

ESTUDO DE PEQUENOS CORPOS DO SISTEMA SOLAR ATRAVÉS DE
ESPECTROSCOPIA E DAS CAMPANHAS J-PLUS E S-PLUS

Mário Nascimento De Prá

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Astronomia do Observatório Nacional/MCTI, como parte dos requisitos necessários à obtenção do Título de Doutor em Ciências.

Orientador: Jorge Carvano

Rio de Janeiro
Julho de 2017

"ESTUDO DE PEQUENOS CORPOS DO SISTEMA SOLAR ATRAVÉS DE
ESPECTROSCOPIA E DAS CAMPANHAS J-PLUS E S-PLUS".

MÁRIO NASCIMENTO DE PRÁ

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

Aprovada por:



Dr. Jorge Marcelo Ferreira Carvano – ON/MCTIC
(Orientador)



Dr. Alvaro Augusto Alvarez Candal - ON/MCTIC



Dr. Julio Ignacio Bueno de Camargo – ON/MCTIC



Dr. Daniele Fulvio – PUC/RJ



Dr. Julio Angel Fernandez Alves –
UDELAR/MONTEVIDEO



Dr. Javier Licandro – IAC/ESPANHA

RIO DE JANEIRO – BRASIL

30 DE AGOSTO DE 2017

Nascimento De Prá, Mário

Estudo de pequenos corpos do Sistema Solar através de espectroscopia e das campanhas J-PLUS e S-PLUS /Mário Nascimento De Prá. – Rio de Janeiro: ON/MCTI, 2017.

XVI, 114 p.: il.; 29,7cm.

Orientador: Jorge Carvano

Tese (doutorado) – ON/MCTI/Programa de Pós-graduação em Astronomia, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 76 – 88.

1. astronomia. 2. ciências planetárias. 3. asteroides.
I. , . II. Observatório Nacional/MCTI, Programa de Pós-graduação em Astronomia. III. Título.

*Dedico esta tese a todos que
lutam por uma ciência aberta e
a todos que apesar das
dificuldades, contribuem para a
produção de ciência no Brasil,
sem Temer.*

Agradecimentos

Ao Dr. Jorge Carvano, pela orientação e paciência ao longo destes seis anos em que trabalhamos juntos, contando o trabalho de mestrado;

Ao Dr. Javier Licandro, por me receber no Instituto de Astrofísica de Canárias, por impulsionar os trabalhos desenvolvidos nesta tese;

Ao grupo de ciências planetárias do ON, aos pesquisadores Daniela Lazzaro, Álvaro Alvarez Candal, Fernando Roig. E aos alunos que estão hoje, ou que já passaram pelo grupo: Ximena, Sandro, Carol, Walter, Matias, Filipe, Plúcida, Hissa, Carmen, Eduardo, Pedro, Anderson, Jorge Alejandro, Sérgio;

Ao grupo espanhol de ciências planetárias, David Morate, Noemi Pinilla Alonso, Julia De León, Victor Alí Lagoa, Humberto Campins e Vania Lorenzi, pelas colaborações e discussões científicas;

À minha família, mãe, pai, irmã e cunhado, por todo o apoio e amor, por tudo e mais;

À Gabriela (Bitá), pelo amor e companheirismo, por ser minha casa ao longo destes quatro anos de doutorado (junto do chico). À Lúcia e Jairo, Geysa e Léo, por me receberem de braços abertos;

Aos meus colegas e amigos do Observatório Nacional e do RJ, pelas conversas, bebedeiras e pelos momentos bons compartilhados;

Aos meus amigos e irmãos de Vitória, que mesmo na minha ausência, sempre me fizeram presente.

Resumo da Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geofísica do Observatório Nacional/MCTI como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Doutor em Ciências (D.Sc.)

ESTUDO DE PEQUENOS CORPOS DO SISTEMA SOLAR ATRAVÉS DE ESPECTROSCOPIA E DAS CAMPANHAS J-PLUS E S-PLUS

Mário Nascimento De Prá

Julho/2017

Orientador: Jorge Carvano

Programa: Astronomia

Asteroides primitivos são considerados objetos na transição entre corpos rochosos e ricos em voláteis. A superfície destes objetos pode apresentar minerais que sofreram processo de alteração aquosa. A presença de materiais hidratados pode ser inferida através da detecção de uma banda de absorção em $0.7 \mu\text{m}$, na região espectral do visível. Mapear a ocorrência desta banda possibilita estimar a abundância de flossilicatos no Cinturão Principal de Asteroides (CPA). Esta análise pode auxiliar na restrição de modelos de evolução dinâmica do Sistema Solar. Nesta tese, estudamos a distribuição da banda de hidratação nas populações externas do CPA e a metodologia para a identificação da banda a partir de dados de espectrofotometria.

A primeira abordagem está inserida no contexto do PRIMASS (*PRIMitive Asteroids Spectroscopy Survey*), o qual visa caracterizar asteroides primitivos ao longo de todo o CPA. Realizamos um estudo dos grupos dinâmicos Hildas e Cibeles, através de dados de espectroscopia no visível e infra-vermelho próximo. Esta análise revelou uma maior diversidade espectral para a população de Cibeles em comparação aos Hildas, sendo que o primeiro grupo pode delimitar a zona onde o processo de alteração aquosa pode ocorrer. A análise foi estendida para as família de Themis e troianos de Júpiter, a partir de dados do SDSS e NEOWISE. Com isto, observamos um indício de um gradiente composicional entre o grupo do CPA e a população de troianos.

Na segunda abordagem, apresentamos as campanhas J-PLUS e S-PLUS. Descrevemos a infraestrutura computacional que permitirá, no futuro próximo, catalogar

dados de espectrofotometria de milhares de asteroides. Comparamos a sensibilidade para a identificação da banda de hidratação com diferentes sistemas fotométricos. É esperado que o sistema do J-PLUS e S-PLUS fornecerá uma análise mais confiável nesta tarefa do que a obtida através do SDSS.

Abstract of Thesis presented to Observatório Nacional/MCTI as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

STUDY OF SMALL BODIES OF THE SOLAR SYSTEM THROUGH SPECTROSCOPY AND THE J-PLUS E S-PLUS SURVEYS

Mário Nascimento De Prá

July/2017

Advisor: Jorge Carvano

Department: Astronomy

Primitive asteroids are considered transitional objects between rocky and icy bodies. They are expected to present volatile-rich content, such as hydrated minerals. The hydration level can be obtained by the study of the 0.7 microns absorption band in the visible range. Mapping the presence of this band in asteroids spectra enables the study of the distribution of phyllosilicates across the main belt. Such effort can help to constrain models and to shed light into the evolutionary history of the Solar System. In this thesis we aim to study the distribution of the 0.7 μm band at the outskirts of the main belt and the methodology that can be applied to identify the band with spectrophotometric data.

The first approach is within the context The PRIMASS (PRIMitive Asteroids Spectroscopy Survey), which aims to characterize primitive asteroids throughout the asteroid belt. We study visible and near-infrared spectroscopy of members of the dynamical groups Hildas and Cibebes. We find that the Cibele population is more diverse than the Hildas and that the former may delimit the hydration zone. The study is then extended to compare with the Themis Family and Jupiter trojans, with the SDSS and NEOWISE data. The extended analysis reveals a possible compositional gradient from the main belt to the trojan population.

On the second approach we present the J-PLUS and S-PLUS surveys. We describe the computational infrastructure that will allow in the near future to catalog the spectrophotometric information of thousands of asteroids obtained with these projects. We compare the sensitivity for the detection of the 0.7 μm band with the different spectrophotometric systems. It is expected that the J-PLUS/S-PLUS system will provide a more reliable analysis than the one with SDSS data.

Sumário

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xv
1 Introdução	1
2 O Cinturão de Asteroides: Passado e Presente	3
2.1 Um Histórico da Caracterização Física de Asteroides	6
2.2 A Estrutura do Cinturão Principal de Asteroides	18
2.3 O Papel da Água no Sistema Solar	23
3 Análise Composicional de Grupos Dinâmicos do Cinturão Externo	30
3.1 Análise da amostra espectroscópica	33
3.1.1 Observações e Redução de Dados	33
3.1.2 Análise paramétrica da amostra no visível	38
3.1.3 Análise Paramétrica da amostra no infravermelho próximo	44
3.1.4 Resultados	46
3.2 Análise estendida com dados do SDSS e NEOWISE	49
3.3 Discussão	54
3.4 Conclusões	57
4 As Campanhas Observacionais J-PLUS e S-PLUS	59
4.1 Introdução	59
4.2 Estimativa do Catálogo de Asteroides	61
4.3 <i>Pipeline</i> para Pequenos Corpos do Sistema Solar	63
4.4 Estudando a banda em 0.7 com dados de espectrofotometria	68
5 Considerações Finais	74
Referências Bibliográficas	76
A Tabelas do Capítulo 3	89

B	O teste de Kolmogorov-Smirnov	99
B.0.1	K-S uniamostrat	99
B.0.2	Teste K-S biamostrat	101
B.0.3	Interpretação do valor-p do Teste K-S	102
C	Descrição do Banco de Dados J-PLUS	103
D	Trabalhos Desenvolvidos em Colaborações Durante a Tese	109

Lista de Figuras

2.1	Distribuição acumulada da descoberta de asteroides por ano. Dados extraídos de www.minorplanetcenter.net/iau/lists/NumberedPerYear.html	3
2.2	Famílias de asteroides obtidas por Nesvorný et al. (2015), identificadas pelo numero do objeto de maior dimensão dentre os membros.	5
2.3	Os primeiros espectros de asteroides observados: A - (4) Vesta e B - (1) Ceres. Adaptado de Bobrovnikoff (1929).	6
2.4	Distribuição das classes definidas pela taxonomia CMZ, C e S, pelo semi-eixo maior. Gráfico extraído de Chapman et al. (1975).	8
2.5	<i>topo</i> - Histograma do numero de objetos por semi-eixo maior. <i>abaixo</i> - Distribuição de classes taxonômicas de Bowell por semi-eixo maior. Extraído de Gradie and Tedesco (1982).	10
2.6	Identificação das classes taxonômicas de Tholen (1984) no espaço de componente principais.	12
2.7	Distribuição das cada classe definidos por Carvano et al. (2010) no CPA. Adaptado do trabalho original.	18
2.8	Distribuição de massa para cada classe taxonômica (DeMeo and Carry, 2014).	19
2.9	Conceito da região de formação dos asteroides de tipo S e C (a), de acordo com o <i>Grand Track</i> . A migração de Júpiter e Saturno (b) produziria uma aproximação da distribuição de objetos do CPA hoje (c). Extraído de Walsh et al. (2011).	21
2.10	Razões de D/H medidos em, na Terra, Marte, cometas e meteoritos condritos carbonáceos. Extraído de Marty (2012).	24
2.11	Os quatro tipos de bandas em $3 \mu\text{m}$ identificadas por Takir and Emery (2012).	25
2.12	Resultado do modelo térmico de Grimm and McSween (1993) em sobreposição com a distribuição de tipo de banda em $3.0 \mu\text{m}$ de Takir and Emery (2012).	27

2.13	Distribuição da profundidade da banda em $0.7 \mu\text{m}$, calculadas a partir dos dados do SDSS (linha preta). As linhas tracejadas representam distribuições ajustadas para objetos hidratados (Ch) e não hidratados (C) (Rivkin, 2012).	29
3.1	Populações do cinturão externo de asteroides: Cibele, Hildas, Thule e Troianos. Em tons de vermelho também são marcadas as principais famílias de objetos primitivos dentre ao cinturão externo.	31
3.2	Resultado da técnica utilizada para a correção do fringing com a câmera do GHTS, no SOAR. A imagem do topo mostra o espectro de reflectância de (790) Pretoria, a do meio, o mesmo espectro, porém com a correção de fringing e abaixo o resíduo.	36
3.3	Espectros no visível de membros da população Hilda, durante as campanhas observacionais apresentadas neste trabalho. Todos os espectros estão normalizados a unidade em $0.55 \mu\text{m}$	39
3.4	Espectros no visível de membros da população Cibele, durante as campanhas observacionais apresentadas neste trabalho. Todos os espectros estão normalizados a unidade em $0.55 \mu\text{m}$	40
3.5	Parametrização aplicada para a amostra de espectros no visível. Os parâmetros medidos foram: Gradiente espectral no visível, gradiente espectral no ultravioleta, ponto de virada do gradiente espectral e banda de hidratação em $0.7 \mu\text{m}$	41
3.6	Metodologia aplicada para o cálculo da banda de hidratação. Primeiro o contínuo é removido, e posteriormente medimos a distância relativa do mínimo próximo a $0.7 \mu\text{m}$	43
3.7	Parametrização aplicada para os espectros no infravermelho próximo. O gradiente espectral foi medido em dois intervalos, IR-slope1 e IR-slope2, como forma de detectar uma possível curvatura no espectro.	44
3.8	Espectros no infravermelho próximo de 20 asteroides membros da população de Hildas. Em vermelho marca os objetos que foram observados mais de uma vez. Os espectros foram normalizados a unidade em $1.2 \mu\text{m}$. As regiões de bandas de absorção telúricas foram retiradas para melhor visualização.	45
3.9	Gradiente espectral no visível <i>versus</i> diâmetro para Hildas (a) e Cibelles (b). Os asteriscos cinza são gradiente espectrais calculados com o SDSS (seção 3.2).	47

3.10	<i>Topo</i> : Distribuição de asteroides de Hildas e Cibeles no espaço de gradiente espectral por albedo. As caixas em azul representam os grupos descritos na seção 3.2. Em amarelo estão representados objetos que apresentam a queda de reflectância no ultravioleta, em laranja os que apresentam banda em $0.7 \mu\text{m}$ e em vermelho aqueles que apresentam ambos parâmetros. <i>base</i> : Histograma da distribuição de gradiente espectral nos grupos dinâmicos. As linhas vermelhas representem ajustes de gaussianas bimodais nas distribuições.	48
3.11	Albedo <i>versus</i> IR-slope1 para Hildas (pontos) e Cibeles (quadrados). Asteroides que mostram uma mudança no gradiente espectral do infravermelho próximo são pintados de azul.	49
3.12	Histograma de gradiente espectral de Hildas e Cibeles com dados do SDSS. O histograma em azul mostra o efeito da remoção das famílias.	50
3.13	Diagramas de espalhamento e de densidade para a família colisional de Themis e as populações Cibele, Hilda e Troianos	52
3.14	Médias ponderadas e desvio padrão de albedo e gradiente espectral para cada grupo de objetos em troianos, Hildas, Cibeles e na família de Themis. Os tamanhos dos pontos está relacionado com a proporção relativa aos grupos de objetos, para cada população.	53
4.1	Curvas de transmissão do sistema de filtros do T80.	60
4.2	Número de objetos observados por magnitude visual. Resultado da simulação de três anos de operação do J-PLUS	62
4.3	Distribuição simulada no espaço de semi-eixo maior por excentricidade dos asteroides a serem observados pelo J-PLUS e S-PLUS.	63
4.4	Fluxograma do <i>pipeline</i> de pequenos corpos do Sistema Solar com dados do J-PLUS.	64
4.5	Fluxograma de decisões do <i>demob</i> e do armazenamento e envio de informações para os bancos de dados do CEFCA (vermelho) e do ON (azul).	65
4.6	Exemplo de asteroides reconhecidos em um campo observado pelo J-PLUS.	67
4.7	Convolução do espectro de um meteorito do tipo CM2 com o sistema fotométrico do ECAS, SDSS e J-PLUS.	69
4.8	Diagrama de fluxo do algoritmo utilizado para estimar a eficiência no calculo de hidratação com dados do ECAS, SDSS e J-PLUS.	70

4.9	Metodologia para a identificação da banda em $0.7 \mu m$ com dados do J-PLUS. <i>Esquerda</i> : Ajuste polinomial nos filtros r' , $F660$, i' e $F861$ e estimativa da reflectância em $0.7 \mu m$. <i>Direita</i> : Cálculo da área formada pelo polígono entre as reflectâncias em r' , $F660$, i' e $F861$	71
4.10	Resultados da análise utilizando o algoritmo descrito na figura 4.8 para os sistemas do ECAS, SDSS e J-PLUS.	72
B.1	Representação gráfica da estatística de K-S. Figura adaptada de Press (2007).	100
C.1	Estrutura relacional das bases de dados de objetos móveis no CEFCA (<i>topo</i>) e no ON (<i>baixo</i>).	103

Lista de Tabelas

2.1	Sistema de filtros utilizados pelo ECAS	11
2.2	Tradução livre para as tipos de objetos identificados por Bell (1989).	13
2.3	Tabela de comparação entre os principais tipos taxonômicos e as respectivas sugestões mineralógicas. Adaptada de DeMeo et al. (2015)	16
2.4	Sistema de filtros do SDSS	17
3.1	Condições de observação dos asteroides - Visível	34
3.2	Lista de análogas solares observadas no visível	34
3.3	Condições observacionais dos asteroides Hildas- IR	37
3.4	Lista de análogas solares observadas no infravermelho próximo	37
3.5	Médias ponderadas e desvio padrão para p_v e gradiente espectral de cada grupo dentro das populações da família de Themis, Cibele, Hildas e Troianos.	53
4.1	Características do OAJ	59
4.2	Características do filtros do J-PLUS	60
A.1	Resultados para a análise dos espectros no visível para as populações de Cibele e Hilda observados no SOAR com GHTS.	89
A.2	Resultados da análise dos espectros no visível de objetos da população de Cibele encontrados na literatura. O asterisco '*' é usado para marcar objetos onde a análise do determinado parâmetro não pode ser feita, devido a cobertura espectral insuficiente. O traço '-' marca objetos onde o parâmetro não foi identificado. Referências: (1) Lagerkvist et al. (2005); (2) SMASS II Bus and Binzel (2004);(3) S3OS2 Lazzaro et al. (2004); (4) Vilas et al. (2006)	90

A.3	Resultados da análise dos espectros no visível de objetos da população de Hildas encontrados na literatura. O asterisco '*' é usado para marcar objetos onde a análise do determinado parâmetro não pode ser feita, devido a cobertura espectral insuficiente. O traço '-' marca objetos onde o parâmetro não foi identificado. Referências: (1) Dahlgren et al. (1997) ou Dahlgren and Lagerkvist (1995); (2) SMASS II (Bus and Binzel, 2004);(3) S3OS2 (Lazzaro et al., 2004); (5) Vilas et al. (2006)	92
A.4	Resultados para a análise dos espectros no infravermelho próximo de membros de Hildas observados com o TNG.	94
A.5	Resultados para a análise dos espectros no infravermelho próximo de membros de Hildas e Cibeles encontrados na literatura. Referências:(1) Reddy and Sanchez (2016); (2) SMASS II (Bus and Binzel, 2004); (3) Takir and Emery (2012)	95
A.6	Propriedades físicas e dinâmicas dos membros de Cibeles	95
A.7	Propriedades físicas e dinâmicas dos membros de Hildas	97
C.1	Tabela do banco de dados de objetos móveis do CEFCA	104
C.2	Tabela do banco de dados de objetos móveis do ON	106

Capítulo 1

Introdução

Em janeiro de 1801, o astrônomo italiano Giuseppe Piazzi anunciava a descoberta de um astro pouco brilhante, com aspecto de estrela mas que se movia em relação ao fundo de estrelas fixas do céu. Posteriormente naquele ano, graças aos esforços do matemático alemão Carl Friedrich Gauss e do astrônomo de mesma nacionalidade, Heinrich Olbers, o objeto foi reencontrado e, anos depois classificado como o primeiro asteroide: (1) Ceres. À época da escrita desta tese, mais de 200 anos após este feito, o *Minor Planet Center* (MPC), órgão responsável por catalogar e manter os dados de pequenos corpos do Sistema Solar, conta com um acervo de ~ 700 mil asteroides com órbitas catalogadas. Grande parte destes objetos está localizada na região entre as órbitas de Marte e Júpiter, no chamado Cinturão Principal de Asteroides (CPA).

Em uma definição rápida, os asteroides são hoje entendidos como objetos remanescentes do processo de formação planetária, isto é, fragmentos de corpos que não acumularam massa suficiente para se tornarem planetas. Desta forma, estes objetos não sofreram um metamorfismo térmico intenso como os planetas e conservam características pristinas da região onde foram formados na Nebulosa Solar Primitiva.

Com o advento da Astronomia do século XXI, tornou-se possível não apenas a catalogação das órbitas de centenas de milhares de asteroides, mas também a obtenção de informações da diversidade de propriedades físicas dentre eles. A evolução das técnicas de observação impulsionou a caracterização do CPA, a descoberta de outras populações de pequenos corpos do Sistema Solar, diversos sistemas planetários, e ainda, de discos protoplanetários. Estes fatores, em conjunto com a evolução das simulações computacionais seguem revolucionando a maneira como entendemos o Sistema Solar.

Apesar dos avanços científicos das últimas décadas, diversas perguntas seguem em aberto, como por exemplo: Quais foram as condições iniciais do Sistema Solar? Como o Sistema Solar evoluiu? Onde os planetas se formaram? Quais foram as condições e a prevalência de processos na região onde se formaram? Quais foram os mecanismos que levaram às condições para o surgimento da vida na Terra?

Determinar o cenário que melhor representa a formação do Sistema Solar é um desafio. Se em teoria o estudo de asteroides é uma ferramenta crucial para sondar os modelos de formação, na prática muitas informações foram obscurecidas por 4.5 bilhões de anos de evolução colisional e dinâmica, além da exposição a efeitos ambientais que alteram as propriedades superficiais de asteroides. Desta maneira, anterior às perguntas acima, diversas outras devem ser respondidas, entre elas:

- Como o Cinturão Principal de Asteroides se formou?
- Qual é a distribuição de composições do CPA atualmente?
- Qual é a abundância de água no CPA?
- Quais são os limites da região aonde a alteração aquosa de minerais ocorreu?

Os trabalhos apresentados nesta tese visam uma contribuição na direção de responder os questionamentos acima.

No capítulo 2 revisamos o avanço histórico no entendimento do CPA. O capítulo 3 é dedicado ao estudo das populações externas do CPA, em especial os grupos dinâmicos Hildas e Cibelas. Este capítulo está inserido no contexto do *Primitive Asteroid Spectroscopic Survey* (PRIMASS), uma campanha observacional destinada a obtenção de dados de espectroscopia de asteroides primitivos ao longo de todo o CPA. No capítulo 4, apresentamos os estudos realizados no contexto das campanhas observacionais J-PLUS e S-PLUS, que produzirão dados de espectrofotometria de milhares de asteroides. Finalmente, as considerações finais e as perspectivas deste trabalho são apresentadas no capítulo 5.

Capítulo 2

O Cinturão de Asteroides: Passado e Presente

O avanço na compreensão do Sistema Solar está diretamente relacionado com a evolução na taxa de descobrimento de asteroides (Fig. 2.1). No começo da década de 1850, quando a quantidade de objetos catalogados chegava ainda à primeira dezena, surgiu a noção de que existiria um "cinturão" de asteroides, localizado entre as órbitas de Marte e Júpiter. A real origem do termo é difícil de ser avaliada, entretanto, os anos posteriores viriam a confirmar a existência do que hoje chamamos de Cinturão Principal de Asteroides (CPA).

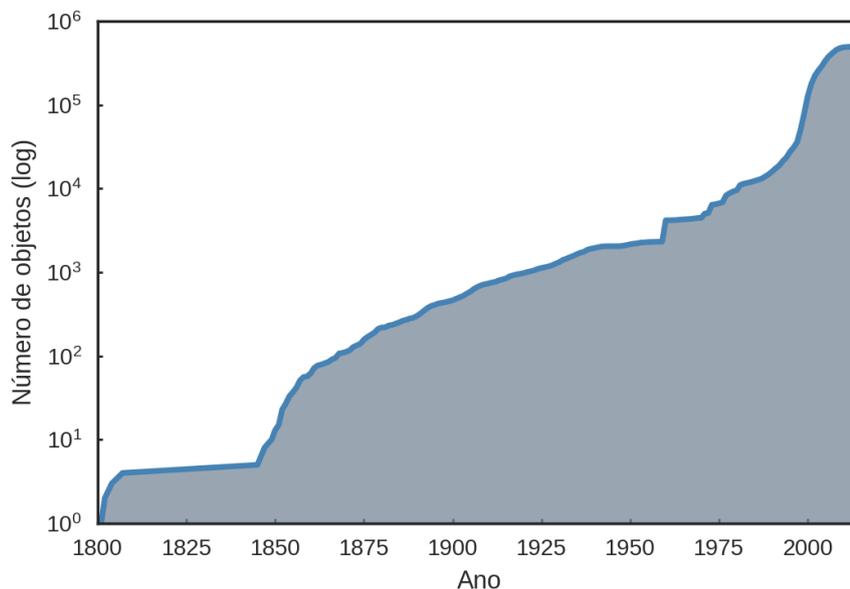


Figura 2.1: Distribuição acumulada da descoberta de asteroides por ano. Dados extraídos de www.minorplanetcenter.net/iau/lists/NumberedPerYear.html.

O crescimento no número de objetos conhecidos nos anos posteriores revelou características importantes do CPA. Em 1867, D. Kirkwood reportou "falhas" na

distribuição orbital de asteroides, causadas por ressonâncias de movimentos médios com Júpiter (Kirkwood, 1867). Estas zonas de instabilidade dinâmica ficaram conhecidas como Lacunas de Kirkwood e dividem o CPA em três partes principais:

- Cinturão Interno (2.1-2.5 ua): Delimitado pela ressonância secular ν_6 com Saturno e pela ressonância de movimentos médios 3:1 com Júpiter.
- Cinturão Intermediário (2.5-2.8 ua): População de asteroides entre as ressonâncias de movimentos médios com Júpiter, 3:1 e 5:2.
- Cinturão externo (2.8-3.3 ua): Região mais externa dentro do CPA, entre as ressonâncias de movimentos médios 5:2 e 2:1 com Júpiter. Esta região também é subdividida pela ressonância 7:3.

No final do século XIX, além do CPA, outras populações de asteroides começaram a ser identificadas. Em 1896, o asteroide (65) Cibele foi descoberto; em 1875, o objeto (153) Hilda e em 1906, o asteroide troiano de Júpiter, (588) Achilles. Estes asteroides são os objetos de maior dimensão dentre as populações da região externa ao CPA, os grupos dinâmicos de Cibeles, Hildas e Troianos, respectivamente. Um foco maior a estas populações é dado no capítulo 3.

Já no começo do século XX, a quantidade de órbitas de asteroides catalogados chegava próximo a marca de mil. Em uma série de trabalhos, K. Hirayama estudou agrupamentos de asteroides no espaço de elementos próprios, i.e., elementos orbitais removidos de perturbações seculares (Hirayama, 1918, 1919, 1922, 1923). A estes grupos de objetos, ele chamou de famílias de asteroides e sugeriu uma origem comum, sendo o resultado de um processo de quebra ou craterização de um corpo maior.

Desde os trabalhos pioneiros de Hirayama, vários autores exploraram o tema e identificaram diversas famílias no CPA (ver em Nesvorný et al. (2015), e referências internas). No final do século XX, a quantidade de asteroides com órbitas conhecidas chegou a centenas de milhares, e a tarefa de identificar famílias no espaço de elementos próprios deixou de ser feita com na base na análise visual e passou a necessitar técnicas mais modernas de computação. A figura 2.2 mostra as famílias identificadas em um trabalho recente, por Nesvorný et al. (2015) (dados disponíveis em Nesvorný (2015)).

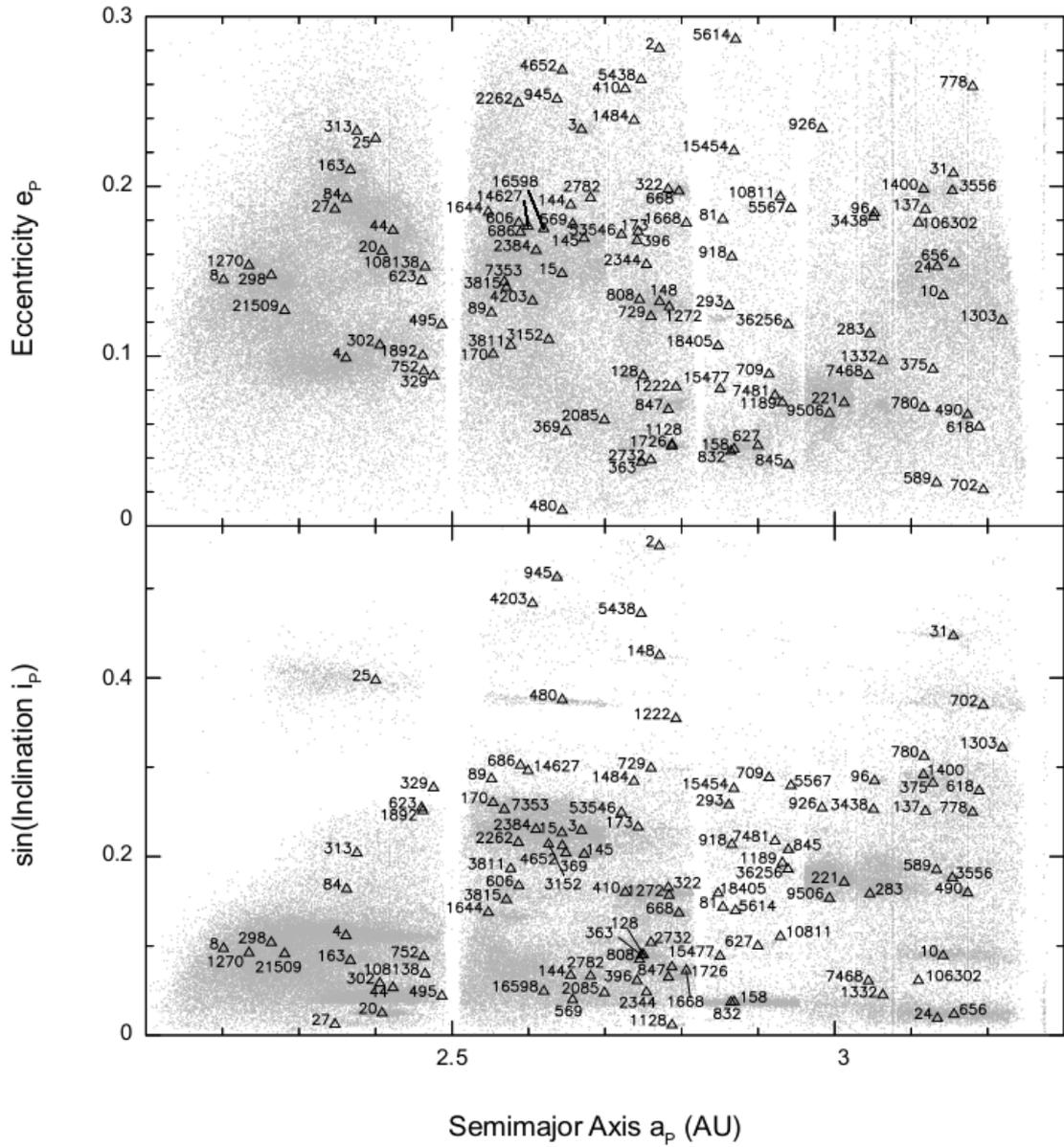


Figura 2.2: Famílias de asteroides obtidas por Nesvorný et al. (2015), identificadas pelo numero do objeto de maior dimensão dentre os membros.

2.1 Um Histórico da Caracterização Física de Asteroides

No começo do século XX a taxa de descobrimento de asteroides chegava a ~ 30 objetos/ano e as características da distribuição orbital de objetos começavam a ser desvendadas. Entretanto, o primeiro espectro de um asteroide foi publicado apenas em 1929. Bobrovnikoff (1929) utilizou técnicas fotográficas para observar a região entre $0.4\text{-}0.5 \mu\text{m}$ de 12 asteroides, entre eles: (1) Ceres, (2) Pallas, (4) Vesta e (8) Flora. As observações revelaram uma diversidade de propriedades espectrais, em especial a diferença entre os espectros de (1) Ceres e (4) Vesta (Fig. 2.3). Contudo, este trabalho pioneiro não teve sequencia e, com os acontecimentos da Segunda Guerra Mundial, as pesquisas das propriedades físicas de asteroides ficaram estagnadas por quase três décadas.

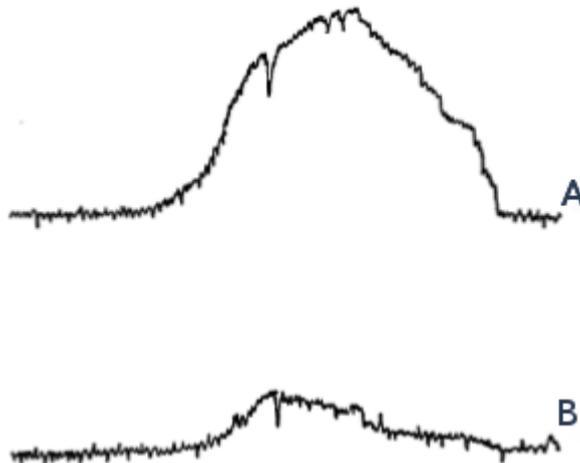


Figura 2.3: Os primeiros espectros de asteroides observados: A - (4) Vesta e B - (1) Ceres. Adaptado de Bobrovnikoff (1929).

Em meados da década de 1950, iniciaram as observações de asteroides com o sistema de filtros fotométricos UBV. Entretanto o foco destas pesquisas era determinação de propriedades rotacionais e cálculo de magnitude absoluta (ver Chapman and Gaffey (1979), Bowell and Lumme (1979) e referências internas). Apenas em 1970, foi publicado o primeiro trabalho com o espectro de reflectância de um asteroide, (4) Vesta, a partir de espectralfotometria com 24 filtros de banda estreita que cobriam a região de $0.3\text{-}1.1 \mu\text{m}$ (McCord et al., 1970). Neste trabalho, os autores notaram uma intensa banda de absorção próximo a $0.9 \mu\text{m}$ no espectro de Vesta e uma semelhança com o espectro de meteoritos acondritos basálticos, do grupo dos Howarditos, Eucritos e Diogenitos (HED).

Nos anos seguintes, os trabalhos observacionais foram estendidos para outros objetos (Chapman et al., 1971, 1973; Chapman and Salisbury, 1973; McCord and

Chapman, 1975a,b). O conjunto destas campanhas posteriormente ficou conhecido como *24-color Asteroid survey* (Chapman et al., 2005; Chapman and Gaffey, 1979; McFadden et al., 1984). Estes trabalhos reportaram uma série de resultados importantes e alavancaram a pesquisa na área de astrofísica de pequenos corpos do Sistema Solar, entre eles: a vasta diversidade de tipos espectrais dentre o CPA, a distribuição heterogênea dos tipos espectrais com a distância heliocêntrica, a relativa homogeneidade de tipos espectrais nas famílias de Hirayama.

Além da fotometria, na década de 1970 também foram impulsionadas observações de asteroides por diferentes técnicas, como a radiometria (Allen, 1970; Morrison, 1974) e a polarimetria (Gehrels et al., 1970; Veverka and Noland, 1973; Zellner et al., 1974). A partir destas técnicas, foi possível a determinação de albedos e diâmetros de dezenas de asteroides.

Nesta época, tornava-se evidente a existência de grupos de asteroides com similaridades nas propriedades espectrais. De maneira a facilitar a análise da distribuição composicional do CPA, as características espectrais podiam ser usadas para definir grupos de objetos, dando origem ao estudo taxonômico de asteroides.

A primeira tentativa de classificação de asteroides através de propriedades espectrais foi feita por Chapman et al. (1973) a partir do espectro de 32 asteroides. Os autores dividiram a amostra em três grupos principais, baseados nas cores destes objetos. Este parâmetro é definido pela subtração entre as magnitudes em comprimentos de onda distintos, isto é, se a reflectância em comprimentos de onda da região do vermelho no espectro visível for superior a da região do violeta, este objeto possui uma cor "avermelhada", caso as reflectâncias sejam de mesma magnitude nas duas regiões, o objeto possui uma cor "cinza". Desta forma, este parâmetro é diretamente relacionado a inclinação do espectro de reflectância. Os objetos foram classificados como: avermelhados (R - *red*, do inglês), moderadamente avermelhados (M - *medium red*) e planos (F - *flat*). E, por sua vez, subdivididos a partir da presença e o centro da banda próxima a $0.9 \mu\text{m}$ ou a ocorrência de uma queda em reflectância na região do ultravioleta, entre outros parâmetros.

Posteriormente, McCord and Chapman (1975a) notaram 36 grupos de tipos espectrais com base em uma parametrização dos espectros em uma amostra com 98 objetos. A análise do histograma de frequência do parâmetro de cor mostrou uma distribuição bimodal de cores. Segundo os autores, este fato estava relacionado com a predominância de dois grupos de espectros dentre o CPA.

Naquele mesmo ano, Chapman et al. (1975) realizaram a análise conjunta dos dados de espectrofotometria de 24 cores, polarimetria e radiometria presentes até o momento e obtiveram uma amostra com 110 asteroides. Os autores perceberam uma correspondência entre a distribuição de albedos e os grupos encontrados por McCord and Chapman (1975a). Desta forma, definiram duas classes de asteroides,

nas quais 90% dos objetos da amostra foram classificados:

- classe-C (*carbonaceous*): Objetos com cores cinzas e albedos inferiores a 0.11, com valores altos de para o mínimo da curva de polarização (P_{min}). Devido a similaridade aos espectros e albedos de meteoritos condritos carbonáceos, estes objetos apresentariam uma superfície composta por silicatos ricos em carbono, condensados a baixos valores de temperatura e pressão.
- classe-S (*stony*): Objetos avermelhados, com albedos moderadamente altos e valores baixos de P_{min} . Estes objetos geralmente apresentam assinaturas da presença de silicatos como olivina e piroxênio, como uma banda $\sim 1.0 \mu\text{m}$. Estes silicatos apresentam fortes bandas de absorção no ultravioleta, resultando em um espectro avermelhado na região visível do espectro.

Este modelo de classificação, com apenas duas classes de objetos, ficou conhecido como taxonomia CMZ, seguindo as iniciais dos autores deste trabalho (Chapman et al., 1975). A figura 2.4 mostra a distribuição destas classes com o semi-eixo maior. Na região externa há uma predominância de asteroides de tipo C, os quais se acredita que possuem uma superfície dominada pela presença do carbono, enquanto na região interna os tipos S, de composições rochosas, dominam o cinturão interno.

Bowell et al. (1978) propuseram uma ampliação do esquema anterior, utilizando não apenas a espectrofotometria de 24 cores, mas também cores UBV, além dos

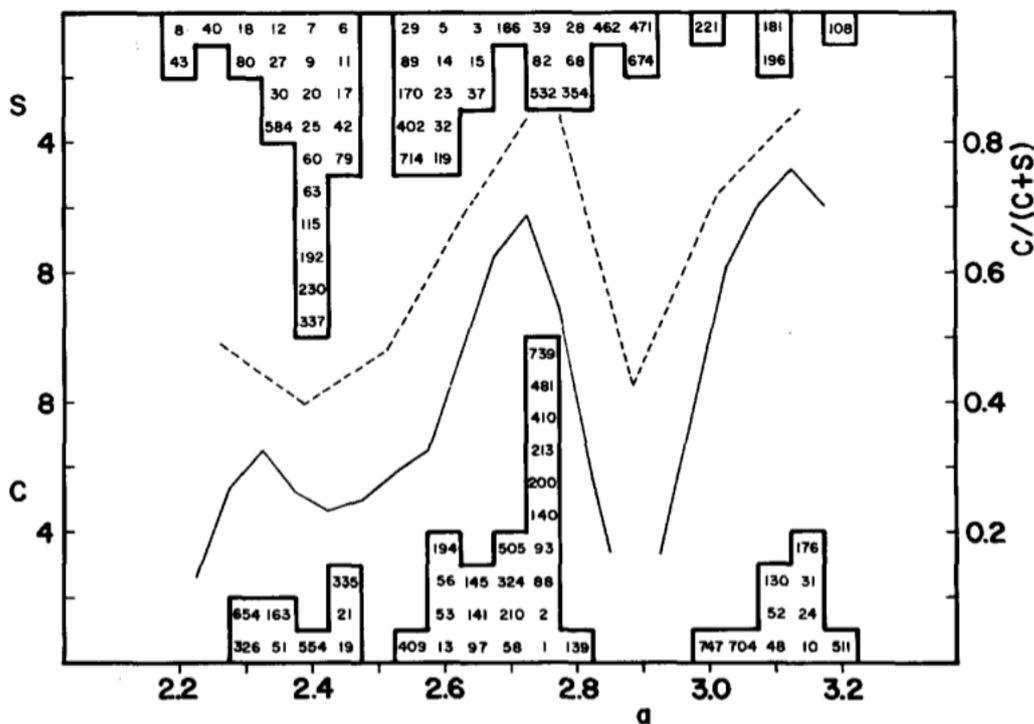


Figura 2.4: Distribuição das classes definidas pela taxonomia CMZ, C e S, pelo semi-eixo maior. Gráfico extraído de Chapman et al. (1975).

dados de radiometria e polarimetria. Desta forma, a amostra foi ampliada para 523 asteroides. Três novas classes de objetos foram adicionadas:

- classe-M: Objetos com espectros avermelhados e com um valor de albedo intermediário (0.1-0.2), os quais se assemelhavam a meteoritos com alto teor de Fe-Ni, chamados de meteoritos metálicos.
- classe-E: Objetos também com espectros avermelhados, porém com um alto valor de albedo. Estes se assemelhavam a classe de meteoritos acondritos enstatite.
- classe-R: Objetos avermelhados com valores altos de albedo.

Novamente, $\sim 10\%$ de objetos não foram classificados em nenhuma classe, enquanto $\sim 20\%$ foram classificados como ambíguos. Mesmo com a adição de novas classes taxonômicas, os autores salientam um alto nível de diversidade espectral dentre cada uma delas.

Trabalhos posteriores seguiram ampliando este sistema taxonômico. Degewij and van Houten (1979) propuseram a classe D, para objetos de baixo albedo e espectros muito avermelhados, como aqueles observados na região dos troianos.

