



OBSERVATÓRIO NACIONAL
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ASTRONOMIA

ESTUDO SOBRE A ORIGEM DOS NEOs A
PARTIR DA ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DE
CLASSES TAXONÔMICAS

FRANCISCO WESLEY DE OLIVEIRA MESQUITA

ORIENTADORA: DRA. DANIELA LAZZARO

RIO DE JANEIRO - RJ
2022

ESTUDO SOBRE A ORIGEM DOS NEOS A PARTIR DA ANÁLISE DA
DISTRIBUIÇÃO DE CLASSES TAXONÔMICAS

Francisco Wesley de Oliveira Mesquita

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Astronomia do Observatório Nacional/MCTI, como parte dos requisitos necessários à obtenção do Grau de Mestre em Astronomia.

Orientadora: Daniela Lazzaro

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2022

ESTUDO SOBRE A ORIGEM DOS NEOS A PARTIR DA ANÁLISE DA
DISTRIBUIÇÃO DE CLASSES TAXONÔMICAS

Francisco Wesley de Oliveira Mesquita

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ASTRONOMIA DO OBSERVATÓRIO NACIONAL/MCTI COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM ASTRONOMIA.

Examinada por:

,

,

,

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
FEVEREIRO DE 2022

Wesley de Oliveira Mesquita, Francisco

Estudo sobre a origem dos NEOs a partir da análise da distribuição de classes taxonômicas/Francisco Wesley de Oliveira Mesquita. – Rio de Janeiro: ON/MCTI, 2022.

XVIII, 73 p.: il.; 29, 7cm.

Orientadora: Daniela Lazzaro

Dissertação (mestrado) – ON/MCTI/Programa de Pós-graduação em Astronomia, 2022.

Referências Bibliográficas: p. 67 – 73.

1. Objetos próximos da Terra.
2. Taxonomia.
3. Espectrofotométrico.
4. IMPACTON. I. , . II. Observatório Nacional/MCTI, Programa de Pós-graduação em Astronomia. III. Estudo sobre a origem dos NEOs a partir da análise da distribuição de classes taxonômicas

*À minha mãe Rosa, ao meu pai
Francisco, aos meus irmãos
Weuler e Maria Clara. À mim.*

Agradecimentos

Após muito esforço e dedicação, chego ao fim deste Mestrado que não seria possível sem o apoio e colaboração de muitos, para os quais aqui eu apresento os meus agradecimentos.

À minha fé e determinação que nunca me deixaram desistir dos meus sonhos e objetivos. Só eu sei o tanto de obstáculos que tive que passar para chegar a esse momento.

Aos meus pais **Rosa e Francisco** e meus irmãos, **Weuler e Maria Clara**, que sempre deram seu amor e apoio.

À minha orientadora, professora Dra. Daniela Lazzaro, pelo suporte, grande paciência, dedicação, compreensão, enorme ajuda e incentivo ao longo de todo o período de desenvolvimento do trabalho. Muito obrigado por tudo.

À todos da família Oliveira, Rodrigues e Mesquita, que também me ajudaram e apoiaram muito. Obrigado!

À Thais, minha carioca preferida. Obrigado por ter compartilhado tantos momentos marcantes, e por ter me ajudado tanto em terras cariocas. Seu companheirismo e apoio foram fundamentais. Agradeço também a sua **mãe (Anna)** e ao **seu irmão (Bruno)** que me ajudaram muito quando estava no Rio de Janeiro. Obrigado, de coração.

Aos meus professores do Curso de Física da Universidade Estadual Vale do Acaraú, em especial aos professores Luiz Ozório e Valmir Leite. Vocês me ajudaram a chegar até o mestrado. Sempre me apoiaram e me motivaram. Sem vocês não teria conseguido.

Aos meus amigos: Roberto Ferreira, Wesley Nathan, Josué Cavalcante e Luciano Cordeiro, que mesmo distante se fazem presente para me dar

forças.

À Jonatan Michimani, o mexicano mais brasileiro que conheço. Obrigado por toda a sua ajuda durante a convivência no Rio de Janeiro. **À Hissa e Marçal**, que me receberam muito bem quando cheguei ao Rio e que me ajudaram na adaptação.

Ao Observatório Nacional, por oferecer a infraestrutura necessária para minha formação e realização deste trabalho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro - FAPERJ e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, que financiaram este trabalho.

Ao grupo de Ciências Planetárias do Observatório Nacional: a todos os professores e alunos, pela oportunidade de participar de um grupo qualificado e diversificado onde é feita uma constante discussão de diversos temas científicos.

À equipe do projeto IMPACTON, por toda iniciativa e esforços para manter nossa pesquisa em andamento.

À equipe de observadores: Hissa, Filipe, Eduardo, Marçal, José Wesley e Plícida, pelas noites de observação. Sem vocês não seria possível a conclusão desse trabalho. Queria agradecer em especial aos meus amigos **José Wesley e Marçal** que me ajudaram demais na redução de dados e finalização da dissertação. Obrigado!

Aos meus colegas do Observatório Nacional, por todos bons momentos nas salas, na copa, nos ajudando no dia a dia.

À todos os funcionários do Observatório Nacional, em especial, **Dona Ana e Márcia** que me ajudaram muito quando cheguei ao Rio de Janeiro. **À Ana e Marcelo** (grandes botafoguenses), obrigado pelas conversas. Além de **Márcio e Dona Ângela**.

À todos, que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento desta Dissertação.

Resumo da Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Astronomia do Observatório Nacional/MCTI como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Astronomia (M.Sc.)

ESTUDO SOBRE A ORIGEM DOS NEOS A PARTIR DA ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DE CLASSES TAXONÔMICAS

Francisco Wesley de Oliveira Mesquita

Fevereiro/2022

Orientadora: Daniela Lazzaro

Programa: Astronomia

No presente trabalho realizamos um estudo visando melhor entender a origem dos objetos em órbita próxima da Terra (NEOs) utilizando a distribuição de composições superficiais, ou classes taxonômicas, destes em comparação com as de diversas populações de asteroides do Cinturão Principal. Foram utilizados majoritariamente dados obtidos da literatura e, também, de NEOs, sem prévia classificação taxonômica, obtidos a partir de observações realizadas no Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica (OASI). O estudo foi desenvolvido utilizando dois conjuntos de dados: os espectroscópicos, obtidos integralmente da literatura, e os espectrofotométricos, a maior parte resultantes do grande mapeamento fotométrico SDSS e 3 obtidos dentro do presente projeto. A análise e comparação das distribuições de classes taxonômicas foi realizada separadamente para cada conjunto de dados e em seguida comparadas. Como principais resultados vale ressaltar a elaboração de uma compilação atualizada de todas as classificações taxonômicas disponíveis na literatura e a partir desta foram computados novos valores médios do albedo para as diversas classes. Desta forma foi possível estimar o tamanho de objetos com classificação taxonômica, mas sem albedo determinado, e assim estudar a influência do diâmetro nas diversas distribuições. Foram obtidos espectros fotométricos para seis NEOs permitindo a classificação taxonômica para três destes. Também foram detalhadas e discutidas as diferenças existentes entre as amostras das classificações taxonômicas obtidas a partir de dados espectroscópicos e espectrofotométricos e as

tendências embutidas. O principal resultado sendo que as duas amostras, embora complementares em termos de tamanho dos objetos, precisam ser analisadas com cuidado. Por fim, no que se refere às distribuições de classes taxonômicas de NEOs e de diversas regiões do Cinturão Principal apesar dos resultados não serem conclusivos, é possível afirmar que tanto o cinturão interno como um todo, quanto as regiões próximas às ressonâncias de movimento médio 3:1 com Júpiter e secular ν_6 com Saturno, tem distribuições de composição similares. Isto indicando essas regiões como possíveis fontes de NEOs de acordo com o previsto por modelos teóricos.

Abstract of Dissertation presented to Observatório Nacional/MCTI as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Astronomy (M.Sc.)

STUDY ON THE ORIGIN OF NEOS FROM THE ANALYSIS OF THE DISTRIBUTION OF TAXONOMIC CLASSES

Francisco Wesley de Oliveira Mesquita

February/2022

Advisor: Daniela Lazzaro

Department: Astronomy

In the present work we performed a study aiming to better understand the origin of Near-Earth Objects (NEOs) using their surface composition distribution, or taxonomic classification, in comparison with those of diverse Main Belt populations. Data from the literature was mainly used as well as some NEOs, with no previous classification, from observations performed at the Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica (OASI). The study was performed using two data sets: the first with spectra, totally obtained from the literature, and the other with photometric spectra, the largest part being from the Sloan Digital Spectroscopic Survey (SDSS) and some obtained within this project. The analysis and comparison of the taxonomic class distribution has been performed separately for each one of the data sets and then compared. Among the obtained results we mention the up-to-date compilation of all objects with a taxonomic classification available in the literature and from this the computation of new mean values of the mean albedo for the different classes. From these new values it was then possible to compute the size of objects with taxonomic classification, but without an albedo, and analyze the effect of the diameter on the obtained distributions. We obtained the photometric spectra for six NEOs allowing the taxonomic classification for three of them. The differences among the spectroscopic and spectrophotometric samples were also analyzed and discussed, along with the existing bias. The main result being that the two samples, although complementary in terms of objects size need to be analyzed with care due to different resolutions and bias. Finally, regarding the taxonomic classifications

of the NEOs and different Main Belt regions, although the results are not conclusive it is possible to say that the inner main belt and the regions near the mean motion resonance 3:1 with Jupiter and secular resonance ν_6 with Saturn, present similar distributions. This indicating these regions as possible origin of the NEOs, as predicted by theoretical models.

Sumário

Lista de Figuras	xii
Lista de Tabelas	xvii
1 Introdução	1
1.1 Objetos em órbitas próximas da Terra - NEOs	2
1.2 Taxonomias	6
1.3 Estado da arte sobre a distribuição de classes taxonômicas entre os NEOs	10
2 Metodologia	16
2.1 Dados da literatura	16
2.2 Novos dados	19
2.2.1 Obtenção de dados	20
2.2.2 Seleção e redução dos dados	21
2.2.3 Espectro fotométrico e classificação taxonômica	24
3 Distribuições de classes taxonômicas	29
3.1 Distribuições utilizando dados espectroscópicos	30
3.1.1 Comparação entre NEOs e diferentes populações de asteroides	30
3.1.2 Comparação entre NEOs e regiões fontes	40
3.2 Distribuições utilizando dados espectrofotométricos	47
3.2.1 Comparação entre NEO e diferentes populações de asteroides .	47
3.2.2 Comparação entre NEOs e possíveis regiões de origem	53
4 Conclusões e perspectivas futuras	60
Referências Bibliográficas	67

Lista de Figuras

1.1	<i>Representação orbital dos subgrupos da população de NEOs. Figura retirada de Monteiro (2016).</i>	3
1.2	<i>Classificação de espectros segundo a taxonomia de Tholen. Figura retirada de Tholen (1984).</i>	8
1.3	<i>Taxonômica de Bus e sua comparação com a taxonomia de Tholen, onde se mostra o complexo C (delimitado pela linha em cor amarelo), complexo X (linha azul) e S (linha vermelha). Figura retirada de Rondón (2016).</i>	9
1.4	<i>Taxonomia de DeMeo e sua comparação com a taxonomia de Bus. Figura retirada de Rondón (2016).</i>	9
1.5	<i>Logaritmo da reflectância média para as classes taxonômicas fotométricas usando os dados do catálogo MOC4 de SDSS definidas por Carvano et al. (2010). Figura retirada de Carvano et al. (2010).</i>	10
1.6	<i>Histograma dos tipos taxonômicos de acordo com a Taxonomia de Tholen. Figura retirada de McFadden et al. (1989).</i>	11
1.7	<i>Histograma da porcentagem dos tipos taxonômicos de acordo com a taxonomia de Tholen. Figura retirada de Lupishko and Di Martino (1998).</i>	11
1.8	<i>Histograma das proporções relativas da distribuição de classes taxonômicas, segundo a taxonomia de Tholen, para 230 NEOs. Figura retirada de Binzel et al. (2002).</i>	12
1.9	<i>Histograma da distribuição de classes taxonômicas, segundo a taxonomia de Bus, para mais de 1000 NEOs. Figura retirada de Binzel et al. (2015).</i>	13
1.10	<i>Distribuição do histograma para regiões de origem de asteróides próximos à Terra com base no modelo de evolução orbital de Bottke et al. (2002a). Figura retirada de Binzel et al. (2004).</i>	14
1.11	<i>Contribuição relativa das distintas regiões de origem dos NEOs em função da magnitude absoluta H. Figura retirada de Granvik et al. (2018).</i>	15

2.1	<i>Albedos médios para cada classe espectral da taxonomia Bus. Figura retirada de Jasmim (2013).</i>	18
2.2	<i>Imagem do Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica, onde estão indicados a cúpula e diversos periféricos.</i>	20
2.3	<i>Exemplo de transmissão de filtro u', g', r', i', z', a linha pontilhada mostra a eficiência quântica. Figura retirada de Fukugita et al. (1996).</i>	24
2.4	<i>Espectro fotométrico do asteroide (85275) 1994 LY.</i>	25
2.5	<i>Espectro fotométrico do asteroide (163348) 2002 NN4.</i>	26
2.6	<i>Espectro fotométrico do asteroide (474179) 1999 VS6.</i>	26
2.7	<i>Espectro fotométrico para os asteroides (267494) 2002 JB9, (433992) 2000 HD74 e (503960) 2004 QF1. Em todas as figuras, os pontos e linhas vermelhos se referem ao objeto enquanto as linhas preta, azul e roxa representam o template da classe C, de acordo com Carvano et al. (2010).</i>	27
3.1	<i>Distribuição das classes taxonômicas de acordo com o agrupamento A (DeMeo et al. 2009) para objetos de todos os tamanhos. As cores indicam as diferentes classes conforme indicado na legenda abaixo.</i>	31
3.2	<i>Distribuição das classes taxonômicas de acordo com o agrupamento B (Perna et al. 2016) para objetos de todos os tamanhos. As cores indicam as diferentes classes conforme indicado na legenda abaixo.</i>	32
3.3	<i>Distribuição das classes taxonômicas de acordo com o agrupamento A (DeMeo et al. 2009) para objetos com diâmetro menor do que 10 km. As cores indicam as diferentes classes conforme indicado na legenda abaixo.</i>	34
3.4	<i>Distribuição das classes taxonômicas de acordo com o agrupamento B (Perna et al. 2016) para objetos com diâmetro menor do que 10 km. As cores indicam as diferentes classes conforme indicado na legenda abaixo.</i>	34
3.5	<i>Distribuição das classes taxonômicas de acordo com o agrupamento A (DeMeo et al. 2009) para objetos com diâmetro menor do que 5 km. As cores indicam as diferentes classes conforme indicado na legenda abaixo.</i>	36
3.6	<i>Distribuição das classes taxonômicas de acordo com o agrupamento B (Perna et al. 2016) para objetos com diâmetro menor do que 5 km. As cores indicam as diferentes classes conforme indicado na legenda abaixo.</i>	37

3.7	<i>Distribuição de classes taxonômicas (agrupamento A) para a população dos NEOs, na esquerda, e do cinturão interno, da direita, para diferentes faixas de diâmetro. Para cada faixa de tamanho e população é dado número de objetos utilizados.</i>	39
3.8	<i>Distribuição de classes taxonômicas (agrupamento A) para a população dos NEOs para diferentes faixas de diâmetro. Para cada faixa de tamanho é dado número de objetos utilizados.</i>	40
3.9	<i>Esquema da região à esquerda da ressonância de movimentos médio 3:1. A faixa está delimitada pelas linhas magenta sobrepostas à imagem obtida do site AstDyS-2 do espaço de semieixo e seno da inclinação próprios. Em vermelho, amarelo e verde estão indicadas as famílias identificadas através da metodologia descrita em Milani et al. (2014) indicando o núcleo, o halo e objetos incluídos, respectivamente.</i>	41
3.10	<i>Distribuição de classes taxonômicas na borda externa do cinturão interno e na população dos NEOs, para diferentes faixas de diâmetro e utilizando o agrupamento A (DeMeo et al. 2009). Para cada faixa de tamanho é dado número de objetos considerados.</i>	41
3.11	<i>Distribuição de classes taxonômicas na borda externa do cinturão interno e na população dos NEOs, para diferentes faixas de diâmetro e utilizando o agrupamento B (Perna et al. 2016). Para cada faixa de tamanho é dado número de objetos considerados.</i>	42
3.12	<i>Esquema da região à esquerda da ressonância de movimentos médio 3:1. A faixa está delimitada pelas linhas magenta sobrepostas à imagem obtida do site AstDyS-2 do espaço de semieixo e seno da inclinação próprios. Em vermelho, verde e amarelo estão indicadas as famílias identificadas através da metodologia descrita em Milani et al. (2014).</i>	43
3.13	<i>Distribuição de classes taxonômicas na borda interna do cinturão intermediário e na população dos NEOs, para diferentes faixas de diâmetro e utilizando o agrupamento A (DeMeo et al. 2009). Para cada faixa de tamanho é dado número de objetos considerados.</i>	44
3.14	<i>Distribuição de classes taxonômicas na borda interna do cinturão intermediário e na população dos NEOs, para diferentes faixas de diâmetro e utilizando o agrupamento B (Perna et al. 2016). Para cada faixa de tamanho é dado número de objetos considerados.</i>	44

3.15	<i>Esquema da região próxima à ressonância secular ν_6. A faixa estudada está delimitada pelas linhas magenta sobrepostas à imagem obtida do site AstDyS-2 do espaço de semieixo e seno da inclinação próprios. Em vermelho, verde e amarelo estão indicadas as famílias identificadas através da metodologia descrita em Milani et al. (2014).</i>	45
3.16	<i>Distribuição de classes taxonômicas próximo da ressonância secular ν_6 e na população dos NEOs, para diferentes faixas de diâmetro e utilizando o agrupamento A (DeMeo et al. 2009). Para cada faixa de tamanho é dado número de objetos considerados.</i>	46
3.17	<i>Distribuição de classes taxonômicas próximo da ressonância secular ν_6 e na população dos NEOs, para diferentes faixas de diâmetro e utilizando o agrupamento B (Perna et al. 2016). Para cada faixa de tamanho é dado número de objetos considerados.</i>	46
3.18	<i>Distribuição das classes taxonômicas de acordo com o agrupamento A (DeMeo et al. 2009) para objetos de todos os tamanhos. As cores indicam as diferentes classes conforme indicado na legenda abaixo.</i>	48
3.19	<i>Distribuição das classes taxonômicas de acordo com o agrupamento B (Perna et al. 2016) para objetos de todos os tamanhos. As cores indicam as diferentes classes conforme indicado na legenda abaixo.</i>	49
3.20	<i>Distribuição das classes taxonômicas de acordo com o agrupamento A (DeMeo et al. 2009) para objetos com diâmetro menor do que 10 km. As cores indicam as diferentes classes conforme indicado na legenda abaixo.</i>	51
3.21	<i>Distribuição das classes taxonômicas de acordo com o agrupamento B (Perna et al. 2016) para objetos com diâmetro menor do que 10 km. As cores indicam as diferentes classes conforme indicado na legenda abaixo.</i>	51
3.22	<i>Distribuição das classes taxonômicas de acordo com o agrupamento A (DeMeo et al. 2009) para objetos com diâmetro menor do que 5 km. As cores indicam as diferentes classes conforme indicado na legenda abaixo.</i>	53
3.23	<i>Distribuição das classes taxonômicas de acordo com o agrupamento B (Perna et al. 2016) para objetos com diâmetro menor do que 5 km. As cores indicam as diferentes classes conforme indicado na legenda abaixo.</i>	53
3.24	<i>Distribuição de classes taxonômicas na borda externa do cinturão interno e na população dos NEOs, para diferentes faixas de diâmetro e utilizando o agrupamento A (DeMeo et al. 2009). Para cada faixa de tamanho é dado número de objetos considerados.</i>	55

3.25	<i>Distribuição de classes taxonômicas na borda externa do cinturão interno e na população dos NEOs, para diferentes faixas de diâmetro e utilizando o agrupamento B (Perna et al. 2016). Para cada faixa de tamanho é dado número de objetos considerados.</i>	55
3.26	<i>Distribuição de classes taxonômicas na borda externa do cinturão interno e na população dos NEOs, para diferentes faixas de diâmetro e utilizando o agrupamento A (DeMeo et al. 2009). Para cada faixa de tamanho é dado número de objetos considerados.</i>	57
3.27	<i>Distribuição de classes taxonômicas na borda interna do cinturão intermediário e na população dos NEOs, para diferentes faixas de diâmetro e utilizando o agrupamento B (Perna et al. 2016). Para cada faixa de tamanho é dado número de objetos considerados.</i>	57
3.28	<i>Distribuição de classes taxonômicas próximo da ressonância secular ν_6 e na população dos NEOs, para diferentes faixas de diâmetro e utilizando o agrupamento A (DeMeo et al. 2009). Para cada faixa de tamanho é dado número de objetos considerados.</i>	58
3.29	<i>Distribuição de classes taxonômicas próximo da ressonância secular ν_6 e na população dos NEOs, para diferentes faixas de diâmetro e utilizando o agrupamento B (Perna et al. 2016). Para cada faixa de tamanho é dado número de objetos considerados.</i>	59

Lista de Tabelas

1.1	<i>Subgrupos de NEOs, sua definição e número de objetos conhecidos até 20-01-2022, onde a é o semi-eixo maior, Q é a distância afélica e q é a distância periélica.</i>	4
2.1	<i>Tabela com os albedos médios, e erro associado, para cada classe da taxonomia DeMeo. Na última coluna é dado o número de objetos com albedo conhecido em cada classe.</i>	19
2.2	<i>Parâmetros físicos dos 8 objetos observados entre Abril de 2020 e Dezembro de 2020. Os dados foram obtidos dos sites NEODyS-2 e EARN.</i>	22
2.3	<i>Circunstâncias observacionais dos asteroides nas noites de observação.</i>	23
3.1	<i>Divisão das classes taxonômicas para fins de análise das distribuições</i>	29
3.2	<i>Número de objetos de todos os diâmetros, por região, que contêm classificação taxonômica e a quantidade de objetos que contêm diâmetros determinados e estimados.</i>	31
3.3	<i>Número de objetos para a faixa de diâmetro 0 km - 10 km, por região, que contêm classificação taxonômica e a quantidade de objetos que contêm diâmetros determinados e estimados.</i>	33
3.4	<i>Número de objetos para a faixa de diâmetro 0 km - 5 km, por região, que contêm classificação taxonômica e a quantidade de objetos que contêm diâmetros determinados e estimados.</i>	36
3.5	<i>Número de objetos para várias faixas de diâmetros, para a região dos NEOs, que contêm classificação taxonômica e a quantidade de objetos que contêm diâmetros determinados e estimados.</i>	38
3.6	<i>Número de objetos para várias faixas de diâmetros, para a região do Cinturão Interno, que contêm classificação taxonômica e a quantidade de objetos que contêm diâmetros determinados e estimados.</i>	38
3.7	<i>Número de objetos de todos os diâmetros, por região, que contêm classificação taxonômica e a quantidade de objetos que contêm diâmetros determinados e estimados.</i>	48

3.8	<i>Número de objetos para a faixa de diâmetro 0 km - 10 km, por região, que contêm classificação taxonômica e a quantidade de objetos que contêm diâmetros determinados e estimados.</i>	50
3.9	<i>Número de objetos para a faixa de diâmetro 0 km - 5 km, por região, que contêm classificação taxonômica e a quantidade de objetos que contêm diâmetros determinados e estimados.</i>	52
4.1	<i>Para as diferentes populações e regiões analisadas é dado o número de objetos com classificação taxonômica a partir de dados espectroscópicos e espectrofotométricos.</i>	61

Capítulo 1

Introdução

O Sistema Solar é composto por três grandes classes de corpos: planetas, planetas anões e pequenos corpos. Os objetos de cada uma dessas classes possuem características físicas e dinâmicas distintas. No caso dos pequenos corpos, estes se dividem em diversas populações localizadas desde as regiões mais internas do Sistema Solar, os asteroides, até as mais externas, como os Centauros, os objetos transnetunianos (TNOs) e os cometas.

O estudo das diversas propriedades físicas de pequenos corpos do Sistema Solar permite obter um melhor conhecimento das distintas populações. Isso porque a partir das distribuições destas propriedades é possível investigar os processos físicos atuantes, ou que atuaram no passado, nas diversas populações e estabelecer uma melhor compreensão dos modelos de formação e evolução do Sistema Solar, permitindo até impor vínculos importantes. O sistema planetário externo pode ser analisado com base nas características físicas de cometas e TNOs, já que tais objetos estiveram e permanecem nas regiões mais frias do Sistema Solar. Em contrapartida, o estudo da população de asteroides permite ter um melhor entendimento sobre a zona de transição entre os planetas terrestres e os gigantes gasosos. Acredita-se que essas populações de pequenos corpos estejam diretamente relacionadas aos planetesimais que deram origem aos planetas.

Embora a maior parte dos asteroides esteja localizada no Cinturão Principal, outras concentrações são encontradas na região mais interna, como é o caso dos objetos cruzadores da órbita de Marte, denominados de Mars-Crossers ou MC, e dos próximos da órbita da Terra, os Near-Earth Objects ou NEOs. Os objetos em órbitas próximas da Terra, que tanto podem ser asteroides como cometas (extintos e/ou dormentes), formam uma população particularmente interessante de ser estudada (ver, por exemplo, Binzel et al. 2015), já que esses objetos se encontram em órbitas instáveis sobre a idade do Sistema Solar, implicando ser uma população transiente, cuja proveniência ainda está em discussão e cujo destino pode variar desde uma colisão com um dos planetas terrestres até a ejeção para os confins do Sistema Solar

(Michel et al. 2000b, Bottke et al. 2002a, Morbidelli et al. 2015).

Infelizmente, ainda se tem um conhecimento limitado das características físicas dessa população, assim como de seu tamanho (Harris and D’Abramo 2015; Harris and Chodas 2021), apesar dos avanços realizados na última década quanto ao número de objetos com propriedades físicas determinadas e suas distribuições. Portanto, é importante determinar essas propriedades, assim como entender como se distribuem, já que podem fornecer evidências importantes sobre a origem e os mecanismos de transporte dos objetos até suas órbitas atuais. O projeto IMPACTON, dentro do qual o presente trabalho se insere, visa o estudo sistemático de diversas características físicas de objetos em órbitas próximas da Terra (Lazzaro 2010, Rondón et al. 2020).

O objetivo do presente projeto é estudar a distribuição da composição superficial, ou classes taxonômicas, entre os NEOs e de como estas se comparam com a de outras populações de asteroides. Essa comparação visa identificar as regiões mais prováveis de origem dos NEOs. A distribuição das composições superficiais será realizada utilizando tanto dados da literatura, espectros e cores, quanto de espectros fotométricos de NEOs obtidos no Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica (OASI) do projeto IMPACTON.

Este trabalho está estruturado da seguinte forma: no capítulo 1 é dada a fundamentação teórica, enquanto no capítulo 2 é descrita a metodologia utilizada quanto à obtenção dos dados, tanto da literatura quanto os novos. No capítulo 3 são apresentadas as distribuições obtidas, assim como sua discussão. Por fim, no capítulo 4 é feito um resumo dos principais resultados obtidos e das conclusões que podem ser derivadas, assim como são discutidas algumas perspectivas futuras.

1.1 Objetos em órbitas próximas da Terra - NEOs

Os objetos em órbitas próximas da Terra, conhecidos como NEOs, são definidos como corpos cuja órbita tem periélio menor ou igual a 1.3 UA. Esse limite implica que esses objetos cruzam ou se aproximam bastante da órbita da Terra. O primeiro NEO a ser descoberto foi o asteroide 433 Eros, em 13 de agosto de 1898 pelo astrônomo alemão Gustav Witt em Berlim e, independentemente, por Auguste Charlois em Nice, na França. Desde então, a quantidade de objetos conhecidos desta população tem crescido constantemente.

NEOs são convencionalmente divididos em 4 subgrupos de acordo com suas características orbitais a , q , Q (semieixo maior, distância ao periélio, distância ao afélio) sendo chamados de Amor, Apollo, Aten e Atiras (Shoemaker et al. 1979). Na figura 1.1 são mostradas esquematicamente as órbitas, em relação àquela da Terra,

de objetos dos diferentes subgrupos. É fácil notar que os objetos dos subgrupos Apollo e Aten cruzam a órbita da Terra, enquanto os dos subgrupos Amor e Atira apenas se aproximam desta. Um outro importante subgrupo é o dos PHA, do inglês Potentially Hazardous Asteroids, definido por aqueles objetos que possuem uma distância mínima de interseção, ou MOID (do inglês Minimum Orbit Intersection Distance), menor ou igual a 0.05 UA e uma magnitude absoluta (H) menor ou igual a 22.0. Essa magnitude absoluta corresponde a um tamanho da ordem de 140 m quando considerado um albedo de 0.15. Na tabela 1.1 é dada a definição rigorosa de cada subgrupo, assim como o número de objetos conhecidos até a data de 20-01-2022, de acordo com o Minor Planet Center (<https://minorplanetcenter.net>). É importante aqui ressaltar que de um total de quase 28 mil NEOs conhecidos temos alguma propriedade física para apenas cerca de 2000 (Michel et al. 2000b, Greens-treet et al. 2012, Binzel et al. 2015).

