e. of the ‘small’ objects was focused by Perna et al. (2018), considering bodies with an absolute magnitude $H > 20$. In this population, even though the distribution is still dominated by the S-complex, it is observed an overabundance of olivine-rich A-types and organic-rich D-types. This finding might be related either to the dynamical evolution of small bodies from the Main Belt (DeMeo & Carry 2014), or to the taxonomic classification of NEOs due to phenomena affecting their surface and spectra, such as space weathering and phase reddening, or represent a real difference in the chemical properties of smaller objects (undetected within the Main Belt asteroids), as discussed in the following of the paper.

To further investigate this interesting population, we aimed to spectrally characterize recently discovered NEOs in the sub-km size range, i.e. having an absolute magnitude of ≥ 20 . A long programme was thus submitted and approved to be carried on at the Southern Astrophysical Research (SOAR) 4.1-m telescope (Cerro Pachon, Chile) and its first results are here presented.

In Section 2, we describe the observational methodology and data reduction procedures. The obtained results are given in Section 3 which are discussed in the light of other works in Section 4.

2 OBSERVATIONS AND DATA ANALYSIS

The data presented in this work was obtained during eighteen observing runs between 2020 October and 2021 December, mostly under good weather conditions. We used the 4.1-m SOAR telescope equipped with the Goodman High Throughput Spectrograph. The ‘Red Camera’ used is a 4096×4112 backside illuminated CCD with $15\text{-}\mu\text{m}$ square pixels. The instrument setup included a long slit of 1.5 arcsec, in width and a blocking filter GG-455. The spectrograph was equipped with a grating of 400 lines per mm. This configuration covers the spectral interval between 0.500 and $0.905\ \mu\text{m}$ with a resolution $R \sim 1850$ and a dispersion of $0.0001\ \mu\text{m}$ per unbinned CCD pixel, presenting some fringing, more evident for faint objects observed under poor (seeing around 1.4–1.5) sky conditions. All the observations have been performed using differential tracking at the object’s rates. It is noteworthy that the limits of the SOAR telescope tracking are: (a) the object not at zenith, (b) maximum and minimum elevation of 88° and 15° , respectively, (c) rates in declination (Dec.) and right ascension (RA) greater than $\pm 2700\ \text{arcsec h}^{-1}$ and $\pm 180\ \text{s of RA h}^{-1}$, respectively.

Observations focused on newly discovered NEOs with absolute magnitude greater than 20, although some objects with slightly smaller H were also observed. This constraint in magnitude was set to limit the sample to ‘small’ objects which, depending on the visual albedo, should have an equivalent diameter in the few-hundred-metre size range. A rapid response observing programme was developed in order to take advantage of the short observational window of these bodies during their close approach to the Earth. In Fig. 1 is given the distribution of the observed objects as a function of their absolute magnitude. Depending on the visual magnitude and motion rates (RA and Dec.) each object was observed up to three times with exposures ranging between 600 s and 1800 s, using differential tracking. Several solar analogue stars were observed at various airmasses throughout each night. When acquiring the data, the slit was oriented along the parallactic angle in an effort to reduce the effects of atmospheric differential refraction.

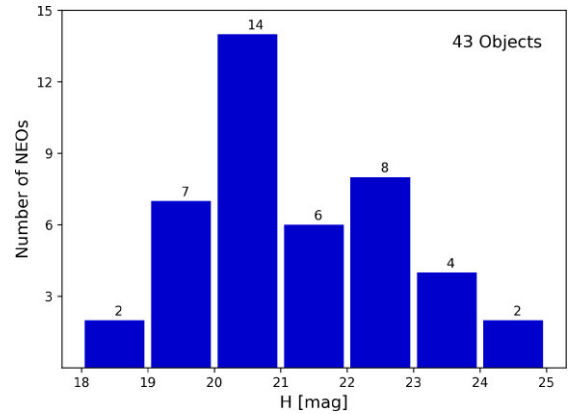


Figure 1. Distribution of the observed NEOs as a function of their absolute magnitude.

After the image acquisition, we used the IRAF software packages and some scripts implemented in PYTHON to perform the data reduction. The procedure included: bias subtraction, flat-field normalization correction, spectra extraction, atmospheric extinction correction, wavelength calibration using the HgAr-Ne lamps emission lines, division of individual object spectrum by a solar analogue with similar airmass and the normalization at $0.55\ \mu\text{m}$ to obtain the reflectance spectrum. Finally, we rebinned the data in order to improve the signal-to-noise ratio, performed through a PYTHON script, and obtained the mean value of up to twenty $0.0001\ \mu\text{m}$, depending on the quantity of noise of each spectrum. The resulting reflectance spectra of all the observed NEOs are given in Fig. 2 (blue dots) along with the curve of the assigned spectral class and its error bar (black points and line and pink shaded region).

In order to obtain information on the surface composition of the observed NEOs, their reflectance spectra was then taxonomically classified. This was performed using the scheme defined by Bus–DeMeo (DeMeo et al. 2009), which comprises 25 different classes, with the aid of the M4AST online tool (Popescu, Birlan & Nedelcu 2012). For a given spectrum, this tool finds the closest match to the templates of the Bus–DeMeo taxonomy, through a curve matching approach. We also visually inspected all the solutions given by the tool and selected the one which more closely matched each spectrum.

Finally, to estimate the diameter for each observed NEO we used the equation given in Harris & Harris (1997), the value of H obtained from MPC¹ and the mean visual albedo (p_v) of each Bus–DeMeo class, as given by Mainzer et al. (2011). The diameter distribution of our sample is shown in Fig. A1. It is to be mentioned that DeMeo & Carry (2013) computed slightly different mean values for each taxonomic class as well as, more recently, also Mesquita (2022). No significant differences are observed but it is important to point out that these discrepancies might affect a statistical analysis.