Gradie and Tedesco (1982) sugeriram as classes: P, para objetos de cor moderadamente avermelhada e com baixo albedo; e F, para objetos de cores neutras, similares aos tipos C, porém sem a queda de reflectância na direção do ultravioleta. Estes autores sugeriram para os tipos P e D, uma superfície composta por silicatos ricos em carbono, condensados a temperatura ainda inferiores aquelas para os tipos C. A figura 2.5 mostra a distribuição dos tipos taxonômicos com a distancia heliocêntrica. Este resultado foi explicado considerando a remanescência de um gradiente composicional primitivo no CPA. Segundo esta interpretação, os asteroides teriam se formado razoavelmente próximos a região onde estão atualmente. Finalmente, Veeder et al. (1983) utilizaram fotometria no sistema JHK, no infravermelho próximo, para distinguir uma classe A de asteroides, dentre a classe R.

O objetivo destas classificações taxonômicas era agrupar objetos com propriedades superficiais semelhantes afim de estudar as características da distribuição espacial de classes, e obter uma visão ampla sobre distribuição de composições no CPA. Entretanto, é necessário ressaltar que diversos trabalhos paralelos realizados entre as décadas de 1970 de 1980 se dedicavam à comparação direta das propriedades espectrais de asteroides, em diversos comprimentos de onda, a aquelas observadas em de meteoritos (e.g, Gaffey and McCord (1978, 1979)). Estes estudos mineralógicos produziram uma série de resultados importantes, como por exemplo: a identificação da banda próximo a $3\mu\text{m}$ em Ceres, que estaria relacionada a presença de materiais hidratados na superfície (Larson et al., 1979; Lebofsky, 1978).

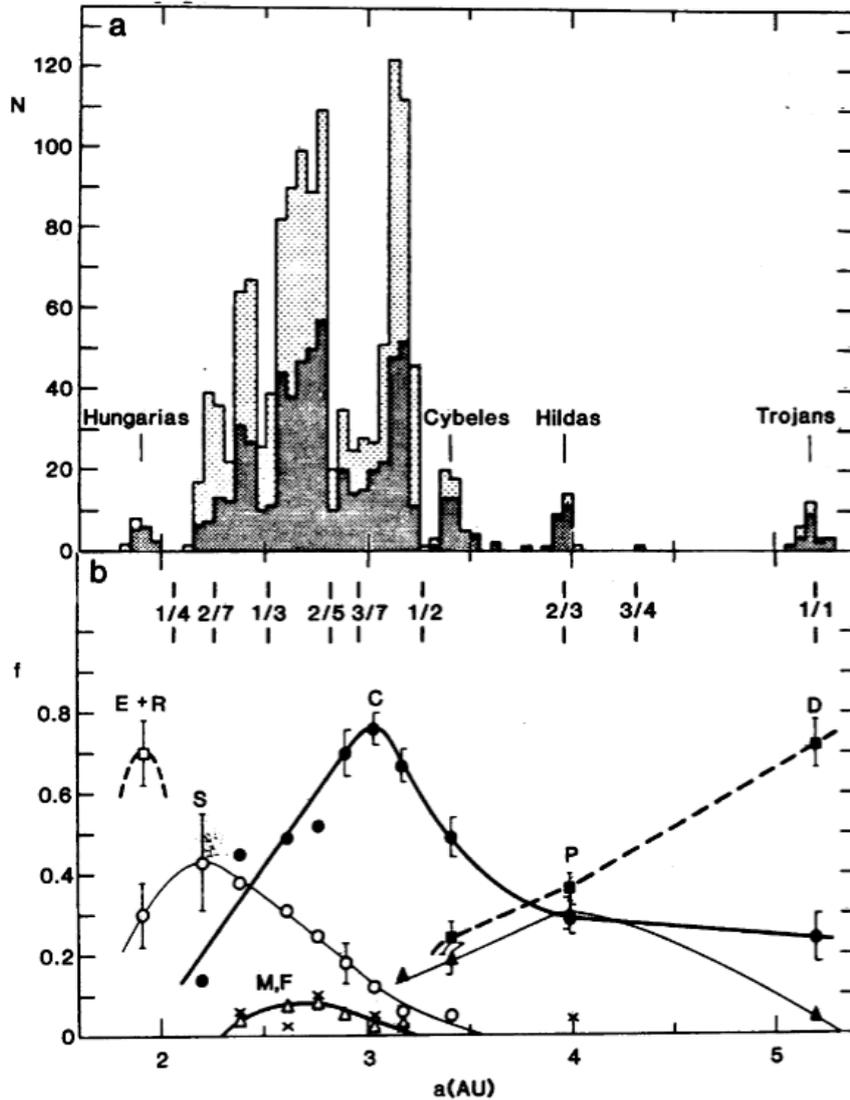


Figura 2.5: *topo* - Histograma do numero de objetos por semi-eixo maior. *abaixo* - Distribuição de classes taxonômicas de Bowell por semi-eixo maior. Extraído de Gradie and Tedesco (1982).

O ano de 1979 deu início a uma campanha observacional denominada *The Eight Color Asteroid Survey* (ECAS). Nesta campanha utilizou-se um sistema fotométrico com oito filtros de banda estreita que cobria a região de $0.34\text{-}1.04 \mu\text{m}$ (Tabela 2.1). Ao total foram observados 589 asteroides, contendo amostras de todo o Cinturão de Asteroides e ainda dos grupos dinâmicos de Cibeles, Hildas, Troianos e Hungarias, assim como de famílias de asteroides e NEAs (dados disponíveis em Zellner et al. (2009)).

Além dos dados de espectrofotometria do ECAS, esta época contou com um aumento exponencial do numero de albedos determinados. A partir dos dados produzidos pelo satélite IRAS (*Infrared Astronomical Satellite*) foram calculados albedos e diâmetros de ~ 2000 objetos. A coletânea destes dados ficou conhecida

como *IRAS Minor Planet Survey* (IMPS), e pode ser obtida em Tedesco et al. (2004).

Tabela 2.1: Sistema de filtros utilizados pelo ECAS

ID	Comprimento de onda	
	Central (nm)	Cobertura espectral (nm)
s	310	0.080
u	320	0.133
b	430	0.110
v	545	0.055
w	705	0.068
x	860	0.080
p	955	0.083
z	1055	0.090

A partir dos dados do ECAS e do IRAS foram criados três sistemas taxonômicos: Tholen (1984), Barucci et al. (1987) e Tedesco et al. (1989). Sendo o primeiro, um dos sistemas taxonômicos mais utilizados na literatura até o presente, e referenciado posteriormente nesta tese.

Taxonomia de Tholen

Em oposição aos sistemas taxonômicos propostos anteriormente, a taxonomia de Tholen utilizou técnicas computacionais aplicadas às cores do ECAS e, quando necessário, aos albedos do IRAS. A amostra de Tholen contava com os 405 asteroides que possuíam espectrofotometria de melhor qualidade dentro do ECAS.

A classificação foi feita a partir do uso de algoritmos de Análise de Componentes Principais e Árvore de Extensão Mínima (PCA e MST, respectivamente, siglas do termo em inglês). A análise mostrou que 95% da variância recaía sobre duas componentes principais, o que mostrava a sensibilidade do método às duas características mais presentes nos espectros ECAS, a queda de reflectância no ultravioleta e a banda de absorção de olivina/piroxênio próxima a $1 \mu\text{m}$.

A figura 2.6 mostra o espaço das duas componentes principais. A aplicação do algoritmo MST identifica as classes A, C, D, S, T, X, V, Q e R, sendo que as três últimas contêm um objeto cada: (4) Vesta, (349) Dembowska e (1862) Apollo, respectivamente. O algoritmo foi utilizado para subdividir a classe C em três subclasses: F, B e G. Finalmente, a classe X foi subdividida com o auxílio do albedo: E, para objetos com alto albedo; M, para os de albedo intermediário e P, para os de baixo albedo.

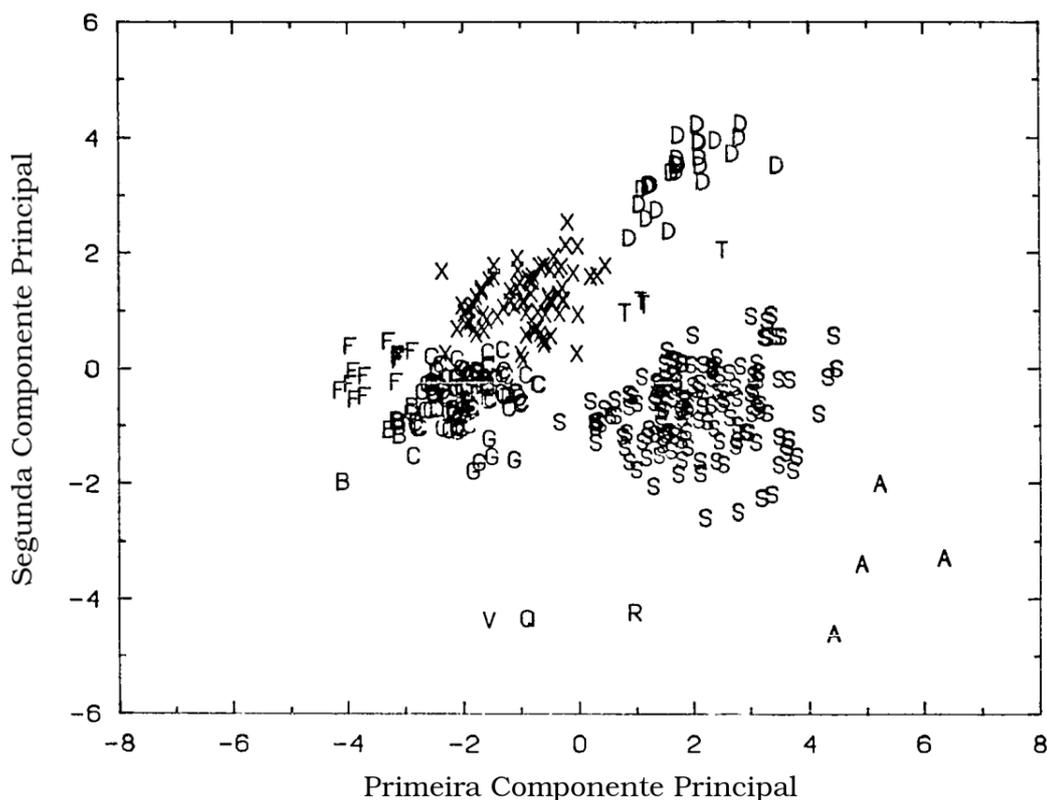


Figura 2.6: Identificação das classes taxonômicas de Tholen (1984) no espaço de componente principais.

Os sistemas taxonômicos de Tholen (1984), Barucci et al. (1987) e Tedesco et al. (1989), apesar de utilizarem uma metodologia completamente distinta, produziram uma distribuição de classes semelhantes. Este fato indica uma certa consistência na distribuição de propriedades físicas dentre os asteroides. Cada modelo de classificação possui uma série de vantagens e desvantagens (ver em Tholen and Barucci (1989)). Entretanto, a taxonomia de Tholen foi adotada como o padrão da época.

A partir de dados do ECAS, Vilas and Gaffey (1989) identificaram em asteroides do grupos Hildas e Cybeles, uma fraca banda de absorção próximo a $0.7\mu\text{m}$. Esta banda é comum em meteoritos condritos carbonáceos CM2. Os autores sugeriram que a banda era o resultado de transições de intervalência de óxidos de ferro em flossilicatos. Estes tipos de silicatos são formados através de uma lenta alteração química de minerais causada pela presença de água líquida. A identificação desta característica espectral é um dos tópicos centrais desta tese, e sua importância será tratado com mais detalhe na sessão 2.3 e no capítulo 4.

Os sistemas taxonômicos propostos até então auxiliaram na evolução da caracterização do CPA. Gradie et al. (1989) fizeram uma análise similar ao trabalho de Gradie and Tedesco (1982), desta vez considerando os novos sistemas taxonômicos e realizando uma correção por viés observacional. Os autores confirmaram o resul-

tado anterior, sugerindo que haveria de fato um gradiente composicional no CPA, ponderando a possibilidade de que as superfícies e a distribuição dos objetos provavelmente sofreram alterações desde a formação. Wasson and Wetherill (1979) e Wetherill (1979), a partir de estudos da dinâmica de pequenos corpos, notaram a possibilidade de corpos formados em regiões mais externas do Sistema Solar, evoluírem para órbitas estáveis dentro do CPA.

Bell (1989) sintetizaram as sugestões mineralógicas de análogos meteoríticos para cada classe da taxonomia de Tholen (Tabela 2.2). Os autores propuseram super-classes de objetos de acordo com a mineralogia proposta:

- Primitivos: Objetos que sofreram pouco ou nenhum aquecimento.
- Metamórficos: Objetos que sofreram algum processo de aquecimento, suficiente para exibir alterações no espectro.
- Ígneos: Objetos em que a mineralogia superficial foi formada através de um processo de derretimento parcial ou total.

Tabela 2.2: Tradução livre para as tipos de objetos identificados por Bell (1989).

Classe de Bell	Classe de Tholen	Mineralogia Sugerida	Meteoritos Análogos
Primitivos	D	orgânicos, gelo?	Nenhum
	P	orgânicos, gelo?	Nenhum
	C	orgânicos, carbono, argila	CI e CM
	K	olivina, piroxênio, carbono	CO e CV
	Q	piroxênio, olivina, NiFe	H,L e LL?
Metamórficos	B+F+G	argila, carbono	CC alterados
	T	?	CC alterados?
Ígneos	V	basalto, piroxênio, olivina	HED
	R	olivina, piroxênio	Acondritos ricos em ol.
	S	Piroxênio, olivina, NiFe avermelhado	Palasitas, Lodranitos
	A	olivina	Brachinitas
	M	NiFe	Metálicos
	E	Fe-livre, piroxênio	Aubritos

Em um trabalho anterior, Bell (1986), classificava apenas os tipos C, P e D

como membros da superclasse de primitivos. Embora com o passar do tempo o entendimento sobre a mineralogia de meteoritos e asteroides foi sofrendo mutações, o termo primitivo ainda é geralmente usado na literatura para se referir aos objetos destas três classes.

O surgimento do Dispositivo de Carga Acoplada (CCD, sigla do termo em inglês) tornou possível uma nova era da caracterização física de asteroides. A espectroscopia de baixa resolução passou a ser feita a partir de conjuntos de redes de difração, ao contrário da espectrofotometria com filtros realizada até o momento. Desta forma a resolução espectral é consideravelmente maior e o espectro é adquirido por inteiro de maneira simultânea, diminuindo o efeito de variação espectral devido à rotação do objeto. A possibilidade de rearranjar a resolução espectral (*rebinning*), em conjunto com o avanço na sensibilidade do CCD e telescópios mais potentes, permitiram a obtenção de espectros de asteroides de dimensões físicas menores e com maior qualidade.

O primeiro espectro de reflectância de um asteroide obtido através de um CCD foi apresentado na tese de doutorado de Vilas (1984). Desde então milhares de objetos foram observados, incluindo duas grandes campanhas observacionais: SMASS e SMASSII (Bus and Binzel, 2004), e S3OS2 Lazzaro et al. (2004). Estas campanhas observaram aproximadamente 2000 asteroides.

Taxonomia de Bus

Bus (1999) propôs um sistema taxonômico utilizando os dados de espectroscopia de baixa resolução com CCD, coletados pelas campanhas SMASS e SMASSII. Todos os espectros utilizados cobriam uma região de 0.44-0.92 μm , sendo normalizados a 0.55 μm . Ao contrário da taxonomia de Tholen, a classificação de Bus foi baseada apenas em características espectrais, e não fez uso de informações de albedos.

A metodologia aplicada, assim como na taxonomia de Tholen, utilizava um algoritmo de Análise de Componentes Principais. Os dados de entrada eram produzidos pelo ajuste de uma *spline* cúbica no espectro, posteriormente re-amostrado em 48 comprimentos de onda distribuídos uniformemente ao longo de toda a cobertura espectral. Além das duas primeiras componentes principais, a inclinação espectral e outras características espectrais desempenhavam um papel fundamental.

Bus e colaboradores identificaram três complexos de asteroides: S, C e X, além de classes individuais: A, B, D, K, L, Ld, O, Q, R, T e V. As letras de identificação de cada classe foi assimilada de modo a dar continuidade a taxonomia de Tholen e/ou Tedesco. Os complexos foram subdivididos de acordo com alguns critérios:

- Complexo S: Levando em consideração que as classes A, Q, R, K e L, também apresentam a banda de olivina/piroxênio, esta complexo foi subdivido em S_a , S_q , S_r , S_k e S_l de acordo com a similaridade com as classes anteriores.

- Complexo C: Espectros com inclinação espectral próximo a zero, porém negativos foram classificados como C_b . Aqueles que apresentam a banda de absorção $\sim 0.7 \mu\text{m}$ como C_h . Os objetos que apresentam uma queda acentuada no UV como C_g ou C_{gh} , caso também apresentem a banda em $0.7 \mu\text{m}$.
- Complexo X: X_e para espectros côncavos e com banda de absorção no ultravioleta ($<0.5 \mu\text{m}$). Para espectros não côncavos mais avermelhados, X_k e X_c para os menos avermelhados.

Taxonomia de DeMeo

Uma extensão da taxonomia de Bus para o infravermelho próximo, com os dados obtidos pelo SMASSII, foi proposta por DeMeo et al. (2009). Os autores utilizaram espectros que cobriam a região de $0.4\text{-}2.5 \mu\text{m}$, com um total de 371 asteroides. A metodologia empregada é essencialmente a mesma de Bus and Binzel (2002). Aproximadamente todas as classes do trabalho anterior foram reobtidas. Contudo, com a informação no infravermelho próximo 3 classes foram excluídas e uma criada. A classe L_d , pôde ser incorporada pelas classes D e L , dependendo do avermelhamento do espectro, enquanto as classes S_K e S_L foram englobadas nas demais classes do complexo S, o qual teve a classe S_V adicionada. Esta última classe é caracterizada por bandas de olivina/piroxênio mais estreitas do que as demais classes do complexo, e seria uma classificação intermediária entre o complexo S e a classe V.

A tabela 2.3 mostra a relação entre as taxonomias de Tholen, Bus e Bus-DeMeo, assim como a sugestão composicional para classe de objeto.

Uma parte considerável dos trabalhos realizados pelos autores das campanhas SMASSII e S3OS2 estiveram focados no estudo da distribuição de características espectrais dentre as famílias de asteroides. Entre uma vasta quantidade de resultados importantes, destacamos alguns: Lazzaro et al. (2000) descobriram o primeiro asteroide de tipo V fora na região interna do CPA; a taxonomia de Bus and Binzel (2002) revelou um duplo pico na distribuição espacial de tipos S, desta forma, estes tipos taxonômicos continuam abundantes em regiões mais externas do CPA; Mothé-Diniz et al. (2003) notaram que a distribuição de objetos do complexo C é distinta quando analisada as populações de alta e baixa inclinação.

Os dados produzidos por estas campanhas seguem sendo amplamente reutilizados pela literatura, como é o caso do trabalho descrito no capítulo 3.

O advento de novas tecnologias seguiram impulsionando o entendimento sobre características composicionais do Cinturão de Asteroides. O projeto *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS) observou uma grande área do céu utilizando cinco filtros fo-

Tabela 2.3: Tabela de comparação entre os principais tipos taxonômicos e as respectivas sugestões mineralógicas. Adaptada de DeMeo et al. (2015)

Complexo	Tholen 0.35-1.0 μm	Bus 0.4-0.9 μm	Bus-DeMeo 0.45-2.5 μm	Mineralogia Proposta
C	<ul style="list-style-type: none"> •  F •  B •  C •  G 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>B</i> • <i>C</i> • <i>C_b</i> • <i>C_g</i> • <i>C_{gh}</i> • <i>C_h</i> 	<ul style="list-style-type: none"> •  <i>B</i> •  <i>C</i> •  <i>C_b</i> •  <i>C_g</i> •  <i>C_{gh}</i> •  <i>C_h</i> 	<p>Materiais opacos, carbono, filossilicatos. Algumas bandas de absorção fracas indicam a presença de olivina e piroxênio. Análogos a meteoritos condritos carbonáceos com exceção dos tipos CV.</p>
S	<ul style="list-style-type: none"> •  S 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>S</i> • <i>S_a</i> • <i>S_q</i> • <i>S_r</i> • <i>S_k</i> • <i>S_l</i> 	<ul style="list-style-type: none"> •  <i>S</i> •  <i>S_a</i> •  <i>S_q</i> •  <i>S_r</i> •  <i>S_v</i> 	<p>Presença de olivina e piroxênio. Relacionados a Palasitas, condritos R, condritos ordinários, acondritos primitivos? Os tipos <i>S_v</i> podem estar relacionados a acondritos basálticos.</p>
X	<ul style="list-style-type: none"> •  E •  M •  P 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>X</i> • <i>X_c</i> • <i>X_e</i> • <i>X_k</i> 	<ul style="list-style-type: none"> •  <i>X</i> •  <i>X_c</i> •  <i>X_e</i> •  <i>X_k</i> 	<p>E: Relacionados a meteoritos enstatite P: Material opaco, carbono M: Meteoritos metálicos?</p>
Classes Individuais	<ul style="list-style-type: none"> •  T •  D •  O •  R •  V •  A 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>T</i> • <i>D</i> • <i>Q</i> • <i>O</i> • <i>R</i> • <i>V</i> • <i>A</i> • <i>K</i> • <i>L</i> • <i>L_d</i> 	<ul style="list-style-type: none"> •  <i>T</i> •  <i>D</i> •  <i>Q</i> •  <i>O</i> •  <i>R</i> •  <i>V</i> •  <i>A</i> •  <i>K</i> •  <i>L</i> 	<p>T: ? D: Materiais opacos, orgânicos Q: Condritos ordinários LL O: Piroxênio, olivina R: Olivina, piroxênio V: Meteoritos HED A: Palasita, brachnita, condritos R, olivina K: Condritos carbonáceos CO e CV L: Ricos em inclusões de CAI, espinela</p>

tométricos (Tabela 2.4). A campanha produziu dados de cores de 104 mil objetos (MOC - *Moving Object Catalog*) desde o primeiro até o quarto e último lançamento de dados (Ivezić et al., 2001; Parker et al., 2008).

Tabela 2.4: Sistema de filtros do SDSS

ID	Comprimento de onda	Cobertura
	Central (nm)	espectral (nm)
u'	358.0	33.9
g'	475.4	138.7
r'	620.4	124.0
i'	769.8	130.3
z'	966.5	255.8

Carvano et al. (2010) aplicaram uma classificação taxonômica desenvolvida de forma a ser compatível a taxonomia de Bus, levando em consideração as limitações devidas à baixa resolução espectral (dados disponíveis em Hasselmann et al. (2011)).

Um total de oito classes foram definidas: C_p , S_p , X_p , Q_p , V_p , D_p e A_p , \mathcal{L}_p . A designação foi escolhida de forma a ser homônima com as classes definidas por Bus and Binzel (2002), a letra "p" foi adicionada para explicitar que a classificação foi feita a partir da fotometria (*photometry*, em inglês). A classe \mathcal{L}_p recebeu uma tipografia diferente porque, diferente das demais, esta classe agrega objetos que são similares aos tipos L , L_p e K da taxonomia de Bus.

A figura 2.7 mostra a distribuição das classes taxonômicas definidas por estes autores. É possível notar que a maior parte delas é observada em todas as regiões do Cinturão de asteroides, apesar de que em densidades diferentes. Esta imagem retrata a dispersão de objetos de pequenas dimensões, com diferentes características superficiais ao longo do CPA.

Além do volume massivo de dados de cores de asteroides obtidos pelo SDSS, o satélite *Wide-field Infrared Survey Explorer* produziu dados de albedo e diâmetro de ~ 100 mil asteroides (Mainzer et al., 2016). O conjunto dos dados destas formaram uma poderosa ferramenta de análise do distribuição composicional do CPA.

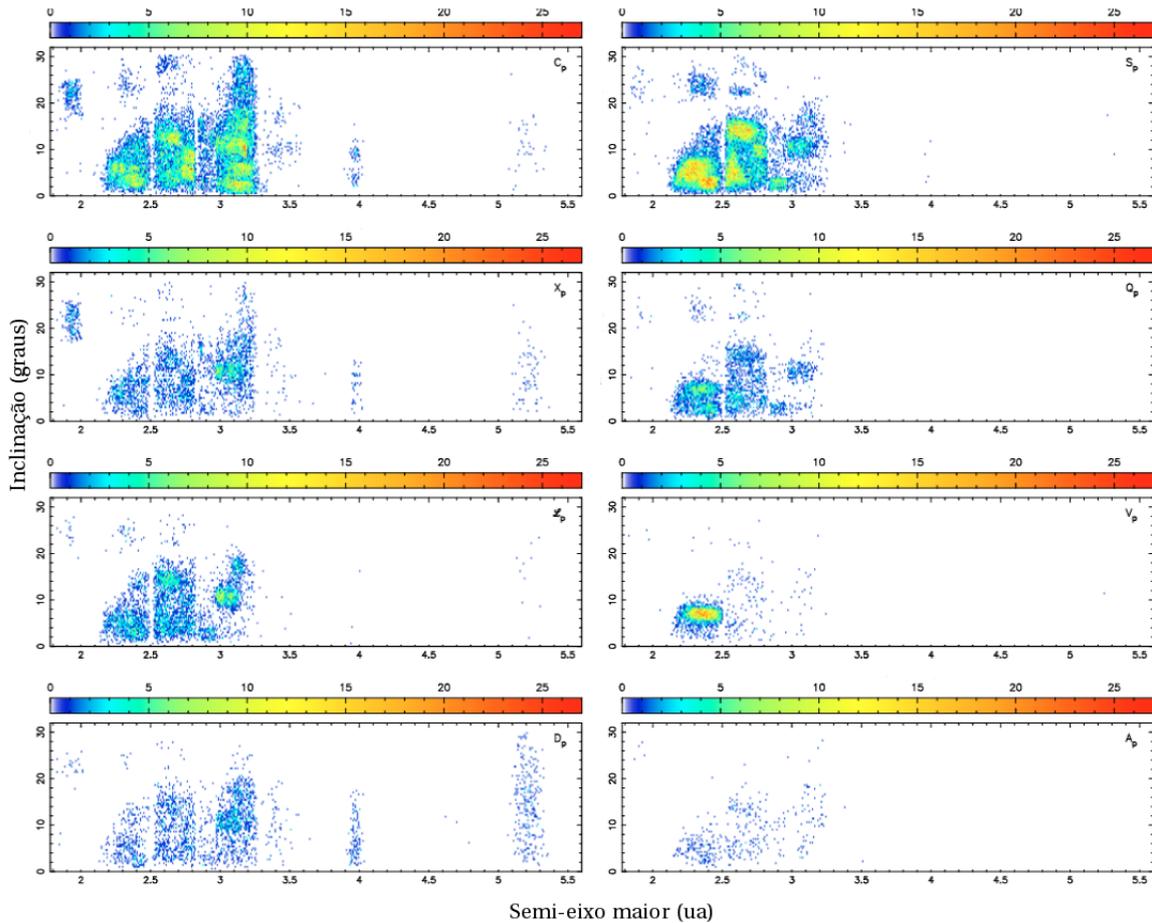


Figura 2.7: Distribuição das cada classe definidos por Carvano et al. (2010) no CPA. Adaptado do trabalho original.

2.2 A Estrutura do Cinturão Principal de Asteroides

A investigação da estrutura composicional do Cinturão Principal de asteroides obteve grandes avanços desde o trabalho de Bobrovnikoff (1929). Em grande parte, este progresso deve-se à análise mais detalhada de espectros de asteroides, graças à chegada do CCD, e ao volume massivo de dados produzidos pelas grandes campanhas observacionais, como o SDSS e o WISE.

Enquanto a percepção da distribuição de propriedades físicas da população de objetos de grandes dimensões se manteve razoavelmente similar à daquela descrita por Gradie and Tedesco (1982) e Gradie et al. (1989) (figura 2.5), a análise da população de objetos pequenos, revelou um grande nível de espalhamento de tipos taxonômicos ao longo de todo o cinturão de asteroides (figura 2.7).

Em um trabalho recente, DeMeo and Carry (2013) realizaram uma análise estatística da distribuição de massa no CPA, utilizando o grande volume de dados do SDSS e WISE. A maior parte dos estudos anteriores se baseavam na distribuição

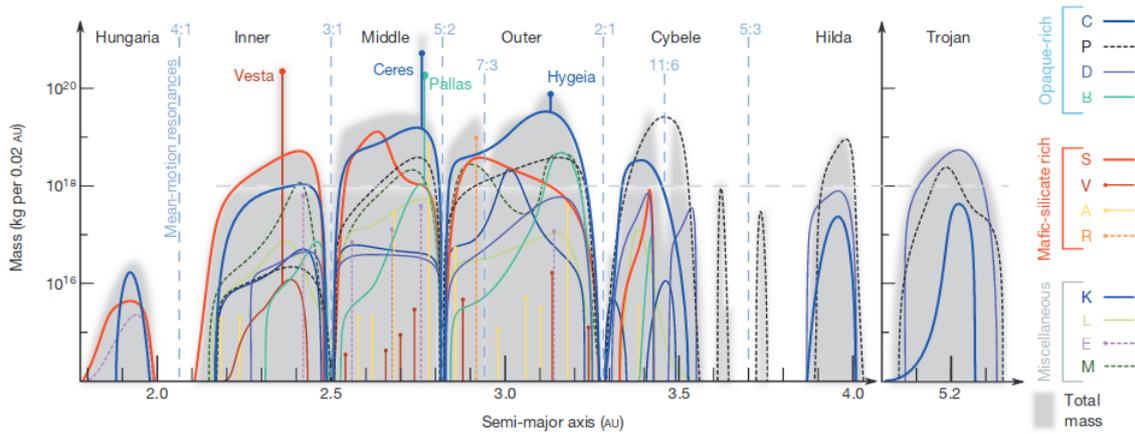


Figura 2.8: Distribuição de massa para cada classe taxonômica (DeMeo and Carry, 2014).

em semi-eixo maior da frequência de cada classe taxonômica.

É necessário salientar que há diversas imprecisões envolvidas na determinação de massa de um asteroide. Enquanto as bases de dados atuais contêm informações de propriedades superficiais de centenas de milhares de asteroides, pouco ainda se sabe sobre a estrutura interna destes objetos. De Meo & Carry se basearam em resultados de estudos de famílias de asteroides, que frequentemente apresentam uma relativa homogeneidade na distribuição de cores e albedos, para considerar que o interior dos asteroides deve ser também razoavelmente homogêneo. Entretanto, objetos originados de uma colisão catastrófica, foram provavelmente reacumulados, e a composição superficial deve ter sido contaminada pela poeira produzida pelo impacto. Há ainda o fato de que a metodologia frequentemente empregada na análise de famílias assume como uma condição *a-priori* que a distribuição de propriedades deve ser homogênea, e objetos dinamicamente ligados as famílias, que possuem propriedades espectrais distintas, são considerados "intrusos" ou membros da estrutura de fundo do CPA. As incertezas instrumentais e de modelos de determinação de albedo e diâmetro também são fontes consideráveis de incerteza na análise realizada por estes autores (ver em Alí-Lagoa et al. (2016)).

Desta forma, uma série de passos e considerações tiveram que ser feitas até a determinação da massa dos objetos. Primeiramente, os diâmetros dos asteroides foram obtidos do catálogo WISE ou estimados considerando o albedo médio da classe taxonômica e a magnitude absoluta obtida do catálogo MOC4 do SDSS. Por sua vez, o volume foi calculado aproximando a forma de um asteroide para uma esfera. Finalmente, a massa foi estimada considerando valores de densidade média de objetos da classe taxonômica obtidos por Carry (2012).

A figura 2.8 mostra a distribuição de massa para cada tipo taxonômico. A maior parte da massa está concentrada nos tipos C, P, S, B e M, em ordem decrescente.

Desta forma, a classe C possui aproximadamente seis vezes mais massa que a classe S. É válido notar que a distribuição é altamente enviesada pelos asteroides mais massivos: (1) Ceres, (2) Pallas, (4) Vesta e (10) Hygiea. Estes objetos correspondem respectivamente a 35%, 10%, 8% e 3% da massa total encontrada para do CPA. Mesmo removendo-se (1) Ceres e (10) Hygiea, a classe C é ainda três vezes mais massiva do que a classe S.

A maior parte da massa do cinturão interno está concentrada em (4) Vesta e nos tipos S (20%), com apenas 5% para a classe C. No cinturão intermediário, (1) Ceres e (2) Pallas retêm a maior parte da massa. Removendo estes objetos obtêm-se um valor de 30% da massa em tipos C e S, e 20% em tipos P. A maior parte da massa do cinturão externo está concentrada em tipos C, onde o objeto mais massivo é (10) Hygiea. Objetos de tipos P dominam as regiões dos Cybeles e Hildas, enquanto a massa nos troianos é dominada por objetos de tipo D.

Os autores encontraram uma massa total do CPA de $\sim 2.7 \times 10^{21}$ kg. Esta estimativa representa aproximadamente 5×10^{-4} da massa da Terra. O pequeno valor encontrado para a massa do CPA, em conjunto com a pequena massa do planeta Marte estão em desacordo com modelos de formação planetária que sugerem uma distribuição suave de material no disco protoplanetário (Weidenschilling, 1977).

Atualmente é entendido que no passado do Sistema Solar ocorreram processos dinâmicos envolvendo a formação e evolução dos planetas, que resultariam na depleção de massa e no espalhamento de tipos taxonômicos no CPA.

Há, de fato, uma gama de modelos de evolução de dinâmica que tenta reproduzir estes e outros vínculos observacionais. Dentre eles, os mais citados são o Modelo de Nice Gomes et al. (2005); Levison et al. (2009); Morbidelli et al. (2005); Tsiganis et al. (2005) e o *Grand Tack Scenario* (Walsh et al., 2011). Diversas extensões e adaptações destes trabalhos foram desenvolvidas para tentar explicar outras características do Sistema Solar (ver em Morbidelli et al. (2015)).

O modelo proposto por Walsh et al. (2011), propõe que os planetas gigantes teriam se formado mais próximos ao Sol do que as suas órbitas atuais. A acreção de massa de Júpiter aconteceria a 3.5 ua e nos primeiros milhões de anos do Sistema Solar, o planeta migraria até ~ 1.5 ua. Neste momento, o planeta Saturno alcança Júpiter, e ambos começam a migrar no sentido oposto até a total depleção do gás do disco protoplanetário, atingindo as posições de 5 e 7 ua respectivamente.

Neste cenário, os autores propõem duas regiões de acreção para os corpos parentais dos asteroides, uma anterior e outra posterior a região de acreção de Júpiter (Figura 2.9). Os objetos acretados na primeira região, teriam experimentado temperatura mais altas, o que causaria uma interação pequena com materiais voláteis durante a formação. Esta região produziria objetos similares ao que hoje se entende dos condritos ordinários e conseqüentemente dos asteroides de tipo S. Em oposição,

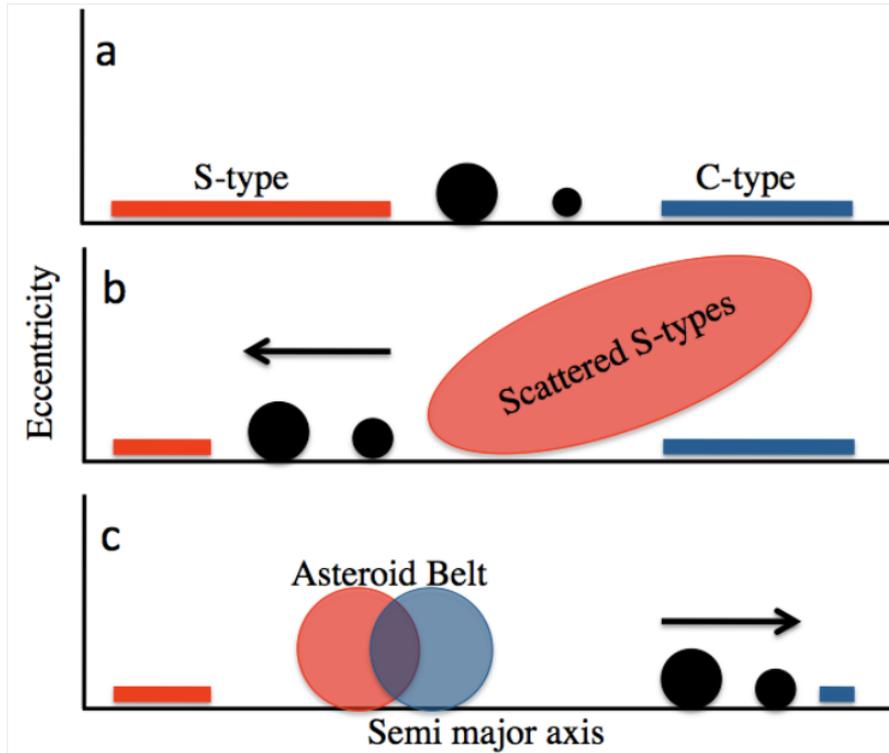


Figura 2.9: Conceito da região de formação dos asteroides de tipo S e C (a), de acordo com o *Grand Track*. A migração de Júpiter e Saturno (b) produziria uma aproximação da distribuição de objetos do CPA hoje (c). Extraído de Walsh et al. (2011).

os objetos formados na região externa a Júpiter, teriam uma forte interação com materiais voláteis, formando objetos similares a parte dos condritos carbonáceos e aos asteroides do complexo C. A migração dos planetas para a parte mais interna do Sistema Solar causaria uma grande remoção de massa no que viria a ser o CPA. A posterior migração do planeta para a parte externa faria com que objetos formados em nestas regiões fossem implantados na região interna a Júpiter, produzindo uma mistura de objetos de diferentes composições no CPA.

O modelo do *Grand Track* é capaz de explicar a baixa massa e a mistura de asteroides de diferentes tipos taxonômicos. Todavia, a distribuição de excentricidades resultante das simulações deste trabalho é maior do que a observada hoje (Walsh et al., 2012).

Um conflito ainda maior está relacionado a época em que a migração deve ocorrer. As datas de acreção dos planetesimais são geralmente calculadas em relação as inclusões de alumínio e cálcio em meteoritos condríticos (CAIs, do termo em inglês *calcium-aluminum-rich inclusions*). Estes são considerados os sólidos mais antigos do Sistema Solar. Connelly et al. (2012) estimaram uma idade de 4567.30 ± 0.16 Ma, esta idade é frequentemente utilizada na literatura como o t_0 e o início da formação do Sistema Solar. Dauphas and Pourmand (2011) sugerem a acreção de 50% da

massa de Marte ocorreu em até 2 Ma. Enquanto, Krot et al. (2015) estimou que a época de acreção dos condritos carbonáceos foi entre 2.5-4 Ma. Desta maneira, para explicar a baixa massa de Marte, a migração deveria ocorrer nos estágios iniciais da formação planetária, conflitando com a formação dos condritos carbonáceos, já que eles devem estar formados quando a migração acontecer.

O Modelo de Nice é um modelo de evolução dinâmica que teria ocorrido em um período subsequente ao modelado pelo *Grand Tack*. A motivação deste modelo é, entre outras, a necessidade de explicar a órbita atual dos planetas gigantes. O modelo de Walsh e colaboradores, assim como outros modelos (Morbidelli et al., 2007), preveem que os planetas se formam em órbitas circulares e coplanares, em contraste com a excentricidade observadas hoje para Júpiter e Saturno, respectivamente. Desta forma, os autores deste modelo propõem período de instabilidade dinâmica, causado principalmente pela interação com um disco massivo de planetesimais localizado após a órbita de Netuno.

A época na qual a instabilidade teria ocorrido é vinculada a observação de um período em que a taxa de impactos e criação de crateras na Lua teve um súbito aumento, sendo este fenômeno chamado de "o bombardeamento tardio" (LHB - do termo em inglês *Late Heavy Bombardment*). Norman and Nemchin (2014) estima que o LHB teria ocorrido ~ 450 Ma após a remoção de gás do disco protoplanetário.

Outra motivação do modelo é reproduzir a configuração orbital dos troianos de Júpiter. A distribuição de inclinações observada não condiz com uma formação destes objetos *in-situ* (Morbidelli et al., 2005). O modelo prevê que após o período de migração, a região dos troianos seria preenchida por planetesimais provenientes do disco transnetuniano. Desta forma, além de uma população dinamicamente excitada, os troianos devem possuir uma certa homogeneidade composicional, e espectros compatíveis com aqueles de objetos da região dos TNO, tipicamente das classes D e P. A inserção de objetos de tipos D e P no CPA é também creditada ao modelo.

Por fim, o modelo de Nice é capaz de reproduzir os valores observados das excentricidades do CPA, solucionando um dos problemas deixados pelo modelo do *Grand Tack*.

A combinação dos modelos do *Grand Tack* e do Modelo de Nice assumem que asteroides de tipo S se formaram na região de 2-3 ua; os de C entre 3-15 ua, e os tipos P e D na região de $\sim 15-30$ ua. Estas regiões estão em grande contraste com a suposição de Gradie and Tedesco (1982), em que os asteroides teriam se formado relativamente próximos às posições onde ocupam atualmente.

2.3 O Papel da Água no Sistema Solar

A caracterização detalhada de CPA é um passo fundamental para restringir os modelos dinâmicos e se aproximar de uma descrição mais realista da formação do Sistema Solar. Em especial, é necessário entender melhor a diversidade de composições, a quantidade e a natureza do conteúdo de água dos objetos de classes primitivas (C, P e D). Estas informações podem fornecer pistas de onde os asteroides primitivos se formaram, e como eles evoluíram para as órbitas que ocupam hoje.

Uma outra motivação para estudar a conteúdo de água no CPA é a possível relação do material volátil na Terra com os corpos parentais dos meteoritos condritos carbonáceos, associados aos asteroides de tipo C. Se a Terra se formou em uma região ainda mais próxima do Sol do que os corpos parentais dos condritos ordinários e dos asteroides de tipo S, o material dos planetesimais que compuseram nosso planeta seriam ainda mais pobres em voláteis. O processo de acreção e diferenciação da Terra, e a colisão com outro astro que originou a Lua (Canup and Asphaug, 2001), produziram um aquecimento capaz de remover ainda mais o material volátil de sua composição original.

