



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

ESTUDO DE PEQUENAS BANDAS DE
ABSORÇÃO DE GELOS EM ESPECTROS DE
OBJETOS TRANSNETUNIANOS

ANA CAROLINA DE SOUZA FELICIANO

ORIENTADOR: DR. ALVARO AUGUSTO ALVAREZ
CANDAL

RIO DE JANEIRO - RJ
2016

ESTUDO DE PEQUENAS BANDAS DE ABSORÇÃO DE GELOS EM
ESPECTROS DE OBJETOS TRANSNETUNIANOS

Ana Carolina de Souza Feliciano

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

Orientador: Alvaro Augusto Alvarez Candal

Rio de Janeiro
Março de 2016

ESTUDO DE PEQUENAS BANDAS DE ABSORÇÃO DE GELOS EM
ESPECTROS DE OBJETOS TRANSNETUNIANOS

Ana Carolina de Souza Feliciano

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

Examinada por:

Prof. Dr. Alvaro Augusto Alvarez Candal,

Profa. Dra. Daniela Lazzaro,

Profa. Dra. Diana Paula Andrade,

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2016

de Souza Feliciano, Ana Carolina

Estudo de pequenas bandas de absorção de gelos em espectros de objetos transnetunianos /Ana Carolina de Souza Feliciano. – Rio de Janeiro: ON/MCTI, 2016.

XXII, 105 p.: il.; 29,7cm.

Orientador: Alvaro Augusto Alvarez Candal

Dissertação (mestrado) – ON/MCTI/Programa de Pós-graduação em Astronomia, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 50 – 55.

1. Objetos transnetunianos.
2. Espectroscopia.
3. Wavelets. I. , . II. Observatório Nacional/MCTI, Programa de Pós-graduação em Astronomia. III. Título.

*À minha avó: calma que ainda
tem o doutorado, não tenha
pressa em nos deixar!*

Agradecimentos

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

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

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, que financiou este trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Alvaro Alvarez-Candal, pelo suporte, paciência e dedicação dados ao longo de todo o período de desenvolvimento do trabalho.

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

Às Professoras Dra. Daniela Lazzaro e Dra. Ruth Bruno, pela inspiração e incentivo demonstrado em todos os momentos.

Aos meus colegas do Observatório Nacional, pelas diversas discussões ocorridas nas salas ou na copa, pela ajuda e apresentação de ferramentas, muitas delas utilizadas nesta Dissertação.

Aos amigos e familiares, que me apoiaram e encorajaram nas horas difíceis, em especial ao meu noivo, Gilberto.

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

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

ESTUDO DE PEQUENAS BANDAS DE ABSORÇÃO DE GELOS EM ESPECTROS DE OBJETOS TRANSNETUNIANOS

Ana Carolina de Souza Feliciano

Março/2016

Orientador: Alvaro Augusto Alvarez Candal

Programa: Astronomia

A região além de Netuno (região transnetuniana) abriga mais de 1900 objetos compostos por rochas e, que são considerados os objetos mais pristinos do Sistema Solar. Para analisar estes objetos a partir do solo, utilizamos a espectroscopia de reflexão na região do infravermelho próximo.

Neste trabalho, serão analisados 68 espectros de 50 objetos transnetunianos, buscando encontrar bandas de absorção dos gelos que estiveram presentes na época de formação do Sistema Solar e que poderiam nos contar a história de sua evolução. No entanto, estes espectros apresentam muito ruído e para melhor analisá-los, é necessário utilizar técnicas de filtragem que reduzam a maior quantidade possível de ruído e melhor represente as bandas de absorção destes espectros. A técnica que atendeu a esses requisitos foi a *wavelets* e após a filtragem de toda a amostra, comparamos os espectros limpos com os espectros obtidos a partir de constantes ópticas obtidas em laboratório para os gelos de água, metano e metanol para diversos tamanhos de partículas. Após as filtrações e comparações, uma análise da distribuição destes gelos na região transnetuniana foi realizada.

As *wavelets* se mostraram como uma ferramenta útil e que continuaremos a utilizar. Foram detectadas algumas absorções sob o nível do ruído, mas não em número suficiente como para estabelecer uma distribuição desses gelos no Sistema Solar exterior.