The physical properties and results for the observed objects are given in Table 1 including the date, the phase angle, the belonging Near-Earth Asteroid (NEA) group classification, the Tisserand parameter with Jupiter, the absolute magnitude H , the taxonomic classification, the adopted mean albedo, and the computed diameter. The observational circumstances are given in Table A1, where for each asteroid is presented its provisional designation, the date and UT starting time of observation, the apparent visual magnitude, the airmass, the angular rate of change in apparent RA and Dec., the

¹<https://www.minorplanetcenter.net/data>

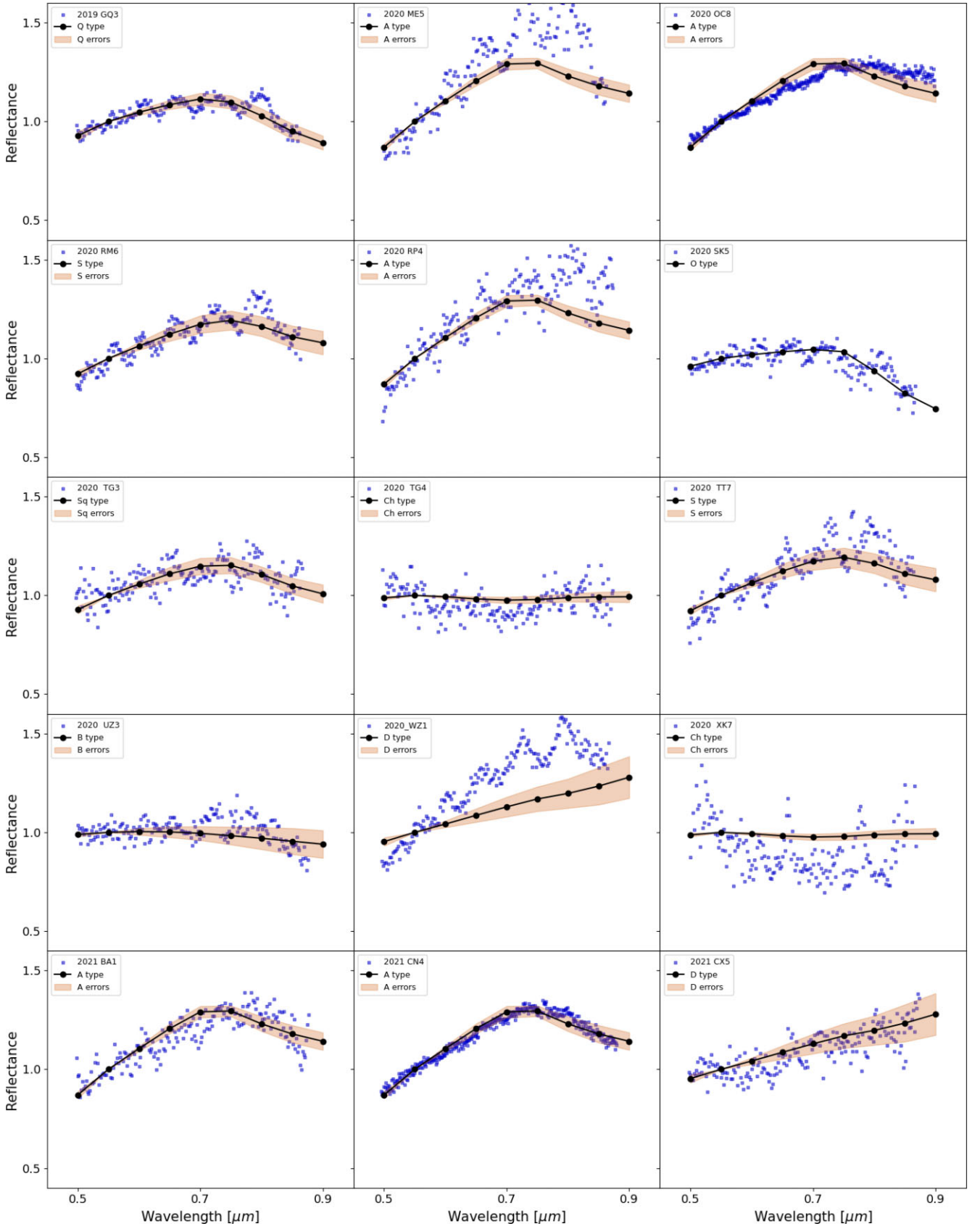


Figure 2. Obtained reflectance spectra (blue dots) of NEOs, normalized at $0.55 \mu\text{m}$, along with the assigned spectral class curve (black points and line) and its error region (pink).