Atualmente, analisa-se a possibilidade de uma origem exogênica para estes materiais. Owen and Bar-Nun (1995) propuseram que a água e o material orgânico teriam sido entregues à Terra por cometas. Entretanto a análise das razões isotópicas dos elementos que compõem os oceanos da Terra e os cometas, em especial a razão do deutério e hidrogênio (D/H), estão em grande desacordo (Figura 2.10), estando em muito melhor acordo com o valor medido para os meteoritos das classes dos condritos carbonáceos. Krot et al. (2015) atentaram ao fato de que todos valores de D/H de cometas foram medidos através da coma destes objetos. Brown et al. (2012), através de simulações da atividade cometária, concluíram que é muito pouco provável que a coma e o núcleo do cometa apresentem um mesmo valor de D/H. Ainda assim, Morbidelli et al. (2000) sugerem que a contribuição maior para o material volátil deve ter sido de fato do CPA.

A ideia de que a água dos oceanos da Terra tenha origem no CPA ganhou força com as recentes descobertas de gelo de água nas superfícies de asteroides nas regiões externas do CPA (Campins et al., 2010; Licandro et al., 2011; Rivkin and Emery, 2010; Takir and Emery, 2012), e de alguns objetos que apresentam atividade cometária, supostamente pela sublimação de gelo de água (ver em Jewitt et al. (2015)). Estes últimos receberam o nome de cometas do Cinturão Principal (MBC, do termo em inglês *Main Belt Comets*). Desta forma, a quantidade de água no cinturão de asteroides pode ter sido consideravelmente maior do que pensado anteriormente.

Neste contexto, o termo "linha do gelo de água" é utilizado para delimitar a região na qual o gelo de água é estável, e atuou na acreção dos planetesimais. A

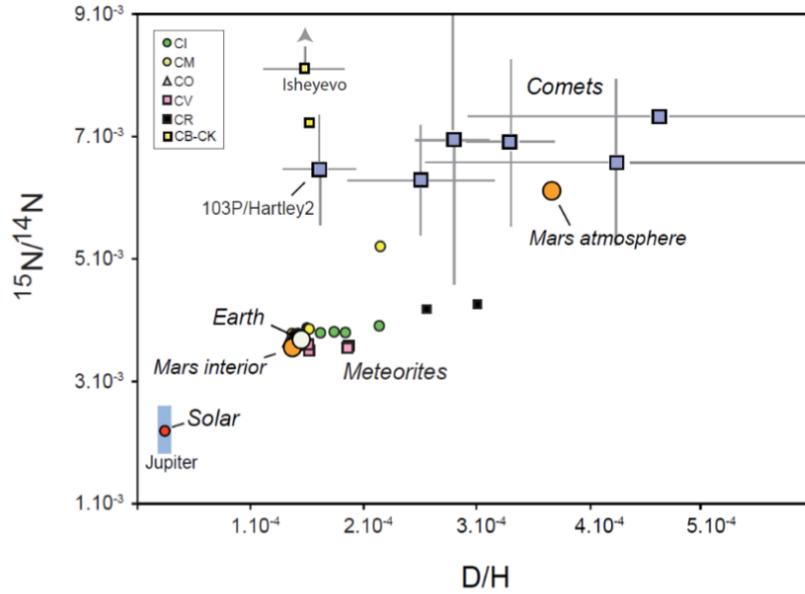


Figura 2.10: Razões de D/H medidos em, na Terra, Marte, cometas e meteoritos condritos carbonáceos. Extraído de Marty (2012).

localização da linha do gelo provavelmente variou durante os estágios iniciais do Sistema Solar, devido à variação da taxa de acreção e da luminosidade solar e à opacidade do disco protoplanetário. Diversos trabalhos propuseram que a linha do gelo estava dentro do cinturão de asteroides durante a acreção dos planetesimais, a ~ 2.7 ua (Lunine and Reid, 2006; Martin and Livio, 2012).

Além da presença de gelo em alguns objetos, a água pode estar presente em meteoritos e asteroides associada em minerais. A análise composicional dos meteoritos condritos carbonáceos revela que muitos destes objetos sofreram um processo de alteração aquosa dos minerais Vilas (1984); Vilas and Gaffey (1989). Após a formação dos corpos parentais dos meteoritos, os minerais podem sofrer alterações causadas pela presença de fluidos e/ou de fontes de calor, como o decaimento de partículas de meia-vida curta (< 10 Ma). É estimado que o decaimento ^{26}Al para ^{26}Mg , que possui uma meia-vida de ~ 0.7 Ma, produziu calor suficiente para manter a água líquida em período considerável para produzir a hidratação dos minerais nos condritos carbonáceos (Grimm and McSween, 1993, 1989). Neste contexto, a água agiu como um solvente em silicatos como a olivina, favorecendo a formação de flossilicatos. Howard et al. (2015, 2009, 2011) mostraram que a abundância de flossilicatos aumenta com grau de alteração aquosa. Segundo Krot et al. (2015), este processo teria ocorrido a baixas temperaturas ($\sim 20^\circ\text{C} - 100^\circ\text{C}$) e com uma razão de água/rocha de até 0.6. Estes autores salientam o fato de que o nível de hidratação em meteoritos é altamente heterogêneo, o que, em princípio, corrobora com uma formação próxima a linha do gelo, ainda que existam teorias alternativas

para explicar esta variação (Young, 2001). Esta hipótese, entretanto está em desacordo com a proposição do modelo do *Grand Tack*, de que asteroides de tipo C teriam se formado a distâncias maiores do que 3 ua.

É válido ressaltar que as informações obtidas através da análise composicional de meteoritos, ainda que valiosas, podem ser incompletas. Não é evidente que a amostra de meteoritos reflete a diversidade composicional dos asteroides. Objetos nas vizinhanças de algumas ressonâncias têm maior chance de chegar à Terra, desta forma, materiais longe de rotas de transporte dinâmicas podem não estar representados na coleção de meteoritos. Os materiais porosos e/ou muito ricos em voláteis podem não sobreviver à entrada na atmosfera. Há, ainda, o fato de que diversos meteoritos foram coletados após um tempo considerável desde a colisão com a Terra, e conseqüentemente foram contaminados pelo intemperismo terrestre.

Considerando o cenário exposto, mapear a frequência de flossilicatos em asteroides é uma forma de estimar o volume de água no passado e presente do CPA. A análise laboratorial de minerais e meteoritos revela bandas espectrais de absorções que são associadas à presença de gelo de água ou de materiais hidratados.

O identificador mais assertivo da presença de H₂O/OH na superfície de asteroides é uma banda de absorção em 3.0 μm Lebofsky (1978, 1980); Rivkin et al. (2015). Recentemente, Takir and Emery (2012) analisaram uma amostra de 28 espectros de asteroides e, baseados na forma e na posição do mínimo, identificaram quatro

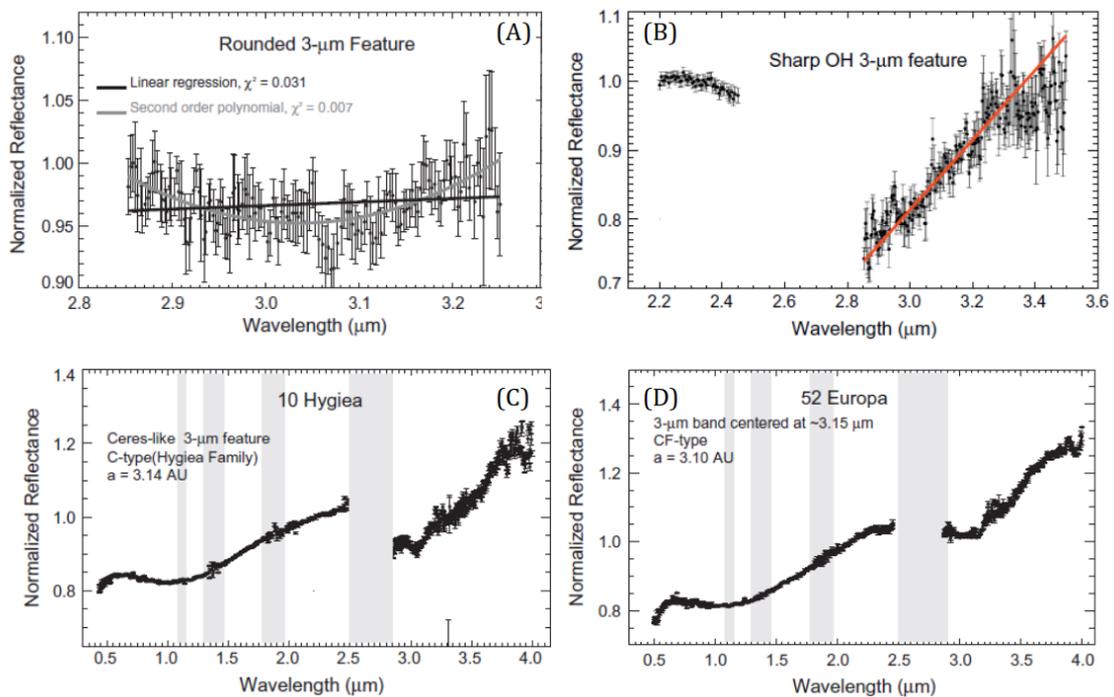


Figura 2.11: Os quatro tipos de bandas em 3 μm identificadas por Takir and Emery (2012).

grupos de bandas:

- "Arredondada"¹ (Fig. 2.11-A): Caracterizada pelo formato arredondado da banda e pelo centro próximo a $3.05 \mu m$. É associada à presença de uma camada fina de gelo de água na superfície dos asteroides.
- "Abrupta"¹ (Fig. 2.11-B): Centrada próximo a $2.9 \mu m$. Atribuída a presença de filossilicatos e correlacionada a banda no visível em $0.7 \mu m$.
- "tipo-Ceres"¹ (Fig. 2.11-C): Similar a banda observada em (1) Ceres. A banda próxima a $3.05 \mu m$ aparece sobreposta com uma banda de absorção mais larga de $2.8-3.7 \mu m$.
- "tipo-Europa"¹ (Fig. 2.11-D): O centro da banda deste grupo é localizado em comprimento de ondas maiores, tipicamente próximo a $3.15 \mu m$.

A figura 2.12 mostra a distribuição dos tipos de banda no espaço de semi-eixo por diâmetros. O resultado apresenta uma boa concordância com o modelo térmico de Grimm and McSween (1993). Porém, é válido ressaltar que a amostra de Takir and Emery (2012) contém apenas objetos grandes e nenhum objeto do cinturão interno de asteroides. Takir et al. (2015) analisaram espectros de condritos carbonáceos, obtidos à vácuo em laboratório. Todos os meteoritos observados apresentaram uma banda do tipo abrupta. Era esperado não encontrar análogos meteoríticos para objetos com a banda arredondada, uma vez que a entrada na atmosfera eliminaria o gelo de água.

Na região visível do espectro, um outro indicador de hidratação é uma banda em $0.7 \mu m$. Por sua vez, esta é relacionada a transições em camadas de interpenetração do Fe, em filossilicatos. A primeira identificação desta banda foi feita por Vilas and Gaffey (1989) com dados do ECAS, o qual foi posteriormente estendido em Vilas et al. (1994). Este último trabalho encontrou que 85.7% dos asteroides de tipo G possuem a banda de hidratação, enquanto a fração diminui para 47.7% nos objetos de tipo C, 33% para os de tipo B, 16.5% para os tipos F e 8.3% para os asteroides de tipo P. Desde estes trabalhos, a banda de absorção em $0.7 \mu m$ foi observada nos espectros de diversos asteroides primitivos (e.g (Carvano et al., 2003; Fornasier et al., 2014)). A taxonomia de Bus inclui classes taxonômicas definidas para a identificação da banda, as classes C_h , C_g e C_{gh} .

Takir and Emery (2012) mostraram que todos os objetos com banda em $0.7 \mu m$ apresentam a banda em $3.0 \mu m$ do tipo abrupta. Entretanto, o contrário não ocorre,

¹Traduções livre dos termos em Inglês:

"sharp": Abrupto

"Ceres-like": Tipo-Ceres

"rounded": Arredondada

"Europa-like": Tipo-Europa

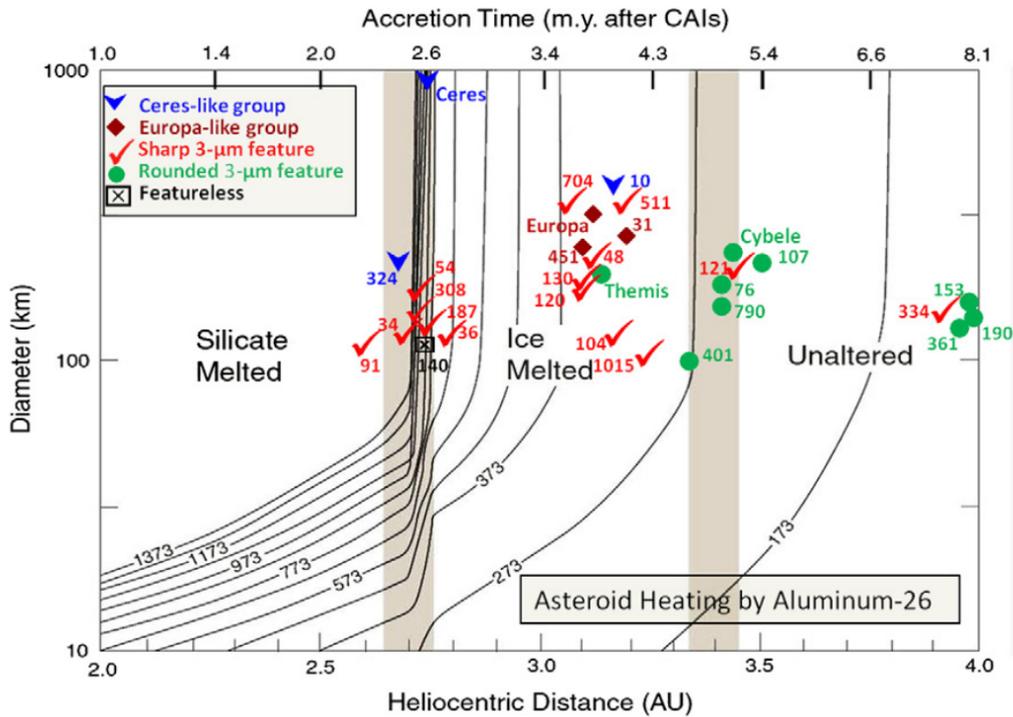


Figura 2.12: Resultado do modelo térmico de Grimm and McSween (1993) em sobreposição com a distribuição de tipo de banda em $3.0 \mu\text{m}$ de Takir and Emery (2012).

$\sim 80\%$ dos objetos com banda no infravermelho apresentam a banda no visível. Desta maneira, a banda em $0.7 \mu\text{m}$ é um estimador do limite inferior de hidratação no CPA.

Devido à melhor resolução espectral, a análise espectroscópica se mostrou mais assertiva na identificação e caracterização desta banda para um objeto. Em Fornasier et al. (2014), os autores analisaram os espectros de ~ 600 objetos, adquiridos na literatura, e concluíram que todos os asteroides de tipo G apresentam sinais de alteração aquosa, enquanto foram encontrados $\sim 50\%$ para os tipos C, $\sim 10\%$ para os tipos B, $\sim 7\%$ para os tipos F e $\sim 4\%$ para os tipos P. Estes valores estão de razoável acordo com os descritos por Vilas et al. (1994), utilizando dados do ECAS.

A análise da distribuição espacial dos objetos que apresentam banda em $0.7 \mu\text{m}$, estudados por Fornasier et al. (2014), sugere que o processo de alteração aquosa foi dominante na região de 2.1-3.1 ua, a distâncias heliocêntricas inferiores às anteriormente propostas. Vilas et al. (1994), a partir de dados do ECAS propuseram que a zona de hidratação estaria entre 2.6 – 3.5 ua. De acordo com o modelo térmico de Grimm and McSween (1993), da figura 2.12, a região onde ocorreu hidratação foi em 2.5 – 3.3 ua, exatamente anterior onde estão hoje os Cibele. Em Morate et al. (2016) e Morate et al. (submetido) (ver também em anexo C), mostramos famílias de asteroides no cinturão interno com alto nível de hidratação, concordando com os resultados de Fornasier e colaboradores.

A obtenção de dados de espectroscopia, apesar de fornecer uma identificação assertiva sobre hidratação de um objeto, é procedimento consideravelmente trabalhoso e requer o uso de telescópios de grande abertura para a observação de objetos pequenos. Enquanto no trabalho de Fornasier et al. (2014), a análise foi feita com dados de espectroscopia de ~ 600 asteroides, Rivkin (2012) utilizou os dados de espectrofotometria com o SDSS de 3165 asteroides primitivos para estudar a fração de objetos hidratados dentre o complexo C. Ainda que a identificação desta banda com dados do SDSS não seja altamente confiável devido à baixa resolução espectral e a erros fotométricos comparáveis à profundidade da banda, como apontado pelo autor, o grande volume de objetos pode fornecer uma análise estatística da distribuição da banda em $0.7 \mu\text{m}$ no CPA. O trabalho descrito no capítulo 4, segue a linha de trabalho desenvolvida por Rivkin, entretanto utilizando dados das campanhas J-PLUS e S-PLUS.

O autor aplicou duas metodologias para identificação da banda e obteve resultados similares. Na primeira, a convolução dos espectros do SMASS de objetos do complexo C com os filtros do SDSS, foram utilizados para gerar modelos de comparação para as classes Ch (hidratados) ou C (não hidratados), em referência a taxonomia de Bus. Os objetos foram então classificados a partir da minimização do *chi*-quadrado entre os dados de espectrofotometria e os modelos gerados. A segunda metodologia consistiu em calcular a profundidade da banda a partir da distância entre a reflectância no filtro i' do contínuo, sendo este calculado por um ajuste linear com os filtros r' e z' . A figura 2.13 mostra a distribuição de frequência da profundidade da banda. É possível observar uma assimetria na distribuição, causada por um excesso em valores de profundidade positivos. Rivkin (2012) assumiu que esta distribuição poderia ser o conjunto de duas distribuições, sendo uma distribuição gaussiana centrada em zero, representando os objetos não hidratados, e o excesso seria correspondente a fração de objetos hidratados.

Os resultados de ambas as metodologias sugerem que aproximadamente 30% dos asteroides do grupo C são hidratados. Uma análise da distribuição espacial, mostrou o cinturão interno como o pico da região de hidratação, com o cinturão externo sendo a região com menos objetos hidratados. Rivkin (2012) também observou que a fração de objetos hidratados aumenta para tamanho menores.

Um outro possível indicador da presença de materiais hidratados na superfície dos asteroides é uma queda em reflectância na região ultravioleta do espectro (Feierberg et al., 1985; Vilas, 1995). Vilas (1995) argumentou que o espectro de reflectância de asteroides que contêm silicatos portadores de ferro na superfície, apresenta uma forte banda de absorção no ultravioleta devido a transições de carga em camadas de intervalência de óxido férrico. Os autores propõem que materiais opacos mascaram a banda na região de $0.5\text{-}0.75\mu\text{m}$, e a presença da banda só é notada a baixos

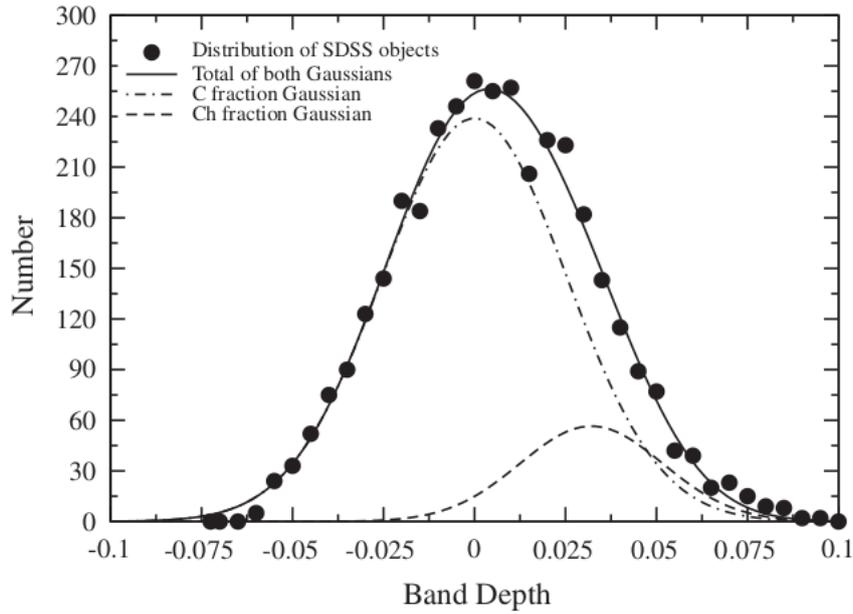


Figura 2.13: Distribuição da profundidade da banda em $0.7 \mu\text{m}$, calculadas a partir dos dados do SDSS (linha preta). As linhas tracejadas representam distribuições ajustadas para objetos hidratados (Ch) e não hidratados (C) (Rivkin, 2012).

comprimentos de onda. Os tipos taxonômicos C, B e G, da taxonomia de Tholen (1984), geralmente exibem esta queda de reflectância a partir de $\sim 0.5 \mu\text{m}$. Rivkin (2012), entretanto, não encontraram relação alguma com a banda em $0.7 \mu\text{m}$ e a cor $u' - g'$ do sistema do SDSS.

A identificação da banda de hidratação em $0.7 \mu\text{m}$ é um dos focos desta tese. O método geral de identificação desta banda, assim como os resultados obtidos nas literatura, serão discutidos nos capítulos seguintes. No capítulo 3 usamos dados espectroscópicos para analisar os grupos dinâmicos Hilda e Cibele, e o limite exterior da zona de hidratação. No capítulo 4 utilizamos dados de espectrofotometria do SDSS e desenvolvemos uma metodologia a ser utilizada com os dados das campanhas J-PLUS e S-PLUS, para a identificação da banda em $0.7 \mu\text{m}$ em objetos de todo o cinturão de asteroides.

Capítulo 3

Análise Composicional de Grupos Dinâmicos do Cinturão Externo

A região externa ao cinturão principal de asteroides pode ser dividida em quatro grupos (Fig. 3.1):

- **Cibeles:** Localizada entre 3.27 e 3.7 ua, é a última zona de estabilidade do cinturão de asteroides anterior às populações ressonantes.
- **Hildas:** Asteroides em ressonância de movimentos médios 3:2 com Júpiter, situados a aproximadamente 4 ua.
- **Thules:** Pequena população de objetos situado a ~ 4.5 ua, em ressonância de movimentos médios com Júpiter
- **Troianos:** Asteroides que compartilham a órbita de Júpiter, em ressonância de 1:1, a aproximadamente 5.2 ua .

As primeiras investigações sobre as composições de membros das regiões externas do cinturão de asteroides (Gradie et al., 1989; Gradie et al., 1979) mostraram uma predominância de objetos com baixo albedo e espectros sem banda de absorção, cujas cores variam de cinza para vermelho. Na classificação taxonômica de Tholen (1984), pertencem às classes C, P e D.

Para um asteroide primitivo, a cor avermelhada é geralmente associada à presença de materiais orgânicos complexos na superfície do objeto. Além disto, Emery et al. (2006), através da análise da emissão térmica de asteroides troianos de tipo D e P, detectaram grãos finos de silicatos anídricos na superfície. Apesar destas classes taxonômicas serem observadas em todo o cinturão de asteroides, podem existir diferenças entre as composições de objetos de tipo D e/ou P do cinturão interno para aqueles do cinturão externo. Carvano et al. (2003), através da análise de espectroscopia no visível, observaram que objetos de tipo D no cinturão interno geralmente

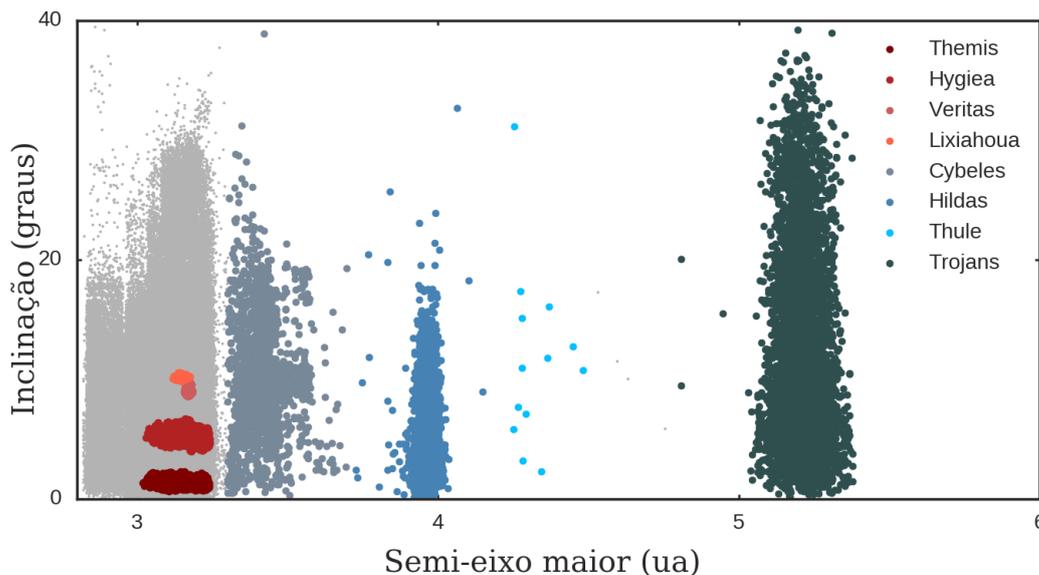


Figura 3.1: Populações do cinturão externo de asteroides: Cibeles, Hildas, Thule e Troianos. Em tons de vermelho também são marcadas as principais famílias de objetos primitivos dentre ao cinturão externo.

possuem um espectro ”concavo” e albedo maior se comparado com os objetos de tipo D do cinturão externo.

Dahlgren and Lagerkvist (1995) e Dahlgren et al. (1997) analisaram espectros no visível de 43 asteroides do grupo dos Hildas. Eles reportaram aproximadamente 64% dos objetos como pertencentes a classe taxonômica D, enquanto 28% e 2% pertencentes as classes P e C, respectivamente (a porcentagem remanescente foi classificada como ambígua). Os autores também notaram uma correlação entre a inclinação espectral e o diâmetro, na qual objetos maiores tendiam a um espectro menos avermelhado. Foi sugerido que esta relação seria resultado de uma dependência da composição superficial com o tamanho. Asteroides de classificação espectral D seriam mais frágeis do que os tipos P e devido à atividade colisional dentro do grupo, se quebrariam mais facilmente, proporcionando uma dominância de tipos P dentre os objetos maiores e de tipos D dentre os pequenos.

Lagerkvist et al. (2005) realizaram um estudo com 20 espectros no visível de asteroides do grupo de Cibeles. Um comportamento similar ao descrito anteriormente para Hildas foi encontrado, i.e. objetos maiores também tendiam a possuir o espectro mais neutro. Os autores salientam também a presença de um objeto de tipo S e uma quantidade maior de objetos de tipo C do que em Hildas.

Os resultados de Dahlgren et al. (1997) foram obtidos considerando asteroides com diâmetro superior a 35 km ($H < 11.3$, para um $\rho_v = 0.05$). Para Lagerkvist et al. (2005), os objetos possuíam diâmetros maiores que 20 km ($H < 11.9$, também para um $\rho_v = 0.05$). As duas amostras representam as características das populações

de objetos grandes de cada grupo.

Gil-Hutton and Licandro (2010) e Gil-Hutton and Brunini (2008) analisaram dados do *survey* fotométrico SDSS em busca de informações espectrofotométricas de asteroides Cibele e Hildas, respectivamente. As dimensões físicas dos objetos observados pelo *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS) são consideravelmente menores do que as dos observados por espectroscopia nos trabalhos mencionados anteriormente (i.e. $H > 12$). Para este regime de diâmetros a relação com a inclinação espectral não foi observada. Os autores propuseram que a tendência vista apenas para os objetos de maiores dimensões fosse resultante de uma combinação de intemperismo espacial e rejuvenescimento superficial.

Atualmente, existem algumas de dezenas de asteroides dos grupos Hildas e Cibele com espectro visível publicado. Entretanto, para o infravermelho próximo (0.8 - 2.5 μm), a quantidade de objetos com espectros decai consideravelmente. Dumas et al. (1998) apresentou o espectro de um asteroide Cibele e oito Hildas, em conjunto com nove espectros de objetos com baixo albedo. Neste trabalho todos os espectros eram avermelhados e não possuíam banda de absorção, classificados como X e D na taxonomia de DeMeo et al. (2009).

Dentro da amostra de Takir and Emery (2012) foram identificados seis asteroides Cibele, incluindo (65) Cibele e três de Hildas. Estes objetos foram observados na região espectral de 0.5-4.0 μm , dentre uma amostra de 28 espectros de asteroides primitivos com semi-eixo maior entre 2.5-4.0 ua. Dentre os Cibele, cinco objetos possuíam banda do tipo arredondada e apenas um do tipo abrupta. No grupo dos Hildas foram observados três objetos do tipo arredondada e um do tipo abrupta.

A falta de características espectrais mais específicas no visível e no infra-vermelho próximo impedem uma interpretação unívoca sobre a composição dos asteroides presentes no grupo dos Hildas e Cibele. Atualmente é entendido, de maneira geral, que a composição predominante nestes grupos seja uma mistura de material orgânico, silicatos anídricos e gelo de água (Bell, 1989; Gaffey et al., 1989; Vilas et al., 1994). Uma dificuldade na interpretação da composição destes asteroides é também imposta pela falta de meteoritos com espectro similar aos asteroides de tipo P. No caso de asteroides de tipo D é sugerida uma similaridade composicional com Tagish Lake (Hiroi et al., 2001), um meteorito de material muito escuro e vermelho.

Um interesse adicional na caracterização destes grupos se deve a uma possível relação com cometas adormecidos (Licandro et al., 2008). Di Sisto et al. (2005) mostraram que uma quantidade considerável de objetos provenientes da população de Hildas pode evoluir para uma órbita cometária do tipo "cometas da Família de Júpiter".

Os modelos de migração planetária, como o Modelo de Nice, descrito no capítulo 2, propõem que o Sistema Solar sofreu uma intensa evolução dinâmica desde sua

formação. As populações de Hildas e Cibele seriam diretamente afetadas neste contexto. Um cenário onde ocorre um período de instabilidade no Sistema Solar destabilizaria as populações de Hildas e Troianos de Júpiter, que seriam repopuladas posteriormente, quando os planetesimais formados na região externa aos gigantes de gelo seriam espalhados para a região interna do Sistema Solar. Levison and Duncan (1993) mostraram que objetos do cinturão transneptuniano primitivo podem também ser inseridos em regiões mais internas do cinturão de asteroides, como na região dos Cibele. A partir destes modelos seria então esperado uma distribuição composicional similar para Hildas e Troianos (Wong and Brown, 2017), e uma similaridade também com parte dos objetos em Cibele.

Considerando o cenário exposto, neste capítulo apresentamos um estudo sobre os possíveis grupos composicionais dentre as populações do cinturão externo de asteroides, com um foco nos grupos de Hildas e Cibele. Na seção 3.1 apresentamos os dados de espectroscopia no visível e no infravermelho próximo. A metodologia para análise dos dados no visível é mostrada na seção 3.1.2 e para os dados no infravermelho em 3.1.3. Os resultados na seção 3.1.4. Na seção 3.2 utilizamos dados do NEOWISE e do SDSS para uma análise estendida das populações e seus arredores. Finalmente, discutimos nossos resultados na seção 3.3, e na seção 3.4 apresentamos nossas conclusões para este capítulo.

3.1 Análise da amostra espectroscópica

3.1.1 Observações e Redução de Dados

Espectroscopia no Visível

Coletamos 18 espectros de baixa resolução de asteroides membros dos grupos Hildas e Cibele. A tabela 3.1 mostra as datas e condições observacionais para cada objeto. Os espectros foram obtidos através do *Goodman high Throughput Spectrograph* (GHTS), instalado no telescópio SOAR, de 4.1m de abertura. Utilizamos uma grade de 300 linhas/mm e a fenda de 1.33", na missão observacional de 2011, e a de 1.67", em 2012. A configuração produziu uma cobertura espectral de 0.4-0.87 μm . Em ambas missões não foram utilizados filtros de bloqueio de segunda ordem. As observações foram feitas em um total de seis noites, divididas entre os semestres 2011A e 2012B. Executamos duas sequências de calibrações com lâmpadas de quartzo e de arcos para calibração em comprimento de onda, uma antes e outra após a aquisição do espectro alvo. Este procedimento, utilizando a mesma configuração do objeto, foi utilizado para reduzir problemas de flexão do telescópio. Além disto, ao menos uma estrela análoga solar foi observada em cada noite, em diferentes massas de ar.

Tabela 3.1: Condições de observação dos asteroides - Visível

Número	Nome	Data	UT	Massa	m_v	α	T_{EXP}	Slit	AS*
		início		de ar		(o)	sec	(")	
225	Henrietta	2011-01-31	05:32	1.1	14.9	5.6	270.0	1.03	1
229	Adelinda	2012-03-28	00:43	1.6	14.9	6.5	330.0	1.68	1,4,5
401	Ottília	2011-01-31	07:35	1.2	15.0	14.6	240.0	1.03	1
528	Rezia	2012-03-28	09:10	1.2	15.4	16.6	360.0	1.68	1,4,5
790	Pretoria	2012-03-29	00:05	1.3	14.6	14.6	240.0	1.68	1,3,5
909	Ulla	2011-01-31	01:28	1.35	14.9	17.4	180.0	1.03	1
940	Kordula	2011-02-01	07:26	1.36	16.0	14.6	540.0	1.03	1
1177	Gonnessia	2012-03-28	00:01	1.21	14.5	11.9	240.0	1.68	1,4,5
1280	Baillauda	2012-03-29	01:45	1.36	16.0	13.2	360.0	1.68	1,3,5
6039	Parmenides	2011-02-01	05:22	1.19	17.1	4.7	600.0	1.03	1
334	Chicago	2011-01-31	05:13	1.51	13.1	0.1	120.0	1.03	1
1144	Oda	2011-02-08	06:11	1.39	16.4	11.8	540.0	1.03	1
1269	Rollandia	2011-02-01	03:48	1.60	14.1	5.5	180.0	1.03	1
1439	Vogtia	2012-03-28	03:26	1.25	15.7	4.2	360.0	1.68	1,4,5
1902	Shaposhnikov	2012-03-27	06:46	1.19	15.7	14.3	240.0	1.68	1,2,3,4
3202	Graff	2011-02-01	01:02	1.34	16.4	10.8	510.0	1.03	1
3577	Putilin	2011-02-01	04:10	1.49	14.9	2.8	180.0	1.03	1
3843	Oisca	2011-01-31	04:39	1.75	16.5	5.9	480.0	1.03	1
7394	Xanthomalitia	2012-03-29	00:33	1.37	17.5	12.4	600.0	1.68	1,3,5

*Análogos Solar: (1) L102-1081, (2) L107-684, (3) L107-998, (4) HD44594, (5) HD144585

Tabela 3.2: Lista de análogas solares observadas no visível

ID-Estrela	Ascensão Reta	Declinação	Magnitude
Land (SA) 102-1081	10:57:04.4	-00:13:12	9.9
Land (SA) 107-684	15:37:18.1	-00:09:50	8.4
Land (SA) 107-998	15:38:16.4	+00:15:23	10.4
HD44594	06:20:06.1	-48:44:28	6.6
HD144585	16:07:03.3	-14:04:17	6.3

A redução de dados foi feita utilizando as ferramentas IRAF¹, Pyraf², além de rotinas científicas do python e a biblioteca Astropy (Astropy Collaboration et al., 2013). Utilizamos técnicas de redução padrões para este tipo de dado:

¹IRAF é distribuído pelo *National Optical Astronomy Observatories*, o qual é operado pela *Association of Universities for Research in Astronomy, Inc.*, sobre um acordo de cooperação com o *National Science Foundation*.

²PyRAF é um produto do *Space Telescope Science Institute*, o qual é operado pela AURA para a NASA.

1. Imagens foram corrigidas de *flat-field* e *bias* usando as imagens de calibração e lâmpadas quartzo.
2. O fundo de céu foi subtraído e o espectro unidimensional extraído. Neste procedimento utilizamos uma abertura variável, considerando as condições da noite.
3. Calibramos os espectros em comprimento de onda utilizando as lâmpadas de calibração.
4. Repetimos os procedimentos anteriores para cada exposição do objeto e posteriormente calculamos a média para produção do espectro final.

O espectro de reflectância do asteroide foi finalmente obtido após a divisão do espectro do objeto com o de uma estrela análoga solar e normalizados a unidade em $0.55 \mu m$.

A similaridade das estrelas observadas em uma mesma noite foi checada aplicando uma correção por extinção atmosférica e comparando uma estrela à outra. Os coeficientes de extinção utilizados foram do observatório de La Silla ³. A análise mostrou consistência interna entre as estrelas observadas. Apenas em algumas noites de 2011, algumas estrelas mostraram uma discrepância com observações em diferentes massas de ar. Uma explicação para este comportamento pode ser uma má centragem na fenda e perda de luz durante a aquisição. Para as noites de 2012, quando uma fenda mais larga foi utilizada, o mesmo comportamento não foi observado. Este processo foi também utilizado para estimar o erro no gradiente espectral do asteroide.

Correção do efeito de franja

O espectro final apresentava um forte padrão de franja na direção vermelha do espectro, mesmo após a correção de *flat-field*. Aplicamos uma técnica baseada em *wavelets* para atenuar este efeito.

As transformadas *wavelets* permitem a decomposição de sinais em domínios de frequência, onde a resolução é atrelada a sua escala. A técnica implementada é baseada naquelas descritas em Mallat (1999).

Os algoritmos baseados nesta ferramenta matemática são geralmente direcionados à redução de ruído, que está associado aos coeficientes pequenos na decomposição *wavelet*. No caso da remoção do efeito de franja, aplicamos um filtro "passa-banda" e reduzimos a intensidade coeficientes pequenos-médio, compatível com as frequências

³O telescópio SOAR é localizado no Cerro Pachón, Chile, geograficamente próximo ao observatório de La Silla. Assumimos que a extinção atmosférica não deve variar muito entre estes observatórios.

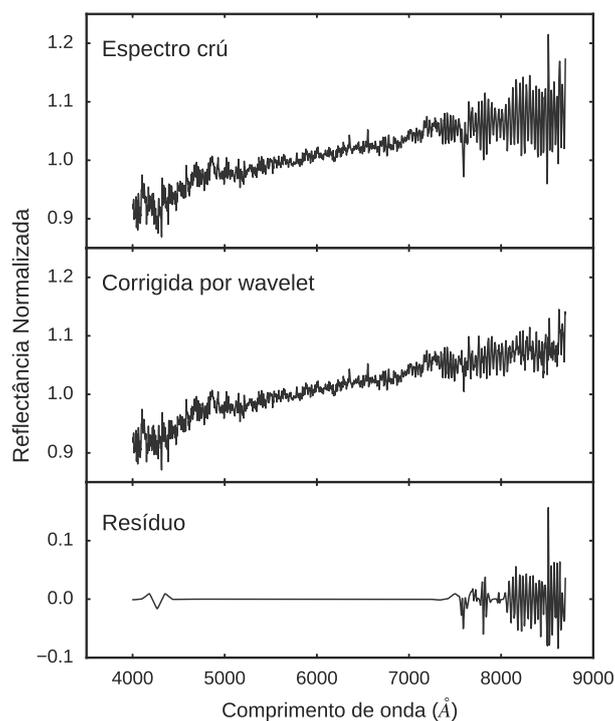


Figura 3.2: Resultado da técnica utilizada para a correção do fringing com a câmera do GHTS, no SOAR. A imagem do topo mostra o espectro de reflectância de (790) Pretoria, a do meio, o mesmo espectro, porém com a correção de fringing e abaixo o resíduo.

observadas das franjas, sem retirar as frequências altas (associadas ao ruído). O método de filtragem foi uma alteração da implementação do método *hardthresholding* da biblioteca *Pywavelets*⁴, para Python, onde estabelecemos um limite inferior e superior. É importante que o tipo de *wavelet* seja similar ao sinal a ser removido, desta forma optamos pela família *coiflet* de *wavelets*. A figura 3.2 mostra um resultado típico do emprego desta técnica.

⁴A biblioteca *Pywavelets* é de código aberto sobre licença do MIT e pode ser encontrada em www.github.com/PyWavelets/pywt

Espectroscopia no Infravermelho próximo

Tabela 3.3: Condições observacionais dos asteroides Hildas-IR

Número	Nome	Data início	UT	Massa de ar	m_v	α (o)	T_{EXP} sec	Slit (")	AS*
190	Ismene	2001-08-04	01:00:32	2.0	14.6	10.5	30 x 4	1.5	5
334	Chicago	2001-08-05	06:45:30	1.3	14.6	13.7	50 x 4	1.5	2,5,4
1202	Marina	2001-08-05	04:46:41	1.5	14.9	5.7	30 x 8	1.5	2,5,4
1269	Rollandia	2001-08-05	06:30:06	1.1	15.7	14.2	50 x 4	1.5	2,5,4
1754	Cunningham	2001-08-05	05:29:15	1.1	15.8	12.6	50 x 4	1.5	2,5,4
2067	Aksnes	2001-08-31	21:51:18	1.6	17.8	12.2	60 x 8	1.5	2
		2001-09-01	21:57:56	1.6	17.8	12.3	60 x 4	1.5	2
2624	Samitchell	2001-09-29	01:06:48	1.3	16.2	7.8	60 x 4	1.5	2
3561	Devine	2001-08-05	05:50:33	1.2	16.9	12.8	50 x 4	1.5	2,5,4
4317	Garibaldi	2001-09-30	03:15:38	1.1	17.0	9.5	60 x 8	1.5	2,5,4
5368	Vitagliano	2001-09-30	03:43:34	1.2	17.3	12.8	60 x 11	1.5	2,5,4
5661	Hildebrand	2001-09-29	23:43:08	1.2	15.9	6.4	60 x 41	1.5	2,5,4
5711	Eneev	2001-09-29	01:26:39	1.3	16.1	7.0	60 x 10	1.5	2
6237	Chikushi	2001-10-05	23:12:22	1.2	17.3	3.6	60 x 8	1.5	2,4,3
9121	Stefanovalentini	2001-10-05	20:32:34	1.4	17.1	10.8	60 x 8	1.5	2,4,3
11750		2001-10-06	05:41:49	1.2	18.5	8.8	60 x 32	1.5	2,4,3
15417	Babylon	2001-10-05	21:37:36	1.4	17.7	9.3	60 x 20	1.5	2,4,3
15505		2001-10-06	04:55:42	1.0	18.1	9.5	60 x 24	1.5	2,4,3
15540		2002-04-26	05:36:33	1.2	17.9	12.6	60 x 8	1.5	1,2,5

*Análogas Solar: (1) L102-1081, (2) L110-361 (3) L98-978, (4)L93-101, (5) 112-1333

Tabela 3.4: Lista de análogas solares observadas no infravermelho próximo

ID-Estrela	Ascensão Reta	Declinação	Magnitude
Land (SA) 102-1081	10:57:04.4	-00:13:12	9.9
Land (SA) 110-361	18:42:45.0	+00:08:04	12.4
Land (SA) 98-978	06:51:34.0	-00:11:33	10.5
Land (SA) 93-101	01:53:18.0	+00:22:25	9.7
Land (SA) 112-1333	20:43:11.8	+00:26:15	10.0

Utilizamos o *Telescópio Nazionale Galileo* (TNG), de 3.56m de abertura, em conjunto com o instrumento *Near-Infrared Camera Spectrograph* (NICS), para obtenção de espectros de 20 asteroides Hildas. O instrumento foi configurado no modo de

baixa resolução, baseado no prisma dispersor Amici, que cobre a região de 0.8-2.3 μm (Oliva, 2000). A fenda utilizada nestas observações foi a de 1.5". Assim como nas observações no visível, a fenda esteve orientada em ângulo paralático, e foi utilizada a guiagem diferencial para manter o objeto centrado.