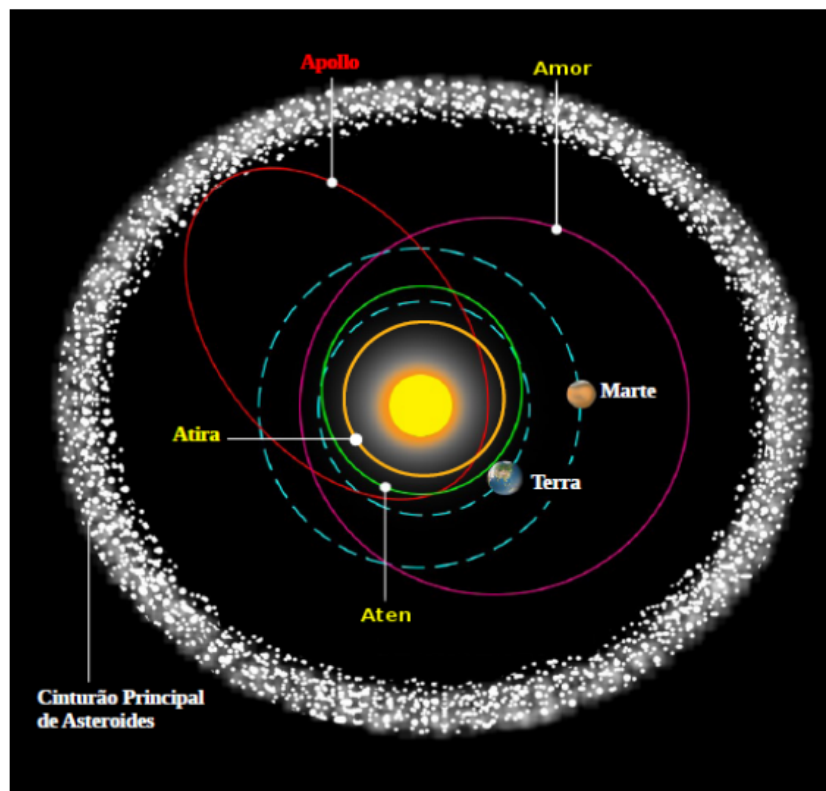


Figura 1.1: *Representação orbital dos subgrupos da população de NEOs. Figura retirada de Monteiro (2016).*

Dentro do Sistema Solar os NEOs compõem uma população particularmente interessante tanto do ponto de vista científico como social. Além de serem objetos primordiais que guardam vestígios sobre os estágios iniciais da formação do Sistema Solar, estes podem causar sérios riscos à Terra devido à possibilidade de impactos. Vale destacar que os NEOs são a principal fonte de pequenos corpos que caem

Tabela 1.1: *Subgrupos de NEOs, sua definição e número de objetos conhecidos até 20-01-2022, onde a é o semi-eixo maior, Q é a distância afélica e q é a distância periélica.*

Subgrupo de NEOs	Definição	N° de objetos conhecidos
Atiras	$a < 1$ UA e $Q < 0.983$ UA	52
Atens	$a < 1$ UA e $Q > 0.983$ UA	2146
Apollos	$a > 1$ UA e $q \leq 1.017$ UA	14202
Amors	$a > 1$ UA e $1.017 < q \leq 1.3$ UA	11557
Total		27957
PHAs	$MOID \leq 0.05$ UA e $H \leq 22$	2253

na Terra, sendo que entre os que sobrevivem à travessia por nossa atmosfera, os meteoritos, alguns são tão antigos quanto o Sistema Solar permitindo ter informações sobre a própria nebulosa solar.

Outro aspecto interessante é a evolução desta população já que segundo estudos dinâmicos a expectativa de vida de um objeto na região dos NEOs é da ordem de alguns milhões de anos (Bottke et al. 2002a; Morbidelli et al. 2002). Isto implica que não podem ter permanecido em suas localizações atuais desde o início do Sistema Solar e, mais importante ainda, que a população deve estar sempre sendo renovada com objetos entrando e outros sendo ejetados da região. Segundo alguns trabalhos (Bottke et al. 2002a; Morbidelli et al. 2002), a principal fonte de origem dos NEOs é a região do Cinturão Principal de asteroides através de ressonâncias, de movimento médio e seculares, com Júpiter e Saturno. Essas ressonâncias podem transportar asteroides do Cinturão Principal para a região dos NEOs, via encontros próximos com Marte, numa escala de tempo de 10^5 anos. Além das colisões e das interações dinâmicas, o efeito Yarkovsky também desempenha um papel relevante em mover asteroides com tamanho da ordem de dezenas de quilômetros. Esse efeito provoca uma migração lenta em semieixo maior de asteroides no Cinturão Principal, alguns dos quais acabam entrando em regiões de ressonâncias e sendo então transportados até a região dos NEOs (Bottke et al. 2002b; Morbidelli and Vokrouhlický 2003). Asteroides que cruzam a órbita de Marte podem permanecer nesta região por cerca de dezenas de milhões de anos antes das suas órbitas serem perturbadas por interações gravitacionais e, conseqüentemente, se tornarem cruzadores da órbita da Terra (Michel et al. 2000a). Logo, o estudo da distribuição das propriedades físicas dos NEOs e sua comparação com as de diversas populações do Cinturão Principal

podem fornecer informações relevantes sobre a origem e os mecanismos de transporte dos NEOs (Binzel et al. 2015).

Outro aspecto importante sobre esses objetos é de que, por se aproximarem da Terra, podem ser observados por telescópios menores, além do fato de ser possível observar objetos bem menores do que no Cinturão Principal (Lupishko and Di Martino 1998; Binzel et al. 2002). Neste sentido, o estudo desta população nos permite obter informações sobre as propriedades físicas dos menores corpos do Sistema Solar.

Por fim, vale ressaltar o risco que a população dos NEOs representa para a Terra devido à possibilidade de colisão com a mesma (Morrison et al. 2002). Atualmente, acredita-se que todas as maiores extinções em massa ocorridas ao longo da história da Terra tenham tido como causa a colisão de um corpo de tamanho da ordem de quilômetros. A mais famosa sendo a extinção dos dinossauros (além de cerca de 90% de todos os seres vivos), a cerca de 65 milhões de anos atrás devido à queda de um corpo de alguns quilômetros de diâmetro na península de Yucatán (México), formando a cratera de Chicxulub (Alvarez et al. 1980). A possibilidade da colisão de um NEO com o nosso planeta dá ao estudo uma dimensão social importante.

Conforme mencionado acima, o estudo dos asteroides permite obter informações importantes sobre a formação do Sistema Solar por sua relação direta com os planetesimais que formaram os maiores corpos do nosso sistema planetário. Entretanto, esse estudo esbarra em limitações devido ao fato dos asteroides estarem distantes e serem, em sua grande maioria, pequenos, dificultando assim sua observação e a obtenção de dados a partir da Terra. Vale aqui lembrar de que os asteroides, assim como os demais corpos planetários, não tem luz própria e apenas refletem a luz que recebem do Sol. De forma geral, é possível dizer que a distância ao Sol e ao observador é fator preponderante para sua observação: entre dois asteroides de mesma composição e estrutura superficial, o mais distante será sempre mais difícil de ser observado.

O estudo direto da composição superficial de asteroides só é possível através de meteoritos encontrados na Terra ou no caso de missões espaciais que retornam com amostras desses objetos, como as missões Hayabusa-1 e Hayabusa-2, da JAXA, e a Osiris-Rex da NASA, que visitaram os NEOs (25143) Itokawa, (162173) Ryugu e (101955) Bennu, respectivamente. Uma das formas de estudo da composição mineralógica da superfície é por meio da comparação de dados obtidos de observações remotas de asteroides com aqueles de meteoritos e minerais obtidos em laboratório. Com base nesses dados, é possível dividir os asteroides em diferentes classes taxonômicas. Essa classificação se dá a partir de características do fluxo de reflexão por comprimento de onda, ou espectro de reflexão no visível, obtidas da fotometria de multi-banda ou espectroscopia. Como a composição superficial está diretamente relacionada com a composição original e com diversos processos sofridos pelo aste-

roide com o passar do tempo, espera-se que haja uma correlação entre a composição mineralógica superficial e cada classe taxonômica.

Diferentes classificações taxonômicas foram sendo formuladas ao longo dos anos identificando desde 3 classes (Chapman et al. 1975) até 26 classes (Bus and Binzel 2002). Trabalhos mais recentes utilizam dados fotométricos de grandes mapeamentos tais como o Sloan Digital Sky Survey, ou SDSS, (<http://www.sdss.org/surveys/>), para criar classes compatíveis com as taxonomias derivadas de espectros (por exemplo, Carvano et al. 2010).

No que segue, vamos detalhar alguns conceitos fundamentais sobre as principais taxonomias e sua importância para inferir e compreender a composição superficial de asteroides. Também iremos fazer um resumo dos principais estudos realizados até o presente sobre a distribuição de composições entre os NEOs.

1.2 Taxonomias

Em uma definição sucinta, taxonomia é a separação de um grupo de elementos (que podem ser pessoas, animais, plantas, objetos, etc.) em classes com base em suas características observáveis. No caso dos asteroides, as classes são definidas a partir de um conjunto de dados observacionais tais como albedo, índice de cor e presença/ausência de bandas de absorção (Tholen and Barucci 1989).

Geralmente é assumido que asteroides com a mesma classificação taxonômica possuem composições similares. Entretanto, é importante ressaltar que objetos com a mesma classificação taxonômica não necessariamente possuem a mesma composição mineralógica. Uma taxonomia é apenas uma forma de separar asteroides e, assim, poder analisar de forma qualitativa um grande número de objetos.

A maioria das taxonomias desenvolvidas até o momento são baseadas em espectros obtidos na faixa do visível, isto é, entre $0.49 \mu\text{m}$ e $1.0 \mu\text{m}$. Dentre todas as taxonomias já propostas neste intervalo de comprimento de onda, podemos citar as duas mais utilizadas atualmente, a de Tholen (Tholen 1984) e a de Bus (Bus and Binzel 2002). Também existe a classificação de DeMeo (DeMeo et al. 2009), baseada em espectros obtidos desde a faixa do visível até o infravermelho próximo. Muito utilizada também é a classificação realizada por Carvano et al. (2010) a qual não é estritamente uma taxonomia, pois apenas classifica espectros fotométricos obtidos com dados do SDSS para serem compatíveis com a taxonomia de Bus. No que segue vamos descrever brevemente cada uma delas.

Tholen (1984) realiza uma classificação taxonômica baseada na campanha espectrofotométrica Eight Colors Asteroids Survey (ECAS) com a observação das cores de 405 asteroides obtidas através de 9 filtros e dos albedos obtidos pelo Infrared Astro-

nomical Satellite (IRAS). O esquema de classificação consistiu em aplicar um algoritmo de árvore minimal à amostra. Este algoritmo consiste, primeiro, em distribuir os asteroides em um diagrama de componentes principais, que são dois autovetores do espaço de observáveis obtidos por transformações lineares, de modo a maximizar a concentração da variância, no caso a inclinação espectral (slope) e a presença ou não de bandas de absorção. Em seguida, todos os asteroides são conectados através de uma linha, chamada de ramo da árvore minimal. O algoritmo, então, analisa cada ramo e seus adjacentes, e se um ramo for maior de que os adjacentes então significa que ele está separando duas classes de asteroides. Assim, Tholen definiu as primeiras 8 classes principais (A, C, D, S, T, V, R e Q) por meio do corte dos braços mais longos em relação aos ramos vizinhos. Em seguida, os cortes dos braços menores subdividiu a classe C nas classes B, G e F. A classe X foi subdividida nas classes E, M e P dependendo do albedo alto, mediano e baixo, respectivamente. As classes da taxonomia de Tholen podem ser visualizadas na figura 1.2.

A taxonomia de Bus é baseada nos espectros de 1189 asteroides, obtidos pela campanha Small Main Belt Asteroid Spectroscopy Survey II (SMASSII) e sua metodologia de classificação é igual a de Tholen, descrita acima. Essa taxonomia agrupa os asteroides inicialmente em três grandes grupos, chamados de complexos S, X e C. Os asteroides que não pertencem aos três complexos são, então, divididos nas classes O, V, T, D e Ld, como mostrado na figura 1.3.

É importante ressaltar de que a taxonomia de Tholen utiliza 8 cores na faixa de $0.3 \mu\text{m}$ a $1.1 \mu\text{m}$ enquanto a de Bus espectros na faixa de $0.435 \mu\text{m}$ a $1.0 \mu\text{m}$.

DeMeo et al. (2009) realiza uma nova classificação taxonômica (figura 1.4) baseada na observação de 361 asteroides obtidos no telescópio Infrared Telescope Facility de 3 metros da NASA, na faixa de $0.45 \mu\text{m}$ a $2.45 \mu\text{m}$. Esta taxonomia utiliza a mesma metodologia de classificação desenvolvida por Tholen.

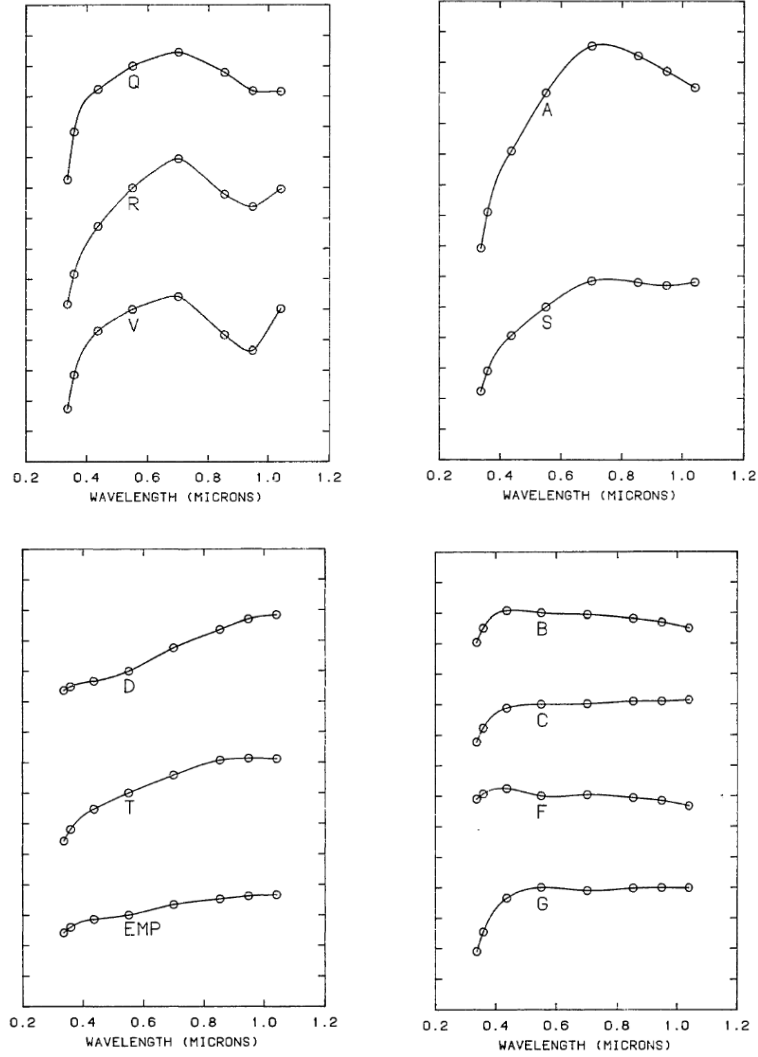


Figura 1.2: *Classificação de espectros segundo a taxonomia de Tholen. Figura retirada de Tholen (1984).*

Finalmente, Carvano et al. (2010) desenvolvem um esquema de classificação taxonômica utilizando espectros fotométricos de baixa resolução (5 cores) obtidos dos dados do catálogo fotométrico Moving Object Catalog 4 (MOC4) do SDSS (Izевic et al. 2001). Os espectros são então classificados em 9 classes taxonômicas - V_p , O_p , Q_p , S_p , A_p , L_p , D_p , X_p e C_p - todas diretamente comparáveis com a classe correspondente na taxonomia de Bus, com a exceção da classe \mathcal{L}_p , que difere das demais por não ser diretamente comparável a uma das classes dos trabalhos anteriores. Em vez disso, é definida pela junção das classes K, L e Ld da taxonomia de Bus representando, portanto, uma composição diferente. Deve-se notar ainda que, embora este esquema de classificação tenha sido projetado para ser compatível com a taxonomia de Bus, tal compatibilidade é limitada pelas características do conjunto de dados. Na figura 1.5 são apresentados os “templates” das classes assim obtidas.

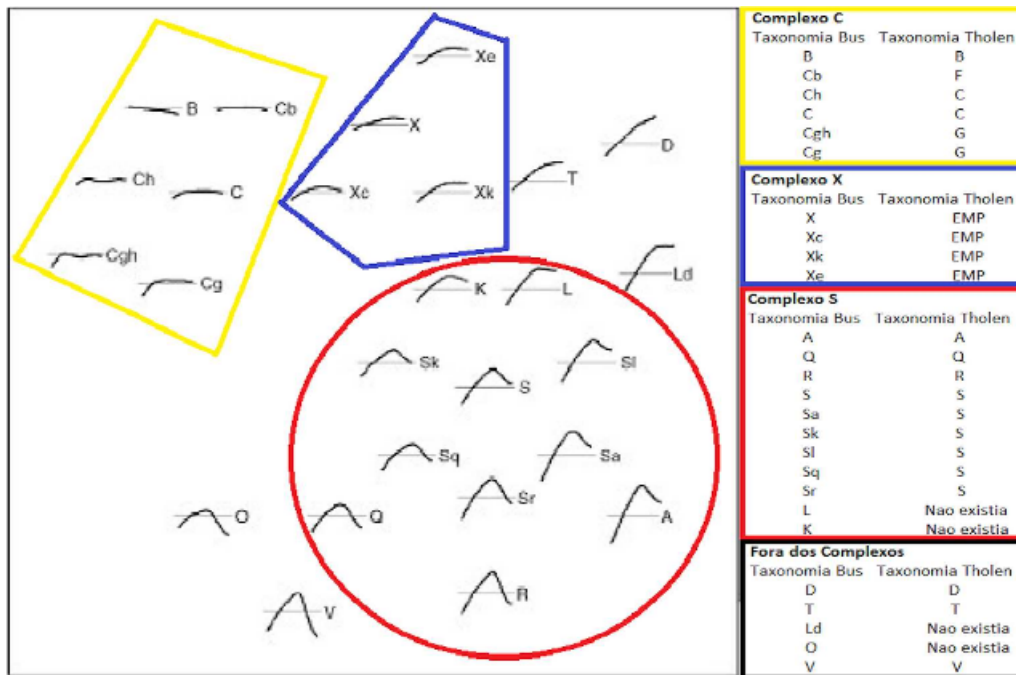


Figura 1.3: Taxonômica de Bus e sua comparação com a taxonomia de Tholen, onde se mostra o complexo C (delimitado pela linha em cor amarelo), complexo X (linha azul) e S (linha vermelha). Figura retirada de Rondón (2016).

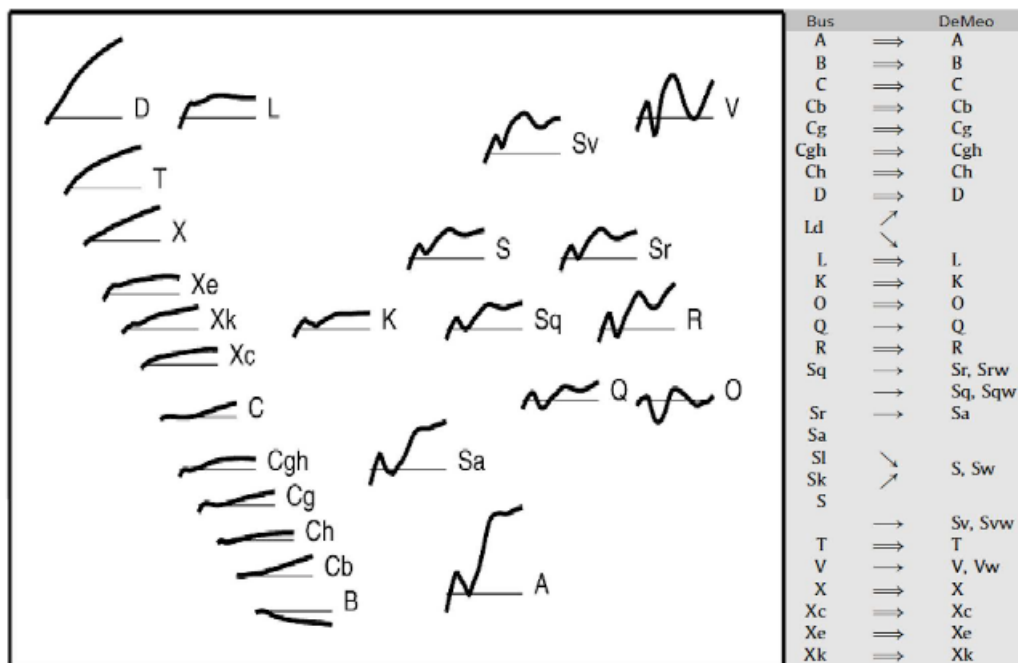


Figura 1.4: Taxonomia de DeMeo e sua comparação com a taxonomia de Bus. Figura retirada de Rondón (2016).

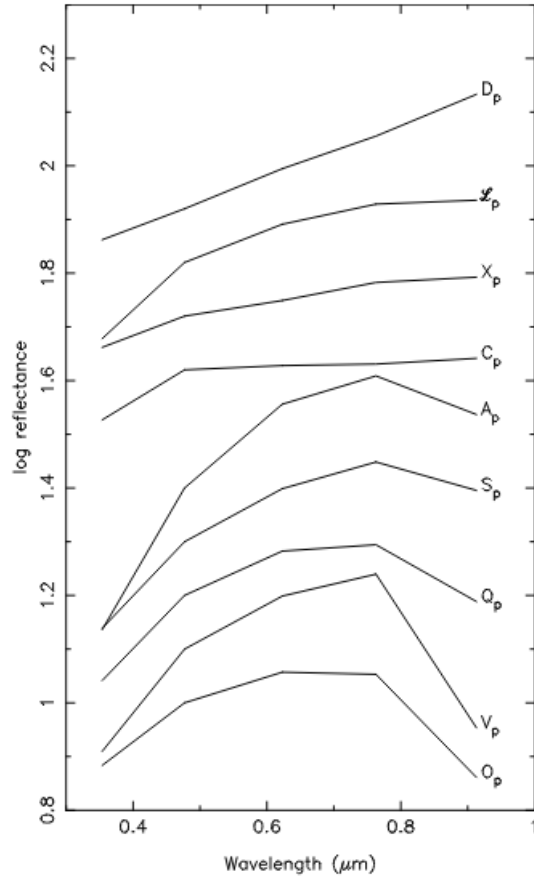


Figura 1.5: *Logaritmo da reflectância média para as classes taxonômicas fotométricas usando os dados do catálogo MOC4 de SDSS definidas por Carvano et al. (2010). Figura retirada de Carvano et al. (2010).*

1.3 Estado da arte sobre a distribuição de classes taxonômicas entre os NEOs

No que segue, vamos realizar uma revisão dos diversos trabalhos realizados até o presente sobre a classificação taxonômica dos NEOs, mostrando o aumento no número de objetos classificados em comparação com o de objetos conhecidos. Também vamos discutir a distribuição de taxonomias na população dos NEOs e os modelos dinâmicos que utilizam essas distribuições para estimar as prováveis origens desses objetos.

No final da década de 80, segundo McFadden et al. (1989), conhecia-se 120 NEOS (59 Amors, 54 Apollos e 7 Atens). Desses objetos, 43 possuíam classificação na taxonomia Tholen ou na de Chapman, Morrison e Zellner - CMZ (Chapman et al. 1975), embora para 11 destes a classificação era ambígua. Dos objetos classificados, 22 são do tipo S e apenas 8 do tipo C. Os demais objetos ficaram distribuídos entre os

tipos Q, E, F, M, A, D, V e T. O histograma da distribuição de classes taxonômicas para essa amostra é mostrada na figura 1.6.

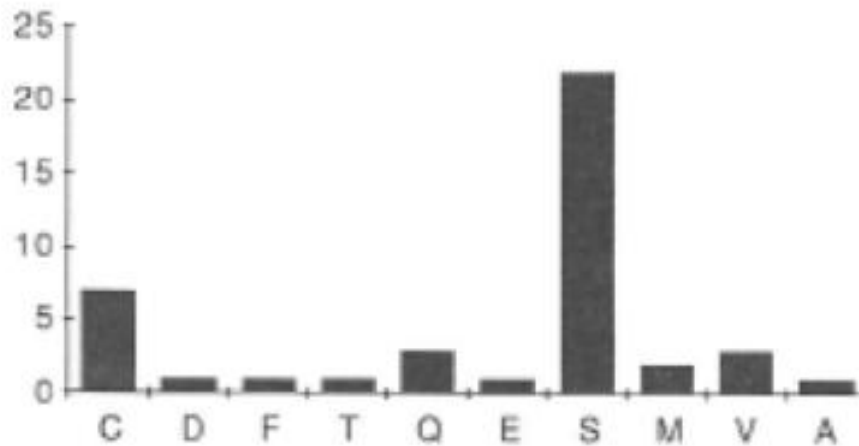


Figura 1.6: *Histograma dos tipos taxonômicos de acordo com a Taxonomia de Tholen. Figura retirada de McFadden et al. (1989).*

Cerca de dez anos mais tarde o número de NEOs conhecidos passou a ser quase quatro vezes maior (409 sendo 191 Amor, 194 Apollos e 24 Atens) mas o número de objetos com classificação ficou em apenas 69, ou seja, apenas dobrou Lupishko and Di Martino 1998. O histograma na figura 1.7 mostra a porcentagem do número de objetos distribuídos entre as classes taxonômicas segundo a taxonomia de Tholen. Como pode ser visto, praticamente todas as classes estão presentes na amostra, com exceção das classes B, R e T. Novamente, a classe S corresponde a mais da metade da distribuição entre as classes, com a C sendo a segunda mais presente na amostra.

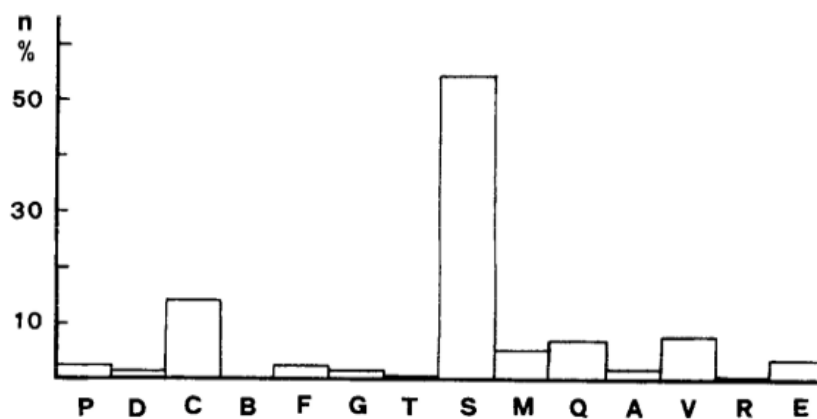


Figura 1.7: *Histograma da porcentagem dos tipos taxonômicos de acordo com a taxonomia de Tholen. Figura retirada de Lupishko and Di Martino (1998).*

Até o ano de 2002, segundo Binzel et al. (2002), conhecia-se cerca de 2000 NEOs, distribuídos em números relativamente iguais de asteroides do grupo Amor e Apollo, perfazendo cerca de 90% do total. O restante da amostra se dividia entre cerca de 8% de objetos do grupo Aten e 2% de cometas de curto período. Destes, para apenas 230 se tinha classificação taxonômica, englobando todas as classes da taxonomia de Tholen, como mostra a figura 1.8. Os objetos do tipo S dominam a distribuição, com uma proporção cerca de quatro vezes maior do que aqueles com designação “C” que nesse trabalho inclui os tipos C, B, F e G. A designação “U” é composta pelas classes L e K e por classes que demonstram características incomuns dentre aquelas definidas na taxonomia de Tholen.

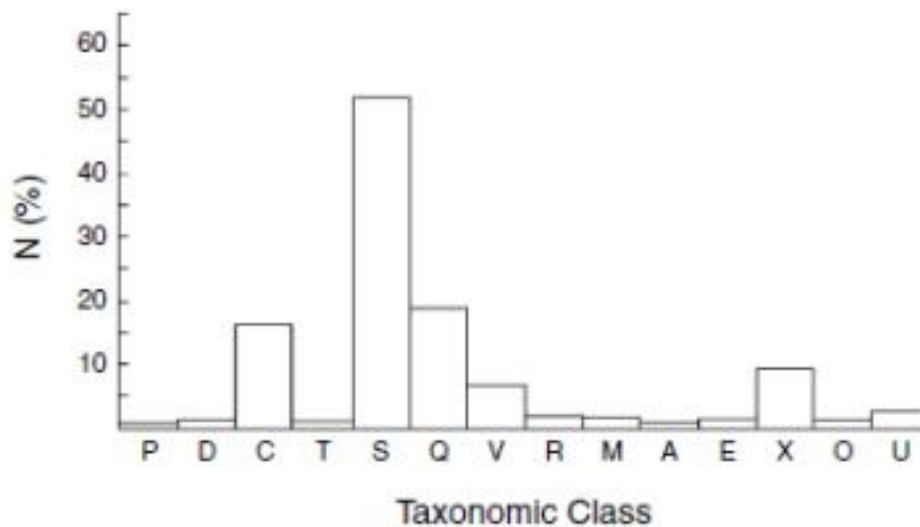


Figura 1.8: *Histograma das proporções relativas da distribuição de classes taxonômicas, segundo a taxonomia de Tholen, para 230 NEOs. Figura retirada de Binzel et al. (2002).*

Em meados do ano de 2015, segundo Binzel et al. (2015), conhecia-se aproximadamente 12000 NEOs, aumentando a quantidade em seis vezes em um intervalo de 13 anos. Destes, mais de 1039 NEOs possuem classificação taxonômica, quadruplicando o número de objetos classificados durante o mesmo período. A figura 1.9 mostra o histograma da distribuição de classes taxonômicas, segundo a taxonomia de Bus, para os NEOs. As proporções obtidas revelam que os NEOs da classe S são os mais observados. Além disso, considerando todas as subclasses de tipo S, mais da metade de todos os NEOs classificados fazem parte do complexo S. Os outros grandes complexos (C e X) tem proporções baixas quando comparadas ao complexo S. Notar que essa mesma tendência já tinha sido identificada nos trabalhos anteriores.