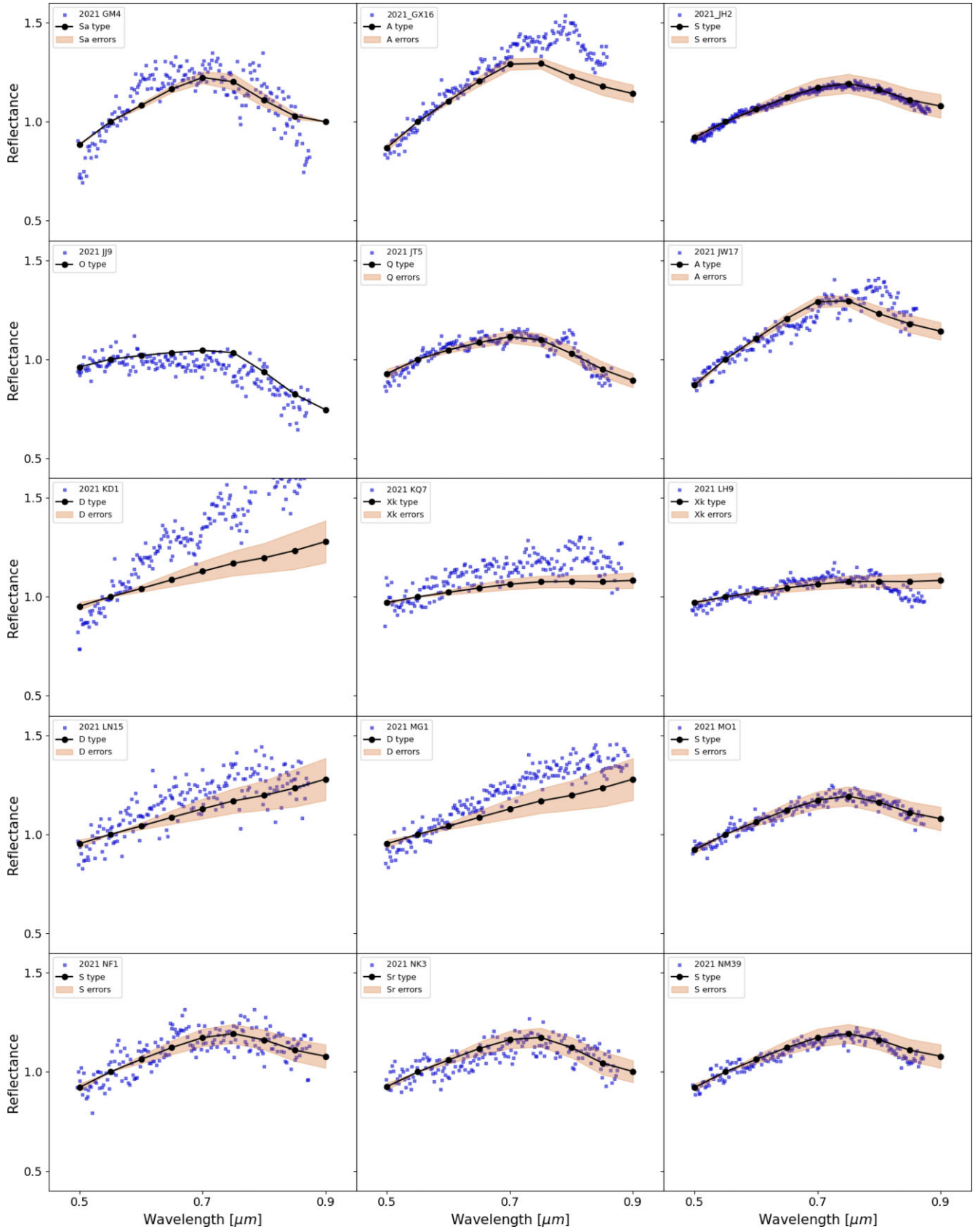


Figure 2. Continued.

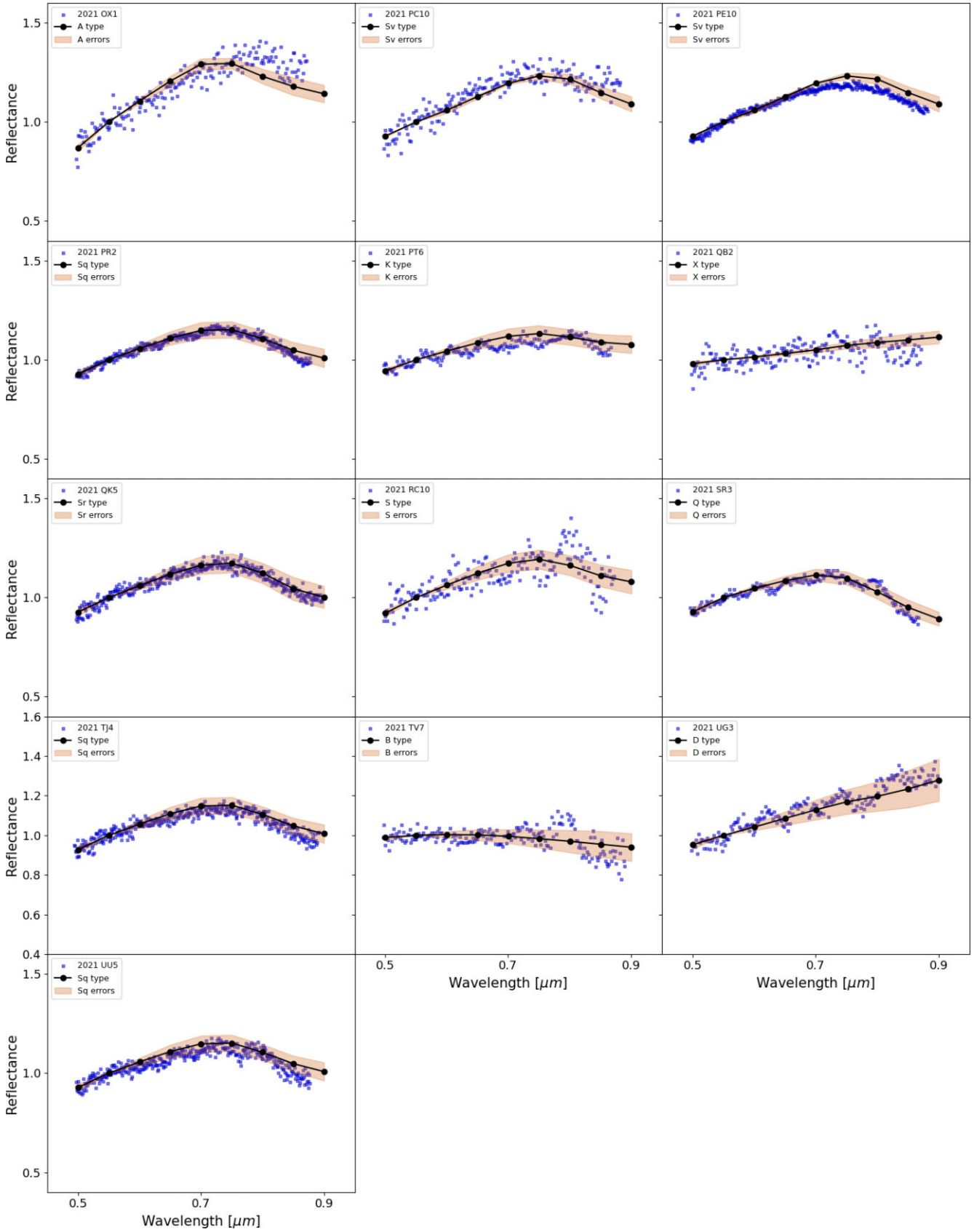


Figure 2. Continued.

Table 1. The table lists for each object: its designation, the date of observation, the solar phase angle (α), the belonging NEA group classification, the Tisserand parameter with Jupiter (T_J), the absolute magnitude H , the determined taxonomic type according to the Bus–DeMeo taxonomy (DeMeo et al. 2009), the mean albedo of the class according to Mainzer et al. (2011), and the computed equivalent diameter.