Na aquisição fizemos uma série de imagens com baixa exposição em uma posição na fenda (posição A), e logo deslocando o objeto em 10", na direção da fenda (posição B), e obtendo uma nova série de imagens. Este processo foi repetido e uma série de ciclos de posições ABBA foram adquiridos. A tabela 3.3 lista os tempos totais de exposição, assim como as datas e outras condições observacionais.

A redução de dados foi feita utilizando técnicas similares as descritas na subseção anterior, para o visível. Neste caso os espectros foram normalizados em 1.2 μm . A correção das bandas telúricas e a obtenção dos espectros de reflectância foi feita através da observação de diversas estrelas G2 obtidas da lista de Landolt (1992), observadas em diversas massas de ar na mesma noite de observação dos asteroides. Estas estrelas foram observadas anteriormente em conjunto com a análoga solar P330E (Colina and Bohlin, 1997) e podem ser utilizadas também como análogos solares nos comprimentos de onda aqui descritos. Aplicamos, quando necessário deslocamentos de sub-pixels, para alinhamento dos espectros de asteroides com as estrelas, e corrigir problemas de flexão do instrumento. O erro proveniente da divisão dos espectros foi estimado pela comparação do espectro de um asteroide com diversas análogas solares. A análise mostrou uma incerteza no cálculo do gradiente espectral sempre menor a 1%/1000Å.

3.1.2 Análise paramétrica da amostra no visível

As figuras 3.3 e 3.4 mostram os espectros finais de asteroides Hildas e Cibeles, respectivamente. Ambos foram observados na faixa do visível com GHTS, no telescópio SOAR. De maneira geral, estes objetos apresentam um espectro avermelhado, com exceção de (225) Henrietta, que possui um espectro azulado. A maior parte destes objetos não apresentam bandas de absorção, porém é notável, em alguns casos, a presença de uma banda de absorção em 0.7 μm . Uma pequena porção destes objetos ainda apresentam uma queda em reflectância para comprimentos de onda menor que 0.5 μm .

Desta forma, além de uma classificação espectral na taxonomia de Bus and Binzel (2002), definimos uma parametrização para os espectros no visível (Fig. 3.5):

- O gradiente espectral em 0.55-0.87 μm
- A presença de uma banda de absorção próxima a 0.7 μm

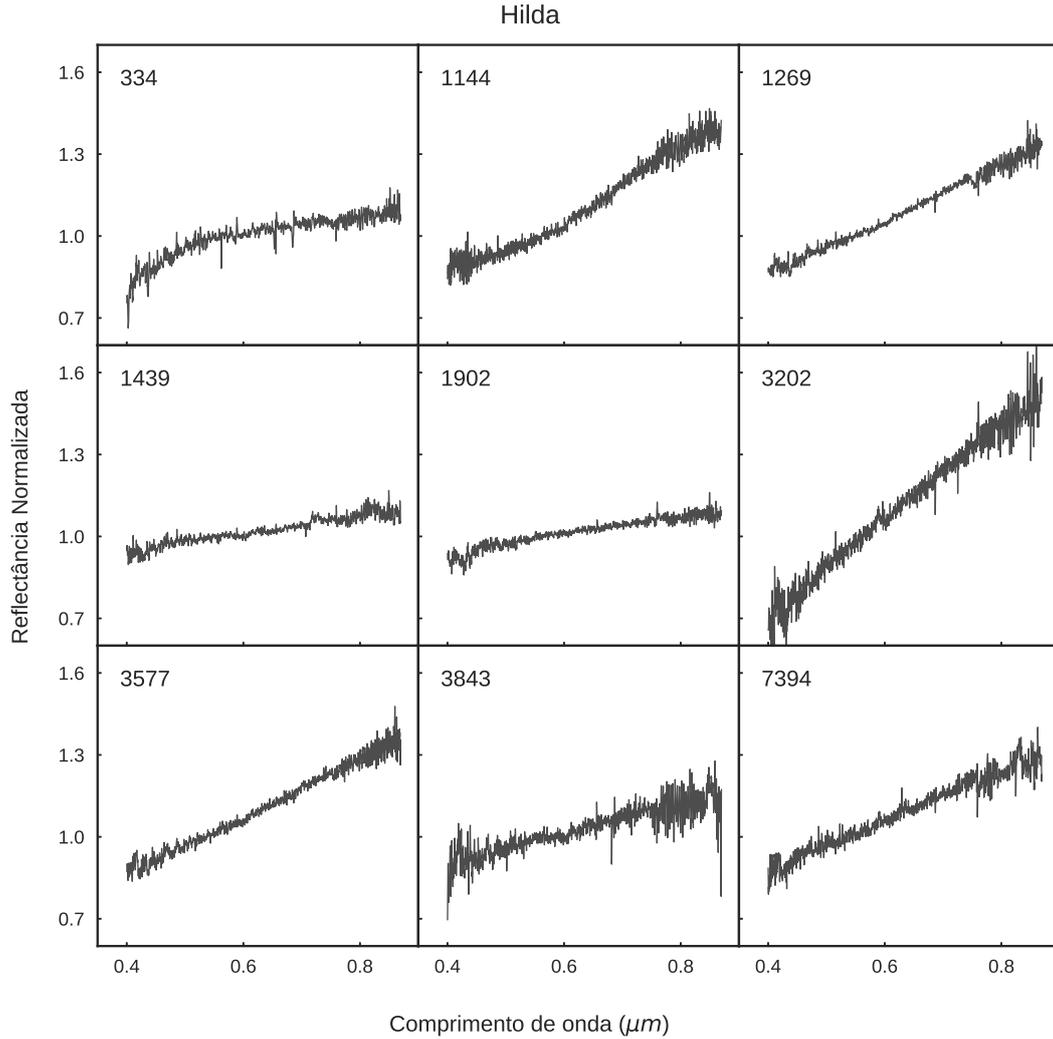


Figura 3.3: Espectros no visível de membros da população Hilda, durante as campanhas observacionais apresentadas neste trabalho. Todos os espectros estão normalizados a unidade em $0.55 \mu m$

- A presença de uma queda de reflectância em direção ao ultravioleta, e o ponto crítico aonde o gradiente espectral muda.
- No caso da existência do parametro anterior, também medimos o gradiente espectral no ultravioleta próximo, em $0.4-0.55 \mu m$

A fim de uma análise estatística mais aprofundada da região, também buscamos na literatura por espectroscopia no visível de membros dos grupos Hildas e Cibeles. Coletamos 5 espectros de Hildas por trabalho: S3OS2 Lazzaro et al. (2004); Bus and Binzel (2002); Vilas et al. (2006). Destes trabalhos, também obtivemos 35,11,15, espectros de membros de Cibeles, respectivamente. Além dos espectros disponíveis nestas base de dados, também adicionamos 57 espectros de Hildas dos trabalhos Dahlgren and Lagerkvist (1995) e Dahlgren et al. (1997) e 18 espectros de Cibeles

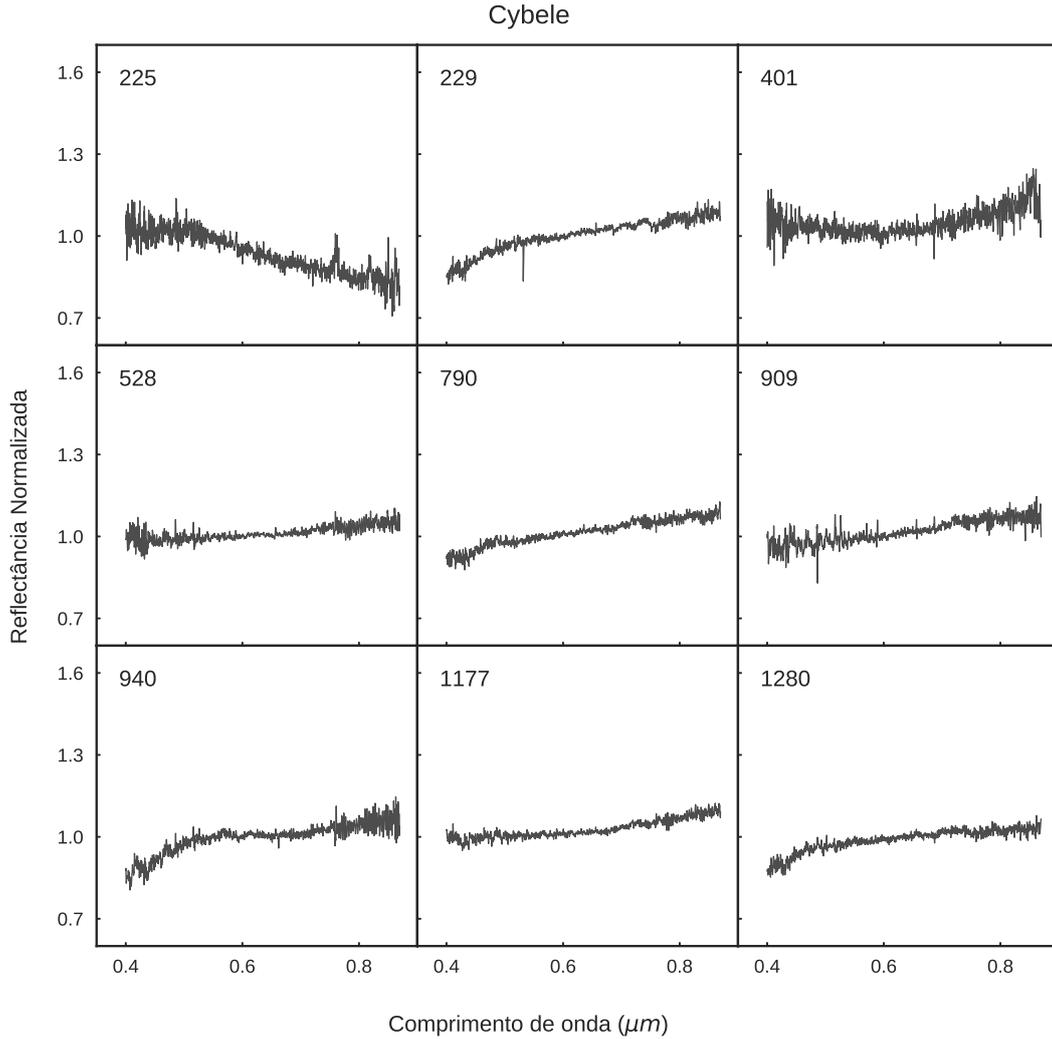


Figura 3.4: Espectros no visível de membros da população Cybele, durante as campanhas observacionais apresentadas neste trabalho. Todos os espectros estão normalizados a unidade em $0.55 \mu m$

de Lagerkvist et al. (2005). A amostra final consistiu em 88 espectros de 55 objetos para a população de Cibeles e 82 espectros de 53 objetos para a população de Hildas. É importante salientar que a cobertura espectral destes espectros difere dos espectros observados neste trabalho: S30S2 possui uma cobertura espectral de $0.5\text{-}0.9 \mu m$; SMASS $0.4\text{-}0.9 \mu m$; Vilas et al. (2006) de $0.5\text{-}0.9 \mu m$; Dahlgren and Lagerkvist (1995) e Dahlgren et al. (1997) possui espectros de $0.4\text{-}0.9 \mu m$ ou $0.4\text{-}0.7 \mu m$ e Lagerkvist et al. (2005) de $0.4\text{-}0.9 \mu m$.

Todos os espectros foram reanalisados utilizando a metodologia aqui descrita, para fim de uma análise homogênea. Entretanto, em alguns casos nem todos os parâmetros puderam ser medidos, devido a uma cobertura espectral insuficiente para a análise.

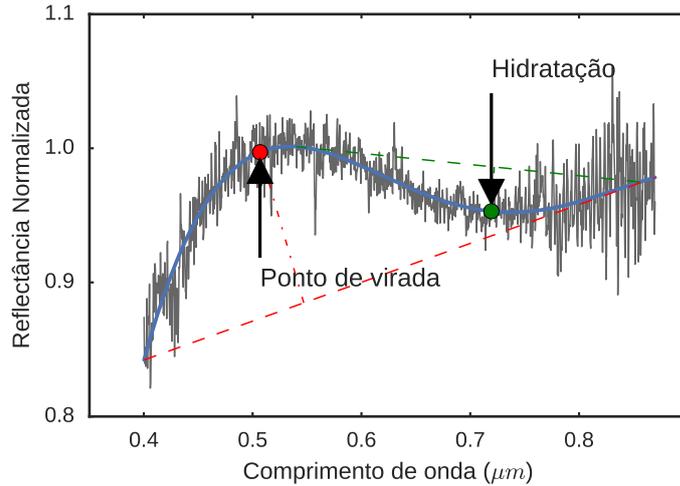


Figura 3.5: Parametrização aplicada para a amostra de espectros no visível. Os parametros medidos foram: Gradiente espectral no visível, gradiente espectral no ultravioleta, ponto de virada do gradiente espectral e banda de hidratação em $0.7 \mu m$.

Classificação Taxonômica

A classificação taxonômica foi feita através da ferramenta online para modelagem de asteroides, M4AST (Popescu et al., 2012). Primeiro ajustamos um polinômio de ordem variável, checando visualmente a relação do ajuste com o espectro do asteroide. Posteriormente inserimos o resultado do ajuste na base de dados do M4AST. A ferramenta compara os dados com modelos gerados para cada classe definida pela taxonomia de DeMeo et al. (2009). A classe do asteroide é definida pela minimização do χ^2 , de acordo com a definição:

$$\chi^2 = \frac{1}{N} \sum_i^N \frac{(x_i - \mu_i)^2}{x_i} \quad (3.1)$$

onde N é a dimensão do espectro, x_i são os valores de reflectância do ajuste polinomial e μ_i são os valores de reflectâncias do modelo da classe taxonômica, no determinado comprimento de onda.

O sistema taxonômico utilizado pela ferramenta é uma extensão para o infravermelho da taxonomia de Bus and Binzel (2002), originalmente feita apenas com a parte visível do espectro. Neste caso, como a cobertura espectral é, em geral, de $0.4-0.87 \mu m$, checamos individualmente o resultado para cada objeto e o reclassificamos usando taxonomia de Bus and Binzel (2002), caso o resultado da ferramenta seja uma das classes específicas da taxonomia de DeMeo et al. (2009).

Gradiente espectral

Os asteroides que populam as regiões de Hildas e Cibebes são tipicamente objetos primitivos, que não apresentam nenhuma característica espectral forte na região do visível. Desta forma o único parâmetro que pode ser medido para todos os objetos, considerando a cobertura espectral variável, é o gradiente espectral.

O calculo foi feito de acordo com a definição em Jewitt (2002):

$$S' = \frac{(dS/d\lambda)}{\bar{S}} \quad (3.2)$$

Primeiramente realizamos um ajuste linear na região de 0.55-0.86 μm , onde o espectro de objetos primitivos é geralmente bem representado por uma reta. O coeficiente angular do ajuste é normalizado pela reflectância média na mesma região (\bar{S}). O gradiente espectral é definido por este coeficiente em unidades de %/1000Å.

Em Dahlgren et al. (1997) há alguns asteroides com cobertura espectral de 0.4-0.7 μm . Checamos que nenhum destes objetos possui a queda para o ultravioleta. Desta maneira, o gradiente espectral no visível foi medido utilizando o intervalo disponível.

Para objetos que possuem mais de um espectro observado, o gradiente espectral final é a média dos casos singulares enquanto que o erro é definido pelo desvio padrão ou o erro propagado, neste caso, o que for maior.

A banda de hidratação

As populações de Hildas e Cibebes podem delimitar a região onde as condições de temperatura e pressão foram compatíveis para ocorrência do processo de alteração aquosa (seção 2.3).

Buscamos a identificação de membros que apresentem a banda de hidratação em 0.7 μm aplicando uma metodologia similar a Carvano et al. (2003) e Morate et al. (2016). O primeiro passo foi o cálculo e a remoção do contínuo (Fig. 3.6). Este processo foi feito através de um ajuste linear nas regiões de 0.55-0.58 e 0.83-0.86 μm , onde um objeto com espectro de tipo primitivo não deve apresentar bandas de absorção. O espectro foi dividido por este ajuste e, então, ajustado por um *spline* de quarta ordem na região de 0.53-0.83 μm . A presença da banda é caracterizada pela posição de um mínimo próximo a 0.7 μm , sendo este o centro da banda, e pela diferença da reflectância no ponto, relativa ao contínuo, que define a profundidade da banda. É valido salientar que a posição do mínimo deve ser razoavelmente próxima a 0.7 μm , onde estabelecemos como um desvio máximo 0.05 μm . Objetos como (401) ou (1144) apresentam um espectro côncavo com um mínimo em comprimentos de onda muito menores, $\sim 0.6 \mu m$. Desta forma, estes objetos não são diagnosticados como hidratados.

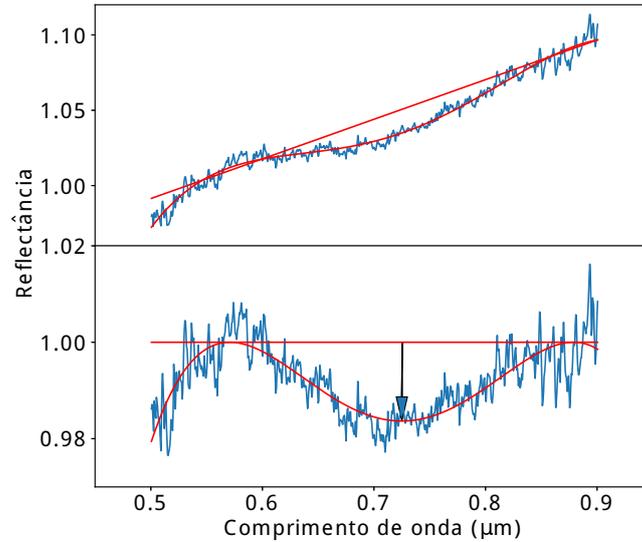


Figura 3.6: Metodologia aplicada para o cálculo da banda de hidratação. Primeiro o contínuo é removido, e posteriormente medimos a distancia relativa do mínimo próximo a $0.7 \mu m$.

Os erros nas medidas do centro e profundidade da banda foram estimados a partir de um modelo de Monte-Carlo com 1000 iterações, onde em cada uma destas removemos 20% dos pontos do espectro aleatoriamente. Para objetos de Dahlgren et al. (1997), em que a cobertura espectral era de $0.4-0.7 \mu m$, este parâmetro não pode ser medido.

Um outro possível indicador da presença de materiais hidratados na superfície dos asteroides é uma queda em reflectância na região ultravioleta do espectro (Feierberg et al., 1985; Vilas, 1995). Vilas (1995) argumenta que o espectro de reflectância de asteroides que contêm silicatos portadores de ferro na superfície, apresenta uma forte banda de absorção no ultravioleta devido a transições de carga em camadas de intervalência de óxido férrico. Os autores propõem que materiais opacos mascaram a banda na região de $0.5-0.75 \mu m$, e a presença da banda só é notada a baixos comprimentos de onda. Os tipos taxonômicos C, B e G, da taxonomia de Tholen (1984), geralmente exibem esta queda de reflectância a partir de $\sim 0.5 \mu m$.

A presença da queda de reflectância no ultravioleta foi caracterizada a partir da medição do ponto de virada do gradiente espectral (fig. 3.5) e o gradiente espectral na região do ultravioleta próximo ($0.4-0.5 \mu m$), caso a mudança no gradiente seja significativa. Para detectar a presença do ponto de virada ajustamos uma reta com os extremos do espectro e medimos o ponto mais distante à reta. A distância deve ser superior a 3.5%, para que a mudança no gradiente espectral seja considerada significativa e que o ponto de virada seja notado. O limite foi estabelecido a partir de tentativa e erro e em análise visual.

3.1.3 Análise Paramétrica da amostra no infravermelho próximo

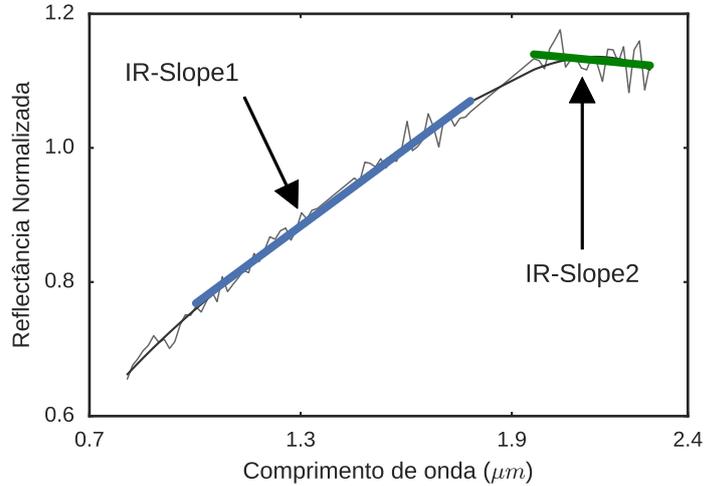


Figura 3.7: Parametrização aplicada para os espectros no infravermelho próximo. O gradiente espectral foi medido em dois intervalos, IR-slope1 e IR-slope2, como forma de detectar uma possível curvatura no espectro.

A figura 3.8 mostra 22 espectros no infravermelho próximo de 20 objetos do grupo de Hildas observados com o NICS, no TNG.

Os objetos observados apresentam um espectro avermelhado com ausência de bandas de absorção. O único comportamento destacável em alguns objetos é uma mudança na inclinação espectral em $\sim 1.9 \mu m$, como nos casos de (1269) Rollandia e (3561) Devine. Um comportamento similar foi observado no espectro do meteorito Alias, da classe de meteoritos CI (Cloutis et al., 2011a), e em alguns meteoritos do grupo CM (Cloutis et al., 2011b). Os autores destes trabalhos atribuiriam este comportamento à presença do mineral Berthierina, um flossilicato do grupo serpentina, um mineral formado sobre a presença de água líquida. Todavia, é possível que outros minerais tenham comportamento similar nesta região e mais estudos são necessários para estabelecer uma relação do parâmetro com hidratação.

A fim de detectar este comportamento, optamos por calcular o gradiente espectral em duas faixas do espectro (figura 3.7: IRslope1 de 1.0-1.75 μm e IRslope2 de 1.95-2.3 μm). Consideramos que objetos que possuem uma variação no gradiente espectral significativa aqueles em que $|IRslope1 - IRslope2| > 1.5\%/1000\text{\AA}$.

Buscamos na literatura, também, por espectros no infravermelho próximo de objetos de Hildas e Cibele. Encontramos quatro espectros do SMASS II (Bus and Binzel, 2004), nove de Takir and Emery (2012) e dois de Reddy and Sanchez (2016). Desta forma, a amostra final contém 40 espectros de 31 objetos do grupo Hilda e 9 espectros de 6 asteroides do grupo Cibele.

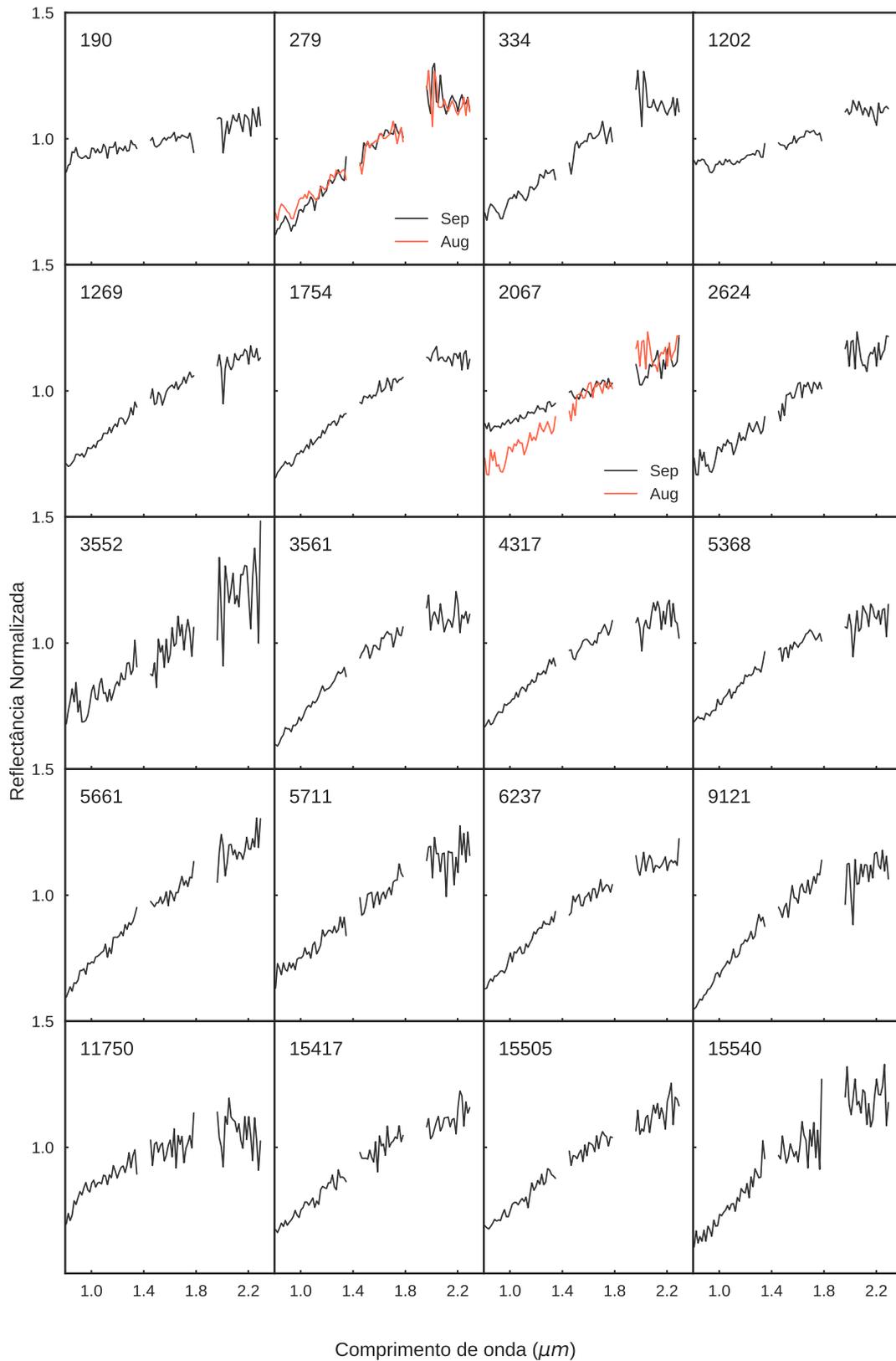


Figura 3.8: Espectros no infravermelho próximo de 20 asteroides membros da população de Hildas. Em vermelho marca os objetos que foram observados mais de uma vez. Os espectros foram normalizados a unidade em $1.2 \mu m$. As regiões de bandas de absorção telúricas foram retiradas para melhor visualização.

As metodologias para a classificação taxonômica e o cálculo do gradiente espectral seguem as descritas na seção anterior, para a região do visível. Todavia, neste caso a classificação taxonômica segue as classes definidas por DeMeo et al. (2009). As regiões de 1.35-1.45 e 1.75-1.95 μm foram removidas devido ao forte ruído causado pela absorção atmosférica da Terra.

3.1.4 Resultados

Os resultados para a análise dos espectros no visível de asteroides Cibeles e Hildas, que foram observados neste trabalho, são apresentados na tabela A.1. As tabelas A.2 e A.3 mostram os resultados da análise dos espectros encontrados na literatura, para Cibeles e Hildas, respectivamente. Os parâmetros que não puderam ser medidos, devido a uma cobertura espectral insuficiente, estão marcados com ”*”, e os objetos em que o parâmetro pôde ser analisado, mas não foram mensurados, estão marcados com ”-”.

Nós estendemos a análise com informações de albedo geométrico e diâmetro, obtidos da última versão do banco de dados do NEOWISE (Mainzer et al., 2016). As tabelas A.6 e A.7 listam as propriedades de albedo, diâmetro e ainda de elementos próprios (Nesvorny, 2015) de todos os objetos de nossa amostra, para as populações de Cibeles e Hildas, respectivamente

A figura 3.9 mostra a distribuição de gradiente espectral contra o diâmetro, separadamente, para Cibeles e Hildas. A figura revela uma tendência de que objetos maiores possuam inclinação espectral menos avermelhada em relação ao restante da população, há um maior espalhamento no gradiente espectral para objetos menores. Este comportamento já foi observado anteriormente por Lagerkvist et al. (2005), para os Cibeles, e por Dahlgren et al. (1997), para os Hildas.

A distribuição de gradiente espectral por albedo é apresentada na figura 3.10, no painel superior. No painel inferior, mostramos um histograma da distribuição de cores para as populações. Em ambas populações, Cibeles e Hildas, é possível notar uma bimodalidade na distribuição, também já apontada na literatura no caso dos Hildas (Gil-Hutton and Brunini, 2008). Neste último caso, é possível notar a presença de dois agrupamentos: um grupo com inclinação espectral centrado $\sim 4.2 \text{ \%}/1000\text{\AA}$, representando a classe taxonômica X e um grupo com índices de cores mais avermelhadas com centro $\sim 9.4 \text{ \%}/1000\text{\AA}$, dominado pela classe taxonômica D. Para a população de Cibeles, o primeiro grupo de objetos está centrado em $\sim 2.3 \text{ \%}/1000\text{\AA}$, com uma mistura de objetos dos tipos C e X, com uma separação do grupo de objetos de tipo D, centrado a $\sim 8.8 \text{ \%}/1000\text{\AA}$. Nas duas populações o grupo de cores mais avermelhadas, relacionado à classe D, mostra uma distribuição de albedos ligeiramente superior em relação ao grupo de cor menos avermelhada.

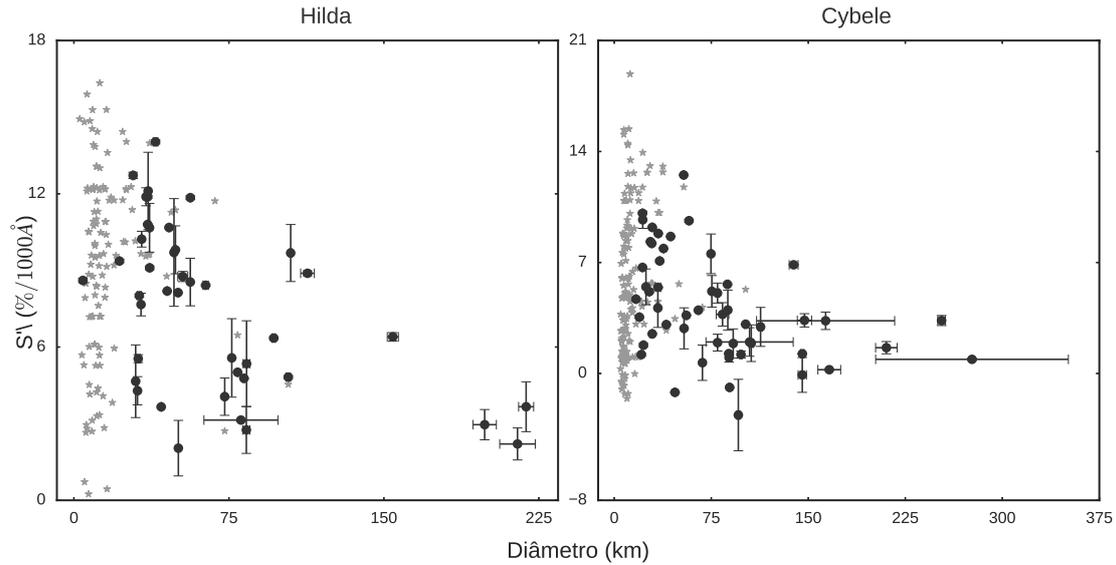


Figura 3.9: Gradiente espectral no visível *versus* diâmetro para Hildas (a) e Cibele (b). Os asteriscos cinza são gradiente espectrais calculados com o SDSS (seção 3.2).

O grupo dos Cibele mostrou uma maior abrangência de cores e classes taxonômicas se comparado ao grupo dos Hildas, ambos com uma predominância de tipos primitivos. Nós destacamos a presença de dois objetos com classificação taxonômica S: (679) Hippodamia com um diâmetro de $D = 42$ km e (3675) Kemstach com $D = 18$ km, de acordo com a base de dados do NEOWISE. Gil-Hutton and Licandro (2010) mostrou a presença de outros cinco objetos, com o uso do SDSS, potencialmente classificados como S ou Q, todavia estes seriam objetos de dimensões físicas menores.

O gráfico 3.10 mostra também a distribuição de objetos hidratados dentre as populações. A banda de absorção em $0.7 \mu m$ foi detectada em apenas sete dos 55 membros de Cibele, e em nenhum dos objetos de Hildas. Todos os asteroides que apresentam esta banda foram classificados como tipo C, com a exceção de (940) Kordula, que foi classificado como tipo X. A queda em direção ao ultravioleta foi identificada em seis membros de Cibele e em apenas um membro de Hildas: (334) Chicago. Dois objetos de Cibele apresentam os dois parâmetros: (121) Hermione e (168) Sibylla. Os asteroides (334) Chicago e (121) Hermione foram observados no infravermelho médio por Takir and Emery (2012) e são os únicos objetos daquela amostra que apresentam uma banda em $3 \mu m$ do tipo "abrupta", dentre os objetos de Hildas e Cibele, respectivamente. É válido lembrar que esta é a banda em $3 \mu m$ que também é associada à presença de materiais hidratados na superfície de asteroides. Para objetos que apresentam a queda no ultravioleta, medimos também o gradiente espectral nesta região. Entretanto, nenhuma relação relevante envolvendo este parâmetro foi detectada.

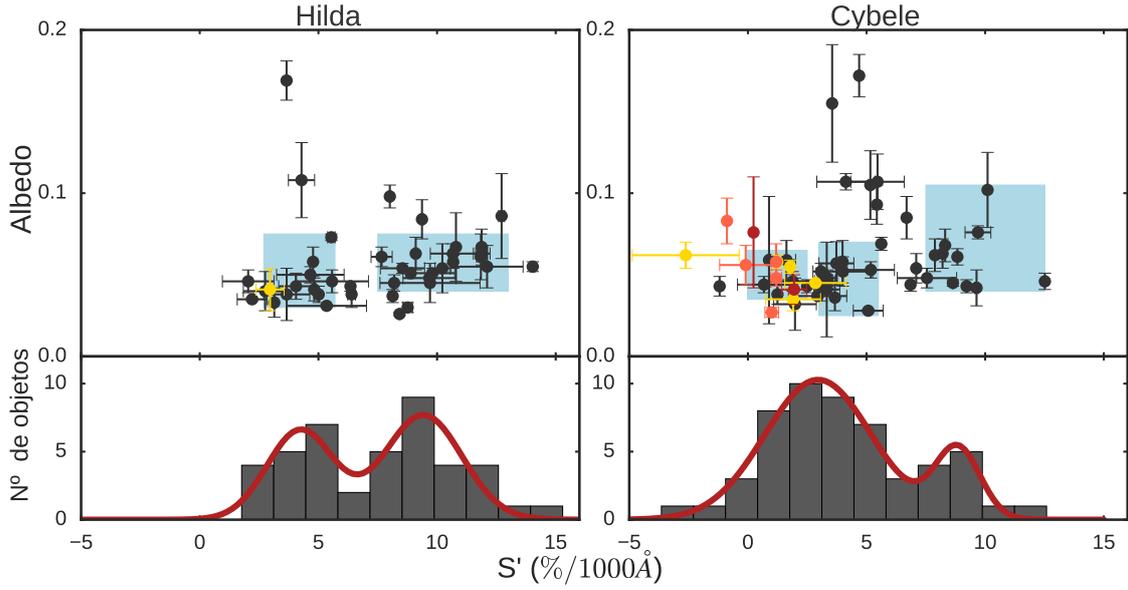


Figura 3.10: *Topo*: Distribuição de asteroides de Hildas e Cibele no espaço de gradiente espectral por albedo. As caixas em azul representam os grupos descritos na seção 3.2. Em amarelo estão representados objetos que apresentam a queda de reflectância no ultravioleta, em laranja os que apresentam banda em $0.7 \mu\text{m}$ e em vermelho aqueles que apresentam ambos parâmetros. *base*: Histograma da distribuição de gradiente espectral nos grupos dinâmicos. As linhas vermelhas representam ajustes de gaussianas bimodais nas distribuições.

Os resultados da análise dos espectros no infravermelho próximo são apresentados nas tabelas A.4 e A.5, para objetos observados neste trabalho e na literatura, respectivamente. A vasta maioria dos objetos de Hildas apresenta um espectro vermelho e foram classificados como de tipo D, embora uma parcela tenha sido classificada como tipo X. Nenhum tipo D nesta região do espectro foi observado em Cibele, onde a maioria de objetos pertencem a classe X. Entretanto, o número de espectros observados de Cibele é consideravelmente menor do que de Hildas. A figura 3.11 sugere a presença de dois grupos de espectros no infravermelho próximo, um de cor menos avermelhada e com menores valores de albedo, e outro mais vermelho, com valores de albedos mais elevados. Este comportamento concorda com a sugestão anterior de que no visível os objetos de tipo D poderiam ter uma distribuição de albedo maior do que os tipos X. Os asteroides que possuem uma mudança no gradiente espectral do infravermelho próximo estão marcados de azul na figura e são observados nos dois grupos.

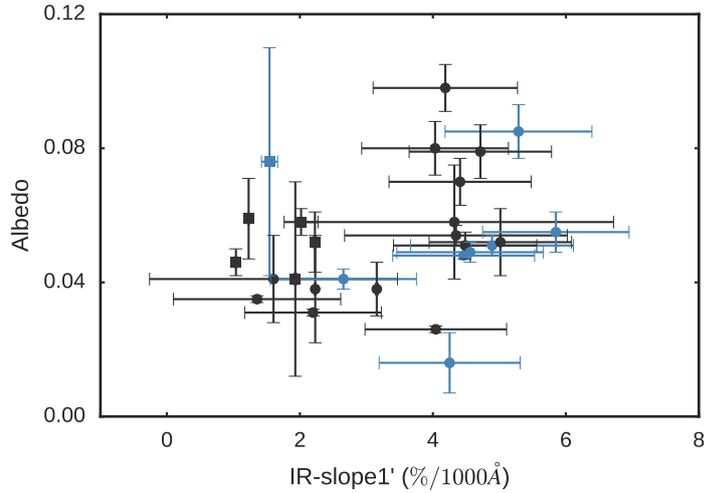


Figura 3.11: Albedo *versus* IR-slope1' para Hildas (pontos) e Cibeles (quadrados). Asteroides que mostram uma mudança no gradiente espectral do infravermelho próximo são pintados de azul.

3.2 Análise estendida com dados do SDSS e NEOWISE

Nesta seção utilizamos os grandes bancos de dados públicos para estender a análise das propriedades físicas dos asteroides de Hildas e Cibeles em um contexto mais amplo e comparar com as fronteiras interna e externa destas populações. Buscamos objetos na base de dados do catálogo de objetos móveis (MOC na sigla em inglês) do SDSS (Ivezic et al., 2010)). Utilizamos aqueles que foram classificados por Carvano et al. (2010) e Hasselmann et al. (2011) em um sistema taxonômico elaborado para ser compatível com a taxonomia de Bus and Binzel (2002), considerando os limites devido a baixa resolução espectral do SDSS. Mais uma vez usamos a base de dados do NEOWISE para buscar por albedo geométrico e diâmetros e a base de Nesvorny (2015) para listar os membros pertencentes a famílias dinâmicas de asteroides.

O cálculo do gradiente espectral dos objetos foi feito a partir das reflectâncias listadas em Hasselmann et al. (2011), de maneira compatível com os gradientes espectrais descritos na seção 3.1.2. Realizamos um ajuste linear nas reflectâncias em g' , r' e i' dos filtros SDSS (centrados em 0.47, 0.62 e 0.76 μm , respectivamente) e normalizamos no filtro g' . A incerteza foi estimada a partir de um modelo Monte-Carlo, onde 1000 clones foram criados aleatoriamente dentro da incerteza em cada filtro, usando uma distribuição normal. O valor final do gradiente espectral foi definido a partir do valor médio da distribuição resultante do Monte-Carlo, e a incerteza definida pela variância, expressados em unidade de $\%/1000\text{\AA}$.