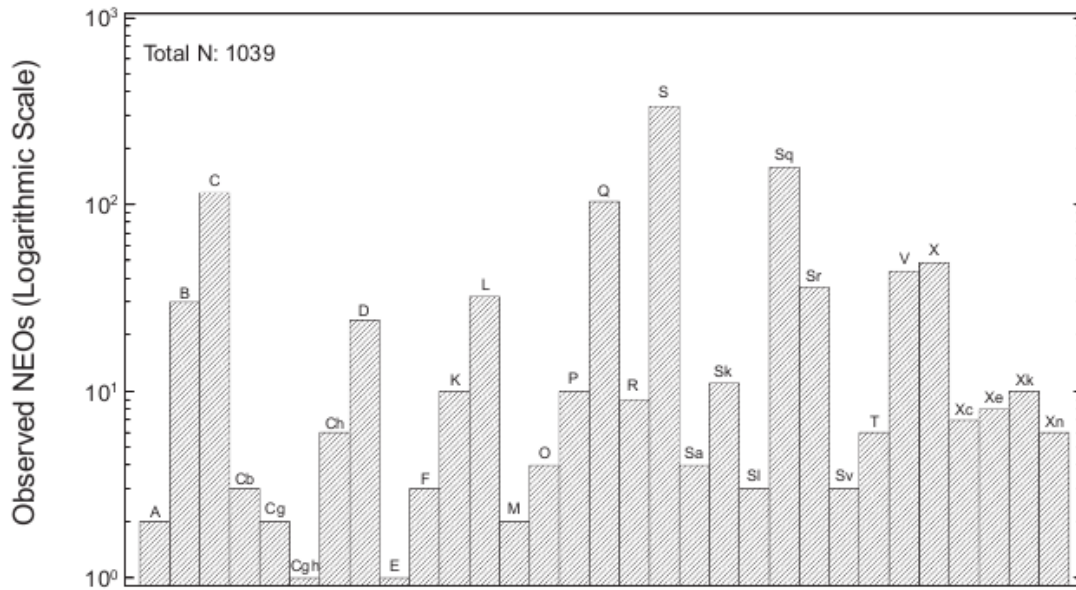


Figura 1.9: *Histograma da distribuição de classes taxonômicas, segundo a taxonomia de Bus, para mais de 1000 NEOs. Figura retirada de Binzel et al. (2015).*

Recentemente, Binzel et al. (2019) relataram propriedades espectrais para 1040 NEOs, ou seja, o número de objetos dessa população praticamente não teve aumento. No entanto, até esse mesmo ano tinham sido descobertos cerca de 21000 NEOs, representando um aumento de 75% comparado ao ano de 2015. Isso mostra que a taxa de descoberta desses objetos é bem maior do que a taxa de classificação, conforme já observado nos trabalhos anteriores. Além disso, dados espectrais adicionais foram relatados para mais de 350 asteroides que cruzam Marte. A maioria dessas classificações foram realizadas através de uma colaboração entre pesquisadores do Instituto de Tecnologia de Massachusetts e da Universidade do Havaí, em cooperação com a NASA, onde foi utilizado o Infrared Telescope Facility (IRTF) em Mauna Kea. Esse projeto é chamado de Pesquisa Espectroscópica de Objetos Próximos à Terra do MIT Hawaii, do inglês MIT-Hawaii Near-Earth Object Spectroscopic Survey (MITHNEOS).

Até aqui mostramos como ao longo dos anos foi aumentando tanto o número de NEOs conhecidos quanto o de objetos com classificação taxonômica, embora esse segundo progressivamente muito inferior ao primeiro. No que segue vamos descrever alguns trabalhos teóricos que utilizaram essas distribuições para tentar entender a origem dos NEOs.

Em Bottke et al. (2002a) é desenvolvido um modelo dinâmico que visa investigar as possíveis regiões de origem da população de NEOs. Esse modelo, baseado na distribuição orbital e de magnitude absoluta para os objetos próximos à Terra, leva em consideração cinco regiões mais prováveis: a ressonância secular ν_6 com Saturno, a região dos cruzadores de Marte (Mars-Crossers), a ressonância de movimento

médio 3:1 com Júpiter, em 2.5 UA, a região do cinturão externo (OB) próxima à ressonância 5:2 em 2.82 UA e a região dos cometas da família de Júpiter (JFC). Baseado neste modelo, Binzel et al. (2004) realizaram uma análise da distribuição de classes taxonômicas para uma amostra de 400 NEOs e Mars-Crossers. A figura 1.10 mostra o histograma da distribuição e a contribuição relativa de cada região para as classes taxonômicas. A análise do histograma revela que o Cinturão Externo seguido da ressonância 3:1 com Júpiter entregam uma fração proporcionalmente maior de objetos do tipo C para a região próxima à Terra. Já os objetos do tipo S são oriundos principalmente das regiões de ressonâncias e dos cruzadores da órbita de Marte. Além disso, o estudo mostra ainda que a ressonância ν_6 contribui com 46% dos NEOs, o MC com 27%, a ressonância 3:1 com 19%, o OB 6% e o JFC 2%.

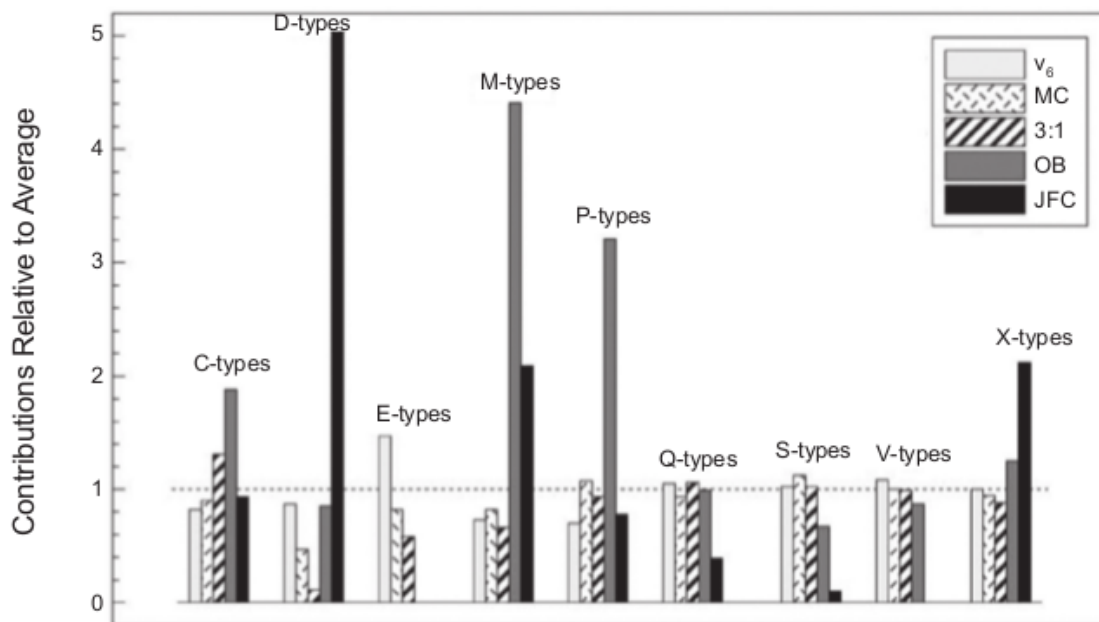


Figura 1.10: *Distribuição do histograma para regiões de origem de asteróides próximos à Terra com base no modelo de evolução orbital de Bottke et al. (2002a). Figura retirada de Binzel et al. (2004).*

Mais recentemente, Granvik et al. (2018) desenvolveram um novo modelo dinâmico para tentar estudar a origem e os mecanismos de transporte dos NEOs. Apesar de mais preciso e de substituir o anterior, esse modelo parte de princípios semelhantes ao do modelo discutido anteriormente. Sua maior precisão está no fato de ter sido construído com base em um conjunto muito mais extenso de simulações numéricas que rastreou como os asteroides do Cinturão Principal escapam para a região dos NEOs. Esse modelo divide o Cinturão Principal em seis diferentes rotas ou regiões de entrada para a região dos NEOs: o complexo ν_6 incluindo as ressonâncias de movimento médio 4:1 e 7:2, o complexo de ressonância de movimento médio 3:1, o complexo de ressonância de movimento médio 5:2 incluindo as ressonâncias de movimento médio 8:3 e 7:3 e o complexo de ressonância de movimento

médio 2:1 incluindo as ressonâncias de movimento médio 7:2 e 9:4 e a ressonância secular z_2 , bem como as regiões de Hungaria e Phocaea. Além disso, foram incluídos os cometas da família de Júpiter (JFC) como a fonte cometária primária de NEOs. A figura 1.11 mostra a contribuição das diferentes regiões de entrada em função da magnitude absoluta H . As ressonâncias ν_6 com Saturno e 3:1 com Júpiter são as regiões com maiores contribuições para a população de NEOs, sendo a ν_6 dominante entre os grandes NEOs e a 3:1 é igualmente importante para objetos com diâmetro $D \sim 100$ m. Os Hungarias e JFCs têm uma contribuição não desprezível para todas as faixas de magnitude, enquanto os Phocaeas e as ressonâncias 5:2 e 2:1 com Júpiter têm uma contribuição desprezível para tamanhos pequenos.

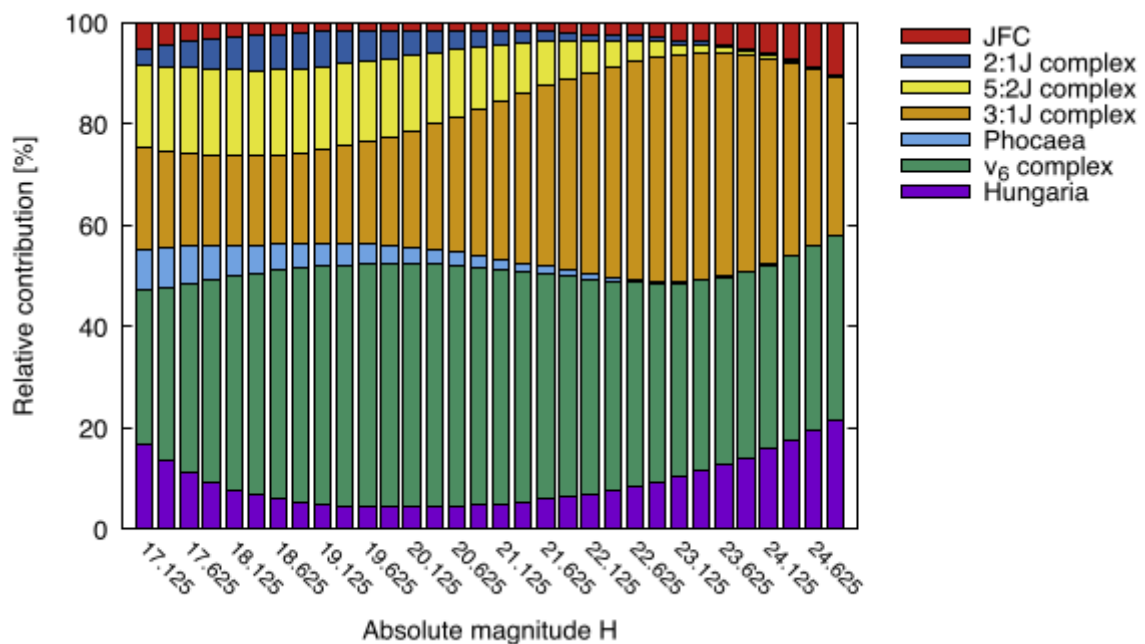


Figura 1.11: *Contribuição relativa das distintas regiões de origem dos NEOs em função da magnitude absoluta H . Figura retirada de Granvik et al. (2018).*

Conforme descrito acima, o último trabalho sobre a distribuição de taxonomias é de 2019 e desde então mais objetos, tanto NEOs quanto do Cinturão Principal, foram tendo sua classificação taxonômica. Isso nos motivou a ver se os novos dados e distribuições confirmam os resultados anteriormente obtidos e se permitem ter uma maior confiança sobre as principais regiões de origem dos NEOs. No próximo capítulo vamos descrever como foram obtidos os dados utilizados para realizar as distribuições de classes taxonômicas a serem discutidas no capítulo 3.

Capítulo 2

Metodologia

Neste capítulo iremos descrever a metodologia usada no presente trabalho, que é composta por duas partes: a busca de dados na literatura e a obtenção de novas classificações. Na primeira parte realizamos uma busca sistemática na literatura de asteroides com classificação taxonômica e albedo determinado, visando obter um conjunto de dados que permita tanto construir a distribuição de classes mais recente quanto uma nova tabela de albedos médio. Na segunda parte realizamos observações astronômicas visando a obtenção de novos NEOs com classificação taxonômica. Será aqui discutido desde a seleção dos objetos, as observações realizadas até o processo de redução dos dados para a obtenção do espectro fotométrico.

2.1 Dados da literatura

Para poder obter a distribuição de classificações de NEOs e sua comparação com a de regiões específicas do Cinturão Principal um primeiro passo consistiu em obter todos os dados disponíveis na literatura. Assim, foram buscados todos os objetos com classificação taxonômica das diversas populações dos NEOs, cruzadores de Marte, Cinturão Principal, Phocaea e Hungaria. Os dados foram obtidos dos seguintes trabalhos: *Bowell et al. (1978)*, *Tholen (1984)*, *Angeli and Lazzaro (2002)*, *Burbine and Binzel (2002)*, *Bus and Binzel (2002)*, *Carvano et al. (2003)*, *Binzel et al. (2004)*, *Lazzaro et al. (2004)*, *Lazzarin et al. (2005)*, *Alvarez-Candal et al. (2006)*, *DeMeo et al. (2009)*, *de León et al. (2010)*, *de Sanctis et al. (2011)*, *Mainzer et al. (2011)*, *de León et al. (2012)*, *Fornasier et al. (2014)*, *Thomas et al. (2014)*, *Ieva et al. (2016)*, *Morate et al. (2016)*, *Perna et al. (2016)*, *Ieva et al. (2018)*, *Licandro et al. (2018)*, *Morate et al. (2018)*, *Perna et al. (2018)*, *Morate et al. (2019)* e *Popescu et al. (2019)*. Assim, conseguimos coletar uma amostra de 3893 objetos com classificação taxonômica a partir de espectros no visível e infravermelho próximo. Destes, 1108 são NEOs, 123 objetos que cruzam a órbita de Marte e 2461

do Cinturão Principal. Estes últimos, por sua vez, foram subdivididos em três regiões classicamente definidas como segue:

- Cinturão Interno: limitado pela ressonância secular ν_6 com Saturno em 2.1 U.A e pela ressonância de movimento médio 3:1 com Júpiter em 2.5 U.A;
- Cinturão Intermediário: limitado por duas ressonâncias de movimento médio com Júpiter, a 3:1 e a 5:2, definido entre 2.5 U.A e 2.82 U.A;
- Cinturão Externo: também limitado por duas ressonâncias de movimento médio com Júpiter, a 5:2 e a 2:1, definido entre 2.82 U.A e 3.26 U.A.

Também foram obtidos dados para outras três regiões: *Hungaria*, definida por $1.78 \text{ U.A} < a < 2.0 \text{ U.A}$, e < 0.18 e $16 < i < 34$, com 53 objetos, *Phocaea*, definida por $2.25 \text{ U.A} < a < 2.5 \text{ U.A}$, e ≥ 0.1 e $18 < i < 32$, com 54 objetos e a região além do Cinturão Externo, ou seja, em $a > 3.26 \text{ U.A}$, com 94 objetos.

A amostra de 3893 contém objetos de todos os tamanhos e muitos desse objetos não tem diâmetros determinados. Vale aqui ressaltar que o diâmetro de um asteroide é função de sua magnitude absoluta H (brilho intrínseco) e de seu albedo, sendo dado pela equação

$$D = (1329/\sqrt{\rho_v})10^{-0.2H} \quad (2.1)$$

Por outro lado, é possível atribuir um albedo médio para cada classe taxonômica utilizando aqueles objetos que tenham classe e albedo determinados. Como exemplo, na figura 2.1 é mostrada a tabela dada em Jasmim (2013) com os albedos médios para as classes da taxonomia Bus.

Considerando os 3893 objetos classificados taxonomicamente pelos diferentes autores, produzimos uma nova tabela de albedos médios para cada classe com o intuito de obter o diâmetro estimado para os objetos classificados. Para tanto, utilizamos a base de dados do NEOWISE (<https://sbn.psi.edu/pds/resource/neowisediam.html>), derivando os valores de albedos médios dados na tabela 2.1. A tabela mostra, para cada classe taxonômica, o albedo e erro médio associado, assim como o número de objetos com albedo conhecido. O erro médio dado na tabela é a média dos erros nos albedos NEOWISE para cada objeto.

É importante notar que para algumas classes taxonômicas, tais como D, L, R, Sa, Sr, T, V e Xe, o valor do albedo médio é bem diferente do valor dado por Jasmim (2013). Isso deve ser atribuído essencialmente ao maior número de objetos com albedo determinado graças ao survey NEOWISE. Além disso, obtivemos um valor do albedo médio para as classes O e Q que antes não tinham valores determinados. Por meio do valor médio, associado a cada classe, foi possível estimar o diâmetro

Classe	Albedo Médio	Classe	Albedo Médio
A	0,27	R	0,27
B	0,08	S	0,22
C	0,07	Sa	0,16
Cb	0,06	Sk	0,22
Cg	0,06	Sl	0,23
Cgh	0,09	Sq	0,29
Ch	0,06	Sr	0,42
D	0,06	T	0,05
K	0,15	V	0,23
L	0,15	X	0,12
Ld	0,14	Xc	0,09
O	-	Xe	0,28
Q	-	Xk	0,11

Figura 2.1: *Albedos médios para cada classe espectral da taxonomia Bus. Figura retirada de Jasmim (2013).*

para aqueles objetos que não tinham diâmetros determinados e, assim, ter todos os objetos da amostra com seu respectivo diâmetro.

No caso dos dados de Carvano et al. (2010) e Hasselmann et al. (2020) não foram incluídos na determinação dos albedos médios por terem menor resolução, já que baseados em apenas 4 cores do SDSS. Entretanto, devido ao grande número de objetos classificados são importantes na análise da distribuição de classes. Conforme descrito em Carvano et al. (2010) cada objeto classificado tem associada a probabilidade de pertencer a uma ou mais classes, logo, na análise das distribuições vamos utilizar apenas objetos cuja probabilidade seja maior ou igual a 30%. Com isso a amostra que vamos utilizar nas distribuições contém 62985 asteroides, distribuídos entre as populações de NEOs, Mars-Crossers, Phocaea, Hungaria, além das regiões interna, intermediária e externa do cinturão principal e da região após o Cinturão Principal. No caso de objetos que não tem albedo determinado, seus diâmetros foram obtidos a partir do albedo médio da classe correspondente na taxonomia Bus conforme dado na tabela 2.1.

Tabela 2.1: Tabela com os albedos médios, e erro associado, para cada classe da taxonomia DeMeo. Na última coluna é dado o número de objetos com albedo conhecido em cada classe.

Tipo	Albedo Médio	Erro Médio	Número de Objetos
A	0.306	0.063	19
B	0.078	0.016	148
C	0.080	0.018	285
Cb	0.075	0.013	105
Cg	0.081	0.013	20
Cgh	0.077	0.013	56
Ch	0.057	0.011	236
D	0.124	0.023	75
K	0.180	0.038	37
L	0.204	0.047	61
M	0.146	0.026	12
O	0.170	0.049	4
P	0.039	0.012	11
Q	0.286	0.091	39
R	0.412	0.110	4
S	0.259	0.049	857
Sa	0.366	0.080	10
Sq	0.271	0.062	90
Sr	0.278	0.079	15
Sv	0.166	0.048	5
T	0.111	0.022	47
V	0.358	0.073	125
X	0.123	0.023	292
Xc	0.136	0.025	79
Xe	0.334	0.058	31
Xk	0.107	0.020	60

2.2 Novos dados

No que segue vamos descrever a obtenção da classificação taxonômica para um conjunto de NEOs. Começando por uma breve descrição do Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica (OASI), onde os dados foram obtidos, vamos detalhar como os dados fotométricos foram obtidos. Em seguida vamos descrever os critérios adotados para a seleção dos objetos assim como os objetos efetivamente observados. A redução dos dados para a obtenção do espectro fotométrico será detalhada em seguida e, por fim, vamos apresentar os resultados obtidos para 8 NEOs com sua classificação taxonômica, quando possível.

2.2.1 Obtenção de dados

Dados de espectros fotométricos para um conjunto de NEOs foram obtidos utilizando 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). O OASI, de código Y28 Nova Itacuruba (De Pra et al. 2013), está localizado no município de Itacuruba (PE) na região do semiárido brasileiro. O observatório conta com um telescópio robótico com um espelho principal de 1.0 metro de diâmetro e montagem alto-azimutal, com várias câmeras CCD e com uma roda com dois sistemas de filtros instalados: SDSS (u' , g' , r' , i' , z') e Johnson-Cousins (B, V, R, I). Maiores detalhes sobre os equipamentos e condições de seeing do OASI são dados em Rondón et al. (2020). Na figura 2.2 é dada uma visão do observatório onde estão indicados alguns periféricos importantes para as observações remotas.

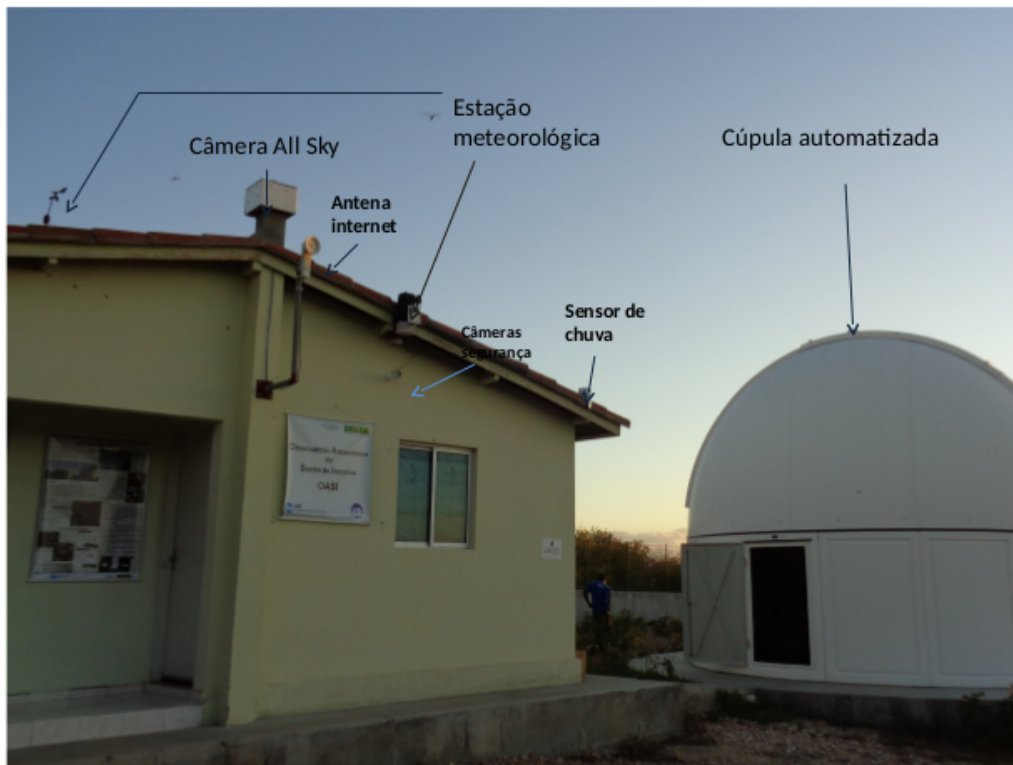


Figura 2.2: Imagem do Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica, onde estão indicados a cúpula e diversos periféricos.

A operação do telescópio é totalmente remota com os procedimentos de ligar/desligar equipamentos realizados pelos técnicos de suporte no OASI, atualmente Airton Santiago da Silva e Juliano dos Santos Silva. O controle do telescópio e cúpula é feito via computador e os dados adquiridos são armazenados temporariamente em outro computador do OASI. Ao término de cada missão observacional, normalmente durante 15 noites em torno da lua nova, os dados são transferidos, via internet, para o servidor do projeto IMPACTON no ON.

As observações fotométricas deste projeto foram realizadas entre abril e dezembro de 2020 durante 9 missões, quando foram observados entre um e dois NEOs por missão, sempre que possível. Cada objeto foi observado três vezes nos filtros g' , r' , i' , z' do sistema SDSS e no filtro R do sistema Johnson, ao longo de 3 a 5 horas por noite, durante 3 noites consecutivas. Além dos NEOs, em cada noite, também foi observada uma estrela padrão do catálogo SDSS (<http://classic.sdss.org/dr2/algorithms/standardstars/>) em massas de ar diferentes, para determinar o coeficiente de extinção da noite e o ponto zero. Essa metodologia de observação foi utilizada visando obter o espectro fotométrico do objeto.

As missões observacionais foram conduzidas pela equipe de observadores do projeto IMPACTON, que se dividem para realizar as observações destinadas aos diferentes projetos. As observações foram realizadas com as câmeras CCD Apogee Alta U42 e Alta U47, de 2048×2048 pixels e 1024×1024 pixels, respectivamente. O tempo de exposição das observações foi ajustado de acordo com a magnitude aparente e o movimento do objeto, variando entre 30 e 150 segundos, a fim de obter um $S/N > 50$ com os filtros do sistema SDSS (g' , r' , i' , z') para o espectro fotométrico e com o filtro R do sistema Johnson-Cousins para determinar a curva de luz. Os CCDs foram usados numa configuração de binning 2×2 , visto que com o aumento da binagem conseguimos ter uma melhor relação sinal-ruído. Além disso, para obter as imagens do objeto foi utilizado o tracking diferencial, ou seja, o movimento do telescópio na mesma velocidade do asteroide somado ao tracking sideral. Isso se faz necessário pelo fato do asteroide ser muito rápido e por muitas vezes os objetos escolhidos terem magnitudes com valores acima de 17, acarretando em tempos de exposição longos. Durante cada observação também foram obtidas imagens de calibração, como bias, flatfields e darkfields, para correção de efeitos do instrumento.

2.2.2 Seleção e redução dos dados

As observações espectrofotométricas deste projeto tiveram como objetivo principal aumentar o número de NEOs com classificação taxonômica. Dessa forma, a seleção dos NEOs a serem observados levou em consideração as seguintes condições:

- 1) Não ter classificação taxonômica publicada, ou ter classificação taxonômica

duvidosa, precisando de novas observações para confirmar a classificação;

- 2) Terem, preferencialmente, período rotacional determinado;
- 3) Magnitude aparente (V) inferior ou igual a 18, limite imposto pelo telescópio para que os dados coletados tenham uma boa qualidade fotométrica;
- 4) Não ter um movimento diferencial muito grande no momento da observação;
- 5) Não estar muito próximo ao plano da galáxia no momento da observação.

A partir dessas condições foram selecionados 8 NEOs, sendo 3 do subgrupo Amor, 4 do subgrupo Apollo, e 1 do subgrupo Aten. Dentre os asteroides selecionados, 3 são também classificados como PHA. Todos os objetos selecionados estão listados na tabela 2.2, onde para cada um é dado o número e denominação, o subgrupo ao qual pertence, os parâmetros orbitais (a , q e Q), a magnitude absoluta (H), o albedo geométrica p_V , o diâmetro (D) e o período (P).

Tabela 2.2: *Parâmetros físicos dos 8 objetos observados entre Abril de 2020 e Dezembro de 2020. Os dados foram obtidos dos sites NEODyS-2 e EARN.*

Asteroide	Subgrupo	a	q	Q	H	p_V	D	P
		(UA)	(UA)	(UA)			(km)	(h)
(85275) 1994 LY	Amor	1.8901	1.0549	2.7255	16.4	0.093	2.506	2.6962
(163348) 2002 NN4	Aten/PHA	0.8763	0.4956	1.2572	20.1	0.030	0.735	14.50
(267494) 2002 JB9	Apollo/PHA	2.7183	0.5854	4.8514	16.0			2.4261
(388838) 2008 EZ5	Amor	2.0882	1.0266	3.1499	19.5	0.196	0.378	2.859
(415029) 2011 UL21	Apollo/PHA	2.1224	0.7367	3.5082	15.8			2.732
(433992) 2000 HD74	Amor	2.9168	1.1706	4.6631	18.0	0.144	0.827	9.36
(474179) 1999 VS6	Apollo	1.1978	0.9306	1.4651	19.0			16.91
(503960) 2004 QF1	Apollo	1.0512	0.7458	1.3566	18.3			

Na tabela 2.3 para cada NEO são dadas as circunstâncias observacionais, ou seja: data, número de horas de observação, distância à Terra e ao Sol, faixa de ângulos de fase e magnitude aparente durante as observações.

Tabela 2.3: *Circunstâncias observacionais dos asteroides nas noites de observação.*

Asteroide	Data	Tempo Obs. (h)	Δ (UA)	r (UA)	α ($^{\circ}$)	Mag (V)
(85275) 1994 LY	22/07/2020	0.4	0.236	1.180	41.7	15.2
	23/07/2020	0.1	0.231	1.175	42.0	15.1
	24/07/2020	0.1	0.225	1.171	42.4	15.1
(163348) 2002 NN4	18/06/2020	0.3	0.091	1.103	16.3	16.0
	20/06/2020	0.3	0.104	1.113	20.0	16.4
	21/06/2020	0.4	0.110	1.118	21.6	16.6
(267494) 2002 JB9	22/05/2020	0.4	0.218	1.143	48.9	14.8
(388838) 2008 EZ5	26/04/2020	1.2	0.182	1.092	57.6	18.1
(415029) 2011 UL21	17/12/2020	1.3	0.702	1.674	8.1	16.8
	18/12/2020	1.2	0.692	1.665	7.7	16.8
	19/12/2020	0.7	0.682	1.656	7.5	16.7
(433992) 2000 HD74	22/05/2020	0.4	0.278	1.268	20.6	16.8
	23/05/2020	0.5	0.204	1.129	51.0	14.7
(474179) 1999 VS6	21/10/2020	0.4	0.174	1.144	28.6	16.8
	22/10/2020	0.4	0.167	1.140	27.5	16.7
(503960) 2004 QF1	12/08/2020	0.4	0.349	1.353	11.1	17.3

As imagens obtidas com CCD contém efeitos instrumentais que devem ser removidos usando as imagens de calibração *bias*, *dark* e *flat*. Essas imagens de calibração devem ser obtidas a cada noite, para que os ruídos instrumentais sejam praticamente os mesmos contidos nas imagens de ciência que serão corrigidas. Para reduzir as imagens foi usado a técnica de fotometria de abertura, onde utilizou-se o software IRAF para determinar as magnitudes instrumentais e seus respectivos erros. Esse procedimento é realizado tanto para o asteroide quanto para a estrela padrão. A precisão dessas medidas depende da estabilidade das condições atmosféricas. O processo de calibração das imagens, bem como a determinação das magnitudes instrumentais foram os mesmos descritos em Arcoverde (2018).