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

STUDY OF SMALL ICE ABSORPTION BANDS IN SPECTRA OBJECTS
TRANSNEPTUNIAN

Ana Carolina de Souza Feliciano

March/2016

Advisor: Alvaro Augusto Alvarez Candal

Department: Astronomy

The region beyond Neptune (transneptunian region) has more than 1900 objects composed of ices, which are considered the most pristine objects in the solar system. To analyze these objects from the ground, we utilize reflection spectroscopy in the near infrared region.

In this work we analyse 68 spectra of 50 transneptunian objects, trying to find absorption bands of the ices that were present at the time of formation of the solar system and that could tell us the story of its evolution. However, these spectra show a considerable amount of noise and to better analyze them we need to use filtering techniques to reduce the noise and better recover the absorption bands of these spectra. The technique that meets these requirements is the one using *Wavelets*. After filtering the whole sample we compare the cleaned spectra with spectra obtained from optical constants obtained in laboratory for water, methane and methanol ices for various particle sizes. After filtering and comparing a distribution analysis of ices in transneptunian region was performed.

The *wavelets* were a versatile tool that we will use in future work. We detected some features that were hidden by the noise, nevertheless not in a number that permits us to fully study the ices distribution in the outer solar system.

Sumário

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xxii
1 Introdução	1
1.1 A região transnetuniana	1
1.2 Grupos dinâmicos	3
1.3 Espectroscopia	5
1.4 Gelos na região transnetuniana	6
1.4.1 Água	6
1.4.2 Metano	7
1.4.3 Metanol	8
1.4.4 Nitrogênio	8
1.4.5 Amônia	9
2 Dados	11
2.1 SINFONI	11
2.2 Espectros	12
3 Metodologia	16
3.1 Técnicas de filtragem	16
3.1.1 Rebinning e Runing Box	16
3.1.2 Transformada de Fourier	19
3.1.3 Wavelets	21
3.2 Comparações	24
3.2.1 Água	25
3.2.2 Metano	26
3.2.3 Metanol	27
4 Resultados	31
4.1 Filtragem	31
4.2 Comparação com modelos de gelo	32

4.2.1	Gelo de Água	33
4.2.2	Gelo de Metano	38
4.2.3	Gelo de Metanol	39
4.3	Distribuição dos gelos	42
5	Conclusão e Considerações Finais	47
	Referências Bibliográficas	50
A	Espectros Filtrados	56
A.1	2060 Chiron	56
A.2	5145 Pholus	57
A.3	10199 Chariklo	58
A.4	15874 1996 TL ₆₆	59
A.5	19308 1996 TO ₆₆	60
A.6	26375 1999 DE ₉	61
A.7	28978 Ixion	62
A.8	32532 Thereus	63
A.9	38628 Huya	64
A.10	42355 Typhon	65
A.11	44594 1999 OX ₃	66
A.12	47171 1999 TC ₃₆	67
A.13	47932 2000 GN ₁₇₁	68
A.14	50000 Quaoar	69
A.15	52872 Okyrhoe	70
A.16	54598 Bienor	71
A.17	55565 2002 AW ₁₉₇	72
A.18	55576 Amycus	73
A.19	55637 2002 UX ₂₅	74
A.20	55638 2002 VE ₉₅	75
A.21	60558 Echeclus	76
A.22	73480 2002 PN ₃₄	77
A.23	83982 Crantor	78
A.24	90377 Sedna	79
A.25	90568 2004 GV ₉	80
A.26	90482 Orcus	81
A.27	95626 2002 GZ ₃₂	82
A.28	119951 2002 KX ₁₄	83
A.29	120061 2003 CO ₁	84
A.30	120132 2003 FY ₁₂₈	85

A.31 120348 2004 TY ₃₆₄	86
A.32 134340 Plutão	87
A.33 136108 Haumea	88
A.34 136199 Eris	89
A.35 144897 2004 UX ₁₀	90
A.36 145451 2005 RM ₄₃	91
A.37 145452 2005 RN ₄₃	92
A.38 145453 2005 RR ₄₃	93
A.39 174567 Varda	94
A.40 208996 2003 AZ ₈₄	95
A.41 229762 2007 UK ₁₂₆	96
A.42 250112 2002 KY ₁₄	97
A.43 281371 2008 FC ₇₆	98
A.44 307616 2003 QW ₉₀	99
A.45 309737 2008 SJ ₂₃₆	100
A.46 2003 UZ ₄₁₃	101
A.47 2007 UM ₁₂₆	102
A.48 2007 VH ₃₀₅	103
A.49 Caronte	104
A.50 Tritão	105