Nós usamos os limites em semi-eixo maior $3.27 < a < 3.7$ au e $3.7 < a < 4.5$

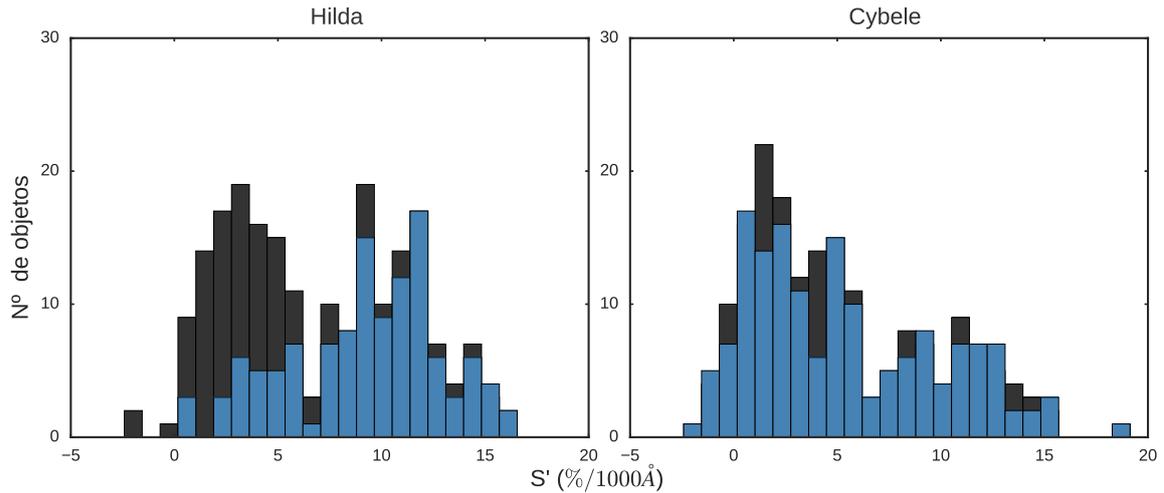


Figura 3.12: Histograma de gradiente espectral de Hildas e Cibeles com dados do SDSS. O histograma em azul mostra o efeito da remoção das famílias.

au para definir as buscas por objetos das populações de Cibeles e Hildas, respectivamente. Obtivemos um total de 255 asteroides Cibeles e 297 Hildas listados em Ivezić et al. (2010). Destes, 179 Cibeles e 208 Hildas também possuem albedo e diâmetro tabulados em Mainzer et al. (2016). Rejeitamos os objetos que possuem uma indicação de presença de banda de absorção de olivina/piroxênio, resultando em 177 Cibeles e 207 Hildas com dados do SDSS e NEOWISE.

Nesvorný (2015) definiu duas famílias dinâmicas na região dos Cibeles, Sylvia e Ulla, e outras duas na região dos Hildas, a homônima Hilda e Schubart. Em Cibeles, dos objetos que estão catalogados em ambas bases de dados, SDSS e NEOWISE, vinte pertencem a Sylvia e dois a Ulla. Enquanto em Hildas, 58 pertencem a família Hilda e 31 a Schubart.

Com o intuito de comparar com as populações vizinhas a Cibeles e Hildas, também consideramos as distribuições de albedo e gradiente espectral de Troianos, sendo esta a população externa a de Hildas. Ainda consideramos a família de Themis, uma antiga família de asteroides de baixa inclinação no cinturão externo, população mais interna aos Cibeles. Ao total obtivemos 575 objetos da família colisional de Themis e 330 de troianos presentes em ambas bases de dados de SDSS e NEOWISE.

A figura 3.12 mostra a distribuição de gradiente para os asteroides selecionados dos grupos de Cibeles e Hildas, com e sem as famílias dinâmicas. As distribuições apresentadas são claramente bimodais, concordando com o resultado apresentado na seção anterior, com dados de espectroscopia. As famílias de Hilda e Schubart contribuem fortemente para o primeiro grupo de cores menos avermelhadas na região dos Hildas. Todavia, mesmo com a remoção destes objetos, o pico ainda é notável. Por outro lado, em Cibeles a remoção de membros de famílias dinâmicas não parece

afetar a distribuição do gradiente espectral. Desta forma, para a análise das propriedades físicas dos grupos, decidimos por remover os membros de famílias em Hildas e manter os de Cibele.

Uma parcela das características aqui mencionadas sobre a distribuição de gradiente espectral e albedo já foi mencionada e discutida na literatura (Gil-Hutton and Brunini, 2008; Gil-Hutton and Licandro, 2010; Grav et al., 2012; Kasuga et al., 2012; Ryan and Woodward, 2011; Wong and Brown, 2017). Mas nenhum destes estudos analisa ambas as distribuições conjuntamente. Neste sentido, usamos a distribuição conjunta destas propriedades para construir gráficos de densidade ponderada. Este processo foi feito considerando que cada medição de albedo e gradiente espectral define uma gaussiana bidimensional, onde o valor médio é igual o valor medido e a variância é igual a incerteza na medição. A densidade total para cada valor de albedo e gradiente espectral é dada pela soma de todas as gaussianas. Os picos de densidade correspondem à maior probabilidade de encontrar um membro de cada população no espaço de gradiente espectral por albedo. A figura 3.13 mostra a presença de diversos picos de densidade dentre as populações. Na região dos Cibele a bimodalidade já observada anteriormente é também aparente no espaço de gradiente espectral por albedo. Há uma clara divisão entre os grupos de cor mais avermelhada e o grupo com cores menos avermelhadas, correspondentes às classes C/X e D, de acordo com o observado com os dados de espectroscopia, na seção X. Entretanto, neste caso é possível notar a subdivisão entre o complexo C e X, o segundo com uma distribuição de albedos a valores levemente inferiores em relação ao primeiro. Na região dos Hildas a bimodalidade é novamente observada, com o grupo de cores avermelhadas aparentemente com uma distribuição de albedo levemente superior. A remoção de membros de famílias dinâmicas dentre os Hildas reduz intensamente o contraste do pico de cor intermediária, embora ainda seja possível notar a contribuição de objetos não relacionados a famílias. Nos troianos uma bimodalidade é novamente observada, contudo o grupo de cores intermediárias, desta vez, apresenta uma distribuição de albedo superior ao grupo de cores avermelhadas, e ainda, uma distribuição de cores que não atinge valores neutros de gradiente espectral. Finalmente, a família de Themis apresenta apenas um grupo de objetos, comportamento que é esperado para uma família colisional, sendo este de cores cinzas.

Procedemos definindo os limites de cada grupo de asteroides. Este procedimento foi feito a partir de análise visual, usando a figura 3.13. Para os Cibele e Hildas podemos aplicar um limite no gradiente espectral para cada grupo. Os três grupos em Cibele foram então definidos por $S' < 2.5\%/1000\text{\AA}$, $2.5 < S' < 7.5\%/1000\text{\AA}$ e $S' > 7.5\%/1000\text{\AA}$. Os dois grupos em Hildas foram definidos usando $7.5\%/1000\text{\AA}$ como o limite inferior ou superior. No caso dos troianos, por outro lado, os grupos foram melhor separados usando o linha $p_v = 0.055 - 0.1575(S' - 7)$ como limite. Posteri-

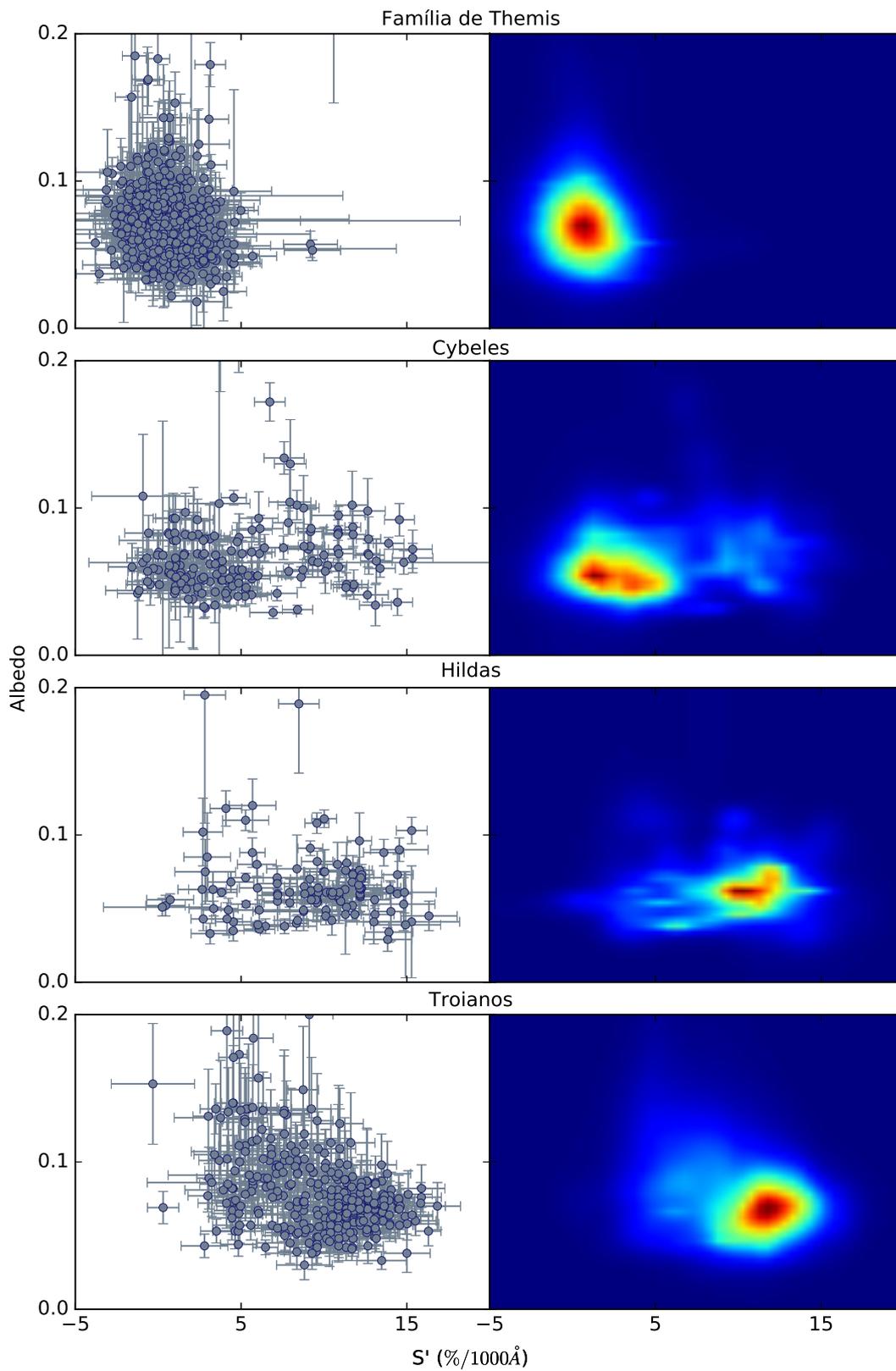


Figura 3.13: Diagramas de espalhamento e de densidade para a família colisional de Themis e as populações Cibele, Hilda e Troianos

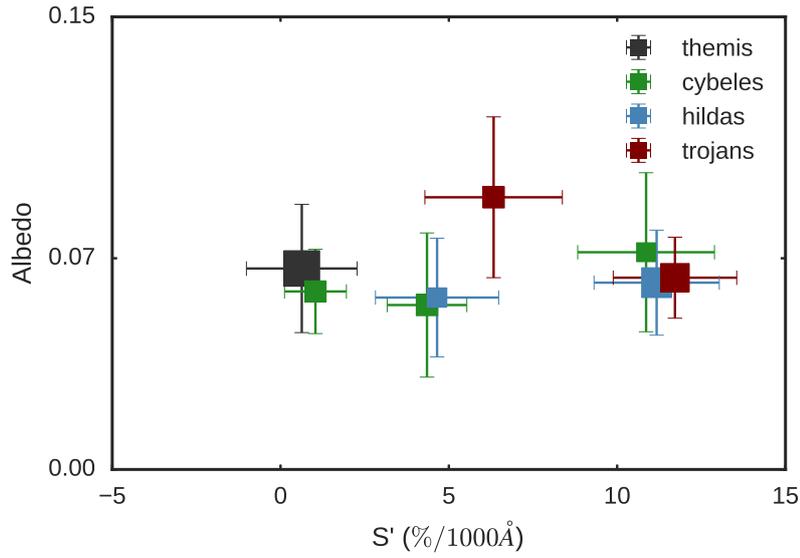


Figura 3.14: Médias ponderadas e desvio padrão de albedo e gradiente espectral para cada grupo de objetos em troianos, Hildas, Cibeles e na família de Themis. Os tamanhos dos pontos está relacionado com a proporção relativa aos grupos de objetos, para cada população.

ormente, calculamos as médias ponderadas e o desvio padrão de albedo e gradiente espectral para cada grupo de objetos. Os resultados são mostrados na figura 3.14 e na tabela 3.5.

Tabela 3.5: Médias ponderadas e desvio padrão para p_v e gradiente espectral de cada grupo dentro das populações da família de Themis, Cibeles, Hildas e Troianos.

População	Grupo	p_v	$p_{v(Erro)}$	S' %/1000Å	S'_{erro} %/1000Å
Themis	C	0.066	0.021	0.63	1.64
Cibele	C	0.059	0.014	1.03	0.92
Cibele	P	0.055	0.023	4.35	1.18
Cibele	D	0.072	0.026	10.86	2.03
Hilda	P	0.057	0.020	4.65	1.83
Hilda	D	0.062	0.017	11.17	1.86
Trojan	PD	0.090	0.027	6.32	2.04
Trojan	D	0.064	0.013	11.71	1.83

3.3 Discussão

A análise conjunta dos dados de espectroscopia, que representa os objetos grandes e os dados de espectrofotometria com o SDSS, que permite o acesso aos objetos pequenos, revela uma diversidade de características superficiais em cada população. Nós encontramos dois grupos de objetos no espaço de gradiente espectral/albedo para os Hildas e três para os Cibeles. A subdivisão do grupo de cores mais neutras foi possível apenas com a quantidade de dados da amostra do SDSS. Uma bimodalidade é também observada na distribuição de propriedades dos espectros no infravermelho próximo. Cada um destes grupos de objetos pode estar relacionado a um conjunto de composições e/ou processos que alteram a superfície de asteroides, como o rejuvenescimento superficial e intemperismo espacial. Uma vez que estes grupos são principalmente discerníveis pelo gradiente espectral, eles podem ser associados a classes taxonômicas, para facilitar o estudo comparativo. Considerando a classificação de Tholen (1984), iremos referir ao grupo de cores neutras de "grupo-C", ao de cores intermediárias de grupo "P" e ao de cores vermelhas de "grupo-D".

A maior variedade de classes taxonômicas, cores e distribuição de albedo de Cibeles reflete uma gama maior de possíveis composições de seus membros do que em Hildas. A presença de objetos de alto albedo ($\rho_g > 0.1$) e até asteroides de tipo S, sugere uma contribuição maior de objetos que foram formados mais próximo ao Sol do que aonde estão atualmente.

A presença de dois objetos de alto albedo dentre os Hildas também sugere uma contribuição de membros que se formaram em outras regiões do cinturão de asteroides, como foi sugerido por Grav et al. (2012). Investigamos se os albedos destes objetos podem ser explicados por algum viés nas medidas radiométricas de diâmetro e/ou magnitude absoluta. (1162) Larissa tem dois grupos de observações no infravermelho térmico pelo WISE (Mainzer et al., 2011) e também pelo AKARI (ver em Usui et al. (2011)), então recalculamos os diâmetros usando uma implementação do NEATM de Alí-Lagoa et al. (2016). Os ajustes produzidos para os quatro grupos de observações são similares ao diâmetro e albedo obtidos pelo time do NEOWISE. O albedo encontrado permanece maior que 0.11, mesmo se aumentarmos o valor da magnitude absoluta em 0.3 mag. Por outro lado, a cobertura no infravermelho térmico de (3843) OISCA é limitada pelas observações do WISE. Se o objeto for altamente irregular e as observações foram feitas em uma seção cruzada pequena, o diâmetro ajustado será subestimado. É impossível de checar esta hipótese, uma vez que não há um modelo de forma disponível, todavia o valor alto da amplitude na curva de luz sugere esta possibilidade (o ALCDEF, um banco de dados de observações de curvas de luz de asteroides, contém três estimativas para a amplitude, variando de 0.2 a 0.32 mags; Warner et al. (2009)). Igualmente, usando uma va-

riação de 0.3 mag na magnitude absoluta, obtivemos um albedo de 0.08 ± 0.02 . Desta forma, concluímos que os albedos destes objetos são de fato moderados, considerando o albedo médio desta região. Pelo sistema de Tholen (1984), estes objetos são classificados como tipos M. Entretanto, é pouco provável uma relação com meteoritos metálicos. Landsman et al. (2015) propuseram que diversos tipos M podem ter composições primitivas que não estão amostradas em meteoritos.

O trabalho de Fornasier et al. (2014) encontrou que $\sim 50\%$ dos asteroides do complexo C apresentam a banda em $0.7 \mu m$, em contraste com 4.5% para os tipos P, na taxonomia de Tholen. Para o grupo de Cibele, encontramos que apenas $\sim 30\%$ de objetos de tipo C são hidratados e 5% de tipos X na taxonomia de Bus (análoga aos tipos C e P da taxonomia de Tholen). A figura 3.10 mostra que a maior parte dos asteroides hidratados estão relacionados ao grupo C nos Cibele. Nos Hildas (334) Chicago está no limite esquerdo do grupo P.

O único asteroide onde a hidratação foi observada em Hildas é (334) Chicago, que apresenta a queda no ultravioleta e um banda em $3.0 \mu m$ do tipo "abrupta" (Takir and Emery, 2012). Este fato em conjunto com a pequena quantidade de objetos hidratados entre os asteroides de Cibele, sugere um cenário onde o processo de alteração aquosa não foi predominante nestas regiões. Em Fornasier et al. (2014), os autores analisaram ~ 600 espectros de asteroides primitivos, adquiridos na literatura, e concluíram o processo como dominante na região de 2.1-3.1 ua, a distâncias heliocêntricas inferiores as anteriormente propostas por Vilas et al. (1994). Morate et al. (2016) e Morate et al. (submetido) (ver também em anexo C) mostraram famílias de asteroides no cinturão interno com alto nível de hidratação. O modelo térmico de Grimm and McSween (1993) propõem que a região onde ocorreu hidratação foi em 2.5 – 3.3 ua, exatamente anterior onde estão os Cibele hoje. O conjunto de proposições destes trabalhos e os dados inferem a região dos Cibele é o limite onde os minerais constituintes de um asteroide podem sofrer o processo de alteração aquosa. Entretanto o processo aparenta ser predominante em populações mais próximas do Sol, e a hipótese de que os objetos hidratados foram formados em outras regiões do cinturão de asteroides e migraram para a região dos Cibele e Hildas, sendo desta forma também contribuição do cinturão de asteroides, não pode ser descartada.

Confirmamos a tendência de objetos grandes em ambas as populações apresentarem uma cor mais neutra. Lagerkvist et al. (2005) e Dahlgren et al. (1997) tentaram explicar este comportamento sugerindo que objetos de tipo D fossem mais frágeis que tipos P, e desta forma mais afetados por eventos disruptivos e sendo mais numerosos como objetos pequenos. Gil-Hutton and Brunini (2008) e Gil-Hutton and Licandro (2010) enfatizam que a tendência não é observável nos objetos pequenos, a partir dos dados do SDSS. Os autores argumentam em favor a uma combinação de

fenômenos de intemperismo espacial e rejuvenescimento da superfície como principal explicação para o comportamento. Experimentos de irradiação de íons em amostras do meteorito Tagish-Lake mostram uma tendência para a neutralização do gradiente espectral no visível e infravermelho próximo (Lantz et al., 2017; Vernazza et al., 2013). Se as superfícies de asteroides tipos D forem óticamente dominadas por materiais similares aqueles de Tagish-Lake, o intemperismo espacial favorece a evolução de um tipo D para uma superfície de tipo P. Por outro lado, pequenas colisões na superfície dos asteroides revelariam material não processado de tipo D. Portanto, sugerem os autores, objetos maiores que não sofreram disrupção catastrófica ou que não sofreram um rejuvenescimento superficial significativo teriam cores mais neutras, uma vez que suas superfícies ficaram mais tempo expostas ao intemperismo espacial. O contrário ocorreria para os objetos pequenos que estatisticamente teriam uma gama maior de estados possíveis no balanço entre intemperismo espacial e rejuvenescimento superficial, desta forma podendo apresentar superfícies jovens e vermelhas ou mais antigas e mais neutras.

Contudo, Vernazza et al. (2013) e Lantz et al. (2017) também observaram que o intemperismo espacial aumentou o albedo em Tagish-Lake. Em oposição, observamos que os objetos que possuem espectros no visível e infravermelho de tipo D tem o albedo levemente superior aos objetos de tipo P. Carvano et al. (2003) analisaram uma amostra de 460 espectros de asteroides primitivos de diversas regiões do cinturão de asteroides e observaram um comportamento similar. Os efeitos de ambiente, como o intemperismo espacial e o rejuvenescimento superficial devem diversificar as propriedades superficiais de asteroides em maior escala para objetos pequenos do que em objetos grandes, pelos motivos apontados em Gil-Hutton and Brunini (2008) e Gil-Hutton and Licandro (2010), mas o mesmo comportamento pode ser observado mesmo se existem diferentes grupos composicionais na população.

A cor vermelha de objetos é geralmente associada a uma composição similar ao meteorito Tagish-Lake, que apresenta um espectro também vermelho e um albedo muito baixo. Em Takir and Emery (2012), os autores argumentam que todos os objetos de tipo D e P da região de $3.0 < a < 4.0$ ua possuem uma banda de $3.0 \mu m$ de tipo "arredondada". Eles sugerem que este tipo de banda é causado por uma camada fina de gelo de água na superfície do asteroide. A presença de gelo de água contribui na explicação do por que o albedo dos asteroides é maior do que o albedo de Tagish-Lake. Embora não seja claro a quantidade de gelo presente nas superfícies e o quanto isto alteraria o gradiente espectral.

Para estender a comparação a outras populações, analisamos as distribuições de cores e albedos da família de Themis e o grupo dinâmico de troianos de Júpiter. A figura 3.14 mostra os centros de cada grupo de objetos dentre a família de Themis e as populações de Cibele, Hildas e troianos. Estes valores estão listados na tabela

3.5. Há uma clara equivalência com os três grupos em Cibele, na qual há um grupo similar aqueles de Themis (grupos C), e os outros dois grupos similares aos dois grupos presentes em Hildas (grupos P e D). Nos troianos de Júpiter há um grupo que se assemelha com um grupo de Cibele e Hildas (grupos D), porém o outro grupo não aparece significativamente em nenhuma das populações anteriores. A estes objetos nos chamamos de grupo DP. Esta população de objetos residentes nos troianos de Júpiter são mais avermelhados e com uma distribuição de albedos superior aos grupos P de Hildas e Cibele. Nós realizamos um teste Kolmogorov-Smirnov bidimensional que rejeita a hipótese do grupo DP provenha de uma distribuição similar a dos grupos P, resultando em um valor-p $\ll 0.01$.

Os modelos de migração planetária sugerem uma origem comum para as populações de Hildas e Troianos. Entretanto, apesar do fato de ambas as populações apresentarem uma distribuição bimodal do gradiente espectral, como também discutido em Wong and Brown (2017), no espaço de albedo/gradiente espectral, fica claro que os grupos possuem características superficiais divergentes. Uma explicação possível seria que os troianos possuem uma taxa de rejuvenescimento superficial superior a dos Hildas, e conseqüentemente possuem uma superfície geralmente mais jovem. Davis et al. (2002) argumentam que a probabilidade colisional intrínseca atual e as velocidades dos impactos são significativamente maiores nos troianos. Isto levaria a uma taxa de rejuvenescimento também superior. Contudo, um dos grupos dentre os troianos possui uma boa concordância com um dos grupos em Hildas, o grupo D. Uma outra explicação seria que os Hildas e os troianos possuem diferentes grupos composicionais, com diferentes origens. A continuidade aparente de propriedades superficiais e densidade de objetos começando pela família de Themis até as populações de Cibele, Hildas e troianos pode sugerir um gradiente composicional. Este cenário todavia impõem um obstáculo para os modelos de migração planetária.

3.4 Conclusões

Estudamos as propriedades composicionais das populações no cinturão externo de asteroides com espectros no visível de 18 objetos das populações de Hildas e Cibele e 22 espectros no infravermelho próximo de Hildas. A amostra foi aumentada com espectros existentes na literatura nestas faixas espectrais, resultando em um total de 85 espectros no visível e nove no infravermelho para o grupo de Cibele e 83 espectros no visível e 35 no infravermelho para os Hildas. No total adquirimos informações espectroscópicas de 55 objetos de Cibele e 53 Hildas. Foram aplicadas parametrizações nos espectros para caracterizar o gradiente espectral e buscar por sinais de materiais hidratados nas superfícies dos asteroides.

Uma análise estendida foi realizada com objetos de Hildas e Cibele presentes nas

bases de dados do NEOWISE e do SDSS, onde obtivemos informações de diâmetro e albedo e de espectrofotometria, sobretudo da população de objetos pequenos. As conclusões são listadas abaixo:

- A população de Hildas apresenta uma distribuição bimodal de propriedades superficiais, enquanto três grupos foram encontrados em Cibele. É possível observar uma maior gama de possibilidades composicionais em Cibele, dada a uma contribuição de objetos de cor cinza, não observada significativamente em Hildas. A bimodalidade é também apreciável a partir da espectroscopia no infravermelho, onde notamos que objetos vermelhos possuem albedo levemente superior aos demais objetos da população.
- No grupo de Cibele apenas 9 dos 55 asteroides possuem evidência de materiais hidratados, baseado no espectro no visível. Em Hildas apenas o objeto (334) Chicago pode ser confirmado como possuinte de materiais hidratados. Desta maneira, a região dos Cibele aparenta ser o limite da zona de alteração aquosa.
- Hildas e troianos de Júpiter apresentam propriedades superficiais distintas. Identificamos uma continuidade de propriedades desde a família de Themis às populações de Cibele, Hildas e troianos de Júpiter, que pode estar ligado a um gradiente composicional.

Este estudo foi submetido para a revista ICARUS.

Capítulo 4

As Campanhas Observacionais J-PLUS e S-PLUS

4.1 Introdução

As campanhas observacionais J-PAS (*Javalambre Physics of the Accelerating Universe Astronomical Survey*) e J-PLUS (*Javalambre Photometric Local Universe Survey*) fazem parte de um empreendimento conjunto Brasil-Espanha. O objetivo do projeto é medir desvios para o vermelho de uma grande amostra de objetos extragaláticos a uma profundidade de até $V \sim 23$, em uma região de 8000 graus quadrados do céu setentrional (Benitez et al., 2014). Desta maneira, foram instalados dois telescópios (T80 e T250) no Observatório Astrofísico de Javalambre (OAJ), Espanha. As características da localização do Observatório são mostrados na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Características do OAJ

Latitude	40° 02' 28.67" N
Longitude	01° 00' 59.10" O
Altitude	1957 m
<i>Seeing</i> Médio	0.7"

O telescópio principal (T250) tem uma abertura de 2.5 metros e foi equipado com uma câmera que consiste em um mosaico de 14 CCDs de $9K \times 9K$ pixels cada, produzindo um campo visual de 3 graus quadrados com uma escala de placa de $0.22''/mm$. O J-PAS faz uso deste telescópio em conjunto a um sistema de 56 filtros (2 de banda intermediária e 54 de banda estreita), projetados para cobrir a região espectral entre $(0.35-1.0\mu m)$.

O segundo telescópio (T80) tem uma abertura de 0.8 metros e foi equipado com

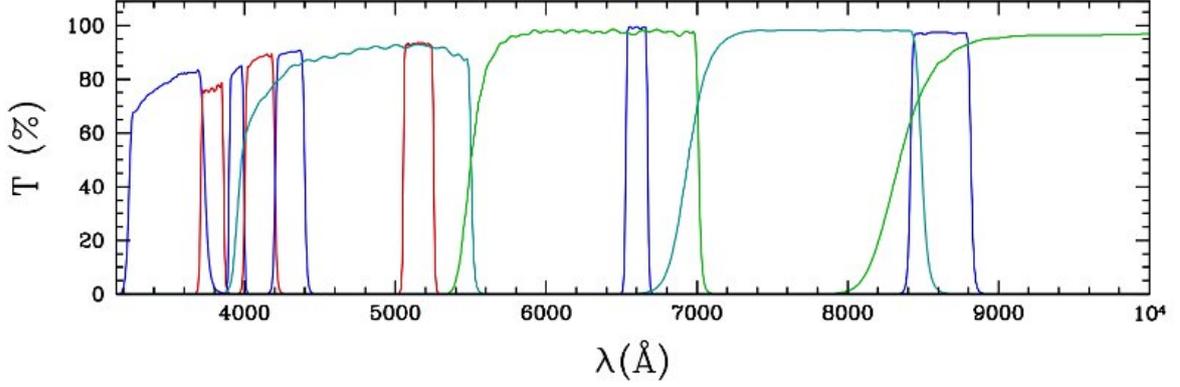


Figura 4.1: Curvas de transmissão do sistema de filtros do T80.

uma câmera CCD com $9K \times 9K$ pixels. O campo visual obtido é de 1.7 graus quadrados com uma escala de placa de $0.55''/mm$. O objetivo primário do T80 é prover, na mesma área do céu a ser observado pelo J-PAS, a calibração fotométrica necessária para que a campanha atinja os resultados esperados. O segundo objetivo é realizar a campanha observacional J-PLUS, que cobrirá a mesma área do céu, porém com um sistema de 12 filtros, também na região de $0.35\text{-}1.0\mu m$. O sistema fotométrico utiliza 4 filtros do sistema do SDDS ($g'r'i'z'$), sete filtros de banda estreita e um filtro no ultravioleta. A figura 4.1 mostra as curvas de transmissão dos filtros, enquanto na tabela 4.2 mostramos as características gerais e o tempo de exposição em cada filtro.

Tabela 4.2: Características do filtros do J-PLUS

ID	Comprimento de onda central (Å)	FWHM (Å)	Tempo de exposição (s)
U_J	3485	508	3×207
F378	3785	168	3×64
F395	3950	100	3×98
F410	4100	200	3×39
F430	4300	200	3×37
g'	4750	1500	3×52
F515	5150	200	3×41
r'	6250	1500	3×80
F660	6600	125	3×270
i'	7725	1550	3×26
F861	8610	400	3×60
z'	9150	1700	3×36

A campanha S-PLUS (*Southern Photometric Local Universe Survey*) utiliza uma cópia do telescópio, câmera e filtros do J-PLUS para mapear, na mesma região espectral, uma área equivalente do céu meridional. Este telescópio foi instalado em Cerro Pachón, no Chile.

O tempo de execução das campanhas J-PLUS/S-PLUS foi estimado em três anos para cada projeto. As estratégias de observação contam com uma primeira visita a um campo, quando é obtido três sub-exposições em cada um dos 12 filtros, produzindo um total de 36 imagens em um intervalo de ~ 1 h. No caso do J-PLUS, posteriormente, seriam realizadas três revisitas em um mesmo campo, apenas com os filtros g' e r' e com um espaçamento de sete dias entre cada visita. Entretanto, devido a atrasos causados por problemas técnicos, as revisitas deixaram de fazer parte da estratégia de observação do J-PLUS.

Até o final destas campanhas, uma grande quantidade de asteroides serão observados. Os trabalhos a serem descritos a seguir estão enfocados na metodologia de obtenção e análise de dados de asteroides com as campanhas J-PLUS e S-PLUS. Porém, parte das metodologias desenvolvidas são também aplicáveis ao J-PAS.

4.2 Estimativa do Catálogo de Asteroides

Realizamos uma simulação com o intuito de estimar o número de objetos a serem observados até o final da campanha J-PLUS. Neste caso, contamos apenas com os asteroides que seriam observados pelo 12 filtros fotométricos, na primeira visita.

Os códigos utilizados para a simulação foram parcialmente desenvolvidos no trabalho de mestrado, intitulado "*Pipeline* Fotométrico e Astrométrico para o Projeto IMPACTON" (De Prá and Carvano (2013)). Neste trabalho, desenvolvemos uma rotina nas linguagens Python e Fortran para calcular as efemérides de asteroides próximos a uma posição do céu, em um dado instante. A finalidade deste algoritmo é identificar objetos conhecidos a partir de catálogos de astrometria obtida de imagens observadas com os telescópios do IMPACTON e J-PLUS/S-PLUS, de maneira independente aos serviços *online*.

A rotina desenvolvida durante o trabalho de mestrado foi adaptada, substituindo o integrador Runge-Kutta para um integrador Radau 15, visando obter uma melhor precisão nas efemérides calculadas.

Para estimar a quantidade de objetos a serem observados por três anos de operação do J-PLUS, utilizamos uma simulação de apontamentos, produzidas pela equipe do projeto. Para cada posição do céu e data de observação fornecidas pela simulação de apontamentos, buscamos por asteroides que seriam observados, i.e, estariam dentro de uma região projetada no céu de $1.7^\circ \times 1.7^\circ$, considerando a posição de apontamento como centro.

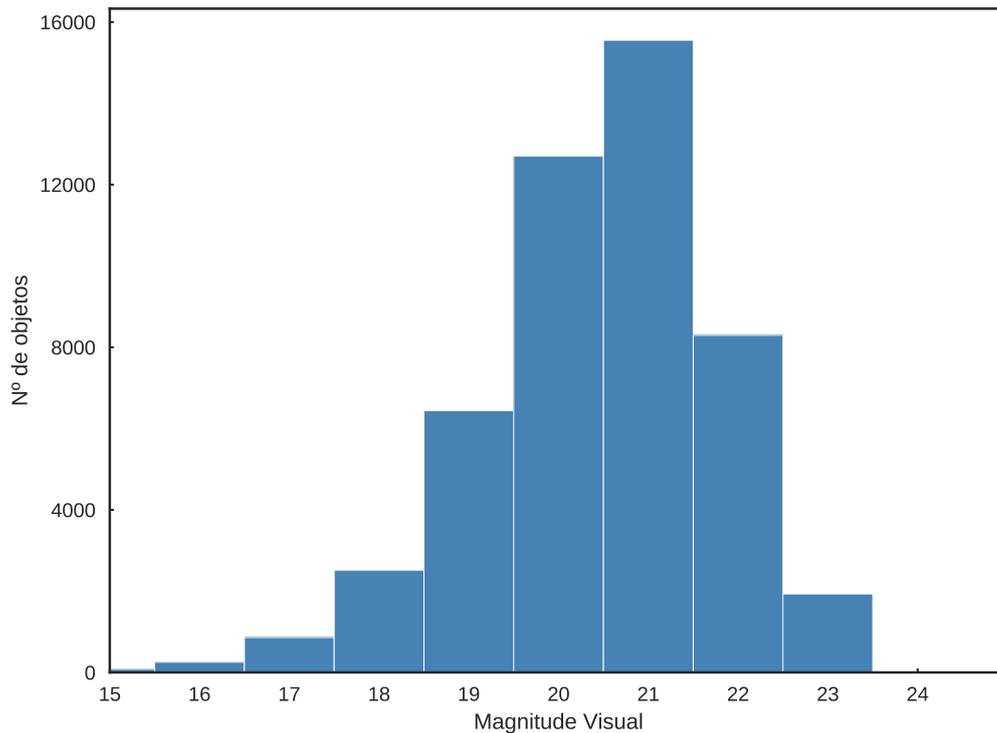


Figura 4.2: Número de objetos observados por magnitude visual. Resultado da simulação de três anos de operação do J-PLUS

A figura 4.2 mostra o número de objetos observados por valores de magnitude visual. Desta forma, é estimado que catálogo de espectrofotometria de asteroides com dados do J-PLUS contará com ~ 5 mil objetos observados com magnitude visual inferior a $V < 18$ e, aproximadamente ~ 12 mil para $V < 19$. É válido ressaltar que os tempos de exposição de cada filtro foram projetados para detectar objetos com um sinal-ruído em 5 para objetos com magnitude visual de até $V \sim 23$.

A campanha S-PLUS utilizará a mesma metodologia para observar o céu meridional. Desta maneira, uma estimativa razoável é que o catálogo de espectrofotometria de asteroides com 12 filtros, chegue a aproximadamente ~ 24 mil objetos ao final das campanhas S-PLUS e J-PLUS.

Os dados obtidos por estas campanhas fornecerão informações sobre a distribuição de propriedades físicas de asteroides em todo o CPA. Na figura 4.3, mostramos uma estimativa da quantidade de objetos com $V < 19$, a serem observados apenas com o J-PLUS, no espaço de semi-eixo maior por excentricidade. Além do CPA, o projeto ainda observará uma quantidade razoável de objetos dos grupos dinâmicos de Cybeles, Hildas e Troianos.

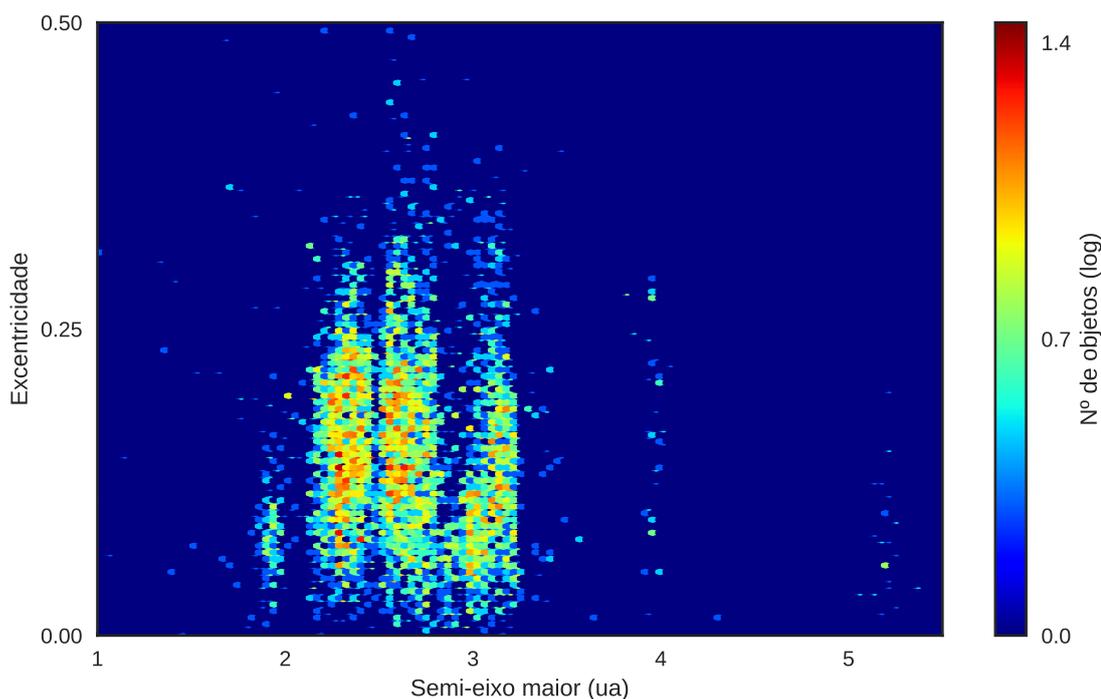


Figura 4.3: Distribuição simulada no espaço de semi-eixo maior por excentricidade dos asteroides a serem observados pelo J-PLUS e S-PLUS.

4.3 *Pipeline* para Pequenos Corpos do Sistema Solar

A análise dos dados de pequenos corpos do Sistema Solar observados pelo J-PLUS e S-PLUS requer rotinas computacionais que sejam eficientes em processar, extrair e manter informações específicas destes objetos dentre o volume massivo de dados produzidos por estas campanhas. Em média, são observadas ~ 300 imagens em uma noite, cada uma com aproximadamente 80 mil fontes luminosas. Deve ser considerado ainda que os dados de asteroides tem que ser transportados do *Centro de Estudios de Física del Cosmos de Aragón (CEFCA)*, em Teruel, Espanha, para a análise de ciência na sede do Observatório Nacional, no Rio de Janeiro, Brasil. Desta maneira, desenvolvemos um conjunto de rotinas computacionais (*pipeline*) e bancos de dados que auxiliam nestas tarefas.

É válido ressaltar que o *pipeline* aqui descrito foi desenvolvido visando otimizar a identificação de novos objetos do Sistema Solar. Esta tarefa levava em consideração a estratégia de observação anterior do J-PLUS, em que um campo do céu seria revisitado quatro vezes em um mês. Com a remoção das revisitas, a identificação de novos asteroides com os dados do J-PLUS é imensamente restringida. Estas

rotinas serão adaptadas e utilizadas no J-PAS, onde existirão revisitas em um campo, separadas por períodos de aproximadamente um mês.

O *pipeline* foi dividido em duas partes. A primeira, denominada por *demob*, sendo esta responsável por encontrar candidatos a objetos móveis a partir da comparação das posições de fontes extraídas das imagens do J-PLUS. Esta rotina foi integrada ao *pipeline* central do J-PLUS, no CEFCa. A segunda parte foi implementada na sede do Observatório Nacional (ON), no Rio de Janeiro. O conjunto de algoritmos da parte brasileira do *pipeline* foi chamado de *jppe*, sendo responsável por encontrar asteroides conhecidos e identificar novos objetos dentre os dados fornecidos pelo *demob*, e ainda, estabelecer uma base de dados acessível para a busca dos dados de um objeto. A figura 4.4 mostra um diagrama de fluxo das rotinas implementadas no *pipeline* para pequenos corpos do Sistema Solar com o J-PLUS, assim como onde cada rotina deve ser executada.