2.2.3 Espectro fotométrico e classificação taxonômica

Como mencionado anteriormente, neste projeto usamos um dos sistemas fotométricos mais usado na atualidade, o do SDSS, com os filtros g' , r' , i' , z' , que tem centro de bandas em $0.477 \mu\text{m}$, $0.623 \mu\text{m}$, $0.763 \mu\text{m}$ e $0.913 \mu\text{m}$, respectivamente (Fukugita et al. (1996)). Na figura 2.3, é mostrado um exemplo da transmissão de cada filtro definido pelo sistema SDSS.

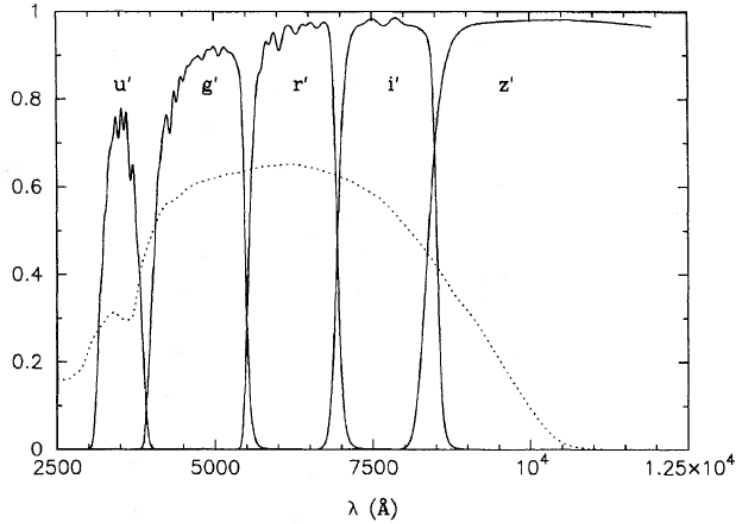


Figura 2.3: Exemplo de transmissão de filtro u' , g' , r' , i' , z' , a linha pontilhada mostra a eficiência quântica. Figura retirada de Fukugita et al. (1996).

O espectro fotométrico de um asteroide mostra como a refletância varia com o comprimento de onda e está diretamente relacionada à composição da superfície do objeto. Assim, sabendo o comportamento do espectro podemos obter uma classificação taxonômica. Para derivar o espectro dos NEOs observados, o primeiro passo é transformar as medidas de cores $(m_g - m_r)_A$, $(m_r - m_i)_A$ e $(m_r - m_z)_A$ no sistema SDSS, normalizando o fluxo para a banda r e removendo as cores solares (Izevic et al. 2001) $(m_g - m_r)_\odot$, $(m_r - m_i)_\odot$ e $(m_r - m_z)_\odot$, como mostrado na equação 2.2. Um procedimento semelhante ao descrito acima foi usado por Carvano et al. (2010) para derivar a classificação taxonômica de asteroides do catálogo SLOAN-MOC4, produzindo modelos para as classes identificadas. Assim, como feito em Rondón et al. (2019), comparamos cada um dos nossos espectros com esses modelos e derivamos a classificação taxonômica do NEO por meio do melhor ajuste do qui-quadrado.

$$f_x = \frac{\left(\frac{f_x}{f_r}\right)_A}{\left(\frac{f_x}{f_r}\right)_\odot} = 10^{-0.4C_{x-r}};$$

$$C_{x-r} = (m_x - m_r)_A - (m_x - m_r)_\odot. \quad (2.2)$$

Com base no procedimento descrito acima, conseguimos obter um espectro fotométrico para 6 objetos da tabela 2.2. Para os outros 2 objetos, ou seja (136900) 1998 HL49 e (505657) 2014 SR339, não foi possível obter o espectro fotométrico devido a não ter dados em todos os filtros, além de imagens com objetos saturados. Vale também salientar que entre os seis espectros obtidos, conseguimos a classificação taxonômica para apenas três objetos, conforme detalhado a seguir.

A figura 2.4 mostra o espectro fotométrico obtido para o asteroide (85275) 1994 LY, que pertence ao subgrupo Amor. Na figura tem-se as magnitudes observadas, normalizadas no filtro r, indicadas por pontos vermelhos, com barras de erro correspondentes, conectados por uma linha. O teste qui-quadrado, aplicado a vários modelos do esquema taxonômico de Carvano et al. (2010), mostra que o tipo L (pontos e linha azul), melhor se ajusta ao espectro. Este objeto tem um albedo de 0.093, o qual é um pouco inferior ao valor médio determinado (tabela 2.1) para a classe L, que é de 0.204. Entretanto, conforme já mencionado, a classe L de Carvano et al. (2010) é a junção das classes K, L e Ld de Bus, logo o albedo médio pode ter um valor menor.

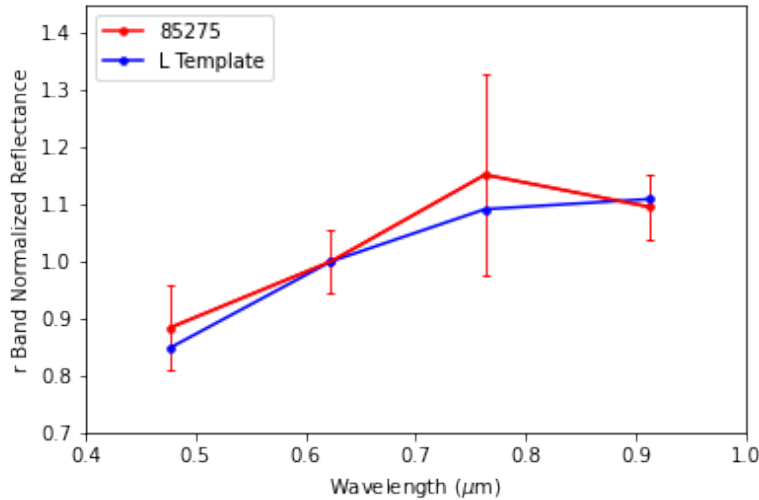


Figura 2.4: *Espectro fotométrico do asteroide (85275) 1994 LY.*

Na figura 2.5 dado o espectro fotométrico obtido para o asteroide (163348) 2002 NN4, do subgrupo Aten. Novamente, os pontos e linha vermelha indicam os dados obtidos, enquanto a linha verde o template que melhor se ajusta ao espectro de acordo com o teste qui-quadrado, aplicado a vários modelos do esquema taxonômico de Carvano et al. (2010). Esse NEO tem um albedo baixo, de 0.030, o que indica que deve ter uma composição carbonácea. Entretanto, vale mencionar de que o valor médio para a classe D, computado acima (tabela 2.1) é um pouco superior, ou seja, de 0.124. Como esse valor médio foi computado a partir de apenas 75 objetos, essa

diferença com o albedo observado não chega colocar em dúvida a classificação feita.

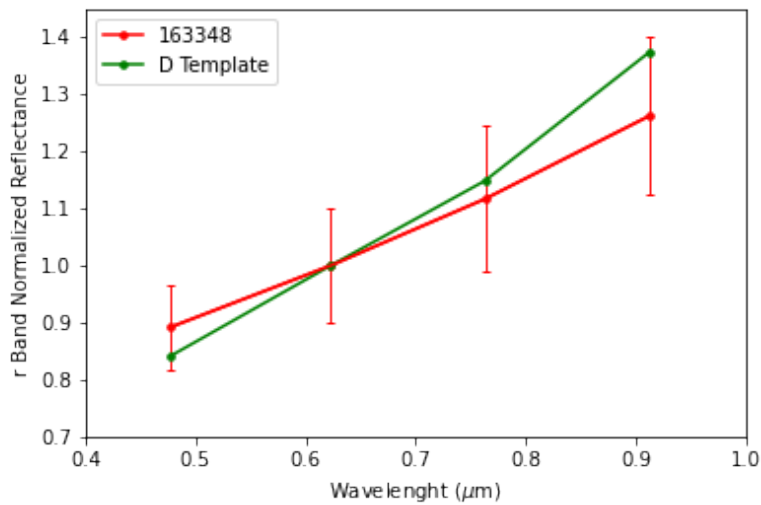


Figura 2.5: *Espectro fotométrico do asteroide (163348) 2002 NN4.*

Por fim, na figura 2.6 é dado, em vermelho, o espectro fotométrico obtido para o asteroide (474179) 1999 VS6, do subgrupo Amor. O teste qui-quadrado, aplicado a vários modelos do esquema taxonômico de Carvano et al. (2010), indica que o tipo L (pontos e linha verde) é o que melhor se ajusta ao espectro. É de ressaltar o pequeno erro nas magnitudes. Como este objeto era menos brilhante do que os dois mostrados acima, isso tende a indicar que foi observado em noites bem mais fotométricas

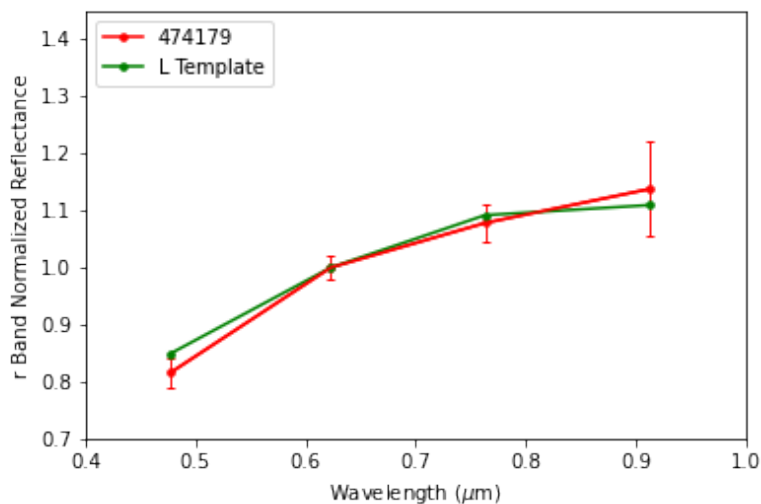


Figura 2.6: *Espectro fotométrico do asteroide (474179) 1999 VS6.*

Para os NEOs (267494) 2002 JB9, (433992) 2000 HD74 e (503960) 2004 QF1 os espectros obtidos são mostrados na figura 2.7, todos representados pelos pontos e linhas vermelhas. Como pode ser visto, a forma dos espectros não é similar a nenhum dos templates de Carvano et al. (2010), e embora o melhor ajuste seja obtido para a classe C, o desvio é muito grande. Isso claramente é devido aos grandes erros nas magnitudes, resultantes de noites não fotométricas. Embora os espectros obtidos para esses três asteroides sejam aqui apresentados, eles não serão considerados na análise das distribuições de taxonomias devido à grande incerteza na classificação.

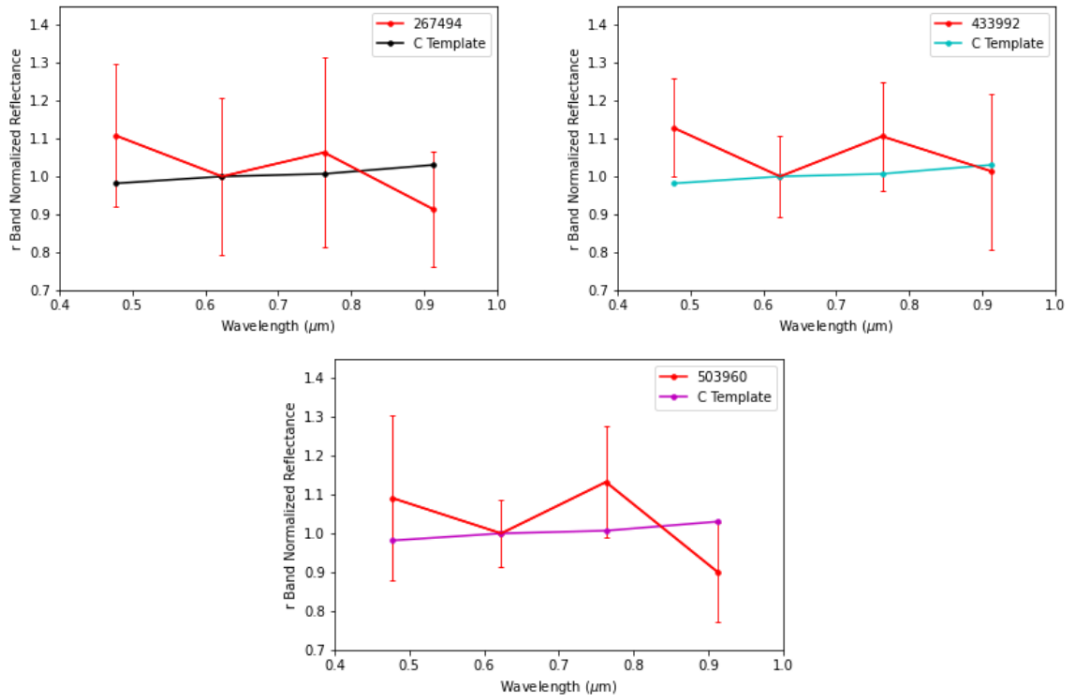


Figura 2.7: *Espectro fotométrico para os asteroides (267494) 2002 JB9, (433992) 2000 HD74 e (503960) 2004 QF1. Em todas as figuras, os pontos e linhas vermelhos se referem ao objeto enquanto as linhas preta, azul e roxa representam o template da classe C, de acordo com Carvano et al. (2010).*

É importante mencionar que os espectros fotométricos derivados acima foram obtidos supondo que os objetos são esféricos e não usamos nenhum tipo de correção. No entanto, sabemos que a maioria dos asteroides tem forma alongada, o que provoca uma variação na magnitude reduzida do objeto, causado pela variação na área de reflexão da luz solar. É exatamente essa variação do brilho do objeto que permite determinar a curva de luz e, conseqüentemente, o período de rotação do objeto. Na maioria dos casos o período de rotação não varia com o tempo, mas a amplitude da variação de brilho varia. Neste caso, a curva de luz é utilizada para corrigir o espectro fotométrico, como mostrado em Rondón et al. (2019). Entretanto, quando o tempo de observação para determinar o espectro é bem menor que o período rotacional do objeto a correção pela curva rotacional se torna irrelevante já que no

momento da observação apenas parte do objeto foi observado.

Capítulo 3

Distribuições de classes taxonômicas

Neste capítulo vamos apresentar as distribuições de classes taxonômicas entre os NEOs e outras populações de asteroides visando, de um lado, entender como se comparam e, por outro, verificar se é possível estabelecer alguma relação que indique possíveis fontes dos NEOs.

Para tanto, serão apresentadas distribuições em forma de pizza conforme apresentadas no trabalho de DeMeo and Carry (2014), separando os objetos em regiões e, dentro destas, em faixas de diâmetro. Para facilitar a análise das distribuições serão utilizados dois tipos de agrupamento de classes taxonômicas: A, os complexos e “end members”, conforme definidos em DeMeo et al. (2009) e B, os definidos em Perna et al. (2016). Na tabela 3.1 são detalhados esses dois agrupamentos em termos das classes da taxonomia DeMeo. As distribuições serão apresentadas para diferentes faixas de diâmetros indicando sempre o número de objetos analisados.

Tabela 3.1: *Divisão das classes taxonômicas para fins de análise das distribuições*

Agrupamento A (DeMeo et al. 2009) – 10 classes
Complexo S: S + Sq + Q + O + R + Sv
Complexo C: C + Cgh + Cg + Ch + Cb + B
Complexo X: X + Xc + Xk + Xe
End-members: L, D, T, K, Sa, A e V

Agrupamento B (Perna et al. 2016) – 4 classes
S: Siliceous: S, Sq, Q, A, Sa, O
B: Basaltic: V, Sv
C: Carbonaceous: B, C, Cgh, Ch, Cb, D, T, Xc
M: Miscellaneous: X, Xe, Xk, K, L

No que segue vamos analisar separadamente as distribuições obtidas utilizando dados espectroscópicos (incluindo os dados do ECAS) e os espectrofométricos (SDSS e presente trabalho). Para cada um desses conjuntos de dados serão primeiramente mostradas e comparadas as distribuições de composições dos NEOs e de diversas populações do Cinturão Principal e, em seguida, a comparação será feita entre os NEOs e objetos em regiões próximas das principais rotas de transporte, as ressonâncias 3:1 e ν_6 . Nos dois casos as distribuições serão apresentadas primeiramente para todos os objetos das diversas populações analisadas e depois separados em duas faixas diâmetro: menores do que 10 km e menores do que 5 km. Vale ressaltar que essas faixas se justificam pelo fato da maioria dos NEOs ter tamanho pequeno, sendo que o maior, (1036) Ganymede, tem diâmetro menor do que 40 km. Além do mais, apenas uns 15 NEOs tem diâmetro maior do que 10 km. Por outro lado, no caso de espectros, temos poucos objetos de pequeno tamanho nas demais populações do Cinturão Principal. Obviamente, isso é um problema, ou melhor, uma tendência observacional, já que para um mesmo tamanho quanto mais distante for o objeto, mais difícil será sua observação. Por exemplo, com diâmetro menor ou igual a 5 km temos apenas 5 objetos no cinturão intermediário e nenhum no externo! Portanto, as faixas escolhidas tentam apenas entender o quanto o diâmetro dos objetos afeta as distribuições nas diversas populações. Vale ressaltar de que esse panorama muda bastante quando utilizamos dados do SDSS pois foram observados objetos menores no Cinturão Principal, e daí sua relevância.

3.1 Distribuições utilizando dados espectroscópicos

No que segue vamos mostrar e discutir as distribuições de classes taxonômicas utilizando 3893 dados obtidos de espectroscopia e o mapeamento ECAS, conforme identificados na sessão 2.1.

3.1.1 Comparação entre NEOs e diferentes populações de asteroides

Nas figuras 3.1 e 3.2 são mostradas, respectivamente, as distribuições utilizando os agrupamentos de classes taxonômicas A e B, conforme dado na tabela 3.1. Esses gráficos foram produzidos utilizando todos os diâmetros e na tabela 3.2 é dado tanto o número de objetos em cada região quanto a quantidade de objetos que têm diâmetro determinado ou estimado. No primeiro caso são objetos com diâmetro

obtido a partir de albedo determinado enquanto no segundo foi utilizado o albedo médio da classe taxonômica, conforme dado na tabela 2.1. Como primeiro ponto, é importante ressaltar como aumentou o número de NEOs com classificação passando de 1039 e 1040 nos trabalhos de Binzel et al. (2015) e Binzel et al. (2019) para 1108 aqui. Também vale notar que existem mais NEOs com diâmetro estimado do que com determinado. O mesmo vale para a população dos Mars-Crossers mas essa tendência se inverte no caso das demais populações do Cinturão Principal.

Tabela 3.2: *Número de objetos de todos os diâmetros, por região, que contêm classificação taxonômica e a quantidade de objetos que contêm diâmetros determinados e estimados.*

População	Número de objetos	Número de objetos com diâmetro determinado	Número de objetos com diâmetro estimado
NEOs	1108	456	652
Mars-Crossers	123	43	80
Hungaria	53	42	11
Phocaea	54	51	3
Cinturão Interno	1052	935	117
Cinturão Intermediário	822	801	21
Cinturão Externo	587	582	5
Objetos com $a > 3.26$ UA	94	89	5

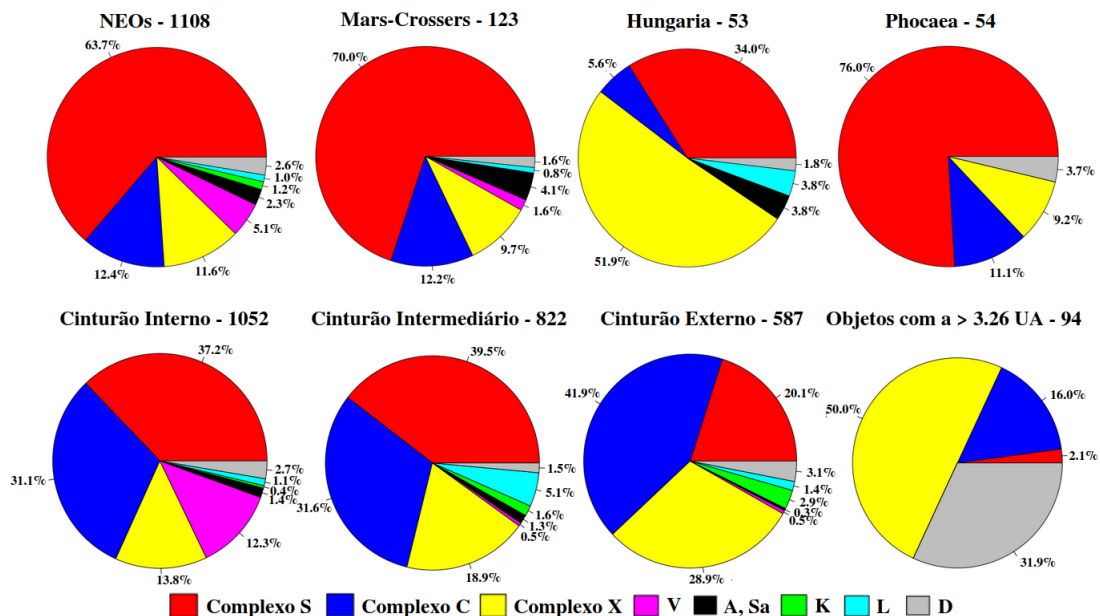


Figura 3.1: *Distribuição das classes taxonômicas de acordo com o agrupamento A (DeMeo et al. 2009) para objetos de todos os tamanhos. As cores indicam as diferentes classes conforme indicado na legenda abaixo.*

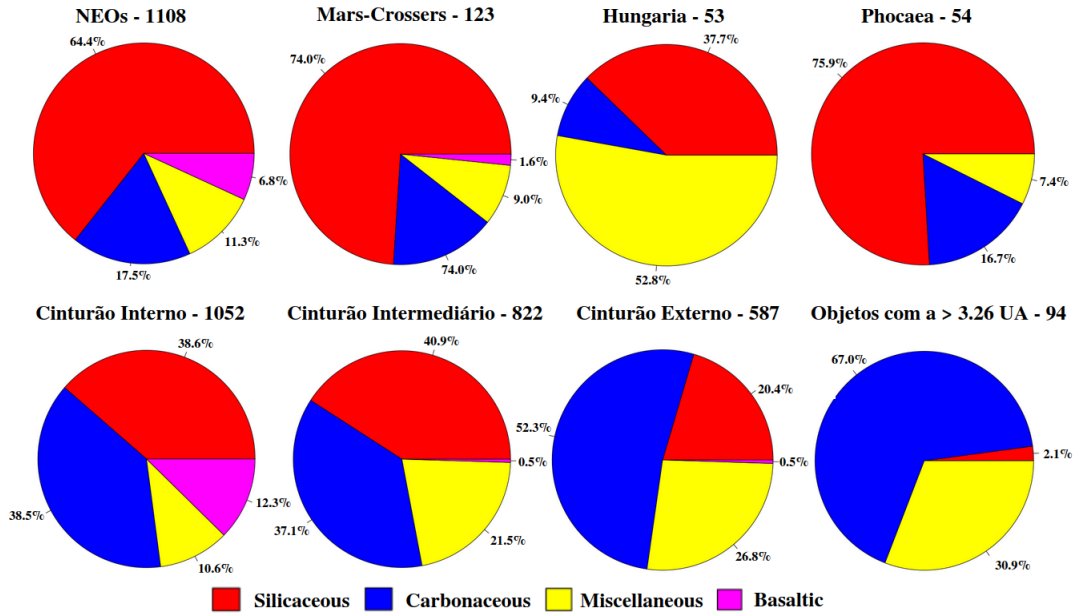


Figura 3.2: Distribuição das classes taxonômicas de acordo com o agrupamento B (Perna et al. 2016) para objetos de todos os tamanhos. As cores indicam as diferentes classes conforme indicado na legenda abaixo.

Analisando as distribuições dadas nas figuras 3.1 e 3.2, em termos dos principais complexos e classes, é possível ver que a população dos NEOs é dominada por objetos que fazem parte do complexo S, ou seja, o material silicato domina essa população. Veja ainda que, em termos percentuais, a distribuição de classes nessa população é semelhante àquela observada entre os Mars-Crossers, principalmente em relação aos grandes complexos. O mesmo ocorre no grupo dos Phocaea. No entanto, é importante ressaltar que o número de NEOs é cerca de 9 e 20 vezes maior do que os Mars-Crossers e Phocaea, respectivamente.

Em relação as distribuições no Cinturão Principal, é possível ver que na região interna e intermediária o percentual de objetos dos complexos S e C são praticamente iguais, o que tende a indicar uma proporção similar de silicatos e carbonáceos. Já na parte externa do cinturão objetos do complexo C e X dominam a distribuição. O grupo Hungaria é dominado basicamente por objetos do complexo X e S. As outras classes presentes na distribuição, em geral, possuem pequeno percentual nas diversas populações, com exceção da classe V, bastante abundante na região interna do cinturão devido à presença da família de (4) Vesta, e dos objetos do tipo D na região além do cinturão externo. No cinturão intermediário, a classe D apresenta-se em grande quantidade quando comparado as demais. Vale ressaltar de que embora as distribuições dadas na figura 3.2 sejam mais simples de serem visualizadas, a sua interpretação composicional é mais complicada devido à grande mistura na classe denominada “miscellaneous”.

Na tabela 3.3 é dado o número de objetos com diâmetro, determinado ou es-

timado, menor do que 10 km nas diversas populações, ou regiões, aqui analisadas. É importante notar que a quantidade de NEOs praticamente não muda já que a população é composta por objetos pequenos e que são possíveis de serem observados pois estão próximos da Terra. Por outro lado, a quantidade de objetos no Cinturão Principal diminui bastante, principalmente na região intermediária e externa. Isso é devido à tendência observacional, que faz com que objetos, com mesma composição superficial, mais distantes da Terra sejam mais difíceis de serem observados. Considerando também que existe uma tendência de objetos mais escuros nas partes externas do cinturão de asteroides, isso tudo leva a que se tenha as propriedades composicionais apenas para os corpos maiores.

Tabela 3.3: *Número de objetos para a faixa de diâmetro 0 km - 10 km, por região, que contém classificação taxonômica e a quantidade de objetos que contém diâmetros determinados e estimados.*

População	Número de objetos	Número de objetos com diâmetro determinado	Número de objetos com diâmetro estimado
NEOs	1104	452	652
Mars-Crossers	105	34	71
Hungaria	52	41	11
Phocaea	28	25	3
Cinturão Interno	794	682	112
Cinturão Intermediário	147	131	16
Cinturão Externo	16	14	2
Objetos com $a > 3.26$ UA	8	3	5

As distribuições de classes taxonômicas podem ser vistas nas figuras 3.3 e 3.4. Nelas é possível notar de que, apesar de uma pequena diferença nos percentuais, os NEOs e os Mars-Crossers continuam com distribuições bem parecidas. Analisando a distribuição de classes no Cinturão Principal, percebe-se uma grande mudança nas regiões intermediárias e externas. Essas regiões, que antes eram divididas, basicamente, entre materiais silicatos e carbonáceos, para essa faixa de diâmetro passam a ter o complexo S como dominante na distribuição. Isso claramente é um efeito de seleção, já que, conforme mencionado anteriormente, para essa faixa de tamanhos apenas os objetos com maior albedo (tipo S) conseguem ser observados. É interessante perceber também que a distribuição no cinturão intermediário, em relação, principalmente, aos complexos S e C torna-se semelhante à distribuição observada na região dos Mars-Crossers. Entretanto, vale notar que no cinturão interno, apesar do número de objetos ter diminuído em comparação com a amostra contendo todos os diâmetros (de cerca de mil para quase 800) a distribuição de composições

permanece praticamente inalterada. Isso pode ser um bom indicativo de que essa distribuição independe do tamanho dos objetos, ou seja, não tem viés observacional, ou este não é significativo.

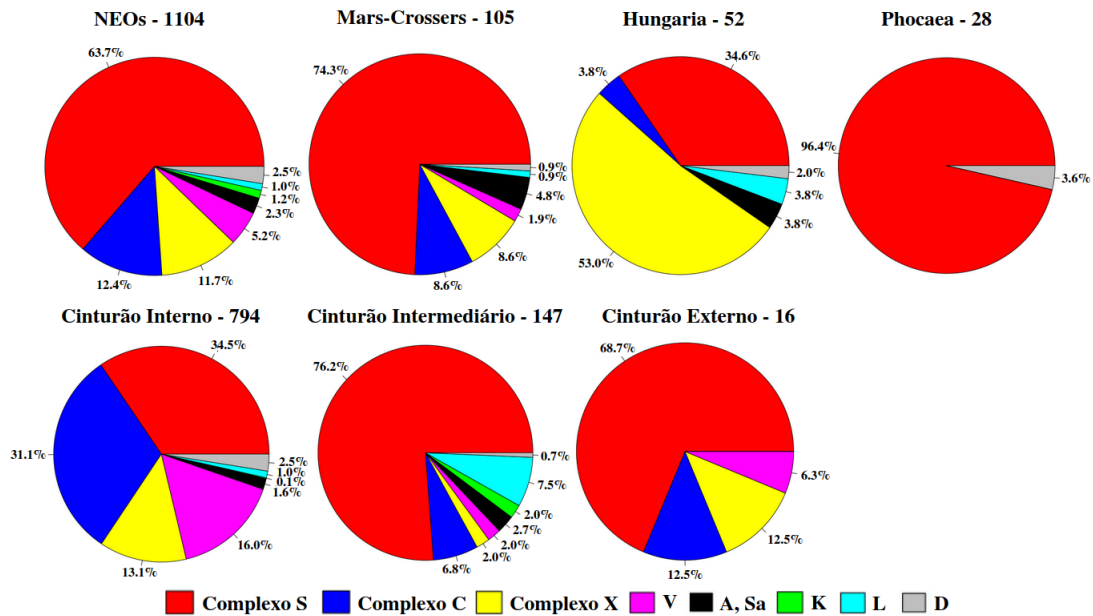


Figura 3.3: Distribuição das classes taxonômicas de acordo com o agrupamento A (DeMeo et al. 2009) para objetos com diâmetro menor do que 10 km. As cores indicam as diferentes classes conforme indicado na legenda abaixo.