Asteroid	Date	α [°]	Class.	T_J	H [mag]	Tax.	Albedo	Diameter [m]
2019 GQ3	2020 Oct 11	30.1572	Apollo	4.175	20.75	Q	0.227	197.50
2020 ME5	2020 Oct 10	46.2403	Amor	3.507	20.4	A	0.191	252.97
2020 OC8	2020 Nov 06	47.1265	Amor	3.806	20.76	A	0.191	214.33
2020 RM6	2020 Oct 11	21.8043	Amor	3.100	24.9	S	0.211	30.30
2020 RP4	2020 Oct 11	12.8961	Amor	4.169	23.6	A	0.191	57.95
2020 SK5	2020 Oct 11	13.1427	Apollo	3.045	23.0	O	0.339	57.34
2020 TG3	2020 Dec 19	40.8312	Amor	2.975	22.5	Sq	0.243	85.27
2020 TG4	2021 Feb 17	25.5446	Amor	3.130	20.0	Ch	0.058	551.93
2020 TT7	2020 Dec 17	31.2868	Amor	4.130	22.27	S	0.211	101.73
2020 UZ3	2020 Nov 06	40.4511	Apollo	3.388	20.32	B	0.120	331.13
2020 WZ1	2020 Dec 17	16.8954	Apollo	5.581	20.4	D	0.048	504.63
2020 XK7	2021 Feb 17	38.4382	Apollo [PHA]	3.607	19.5	Ch	0.058	694.84
2021 BA1	2021 Mar 23	18.0050	Amor	3.375	22.66	A	0.191	89.34
2021 CN4	2021 Mar 22	36.9586	Amor	3.330	20.47	A	0.191	244.95
2021 CX5	2021 Mar 22	43.6637	Apollo	4.234	24.29	D	0.048	84.13
2021 GM4	2021 Jun 12	109.0518	Apollo [PHA]	3.119	21.81	Sa	0.367	95.33
2021 GX16	2021 Jun 13	27.2948	Amor	3.148	21.66	A	0.191	141.60
2021 JH2	2021 Aug 16	66.2982	Amor	3.483	19.34	S	0.211	392.15
2021 JJ9	2021 Jun 14	20.2599	Amor	3.871	22.29	O	0.339	79.52
2021 JT5	2021 Jun 13	26.6521	Amor	3.072	20.76	Q	0.227	196.60
2021 JW17	2021 Jun 14	27.4253	Amor	3.371	20.14	A	0.191	285.15
2021 KD1	2021 Jun 13	38.4981	Amor	2.979	20.88	D	0.048	404.55
2021 KQ7	2021 Aug 16	47.6158	Amor	3.335	19.98	Xk	0.095	435.24
2021 LH9	2021 Sep 26	34.6486	Amor	3.547	20.1	Xk	0.095	411.84
2021 LN15	2021 Aug 17	14.4805	Amor	3.449	20.23	D	0.048	545.73
2021 MG1	2021 Dec 02	39.6783	Apollo [PHA]	2.889	18.14	D	0.048	1428.82
2021 MO1	2021 Dec 01	32.9860	Amor	3.030	18.47	S	0.211	585.40
2021 NF1	2021 Aug 17	6.9983	Amor	3.604	19.8	S	0.211	317.29
2021 NK3	2021 Aug 17	20.5311	Amor	3.586	21.3	Sr	0.266	141.63
2021 NM39	2021 Sep 26	38.1553	Amor	3.645	20.3	S	0.211	252.03
2021 OX1	2021 Sep 26	30.9644	Amor	3.098	19.7	A	0.191	349.20
2021 PC10	2021 Sep 27	36.2548	Amor	4.451	22.34	Sv	0.309	81.39
2021 PE10	2021 Sep 26	41.2859	Amor	3.535	20.7	Sv	0.309	173.22
2021 PR2	2021 Sep 26	18.6029	Amor	3.840	22.5	Sq	0.243	85.27
2021 PT6	2021 Sep 26	17.8461	Amor	2.972	21.22	K	0.130	210.19
2021 QB3	2021 Sep 27	36.2755	Apollo	4.500	23.78	X	0.047	107.53
2021 QK5	2021 Sep 27	39.6561	Amor	3.766	19.23	Sr	0.243	367.41
2021 RC10	2021 Sep 27	17.4251	Apollo	3.377	23.84	S	0.211	49.36
2021 SR3	2021 Dec 01	13.0210	Amor	3.499	22.71	Q	0.227	80.09
2021 TJ4	2021 Dec 02	38.8269	Amor	3.680	21.96	Sq	0.243	109.34
2021 TV7	2021 Dec 01	26.2510	Amor	2.993	22.79	B	0.120	106.17
2021 UG3	2021 Dec 03	17.2693	Amor	4.079	21.52	D	0.048	301.28
2021 UU5	2021 Dec 03	54.2756	Apollo [PHA]	3.303	19.19	Sq	0.243	391.55

exposure time, the solar analogue star used, and its airmass at the instant of the observation.

3 RESULTS

In this work, we present the results of a 18-nights observational programme aimed to derive the taxonomic classification of small recently discovered NEOs. As a result 43 objects, discovered in 2019, 2020, and 2021, were observed and their reflectance spectra in the visible range (0.500–0.905 μm) obtained for the first time. The observed NEOs belong to the Amor and Apollo subgroups with 32 and 11 objects, respectively. Among these, four of the Apollo subgroup are PHAs: 2020 XK7, 2021 GM4, 2021 MG1, and 2021 UU5. The median absolute magnitude of the observed sample is

20.76, corresponding to a mean equivalent diameter between 200 and 400 m, depending on the albedo.

It is noteworthy that the quality of a spectrum is much impacted by the object’s visual magnitude and by the angular rate of change in apparent RA and Dec. Both these factors are unavoidable in the case of small NEOs and for our sample we computed a visual magnitude median value of 19.45 and angular rates of 134.95 [arcmin hr⁻¹] and 113.50 [arcmin hr⁻¹] in RA and Dec., respectively. Moreover, in the case of faint objects observed in poor sky conditions our spectra present a fringing pattern (wavy shape) that, however, does not much impact the taxonomic classification since it is similar at all wavelengths. Another important parameter that affects the reflectance spectra is the solar phase angle, α , at the moment of the observation. For our sample the median solar phase angle was 31.28° with the smallest value of 6.49°, for object 2020 NF1, and the