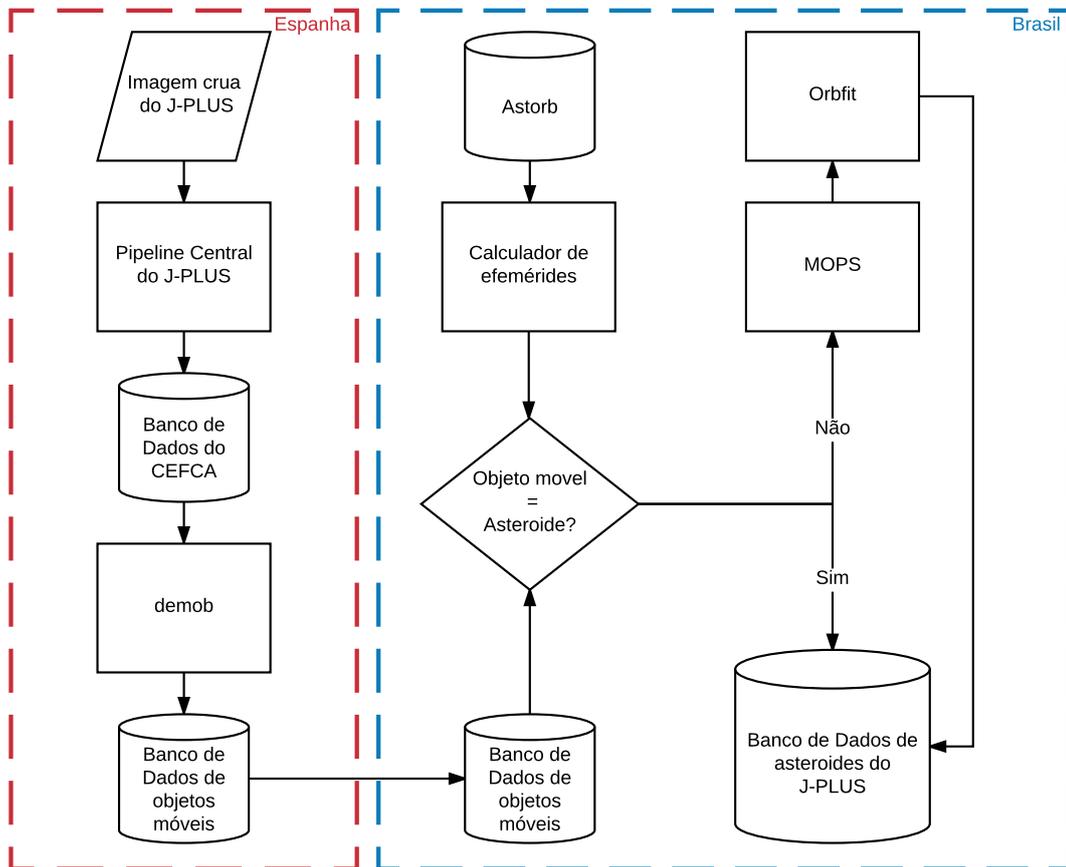


Figura 4.4: Fluxograma do *pipeline* de pequenos corpos do Sistema Solar com dados do J-PLUS.

A primeira etapa do processamento dos dados é realizado pelo *pipeline* do J-PLUS, que faz a extração das informações astrométricas e fotométricas das fontes em cada imagem obtida pelo telescópio. Neste ponto a fotometria deve ser calibrada

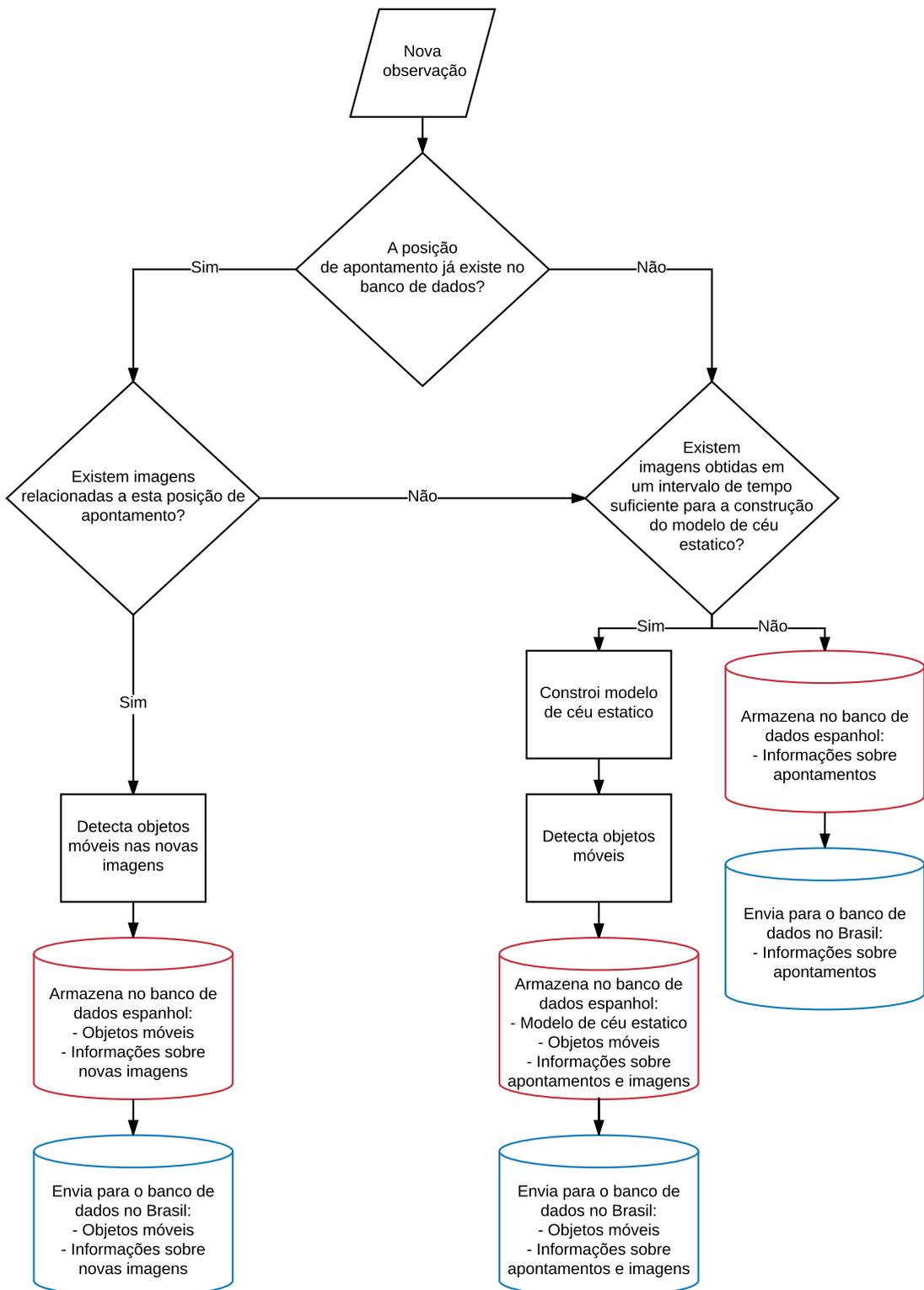


Figura 4.5: Fluxograma de decisões do *demob* e do armazenamento e envio de informações para os bancos de dados do CEFCA (vermelho) e do ON (azul).

e armazenada no banco de dados do projeto. A rotina *demob* obtêm os objetos móveis nos catálogos produzidos pelo *pipeline* do J-PLUS através da comparação de posições astrométricas das fontes nas imagens da primeira visita que estejam separadas por intervalos de tempo de aproximadamente 30 minutos. As fontes que forem recuperadas nas mesmas posições em todas as comparações são incorporadas a uma lista de objetos estacionários, o qual chamamos de modelo do céu estático, que serve como uma referência para identificar os objetos não-estacionários nas imagens da primeira visita e em todas as visitas subsequentes. A sequência de observação dos filtros foi determinada de maneira a minimizar o número de fontes que podem ser identificadas como não estacionárias por estarem próximas do limite de detecção.

Esta rotina é executada junto ao pipeline central do J-PLUS, no CEFCA, Espanha. O resultado é armazenado em uma tabela de banco de dados que contém as informações astrométricas do modelo de céu estático, referente a uma posição de apontamento, e as informações da astrometria e fotométricas dos objetos móveis. Esta parte, relativa apenas aos objetos móveis é clonada pelo banco de dados no ON, Brasil. Desta forma, os dados enviados ao Brasil são referentes apenas as fontes que podem estar relacionadas a corpos do Sistema Solar, catalogados ou não. Os dados de objetos como estrelas, galaxias e etc, não são enviadas, reduzindo enormemente o volume da transferência de dados. A figura 4.5 mostra o fluxo de decisões tomadas pelo algoritmo do *demob* para o armazenamento e envio de informações para os bancos de dados no CEFCA e no ON. Uma descrição da estrutura relacional destes bancos de dados é mostrada no apêndice C.

Uma vez que os dados são obtidos e armazenados no banco de dados no Brasil, o *jpipe* é encarregado de identificar asteroides catalogados e buscar por novo objetos. A primeira etapa é feita comparando as posições astrométricas das fontes de uma imagem com as posições previstas para asteroides conhecidos. Este procedimento é feito utilizando o mesmo código de cálculo de efemérides usado para estimar o volume de dados de asteroides que serão obtidos pelo J-PLUS, na seção anterior. A figura 4.6 mostra um resultado típico obtido com dados reais do J-PLUS, onde alguns asteroides são identificados dentre os objetos móveis de uma imagem.

Os objetos móveis que não foram identificados como asteroides catalogados são passados para as rotinas do programas livres MOPS (Denneau et al., 2013) e Orbitfit¹, que tentarão reconhecer objetos novos.

O primeiro algoritmo gera listas de candidatos a asteroides através de associações entre objetos móveis de diferente imagens baseadas no movimento celeste que poderia ser realizado por um corpo do Sistema Solar, considerando um limite de velocidade imposto. De maneira geral é utilizado o valor de $0.5-0.75^\circ/dia$. Estas listas de associações de objetos móveis obtidas em uma noite são denominadas *trac-*

¹Programa livre disponibilizado em <http://adams.dm.unipi.it/orbmain/orbfit/>

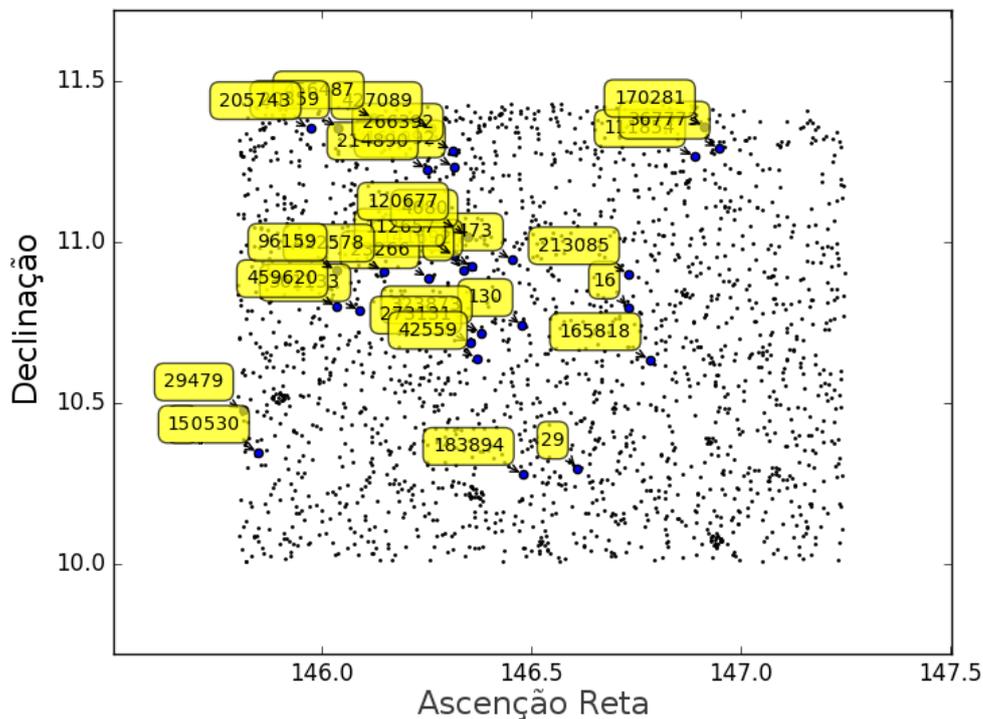


Figura 4.6: Exemplo de asteroides reconhecidos em um campo observado pelo J-PLUS.

klets. Para um intervalo de aproximadamente um mês, a trajetória no céu de um asteroide pode ser aproximada por uma curva quadrática. Desta maneira, a próxima etapa do MOPS gera listas de ao menos três tracklets, de três diferente noites, que foram observadas em menos de 45 dias, considerando que a trajetória de um objeto real seria uma curva cujo modulo do limite de aceleração é de $\sim 0.02^\circ/\text{dia}^2$. Estas ultimas associações são chamadas de *tracks*.

O programa Orbits tenta ajustar elementos orbitais a partir das posições dos objetos pertencentes a uma *track*. É importante salientar que para um bom ajuste, é necessário que a trajetória do objeto no céu possua uma curvatura apreciável (Milani and Gronchi, 2010). Caso o ajuste seja realizado, deverá ser notificado à comunidade a possibilidade da descoberta de um asteroide. O novo objeto é confirmado caso campanhas subsequentes observem um asteroide em uma posição prevista considerando a órbita calculada.

Os bancos de dados do CEFCA e do ON foram projetados para que mesmo que uma imagem de um determinado campo não tenha sido processada pelo *demob*, uma notificação da observação seja registrado no banco de dados brasileiro. Desta maneira, facilitando a escolha do momento mais fortuito para executar as rotinas do MOPS e Orbits. Entretanto, é válido notar que o sucesso destes algoritmos é altamente dependente da estratégia de observação. A retirada das revisitas aos

campos limita o procedimento a apenas objetos que se movam muito rápido no céu, de maneira a formar uma curvatura na trajetória no período de ~ 1 h de observação.

4.4 Estudando a banda em 0.7 com dados de espectrofotometria

As observações em 12 filtros fotométricos realizadas pelas campanhas J-PLUS e S-PLUS, permitem a reconstrução de um espectro de reflectância normalizada de milhares de asteroides. Entre os possíveis casos científicos que podem ser estudados com estes dados, destacamos a identificação da banda de hidratação em $0.7 \mu\text{m}$ em grande amostra do CPA.

No capítulo 2, discutimos os trabalhos de Vilas et al. (1994) e Rivkin (2012), que utilizaram dados de espectrofotometria do ECAS e SDSS, respectivamente, para estudar a distribuição de objetos com a banda em $0.7 \mu\text{m}$ no CPA. A análise desta banda com este tipo de dados geralmente não produz uma identificação altamente confiável para um objeto, devido à baixa resolução espectral e, em geral, aos erros fotométricos comparáveis a profundidade da banda. Entretanto, o grande volume de dados pode fornecer uma análise estatística dos níveis de hidratação de populações do CPA, como apontado nestes trabalhos.

A figura 4.7 mostra a convolução do espectro de um meteorito do tipo CM2 com os sistemas fotométricos do ECAS, SDSS e J-PLUS. Uma análise visual desta figura indica que o ECAS e o SDSS possuem três filtros que podem ser utilizados para a identificação da banda em $0.7 \mu\text{m}$. É válido ressaltar que o ECAS possui um filtro centrado na posição do mínimo da banda de hidratação, sendo isto uma vantagem com relação à disposição dos filtros empregados pelo SDSS. O sistema do J-PLUS permite o uso de quatro filtros fotométricos para esta análise.

Neste trabalho, verificamos a diferença entre a sensibilidade na identificação da banda de hidratação em cada sistema fotométrico. As análises foram feitas a partir da convolução dos espectros de 5 objetos hidratados para cada sistema de filtros. A amostra selecionada é de asteroides membros da família de Erigones, publicados em Morate et al. (2016), onde a profundidade da banda varia de 1 a 5%. Simulamos observações de cada asteroide a partir de clones dos espectros, considerando um erro gaussiano com os valores de 1,2,3,4 e 5% em cada filtro. Os clones foram criados sorteando aleatoriamente o valor da reflectância dentro de uma distribuição gaussiana, cujo centro é o valor obtido da convolução do espectro e a variância determinada pelo erro fotométrico em questão. O objetivo desta análise é determinar a probabilidade da observação de hidratação em um objeto hidratado em cada sistema fotométrico. A figura 4.8 mostra um diagrama geral de fluxo do

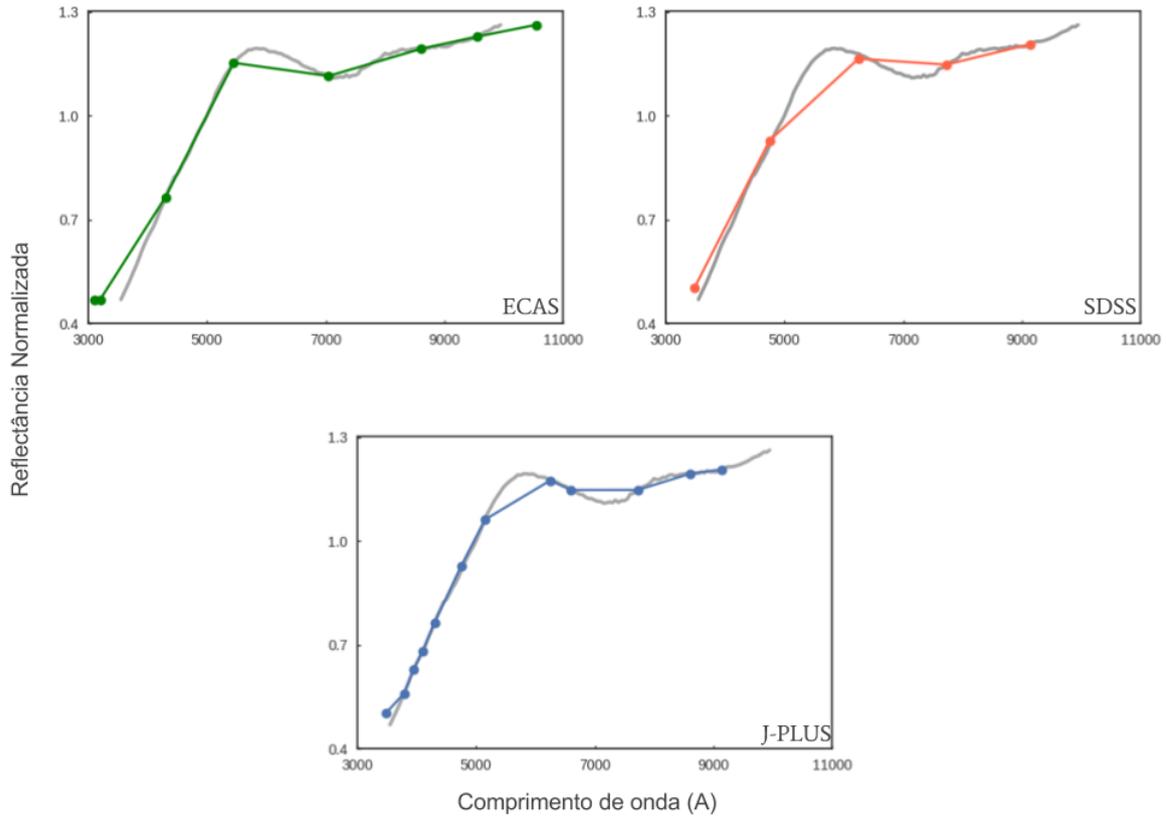


Figura 4.7: Convolução do espectro de um meteorito do tipo CM2 com o sistema fotométrico do ECAS, SDSS e J-PLUS.

algoritmo utilizado nesta análise. Esta mesma análise foi aplicada considerando também um espectro liso, para estimar a probabilidade de obter falsos positivos.

Para cada observação simulada estimamos a presença da banda de hidratação, a partir de uma metodologia considerando o correspondente sistema fotométrico. Em todos os casos, o primeiro passo é o cálculo e remoção do contínuo. Para o J-PLUS, isto é feito a partir de um ajuste linear nas reflectância dos clones para r' e F861. No caso do SDSS usamos as reflectâncias nos filtros r' e z' e, para o ECAS os filtros v e x . O espectro é removido da contribuição do contínuo pela divisão entre as reflectâncias e os valores do ajuste nos respectivos comprimentos de onda.

A metodologia utilizada para identificar a banda com dados do ECAS e SDSS é similar a de Vilas et al. (1994) e Rivkin (2012), respectivamente. Em ambos os casos, o parâmetro para medir hidratação é definido pela distância entre ponto mais próximo a banda e o contínuo, sendo estes pontos equivalentes a reflectância em i' para o SDSS, e w para ECAS.

Para o J-PLUS testamos duas metodologias (figura 4.9). Na primeira, ajustamos um polinômio de quarto grau nos filtros r' , F660, i' e F861. O ajuste é feito de forma a garantir que a curva passe obrigatoriamente nos pontos definidos pelos filtros nas

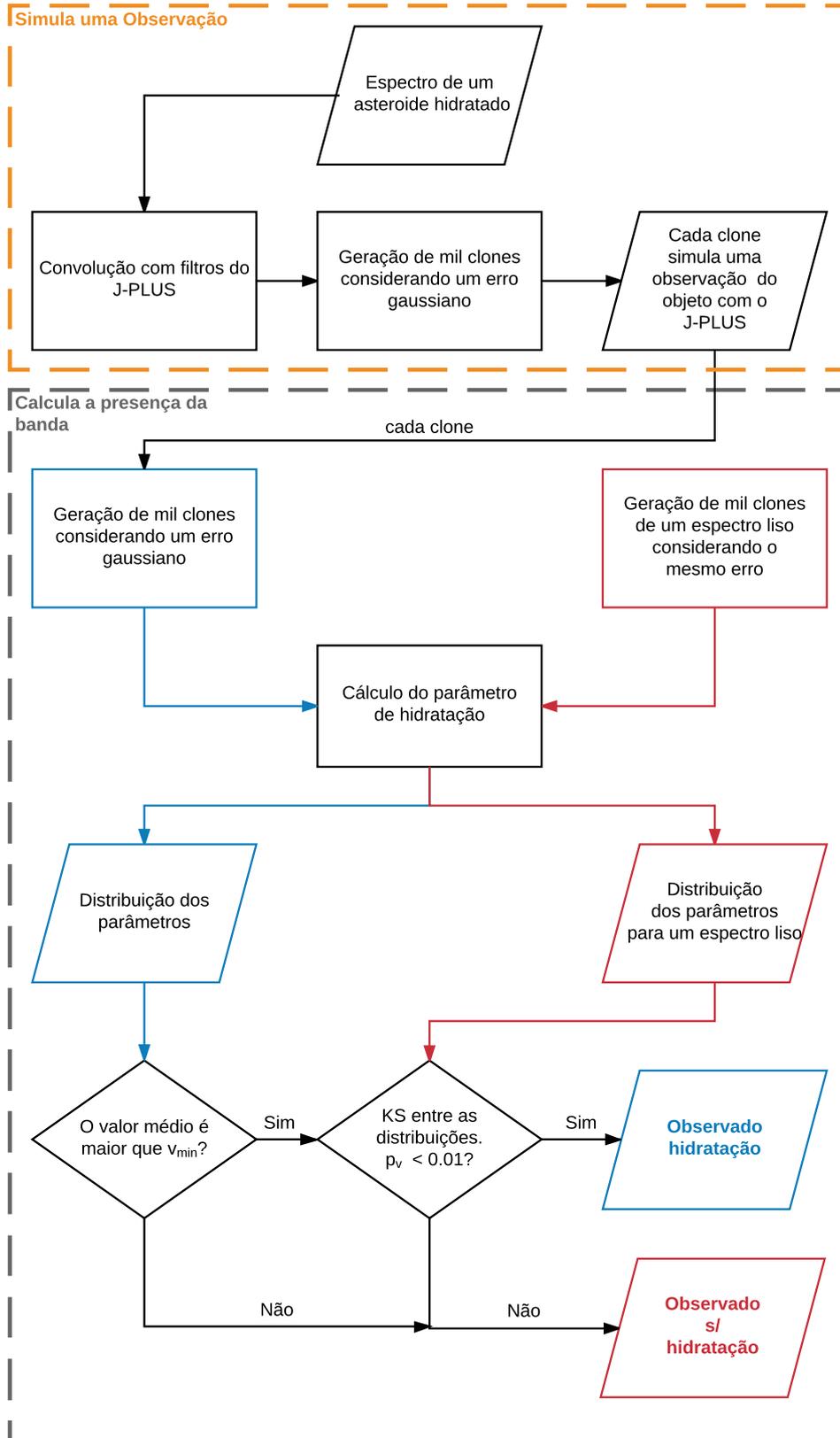


Figura 4.8: Diagrama de fluxo do algoritmo utilizado para estimar a eficiência no cálculo de hidratação com dados do ECAS, SDSS e J-PLUS.

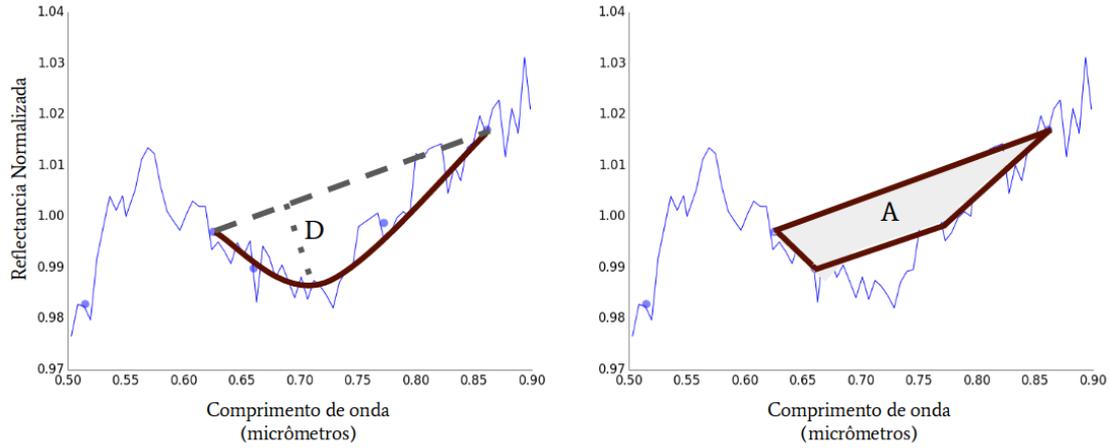


Figura 4.9: Metodologia para a identificação da banda em $0.7 \mu\text{m}$ com dados do J-PLUS. *Esquerda*: Ajuste polinomial nos filtros r' , F660, i' e F861 e estimativa da reflectância em $0.7 \mu\text{m}$. *Direita*: Cálculo da área formada pelo polígono entre as reflectâncias em r' , F660, i' e F861.

extremidades da banda. A partir deste ajuste estimamos o parâmetro de hidratação, definido pelo valor da reflectância em $0.7 \mu\text{m}$, comprimento de onda no qual a posição do mínimo da banda é comumente observado. Na segunda metodologia nos baseamos em dois critérios: se a reflectâncias em F660 e i' estiverem ambas abaixo do contínuo, o parâmetro é definido pela área do polígono formado pelas reflectâncias nos filtros r' , F660, i' e F861. No caso em que a reflectância em F660 ou i' esteja acima do contínuo, o parâmetro é definido pela diferença das áreas acima e abaixo do contínuo. A vantagem deste método é não requerer nenhum tipo de ajuste nos dados.

Estimamos o erro na determinação do parâmetro aplicando o método de Monte-Carlo. Desta maneira, foram gerados mil clones dentro dos regimes dos erros fotométricos, de maneira análoga ao realizado para simular as observações. O parâmetro de hidratação é então medido para cada clone, resultando em uma distribuição de valores (D_h). O mesmo processo é repetido para um espectro liso, para os mesmos erros fotométricos, gerando uma também uma distribuição de valores (D_l). A identificação da banda é feita baseado-se em dois fatores:

- A média da distribuição de parâmetros deve ser maior do que um valor limite (v_{min}). O v_{min} é definido pelo ponto de intersecção entre D_l e D_h . Desta forma, minimizamos o número de falso positivos sem comprometer a fração de acerto para os objetos hidratados.
- O resultado de um teste KS entre D_h e D_l deve produzir um $p_{value} < 0.01$. Este procedimento é utilizado também para minimizar o número de falsos positivos, principalmente no regime de grandes erros fotométricos.

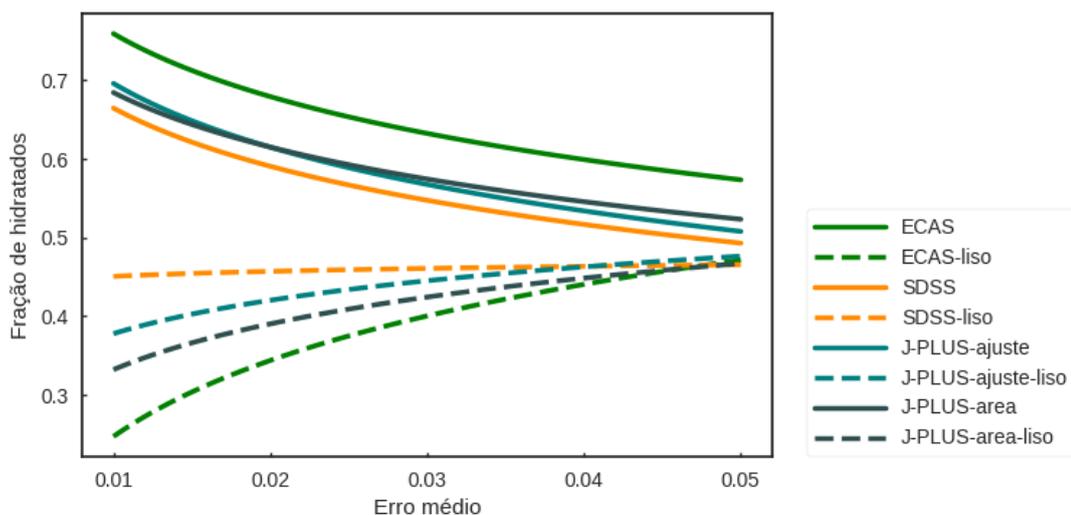


Figura 4.10: Resultados da análise utilizando o algoritmo descrito na figura 4.8 para os sistemas do ECAS, SDSS e J-PLUS.

O resultado desta análise para cada observação simulada, de cada asteroide, em um dado conjunto de erros fotométricos produz uma estimativa da probabilidade de observar a hidratação com os sistemas do ECAS, SDSS e J-PLUS. A figura 4.10 mostra a média da fração de observações, em que a hidratação foi identificada para todos os asteroides, em cada erro simulado. Mostramos também a fração de observações de hidratação em um espectro liso. O resultado foi ajustado por uma lei de potência, para melhor visualização.

A presença de um filtro centrado em $0.7 \mu\text{m}$ faz do ECAS o sistema mais assertivo na identificação da banda, sendo o SDSS o menos eficiente. A análise mostrou o grande número de falsos positivos obtidos com o sistema do SDSS. As metodologias aplicadas para o J-PLUS produzem resultados semelhantes quando analisamos a fração de acerto para objetos hidratados. Entretanto o método da área produz uma quantidade menor de falsos positivos.

É válido ressaltar que estas análises foram realizadas considerando três espectros onde a hidratação mensurada através da espectroscopia é de 1-2%, um com 2.5% e um com 4.3%. Os dois objetos com a banda de hidratação mais profunda produzem uma taxa de acerto levemente maior. A relação entre a taxa de acerto com a profundidade da banda não é linear, devido a possíveis variações nas formas e posições do mínimo da banda.

As metodologias apresentadas para a identificação da banda de hidratação visam comparar as estatísticas globais da distribuição da banda no CPA, como observada pelo ECAS, SDSS e J-PLUS/S-PLUS. O volume de dados produzidos pelo J-PLUS e S-PLUS é consideravelmente maior do que os dados do ECAS. Este fator, combinado

a um sistema fotométrico mais assertivo na identificação da banda em $0.7 \mu\text{m}$ do que o sistema do SDSS, pode fornecer uma visão mais realista do nível de hidratação das populações do CPA, do que aquela descrita em Rivkin (2012).

Até o momento de escrita desta tese, a produção de dados dos projetos J-PLUS e S-PLUS ainda está em estágios iniciais, e impossibilitam uma análise mais aprofundada deste tema.

Capítulo 5

Considerações Finais

No capítulo 2, realizamos uma revisão sobre o atual entendimento da distribuição de composições do CPA e a importância de entender melhor a natureza dos asteroides primitivos, em especial o volume de água destes corpos. Neste contexto, a banda de absorção em $0.7 \mu\text{m}$ é uma ferramenta que auxilia a mapear a frequência com a qual a alteração aquosa dos minerais ocorreu nestes objetos.

Utilizamos dados de espectroscopia para analisar características composicionais de asteroides pertencentes aos grupos dinâmicos Hildas e Cibele. Este estudo foi apresentado no capítulo 3. A análise mostrou que apenas 15% dos asteroides no grupo de Cibele possuem evidência da presença de materiais hidratados. Em Hildas apenas o objeto (334) Chicago pode ser confirmado como possuidor destes tipos de minerais. Desta maneira, a região dos Cibele aparenta ser o limite da zona onde ocorre de alteração aquosa. O caso isolado de (334) Chicago pode ser uma marca da contribuição de asteroides que foram formados em regiões internas a atual região do grupo dos Hildas. Foi possível observar uma maior gama de possibilidades composicionais em Cibele, que apresentam três grupos de objetos. Esta população possui uma contribuição de objetos de cor cinza (tipos C) não observada em larga escala nos Hildas, o qual apresenta uma distribuição bimodal de características superficiais.

Uma análise estendida destas populações com dados do SDSS e do WISE foi realizada. Neste caso, incluímos também as populações de troianos de Júpiter e da família de Themis. Observamos uma continuidade de propriedades superficiais, desde a família de Themis as populações de Cibele, Hildas e troianos de Júpiter. Este comportamento pode estar relacionado a um gradiente composicional. Em especial, observamos que Hildas e troianos de Júpiter apresentam propriedades superficiais distintas, o que pode ser utilizado para restringir modelos de evolução dinâmica do Sistema Solar.

No capítulo 4, apresentamos as campanhas observacionais do J-PLUS e S-PLUS. Desenvolvemos a estrutura computacional que servirão de suporte para a análise dos dados de pequenos corpos do Sistema Solar que serão observados por estes projetos.

Estimamos que o catálogo de asteroides produzido por estas campanhas contará com dados de espectrofotometria em 12 filtros de ~ 24 mil objetos, que seriam observados com magnitude visual $V < 19$.

Apresentamos a metodologia que será utilizada para a identificação da banda em $0.7 \mu\text{m}$ com estes dados. Uma análise comparativa com a metodologia similar à empregada por Rivkin (2012), que utilizou dados do SDSS, mostrou que os dados do J-PLUS são mais sensíveis nesta tarefa, porém menos sensíveis do que o sistema fotométrico do ECAS. Entretanto, o volume de dados produzidos pelo J-PLUS e S-PLUS é uma ordem de grandeza maior do que o produzido pelo ECAS e dos dados de espectroscopia de objetos primitivos analisados por Fornasier et al. (2014). Desta maneira, avaliamos que a aplicação da metodologia desenvolvida para esta análise poderá fornecer uma imagem mais precisa da estrutura em larga escala dos níveis de hidratação das populações do CPA.

Por fim, concluímos que os trabalhos desenvolvidos nesta tese contribuem para o aprimoramento do entendimento da estrutura composicional do CPA, em especial para a análise da presença de materiais hidratados em asteroides primitivos.

É uma perspectiva deste trabalho, a análise dos dados que vem sendo produzidos pelo J-PLUS. A ciência a ser desenvolvida com estes dados conta com a aplicação da metodologia descrita no capítulo 4, dentre outros casos científicos que não estão descritos neste trabalho, como a análise da região no ultravioleta ($0.35\text{-}0.5 \mu\text{m}$) em asteroides primitivos como um indicativo de hidratação. É válido ressaltar que a análise com os dados reais podem fornecer informações que podem aprimorar a metodologia idealizada para identificação da banda em $0.7 \mu\text{m}$.

Os dados de espectroscopia utilizados no capítulo 3 estão inseridos no contexto do PRIMASS. Esta campanha segue observando membros de famílias de asteroides primitivos ao longo de todo o CPA, em diferentes regiões do espectro. Estes dados irão fornecer uma análise sensível a diversidade composicional e ao nível de hidratação das famílias de asteroides primitivos.

Referências Bibliográficas

- Alí-Lagoa, V., Licandro, J., Gil-Hutton, R., Cañada-Assandri, M., Delbo', M., de León, J., Campins, H., Pinilla-Alonso, N., Kelley, M. S. P., and Hanuš, J. (2016). Differences between the Pallas collisional family and similarly sized B-type asteroids. *A&A*, 591:A14.
- Allen, D. A. (1970). Infrared Diameter of Vesta. *Nature*, 227:158–159.
- Astropy Collaboration, Robitaille, T. P., Tollerud, E. J., Greenfield, P., Droettboom, M., Bray, E., Aldcroft, T., Davis, M., Ginsburg, A., Price-Whelan, A. M., Kerzendorf, W. E., Conley, A., Crighton, N., Barbary, K., Muna, D., Ferguson, H., Grollier, F., Parikh, M. M., Nair, P. H., Unther, H. M., Deil, C., Woillez, J., Conseil, S., Kramer, R., Turner, J. E. H., Singer, L., Fox, R., Weaver, B. A., Zabalza, V., Edwards, Z. I., Azalee Bostroem, K., Burke, D. J., Casey, A. R., Crawford, S. M., Dencheva, N., Ely, J., Jenness, T., Labrie, K., Lim, P. L., Pierfederici, F., Pontzen, A., Ptak, A., Refsdal, B., Servillat, M., and Streicher, O. (2013). Astropy: A community Python package for astronomy. *A&A*, 558:A33.
- Barucci, M. A., Capria, M. T., Coradini, A., and Fulchignoni, M. (1987). Classification of asteroids using G-mode analysis. *Icarus*, 72:304–324.
- Bell, J. F. (1986). Mineralogical Evolution of Meteorite Parent Bodies. In *Lunar and Planetary Science Conference*, volume 17 of *Lunar and Planetary Science Conference*, pages 985–986.
- Bell, J. F. (1989). Mineralogical clues to the origins of asteroid dynamical families. *Icarus*, 78(2):426–440.
- Benitez, N., Dupke, R., Moles, M., Sodre, L., CEARRO, J., Marin-Franch, A., Taylor, K., Cristobal, D., Fernandez-Soto, A., Mendes de Oliveira, C., Cepa-Nogue, J., Abramo, L. R., Alcaniz, J. S., Overzier, R., Hernandez-Monteagudo, C., Alfaro, E. J., Kanaan, A., Carvano, J. M., Reis, R. R. R., Martinez Gonzalez, E., Ascaso, B., Ballesteros, F., Xavier, H. S., Varela,

J., Ederoclite, A., Vazquez Ramio, H., Broadhurst, T., Cypriano, E., Angulo, R., Diego, J. M., Zandivarez, A., Diaz, E., Melchior, P., Umetsu, K., Spinelli, P. F., Zitrin, A., Coe, D., Yepes, G., Vielva, P., Sahni, V., Marcos-Caballero, A., Shu Kitaura, F., Maroto, A. L., Masip, M., Tsujikawa, S., Carneiro, S., Gonzalez Nuevo, J., Carvalho, G. C., Reboucas, M. J., Carvalho, J. C., Abdalla, E., Bernui, A., Pigozzo, C., Ferreira, E. G. M., Chandrachani Devi, N., Bengaly, Jr., C. A. P., Campista, M., Amorim, A., Asari, N. V., Bongiovanni, A., Bonoli, S., Bruzual, G., Cardiel, N., Cava, A., Cid Fernandes, R., Coelho, P., Cortesi, A., Delgado, R. G., Diaz Garcia, L., Espinosa, J. M. R., Galliano, E., Gonzalez-Serrano, J. I., Falcon-Barroso, J., Fritz, J., Fernandes, C., Gorgas, J., Hoyos, C., Jimenez-Teja, Y., Lopez-Aguerri, J. A., Lopez-San Juan, C., Mateus, A., Molino, A., Novais, P., OMill, A., Oteo, I., Perez-Gonzalez, P. G., Poggianti, B., Proctor, R., Ricciardelli, E., Sanchez-Blazquez, P., Storchi-Bergmann, T., Telles, E., Schoennell, W., Trujillo, N., Vazdekis, A., Viironen, K., Daffon, S., Aparicio-Villegas, T., Rocha, D., Ribeiro, T., Borges, M., Martins, S. L., Marcolino, W., Martinez-Delgado, D., Perez-Torres, M. A., Siffert, B. B., Calvao, M. O., Sako, M., Kessler, R., Alvarez-Candal, A., De Pra, M., Roig, F., Lazzaro, D., Gorosabel, J., Lopes de Oliveira, R., Lima-Neto, G. B., Irwin, J., Liu, J. F., Alvarez, E., Balmes, I., Chueca, S., Costa-Duarte, M. V., da Costa, A. A., Dantas, M. L. L., Diaz, A. Y., Fabregat, J., Ferrari, F., Gavela, B., Gracia, S. G., Gruel, N., Gutierrez, J. L. L., Guzman, R., Hernandez-Fernandez, J. D., Herranz, D., Hurtado-Gil, L., Jablonsky, F., Laporte, R., Le Tiran, L. L., Licandro, J., Lima, M., Martin, E., Martinez, V., Montero, J. J. C., Penteado, P., Pereira, C. B., Peris, V., Quilis, V., Sanchez-Portal, M., Soja, A. C., Solano, E., Torra, J., and Valdivielso, L. (2014). J-PAS: The Javalambre-Physics of the Accelerated Universe Astrophysical Survey. *ArXiv e-prints*.

Bertin, E. and Arnouts, S. (1996). SExtractor: Software for source extraction. *A&AS*, 117:393–404.

Bobrovnikoff, N. T. (1929). The spectra of minor planets. *Lick Observatory Bulletin*, 14:18–27.

Bowell, E., Chapman, C. R., Gradie, J. C., Morrison, D., and Zellner, B. (1978). Taxonomy of asteroids. *Icarus*, 35:313–335.

Bowell, E. and Lumme, K. (1979). *Colorimetry and magnitudes of asteroids*, pages 132–169.

- Brown, R. H., Lauretta, D. S., Schmidt, B., and Moores, J. (2012). Experimental and theoretical simulations of ice sublimation with implications for the chemical, isotopic, and physical evolution of icy objects. *Planet. Space Sci.*, 60:166–180.
- Bus, S. and Binzel, R. P. (2004). Small Main-belt Asteroid Spectroscopic Survey, Phase II. *NASA Planetary Data System*, 1.
- Bus, S. J. (1999). *Compositional structure in the asteroid belt: Results of a spectroscopic survey*. PhD thesis, MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY.
- 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.
- Campins, H., Hargrove, K., Pinilla-Alonso, N., Howell, E. S., Kelley, M. S., Licandro, J., Mothé-Diniz, T., Fernández, Y., and Ziffer, J. (2010). Water ice and organics on the surface of the asteroid 24 Themis. *Nature*, 464:1320–1321.
- Canup, R. M. and Asphaug, E. (2001). Origin of the Moon in a giant impact near the end of the Earth’s formation. *Nature*, 412:708–712.
- Carry, B. (2012). Density of asteroids. *Planetary and Space Science*, 73(1):98–118.
- Carvano, J., Mothé-Diniz, T., and Lazzaro, D. (2003). Search for relations among a sample of 460 asteroids with featureless spectra. *Icarus*, 161(2):356–382.
- Carvano, J. M., Hasselmann, P. H., Lazzaro, D., and Mothé-Diniz, T. (2010). SDSS-based taxonomic classification and orbital distribution of main belt asteroids. *A&A*, 510:A43.
- Chapman, C. R., Gaffey, M., and McFadden, L. (2005). 24-color Asteroid Spectrophotometry. *NASA Planetary Data System*, 27.
- Chapman, C. R. and Gaffey, M. J. (1979). *Reflectance spectra for 277 asteroids*, pages 655–687.
- Chapman, C. R., Johnson, T. V., Kunin, J. S., and McCord, T. B. (1971). Spectral reflectivity studies of 12 asteroids (0.3 to 1.1 microns). In *Bulletin of the American Astronomical Society*, volume 3 of *BAAS*, page 279.
- Chapman, C. R., McCord, T. B., and Johnson, T. V. (1973). Asteroid spectral reflectivities. *AJ*, 78:126–140.