Lista de Figuras

1.1	Organização dinâmica da Região transnetuniana	4
1.2	Gelo de água amorfo (azul) <i>versus</i> cristalino (vermelho) calculado a partir de constantes ópticas para partículas de $20 \mu m$ de tamanho. . .	7
1.3	Espectro de reflectância para o gelo de metano CH_4 calculado para partículas de $20 \mu m$ de tamanho.	8
1.4	Espectro de reflectância teórico para o gelo de Metanol.	9
1.5	Espectro de reflectância teórico para o gelo de Nitrogênio (N_2) calculado para vários tamanhos de partículas no intervalo de interesse para a nossa amostra de TNOs. A profundidade da banda de absorção é de $\sim 0,01$, tornando muito difícil identificá-lo nos espectros dos TNOs.	10
2.1	Espectro normalizado de 134340 Plutão (em vermelho) e 136199 Eris (em azul). Analisando os espectros destes objetos, podemos perceber que a quantidade de ruído deles é baixa e algumas bandas de absorção associadas ao Metano podem ser identificadas. Para melhor visibilidade, o espectro de 136199 Eris foi deslocado arbitrariamente em 1 unidade para cima.	14
2.2	Espectro de 2060 Chiron (em azul) e 47932 2000 GN ₁₇₁ (em vermelho). O espectro de 2060 Chiron não possui bandas de absorção, por isso é considerado 'liso' enquanto o espectro de 47932 2000 GN ₁₇₁ apresenta bastante ruído, pouco sinal e não nos permite visualizar com clareza a presença de alguma banda de absorção. Para melhor visibilidade, o espectro de Chiron foi deslocado arbitrariamente em 1 unidade para cima.	15
3.1	Espectro do possível TNO capturado Tritão sem nenhum tratamento em vermelho, com Rebinng em azul e, em verde, com Runing Box. A região entre as barras pretas é a região do espectro onde a atmosfera terrestre mais interfere, por isso ela não é levada em consideração no momento de avaliar o resultado da técnica. Os espectros foram deslocados em 0,1 unidade em fluxo para melhor visualização.	17

3.2	Zoom de um intervalo aleatório entre 1,64 e 1,68 μm de Tritão, sem alteração nas cores da legenda.	18
3.3	Espectro do Centauro 2002 KY ₁₄ sem nenhum tratamento em vermelho, com Rebinng em azul e, em verde, com Runing Box. A região entre as barras pretas é a região do espectro onde a atmosfera terrestre mais interfere, por isso ela não é levada em consideração no momento de avaliar o resultado da técnica. Os espectros foram deslocados em 0,2 unidades em fluxo para melhor visualização.	18
3.4	Zoom de um intervalo aleatório entre 1,76 e 1,78 μm de 2002 KY ₁₄ sem alteração nas cores da legenda.	19
3.5	Espectro de Tritão sem tratamento, em azul, e filtrado com a transformada de Fourier, em vermelho. Mostramos em verde a diferença entre o espectro original e o filtrado.	20
3.6	Zoom do intervalo mostrado na figura 3.2 agora com a aplicação da Transformada de Fourier. Não houve alteração nas cores da legenda.	20
3.7	Espectro de 2002 KY ₁₄ sem tratamento, em azul, e filtrado com a transformada de Fourier, em vermelho. Mostramos em verde a diferença entre o espectro original e o filtrado.	21
3.8	Tipos de Wavelets: a) Haar b) Daubechies c) Bior1.3 d) Coiflet e) Morlet f) Mexican Hat g) Meyer h) Symlet (Kim, 2013).	22
3.9	Forma da Wavelet escolhida para filtrar os espectros da nossa amostra. Fonte: http://wavelets.pybytes.com/wavelet/coif4/	22
3.10	Espectro de Tritão sem tratamento em azul, filtrado na <i>wavelet coiflet</i> 4 escalas de 1 a 10 em vermelho, sendo o primeiro gráfico na escala 1 e o último na escala 10. Como este espectro possui uma boa relação sinal ruído, pouca diferença é notada entre os resultados das diversas escalas.	23
3.11	Espectro de Tritão sem tratamento em azul, filtrado na Wavelet Coiflet 4 escala 5 em vermelho e a diferença entre o espectro original e filtrado é mostrado em verde.	23