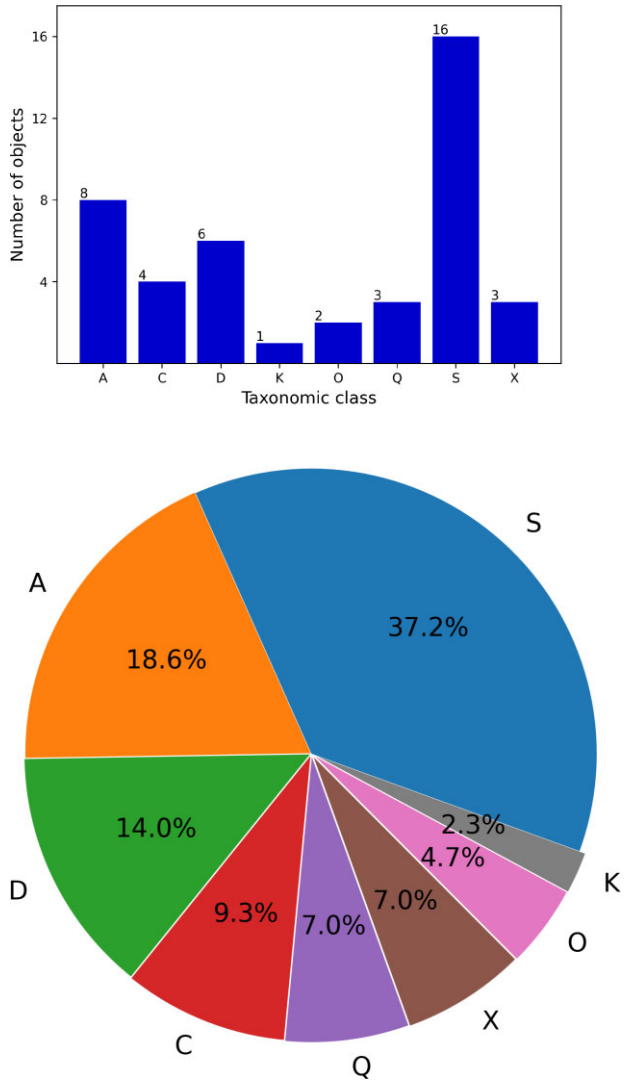


Figure 3. Taxonomic distribution of the 43 observed NEOs.

higher one, of 109.05° , for 2021 GM4. The median value indicates, however, that our sample is not much contaminated by high solar phase angle observations.

Due to the limited number of observed NEOs and in order to increase the significance of our analysis, we grouped objects classified as Sq-, Sr-, Sa-, and Sv-type, in the S-class, those classified as Xk-type in the X-class, and the two B-type in the C-class. As can be seen in Fig. 3, 16 NEOs fall into the S-class, which represents almost 40 per cent of our sample, while four, nearly 10 per cent, belong to the C-class. Surprisingly, a large number of objects were classified as A-type, eight, and as D-type, six, representing 19 per cent and 14 per cent of the sample, respectively. The remaining observed NEOs were classified as Q- and X-type, three objects each, as O-type and B-type, two, and as K-type, just one. The taxonomic distribution of our sample of small NEOs is, thus, dominated by the S-complex with a large fraction of A-type objects and, at a smaller extent, of D-type. This result is quite intriguing considering that in the Main Belt the fraction of A-type objects is considerably smaller (see, for example, DeMeo & Carry 2014). A possible interpretation is that this composition, mainly olivine, is very friable being present only among small sized objects. Since we are unable to observe objects in the Main Belt in the metre size, this could account for the mismatch

among the A-type fractions. Also, we cannot disregard the possibility of an incorrect classification for some of our objects due to the noise in spectra and/or the phase reddening effect. Both these effects could decrease the fraction of A-type in our sample, reconciling it with that of the Main Belt.

It is also important to mention that in the Bus–DeMeo taxonomy the A-class requires the NIR part of the spectra, so that some of our A-type can indeed be S-types. The same occurs with the O-class, quite rare, which is well characterized in the NIR but not in the visible part of the spectra, so that it is possible that our two O-types are Q-types, more common among the NEOs.

Regarding the NEOs members of the two dynamical groups, Amor and Apollo, the interesting difference is that all the A-type are found in former and none in the latter. On the other hand, the fraction of D-types and other classes is similar among the two groups. However, it is important to keep in mind that we are dealing with only 11 Apollo, and any statistic could be flawed by the small numbers.

Five NEOs among the observed sample – 2020 TG3, 2021 KD1, 2021 MG1, 2021 PT6, and 2021 TV7 – have a Jupiter Tisserand parameter, T_J , smaller than 3 (see Table 1). These NEOs are of particular interest considering that it is assumed that $T_J < 3$ correspond to objects in cometary orbits. Among the sample, just one object, 2020 TG3, is classified as Sq-type and, thus, not consistent with cometary material. One NEO, 2021 PT6, is classified as K-type, a composition associated to carbonaceous chondrite meteorites, especially CO and CV (DeMeo et al. 2022) and compatible with a cometary origin. Two objects, 2021 KD1 and 2021 MG1, are classified as D and one, 2021 TV7, as B-type. D-types are consistent with cometary origin. B-types could also be misclassified D-types in the presence of a dust coma as shown by Rondón-Briceño, Carvano & Lorenz-Martins (2017) using a reflectance model and proving that such coma around D-type objects can lower their spectral slope, turning them compatible to C- or X-type.

Similar evolution from D to C and P spectra was found by space weathering laboratory experiments on carbonaceous chondrite (Lantz, Binzel & DeMeo 2018; Hasegawa et al. 2022b) and is supported also by the observations of the spectrum of asteroid (596) Scheila, which was resurfaced by an impact in 2010 and experienced an increase in its spectral slope from T-type to D-type (Hasegawa et al. 2022a). If this is the case, the object 2021 TV7 would also be a D-type increasing the fraction of NEOs in this class among our sample. Therefore, just one object among the five NEOs observed do not present a composition compatible with a cometary origin. In a recent work, Simion et al. (2021) studied a large sample of NEOs with $T_J \leq 3.1$ and found a mixture of compositions, from silicate-like (S, A, Q) to carbonaceous (C, B) and an increase in the fraction of silicate-like objects when $T_J \geq 2.8$ which is the case for all the NEOs with a low-Jovian Tisserand parameter in this work. Of course, more observations of these objects are needed in order to better constrain their origin.

In comparison with other works (e.g. NEOSHIELD2, MANOS, MITHNEOS) our sample presents a smaller fraction of Q-, only two, and no V-type. This discrepancy might be due to the much smaller size of our sample, to the smaller size of our NEOs or, last but not least, to a misclassification. In the case of the V-types the small sample is likely the explanation, since its fraction is small even in the large surveys. Regarding the Q-type, a misclassification is possible since our spectra do have a larger noise at wavelengths above $\sim 0.7 \mu\text{m}$ which could lead to more objects being classified as S instead of Q. However, we cannot disregard the possibility that the smaller fraction of Q-type in our sample indicates real differences in

the taxonomic distribution according to the object's size, as will be discussed below.