- Chapman, C. R., Morrison, D., and Zellner, B. (1975). Surface properties of asteroids - A synthesis of polarimetry, radiometry, and spectrophotometry. *Icarus*, 25:104–130.
- Chapman, C. R. and Salisbury, J. W. (1973). Comparisons of meteorite and asteroid spectral reflectivities. *Icarus*, 19:507–522.
- Cloutis, E. A., Hiroi, T., Gaffey, M. J., Alexander, C. M. O. ., and Mann, P. (2011a). Spectral reflectance properties of carbonaceous chondrites: 1. CI chondrites. *Icarus*, 212:180–209.
- Cloutis, E. A., Hudon, P., Hiroi, T., Gaffey, M. J., and Mann, P. (2011b). Spectral reflectance properties of carbonaceous chondrites: 2. CM chondrites. *Icarus*, 216:309–346.
- Colina, L. and Bohlin, R. (1997). Absolute Flux Distributions of Solar Analogs from the UV to the Near-IR. *AJ*, 113:1138–1144.
- Connelly, J. N., Bizzarro, M., Krot, A. N., Nordlund, Å., Wielandt, D., and Ivanova, M. A. (2012). The Absolute Chronology and Thermal Processing of Solids in the Solar Protoplanetary Disk. *Science*, 338:651.
- Dahlgren, M. and Lagerkvist, C.-I. (1995). A study of hilda asteroids. i. ccd spectroscopy of hilda asteroids. *Astronomy and Astrophysics*, 302:907.
- Dahlgren, M., Lagerkvist, C.-I., Fitzsimmons, A., Williams, I., and Gordon, M. (1997). A study of hilda asteroids. ii. compositional implications from optical spectroscopy. *Astronomy and Astrophysics*, 323:606–619.
- Dauphas, N. and Pourmand, A. (2011). Hf-W-Th evidence for rapid growth of Mars and its status as a planetary embryo. *Nature*, 473:489–492.
- Davis, D. R., Durda, D. D., Marzari, F., Campo Bagatin, A., and Gil-Hutton, R. (2002). *Collisional Evolution of Small-Body Populations*, pages 545–558.
- De Prá, M. and Carvano, J. (2013). *Pipeline Fotométrico e Astrométrico para o Projeto IMPACTON*. Master’s thesis, Observatório Nacional.
- Degewij, J. and van Houten, C. J. (1979). *Distant asteroids and outer Jovian satellites*, pages 417–435.
- DeMeo, F. E., Alexander, C. M. O., Walsh, K. J., Chapman, C. R., and Binzel, R. P. (2015). *The Compositional Structure of the Asteroid Belt*, pages 13–41.

- 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. (2013). The taxonomic distribution of asteroids from multi-filter all-sky photometric surveys. *Icarus*, 226:723–741.
- DeMeo, F. E. and Carry, B. (2014). Solar System evolution from compositional mapping of the asteroid belt. *Nature*, 505:629–634.
- Denneau, L., Jedicke, R., Grav, T., Granvik, M., Kubica, J., Milani, A., Vereš, P., Wainscoat, R., Chang, D., Pierfederici, F., Kaiser, N., Chambers, K. C., Heasley, J. N., Magnier, E. A., Price, P. A., Myers, J., Kleyna, J., Hsieh, H., Farnocchia, D., Waters, C., Sweeney, W. H., Green, D., Bolin, B., Burgett, W. S., Morgan, J. S., Tonry, J. L., Hodapp, K. W., Chastel, S., Chesley, S., Fitzsimmons, A., Holman, M., Spahr, T., Tholen, D., Williams, G. V., Abe, S., Armstrong, J. D., Bressi, T. H., Holmes, R., Lister, T., McMillan, R. S., Micheli, M., Ryan, E. V., Ryan, W. H., and Scotti, J. V. (2013). The Pan-STARRS Moving Object Processing System. *PASP*, 125:357.
- Di Sisto, R. P., Brunini, A., Dirani, L. D., and Orellana, R. B. (2005). Hilda asteroids among Jupiter family comets. *Icarus*, 174:81–89.
- Dumas, C., Owen, T., and Barucci, M. (1998). Near-infrared spectroscopy of low-albedo surfaces of the solar system: Search for the spectral signature of dark material. *Icarus*, 133(2):221–232.
- Emery, J., Cruikshank, D., and Van Cleve, J. (2006). Thermal emission spectroscopy (5.2–38 μm) of three trojan asteroids with the spitzer space telescope: Detection of fine-grained silicates. *Icarus*, 182(2):496–512.
- Feierberg, M. A., Lebofsky, L. A., and Tholen, D. J. (1985). The nature of C-class asteroids from 3-micron spectrophotometry. *Icarus*, 63:183–191.
- 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.
- Gaffey, M. J., Bell, J. F., and Cruikshank, D. P. (1989). Reflectance spectroscopy and asteroid surface mineralogy. In *Asteroids II*, pages 98–127.
- Gaffey, M. J. and McCord, T. B. (1978). Asteroid surface materials - Mineralogical characterizations from reflectance spectra. *Space Sci. Rev.*, 21:555–628.

- Gaffey, M. J. and McCord, T. B. (1979). *Mineralogical and petrological characterizations of asteroid surface materials*, pages 688–723.
- Gehrels, T., Roemer, E., Taylor, R. C., and Zellner, B. H. (1970). Minor planets and related objects. IV. Asteroid (1566) Icarus. *AJ*, 75:186–195.
- Gil-Hutton, R. and Brunini, A. (2008). Surface composition of hilda asteroids from the analysis of the sloan digital sky survey colors. *Icarus*, 193(2):567–571.
- Gil-Hutton, R. and Licandro, J. (2010). Taxonomy of asteroids in the cybele region from the analysis of the sloan digital sky survey colors. *Icarus*, 206(2):729–734.
- Gomes, R., Levison, H. F., Tsiganis, K., and Morbidelli, A. (2005). Origin of the cataclysmic late heavy bombardment period of the terrestrial planets. *Nature*, 435(7041):466–469.
- Gradie, J. and Tedesco, E. (1982). Compositional structure of the asteroid belt. *Science*, 216:1405–1407.
- Gradie, J. C., Chapman, C. R., and Tedesco, E. F. (1989). Distribution of taxonomic classes and the compositional structure of the asteroid belt. In *Asteroids II*, pages 316–335.
- Gradie, J. C., Chapman, C. R., and Williams, J. G. (1979). *Families of minor planets*, pages 359–390.
- Grav, T., Mainzer, A. K., Bauer, J., Masiero, J., Spahr, T., McMillan, R. S., Walker, R., Cutri, R., Wright, E., Eisenhardt, P. R., Blauvelt, E., DeBaun, E., Elsbury, D., Gautier, T., Gomillion, S., Hand, E., and Wilkins, A. (2012). WISE/NEOWISE Observations of the Hilda Population: Preliminary Results. *ApJ*, 744:197.
- Grimm, R. E. and McSween, H. Y. (1993). Heliocentric zoning of the asteroid belt by aluminum-26 heating. *Science*, 259:653–655.
- Grimm, R. E. and McSween, Jr., H. Y. (1989). Water and the thermal evolution of carbonaceous chondrite parent bodies. *Icarus*, 82:244–280.
- Hasselmann, P. H., Carvano, J. M., and Lazzaro, D. (2011). SDSS-based Asteroid Taxonomy V1.0. *NASA Planetary Data System*, 145.
- Hirayama, K. (1918). Groups of asteroids probably of common origin. *AJ*, 31:185–188.

- Hirayama, K. (1919). Further note on the families of asteroids. *Annales de l'Observatoire astronomique de Tokyo*, 8.
- Hirayama, K. (1922). Families of Asteroids. *Japanese Journal of Astronomy and Geophysics*, 1:55.
- Hirayama, K. (1923). Families of asteroids. *Annales de l'Observatoire astronomique de Tokyo*, 11.
- Hiroi, T., Zolensky, M. E., and Pieters, C. M. (2001). The tagish lake meteorite: A possible sample from a d-type asteroid. *Science*, 293(5538):2234–2236.
- Howard, K. T., Alexander, C. M. O. ., Schrader, D. L., and Dyl, K. A. (2015). Classification of hydrous meteorites (CR, CM and C2 ungrouped) by phyllosilicate fraction: PSD-XRD modal mineralogy and planetesimal environments. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 149:206–222.
- Howard, K. T., Benedix, G. K., Bland, P. A., and Cressey, G. (2009). Modal mineralogy of CM2 chondrites by X-ray diffraction (PSD-XRD). Part 1: Total phyllosilicate abundance and the degree of aqueous alteration. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 73:4576–4589.
- Howard, K. T., Benedix, G. K., Bland, P. A., and Cressey, G. (2011). Modal mineralogy of CM chondrites by X-ray diffraction (PSD-XRD): Part 2. Degree, nature and settings of aqueous alteration. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 75:2735–2751.
- Ivezic, Z., Juric, M., Lupton, R. H., Tabachnik, S., Quinn, T., and SDSS Collaboration (2010). SDSS Moving Object Catalog V3.0. *NASA Planetary Data System*, 124.
- Ivezić, Ž., Tabachnik, S., Rafikov, R., Lupton, R. H., Quinn, T., Hammegren, M., Eyer, L., Chu, J., Armstrong, J. C., Fan, X., Finlator, K., Geballe, T. R., Gunn, J. E., Hennessy, G. S., Knapp, G. R., Leggett, S. K., Munn, J. A., Pier, J. R., Rockosi, C. M., Schneider, D. P., Strauss, M. A., Yanny, B., Brinkmann, J., Csabai, I., Hindsley, R. B., Kent, S., Lamb, D. Q., Margon, B., McKay, T. A., Smith, J. A., Waddel, P., York, D. G., and SDSS Collaboration (2001). Solar System Objects Observed in the Sloan Digital Sky Survey Commissioning Data. *AJ*, 122:2749–2784.
- Jewitt, D., Hsieh, H., and Agarwal, J. (2015). *The Active Asteroids*, pages 221–241.
- Jewitt, D. C. (2002). From Kuiper Belt Object to Cometary Nucleus: The Missing Ultrared Matter. *AJ*, 123:1039–1049.

- Kasuga, T., Usui, F., Hasegawa, S., Kuroda, D., Ootsubo, T., Müller, T. G., and Ishiguro, M. (2012). AKARI/AcuA Physical Studies of the Cybele Asteroid Family. *AJ*, 143:141.
- Kirkwood, D. (1867). *Meteoric Astronomy: a treatise on shooting-stars, nre-balls, and aerolites*. Lippincott&Company.
- Krot, A. N., Nagashima, K., Alexander, C. M. O., Ciesla, F. J., Fujiya, W., and Bonal, L. (2015). *Sources of Water and Aqueous Activity on the Chondrite Parent Asteroids*, pages 635–660.
- Lagerkvist, C.-I., Moroz, L., Nathues, A., Erikson, A., Lahulla, F., Karlsson, O., and Dahlgren, M. (2005). A study of cybele asteroids-ii. spectral properties of cybele asteroids. *Astronomy & Astrophysics*, 432(1):349–354.
- Landolt, A. U. (1992). Broadband UBVRI photometry of the Baldwin-Stone Southern Hemisphere spectrophotometric standards. *AJ*, 104:372–376.
- Landsman, Z. A., Campins, H., Pinilla-Alonso, N., Hanuš, J., and Lorenzi, V. (2015). A new investigation of hydration in the M-type asteroids. *Icarus*, 252:186–198.
- Lantz, C., Brunetto, R., Barucci, M. A., Fornasier, S., Baklouti, D., Bourçois, J., and Godard, M. (2017). Ion irradiation of carbonaceous chondrites: A new view of space weathering on primitive asteroids. *Icarus*, 285:43–57.
- Larson, H. P., Feierberg, M. A., Fink, U., and Smith, H. A. (1979). Remote spectroscopic identification of carbonaceous chondrite mineralogies Applications to Ceres and Pallas. *Icarus*, 39:257–271.
- Lazzaro, D., Angeli, C. A., Carvano, J. M., Mothé-Diniz, T., Duffard, R., and Florczak, M. (2004). S³OS²: the visible spectroscopic survey of 820 asteroids. *Icarus*, 172:179–220.
- Lazzaro, D., Michtchenko, T., Carvano, J. M., Binzel, R. P., Bus, S. J., Burbine, T. H., Mothé-Diniz, T., Florczak, M., Angeli, C. A., and Harris, A. W. (2000). Discovery of a Basaltic Asteroid in the Outer Main Belt. *Science*, 288:2033–2035.
- Lebofsky, L. A. (1978). Asteroid 1 Ceres - Evidence for water of hydration. *MNRAS*, 182:17P–21P.
- Lebofsky, L. A. (1980). Infrared reflectance spectra of asteroids - A search for water of hydration. *AJ*, 85:573–585.

- Lehmann, E. L. and D'abrera, H. (1975). *Nonparametrics: statistical methods based on ranks*. Holden-Day.
- Levison, H. and Duncan, M. (1993). The gravitational sculpting of the kuiper belt. *The Astrophysical Journal*, 406:L35–L38.
- Levison, H. F., Bottke, W. F., Gounelle, M., Morbidelli, A., Nesvorný, D., and Tsiganis, K. (2009). Contamination of the asteroid belt by primordial trans-Neptunian objects. *Nature*, 460:364–366.
- Licandro, J., Alvarez-Candal, A., De León, J., Pinilla-Alonso, N., Lazzaro, D., and Campins, H. (2008). Spectral properties of asteroids in cometary orbits. *Astronomy & Astrophysics*, 481(3):861–877.
- Licandro, J., Campins, H., Kelley, M., Hargrove, K., Pinilla-Alonso, N., Cruikshank, D., Rivkin, A. S., and Emery, J. (2011). (65) Cybele: detection of small silicate grains, water-ice, and organics. *A&A*, 525:A34.
- Lunine, J. I. and Reid, I. N. (2006). Book Review: ASTROBIOLOGY: A MULTIDISCIPLINARY APPROACH / Pearson Education/Addison Wesley, 2005. *Physics Today*, 59(12):58.
- Mainzer, A., Bauer, J., Grav, T., Masiero, J., Cutri, R. M., Dailey, J., Eisenhardt, P., McMillan, R. S., Wright, E., Walker, R., Jedicke, R., Spahr, T., Tholen, D., Alles, R., Beck, R., Brandenburg, H., Conrow, T., Evans, T., Fowler, J., Jarrett, T., Marsh, K., Masci, F., McCallon, H., Wheelock, S., Wittman, M., Wyatt, P., DeBaun, E., Elliott, G., Elsbury, D., Gautier, IV, T., Gomillion, S., Leisawitz, D., Maleszewski, C., Micheli, M., and Wilkins, A. (2011). Preliminary Results from NEOWISE: An Enhancement to the Wide-field Infrared Survey Explorer for Solar System Science. *ApJ*, 731:53.
- Mainzer, A. K., Bauer, J. M., Cutri, R. M., Grav, T., Kramer, E. A., Masiero, J. R., Nugent, C. R., Sonnett, S. M., Stevenson, R. A., and Wright, E. L. (2016). NEOWISE Diameters and Albedos V1.0. *NASA Planetary Data System*, 247.
- Mallat, S. (1999). Wavelet analysis & its applications.
- Martin, R. G. and Livio, M. (2012). On the evolution of the snow line in protoplanetary discs. *MNRAS*, 425:L6–L9.
- Marty, B. (2012). The origins and concentrations of water, carbon, nitrogen and noble gases on Earth. *Earth and Planetary Science Letters*, 313:56–66.

- McCord, T. B., Adams, J. B., and Johnson, T. V. (1970). Asteroid Vesta: Spectral Reflectivity and Compositional Implications. *Science*, 168:1445–1447.
- McCord, T. B. and Chapman, C. R. (1975a). Asteroids - Spectral reflectance and color characteristics. *ApJ*, 195:553–562.
- McCord, T. B. and Chapman, C. R. (1975b). Asteroids - Spectral reflectance and color characteristics. II. *ApJ*, 197:781–790.
- McFadden, L. A., Gaffey, M. J., and McCord, T. B. (1984). Mineralogical-petrological characterization of near-earth asteroids. *Icarus*, 59:25–40.
- Milani, A. and Gronchi, G. (2010). *Theory of orbit determination*. Cambridge University Press.
- Morate, D., de León, J., De Prá, 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. *A&A*, 586:A129.
- Morbidelli, A., Chambers, J., Lunine, J. I., Petit, J. M., Robert, F., Valsecchi, G. B., and Cyr, K. E. (2000). Source regions and time scales for the delivery of water to Earth. *Meteoritics and Planetary Science*, 35:1309–1320.
- Morbidelli, A., Levison, H., Tsiganis, K., and Gomes, R. (2005). Chaotic capture of jupiter’s trojan asteroids in the early solar system. *Nature*, 435(7041):462–465.
- Morbidelli, A., Tsiganis, K., Crida, A., Levison, H. F., and Gomes, R. (2007). Dynamics of the Giant Planets of the Solar System in the Gaseous Protoplanetary Disk and Their Relationship to the Current Orbital Architecture. *AJ*, 134:1790–1798.
- 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. (1974). Radiometric diameters and albedos of 40 asteroids. *ApJ*, 194:203–212.
- Mothé-Diniz, T., Carvano, J. M. á., and Lazzaro, D. (2003). Distribution of taxonomic classes in the main belt of asteroids. *Icarus*, 162:10–21.
- Nesvorný, D. (2015). Nesvorný HCM Asteroid Families V3.0. *NASA Planetary Data System*, 234.

- Nesvorný, D., Brož, M., and Carruba, V. (2015). *Identification and Dynamical Properties of Asteroid Families*, pages 297–321.
- Norman, M. D. and Nemchin, A. A. (2014). A 4.2 billion year old impact basin on the Moon: U-Pb dating of zirconolite and apatite in lunar melt rock 67955. *Earth and Planetary Science Letters*, 388:387–398.
- Oliva, E. (2000). Infrared instrumentation for large telescopes : an alternative approach. *Mem. Soc. Astron. Italiana*, 71:861.
- Owen, T. and Bar-Nun, A. (1995). Comets, Impacts, and Atmospheres. *Icarus*, 116:215–226.
- Parker, A., Ivezić, Ž., Jurić, M., Lupton, R., Sekora, M. D., and Kowalski, A. (2008). The size distributions of asteroid families in the SDSS Moving Object Catalog 4. *Icarus*, 198:138–155.
- Popescu, M., Birlan, M., and Nedelcu, D. A. (2012). Modeling of asteroid spectra - M4AST. *A&A*, 544:A130.
- Press, W. H. (2007). *Numerical recipes 3rd edition: The art of scientific computing*. Cambridge university press.
- Reddy, V. and Sanchez, J. A. (2016). Reddy Main Belt Asteroid Spectra V1.0. *NASA Planetary Data System*, 242.
- Rivkin, A. S. (2012). The fraction of hydrated C-complex asteroids in the asteroid belt from SDSS data. *Icarus*, 221:744–752.
- Rivkin, A. S., Campins, H., Emery, J. P., Howell, E. S., Licandro, J., Takir, D., and Vilas, F. (2015). *Astronomical Observations of Volatiles on Asteroids*, pages 65–87.
- Rivkin, A. S. and Emery, J. P. (2010). Detection of ice and organics on an asteroidal surface. *Nature*, 464(7293):1322–1323.
- Ryan, E. L. and Woodward, C. E. (2011). Albedos of Small Hilda Group Asteroids as Revealed by Spitzer. *AJ*, 141:186.
- Sachs, L. (1984). The comparison of independent data samples. In *Applied statistics*, pages 245–306. Springer.
- Takir, D. and Emery, J. P. (2012). Outer main belt asteroids: Identification and distribution of four 3- μ m spectral groups. *Icarus*, 219(2):641–654.

- Takir, D., Emery, J. P., and McSween, H. Y. (2015). Toward an understanding of phyllosilicate mineralogy in the outer main asteroid belt. *Icarus*, 257:185–193.
- Tedesco, E. F., Noah, P. V., Noah, M., and Price, S. D. (2004). IRAS Minor Planet Survey V6.0. *NASA Planetary Data System*, 12.
- Tedesco, E. F., Williams, J. G., Matson, D. L., Weeder, G. J., Gradie, J. C., and Lebofsky, L. A. (1989). A three-parameter asteroid taxonomy. *AJ*, 97:580–606.
- Tholen, D. J. (1984). Asteroid taxonomy from cluster analysis of photometry.
- Tholen, D. J. and Barucci, M. A. (1989). Asteroid taxonomy. In Binzel, R. P., Gehrels, T., and Matthews, M. S., editors, *Asteroids II*, pages 298–315.
- Tsiganis, K., Gomes, R., Morbidelli, A., and Levison, H. (2005). Origin of the orbital architecture of the giant planets of the solar system. *Nature*, 435(7041):459–461.
- Usui, F., Kuroda, D., Müller, T. G., Hasegawa, S., Ishiguro, M., Ootsubo, T., Ishihara, D., Kataza, H., Takita, S., Oyabu, S., Ueno, M., Matsuhara, H., and Onaka, T. (2011). Asteroid Catalog Using Akari: AKARI/IRC Mid-Infrared Asteroid Survey. *PASJ*, 63:1117–1138.
- Veeder, G. J., Matson, D. L., and Tedesco, E. F. (1983). The R asteroids reconsidered. *Icarus*, 55:177–180.
- Vernazza, P., Fulvio, D., Brunetto, R., Emery, J. P., Dukes, C. A., Cipriani, F., Witasse, O., Schaible, M. J., Zanda, B., Strazzulla, G., and Baragiola, R. A. (2013). Paucity of Tagish Lake-like parent bodies in the Asteroid Belt and among Jupiter Trojans. *Icarus*, 225:517–525.
- Veverka, J. and Noland, M. (1973). Asteroid Reflectivities from Polarization Curves: Calibration of the “Slope-Albedo” Relationship. *Icarus*, 19:230–239.
- Vilas, F. (1984). *The nature and origin of outer solar system asteroids from reflectance spectrophotometry*. PhD thesis, Arizona Univ., Tucson.
- Vilas, F. (1995). Is the U-B color sufficient for identifying water of hydration on solar system bodies? *Icarus*, 115:217–218.
- Vilas, F. and Gaffey, M. J. (1989). Phyllosilicate absorption features in main-belt and outer-belt asteroid reflectance spectra. *Science*, 246:790–792.

- Vilas, F., Jarvis, K. S., and Gaffey, M. J. (1994). Iron alteration minerals in the visible and near-infrared spectra of low-albedo asteroids. *Icarus*, 109(2):274–283.
- Vilas, F., Smith, B. A., McFadden, L. A., Gaffey, M. J., Larson, S. M., Hatch, E. C., and Jarvis, K. S. (2006). Vilas Asteroid Spectra V1.1. *NASA Planetary Data System*, 45.
- Walsh, K. J., Morbidelli, A., Raymond, S. N., O’Brien, D. P., and Mandell, A. M. (2011). A low mass for Mars from Jupiter’s early gas-driven migration. *Nature*, 475:206–209.
- Walsh, K. J., Morbidelli, A., Raymond, S. N., O’Brien, D., and Mandell, A. (2012). Populating the asteroid belt from two parent source regions due to the migration of giant planets—“the grand tack”. *Meteoritics & Planetary Science*, 47(12):1941–1947.
- Warner, B. D., Harris, A. W., and Pravec, P. (2009). The asteroid lightcurve database. *Icarus*, 202:134–146.
- Wasson, J. T. and Wetherill, G. W. (1979). *Dynamical chemical and isotopic evidence regarding the formation locations of asteroids and meteorites*, pages 926–974.
- Weidenschilling, S. J. (1977). The distribution of mass in the planetary system and solar nebula. *Ap&SS*, 51:153–158.
- Wetherill, G. W. (1979). Steady state populations of Apollo-Amor objects. *Icarus*, 37:96–112.
- Wong, I. and Brown, M. E. (2017). The Color and Magnitude Distribution of Hilda Asteroids: Comparison with Jupiter Trojans. *AJ*, 153:69.
- Young, E. D. (2001). The hydrology of carbonaceous chondrite parent bodies and the evolution of planet progenitors. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A*, 359:2095.
- Zellner, B., Gehrels, T., and Gradie, J. (1974). Minor planets and related objects. XVI - Polarimetric diameters. *AJ*, 79:1100–1110.
- Zellner, B., Tholen, D. J., and Tedesco, E. F. (2009). Eight Color Asteroid Survey V4.0. *NASA Planetary Data System*, 100.

Apêndice A

Tabelas do Capítulo 3

Tabela A.1: Resultados para a análise dos espectros no visível para as populações de Cibele e Hilda observados no SOAR com GHTS.

Número	Profundidade 0.7 μ m (%)	Centro 0.7 μ m (Å)	Ponto de virada (Å)	Grad. espectral S'%/1000Å	Grad. espectral-UV S'%/1000Å	Tax.	Group
225	-	-	4979 \pm 11	-5.62 \pm 1.25	-2.90 \pm 0.59	B	Cyb
229	-	-	5242 \pm 7	3.06 \pm 0.92	14.14 \pm 0.24	Xc	Cyb
401	-	-	-	4.01 \pm 1.26	-	Cb	Cyb
528	-	-	-	1.89 \pm 0.92	-	Cb	Cyb
790	-	-	-	2.77 \pm 0.42	-	X	Cyb
909	-	-	-	2.99 \pm 1.23	-	X	Cyb
940	1.81 \pm 0.01	7004 \pm 4	5161 \pm 6	1.96 \pm 0.53	13.34 \pm 0.41	Cgh	Cyb
1177	-	-	-	2.89 \pm 0.92	-	X	Cyb
1280	-	-	5339 \pm 11	1.55 \pm 0.42	12.91 \pm 0.25	C	Cyb
6039	-	-	-	9.69 \pm 0.54	-	D	Cyb
334	-	-	5252 \pm 11	2.87 \pm 1.23	23.13 \pm 0.62	Xc	Hilda
1144	-	-	-	11.85 \pm 0.07	-	D	Hilda
1269	-	-	-	9.08 \pm 0.53	-	D	Hilda
1439	-	-	-	3.33 \pm 0.93	-	X	Hilda
1902	-	-	-	2.76 \pm 0.92	-	X	Hilda
3202	-	-	-	13.63 \pm 0.56	-	D	Hilda
3577	-	-	-	9.33 \pm 0.53	-	D	Hilda
3843	-	-	-	5.04 \pm 1.25	-	X	Hilda
7394	-	-	-	7.67 \pm 0.45	-	D	Hilda

Tabela A.2: Resultados da análise dos espectros no visível de objetos da população de Cibeles encontrados na literatura. O asterisco '*' é usado para marcar objetos onde a análise do determinado parâmetro não pode ser feita, devido a cobertura espectral insuficiente. O traço '-' marca objetos onde o parâmetro não foi identificado. Referências: (1) Lagerkvist et al. (2005); (2) SMASS II Bus and Binzel (2004);(3) S3OS2 Lazzaro et al. (2004); (4) Vilas et al. (2006)

Número	Profundidade 0.7 μ m (%)	Centro 0.7 μ m (Å)	Ponto de virada (Å)	Grad. espectral S'%/1000Å	Grad. espectral-UV S'%/1000Å	Tax.	Ref.
65	-	-	*	0,97 \pm 0,02	*	C	3
	-	-	*	3,11 \pm 0,07	*	X	4
	-	-	0,664 \pm 0,003	0,81 \pm 0,06	7,96 \pm 0,56	Xk	2
76	-	-	*	1,54 \pm 0,02	*	Cb	4
	-	-	0,593 \pm 0,006	1,24 \pm 0,02	4,62 \pm 0,92	C	2
87	-	-	-	3,02 \pm 0,04	-	Xc	2
	-	-	*	3,66 \pm 0,02	*	X	3
107	-	-	*	2,01 \pm 0,02	*	Cb	3
	-	-	0,654 \pm 0,004	1,24 \pm 0,06	2,45 \pm 1,22	Xk	2
121	2,20 \pm 0,09	0,685 \pm 0,002	*	1,66 \pm 0,03	*	Cgh	4
	2,32 \pm 0,05	0,719 \pm 0,002	0,551 \pm 0,002	0,24 \pm 0,06	10,99 \pm 0,52	Cgh	2
168	1,83 \pm 0,21	0,706 \pm 0,011	0,552 \pm 0,005	-1,19 \pm 0,05	3,60 \pm 1,65	Ch	2
	2,36 \pm 0,04	0,691 \pm 0,001	*	1,01 \pm 0,02	*	Cgh	3
225	-	-	*	1,63 \pm 0,05	*	Cb	4
229	-	-	*	0,75 \pm 0,02	*	Cb	3
260	-	-	*	3,11 \pm 0,02	*	Xc	3
414	-	-	0,6 \pm 0,002	0,72 \pm 0,05	13,15 \pm 1,45	Cg	2
	1,79 \pm 0,03	0,723 \pm 0,001	*	1,30 \pm 0,03	*	Cgh	3
420	-	-	-	6,85 \pm 0,04	-	D	1
483	-	-	*	9,36 \pm 0,09	*	L	4
522	-	-	-	4,46 \pm 0,03	-	X	1
	-	-	*	2,99 \pm 0,02	*	X	3
528	-	-	*	1,07 \pm 0,03	*	Cb	4
536	-	-	-	3,77 \pm 0,05	-	X	1
	-	-	*	2,93 \pm 0,01	*	X	3
566	-	-	*	2,79 \pm 0,02	*	X	4
570	-	-	-	5,62 \pm 0,05	-	T	2
	-	-	*	11,65 \pm 0,04	*	D	4
643	-	-	-	3,99 \pm 0,05	-	X	1

	-	-	*	4,81 ± 0,06	*	X	4
692	-	-	*	4,73 ± 0,09	*	S	4
	-	-	*	6,12 ± 0,09	*	Sv	3
713	-	-	-	0,97 ± 0,03	-	C	2
	1,34 ± 0,06	0,765 ± 0,002	*	1,42 ± 0,02	*	C	3
721	-	-	-	8,79 ± 0,04	-	D	1
	-	-	*	6,29 ± 0,03	*	T	3
733	-	-	*	2,15 ± 0,02	*	Cb	4
790	-	-	*	3,87 ± 0,02	*	X	3
940	2,35 ± 0,10	0,69 ± 0,003	*	2,51 ± 0,03	*	Xc	4
1004	-	-	-	5,70 ± 0,02	-	T	1
	-	-	*	4,44 ± 0,02	*	X	3
1028	-	-	*	1,25 ± 0,02	*	Cb	3
1154	-	-	*	3,67 ± 0,03	*	X	3
1167	-	-	*	9,19 ± 0,04	*	D	4
1177	-	-	*	1,09 ± 0,03	*	C	3
1266	-	-	-	4,19 ± 0,04	-	Xe	1
	-	-	*	6,18 ± 0,02	*	T	3
1280	-	-	*	4,14 ± 0,01	*	X	3
1328	-	-	*	12,52 ± 0,04	*	D	3
1373	-	-	-	3,55 ± 0,07	-	Xe	2
1390	-	-	*	5,39 ± 0,08	*	T	4
1467	4,65 ± 0,18	0,684 ± 0,003	*	2,69 ± 0,06	*	C	4
	4,97 ± 0,03	0,705 ± 0,0	*	-0,88 ± 0,04	*	Ch	3
1556	-	-	*	5,44 ± 0,02	*	T	3
1574	-	-	-	9,56 ± 0,03	-	D	1
	-	-	*	9,72 ± 0,02	*	D	3
1579	-	-	*	-1,19 ± 0,02	*	B	3
1796	-	-	*	1,80 ± 0,03	*	Cb	3
	-	-	0,63 ± 0,01	-0,438 ± 0,072	2,114 ± 1,389	C	2
1841	-	-	*	3,08 ± 0,04	*	X	3
2266	-	-	*	8,64 ± 0,02	*	D	3
2634	-	-	-	5,36 ± 0,03	-	T	1
	-	-	*	2,90 ± 0,02	*	X	3
2891	-	-	*	8,83 ± 0,02	*	D	3
3015	-	-	-	4,34 ± 0,06	-	X	1
	-	-	*	6,59 ± 0,02	*	D	3
3095	-	-	-	8,20 ± 0,04	-	D	1
3141	-	-	*	9,22 ± 0,04	*	D	3
3622	-	-	-	10,10 ± 0,04	-	D	1
3675	-	-	-	3,67 ± 0,08	-	S	1

4003	-	-	-	$7,09 \pm 0,06$	-	L	1
4158	-	-	-	$4,69 \pm 0,05$	-	T	1
4973	-	-	-	$8,31 \pm 0,04$	-	D	1
5301	$4,346 \pm 0,065$	$0,759 \pm 0,002$	*	$1,19 \pm 0,07$	*	Ch	3
5362	-	-	*	$6,69 \pm 0,04$	*	T	3
5780	-	-	$0,559 \pm 0,005$	$1,79 \pm 0,10$	$22,55 \pm 1,16$	C	1
5833	-	-	-	$5,16 \pm 0,07$	-	X	1
5914	-	-	*	$7,88 \pm 0,03$	*	D	3
6057	-	-	*	$2,50 \pm 0,05$	*	Xc	3

Tabela A.3: Resultados da análise dos espectros no visível de objetos da população de Hildas encontrados na literatura. O asterisco '*' é usado para marcar objetos onde a análise do determinado parâmetro não pode ser feita, devido a cobertura espectral insuficiente. O traço '-' marca objetos onde o parâmetro não foi identificado. Referências: (1) Dahlgren et al. (1997) ou Dahlgren and Lagerkvist (1995); (2) SMASS II (Bus and Binzel, 2004); (3) S3OS2 (Lazzaro et al., 2004); (5) Vilas et al. (2006)

Número	Profundidade $0.7\mu\text{m}$ (%)	Centro $0.7\mu\text{m}$ (Å)	Ponto de virada (Å)	Grad. espectral S%/1000Å	Grad. espectral-UV S%/1000Å	Tax.	Ref.
153	-	-	-	$2,08 \pm 0,04$	-	X	2
	-	-	-	$3,02 \pm 0,04$	-	X	1
	*	*	-	$3,45 \pm 0,11$	-	X	1
	-	-	*	$3,77 \pm 0,03$	*	X	5
	*	*	-	$4,69 \pm 0,17$	-	X	1
	*	*	-	$4,96 \pm 0,09$	-	X	1
190	-	-	-	$1,58 \pm 0,04$	-	Xc	2
	-	-	-	$2,83 \pm 0,02$	-	X	4
334	-	-	-	$2,37 \pm 0,04$	-	C	1
	*	*	-	$2,68 \pm 0,08$	-	X	1
	-	-	*	$2,79 \pm 0,03$	*	Xc	5
	*	*	-	$4,10 \pm 0,11$	-	X	1
361	-	-	-	$6,23 \pm 0,02$	-	T	1
	-	-	*	$6,57 \pm 0,02$	*	D	3
449	-	-	-	$3,14 \pm 0,05$	-	X	4
748	-	-	*	$4,82 \pm 0,05$	*	T	5
958	-	-	-	$8,19 \pm 0,02$	-	D	1

1038	-	-	-	8,56 ± 0,05	-	D	4
	-	-	-	8,96 ± 0,04	-	D	4
1162	-	-	*	3,66 ± 0,04	*	X	5
1180	-	-	*	4,78 ± 0,02	*	X	3
1202	-	-	-	8,42 ± 0,03	-	D	4
1212	-	-	-	2,71 ± 0,06	-	X	2
	-	-	-	5,35 ± 0,08	-	X	1
	-	-	-	6,30 ± 0,06	-	T	1
	*	*	-	6,44 ± 0,11	-	T	1
	*	*	-	7,07 ± 0,08	-	T	1
1268	-	-	-	6,35 ± 0,05	-	T	4
1269	*	*	-	8,15 ± 0,05	-	D	1
	-	-	-	10,69 ± 0,08	-	D	1
	*	*	-	10,80 ± 0,07	-	D	1
1345	-	-	-	3,03 ± 0,07	-	Xc	1
	*	*	-	4,53 ± 0,09	-	X	1
	*	*	-	4,62 ± 0,10	-	X	1
1439	*	*	-	0,67 ± 0,11	-	Cb	1
	-	-	-	2,12 ± 0,09	-	C	1
1512	-	-	*	5,01 ± 0,03	*	X	5
1529	*	*	-	7,49 ± 0,12	-	D	1
	*	*	-	7,77 ± 0,08	-	D	1
	-	-	-	9,25 ± 0,05	-	D	1
	-	-	-	9,67 ± 0,03	-	D	1
1754	-	-	*	3,76 ± 0,02	*	X	3
	*	*	-	4,61 ± 0,13	-	Xk	1
	*	*	-	7,67 ± 0,08	-	Xk	1
2246	-	-	-	6,73 ± 0,07	-	D	2
	*	*	-	11,03 ± 0,07	-	D	1
	*	*	-	11,36 ± 0,07	-	D	1
2483	-	-	-	11,88 ± 0,05	-	D	1
2959	-	-	*	9,92 ± 0,07	*	D	3
	-	-	-	10,53 ± 0,05	-	D	1
3134	-	-	-	8,13 ± 0,02	-	D	1
3202	*	*	-	10,59 ± 0,11	-	D	1
3203	*	*	-	8,61 ± 0,084	-	D	1
3254	-	-	-	5,55 ± 0,16	-	D	2
3415	-	-	-	9,72 ± 0,06	-	D	1
	-	-	-	11,63 ± 0,09	-	D	1
3514	-	-	-	9,37 ± 0,07	-	D	4
3557	*	*	-	14,03 ± 0,08	-	D	1

3561	-	-	-	$8,01 \pm 0,06$	-	D	4
3571	*	*	-	$11,53 \pm 0,08$	-	D	1
	*	*	-	$12,24 \pm 0,13$	-	D	1
3577	*	*	-	$8,97 \pm 0,09$	-	D	1
	*	*	-	$11,12 \pm 0,08$	-	D	1
u 3655	-	-	-	$9,10 \pm 0,07$	-	D	4
3694	-	-	-	$10,68 \pm 0,04$	-	D	1
3843	-	-	-	$3,49 \pm 0,06$	-	X	1
	*	*	-	$4,19 \pm 0,08$	-	Xk	1
	-	-	-	$4,43 \pm 0,06$	-	X	1
3923	-	-	-	$3,24 \pm 0,07$	-	X	1
	-	-	-	$6,08 \pm 0,07$	-	T	1
3990	-	-	*	$10,80 \pm 0,03$	*	D	3
4446	*	*	-	$12,72 \pm 0,12$	-	D	1

Tabela A.4: Resultados para a análise dos espectros no infravermelho próximo de membros de Hildas observados com o TNG.