- 3.12 O espectro de 136108 Hamuea é mostrado em vermelho. Este espectro possui uma boa relação sinal ruído e através da aplicação da *Wavelet Coiflet 4* na escala 6, foi possível reconhecer as bandas de absorção do gelo de água (mostrado em azul) nos comprimentos de onda de 1,65 e 2 μm , respectivamente. A rasa banda de absorção indicada pela seta pode ser uma assinatura de amônia hidratada, como observado no espectro de Caronte (figura 4.4). Em verde é mostrado o espectro do gelo de metanol que pode ser o causador da discrepância observada na região além de 2,3 μm entre o espectro deste TNO e o espectro de gelo de água. A região entre barras pretas é onde a atmosfera mais interage e por isso ela é desconsiderada nas análises. 27
- 3.13 O espectro do TNO 38628 Huya filtrado na *Wavelet Coiflet 4* na escala 7 é mostrado em vermelho e está sendo comparado com o espectro de gelo de água cristalina composto por partículas de 15 μm mostrado em azul. Em verde é mostrado o espectro de metanol. A região entre barras pretas é onde a atmosfera mais interage e por isso ela é desconsiderada nas análises. 28
- 3.14 O espectro de 134340 Plutão já filtrado na *Wavelet Coiflet 4* escala 5 é mostrado em vermelho e o espectro de metano para uma partícula de 40 μm é mostrado em azul. Este espectro é a soma de dois espectros obtidos em datas diferentes. A região entre as barras pretas foi desconsiderada pois é onde a atmosfera terrestre mais interfere no espectro. 28
- 3.15 O espectro de 120348 2004 TY₃₆₄ é mostrado em vermelho e em azul o espectro de metanol (CH_3OH). Apesar da quantidade de ruído, é possível notar que a forma do espectro do TNO é similar ao espectro de metanol. A região entre as barras pretas foi desconsiderada pois é onde a atmosfera terrestre mais interfere no espectro. 29
- 3.16 O espectro de 83982 Crantor é mostrado em vermelho e em verde o espectro de metanol (CH_3OH). Apesar da quantidade de ruído, é possível notar que a forma do espectro do TNO é similar ao espectro de metanol. Em azul, mostramos o espectro de gelo de água, que será abordado na seção 4.2.1. A região entre as barras pretas foi desconsiderada pois é onde a atmosfera terrestre mais interfere no espectro. 30

4.1	O espectro filtrado do TNO 50000 Quaoar é mostrado na cor vermelha e é comparado com o espectro modelado de gelo de água mostrado em azul. A região entre barras pretas é a parte do espectro onde a atmosfera mais interage, por isso ela pode ser desconsiderada.	34
4.2	O espectro filtrado do TNO 145453 2005 RR ₄₃ é mostrado na cor vermelha e é comparado com o espectro modelado de gelo de água mostrado em azul. A região entre barras pretas é a parte do espectro onde a atmosfera mais interage, por isso ela pode ser desconsiderada.	34
4.3	O espectro filtrado do TNO 19308 1996 TO ₆₆ é mostrado na cor vermelha e é comparado com o espectro modelado de gelo de água mostrado em azul. A região entre barras pretas é a parte do espectro onde a atmosfera mais interage, por isso ela pode ser desconsiderada.	35
4.4	O espectro filtrado de Caronte é mostrado na cor vermelha e é comparado com o espectro modelado de gelo de água mostrado em azul. A região entre barras pretas é a parte do espectro onde a atmosfera mais interage, por isso ela pode ser desconsiderada. Este espectro também apresenta na região próxima a 2.23 μm uma pequena banda de absorção que é associada à amônia hidratada em sua composição superficial. Esta banda está indicada pela seta na figura.	36
4.5	O espectro filtrado do TNO 90482 Orcus é mostrado na cor vermelha e é comparado com o espectro modelado de gelo de água mostrado em azul. A região entre barras pretas é a parte do espectro onde a atmosfera mais interage, por isso ela pode ser desconsiderada. Este espectro também apresenta possíveis indícios de possuir metanol em sua composição superficial, por isso o espectro de metanol é mostrado em verde.	37
4.6	O espectro filtrado do TNO 120061 2003 CO ₁ é mostrado na cor vermelha e é comparado com o espectro de gelo de água mostrado em azul. A região entre barras pretas é a parte do espectro onde a atmosfera mais interage, por isso ela pode ser desconsiderada.	37
4.7	O espectro filtrado do TNO 5145 Pholus é mostrado na cor vermelha e é comparado com o espectro de gelo de água mostrado em azul. Em verde é mostrado o espectro de metanol, que será discutido na seção 4.2.3. A região entre barras pretas é a parte do espectro onde a atmosfera mais interage, por isso ela pode ser desconsiderada.	38
4.8	O espectro filtrado do TNO 136199 Eris é mostrado na cor vermelha e é comparado com o espectro de gelo de metano mostrado em azul. A região entre barras pretas é a parte do espectro onde a atmosfera mais interage, por isso ela pode ser desconsiderada.	39