Our sample equivalent diameter has a median value of 210.19 m, with the smallest object, 2020 RM6, with 30.0 m and the largest one, 2021 MG1, with 1428.82 m. We also examined the median values of the phase angle, and found similar values and no tendencies among the different taxonomies.

Considering these interesting results, but over a relatively small sample of NEOs, it is of much importance to compare them with those obtained by other works and/or populations.

4 DISCUSSION AND CONCLUSIONS

It is a fact that any comparative study among asteroid populations has several constraints. First of all the completeness. As mentioned above, among an expected population of millions of small objects within our Solar system, there is a limitation of completeness in their discovery and, to a higher degree in their physical characterization. Another problem is the observational bias. For any survey it is easier to observe larger and brighter objects. Despite these constraints, some trends in the taxonomic distribution of the NEOs population can be identified, as shown by diverse works.

Binzel et al. (2019) compiled more than 1000 NEOs and 300 Mars-crossers and noted that all taxonomic classes recognized in the Main Belt are identified among the NEOs. As in the inner Main Belt, the S-complex dominate being ~ 50 per cent of the sample while the B- and C-types are about 15 per cent. Of all the sample, D-types represent ~ 3 per cent, X-types ~ 10 per cent, V-types ~ 5 per cent, and Q-types ~ 5 – 10 per cent. Their results also indicate a strong compatibility between the overall NEO population and the subset of PHAs. However, Binzel et al. (2019) stress that their data and analysis is limited due to the median size of the sample, with only 10 per cent being of objects smaller than 150 m.

Perna et al. (2018) obtained the visible spectra and taxonomically classified 147 'small' objects with $H \geq 20$. As in the case of the Main Belt, a dominance of objects of the S-complex was found. In order to better constraint their results these authors also performed a comparison with data from the European Asteroid Research Node (EARN) data base of NEO's physical properties. The most significant difference is among the A- and D-types (see also Popescu et al. 2018 and Barucci et al. 2018). In Perna et al. (2018) these classes represent up to 5.48 and 6.85 per cent, respectively, compared to a 147 objects random sample from the EARN data base, where they are represented in a 0.47 and 1.38 per cent proportion. Comparing this distribution with that of large NEOs and of the Main Belt, the abundance of olivine-rich A-types may have implication in the widely known 'missing olivine problem' i.e. shortage of olivine-rich asteroids. On the other hand, the large number of D-types, considered to be very rare among the NEO population, might be probably due to the fragile nature of these carbonaceous bodies, which favours fragmentation. Perna et al. (2018) and Barucci et al. (2018) highlighted that this result could imply in a greater relevance of this population in the delivery of organic material to the primitive Earth.

More recently, Popescu et al. (2019) spectrally characterized a significant number of NEOs with sizes in the range of ~ 0.25 – 5.5 km. These authors observed 76 objects and found an agreement with previous results, where ~ 58 per cent of the objects belong to the Q/S-complex, ~ 21 per cent to the B/C-complex and about ~ 10 per cent of the miscellaneous classes. These percentages match the ones of the inner Main Belt, as described by Gradie & Tedesco (1982) and DeMeo & Carry (2014). Regarding the end-member classes, a small

number of V- and B-types were found as well as only two A- and no D-type.

Ieva et al. (2020) taxonomically classified 51 new small NEOs using photometric observations (colours). These results were then analysed including all available data in the literature, reaching a sample of 1081 NEOs. Their main result was that although the majority of objects belong to the S-complex, there is a larger fraction of C- and A-type among the smaller NEOs, i.e. those with higher absolute magnitude.

Finally, Marsset et al. (2022) presented NIR spectra of 420 objects obtained by the MITHNEOS. This data set, combined with observations from the literature, was then used to study the taxonomic distribution of the debiased NEO population and compare it with that of specific regions of the Main Belt, reckoned as main sources of NEOs. Their main result was that the distribution observed among the NEOs is compatible with that of their source regions and there are no large deviations between the large and small populations. It is noteworthy, however, that the majority of the observed set of NEOs has an absolute magnitude larger than 20, with a very smaller fraction with H larger than 22.5 (see fig. 1 in their paper). They also observed an overabundance of D-type objects among the NEOs, in agreement with Perna et al. (2018) and Barucci et al. (2018), as well as a paucity of V-types coming from the ν_6 resonance. Three hypothesis were presented for the observed overabundance of D-type among the NEOs: the presence of an unobserved large population of small-sized D-type in the Main Belt, the effect of space weathering (Lantz et al. 2018; Hasegawa et al. 2022b) turning D- in C- or P-type, and the fact that D-type in the NEO region are more friable (Perna et al. 2018). As shown by Rondón-Briceño et al. (2017) another possible explanation could be the presence of a thin dust coma. It is noteworthy that among our data set, five NEOs have a Tisserand parameter smaller than 3, which is indicative of a cometary origin, and four have spectra compatible with such an origin in accordance to previous works such as Simion et al. (2021).

The results obtained in this study on a sample of 43 small NEOs, with mean diameter between 200 and 400 m, confirm those previously obtained by Perna et al. (2018) and Ieva et al. (2020), tending to indicate significant differences in the taxonomic distribution according to the size. It is to be noted that a similar result for the Main Belt was already obtained by DeMeo & Carry (2014), showing that the composition distribution changes with the bodies sizes. More importantly, the smaller objects present a greater taxonomic diversity than the larger ones. It is important also to mention that in the case of the Main Belt the smaller observed objects have diameters in the range of 5–10 km, while the NEOs of hundred of metres, specially those sampled in this work. This might be the reason for finding a high percentage of objects which are rare in the Main Belt. It is noteworthy that a similar behaviour was recently obtained by Arcoverde et al. (2023) when trying to use phase curves to derive the taxonomic classification of NEOs. It was found that even among the Main Belt asteroids, the distribution of phase curve parameters changes with the objects size and that in the case of small bodies, it is not possible to derive the taxonomic classification from their phase curves.

Considering that the physical characterization of small bodies is one of the key elements on which planetary models relay, we would like to stress that surveys like the one presented here are of utmost importance.