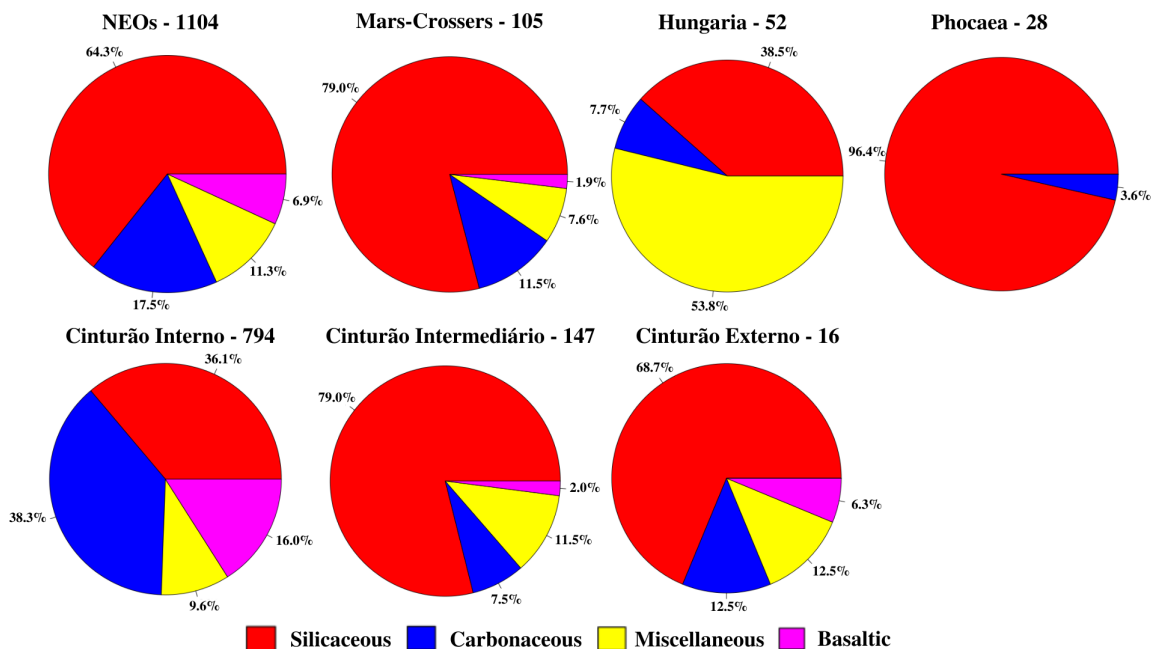


Figura 3.4: Distribuição das classes taxonômicas de acordo com o agrupamento B (Perna et al. 2016) para objetos com diâmetro menor do que 10 km. As cores indicam as diferentes classes conforme indicado na legenda abaixo.

Devido ao pequeno número de objetos não é possível tirar nenhuma conclusão sobre as distribuições no cinturão externo e além deste. O mesmo, valendo para o grupo Phocaea. No caso do grupo Hungaria, entretanto, a distribuição não se altera já que a maior parte dos objetos é de pequeno tamanho. Em relação às demais classes, nota-se apenas um pequeno aumento proporcional da classe V na parte interna. Isso deve ser atribuído ao fato de que os objetos com essa composição superficial, tem alto albedo com valor médio de 0.358 (tabela 2.1), e acredita-se serem fragmentos resultantes de eventos de craterização em (4) Vesta, tendo todos tamanho da ordem de 10 km ou menor.

Para a faixa de diâmetro entre 0 e 5 km a tabela 3.4 mostra que a população de NEOs ainda permanece com quase a mesma quantidade de objetos. Já o número de Mars-Crossers se reduz, praticamente, pela metade. Em relação às regiões do Cinturão Principal, há uma redução significativa na quantidade de objetos, permitindo uma análise apenas da região interna. Nas figuras 3.5 e 3.6 mostramos então as distribuições obtidas apenas para as populações dos NEOs, Mars-Crossers, Hungaria e cinturão interno. As figuras mostram que o complexo S permanece dominando a distribuição na população dos NEOs e Mars-Crossers, onde o percentual desse complexo dentro da distribuição praticamente não muda em relação às distribuições vistas nas análises anteriores, o que era de se esperar, já que a maioria dos objetos dessas populações tem pequeno tamanho. Por outro lado, no cinturão interno, a única região onde ainda temos um número não desprezível de objetos, nota-se a tendência de uma diminuição significativa de objeto do complexo S e um aumento de objetos do complexo C. Comparando com a distribuição para a faixa de diâmetros menores do que 10 km, os objetos do complexo S passam de $\sim 36\%$ para apenas 17% (utilizando o agrupamento B) enquanto os do complexo C de 38% para 47% . As percentagens de objetos classificados como “*miscellaneous*” e “*basaltic*” praticamente se mantém. É importante aqui ressaltar que essa tendência pode ser o resultado de uma amostra não aleatória de objetos na região. Por exemplo, famílias escuras tem sido objeto de alguns estudos recentes (Morate et al. 2018, Morate et al. 2019) e isso pode ter contribuído para um aumento na amostra de objetos da classe C de pequeno tamanho. Uma forma geralmente utilizada para remover essa tendência é a de utilizar um único objeto por família, assumindo que estas são homogêneas. Outra forma, seria retirar todos os objetos membros de famílias da amostra. Infelizmente, em ambos os casos, a amostra de pequenos objetos se torna tão pequena que inviabiliza a análise de distribuição de classes taxonômicas.

Tabela 3.4: Número de objetos para a faixa de diâmetro 0 km - 5 km, por região, que contêm classificação taxonômica e a quantidade de objetos que contêm diâmetros determinados e estimados.

População	Número de objetos	Número de objetos com diâmetro determinado	Número de objetos com diâmetro estimado
NEOs	1089	437	652
Mars-Crossers	59	16	43
Hungaria	34	25	9
Phocaea	1	1	0
Cinturão Interno	366	276	90
Cinturão Intermediário	7	2	5
Cinturão Externo	1	1	0
Objetos com $a > 3.26$ UA	4	1	3

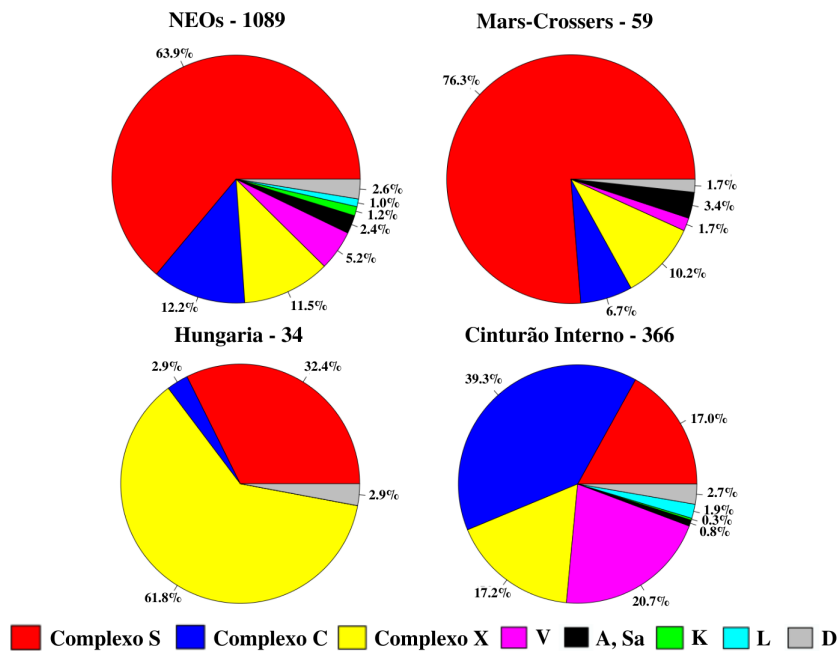


Figura 3.5: Distribuição das classes taxonômicas de acordo com o agrupamento A (DeMeo et al. 2009) para objetos com diâmetro menor do que 5 km. As cores indicam as diferentes classes conforme indicado na legenda abaixo.

Se a distribuição de composições no cinturão interno dada nas figuras 3.5 e 3.6 representa de fato a região interna do Cinturão Principal então devemos concluir que esta não é compatível com a população dos NEOs. Ou seja, a região interna do Cinturão Principal como um todo não seria a principal fonte de objetos da população dos NEOs. Entretanto, se olharmos a distribuição de famílias na região interna do Cinturão Principal (ver, por exemplo, as famílias dadas no site AstDyS-2) notamos que aquelas próximas da ressonância ν_6 são do tipo S, enquanto as do tipo C se

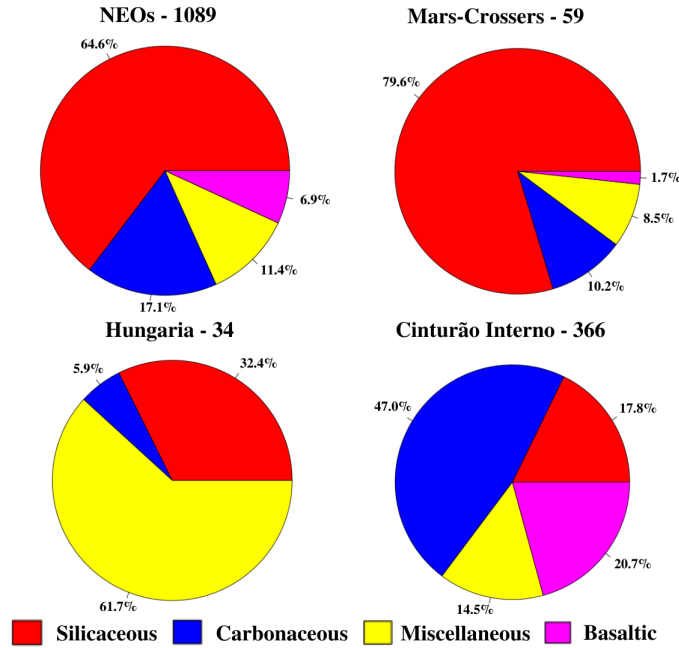


Figura 3.6: *Distribuição das classes taxonômicas de acordo com o agrupamento B (Perna et al. 2016) para objetos com diâmetro menor do que 5 km. As cores indicam as diferentes classes conforme indicado na legenda abaixo.*

encontram próximas da ressonância de movimentos médios 3:1. Nossa distribuição, então, se torna consistente com os estudos teóricos (Bottke et al. 2002a Granvik et al. 2018) que indicam como principal rota de transporte para a região dos NEOs a ressonância ν_6 .

Para melhor aprofundar esse ponto, resolvemos estudar a distribuição de classes taxonômicas para diversas faixas de diâmetro entre os NEOs e os objetos do cinturão interno. Como pode ser visto nas tabelas 3.5 e 3.6, restringimos o diâmetro dos NEOs em faixas menores, com o objetivo de analisar se existe alguma diferença em relação à distribuição mostrada para corpos maiores. No caso do cinturão interno, entretanto, apenas pudemos fazer distribuições até a faixa de 1 km, devido à tendência observacional já mencionada à medida que nos afastamos para regiões mais distantes da Terra. É importante notar nessas tabelas que existem muitos mais objetos com diâmetro estimado do que determinado no caso dos NEOs, o que não ocorre no caso dos objetos do cinturão interno. Na figura 3.7 são mostradas as distribuições, de acordo com o agrupamento A e por faixas de tamanho, para os NEOs e o cinturão interno. Na figura 3.8, por outro lado, mostramos as distribuições para as menores faixas de diâmetro na população dos NEOs.

A análise dessas figuras não é simples devido à grande diferença no tamanho das amostras: enquanto para as maiores faixas de diâmetro tem poucos objetos entre os NEOs, o contrário acontece para o cinturão interno. Apenas para a faixa entre 2 e 3 km temos amostras de tamanho comparável, 57 e 68 objetos para os NEOs e cinturão

Tabela 3.5: *Número de objetos para várias faixas de diâmetros, para a região dos NEOs, que contêm classificação taxonômica e a quantidade de objetos que contêm diâmetros determinados e estimados.*

População dos NEOs	Número de objetos	Número de objetos com diâmetro determinado	Número de objetos com diâmetro estimado
5 km - 10 km	15	15	0
4 km - 5 km	18	17	1
3 km - 4 km	25	22	3
2 km - 3 km	57	49	8
1 km - 2 km	203	136	67
0.5 km - 1 km	263	117	146
0.1 km - 0.5 km	444	108	336
< 0.1 km	102	11	91

Tabela 3.6: *Número de objetos para várias faixas de diâmetros, para a região do Cinturão Interno, que contêm classificação taxonômica e a quantidade de objetos que contêm diâmetros determinados e estimados.*

População do Cinturão Interno	Número de objetos	Número de objetos com diâmetro determinado	Número de objetos com diâmetro estimado
5 km - 10 km	428	406	22
4 km - 5 km	143	121	22
3 km - 4 km	125	108	17
2 km - 3 km	68	43	25
1 km - 2 km	28	4	24

interno, respectivamente. E as duas distribuições são muito distintas! De forma geral é possível dizer que enquanto as distribuições no caso da população dos NEOs não mudam de forma significativa para qualquer tamanho considerado, o mesmo não ocorre para a região do cinturão interno. Nesse caso existe uma tendência aos menores objetos serem da classe C, o que, em princípio, é contrário ao esperado por causa da tendência de observar objetos mais brilhantes. Conforme, já mencionado anteriormente, isso pode ser apenas devido ao fato de estarmos analisando uma amostra não aleatória. De qualquer forma, é um resultado bastante intrigante e que merece mais estudo, seja aumentando a amostra de pequenos objetos com classificação taxonômica, quanto utilizando técnicas que diminuam as tendências observacionais como, por exemplo, as utilizadas em Granvik et al. (2018) e Morbidelli et al. (2020).

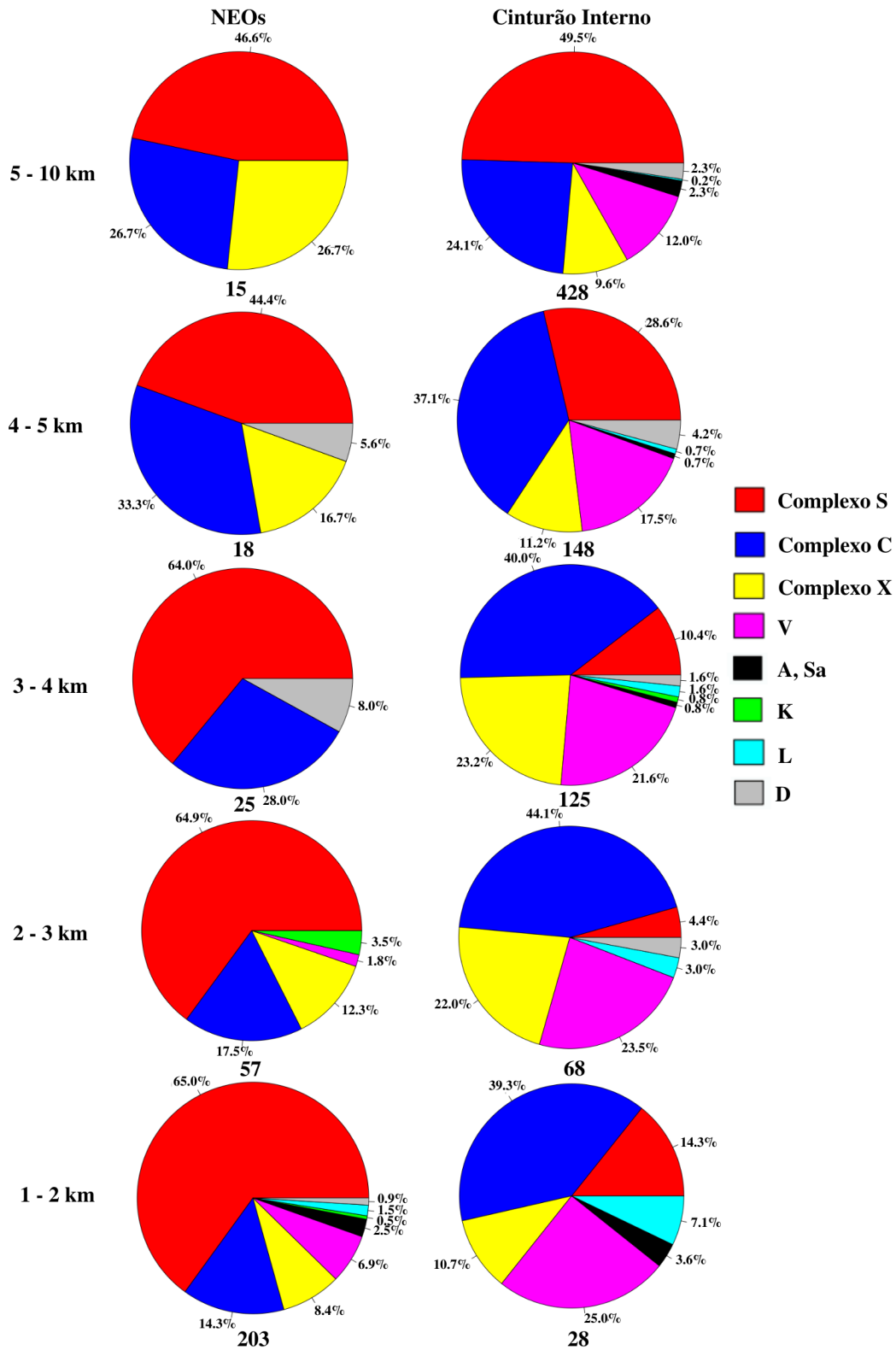


Figura 3.7: Distribuição de classes taxonômicas (agrupamento A) para a população dos NEOs, na esquerda, e do cinturão interno, da direita, para diferentes faixas de diâmetro. Para cada faixa de tamanho e população é dado número de objetos utilizados.

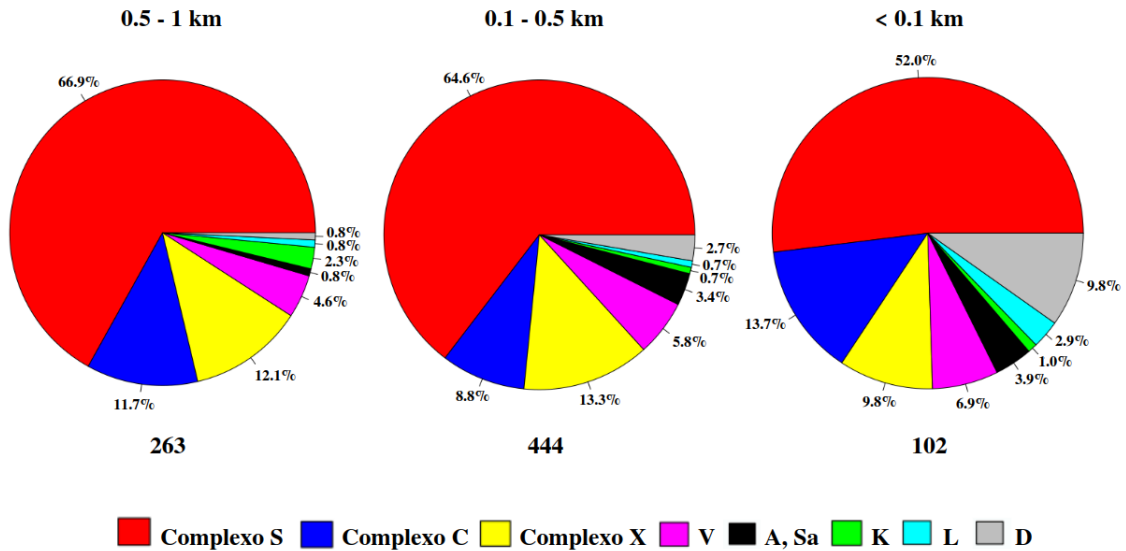


Figura 3.8: *Distribuição de classes taxonômicas (agrupamento A) para a população dos NEOs para diferentes faixas de diâmetro. Para cada faixa de tamanho é dado número de objetos utilizados.*

3.1.2 Comparação entre NEOs e regiões fontes

Diversos estudos dinâmicos (Bottke et al. 2002a, Granvik et al. 2018) indicam que as ressonâncias ν_6 com Saturno e 3:1 com Júpiter são as regiões de maior contribuição para a população de NEOs. Pensando nisso, no que segue vamos comparar as distribuições de classes taxonômicas na população de NEOs e de objetos localizados próximos das ressonâncias acima. Iremos analisar essas distribuições e suas comparações para as mesma faixas de diâmetros estudadas anteriormente, ou seja: todos os diâmetros, menores de 10 km e menores de 5 km. As distribuições serão, novamente, feitas com base nos agrupamentos definidos na tabela 3.1, baseadas em DeMeo et al. (2009) e em Perna et al. (2016).

Borda externa do cinturão interno

Classicamente, a borda externa do cinturão interno é definida pela ressonância de movimento médio com Júpiter, a aproximadamente 2.5 UA. Para estudar a distribuição de composições de objetos próximos a essa ressonância escolhemos uma faixa à esquerda da ressonância, definida por $2.4 \leq a \leq 2.5$ UA. Esquemáticamente, essa região pode ser vista na figura 3.9. Nas figuras 3.10 e 3.11 são dadas as distribuições de classes taxonômicas, de acordo com os agrupamentos A e B, para os objetos dessa região e os NEOs, considerando diversas faixas de diâmetros. Notar que para o caso dos NEOs esses gráficos já foram mostrados anteriormente (figura de 3.1 a 3.6), mas são aqui reproduzidos para facilitar a comparação visual.

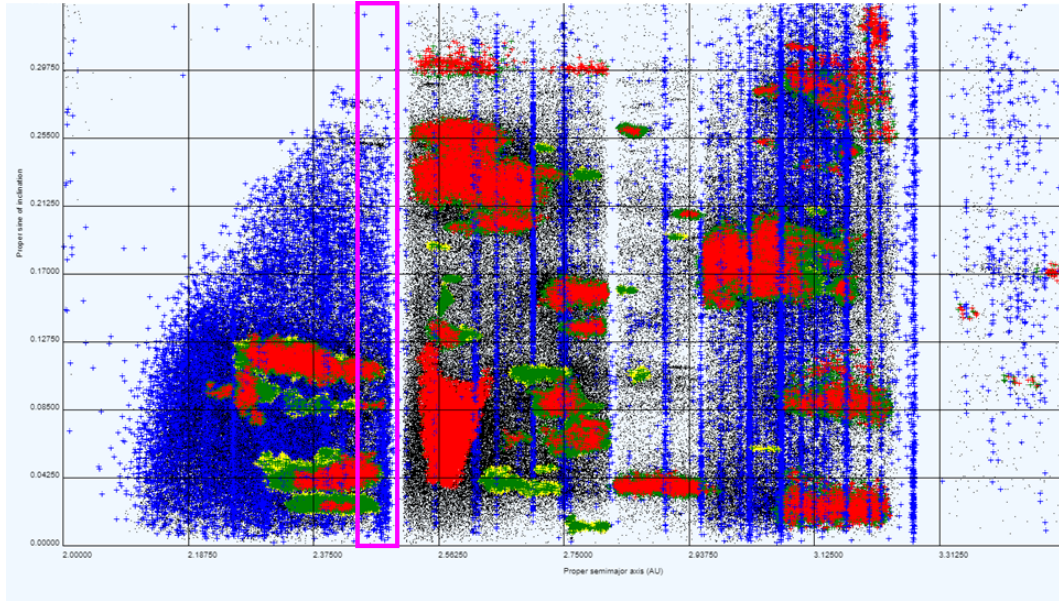


Figura 3.9: Esquema da região à esquerda da ressonância de movimentos médio 3:1. A faixa está delimitada pelas linhas magenta sobrepostas à imagem obtida do site AstDyS-2 do espaço de semieixo e seno da inclinação próprios. Em vermelho, amarelo e verde estão indicadas as famílias identificadas através da metodologia descrita em Milani et al. (2014) indicando o núcleo, o halo e objetos incluídos, respectivamente.

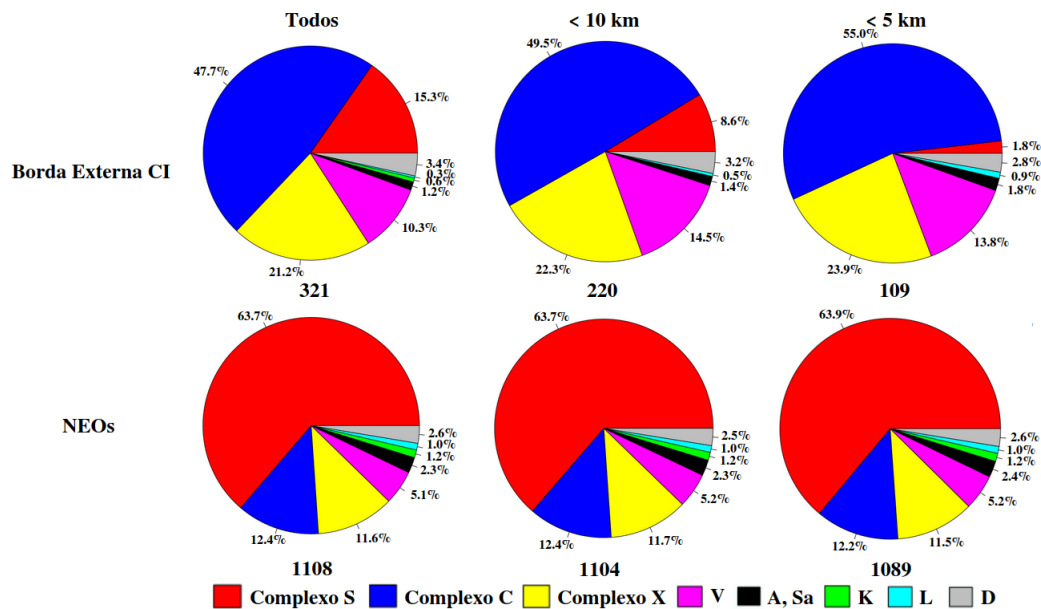


Figura 3.10: Distribuição de classes taxonômicas na borda externa do cinturão interno e na população dos NEOs, para diferentes faixas de diâmetro e utilizando o agrupamento A (DeMeo et al. 2009). Para cada faixa de tamanho é dado número de objetos considerados.

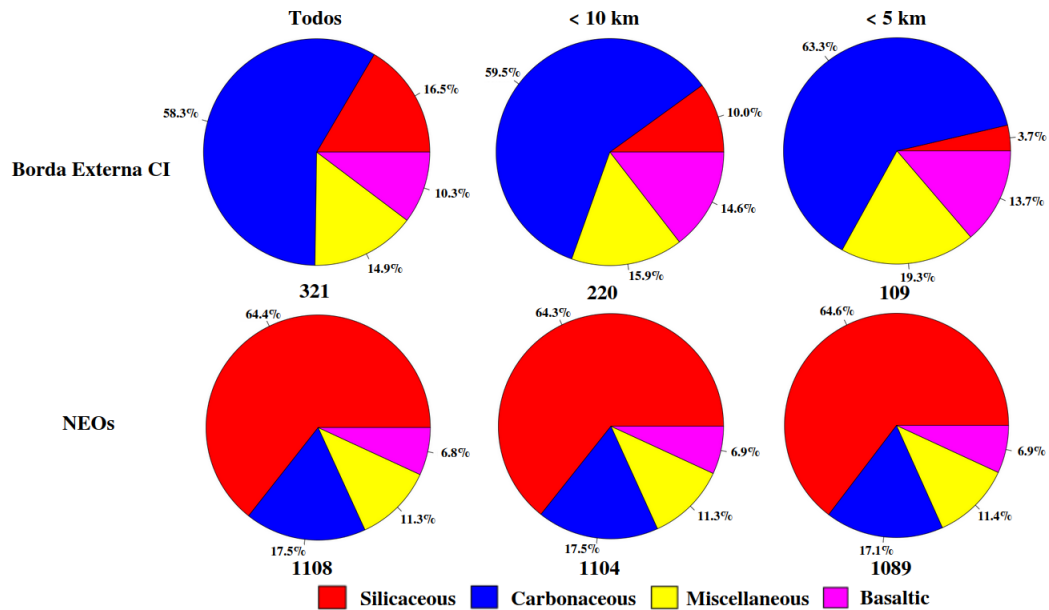


Figura 3.11: *Distribuição de classes taxonômicas na borda externa do cinturão interno e na população dos NEOs, para diferentes faixas de diâmetro e utilizando o agrupamento B (Perna et al. 2016). Para cada faixa de tamanho é dado número de objetos considerados.*

As figuras indicam claramente que, comparativamente, as duas regiões apresentam distribuições de composições bem distintas e para qualquer faixa de diâmetro. Assim como ressaltado nas análises anteriores, é importante lembrarmos que estamos comparando populações cujos membros têm majoritariamente tamanhos distintos. Isso certamente pode afetar a interpretação do resultado obtido. Por outro lado, vale notar de que enquanto a distribuição na população dos NEOs não muda nas três faixas de tamanho estudadas (devido ao fato da maioria ser de corpos pequenos) no caso da borda externa do cinturão interno a percentagem do complexo C aumenta na medida que diminui o diâmetro dos objetos. Esse resultado é no sentido contrário ao que seria esperado pela tendência observacional de observar os objetos mais brilhantes (do complexo S). Por outro lado, o resultado pode ser devido ao estudo específico de famílias escuras no cinturão interno (Morate et al. 2016, Morate et al. 2018, Morate et al. 2019) que estão situadas próximas da borda externa.

Borda interna do cinturão intermediário

Assim como feito para a borda à esquerda da ressonância 3:1, vamos aqui analisar a distribuição de composições na borda à direita, que define a borda interna do cinturão intermediário, em comparação com a da população dos NEOs. Para tanto escolhemos objetos na faixa definida por $2.5 < a \leq 2.6$ UA, conforme mostrado esquematicamente na figura 3.12.