Número	IR-slope1 S%/1000 Å	IR-slope1 erro	IR-Slope2 S%/1000 Å	IR-Slope2 erro	Tax
190	0.886	0.052	1.138	0.447	Cg
279	5.341	0.104	-1.784	0.428	D
	4.756	0.061	-2.210	0.659	D
334	1.835	0.041	-0.268	0.173	X
1202	4.044	0.065	2.068	0.502	D
1269	4.461	0.081	-0.453	0.234	D
1754	2.193	0.029	2.825	0.387	X
2067	4.123	0.148	3.225	1.226	D
	4.561	0.078	0.201	0.479	D
2624	5.259	0.103	-0.364	0.435	D
3557	4.246	0.065	0.965	0.548	D
3561	4.176	0.086	1.871	0.436	D
4317	5.013	0.087	2.725	0.579	D
5368	4.675	0.073	0.873	0.552	D
5661	4.574	0.111	0.725	0.356	D
5711	5.861	0.109	3.115	0.676	D
6237	2.652	0.101	-1.93	0.773	X
9121	4.488	0.083	2.715	0.318	D
11750	4.411	0.078	3.025	0.356	D
15505	4.471	0.071	2.469	0.681	D

15417	5.160	0.202	-0.24	0.712	D
15540	4.022	0.110	6.012	1.797	D

Tabela A.5: Resultados para a análise dos espectros no infravermelho próximo de membros de Hildas e Cibele encontrados na literatura. Referências:(1) Reddy and Sanchez (2016); (2) SMASS II (Bus and Binzel, 2004); (3) Takir and Emery (2012)

Número	IR-Slope1 S'%/1000Å	IR-Slope1 erro	IR Slope2 S'%/1000Å	IR-Slope2 erro	Tax.	Grupo	Ref.
76	2.197	0.013	1.835	0.013	X	Cibele	3
	1.838	0.152	2.344	0.243	X		2
87	1.038	0.013	1.771	0.021	Xc	Cibele	1
107	1.229	0.012	1.647	0.012	C	Cibele	3
121	0.778	0.016	0.164	0.022	L	Cibele	1
	2.001	0.011	-0.134	0.022	K		2
	1.85	0.014	0.03	0.023	K		3
401	2.226	0.022	1.614	0.033	X	Cibele	3
790	1.931	0.022	1.451	0.04	X	Cibele	3
153	2.221	0.01	1.782	0.042	X	Hilda	2
	2.24	0.012	1.813	0.034	-		3
190	1.823	0.016	1.605	0.046	-	Hilda	3
334	1.397	0.009	1.551	0.068	-	Hilda	2
	1.58	0.018	1.545	0.118	-		3
361	3.156	0.021	2.623	0.074	-	Hilda	3

Tabela A.6: Propriedades físicas e dinâmicas dos membros de Cibele

Número	Nome	a_p (ua)	e_p	$\sin i_p$	Família	H (mag)	p_V	p_{Verr}	D (km)	D_{err} (km)
65	Cibele	3,429	0,111	3,563	-	-	0,059	0,039	276,584	74,487
76	Freia	3,411	0,166	2,122	-	-	0,058	0,004	145,423	1,287
87	Sylvia	3,485	0,054	0,171	Sylvia	-	0,046	0,004	253,051	2,953
107	Camilla	3,486	0,093	0,169	Sylvia	-	0,059	0,012	210,37	8,326
121	Hermione	3,447	0,134	7,598	-	-	0,076	0,034	166,242	8,807
168	Sibylla	3,379	0,072	4,666	-	-	0,056	0,012	145,366	3,219
225	Henrietta	3,389	0,264	20,873	-	-	0,062	0,008	95,934	1,249

229	Adelinda	3,421	0,139	2,079	-	-	0,035	0,007	105,912	1,779
260	Huberta	3,444	0,115	6,416	-	-	0,044	0,01	101,539	0,941
401	Ottilia	3,346	0,036	5,972	-	-	0,052	0,009	87,803	0,435
414	Liriope	3,504	0,072	9,558	-	-	0,027	0,003	88,76	2,169
420	Bertholda	3,417	0,031	6,687	-	-	0,044	0,004	138,699	3,446
522	Helga	3,63	0,085	4,417	-	-	0,057	0,0133	83,7	4,85
528	Rezia	3,403	0,018	12,685	-	-	0,046	0,006	91,966	0,361
536	Merapi	3,499	0,086	19,424	-	-	0,048	0,005	147,066	5,524
570	Kythera	3,426	0,12	1,788	-	-	0,069	0,004	87,486	0,784
643	Scheherezade	3,361	0,058	13,769	-	-	0,058	0,013	64,997	0,382
692	Hippodamia	3,383	0,17	26,079	-	-	0,205	0,029	42,771	0,633
713	Luscinia	3,392	0,164	10,36	-	-	0,048	0,005	97,968	0,876
721	Tabora	3,55	0,116	8,323	-	-	0,048	0,006	74,791	0,525
790	Pretoria	3,412	0,151	20,527	-	-	0,041	0,029	163,4	53,372
909	Ulla	3,543	0,05	0,308	Ulla	-	0,037	0,001	113,13	1,48
940	Kordula	3,376	0,172	6,21	-	-	0,041	0,009	79,852	0,504
1004	Belopolskya	3,402	0,087	2,979	-	-	0,028	0,001	79,83	1,33
1028	Lydina	3,408	0,107	9,393	-	-	0,038	0,006	88,526	0,762
1154	Astronomia	3,39	0,071	4,533	-	-	0,036	0,008	55,715	0,5
1177	Gonnessia	3,349	0,031	15,069	-	9,658	0,032	0,016	104,631	33,728
1266	Tone	3,359	0,051	17,185	-	-	0,053	0,005	75,47	0,523
1280	Baillauda	3,415	0,05	6,459	-	9,994	0,045	0,001	53,97	0,72
1328	Devota	3,506	0,135	5,765	-	10,086	0,046	0,005	53,697	0,481
1373	Cincinnati	3,422	0,314	38,929	-	11,367	0,155	0,036	19,448	0,175
1467	Mashona	3,384	0,131	21,947	-	-	0,083	0,014	89,16	0,728
1556	Wingolfia	3,427	0,109	15,748	-	10,665	0,093	0,012	33,88	2,12
1574	Meyer	3,537	0,035	14,478	-	-	0,042	0,011	57,785	0,435
1579	Herrick	3,437	0,127	8,762	-	10,765	0,043	0,006	46,925	0,405
1796	Riga	3,356	0,057	22,585	-	-	- 0,044	0,005	68,167	0,298
1841	Masaryk	3,422	0,1	2,62	-	10,937	0,052	0,005	40,24	0,504
2266	Tchaikovsky	3,4	0,182	13,247	-	10,883	0,045	0,002	43,58	0,69
2634	James Bradley	3,457	0,049	6,422	-	-	0,107	0,005	33,726	0,488
2891	McGetchin	3,355	0,136	9,296	-	-	- 0,061	0,005	33,996	0,418
3015	Candy	3,385	0,173	17,403	-	11,145	0,107	0,017	24,517	0,47
3095	Omarkhayyam	3,502	0,075	2,966	-	10,949	0,063	0,009	29,007	0,335
3141	Buchar	3,4	0,077	10,995	-	-	0,043	0,004	29,368	0,231
3622	Ilinsky	3,389	0,043	4,935	-	-	0,102	0,023	21,88	0,458
3675	Kemstach	3,369	0,088	10,857	-	-	0,181	0,018	18,825	0,184
4003	Schumann	3,427	0,094	5,059	-	-	0,054	0,009	35,139	0,286
4158	Santini	3,401	0,019	6,17	-	-	0,172	0,013	16,797	0,181
4973	Showa	3,426	0,077	18,924	-	-	0,068	0,01	27,958	0,423

5301	Novobranets	3,362	0,102	10u,047	-	-	0,058	0,011	20,97	0,298
5362	None	3,389	0,024	6,146	-	-	0,085	0,013	21,865	0,253
5780	Lafontaine	3,346	0,131	8,677	-	12,365	0,055	0,004	22,593	0,119
5833	Peterson	3,491	0,032	19,381	-	11,587	0,105	0,021	27,077	0,435
5914	Kathywhaler	3,543	0,069	0,162	Sylvia	11,283	0,062	0,01	38,097	0,224
6039	Parmenides	3,411	0,057	13,11	-	-	0,076	0,004	22,03	0,157
6057	Robbia	3,329	0,1	17,863	-	-	0,043	0,004	29,368	0,231

Tabela A.7: Propriedades físicas e dinâmicas dos membros de Hildas

Número	Nome	a_p (ua)	e_p	$\sin i_p$	Família	H (mag)	p_V	p_{Verr}	D (km)	D_{err} (km)
153	Hilda	3.965	0.174	0.155	Hilda	7.67	0.038	0.016	218.844	3.637
190	Ismene	3.986	0.166	6.177	-	-	0.035	0.001	214.664	8.608
334	Chicago	3.895	0.022	4.641	-	-	0.041	0.013	198.77	5.668
361	Bononia	3.96	0.214	12.626	-	-	0.038	0.008	154.334	2.69
449	Hamburga	2.551	0.173	3.085	-	-	0.033	0.009	80.827	17.911
748	Simeisa	3.944	0.188	2.259	-	-	0.041	0.007	103.725	1.034
958	Asplinda	3.986	0.186	5.63	-	10.489	0.045	0.005	45.117	0.091
1038	Tuckia	3.965	0.164	0.143	Hilda	10.599	-	-	-	-
1144	Oda	3.748	0.094	9.743	-	-	0.061	0.014	56.347	0.194
1162	Larissa	3.93	0.109	1.887	-	9.421	0.169	0.012	42.243	0.111
1180	Rita	3.985	0.158	7.199	-	-	0.058	0.009	82.308	0.418
1202	Marina	3.996	0.166	3.334	-	10.088	-	-	-	-
1212	Francette	3.967	0.23	0.126	Hilda	-	0.046	0.007	76.395	0.155
1268	Libya	3.975	0.102	4.427	-	-	0.043	0.003	96.708	0.848
1269	Rollandia	3.906	0.1	2.758	-	-	0.048	0	104.893	0.624
1345	Potomac	3.989	0.183	11.399	-	-	0.043	0.008	72.975	0.463
1439	Vogtia	4.003	0.118	4.203	-	-	0.046	0.007	50.542	0.148
1512	Oulu	3.967	0.147	6.491	-	-	0.038	0.005	79.222	0.241
1529	Oterma	3.964	0.154	0.137	Hilda	-	0.054	0.003	56.327	0.285
1754	Cunningham	3.941	0.169	12.153	-	-	-	-	-	-
1902	Shaposhnikov	3.965	0.222	12.496	-	-	0.04	0.012	83.443	1.723
2067	Aksnes	3.964	0.182	3.08	-	10.548	0.054	0.003	46.003	0.761
2246	Bowell	3.958	0.094	6.495	-	-	0.045	0.012	48.424	0.429
2483	Guinevere	3.972	0.278	4.499	-	-	0.067	0.011	35.687	0.18
2624	Samitchell	3.948	0.117	2.797	-	-	-	-	-	-
2959	Scholl	3.943	0.275	5.234	-	-	0.054	0.015	32.783	0.319
3134	Kostinsky	3.966	0.184	0.156	Hilda	-	0.037	0.004	50.389	0.403
3202	Graff	3.936	0.115	11.107	-	11.311	0.055	0.013	35.914	0.244

3254	Bus	3.951	0.165	4.446	-	-	0.073	0.002	31.104	0.895
3415	Danby	3.963	0.249	1.367	-	11.304	0.063	0.006	36.582	0.124
3514	Hooke	3.954	0.191	3.505	-	-	0.084	0.012	22.037	0.073
3557	Sokolsky	4.003	0.173	6.049	-	-	-	-	-	-
3561	Devine	3.962	0.133	0.149	Hilda	-	-	-	-	-
3571	Milanstefanik	3.962	0.127	0.16	Hilda	-	0.063	0.005	34.898	0.394
3577	Putilin	3.948	0.197	3.741	-	10.557	0.051	0.003	49.138	0.313
3655	Eupraksia	4.014	0.2	3.823	-	11.129	0.063	0.01	36.66	0.207
3694	Sharon	3.933	0.206	4.976	-	-	0.058	0.004	46.036	0.345
3843	OISCA	3.993	0.144	3.926	-	10.938	0.108	0.023	30.768	0.3
3923	Radzievskij	3.966	0.196	0.05	Schubart	-	0.05	0.005	29.87	0.163
3990	Heimdal	3.965	0.168	0.167	Hilda	-	0.067	0.021	35.679	0.33
4317	Garibaldi	3.967	0.213	0.159	Hilda	-	0.052	0.01	38.611	0.224
4446	Carolyn	3.989	0.281	7.239	-	-	0.086	0.026	28.645	0.29
5368	Vitagliano	3.974	0.083	6.262	-	11.2	0.058	0.017	34.812	0.061
5661	Hildebrand	3.966	0.234	13.311	-	-	-	-	-	-
5711	Eneev	3.942	0.164	6.371	-	-	-	-	-	-
6237	Chikushi	3.935	0.073	5.362	-	-	-	-	-	-
7394	Xanthomalitia	3.933	0.033	8.61	-	11.57	0.061	0.006	32.472	0.125
9121	Stefanovalentini	3.885	0.041	4.647	-	-	-	-	-	-
11750	None	3.981	0.053	2.678	-	-	0.07	0.007	18.244	0.336
15505	None	3.966	0.179	0.144	Hilda	11.759	0.079	0.008	24.789	0.38
15417	Babylon	3.933	0.053	3.185	-	-	-	-	-	-
15540	None	3.989	0.113	16.988	-	-	0.08	0.008	19.528	0.39

Apêndice B

O teste de Kolmogorov-Smirnov

Grande parte dos problemas em análise estatística de dados envolvem assumir (ou descartar) com um determinado nível de significância, a hipótese que os dados são retirados de uma população com uma distribuição de probabilidade específica. Outra situação recorrente é considerar como hipótese nula que, dois conjuntos de dados são provenientes de uma população com uma mesma função de distribuição. A estatística de Kolmogorov-Smirnov (K-S) é um teste não paramétrico que destina-se a averiguar tais hipóteses.

B.0.1 K-S uniamostrai

Considere uma amostra aleatória $X_i, i = 1, \dots, N$, com uma distribuição desconhecida \mathbb{P} , a ser comparada com uma distribuição de referência \mathbb{P}_0 (teste K-S uniamostrai). As hipóteses a serem testadas neste caso serão:

- $H_0 : \mathbb{P} = \mathbb{P}_0$,
- $H_1 : \mathbb{P} \neq \mathbb{P}_0$,

em que \mathbb{P}_0 deve ser contínua e fornecida *a-priori*.

Denotamos $P(x)$ como a distribuição acumulada da referência \mathbb{P}_0 . A função de distribuição acumulada empírica dos dados, $S_N(x)$, pode ser determinada por uma função escada de forma:

$$S_N(x) = \mathbb{P}_N(X \leq x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I(X_i \leq x), \quad (\text{B.1})$$

onde I é a função indicadora, igual a 1 se $X_i \leq x$ e igual a 0 no caso contrário. A função S_N é, obviamente, constante entre os consecutivos X_i 's (isto é, ordenados de maneira crescente) e salta para mesma constante de amplitude igual a $1/N$ (ver

figura B.1). As hipóteses H_0 e H_1 podem ser reformuladas em termos das funções S_N e $P(x)$, sendo $H_0 : S_N(x) = P(x)$ e $H_1 : S_N(x) \neq P(x)$.

A estatística de K-S mensura o supremo (máxima) distância D entre a distribuição acumulada de referência $P(x)$ e a distribuição acumulada dos dados $S_N(x)$, sobre a amplitude dos valores de x . Isto é:

$$D = \sup_{-\infty < x < \infty} | S_N(x) - P(x) |, \quad (\text{B.2})$$

em que sup é o supremo do conjunto de distâncias.

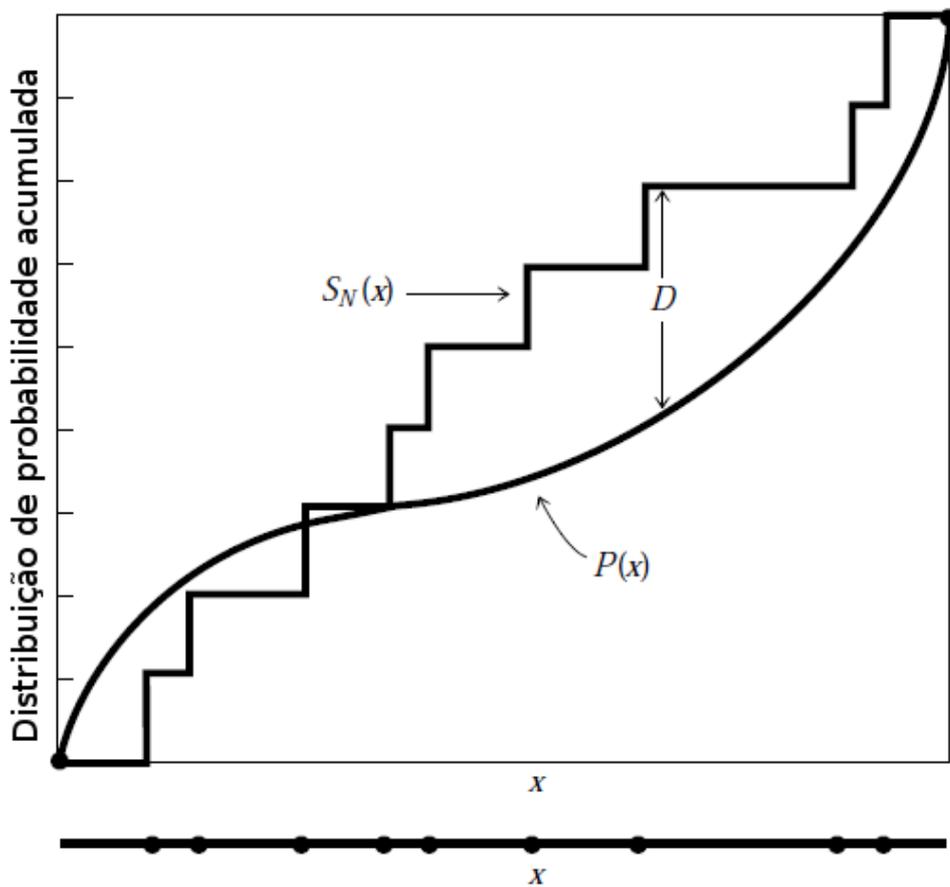


Figura B.1: Representação gráfica da estatística de K-S. Figura adaptada de Press (2007).

A figura B.1 mostra a representação gráfica dos valores de D , S_N e P : uma distribuição de dados com valores em X (mostrado como os N-pontos na abscissa) é comparada com a distribuição teórica cuja distribuição acumulada de probabilidade é $P(x)$. A função degrau de probabilidade acumulada S_N é construída de maneira crescente. Graficamente, D é a maior distância vertical entre as duas distribuições

acumuladas.

Na situação em que a hipótese nula é recusada (H_1), isto é, $S_N \neq P$, teremos que:

$$D = \sup_{x \in \mathbb{R}} |S_N(x) - P(x)| > \delta, \quad (\text{B.3})$$

em que δ assume valor suficiente para discriminar as duas distribuições. Entretanto para avaliar ambas as hipóteses, é necessário considerar o tamanho da amostra (N). Multiplicando ambos os lados da equação por \sqrt{N} , encontra-se:

$$D_N \equiv \sqrt{N} \sup_{x \in \mathbb{R}} |S_N(x) - P(x)| > \sqrt{N}\delta. \quad (\text{B.4})$$

Note que, se H_0 falha, então, $D_N > \sqrt{N}\delta \rightarrow \infty$, quando $N \rightarrow \infty$. Desta forma, pode-se considerar a seguinte regra para decisão:

$$\delta = \begin{cases} H_0 : & D_N \leq c \\ H_1 : & D_N \geq c \end{cases} \quad (\text{B.5})$$

em que c é o valor crítico. Se D_N for maior que c , a hipótese H_0 é rejeitada com $(1 - \alpha) \times 100\%$ de confiança, onde α é o nível de significância com o qual se quer testar as hipóteses. Caso contrário, H_0 não pode ser rejeitada. A relação entre o cálculo do valor crítico (c) e o nível de significância (α) pode ser encontrado em Lehmann and D'abrera (1975); Press (2007).

B.0.2 Teste K-S biamostrais

O teste K-S também pode ser utilizado para comparar duas amostras. Na presente tese, este foi o método aplicado em análises dos capítulos 3 e 4.

Suponha uma primeira amostra $X_1 \dots X_m$, de tamanho m e distribuição acumulada $F(x)$. Enquanto que uma segunda amostra $Y_1 \dots Y_n$ de tamanho n , possui distribuição acumulada $G(x)$. As funções acumuladas $F(x)$ e $G(x)$ são determinadas de maneira análoga à equação B.1. As hipóteses a serem testadas via K-S serão:

- $H_0 : F(x) = G(x)$
- $H_1 : F(x) \neq G(x)$

A estatística de K-S biamostrais é determinado por:

$$D = \sup_{-\infty < x < \infty} |F_m(x) - G_n(x)|. \quad (\text{B.6})$$

De maneira análoga ao realizado na análise uniamostrais, pode-se definir D_{mn} de

forma:

$$D_{mn} = \left(\frac{mn}{m+n} \right)^{1/2} \sup_{x \in \mathbb{R}} | F_m(x) - G_n(x) |. \quad (\text{B.7})$$

Desta forma, a hipótese nula é rejeitada, com um determinado nível de significância α quando:

$$D_{mn} > c(\alpha) \sqrt{\frac{n+m}{nm}}, \quad (\text{B.8})$$

em que o valor crítico $c(\alpha)$ assume diferentes valores para cada α estabelecido na análise (ver em Sachs (1984)). De maneira geral, podemos utilizar a relação:

$$c(\alpha) = \sqrt{-\frac{1}{2} \ln\left(\frac{\alpha}{2}\right)}. \quad (\text{B.9})$$

Desta maneira, para uma significância de $\alpha = 0.05$, por exemplo, temos um $c = 1.36$.

B.0.3 Interpretação do valor-p do Teste K-S

O valor-p (ou do inglês, *p-value*) é usualmente utilizado para auxiliar na rejeição de hipóteses no teste K-S. Neste contexto, este valor é calculado da seguinte forma:

- Cálculo da distancia D , entre as distribuições
- Cálculo da distância D_j , para todas as j permutações possíveis da amostra

O *p-value* é então determinado por:

$$p_{value} = \frac{\#_{total}(D_j > D)}{\#_{total} \text{ de permutações}}. \quad (\text{B.10})$$

Desta maneira, em contraste com o valor de significância fixo α , o *p-value* é calculado com base no teste estatístico e denota o valor limite do nível de significância para qual a hipótese H_0 será aceita (ou rejeitada).

A hipótese H_0 será aceita para valores de α menores que o valor do *p-value* e rejeitada no caso contrário. Por exemplo, para o caso do *p-value*=0.05, a hipótese nula será aceita para um nível de significância menor que 0.05, e rejeitada para níveis maiores que este limite.

Apêndice C

Descrição do Banco de Dados J-PLUS

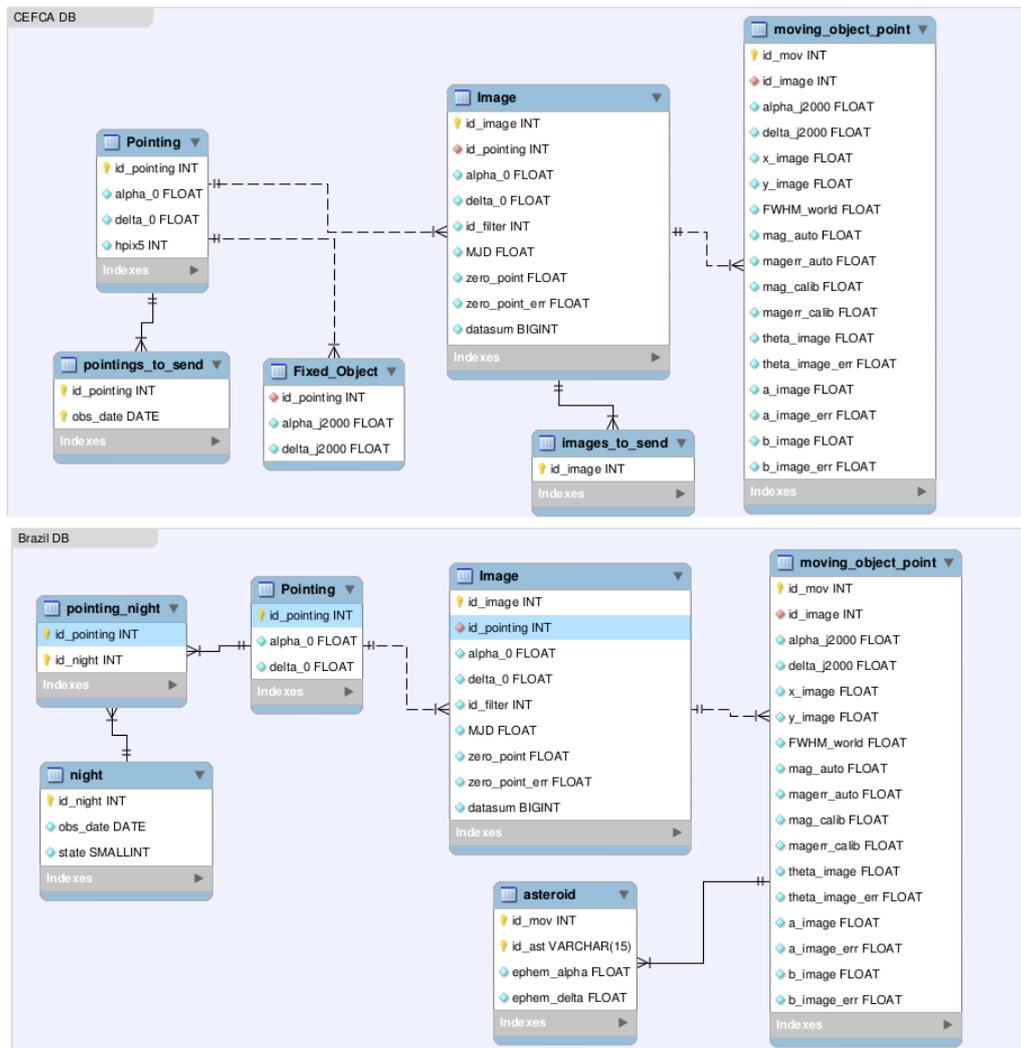


Figura C.1: Estrutura relacional das bases de dados de objetos móveis no CEFCA (*topo*) e no ON (*baixo*).

Neste apêndice descrevemos a estrutura dos bancos de dados implementados no CEFCA e no Observatório Nacional. Na tabela ?? é possível obter a descrição de cada variável em ambos os bancos de dados e na figura C.1 é apresentado a estrutura relacional entre as tabelas. Ambos bancos de dados foram escritos utilizando o gerenciador PostgreSQL. O pipeline central do J-PLUS utiliza o programa *Software for source extraction* (Sextractor - Bertin and Arnouts (1996)), diversos dos parâmetros armazenados nestes bancos dados são resultados deste programa. Para uma descrição detalhada destes parâmetros ver em <https://www.astromatic.net/software/sextractor>.

Tabela C.1: Tabela do banco de dados de objetos móveis do CEFCA

Nome da variável	Tipo da variável	Tabela	Relacional	Descrição
id_pointing	INT	pointings_to_send	pointing image fixed_object	Identificador da posição de apontamento a ser enviado ao banco de dados do ON
obsdate	DATE	pointings_to_send		Data de observação
id_pointing	INT	pointing	pointings_to_send image fixed_object	Identificador da posição de apontamento
alpha_0	FLOAT	pointing		Ascensão Reta da posição apontamento
delta_0	FLOAT	pointing		Declinação da posição apontamento
hpix5	INT	pointing		
id_pointing	INT	fixed_object	pointings_to_send image pointing	Identificador da posição de apontamento
alpha_J2000	FLOAT	fixed_object		Ascensão Reta do objeto fixo
delta_J2000	FLOAT	fixed_object		Declinação do objeto fixo
id_pointing	INT	image	pointings_to_send fixed_object pointing	Identificador da posição de apontamento
id_image	INT	image	images_to_send moving_object	Identificador da imagem
alpha_0	FLOAT	image		Ascensão Reta do centro da imagem
delta_0	FLOAT	image		Declinação do centro da imagem
id_filter	INT	image		Identificador do filtro fotométrico

MJD	FLOAT	image		Data juliana modificada do início da observação
zero_point	FLOAT	image		Ponto zero da calibração fotométrica
zero_point_err	FLOAT	image		Erro do ponto zero da calibração fotométrica
datasum	BIGINT	image		
id_image	INT	images_to_send	image moving_object	Identificador da imagem a ser enviada ao banco de dados do ON
id_image	INT	moving_object	image images_to_send	Identificador da imagem
id_mov	INT	moving_object		Identificador do objeto móvel
alpha_J2000	FLOAT	moving_object		Ascensão Reta do objeto móvel
delta_J2000	FLOAT	moving_object		Declinação do objeto móvel
x_image	FLOAT	moving_object		Posição do objeto móvel em pixel no eixo X
y_image	FLOAT	moving_object		Posição do objeto móvel em pixel no eixo Y
FWHM_WORLD	FLOAT	moving_object		FWHM extraído do sextractor
mag_auto	FLOAT	moving_object		Magnitude instrumental do objeto móvel
magerr_J2000	FLOAT	moving_object		Erro da magnitude instrumental do objeto móvel
mag_calib	FLOAT	moving_object		Magnitude calibrada do objeto móvel
magerr_calib	FLOAT	moving_object		Erro da magnitude calibrada do objeto móvel
theta_image	FLOAT	moving_object		Parâmetro de morfologia da fonte extraída do sextractor
theta_image_err	FLOAT	moving_object		Erro do parâmetro de morfologia da fonte extraída do sextractor
a_image	FLOAT	moving_object		Parâmetro de morfologia da fonte extraída do sextractor

a_image_err	FLOAT	moving_object		Erro do parâmetro de morfologia da fonte extraída do sextractor
b_image	FLOAT	moving_object		Parâmetro de morfologia da fonte extraída do sextractor
b_image_err	FLOAT	moving_object		Erro do parâmetro de morfologia da fonte extraída do sextractor

Tabela C.2: Tabela do banco de dados de objetos móveis do ON

Nome da variável	Tipo da variável	Tabela	Relacional	Descrição
id_pointing	INT	pointing	pointings_night image	Identificador da posição de apontamento
alpha_0	FLOAT	pointing		Ascensão Reta da posição apontamento
delta_0	FLOAT	pointing		Declinação da posição apontamento
hpix5	INT	pointing		
id_pointing	INT	image	pointing_night pointing	Identificador da posição de apontamento
id_image	INT	image	moving_object	Identificador da imagem
alpha_0	FLOAT	image		Ascensão Reta do centro da imagem
delta_0	FLOAT	image		Declinação do centro da imagem
id_filter	INT	image		Identificador do filtro fotométrico
MJD	FLOAT	image		Data juliana modificada do início da observação
zero_point	FLOAT	image		Ponto zero da calibração fotométrica
zero_point_err	FLOAT	image		Erro do ponto zero da calibração fotométrica
datasum	BIGINT	image		
id_image	INT	moving_object	image	Identificador da imagem
id_mov	INT	moving_object	asteroid	Identificador do objeto móvel
alpha_J2000	FLOAT	moving_object		Ascensão Reta do objeto móvel

delta_J2000	FLOAT	moving_object		Declinação do objeto móvel
x_image	FLOAT	moving_object		Posição do objeto móvel em pixel no eixo X
y_image	FLOAT	moving_object		Posição do objeto móvel em pixel no eixo Y
FWHM_- WORLD	FLOAT	moving_object		FWHM extraído do sextractor
mag_auto	FLOAT	moving_object		Magnitude instrumental do objeto móvel
magerr_J2000	FLOAT	moving_object		Erro da magnitude instrumental do objeto móvel
mag_calib	FLOAT	moving_object		Magnitude calibrada do objeto móvel
magerr_calib	FLOAT	moving_object		Erro da magnitude calibrada do objeto móvel
theta_image	FLOAT	moving_object		Parâmetro de morfologia da fonte extraída do sextractor
theta_image_err	FLOAT	moving_object		Erro do parâmetro de morfologia da fonte extraída do sextractor
a_image	FLOAT	moving_object		Parâmetro de morfologia da fonte extraída do sextractor
a_image_err	FLOAT	moving_object		Erro do parâmetro de morfologia da fonte extraída do sextractor
b_image	FLOAT	moving_object		Parâmetro de morfologia da fonte extraída do sextractor
b_image_err	FLOAT	moving_object		Erro do parâmetro de morfologia da fonte extraída do sextractor
id_mov	INT	asteroid	moving_object	Identificador do objeto móvel
id_ast	VARCHAR	asteroid	moving_object	Identificador do asteroide
alpha_J2000	FLOAT	asteroid		Ascensão Reta da efeméride do asteroide
delta_J2000	FLOAT	asteroid		Declinação da efeméride do asteroide

id_pointing	INT	pointing_night	pointing image	Identificador da posição de aponta- mento
id_night	INT	pointing_night	night	Identificador da noite de observação
id_night	INT	night	pointing_night	Identificador da posição de aponta- mento
obsdate	DATE	night		Data de observação
state	SMALLINT	night		Identificador do pro- cessamento dos dados da noite

Apêndice D

Trabalhos Desenvolvidos em Colaborações Durante a Tese

- **Compositional study of asteroids in the Erigone collisional family using visible spectroscopy at the 10.4 m GTC**

Morate, D.; de León, J.; **De Prá, M.**; Licandro, J.; Cabrera-Lavers, A.; Campins, H.; Pinilla-Alonso, N.; Alí-Lagoa, V.

Abstract: Two primitive near-Earth asteroids, (101955) Bennu and (162173) Ryugu, will be visited by a spacecraft with the aim of returning samples back to Earth. Since these objects are believed to originate in the inner main belt primitive collisional families (Erigone, Polana, Clarissa, and Sulamitis) or in the background of asteroids outside these families, the characterization of these primitive populations will enhance the scientific return of the missions. The main goal of this work is to shed light on the composition of the Erigone collisional family by means of visible spectroscopy. Asteroid (163) Erigone has been classified as a primitive object, and we expect the members of this family to be consistent with the spectral type of the parent body. We have obtained visible spectra (0.5-0.9 μm) for 101 members of the Erigone family, using the OSIRIS instrument at the 10.4 m Gran Telescopio Canarias. We found that 87% of the objects have typically primitive visible spectra consistent with that of (163) Erigone. In addition, we found that a significant fraction of these objects ($\sim 50\%$) present evidence of aqueous alteration.

Publicado em: Astronomy & Astrophysics, Volume 586, id.A129, 18 pp.

Data de Publicação: Fevereiro de 2016

DOI: 10.1051/0004-6361/201527453

- **Visible spectroscopy of the Sulamitis and Clarissa primitive families: a possible link to Erigone and Polana**

Morate D.; De León, J.; De Prá M.; Licandro, J.; Cabrera-Lavers, A.; Campins, H.; Pinilla-Alonso, N.

Abstract: The low-inclination ($i \sim 8$) primitive asteroid families in the inner main belt, i.e., Polana, Erigone, Sulamitis, and Clarissa, are considered to be the most likely sources of near-Earth asteroids (101955) Bennu and (162173) Ryugu. These two primitive NEAs will be visited by NASA OSIRIS-REx and JAXA Hayabusa 2 missions, respectively, with the aim of collecting samples of material from their surfaces and returning them back to Earth. In this context, the Primitive Asteroid Spectroscopic Survey (PRIMASS) was born, with the main aim to characterize the possible origins of these NEAs and constrain their dynamical evolution. As part of the PRIMASS survey we have already studied the Polana and Erigone collisional families (de León et al. 2016; Pinilla-Alonso et al. 2016; Morate et al. 2016). The main goal of the work presented here is to compositionally characterize the Sulamitis and Clarissa families by means of visible spectroscopy. We have obtained 97 (64 from Sulamitis and 33 from Clarissa) visible spectra (0.5-0.9 μm) using the OSIRIS instrument at the 10.4m Gran Telescopio Canarias (GTC). We found that about 60% of the sampled asteroids from the Sulamitis family show signs of aqueous alteration on their surfaces. We also found that the majority of the Clarissa members present no signs of hydration. The results obtained here show similarities between Sulamitis-Erigone, and Clarissa-Polana collisional families.

Submetido a: Astronomy & Astrophysics

Data de Submissão: Junho de 2017

• **The Veritas and Themis asteroid families: 5-14 μm spectra with the Spitzer Space Telescope**

Landsman, Z.; Licandro, J.; Campins, H.; Ziffer, J.; **Prá, M.**; Cruikshank, D.

Abstract: Spectroscopic investigations of primitive asteroid families constrain family evolution and composition and conditions in the solar nebula, and reveal information about past and present distributions of volatiles in the solar system. Visible and near-infrared studies of primitive asteroid families have shown spectral diversity between and within families. Here, we aim to better understand the composition and physical properties of two primitive families with vastly different ages: ancient Themis (~ 2.5 Gyr) and young Veritas (~ 8 Myr). We analyzed the 5 - 14 μm Spitzer Space Telescope spectra of 11 Themis-family asteroids, including eight previously studied by Licandro et al. (2012), and nine Veritas-family asteroids, for a total of 20 asteroids in our sample. We detect a broad 10- μm emission feature, attributed to fine-grained and/or porous silicate regolith, in all 11 Themis-family spectra and six of nine Veritas-family asteroids, with 10- μm spectral contrast ranging from $1\% \pm 0.1\%$ to $8.5\% \pm 0.9\%$. We used thermal modeling to derive diameters, beaming parameters and albedos for our sample. Asteroids in both families have beaming parameters near unity and geometric albedos in the range 0.03 - 0.14. Spectral contrast of the 10- μm silicate emission feature is correlated with beaming parameter and rotation period in the Themis family, and may be related to near-infrared spectral slope for both families. We see no correlations of 10- μm emission with diameter or albedo for either family. Comparison with laboratory spectra of primitive meteorites suggests these asteroids are similar to meteorites with relatively low abundances of phyllosilicates. Overall, our results suggest the Themis and Veritas families are primitive asteroids with variation in composition and/or regolith properties within both families.

Publicado em: Icarus, Volume 269, p. 62-74.

Data de Publicação: Maio de 2016

DOI: 10.1051/0004-6361/201527453

- **Dynamical study of the Atira group of asteroids**

Ribeiro, A. O.; Roig, F.; **De Prá, M. N.**; Carvano, J. M.; DeSouza, S. R.

Abstract: We study the dynamics of the group of Atira asteroids, characterized by aphelion distance $Q < 0.983$ au. This group has a significant observational bias, and their number is expected to be an order of magnitude larger than is known today. Due to their orbital configuration, these asteroids may represent a potential danger to the Earth. Here, we construct dynamical maps of the region between 0.2 and 0.98 au using a simple chaos indicator, the mean standard deviation in semimajor axis, and also analyse the behaviour of the real Atira orbits by means of the diffusion coefficient in semimajor axis. Our results indicate that Atira asteroids are located in the most unstable regions of the inner Solar system, and their stability is determined by close encounters and collisions with Mercury, Venus, and the Earth. A fraction of the known Atiras may represent a potential threat to the Earth over a few 10^5 yr of evolution. We found two islands of low-eccentricity stable orbits that might harbour a long-lasting sub-population of Atiras not yet observed.

Publicado em: Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 458, Issue 4, p.4471-4476

Data de Publicação: Junho de 2016

DOI: 10.1093/mnras/stw642

• **J-PAS: The Javalambre-Physics of the Accelerated Universe Astrophysical Survey**

Benitez, N.; Dupke, R.; Moles, M.; Sodre, L.; Cenarro, J.; Marin-Franch, A.; Taylor, K.; Cristobal, D.; Fernandez-Soto, A.; Mendes de Oliveira, C.; Cepa-Nogue, J.; Abramo, L. R.; Alcaniz, J. S.; Overzier, R.; Hernandez-Monteagudo, C.; Alfaro, E. J.; Kanaan, A.; Carvano, J. M.; Reis, R. R. R.; Martinez Gonzalez, E. Ascaso, B.; Ballesteros, F.; Xavier, H. S.; Varela, J.; Ederoclite, A.; Vazquez Ramio, H.; Broadhurst, T.; Cypriano, E.; Angulo, R.; Diego, J. M.; Zandivarez, A.; Diaz, E.; Melchior, P.; Umetsu, K.; Spinelli, P. F.; Zitrin, A.; Coe, D.; Yepes, G.; Vielva, P.; Sahni, V.; Marcos-Caballero, A.; Shu Kitaura, F.; Maroto, A. L.; Masip, M.; Tsujikawa, S.; Carneiro, S.; Gonzalez Nuevo, J.; Carvalho, G. C.; Reboucas, M. J.; Carvalho, J. C.; Abdalla, E.; Bernui, A.; Pigozzo, C.; Ferreira, E. G. M.; Chandrachani Devi, N.; Bengaly, C. A. P., Jr.; Campista, M.; Amorim, A.; Asari, N. V.; Bongiovanni, A.; Bonoli, S.; Bruzual, G.; Cardiel, N.; Cava, A.; Cid Fernandes, R.; Coelho, P.; Cortesi, A.; Delgado, R. G.; Diaz Garcia, L.; Espinosa, J. M. R.; Galliano, E.; Gonzalez-Serrano, J. I.; Falcon-Barroso, J.; Fritz, J.; Fernandes, C.; Gorgas, J.; Hoyos, C.; Jimenez-Teja, Y.; Lopez-Aguerri, J. A.; Lopez-San Juan, C.; Mateus, A.; Molino, A.; Novais, P.; OMill, A.; Oteo, I.; Perez-Gonzalez, P. G.; Poggianti, B.; Proctor, R.; Ricciardelli, E.; Sanchez-Blazquez, P.; Storchi-Bergmann, T.; Telles, E.; Schoennell, W.; Trujillo, N.; Vazdekis, A.; Viironen, K.; Daflon, S.; Aparicio-Villegas, T.; Rocha, D.; Ribeiro, T.; Borges, M.; Martins, S. L.; Marcolino, W.; Martinez-Delgado, D.; Perez-Torres, M. A.; Siffert, B. B.; Calvao, M. O.; Sako, M.; Kessler, R.; Alvarez-Candal, A.; **De Pra, M.**; Roig, F.; Lazzaro, D.; Gorosabel, J.; Lopes de Oliveira, R.; Lima-Neto, G. B.; Irwin, J.; Liu, J. F.; Alvarez, E.; Balmes, I.; Chueca, S.; Costa-Duarte, M. V.; da Costa, A. A.; Dantas, M. L. L.; Diaz, A. Y.; Fabregat, J.; Ferrari, F.; Gavela, B.; Gracia, S. G.; Gruel, N.; Gutierrez, J. L. L.; Guzman, R.; Hernandez-Fernandez, J. D.; Herranz, D.; Hurtado-Gil, L.; Jablonsky, F.; Laporte, R.; Le Tiran, L. L.; Licandro, J.; Lima, M.; Martin, E.; Martinez, V.; Montero, J. J. C.; Penteado, P.; Pereira, C. B.; Peris, V.; Quilis, V.; Sanchez-Portal, M.; Soja, A. C.; Solano, E.; Torra, J.; Valdivielso, L.

Abstract: The Javalambre-Physics of the Accelerated Universe Astrophysical Survey (J-PAS) is a narrow band, very wide field Cosmological Survey to be carried out from the Javalambre Observatory in Spain with a purpose-built, dedicated 2.5m telescope and a 4.7 sq.deg. camera with 1.2Gpix. Starting in late 2015, J-PAS will observe 8500sq.deg. of Northern Sky and measure 0.003(1+z) photo-z for 9×10^7 LRG and ELG galaxies plus several million QSOs, sampling an effective volume of ~ 14 Gpc³ up to $z=1.3$ and becoming the first radial BAO experiment to reach Stage IV. J-PAS will detect 7×10^5 galaxy clusters and groups, setting

constrains on Dark Energy which rival those obtained from its BAO measurements. Thanks to the superb characteristics of the site (seeing ~ 0.7 arcsec), J-PAS is expected to obtain a deep, sub-arcsec image of the Northern sky, which combined with its unique photo-z precision will produce one of the most powerful cosmological lensing surveys before the arrival of Euclid. J-PAS unprecedented spectral time domain information will enable a self-contained SN survey that, without the need for external spectroscopic follow-up, will detect, classify and measure $\sigma_z \sim 0.5\%$ redshifts for ~ 4000 SNeIa and ~ 900 core-collapse SNe. The key to the J-PAS potential is its innovative approach: a contiguous system of 54 filters with 145\AA width, placed 100\AA apart over a multi-degree FoV is a powerful "redshift machine", with the survey speed of a 4000 multiplexing low resolution spectrograph, but many times cheaper and much faster to build. The J-PAS camera is equivalent to a 4.7 sq.deg. "IFU" and it will produce a time-resolved, 3D image of the Northern Sky with a very wide range of Astrophysical applications in Galaxy Evolution, the nearby Universe and the study of resolved stellar populations.

Publicado em: eprint arXiv:1403.5237

Data de Publicação: Março de 2014