ACKNOWLEDGEMENTS

Based on observations obtained at the Southern Astrophysical Research (SOAR) telescope, which is a joint project of the Ministério da

Ciência, Tecnologia, e Inovação (MCTI) da República Federativa do Brasil, the U.S. National Optical Astronomy Observatory (NOAO), the University of North Carolina at Chapel Hill (UNC), and Michigan State University (MSU). JM, ER, and DL would like to thank Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) and Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) for their support through diverse fellowship and grants. DP, SI, VP, ED, and EME acknowledge funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement no. 870403. We thank the reviewer, M. Popescu, for his comments and suggestions which much improved the paper.

DATA AVAILABILITY

The data underlying this study will be shared on reasonable request to the last author which is responsible for the SOAR observing project.

REFERENCES

- Alexander C. M. O., Bowden R., Fogel M. L., Howard K. T., Herd C. D. K., Nittler L. R., 2012, *Science*, 337, 721
- Arcoverde P. et al., 2023, *MNRAS*, 523, 739
- Barucci M. A. et al., 2018, *MNRAS*, 476, 4481
- Binzel R. P., Rivkin A. S., Stuart J. S., Harris A. W., Bus S. J., Burbine T. H., 2004, *Icarus*, 170, 259
- Binzel R. P., Reddy V., Dunn T. L., 2015, *Asteroids IV*. Univ. Arizona Press, p. Tucson, Arizona, USA 243
- Binzel R. et al., 2019, *Icarus*, 324, 41
- Bottke W. F., Morbidelli A., Jedicke R., Petit J.-M., Levison H. F., Michel P., Metcalfe T. S., 2002, *Icarus*, 156, 399
- Carry B., Solano E., Egl S., DeMeo F., 2016, *Icarus*, 268, 340
- Colvin T. J., Crane K., Lal B., 2020, *Acta Astronaut.*, 176, 298
- de León J., Licandro J., Serra-Ricart M., Pinilla-Alonso N., Campins H., 2010, *A&A*, 517, A23
- DeMeo F., Carry B., 2013, *Icarus*, 226, 723
- DeMeo F. E., Carry B., 2014, *Nature*, 505, 629
- DeMeo F. E., Binzel R. P., Slivan S. M., Bus S. J., 2009, *Icarus*, 202, 160
- DeMeo F. E. et al., 2022, *Icarus*, 380, 114971
- Devogèle M. et al., 2019, *AJ*, 158, 196
- Elvis M., 2013, in Badescu V. ed., *Asteroids: Prospective Energy and Material Resources*. Springer-Verlag, Berlin, p. 81,
- Emel'yanenko V. V. et al., 2013, *Sol. Syst. Res.*, 47, 240
- Gradie J., Tedesco E., 1982, *Science*, 216, 1405
- Greenstreet S., Ngo H., Gladman B., 2012, *Icarus*, 217, 355
- Harris A. W., Harris A. W., 1997, *Icarus*, 126, 450
- Hasegawa S. et al., 2022a, *ApJ*, 924, L9
- Hasegawa S. et al., 2022b, *ApJ*, 939, L9
- Ieva S. et al., 2014, *A&A*, 569, A59
- Ieva S. et al., 2018, *A&A*, 615, A127
- Ieva S. et al., 2020, *A&A*, 644, A23
- Lantz C., Binzel R., DeMeo F., 2018, *Icarus*, 302, 10
- Lazzarin M., Marchi S., Magrin S., Licandro J., 2005, *MNRAS*, 359, 1575
- Lazzarin M., Magrin S., Marchi S., 2008, *Mem. Soc. Astron. Ital. Suppl.*, 12, 20
- Mainzer A. et al., 2011, *ApJ*, 741, 90
- Marsset M. et al., 2022, *AJ*, 163, 165
- Marty B., 2012, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 313, 56
- Marty B. et al., 2016, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 441, 91
- Mesquita W., 2022, Estudo sobre a origem dos NEOs a partir da análise da distribuição de classes taxonômicas, Master's thesis, Observatorio Nacional Rio de Janeiro, Brasil 73
- Morbidelli A., Bottke W. F. J., Froeschlé C., Michel P., 2002, *Asteroids III*. Univ. Arizona Press, p. Tucson, Arizona, USA 409
- Nemchinov I., Shuvalov V., Svetsov V., 2008, in Adushkin V., Nemchinov I. eds, *Catastrophic Events Caused by Cosmic Objects*. Springer-Verlag, Berlin, p. 1
- Perna D. et al., 2018, *Planet. Space Sci.*, 157, 82
- Popescu M., Birlan M., Nedelcu D. A., 2012, *A&A*, 544, A130
- Popescu M. et al., 2018, *MNRAS*, 477, 2786
- Popescu M. et al., 2019, *A&A*, 627, A124
- Rondón-Briceño E., Carvano J. M., Lorenz-Martins S., 2017, *MNRAS*, 468, 1556
- Sergeyev A. V., Carry B., 2021, *A&A*, 652, A59
- Simion N. G., Popescu M., Licandro J., Vaduvescu O., de León J., Gherase R. M., 2021, *MNRAS*, 508, 1128
- Tricarico P., 2017, *Icarus*, 284, 416

APPENDIX A: SOME EXTRA MATERIAL

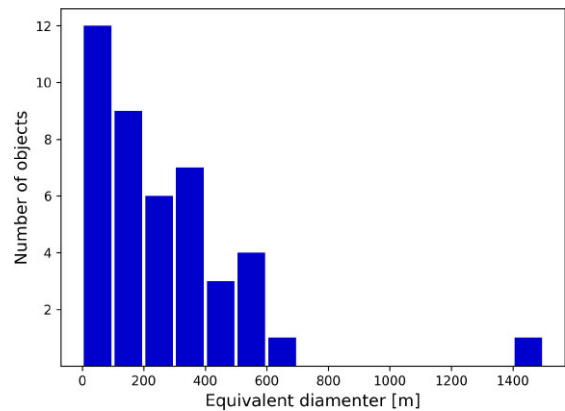


Figure A1. Distribution of the equivalent diameters of the observed NEOs computed by taking into account the mean albedo of its assigned taxonomic classification given by Mainzer et al. (2011).

Table A1. Observational circumstances. The table lists for each object: its designation, the date and the start time (UT), the visual magnitude (AP mag), the airmass (a-mass), the angular rate of change in apparent RA and Dec. [$d(\text{RA}) dt^{-1}$, $d(\text{Dec.}) dt^{-1}$], the exposure time, the solar analogue, and its airmass.