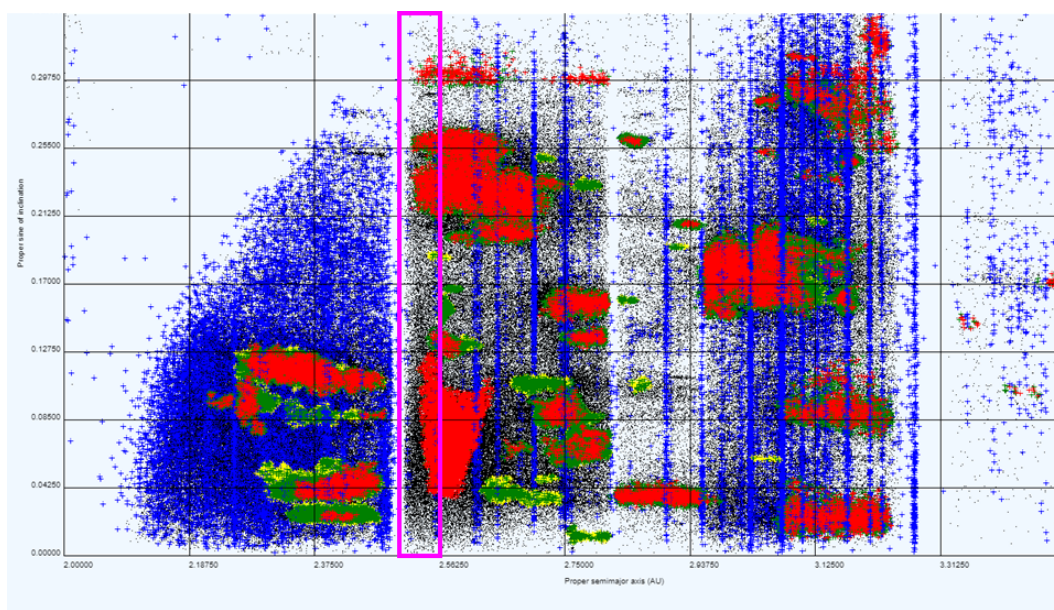


Figura 3.12: *Esquema da região à esquerda da ressonância de movimentos médio 3:1. A faixa está delimitada pelas linhas magenta sobrepostas à imagem obtida do site AstDyS-2 do espaço de semieixo e seno da inclinação próprios. Em vermelho, verde e amarelo estão indicadas as famílias identificadas através da metodologia descrita em Milani et al. (2014).*

A distribuição de classes taxonômicas na borda interna do cinturão intermediário guarda semelhança com a dos NEOs, conforme pode ser visto nas figuras 3.13 e 3.14. Embora seja, novamente, importante ressaltar que estamos lidando com amostras de tamanhos bem distintos, esse resultado é bastante interessante quando notamos que a maioria das famílias que existem nesta região do cinturão intermediário é do tipo S. Então esse resultado tanto pode ser devido ao estudo sistemático dessas famílias em detrimento de objetos do “fundo” como pode indicar que essas famílias podem ser a origem da maioria dos NEOs.

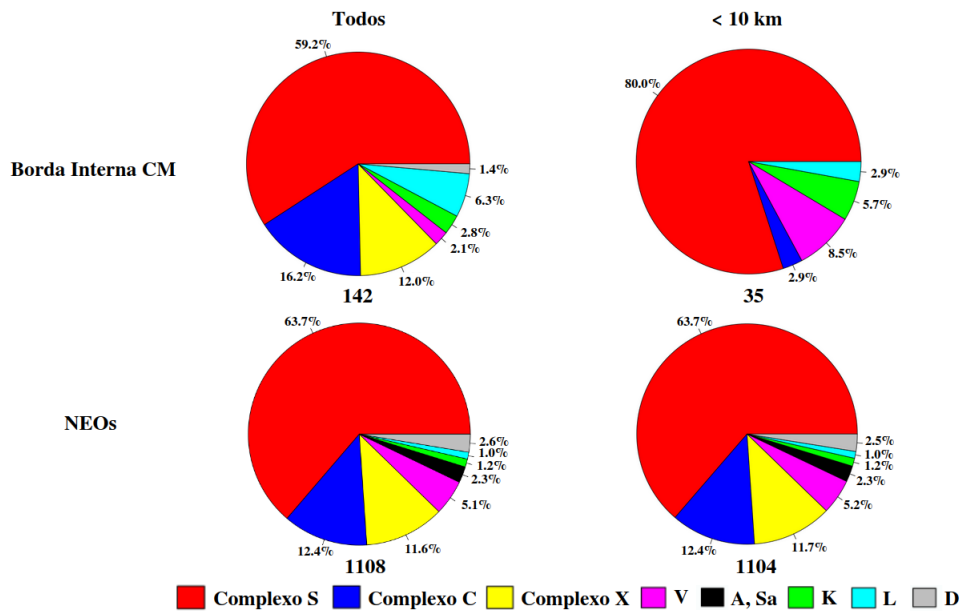


Figura 3.13: Distribuição de classes taxonômicas na borda interna do cinturão intermediário e na população dos NEOs, para diferentes faixas de diâmetro e utilizando o agrupamento A (DeMeo et al. 2009). Para cada faixa de tamanho é dado número de objetos considerados.

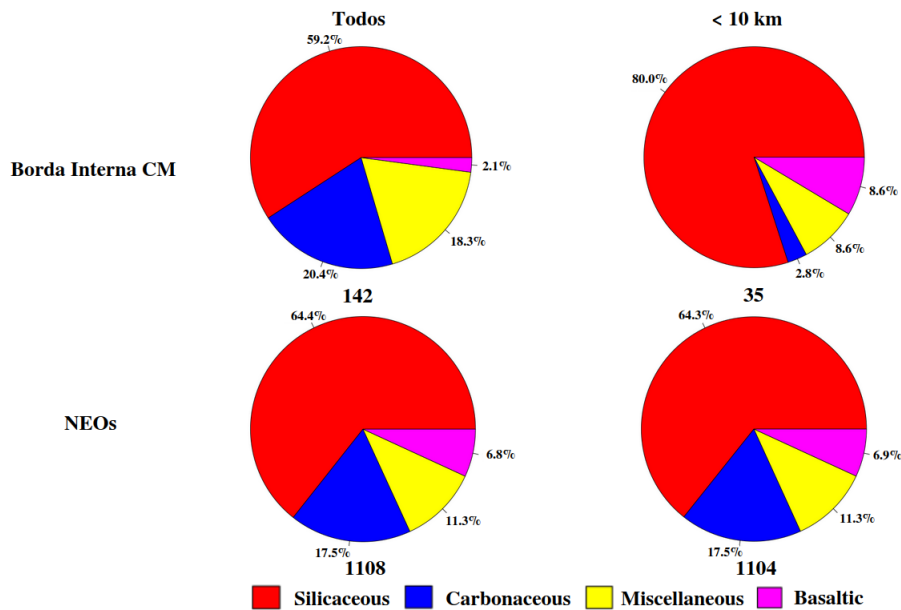


Figura 3.14: Distribuição de classes taxonômicas na borda interna do cinturão intermediário e na população dos NEOs, para diferentes faixas de diâmetro e utilizando o agrupamento B (Perna et al. 2016). Para cada faixa de tamanho é dado número de objetos considerados.

Região próxima da ressonância secular ν_6

A ressonância secular ν_6 com Saturno é a que define a borda interna do Cinturão Principal, sendo considerada a principal rota de transporte de objetos para a região dos NEOs (Bottke et al. 2002a; Granvik et al. 2018). Para estudar a distribuição de composições de objetos próximos à essa ressonância escolhemos uma faixa à direita da ressonância, definida por valores de $24 < g_p < 32$ UA no arquivo de elementos próprios, computados por Milani e Knezevic, e dados no site AstDys (<https://newton.spacedys.com/astdys2/>). Esquemáticamente, essa região pode ser vista na figura 3.15.

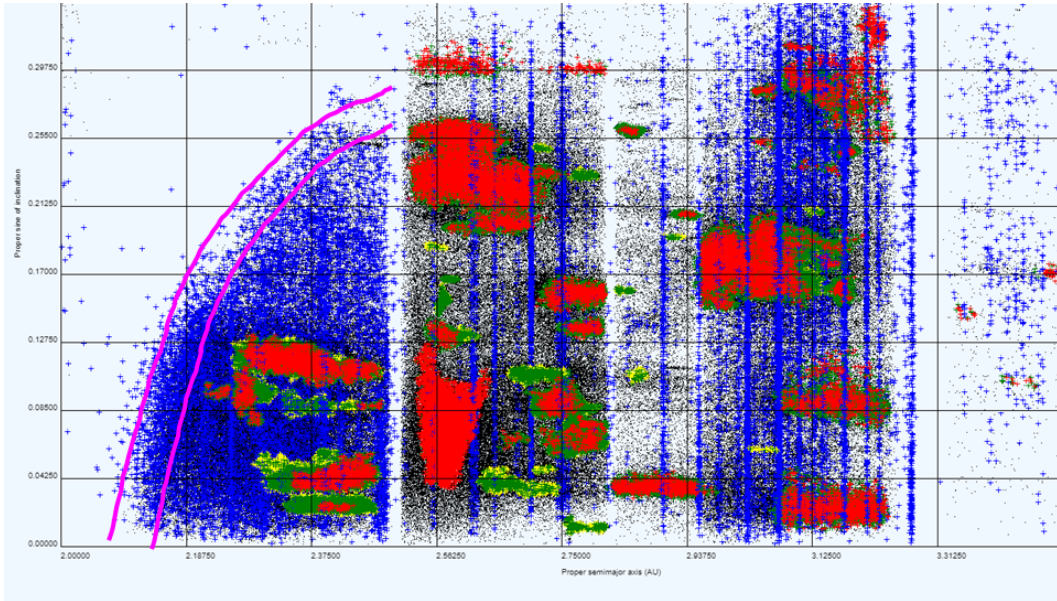


Figura 3.15: *Esquema da região próxima à ressonância secular ν_6 . A faixa estudada está delimitada pelas linhas magenta sobrepostas à imagem obtida do site AstDys-2 do espaço de semieixo e seno da inclinação próprios. Em vermelho, verde e amarelo estão indicadas as famílias identificadas através da metodologia descrita em Milani et al. (2014).*

Conforme podemos ver nas figuras 3.16 e 3.17, apenas 83 objetos na região definida tem classificação taxonômica, sendo que apenas 31 na faixa de diâmetro da maioria dos NEOs (menores do que 5 km). Isso torna a comparação complicada. Embora considerando todos os objetos classificados as duas distribuições são bastante similares, se tornam muito diferentes para os menores corpos. No caso da borda da ressonância ν_6 os 31 objetos classificados se distribuem de forma aproximadamente similar entre os complexos S, C e a classe V. Isso não ocorre nos NEOs, onde mais dos que 60% dos objetos são da classe S com pequenas percentagens das demais classes. Resultado similar é observado utilizando a classificação B, onde novamente a distribuição para os menores objetos mostra um percentual igual de objetos silíceos, carbonáceos e basálticos.

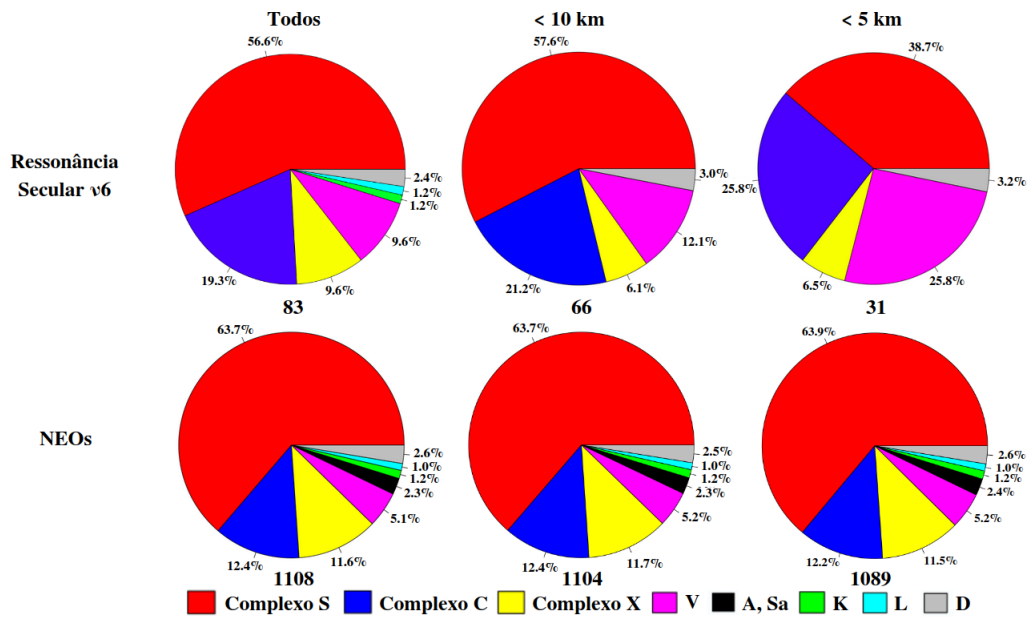


Figura 3.16: Distribuição de classes taxonômicas próximo da ressonância secular ν_6 e na população dos NEOs, para diferentes faixas de diâmetro e utilizando o agrupamento A (DeMeo et al. 2009). Para cada faixa de tamanho é dado número de objetos considerados.

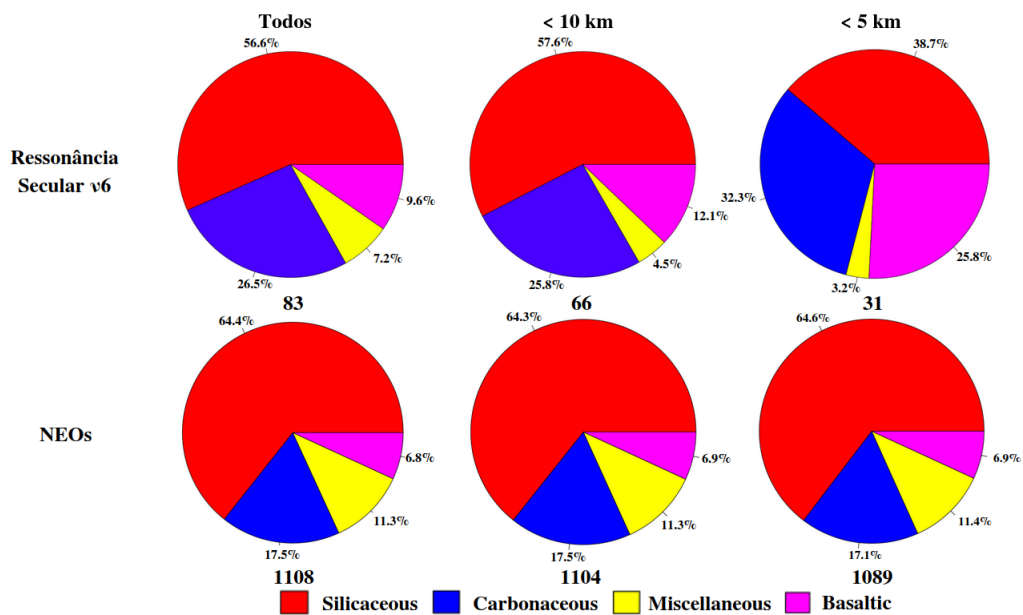


Figura 3.17: Distribuição de classes taxonômicas próximo da ressonância secular ν_6 e na população dos NEOs, para diferentes faixas de diâmetro e utilizando o agrupamento B (Perna et al. 2016). Para cada faixa de tamanho é dado número de objetos considerados.

Se considerarmos todos os objetos classificados podemos concluir que a distribuição dos NEOs é totalmente compatível com a da borda da ressonância ν_6 , o que estaria de acordo com os trabalhos teóricos (Bottke et al. 2002a, Granvik et al. 2018). Entretanto, a tendência de se observar objetos de maior albedo pode estar impactando a distribuição em se tratando em sua maioria de objetos pequenos. É de ser notado de que, embora sendo uma amostra muito pequena, a distribuição dos objetos de mesmo tamanho na borda da ressonância se mostra bem distinta. Por outro lado, esta pode, assim como no resto do Cinturão Principal, estar afetada por estudos de famílias na região como, por exemplo, Flora e Baptistina (Florczak et al. 1998, Reddy et al. 2011).

3.2 Distribuições utilizando dados espectrofotométricos

No que segue vamos mostrar e discutir as distribuições de classes taxonômicas nas diferentes populações de asteroides, bem como em possíveis regiões de origem dos NEOs, com base em classificações obtidas utilizando filtros do sistema SDSS (g' , r' , i' , z') tanto os obtidos de Hasselmann et al. (2020) quanto os aqui determinados. A análise é semelhante a da seção 3.1, onde usamos os agrupamentos de classes taxonômicas A e B. A ideia é mostrar se existem diferenças nessas distribuições, como feito nas seções anteriores.

3.2.1 Comparação entre NEO e diferentes populações de asteroides

Nas figuras 3.18 e 3.19 são mostradas, respectivamente, as distribuições utilizando os agrupamentos de classes taxonômicas A e B, conforme dado na tabela 3.1. Esses gráficos foram produzidos utilizando todos os diâmetros e na tabela 3.7 é dado tanto o número de objetos em cada região quanto a quantidade de objetos que têm diâmetro determinado ou estimado. No primeiro caso são objetos com diâmetro obtido a partir de albedo determinado enquanto no segundo foi utilizado o albedo médio da classe taxonômica, conforme dado na tabela 2.1 e que tem incertezas devido às diferentes taxonomias utilizadas para classificar os espectros. O primeiro ponto a destacar é que o número de objetos classificados é mais de 16 vezes maior do que o número de objetos classificados utilizando dados espectrais. Entretanto, nota-se uma diminuição significativa no número de NEOs classificados, apenas 85, comparado com os 1089 utilizando dados espectroscópicos (figura 3.4). O maior aumento no número de asteroides classificados se dá no Cinturão Principal, cerca de

25 vezes. Vale também notar que, com exceção das regiões dos Phocaea, do cinturão externo e da região além de 3.26 UA, existem mais objetos com diâmetro estimado do que com diâmetro determinado. Por fim, conforme já mencionado, é importante lembrar que os espectros obtidos a partir de cores SDSS tem menor resolução, já que baseados em apenas 4 pontos. O que torna esse conjunto interessante é o tamanho da amostra o que pode evidenciar tendências não observadas no pequeno (relativamente) conjunto de dados espectroscópicos.

Tabela 3.7: *Número de objetos de todos os diâmetros, por região, que contêm classificação taxonômica e a quantidade de objetos que contêm diâmetros determinados e estimados.*

População	Número de objetos	Número de objetos com diâmetro determinado	Número de objetos com diâmetro estimado
NEOs	85	37	48
Mars-Crossers	536	77	459
Hungaria	605	77	528
Phocaea	413	250	163
Cinturão Interno	20111	6338	13773
Cinturão Intermediário	22686	8673	14013
Cinturão Externo	17971	10419	7552
Objetos com $a > 3.26$ UA	578	382	196

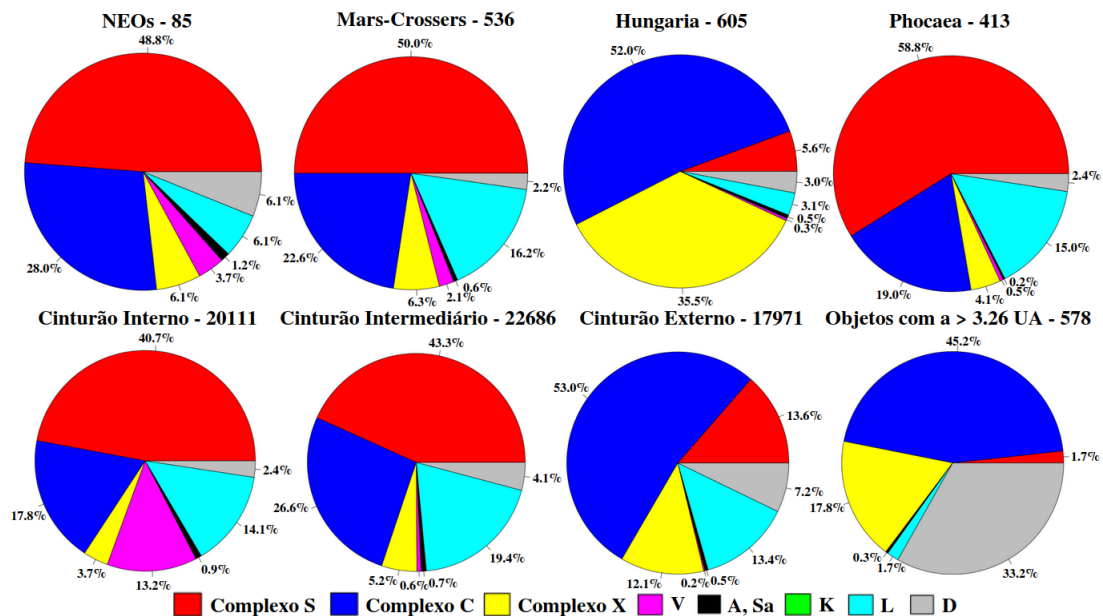


Figura 3.18: *Distribuição das classes taxonômicas de acordo com o agrupamento A (DeMeo et al. 2009) para objetos de todos os tamanhos. As cores indicam as diferentes classes conforme indicado na legenda abaixo.*

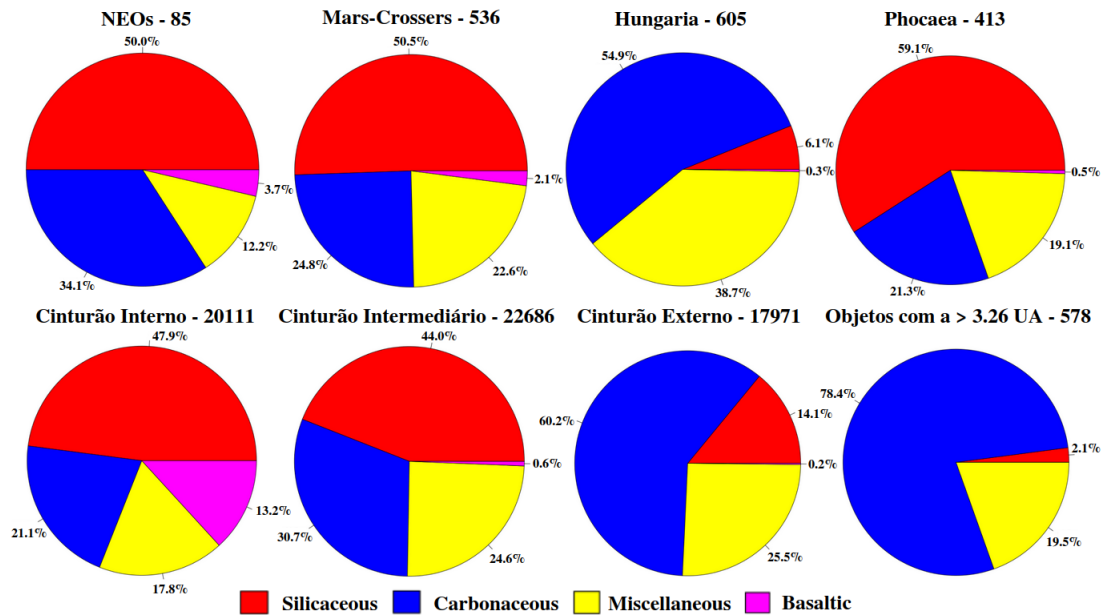


Figura 3.19: Distribuição das classes taxonômicas de acordo com o agrupamento B (Perna et al. 2016) para objetos de todos os tamanhos. As cores indicam as diferentes classes conforme indicado na legenda abaixo.

Nas figuras 3.18 e 3.19 são mostradas as distribuições em termos dos principais complexos. Conforme pode ser visto, entre os NEOs e Mars-Crossers cerca de metade dos objetos classificados fazem parte do complexo S, ou seja, material silicato. É de ser notado que nessas populações, em termos percentuais, as distribuições são similares quanto aos grandes complexos, com a única exceção da classe L. O mesmo, é observado no grupo dos Phocaea. Essa mesma tendência já tinha sido observada com os dados espectroscópicos (figuras 3.1 e 3.2). No entanto, para dados espectrais o número de NEOs é cerca de 9 e 20 vezes maior do que os Mars-Crossers e Phocaea, respectivamente. Já com dados fotométricos o número de NEOs é cerca de 7 e 5 vezes menor do que os Mars-Crossers e Phocaea, respectivamente.

Em relação às distribuições no Cinturão Principal nota-se que na região interna o percentual de objetos do complexo S é parecido, embora um pouco menor, que dos NEOs e Mars-Crossers. Esse percentual vai diminuindo sistematicamente nas regiões intermediária e externa chegando a apenas 1.7% na região além de 3.26 UA. Ao mesmo tempo nessas regiões vai crescendo o percentual de objetos do complexo C chegando a mais do que 50% no cinturão externo. Todas essas distribuições seguem as tendências já mostradas com os dados espectroscópicos. Apenas no caso do grupo dos Hungaria existe uma grande discrepância: os dados espectroscópicos mostram a predominância de objetos dos complexos S e X com apenas uma pequena percentagem do complexo C, enquanto aqui o complexo C é o que representa mais do que 50% da amostra. Explicar essa discrepância não é simples, principalmente considerando que se trata de amostras com tamanho muito diferente: 53 contra 605

objetos. De qualquer forma, essa discrepância merece um estudo mais aprofundado para ser compreendida.

A classe taxonômica L apresenta-se em grande quantidade na região dos Mars-Crossers, Phocaea e nas três regiões do Cinturão Principal, quando comparada com as demais classes. As únicas exceções sendo a classe V no cinturão interno, devido claramente à presença da família de Vesta, e a classe D na região além do cinturão externo. Por fim, é importante salientar de que as distribuições dadas na figura 3.19, embora mais simples, são mais difíceis de serem interpretadas em termos composicionais devido à grande mistura na classe denominada de “miscellaneous”. Embora seja importante aqui lembrar de que ambos os esquemas sofrem do problema de que não há, em geral, uma relação unívoca entre classe e composição.

Na tabela 3.8 é dado o número de objetos com diâmetro, determinado ou estimado, menor do que 10 km nas diversas populações ou regiões aqui analisadas. É importante notar que, assim como visto na tabela 3.3, a quantidade de NEOs praticamente não muda, já que a população é composta por objetos pequenos e, que por estarem próximos da Terra, possíveis de serem observados. Por outro lado, apesar da tendência observacional dificultando a observação dos menores objetos (de mesma composição!) mais distantes da Terra, não há quase redução em relação ao número total. As distribuições de classes taxonômicas podem ser vistas nas figuras 3.20 e 3.21. Apesar de pequenas variações nos percentuais essas figuras não diferem das anteriores, claramente devido ao fato de as amostras serem essencialmente iguais.

Tabela 3.8: *Número de objetos para a faixa de diâmetro 0 km - 10 km, por região, que contêm classificação taxonômica e a quantidade de objetos que contêm diâmetros determinados e estimados.*

População	Número de objetos	Número de objetos com diâmetro determinado	Número de objetos com diâmetro estimado
NEOs	85	37	48
Mars-Crossers	534	76	458
Hungaria	605	77	528
Phocaea	407	244	163
Cinturão Interno	20022	6250	13772
Cinturão Intermediário	22232	8224	14008
Cinturão Externo	16206	8710	7496
Objetos com $a > 3.26$ UA	360	182	178

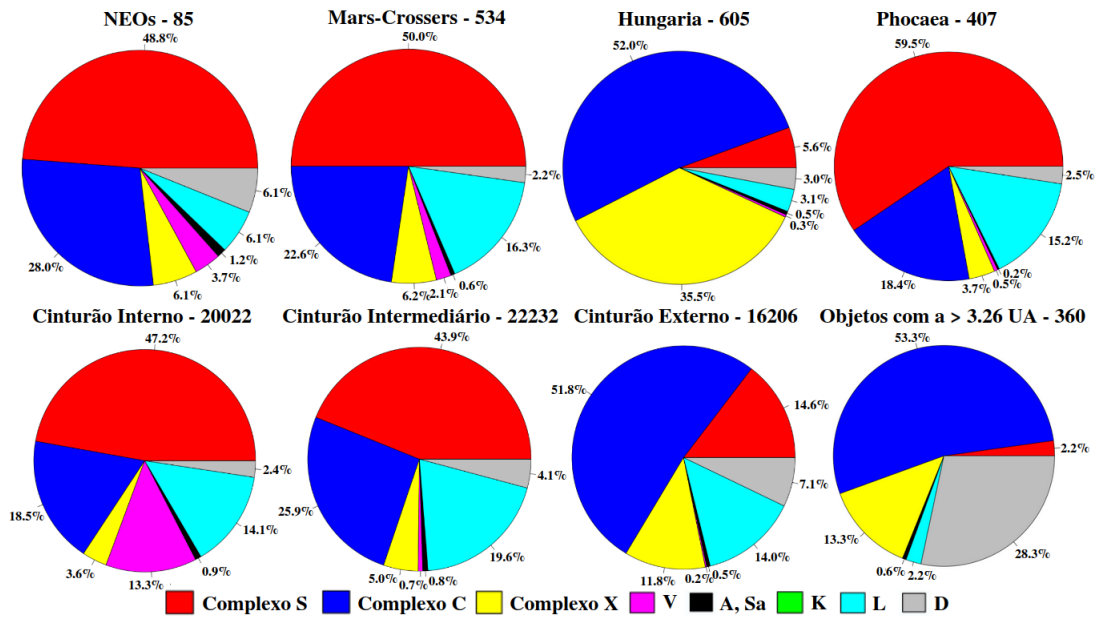


Figura 3.20: Distribuição das classes taxonômicas de acordo com o agrupamento A (DeMeo et al. 2009) para objetos com diâmetro menor do que 10 km. As cores indicam as diferentes classes conforme indicado na legenda abaixo.