4.9	O espectro filtrado de Tritão é mostrado na cor vermelha e é comparado com o espectro de gelo de metano mostrado em azul. A região entre barras pretas é a parte do espectro onde a atmosfera mais interage, por isso ela pode ser desconsiderada.	40
4.10	O espectro filtrado do TNO 55637 2002 UX ₂₅ é mostrado na cor vermelha e é comparado com o espectro do gelo de metanol mostrado em azul. A região entre barras pretas é a parte do espectro onde a atmosfera mais interage, por isso ela pode ser desconsiderada.	41
4.11	O espectro filtrado do TNO 307616 2003 QW ₉₀ é mostrado na cor vermelha e é comparado com o espectro do gelo de metanol mostrado em azul. A região entre barras pretas é a parte do espectro onde a atmosfera mais interage, por isso ela pode ser desconsiderada.	42
4.12	Círculos, referem-se a objetos com menos de 500 km de diâmetro e quadrados, aos objetos com mais de 500 km de diâmetro. O preenchimento branco foi atribuído aos objetos que não apresentaram estruturas compatíveis com os gelos comparados; vermelho aos objetos com gelo de metano; azul aos objetos com gelo de metanol; roxo aos objetos com gelo de água e em preto os objetos que possuem gelo de água e gelo de metanol.	43
4.13	Idem à figura 4.12.	44
4.14	Legenda: círculos, referem-se a objetos com menos de 500 km de diâmetro e quadrados, aos objetos com mais de 500 km de diâmetro. O preenchimento vermelho foi atribuído aos objetos com gelo de metano; azul aos objetos com gelo de metanol; roxo aos objetos com gelo de água e em preto os objetos que possuem gelo de água e gelo de metanol.	45
4.15	Idem à figura 4.14.	45
A.1	Espectro do centauro 2060 Chiron (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 10</i>	56
A.2	Espectro do centauro 5145 Pholus (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 9</i>	57

A.3	Espectro do centauro 10199 Chariklo (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 6</i> . Este espectro é a soma de dois espectros do mesmo objeto obtidos em datas diferentes com o objetivo de reduzir a quantidade de ruído.	58
A.4	Espectro do TNO espalhado 15874 1996TL ₆₆ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 7</i> , de acordo com o critério de escolha adotado neste trabalho. Este espectro é a soma de dois espectros do mesmo objeto obtidos em datas diferentes com o objetivo de reduzir a quantidade de ruído.	59
A.5	Espectro do TNO clássico 19308 1996 TO ₆₆ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 8</i>	60
A.6	Espectro do TNO ressonante 26375 1999 DE ₉ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 10</i> . Este espectro é a soma de dois espectros do mesmo objeto obtidos em datas diferentes com o objetivo de reduzir a quantidade de ruído.	61
A.7	Espectro do TNO ressonante 28978 Ixion (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 7</i>	62
A.8	Espectro do centauro 32532 Thereus (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 10</i>	63
A.9	Espectro do TNO ressonante 38628 Huya (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 10</i>	64

A.10	Espectro do TNO espalhado 42355 Typhon (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 6</i> . Este espectro é a soma de dois espectros do mesmo objeto obtidos em datas diferentes com o objetivo de reduzir a quantidade de ruído.	65
A.11	Espectro do TNO espalhado 44594 1999 OX ₃ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 10</i>	66
A.12	Espectro do TNO ressonante 47171 1999 TC ₃₆ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 8</i>	67
A.13	Espectro do TNO ressonante 47932 2000 GN ₁₇₁ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 6</i> . Este espectro é a soma de dois espectros do mesmo objeto obtidos em datas diferentes com o objetivo de reduzir a quantidade de ruído.	68
A.14	Espectro do TNO clássico 50000 Quaoar (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 7</i>	69
A.15	Espectro do centauro 52872 Okyrhoe (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 6</i>	70
A.16	Espectro do centauro 54598 Bienor (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 7</i>	71
A.17	Espectro do TNO ressonante 55565 2002 AW ₁₉₇ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 8</i>	72