Object	Data	UT _{start}	AP mag	a-mass	$d(\text{RA}) dt^{-1}$ [arcmin hr ⁻¹]	$d(\text{Dec.}) dt^{-1}$ [arcmin hr ⁻¹]	Exp. time [s]	Solar Analogue	Analogue a-mass
2019 GQ3	2020 Oct 11	08:43:11	19.090	2.166	3.553	-222.810	1200	HIP 94698	1.046
2020 ME5	2020 Oct 10	04:37:35	19.730	1.330	93.352	18.94900	3 × 1200	HIP 107095	1.170
2020 OC8	2020 Nov 06	05:19:14	18.285	1.600	245.708	-0.56041	1200	HIP 118319	1.080
2020 RM6	2020 Oct 11	07:34:46	18.903	1.525	753.779	485.6641	2 × 600	HIP 94698	1.046
2020 RP4	2020 Oct 11	03:50:14	19.980	1.600	-10.729	222.4918	3 × 1200	HIP 94698	1.046
2020 SK5	2020 Oct 11	01:20:19	20.105	1.370	95.989	87.83817	3 × 1200	HIP 94698	1.046
2020 TG3	2020 Dec 19	08:03:03	20.464	1.163	105.733	-26.8606	1200	HIP 33033	1.030
2020 TG4	2021 Feb 17	02:50:00	20.314	1.275	55.522	4.815114	1200	HIP 57366	1.320
2020 TT7	2020 Dec 17	01:18:07	20.358	1.360	38.543	27.18619	3 × 1200	HIP 27779	1.080
2020 UZ3	2020 Nov 06	03:17:51	18.912	1.088	-215.067	142.6355	1200	HIP 118319	1.080
2020 WZ1	2020 Dec 17	03:48:17	19.908	1.270	-194.083	-204.005	3 × 1200	HIP 27779	1.080
2020 XK7	2021 Feb 17	08:44:11	18.223	1.134	158.974	-134.802	600	HIP 57366	1.320
2021 BA1	2021 Mar 23	04:42:51	18.965	1.465	209.766	-110.839	1200	HIP 57833	1.110
2021 CN4	2021 Mar 22	09:13:33	17.759	1.172	123.1063	173.8004	1200	HIP 71559	1.270
2021 CX5	2021 Mar 22	00:58:05	18.061	1.077	461.941	-711.033	1200	HIP 71559	1.270
2021 GM4	2021 Jun 12	23:55:58	20.28	1.960	-178.037	-71.6313	1200 + 900	HIP 78425	1.172
2021 GX16	2021 Jun 13	05:17:29	19.960	1.286	97.668	0.394907	1200	HIP 78425	1.172
2021 JH2	2021 Aug 16	08:35:58	16.491	1.039	-155.704	377.9913	900	HIP 109675	1.041
2021 JJ9	2021 Jun 14	05:58:42	19.313	1.232	169.627	79.88961	900	HIP 78425	1.172
2021 JT5	2021 Jun 13	06:00:51	19.055	1.615	2.823	-50.9849	2 × 1200	HIP 78425	1.172
2021 JW17	2021 Jun 14	00:42:05	20.039	1.050	-101.637	-106.062	900	HIP 78425	1.172
2021 KD1	2021 Jun 13	08:56:03	20.051	2.040	101.761	-88.9644	2 × 600 + 900	HIP 78425	1.172
2021 KQ7	2021 Aug 16	07:57:29	19.804	1.056	42.859	47.90507	1200	HIP 109675	1.041
2021 LH9	2021 Sep 26	00:00:46	19.488	1.360	102.718	24.69725	2 × 1200	HIP 106356	1.423
2021 MG1	2021 Dec 02	04:10:19	19.454	1.096	-64.088	36.52772	1200	HIP 15776	1.090
2021 MO1	2021 Dec 01	01:16:48	19.618	1.707	63.787	46.57079	1200	HIP 9197	1.791
2021 NF1	2021 Aug 17	04:18:32	18.468	1.120	13.755	-50.3644	900	HIP 109675	1.093
2021 NK3	2021 Aug 17	05:57:43	20.117	1.375	43.522	-27.9470	1200	HIP 116262	1.330
2021 NM39	2021 Sep 26	04:49:02	19.060	1.30	1.093	-54.6026	2 × 1200	HIP 106102	1.697
2021 OX1	2021 Sep 26	06:20:37	19.780	1.461	32.303	1.024326	1500	HIP 111838	1.522
2021 PC10	2021 Sep 27	06:06:38	20.031	1.220	127.344	-113.683	2 × 1200	HIP 94154	1.307
2021 PE10	2021 Sep 26	01:11:46	19.331	1.190	129.469	-7.42005	2 × 1200	HIP 96379	1.428
2021 PR2	2021 Sep 26	03:32:25	18.082	1.105	290.643	12.47196	2 × 900	HIP 111063	1.034
2021 PT6	2021 Sep 26	07:07:12	19.342	1.285	116.130	-203.017	2 × 1500	HIP 4117	1.402
2021 QB3	2021 Sep 27	08:32:11	20.274	1.109	-29.123	12.128910	1200	HIP 9496	1.290
2021 QK5	2021 Sep 27	04:36:07	19.293	1.475	31.441	128.3874	2 × 1200	HIP 113688	1.603
2021 RC10	2021 Sep 27	03:17:33	20.167	1.780	59.913	-26.2689	1200	HIP 113688	1.603
2021 SR3	2021 Dec 01	02:51:33	18.553	1.390	226.214	51.03979	2 × 1200	HIP 19767	1.810
2021 SR3	2021 Dec 01	02:51:33	18.553	1.390	226.214	51.03979	2 × 1200	HIP 19767	1.810
2021 TJ4	2021 Dec 02	01:14:22	19.123	1.155	104.220	246.8394	2 × 900	HIP 15776	1.082
2021 TV7	2021 Dec 01	02:06:38	19.492	1.322	259.361	25.25317	1200	HIP 9911	1.157
2021 UG3	2021 Dec 03	02:29:10	20.614	1.321	-39.561	128.1865	1800	HIP 16169	1.100
2021 UU5	2021 Dec 03	03:32:31	18.749	1.361	-426.824	173.4930	1200	HIP 8455	1.240

This paper has been typeset from a \TeX/L\TeX file prepared by the author.