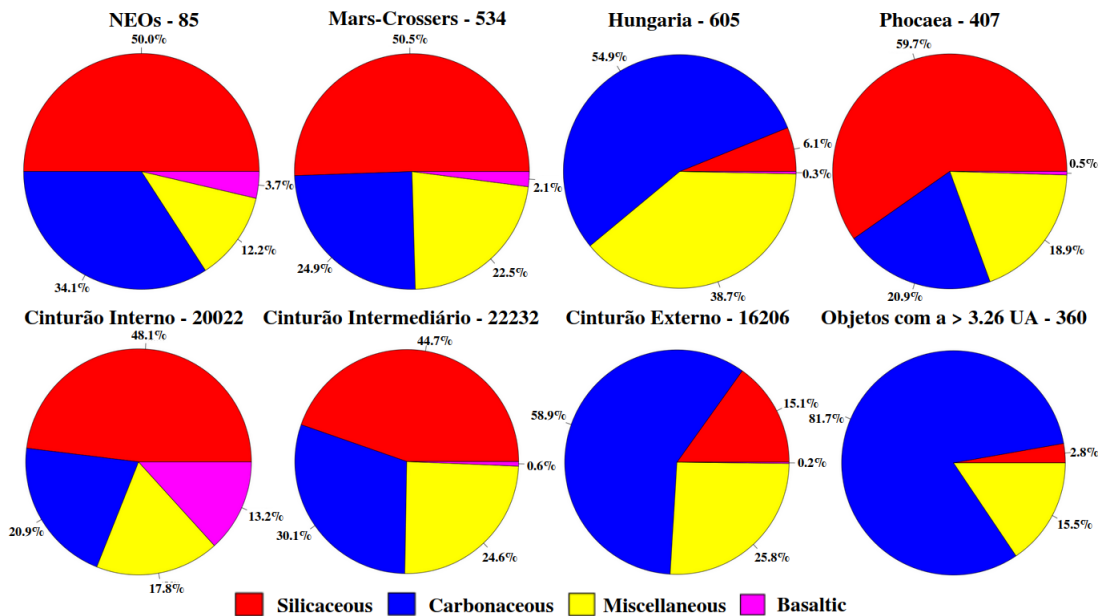


Figura 3.21: Distribuição das classes taxonômicas de acordo com o agrupamento B (Perna et al. 2016) para objetos com diâmetro menor do que 10 km. As cores indicam as diferentes classes conforme indicado na legenda abaixo.

Para a faixa de diâmetro entre 0 e 5 km a tabela 3.9 mostra que a população de NEOs e o grupo Hungaria permanece com quase a mesma quantidade de objetos. Já os Mars-Crossers e o grupo Phocaea apresentam uma redução de 5.3% e 12.6%, respectivamente. Em relação às regiões do Cinturão Principal, há uma redução significativa na quantidade de objetos, principalmente na região do cinturão externo e na região além do Cinturão Principal, que reduziram em 46.8% e 81.8%, respectivamente. Já as regiões interna e média do Cinturão Principal tiveram reduções pequenas de apenas 4.7% e 14.2%.

Nas figuras 3.22 e 3.23 mostramos as distribuições obtidas para todas as regiões. Novamente é possível notar que não houve mudanças significativa nas distribuições, assim como na faixa de tamanhos anterior. Isso, obviamente, se deve ao fato de que as amostras não mudaram de forma significativa. Quando comparados os percentuais dos complexos S e C para as diversas regiões e populações se nota apenas um ligeiro aumento dos S nos menores objetos, o que é esperado devido à tendência que favorece a observação de objetos com maior albedo.

Tabela 3.9: *Número de objetos para a faixa de diâmetro 0 km - 5 km, por região, que contém classificação taxonômica e a quantidade de objetos que contém diâmetros determinados e estimados.*

População	Número de objetos	Número de objetos com diâmetro determinado	Número de objetos com diâmetro estimado
NEOs	83	35	48
Mars-Crossers	508	65	443
Hungaria	594	70	524
Phocaea	361	200	161
Cinturão Interno	19172	5489	13683
Cinturão Intermediário	19461	5768	13693
Cinturão Externo	9568	3053	6515
Objetos com $a > 3.26$ UA	105	9	96

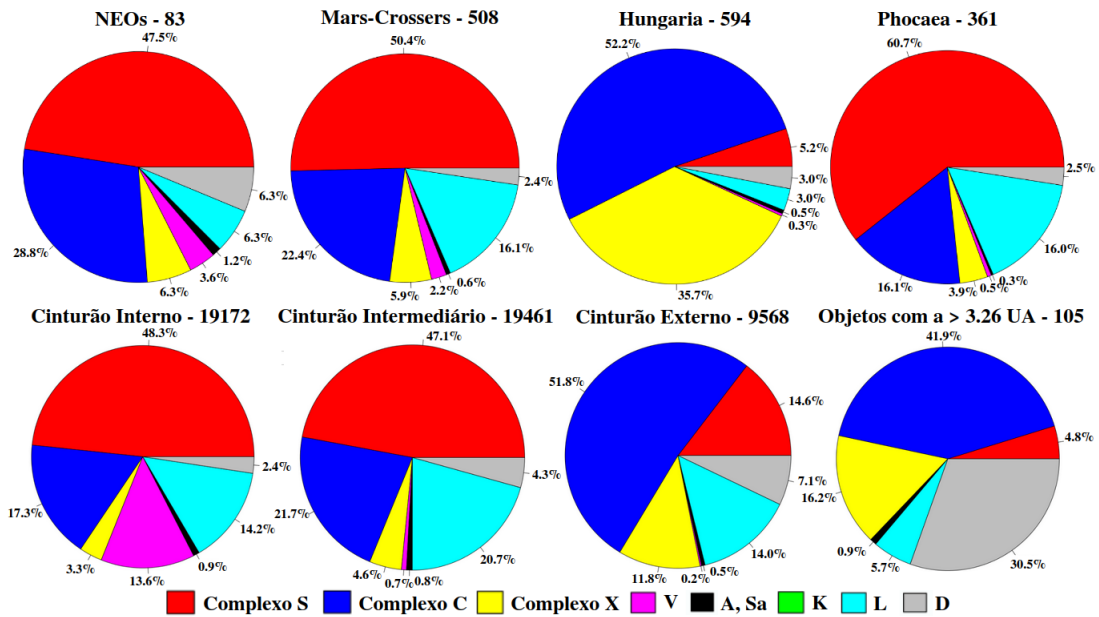


Figura 3.22: Distribuição das classes taxonômicas de acordo com o agrupamento A (DeMeo et al. 2009) para objetos com diâmetro menor do que 5 km. As cores indicam as diferentes classes conforme indicado na legenda abaixo.

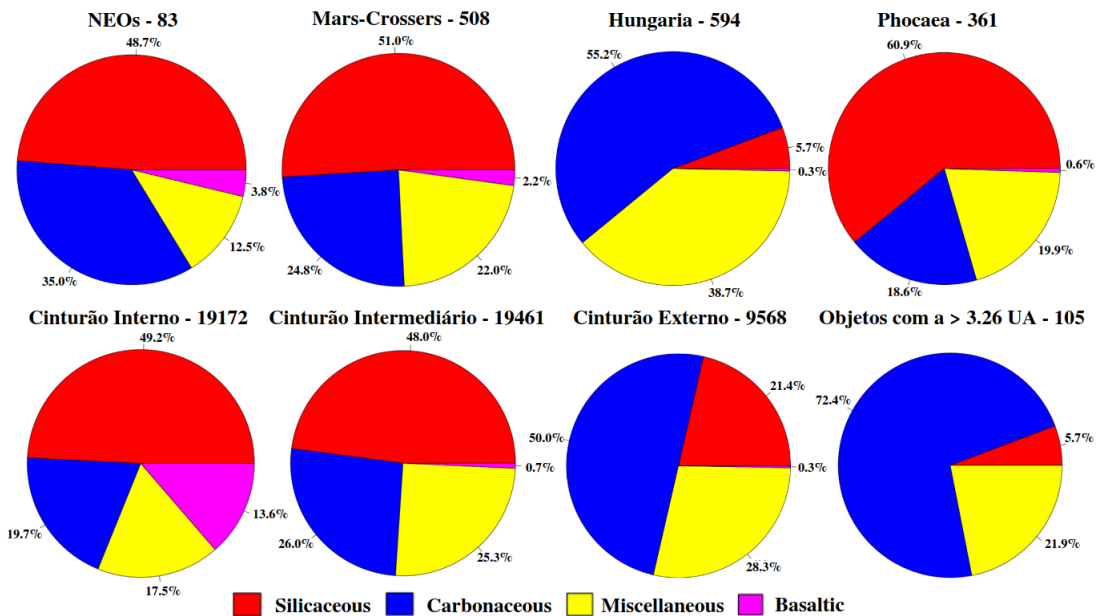


Figura 3.23: Distribuição das classes taxonômicas de acordo com o agrupamento B (Perna et al. 2016) para objetos com diâmetro menor do que 5 km. As cores indicam as diferentes classes conforme indicado na legenda abaixo.

3.2.2 Comparação entre NEOs e possíveis regiões de origem

Assim como fizemos na seção 3.2, vamos a seguir analisar e comparar as distribuições de classes em regiões consideradas como de possível origem dos NEOs.

As regiões são as mesmas já definidas anteriormente: a borda externa do cinturão interno, a borda interna do cinturão intermediário e a região próxima à ressonância secular ν_6 .

Borda externa do cinturão interno

As figuras 3.24 e 3.25 mostram a distribuição de classes taxonômica na borda externa no cinturão interno. As figuras indicam que, comparativamente, pelo menos em relação ao grande complexos, as duas regiões são semelhantes para qualquer faixa de diâmetro. Apenas o complexo C tem um percentual relativamente menor na borda externa, e isso se torna mais visível para objetos com diâmetros < 5 km. Entretanto, quando comparamos essas distribuições com aquelas obtidas com dados espectroscópicos (figuras 3.10 e 3.11), notamos uma grande diferença tanto na borda externa quanto nos NEOs. No caso dos dados espectroscópicos da borda externa, o complexo C dominava a distribuição, em todas as faixas de diâmetros, com apenas uma pequena contribuição do complexo S. O contrário ocorre com os dados espectrofotométricos. No caso dos NEOs, embora o complexo S domine em ambas as distribuições o percentual é muito maior (mais de 60%) nos dados espectroscópicos. Obviamente, o número de objetos nas diversas amostras podem ser responsáveis pelas discrepâncias observadas. Enquanto os NEOs diminuem de mais 1000 objetos com classificação a partir de espectros para apenas 85 com cores, o inverso ocorre na borda externa do Cinturão Principal passando de 300 para quase 5000. Se considerarmos as maiores amostras, espectros de NEOs e cores da borda externa, então as duas regiões apresentam o mesmo predomínio do complexo S, apenas com uma percentagem maior no caso dos NEOs.

Um outro ponto importante a ser ressaltado no caso dos objetos da região próxima à borda externa, é de que os dados espectrofotométricos, particularmente os do SDSS, não contém tendências na seleção de objetos. Por serem resultantes de um mapeamento representam melhor a região do que os dados espectroscópicos. Conforme mencionado na seção 3.2.1, no caso dos espectros estudos de famílias “escuras” na região interna do Cinturão Principal podem ter influenciado as distribuições apresentadas.

Em relação às demais classes taxonômicas, é notável o grande percentual de objetos das classes V e L, tanto na borda externa do cinturão interno quanto no caso dos NEOs. No caso dos tipo V, isso certamente se deve à proximidade da família de Vesta, enquanto a presença de tantos objetos do tipo L é mais difícil de ser explicado. É de ser notado, que no caso dos espectros, as percentagens de objetos dessa classe são bem reduzidas tanto entre os NEOs quanto na borda externa. Isso pode ser uma indicação de que a menor resolução dos espectros obtidos das cores SDSS podem levar a uma classificação menos precisa.

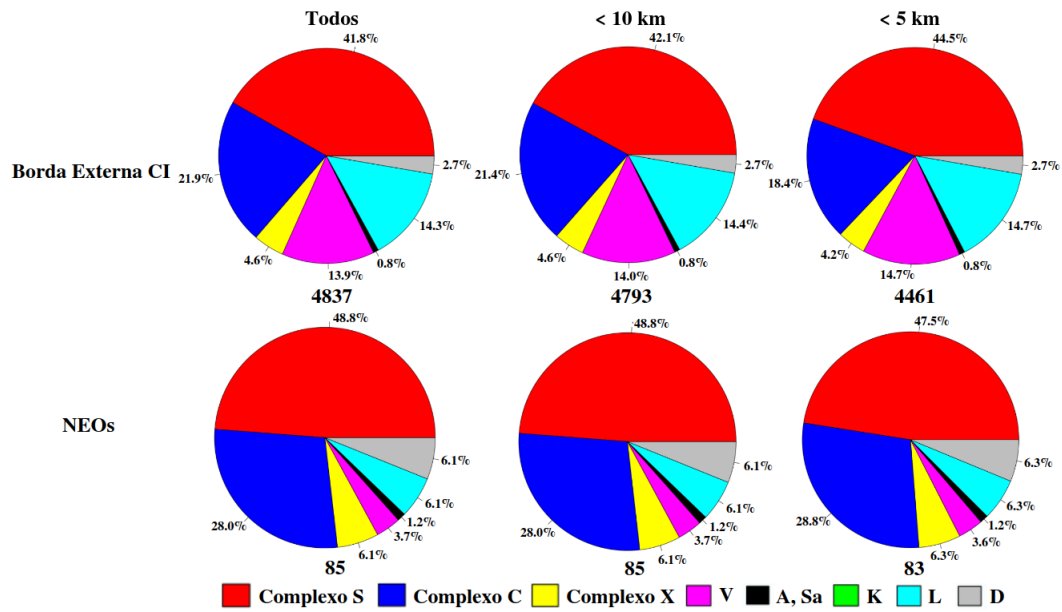


Figura 3.24: Distribuição de classes taxonômicas na borda externa do cinturão interno e na população dos NEOs, para diferentes faixas de diâmetro e utilizando o agrupamento A (DeMeo et al. 2009). Para cada faixa de tamanho é dado número de objetos considerados.

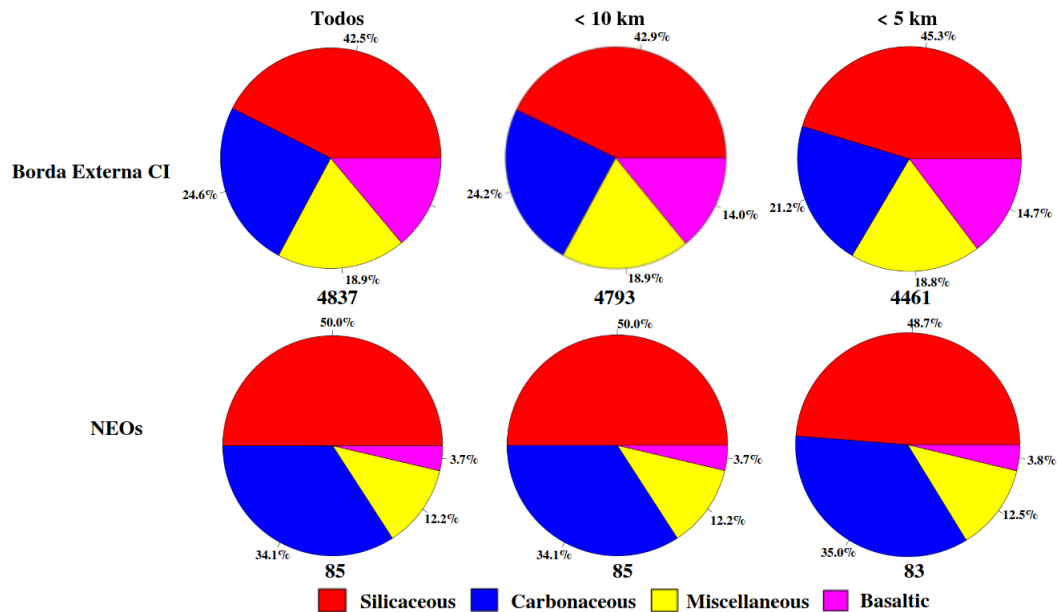


Figura 3.25: Distribuição de classes taxonômicas na borda externa do cinturão interno e na população dos NEOs, para diferentes faixas de diâmetro e utilizando o agrupamento B (Perna et al. 2016). Para cada faixa de tamanho é dado número de objetos considerados.

Borda interna do cinturão intermediário

Em relação à borda externa do cinturão intermediário, as figuras 3.26 e 3.27 mostram a distribuição nessa região e sua comparação com a população do NEOs. Nas

figuras, é possível perceber que, assim como na borda externa do cinturão interno, o complexo S é o que tem maior percentual, o que também é visto na população dos NEOs. Esse percentual permanece praticamente inalterado nas diferentes faixas de diâmetro, devido à pouca diferença no tamanho das amostras. Em comparação com as distribuições de dados espectroscópicos (figuras 3.13 e 3.14) no caso da borda do cinturão intermediário além da grande diferença em tamanho da amostra, apenas 142 objetos contra os mais de 7 mil aqui, é interessante notar que o percentual de objetos do complexo C se mantém no mesmo valor, cerca de 16%. Mas no caso dos dados espectrofotométricos a classe L é a que tem uma percentagem maior em relação ao complexo C. Isso não ocorre com os dados de espectros. Novamente, ou os espectros não conseguem identificar corretamente objetos da classe L, ou então a baixa resolução dos espectros obtidos a partir das quatro cores do SDSS está favorecendo a classificação em tipo L. Isso é um ponto que merece um estudo mais aprofundado, mas que foge ao escopo do presente trabalho.

No caso dos NEOs as distribuições com dados espectroscópicos e espectrofotométricos apresentam apenas diferenças em termos de percentagens que podem ser atribuídas essencialmente a dois fatores: primeiro, a falta de correção da tendência observacional que favorece os objetos de maior albedo, no caso, do complexo S e, em segundo, a baixa resolução dos espectros obtidos das cores SDSS o que pode levar à classificação como do complexo C objetos que apresentam bandas suprimidas. Esse fato foi identificado inicialmente em relação aos objetos da família de Baptistina (Carvano and Lazzaro 2010, Reddy et al. 2011) mas pode estar afetando também as distribuições aqui apresentadas.

Quando considerada a classificação B (Tabela 3.1) notamos que as distribuições da borda interna e dos NEOs é muito similar, com uma percentagem ligeiramente maior de composições “silicaceous” na borda interna. Isso para todas as faixas de diâmetro. Também é de se notar que nessa região os objetos “carbonaceous” tem uma percentagem menor do que os “miscellaneous”, ao contrário dos NEOs. No caso dos dados espectroscópicos (figura 3.13) isso só ocorria para os objetos menores do que 10 km, quanto, entretanto, a amostra se torna extremamente pequena (apenas 35 objetos) para ter significado estatístico. Nesse ponto vale salientar, entretanto, que os dados fotométricos, os que permitem estudar objetos menores, mostra exatamente a tendência observada com os dados espectroscópicos, ou seja, que nos objetos menores da borda interna a mistura de composições, representada pela classe “miscellaneous” se torna predominante em relação aos “carbonaceous”. Obviamente, apenas o aumento no número de espectros de objetos nesta região poderá esclarecer se essa tendência é real ou apenas consequência de aglomerações fortuitas e sem significado composicional.

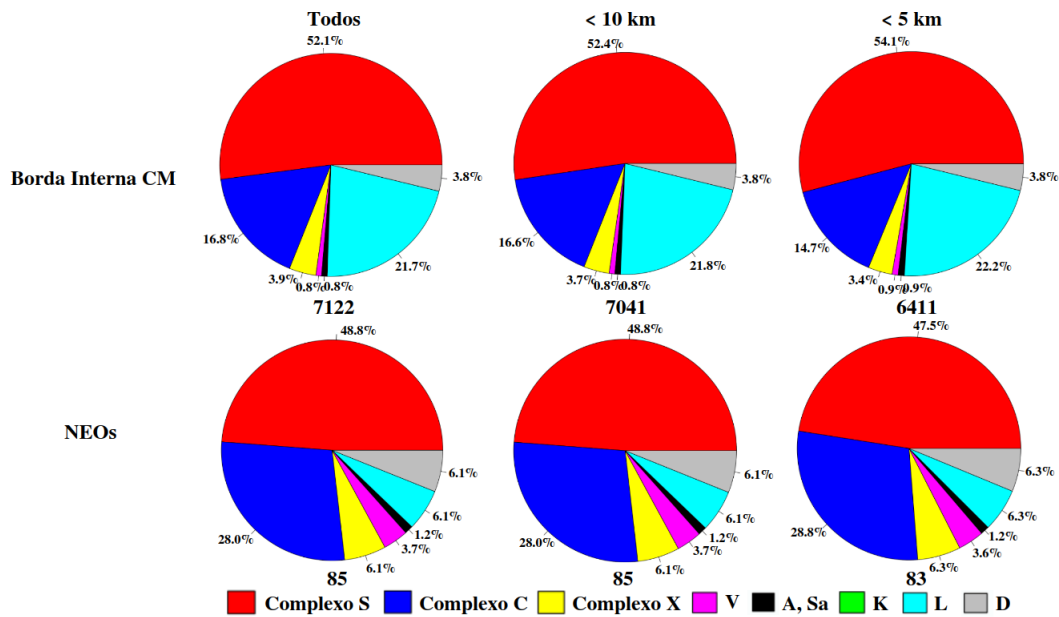


Figura 3.26: Distribuição de classes taxonômicas na borda externa do cinturão interno e na população dos NEOs, para diferentes faixas de diâmetro e utilizando o agrupamento A (DeMeo et al. 2009). Para cada faixa de tamanho é dado número de objetos considerados.

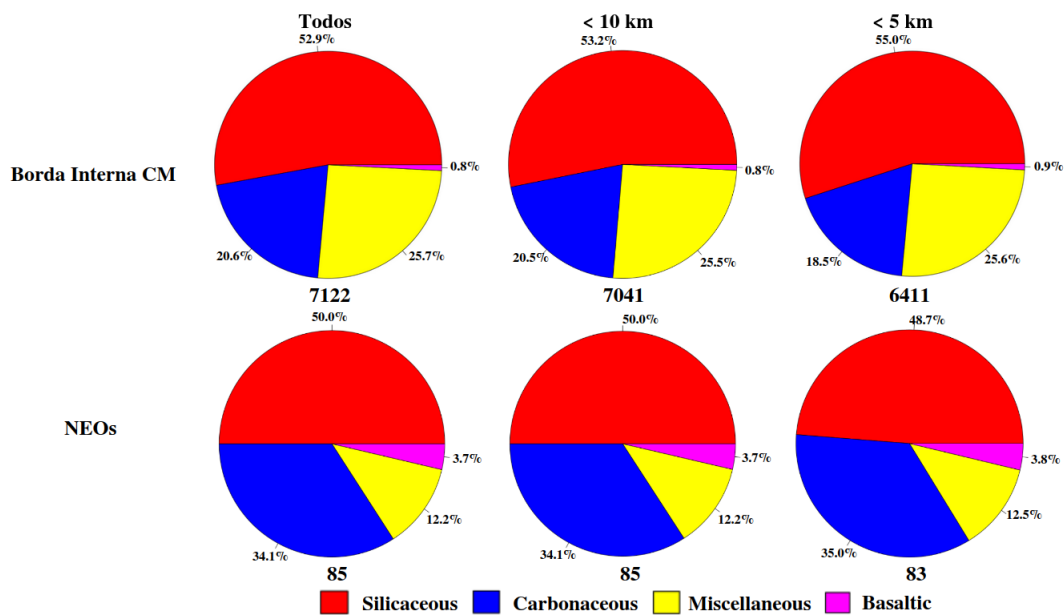


Figura 3.27: Distribuição de classes taxonômicas na borda interna do cinturão intermediário e na população dos NEOs, para diferentes faixas de diâmetro e utilizando o agrupamento B (Perna et al. 2016). Para cada faixa de tamanho é dado número de objetos considerados.

Região próxima à ressonância secular ν_6

Para estudar a distribuição de composições de objetos próximos da ressonância secular ν_6 , utilizamos a mesma faixa já definida na sessão 3.1.2 e mostrada esquematicamente na figura 3.15.

Conforme podemos ver nas figuras 3.28 e 3.29 na região temos 1333 objetos com classificação taxonômica contra apenas 85 NEOs. Entretanto, para ambas as regiões a maioria é de pequenos corpos, ou seja, são bem compatíveis em termos de diâmetro. A principal diferença nas distribuições está no número maior de objetos do complexo C entre os NEOs do que na borda da ressonância. Por outro lado, na borda da ressonância existe uma proporção maior de objetos da classe L, 17%, contra apenas 6% entre os NEOs. Esse fato é mais claramente visível quando utilizamos a classificação B (figura 3.29) onde na borda interna temos menos objetos carbonaceous e mais basaltic e miscellaneous do que entre os NEOs. Isso pode ser consequência da presença de três famílias importantes na região próxima da ressonância, Flora, Baptistina e Vesta. Todas tendo sido alvos de estudos sistemáticos. De qualquer forma, as diferenças não são de ordem tal a inviabilizar essa região como origem dos NEOs, muito pelo contrário. Uma vez corrigidas todas as tendências existentes nas amostras muito provavelmente as duas distribuições devem se mostrar muito similares confirmando a possível origem da maioria dos NEOs através da ressonância ν_6 .

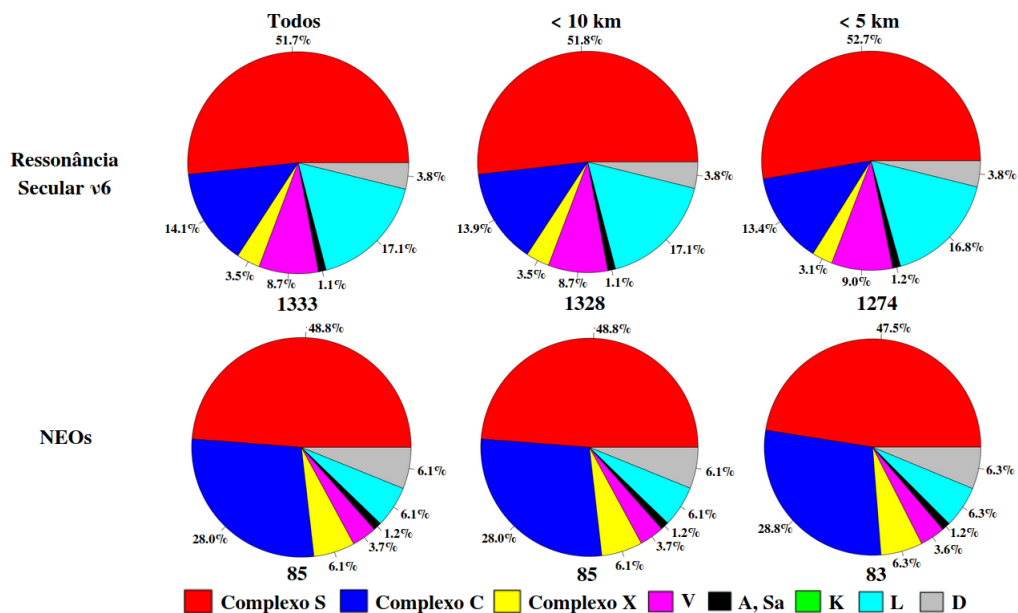


Figura 3.28: Distribuição de classes taxonômicas próximo da ressonância secular ν_6 e na população dos NEOs, para diferentes faixas de diâmetro e utilizando o agrupamento A (DeMeo et al. 2009). Para cada faixa de tamanho é dado número de objetos considerados.

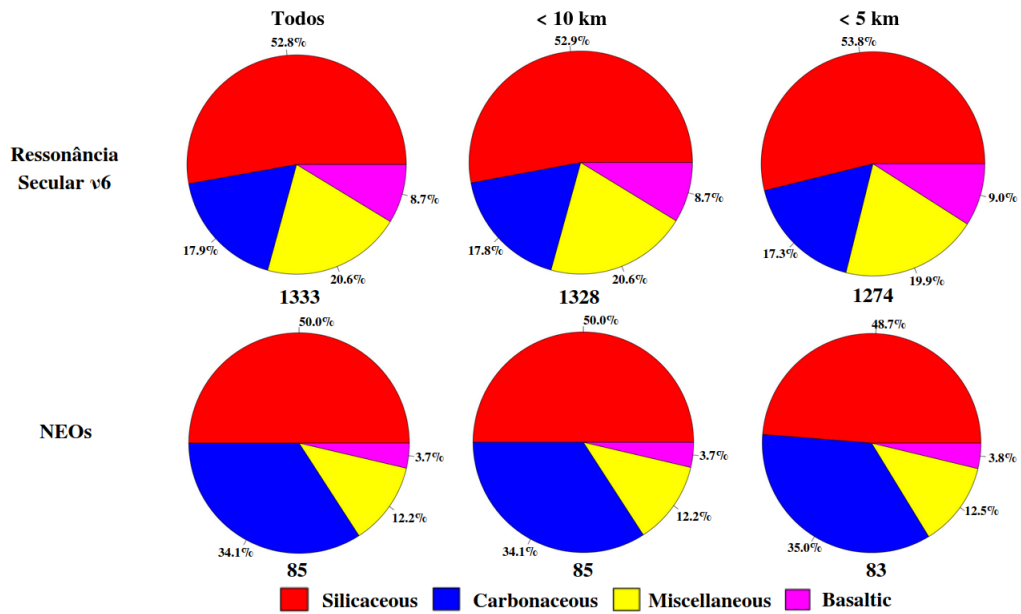


Figura 3.29: Distribuição de classes taxonômicas próximo da ressonância secular ν_6 e na população dos NEOs, para diferentes faixas de diâmetro e utilizando o agrupamento B (Perna et al. 2016). Para cada faixa de tamanho é dado número de objetos considerados.

Capítulo 4

Conclusões e perspectivas futuras

No presente trabalho realizamos um estudo visando melhor entender a origem dos NEOs utilizando a distribuição de composições superficiais, ou classes taxonômicas, destes em comparação com as de diversas populações de asteroides do Cinturão Principal. Foram utilizados majoritariamente dados obtidos da literatura assim como de alguns NEOs, sem prévia classificação taxonômica, obtidos a partir de observações realizadas no OASI.

O estudo foi desenvolvido utilizando dois conjuntos de dados: os espectroscópicos, obtidos integralmente da literatura, e os espectrofotométricos, a maior parte resultantes do grande mapeamento fotométrico SDSS e 3 obtidos dentro do presente projeto. Para simplificar, no que segue, usaremos a sigla EE, para os dados espectroscópicos, e EF para os dados espectrofotométricos. A análise e comparação das distribuições de classes taxonômicas foi realizada separadamente para cada conjunto de dados, isso porque as amostras são bem distintas em diversos aspectos, em particular:

- Tamanho, em termos de número de objetos: cerca de 4 mil EE contra 63 mil EF. Conforme pode ser visto na tabela 4.1 é notável de que para todas as populações/regiões analisadas os dados EF têm da ordem de 10 vezes mais objetos do que os EE, com a única exceção dos NEOs, onde ocorre o contrário. Notar que na tabela os valores dados na primeira linha se referem ao total de cada amostra e não à soma das populações e regiões estudadas.
- Tamanho, em termos de diâmetro dos objetos. No caso dos dados EE, com exceção dos NEOs, em sua grande maioria são de objetos com diâmetro maior do que 5 km. Então quando comparamos a distribuição de composições de NEOs e outras populações do Cinturão Principal estamos, em geral, analisando objetos de tamanhos distintos ou então a distribuição não tem significado estatístico por tratar-se de pequenos números. No caso dos dados EF, estes

são essencialmente para objetos de tamanhos menores, o que permite uma análise de se e como o tamanho influencia as distribuições.

Tabela 4.1: *Para as diferentes populações e regiões analisadas é dado o número de objetos com classificação taxonômica a partir de dados espectroscópicos e espectrofotométricos.*

Tipos de dados Diâmetros	Espectroscópicos		Espectrofotométricos	
	Todos	$D \leq 5$ km	Todos	$D \leq 5$ km
Total da amostra	3893	1561	62985	49852
NEOs	1108	1089	82+3	80+3
Mars Crossers	123	59	536	508
Hungaria	53	34	605	594
Phocaea	54	1	413	361
Cinturão Interno (CI)	1052	366	20111	19172
Cinturão Intermediário (CM)	822	7	22686	19461
Cinturão Externo (CE)	587	1	17971	9568
Objetos com $a > 3.2$ UA	94	4	578	105
Borda externa CI	321	109	4837	4461
Borda interna CM	142	2	7122	6411
Ressonância $\nu 6$	83	31	1333	1274

- Resolução dos dados. Os dados EE apresentam uma grande cobertura na região entre $0.3 - 1.0 \mu\text{m}$, facilitando sua classificação taxonômica. Mesmo os espectros do mapeamento ECAS, embora formalmente obtidos a partir de cores, tem boa cobertura pois são 9 filtros e com comprimento de onda central nos pontos mais relevantes para as principais composições presentes em objetos do Sistema Solar. Isso torna o espectro similar aos obtidos com espectrógrafos CCD de mapeamentos como o SMASS (Bus and Binzel 2002) ou o S3OS2 (Lazzaro et al. 2004). O mesmo não ocorre com os dados do SDSS, pois neste caso são apenas 5 filtros, e cujo comprimento de onda central não é o mais adequado para asteroides (ver definição na seção 2.2.4). Esse fato leva naturalmente a uma maior incerteza numa classificação taxonômica obtida a partir de espectros.
- Seleção da amostra. Os dados EE são, em geral, resultantes de estudos específicos de grupos, regiões ou famílias enquanto os dados EF são resultantes de um mapeamento “aleatório” de objetos. É importante lembrar, que o SDSS foi um mapeamento voltado para o estudo de objetos fixos, em particular galáxias, e os asteroides apenas foram objetos que “apareceram” nos campos estudados. Logo, os asteroides observados o foram de forma aleatória permi-

tindo assim obter um grande conjunto de dados sem tendências na seleção dos objetos.

No que segue, vamos resumir os principais resultados obtidos realizando uma análise comparativa entre algumas das distribuições obtidas com dados EE e EF, sempre à luz das diferenças nas amostras mencionadas acima, além da tendência observacional de se observar preferencialmente objetos de maior albedo e da predominância de objetos escuros nas partes externas do Cinturão Principal.

Total de objetos - As distribuições, dadas nas figuras 3.1 e 3.17, apresentam, em geral, apenas diferenças nas percentagens das classes predominantes, os complexos S e C. Por outro lado, a maior diferença surge quando comparamos a distribuição dos NEOs com às das demais populações do Cinturão Principal. No caso dos dados EE, essas distribuições não se assemelham, tendo uma percentagem muito maior de objetos do complexo S nos NEOs e uma proporção quase similar de objetos dos complexos S e C no cinturão interno e intermediários. Este resultado favoreceria a interpretação de que os NEOs não provêm dessas regiões. Por outro lado, quando analisamos as distribuições com dados EF, diminui a percentagem de objetos do complexo S entre os NEOs enquanto aumenta no cinturão interno e intermediário. Isso torna as distribuições mais similares implicando que os NEOs podem sim ser originários dessas regiões do Cinturão Principal.

Um ponto interessante é de que os NEOs e Mars Crossers apresentam percentagens similares entre si, seja com dados EE quanto EF, embora o valor para objetos do complexo S seja maior nos EF, chegando a 60-70% enquanto apenas 50% nos EE. Considerando o pequeno número de NEOs com dados EF, podemos então utilizar a distribuição dos Mars Crossers (EF) como “espelho” dos NEOs, representando a real distribuição dos NEOs. Nesse caso teríamos cerca de 50% de objetos do complexo S e 22% do complexo C. Essas percentagens são bem similares às do cinturão interno e intermediário, tornando-os prováveis regiões de origem dos NEOs. No caso das distribuições com dados EF, outro ponto a ser ressaltado é a grande quantidade de objetos da classe L. Com dados EE objetos desta classe têm pequenas percentagens, chegando a um máximo de 5% no cinturão intermediário. Por outro lado, nota-se, em geral, que um aumento na percentagem de objetos da classe L corresponde a uma diminuição na de objetos do complexo X, quando comparamos as distribuições EE e EF. Isso poderia indicar que a baixa resolução dos espectros EF tende a classificar objetos como da classe L enquanto os espectros indicariam pertencer ao complexo X. Obviamente, é necessário um estudo mais aprofundado para entender a origem dessa discrepância.

Por fim, existe uma grande discrepância nas distribuições do grupo dos Hungaria. Nos dados EE as maiores percentagens são nos complexos X, S e C, com valores aproximadamente de 54, 34 e 5, respectivamente. Nos dados EF, essas mesmas per-

centagens são 37, 5 e 53. Em vista do tamanho das duas amostras, e considerando o pequeno tamanho daquela obtida com dados EF podemos especular que a distribuição com dados EE representaria a dos maiores objetos, e que mudaria para a observada com dados EF para os corpos menores. Essa hipótese será discutida mais em detalhe na próxima sessão.

Menores objetos - As figuras 3.5 e 3.22 mostram as distribuições das diversas populações quando restringirmos ambas as amostras aos menores objetos, ou seja, com diâmetro igual ou menor a 5 km. Entretanto, é importante ser ressaltado que no caso dos dados EE uma análise comparativa somente pode ser realizada entre os NEOs, Mars-Crossers, Hungaria e Cinturão Interno já que para as demais regiões o número de corpos classificados é insignificante. Quanto ao grupo dos Hungaria embora ambas as distribuições sejam de objetos com mesmo tamanho as diferenças continuam, assim como ocorre com a amostra total. Logo essa discrepância somente pode ser atribuída à tendência de observar objetos de maior albedo no caso dos dados EE e ao pequeno tamanho da amostra (apenas 34 objetos). É de ser ressaltado que dentro do complexo X temos objetos com alto, médio e baixo albedo. Logo, no caso dos espectros, apenas os de alto albedo como o próprio (434) Hungaria teriam sido observados.

No que tange às outras populações notamos as mesmas diferenças já observadas na distribuição do total dos dados. Existe uma clara predominância de objetos do complexo S (maior albedo) nos NEOs e Mars-Crossers, e do complexo C no cinturão interno nas distribuições com dados EE. Por outro lado, nos dados EF as distribuições dessas três populações são, novamente, bem similares. A diferença nas distribuições dos NEOs pode estar associada ao tamanho das amostras, assim como à tendência de observar objetos mais brilhantes. Conforme foi mostrado na sessão 3.1 (figura 3.8), existe uma clara diminuição na percentagem de objetos do complexo S, e aumento do complexo C, entre os NEOs para os menores tamanhos. A diferença nas distribuições do cinturão interno, por outro lado, deve estar associada ao fato de apenas os dados EF serem uma amostra sem tendências e, desta forma, mais representativa da região. Obviamente, apenas um estudo detalhado das diversas tendências nas várias populações pode esclarecer a origem das discrepâncias observadas.

Regiões de possível origem dos NEOs - No caso da região próxima à borda externa do cinturão interno (figuras 3.10 e 3.24), ou seja, à esquerda da ressonância de movimentos médios 3:1 com Júpiter, a comparação com a distribuição de classes taxonômicas nos NEOs mostra diferenças expressivas no caso dos dados EE e pequenas com EF. No primeiro caso, podemos atribuir as diferenças, ou seja, maioria de objetos do complexo S, nos NEOs, e do complexo C, na borda externa, à presença de diversas famílias de objetos escuros na região. Isso, associado ao estudo

específico destas famílias (por exemplo Morate et al. 2018, Morate et al. 2019) tornando a amostra altamente enviesada. No caso dos dados EF, as distribuições são mais similares, com a maioria dos objetos sendo do complexo S, entre 41 e 49%, na borda externa e nos NEOs, respectivamente. Para o complexo C os valores variam entre cerca de 20% na borda externa e 30% entre os NEOs.

O que chama a atenção é a grande quantidade de objetos da classe V na borda externa, tanto nos dados EE quanto EF, claramente devido à presença da família de (4) Vesta. Entretanto, essas altas percentagens não são reproduzidas entre os NEOs, independentemente da amostra. Considerando também as pequenas diferenças observadas nos dados EF, isso tende a indicar que embora essa região possa ser a origem dos NEOs, não deve ser a principal fonte.

Quanto à região próxima à borda interna do cinturão intermediário (figuras 3.13 e 3.26), ou seja, à direita da ressonância 3:1, a comparação entre as distribuições utilizando as duas amostras se torna mais difícil devido ao pequeno número de objetos classificados com dados EE, em particular para os pequenos objetos, que são maioria entre os dados EF. A única comparação possível seria entre os objetos maiores do 10km, mas nesse caso temos apenas 35 objetos classificados com dados EE, contra os mais de 7 mil dos EF. Entretanto, comparando a distribuição nessa faixa de tamanho para os NEOs-EE e a borda interna EF, existe uma maior percentagem da classe S entre os primeiros.

Novamente, também temos uma fração muito grande, da ordem de 22%, de objetos classificados como L com dados EF, inclusive superior aos do complexo C, que são menos do que 17%. E isso não é reproduzido na distribuição de NEOs com dados EF. De forma geral, entretanto, assim como no caso da borda externa do cinturão interno, as diferenças não são tão grandes a descartar essa região como origem dos NEOs, mas não deve ser a principal fonte.

Por fim, as distribuições de composições na região próxima a ressonância secular com Saturno ν_6 , dadas nas figuras 3.16 e 3.28, mostram boa concordância com as dos NEOs, em particular com dados EF. No caso dos dados EE a comparação é dificultada pelo fato de os objetos próximos à ressonância serem, em sua maioria, de tamanho bem superior àquele dos NEOs. Por outro lado, a amostra se torna pequena demais quando restrita apenas aos corpos menores.

De forma geral, as distribuições com dados EE e EF mostram uma predominância de objetos do complexo S, apenas com uma maior percentagem no caso dos dados EE e, particularmente, entre os NEOs. Entre os dados EF nota-se uma grande quantidade de objetos das classes L e V, cerca de 17% e 10%, respectivamente, na região próxima à ressonância, e que não é reproduzida na população dos NEOs. Neste caso, o pequeno número de NEOs classificados pode ser a origem da diferença.

Os principais resultados deste trabalho podem ser resumidos como:

- Foi elaborada uma compilação atualizada de todas as classificações taxonômicas disponíveis na literatura;
- A partir desta lista atualizada foram computados novos valores médios do albedo para as diversas classes, de forma a poder ter uma estimativa mais confiável sobre o tamanho de objetos quem tem classificação taxonômica, mas não tem albedo determinado;
- Foram obtidos espectros fotométricos para 6 NEOs permitindo a classificação taxonômica para 3 destes;
- Foram analisadas as distribuições de classes taxonômicas de diversas regiões do Cinturão Principal e comparadas com a dos NEOs visando identificar as mais prováveis origens destes. Apesar dos resultados não serem conclusivos, é possível afirmar que tanto o cinturão interno como um todo, quanto as regiões próximas às ressonâncias de movimento médio 3:1 com Júpiter e secular ν_6 com Saturno, tem distribuições de composições similares sendo, portanto, possíveis fontes de NEOs e confirmando os resultados teóricos (Bottke et al. 2002a; Granvik et al. 2018);
- Foram detalhadas e discutidas as diferenças existentes entre as amostras das classificações taxonômicas obtidas a partir de dados espectroscópicos e espectrofotométricos e as tendências embutidas. O principal resultado sendo que as duas amostras, embora complementares em termos de tamanho dos objetos, precisam ser analisadas com cuidado.

É importante ressaltar que no presente estudo não foi realizada nenhuma correção da tendência que favorece a observação de objetos de maior albedo, ou seja, mais brilhantes. Essa tendência pode se tornar muito relevante, particularmente para objetos das regiões mais distantes. Também não foi corrigido o problema da grande tendência dos dados EE resultante de estudos dirigidos a classes, famílias e grupos. Por outro lado, embora o conjunto de dados EF não tenha essa tendência, o número de NEOs observados é muito pequeno. Isso é devido ao fato de que esses objetos são, em geral muito rápidos gerando “trilhas” nas imagens do mapeamento SDSS, não podendo ter suas magnitudes medidas. Uma forma de melhorar essa “falha” é aumentando o número de NEOs com cores SDSS utilizando telescópios como o OASI. Neste trabalho obtivemos espectros fotométricos para 6 NEOs obtendo a classificação taxonômica para 3 destes, embora sem realizar a correção pela amplitude da curva de luz rotacional. Cientes de todos esses problemas planejamos trabalhar neles no futuro, lembrando de que é objetivo do projeto IMPACTON colaborar no aumento dos NEOs com propriedades físicas conhecidas pois somente

desta forma poderemos obter conclusões robustas sobre a origem desta interessante população.

Referências Bibliográficas

- Alvarez, L. W., Alvarez, W., Asaro, F., and Michel, H. V. (1980). Extraterrestrial Cause for the Cretaceous-Tertiary Extinction. *Science*, 208:1095–1108.
- Alvarez-Candal, A., Duffard, R., Lazzaro, D., and Michtchenko, T. (2006). The inner region of the asteroid Main Belt: a spectroscopic and dynamic analysis. *Astronomy and Astrophysics*, 459:969–976.
- Angeli, C. A. and Lazzaro, D. (2002). Spectral properties of Mars-crossers and near-Earth objects. Results of the S3OS2 survey. *Astronomy and Astrophysics*, 391:757–765.
- Arcoverde, P. (2018). CURVAS DE FASE DE OBJETOS EM ÓRBITA PRÓXIMA DA TERRA COMO PARTE DO PROJETO IMPACTON.
- Binzel, R. P., DeMeo, F. E., Turtelboom, E. V., Bus, S. J., Tokunaga, A., Burbine, T. H., Lantz, C., Polishook, D., Carry, B., Morbidelli, A., Birlan, M., Vernazza, P., Burt, B. J., Moskovitz, N., Slivan, S. M., Thomas, C. A., Rivkin, A. S., Hicks, M. D., Dunn, T., Reddy, V., Sanchez, J. A., Granvik, M., and Kohout, T. (2019). Compositional distributions and evolutionary processes for the near-Earth object population: Results from the MIT-Hawaii Near-Earth Object Spectroscopic Survey (MITHNEOS). *Icarus*, 324:41–76.
- Binzel, R. P., Lupishko, D. F., Di Martino, M., Whiteley, R. J., and Hahn, G. J. (2002). Physical properties of near-Earth objects. In Bottke, Jr., W. F., Cellino, A., Paolicchi, P., and Binzel, R. P., editors, *Asteroids III*, University of Arizona Press, Tucson, pages 255–271.
- Binzel, R. P., Reddy, V., and Dunn, T. L. (2015). *The Near-Earth Object Population: Connections to Comets, Main-Belt Asteroids, and Meteorites*, pages 243–256.
- Binzel, R. P., Rivkin, A. S., Stuart, J. S., Harris, A. W., Bus, S. J., and Burbine, T. H. (2004). Observed spectral properties of near-Earth objects:

- Results for population distribution, source regions, and space weathering processes. *Icarus*, 170:259–294.
- Bottke, W. F., Morbidelli, A., Jedicke, R., Petit, J.-M., Levison, H. F., Michel, P., and Metcalfe, T. S. (2002a). Debiased Orbital and Absolute Magnitude Distribution of the Near-Earth Objects. *Icarus*, 156:399–433.
- Bottke, W. F., Vokrouhlický, D., Rubincam, D. P., and Broz, M. (2002b). *The Effect of Yarkovsky Thermal Forces on the Dynamical Evolution of Asteroids and Meteoroids*, page 395–408.
- Bowell, E., Chapman, C. R., Gradie, J. C., Morrison, D., and Zellner, B. (1978). Taxonomy of asteroids. *Icarus*, 35:313–335.
- Burbine, T. H. and Binzel, R. P. (2002). Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey in the Near-Infrared. *Icarus*, 159:468–499.
- Bus, S. J. and Binzel, R. P. (2002). Phase II of the Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey. A Feature-Based Taxonomy. *Icarus*, 158:146–177.
- Carvano, J. M., Hasselmann, P. H., Lazzaro, D., and Mothé-Diniz, T. (2010). SDSS-based taxonomic classification and orbital distribution of main belt asteroids. *AAp*, 510:A43.
- Carvano, J. M. and Lazzaro, D. (2010). Diameter, geometric albedo and compositional constraints for (298) Baptistina through visible and mid-infrared photometry. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 404:31–34.
- Carvano, J. M., Mothé-Diniz, T., and Lazzaro, D. (2003). Search for relations among a sample of 460 asteroids with featureless spectra. *Icarus*, 161:356–382.
- Chapman, C. R., Morrison, D., and Zellner, B. (1975). Surface properties of asteroids - A synthesis of polarimetry, radiometry, and spectrophotometry. *Icarus*, 25:104–130.
- de León, J., Licandro, J., Serra-Ricart, M., Pinilla-Alonso, N., and Campins, H. (2010). Observations, compositional, and physical characterization of near-Earth and Mars-crosser asteroids from a spectroscopic survey. *Astronomy Astrophysics*, 517:25.
- de León, J., Pinilla-Alonso, N., Campins, H., Licandro, J., and Marzo, G. A. (2012). Near-infrared spectroscopic survey of B-type asteroids: Compositional analysis. *Icarus*, 218:196–206.

- De Pra, M., Lazzaro, D., Carvano, J., Gonzales, J. A., and Carvano, J. M. (2013). Minor Planet Observations [Y28 OASI, Nova Itacuruba]. *Minor Planet Circular*.
- de Sanctis, M. C., Migliorini, A., Jasmin, F. L., Lazzaro, D., Filacchione, G., Marchi, S., Ammannito, E., and Capria, M. T. (2011). Spectral and mineralogical characterization of inner main-belt V-type asteroids. *Astronomy Astrophysics*, 533:10.
- DeMeo, F. E., Binzel, R. P., Slivan, S. M., and Bus, S. J. (2009). An extension of the Bus asteroid taxonomy into the near-infrared. *Icarus*, 202:160–180.
- DeMeo, F. E. and Carry, B. (2014). Solar System evolution from compositional mapping of the asteroid belt. *Nature*, 505:629–634.
- Florczak, M., Barucci, M. A., Doressoundiram, A., Lazzaro, D., Angeli, C. A., and Dotto, E. (1998). A visible spectroscopic survey of the Flora clan. *Icarus*, 133:233–246.
- Fornasier, S., Lantz, C., Barucci, M. A., and Lazzarin, M. (2014). Aqueous alteration on main belt primitive asteroids: Results from visible spectroscopy. *Icarus*, 233:163–178.
- Fukugita, M., Ichikawa, T., Gunn, J. E., Doi, M., Shimasaku, K., and Schneider, D. P. (1996). The Sloan Digital Sky Survey Photometric System. *Astronomical Journal*, 111:1748.
- Granvik, M., Morbidelli, A., Jedicke, R., Bolin, B., Bottke, W. F., Beshore, E., Vokrouhlický, D., Nesvorný, D., and Michel, P. (2018). Debiased orbit and absolute-magnitude distributions for near-Earth objects. *Icarus*, 312:181–207.
- Greenstreet, S., Ngo, H., and Gladman, B. (2012). The orbital distribution of Near-Earth Objects inside Earth’s orbit. *Icarus*, 217:355–366.
- Harris, A. W. and Chodas, P. W. (2021). The population of near-earth asteroids revisited and updated. *Icarus*, 365:114452.
- Harris, A. W. and D’Abramo, G. (2015). The population of near-Earth asteroids. *Icarus*, 257:302–312.
- Hasselmann, P. H., Carvano, J. M., and Lazzaro, D. (2020). *SDSS-based Asteroid Taxonomy V1.0. NASA Planetary Data System*.

- Ieva, S., Dotto, E., Lazzaro, D., Perna, D., Fulvio, D., and Fulchignoni, M. (2016). Spectral characterization of V-type asteroids - II. A statistical analysis. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 455:2871–2888.
- Ieva, S., Dotto, E., Mazzotta, E. E., Perna, D., Rossi, A., Barucci, M. A., Di Paola, A., Speziali, R., Micheli, M., Perozzi, E., Lazzarin, M., and Bertini, L. (2018). Photometric survey of 67 near-Earth objects. *Astronomy Astrophysics*, 615:10.
- Izevic, Z., Tavachnik, S., and Rafikov, R. R. (2001). Solar System Objects observed in the SLOAN Digital Sky Survey commissioning data. *AJ*, 122:2749–2784.
- Jasmim, F. L. (2013). *Estudo da Composição Superficial De Diversas Classes De Pequenos Corpos*. PhD thesis, Observatório Nacional, Curso de Pós-Graduação em Astronomia, Rio de Janeiro.
- Lazzarin, M., Marchi, S., Magrin, S., and Licandro, J. (2005). Spectroscopic investigation of near-Earth objects at Telescopio Nazionale Galileo. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 359:1575–1582.
- Lazzaro, D. (2010). Photometric and spectroscopic studies of small Solar System bodies and the IMPACTON project. *Boletín de la Asociación Argentina de Astronomía La Plata Argentina*, 53:315–324.
- Lazzaro, D., Angeli, C. A., Carvano, J. M., Mothé-Diniz, T., Duffard, R., and Florczak, R. (2004). S3OS2: the visible spectroscopic survey of 820 asteroids. *Icarus*, 172:179–220.
- Licandro, J., Popescu, M., de León, J., Morate, D., Vaduvescu, O., De Pra, M., and Ali-Laoga, V. (2018). The visible and near-infrared spectra of asteroids in cometary orbits. *Astronomy Astrophysics*, 618:11.
- Lupishko, D. and Di Martino, M. (1998). Physical properties of near-earth asteroids. *Planetary and space science*, 46:47–74.
- Mainzer, A., Grav, T., Masiero, J., Hand, E., Bauer, J., Tholen, D., McMillan, R. S., Spahr, T., Cutri, R. M., Wright, E., Watkins, J., Mo, W., and Maleszewski, C. (2011). NEOWISE Studies of Spectrophotometrically Classified Asteroids: Preliminary Results. *The Astrophysical Journal*, 741:25.

- McFadden, L. A., Tholen, D. J., and Veeder, G. J. (1989). Physical properties of Aten, Apollo and Amor asteroids. In *Asteroids II, University of Arizona Press, Tucson*, pages 442–467.
- Michel, P., Migliorini, F., Morbidelli, A., and Zappalá, V. (2000a). The Population of Mars-Crossers: Classification and Dynamical Evolution. *Icarus*.
- Michel, P., Zappalà, V., Cellino, A., and Tanga, P. (2000b). NOTE: Estimated Abundance of Atens and Asteroids Evolving on Orbits between Earth and Sun. *Icarus*, 143:421–424.
- Milani, A., Cellino, A., Knežević, Z., Novaković, B., Spoto, F., and Paolicchi, P. (2014). Asteroid families classification: Exploiting very large datasets. *Icarus*, 239:46–73.
- Monteiro, F. V. d. M. (2016). *DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES ROTACIONAIS DE ASTEROIDES EM ÓRBITAS PRÓXIMAS DA TERRA ATRAVÉS DO PROJETO IMPACTON*. PhD thesis, Observatório Nacional, Curso de Pós-Graduação em Astronomia, Rio de Janeiro.
- Morate, D., de León, J., De Pra, M., Licandro, J., Cabrera-Lavers, A., Campins, H., Pinilla-Alonso, N., and Alí-Lagoa, V. (2016). Compositional study of asteroids in the Erigone collisional family using visible spectroscopy at the 10.4 m GTC. *Astronomy Astrophysics*, 586:18.
- Morate, D., de León, J., De Pra, M., Licandro, J., Cabrera-Lavers, A., Campins, H., and Pinilla-Alonso, N. (2018). Visible spectroscopy of the Sulamitis and Clarissa primitive families: a possible link to Erigone and Polana. *Astronomy Astrophysics*, 610:14.
- Morate, D., de León, J., De Pra, M., Licandro, J., Pinilla-Alonso, N., Campins, H., Arredondo, A., Carvano, J. M., Lazzaro, D., and Cabrera-Lavers, A. (2019). The last pieces of the primitive inner belt puzzle: Klio, Chaldaea, Chimaera, and Svea. *Astronomy Astrophysics*, 630:14.
- Morbidelli, A., Bottke, Jr., W. F., Froeschlé, C., and Michel, P. (2002). Origin and Evolution of Near-Earth Objects. In Bottke, Jr., W. F., Cellino, A., Paolicchi, P., and Binzel, R. P., editors, *Asteroids III, University of Arizona Press, Tucson*, pages 409–422.
- Morbidelli, A., Delbo, M., Granvik, M., Bottke, W. F., Jedicke, R., Bolin, B., Michel, P., and Vokrouhlický, D. (2020). Debiased albedo distribution for Near Earth Objects. *Icarus*, 340:8.

- Morbidelli, A. and Vokrouhlický, D. (2003). The Yarkovsky-driven origin of near-Earth asteroids. *Icarus*, 163:120–134.
- Morbidelli, A., Walsh, K. J., O’Brien, D. P., Minton, D. A., and Bottke, W. F. (2015). *The Dynamical Evolution of the Asteroid Belt*, pages 493–507.
- Morrison, D., Harris, A. W., Sommer, G., Chapman, C. R., and Carusi, A. (2002). *Dealing with the Impact Hazard*, page 739–754.
- Perna, D., Barucci, M. A., Fulchignoni, M., Popescu, M., Belskaya, L., Fornasier, S., Doressoundiram, A., Lantz, C., and Merlin, F. (2018). A spectroscopic survey of the small near-Earth asteroid population: Peculiar taxonomic distribution and phase reddening. *Planetary and Space Science*, 157:82–95.
- Perna, D., Dotto, E. and Ieva, S., Barucci, M. A., Bernardi, F., Fornasier, S., De Luise, F., Perozzi, E., Rossi, A., Mazzotta Epifani, E., Micheli, M., and Deshapriya, J. D. P. (2016). Grasping the Nature of Potentially Hazardous Asteroids. *The Astronomical Journal*, 151:14.
- Popescu, M., Vaduvescu, O., de León, J., Gherase, R. M., Licandro, J., Boacã, I. L., Šonka, A. B., Ashley, R. P., Močnik, T., Morate, D., Predatu, M., De Pra, M., Fariña, C., Stoev, H., Díaz Alfaro, M., Ordonez-Etxeberria, L., López-Martínez, F., and Errmann, R. (2019). Near-Earth asteroids spectroscopic survey at Isaac Newton Telescope. *Astronomy Astrophysics*, 627:21.
- Reddy, V., Carvano, J. M., Lazzaro, D., Michtchenko, T. A., Gaffey, M. J., Kelley, M. S., Mothé-Diniz, M., Alvarez-Candal, A., Moskovitz, N. A., Cloutis, E. A., and Ryan, E. L. (2011). Mineralogical characterization of Baptistina Asteroid Family: Implications for K/T impactor source. *Icarus*, 216:184–197.
- Rondón (2016). *Estudo Fotométrico e Espectroscópico de Asteroides Ricos em Voláteis*. PhD thesis, Observatório Nacional, Curso de Pós-Graduação em Astronomia, Rio de Janeiro.
- Rondón, E., Arcoverde, P., Monteiro, F., Medeiros, H., Navas, G., Lazzaro, D., Carvano, J. M., and Rodrigues, T. (2019). Photometric characterization of NEOs: 3 Amor and 3 Apollo. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 484:2499–2513.
- Rondón, E., Lazzaro, D., Rodrigues, T., Carvano, J. M., Roig, F., Monteiro, F., Arcoverde, P., Medeiros, H., Silva, J., Jasmim, F., De Pra, M., Hasselmann,

- P., Ribeiro, A., Dávalos, J., and Souza, R. (2020). OASI: A Brazilian Observatory Dedicated to the Study of Small Solar System Bodies—Some Results on NEO’s Physical Properties. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 132:12.
- Shoemaker, E. M., Williams, J. G., Helin, E. F., and Wolfe, R. F. (1979). Earth-crossing asteroids: orbital classes, population, and fluctuation of population in late geologic time. Technical report.
- Tholen, D. J. (1984). *Asteroid taxonomy from cluster analysis of Photometry*. PhD thesis, Arizona Univ., Tucson.
- Tholen, D. J. and Barucci, M. A. (1989). Asteroid taxonomy. In *Asteroids II*, University of Arizona Press, Tucson, pages 298–315.
- Thomas, C. A., Emery, J. P., Trilling, D. E., Delbó, M., Hora, J. L., and Mueller, M. (2014). Physical characterization of Warm Spitzer-observed near-Earth objects. *Icarus*, 228:217–246.