A.18 Espectro do centauro 55576 Amycus (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 7</i>	73
A.19 Espectro do TNO clássico 55367 2002 UX ₂₅ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 8</i>	74
A.20 Espectro do TNO ressonante 55638 2002 VE ₉₅ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 8</i> . Este espectro é a soma de dois espectros do mesmo objeto obtidos em datas diferentes com o objetivo de reduzir a quantidade de ruído.	75
A.21 Espectro do centauro 60558 Echeclus (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 10</i>	76
A.22 Espectro do TNO espalhado 73480 2002 PN ₃₄ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 6</i>	77
A.23 Espectro do centauro 83982 Crantor (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 10</i> . Este espectro é a soma de dois espectros do mesmo objeto obtidos em datas diferentes com o objetivo de reduzir a quantidade de ruído.	78
A.24 Espectro do TNO destacado 90377 Sedna (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 10</i> . Este espectro é a soma de três espectros do mesmo objeto obtidos em datas diferentes com o objetivo de reduzir a quantidade de ruído.	79
A.25 Espectro do TNO clássico 90568 2004 GV ₉ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 10</i>	80

A.26	Espectro do TNO ressonante 90482 Orcus (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 8</i> . Este espectro é a soma de dois espectros do mesmo objeto obtidos em datas diferentes com o objetivo de reduzir a quantidade de ruído.	81
A.27	Espectro do centauro 95626 2002 GZ ₃₂ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 6</i>	82
A.28	Espectro do TNO clássico 119951 2002 KX ₁₄ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 7</i>	83
A.29	Espectro do centauro 120061 2003 CO ₁ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 6</i>	84
A.30	Espectro do TNO destacado 120132 2003 FY ₁₂₈ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 7</i>	85
A.31	Espectro do TNO clássico 120348 2004 TY ₃₆₄ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 7</i>	86
A.32	Espectro do TNO ressonante 134340 Plutão (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 5</i> . Este espectro é a soma de dois espectros do mesmo objeto obtidos em datas diferentes com o objetivo de reduzir a quantidade de ruído.	87
A.33	Espectro do TNO 136108 Haumea (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 6</i>	88

A.34	Espectro do TNO destacado 136199 Eris (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 5</i> . Este espectro é a soma de dois espectros do mesmo objeto obtidos em datas diferentes com o objetivo de reduzir a quantidade de ruído.	89
A.35	Espectro do TNO clássico 144897 2004 UX ₁₀ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 10</i> . Este espectro é a soma de dois espectros do mesmo objeto obtidos em datas diferentes com o objetivo de reduzir a quantidade de ruído.	90
A.36	Espectro do TNO destacado 145451 2005 RM ₄₃ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 8</i>	91
A.37	Espectro do TNO clássico 145452 2005 RN ₄₃ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 7</i>	92
A.38	Espectro do TNO clássico 145453 2005 RR ₄₃ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 7</i>	93
A.39	Espectro do TNO clássico Varda (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 10</i>	94
A.40	Espectro do TNO clássico 136108 Haumea (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 8</i> . Este espectro é a soma de dois espectros do mesmo objeto obtidos em datas diferentes com o objetivo de reduzir a quantidade de ruído.	95
A.41	Espectro do TNO destacado 229762 2007 UK ₁₂₆ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 8</i>	96

A.42	Espectro do centauro 250112 2002 KY ₁₄ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 6</i>	97
A.43	Espectro do centauro 281371 2008FC ₇₆ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 9</i>	98
A.44	Espectro do TNO clássico 307616 2003 QW ₉₀ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 6</i>	99
A.45	Espectro do centauro 309737 2008 SJ ₂₃₆ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 7</i>	100
A.46	Espectro do TNO ressonante 2003 UZ ₄₁₃ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 6</i>	101
A.47	Espectro do centauro 2007 UM ₁₂₆ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 10</i>	102
A.48	Espectro do TNO destacado 2007 VH ₃₀₅ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 7</i>	103
A.49	Espectro de Caronte (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 7</i>	104
A.50	Espectro de Tritão (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na <i>Wavelet Coiflet 4 Escala 5</i>	105

Lista de Tabelas

2.1	TNOs da Amostra	13
4.1	Resultados da filtragem	32
5.1	Resultados das comparações	48

Capítulo 1

Introdução

1.1 A região transnetuniana

A descoberta de Plutão, embora inicialmente reconhecido como planeta, em 1930 por Tombaugh (1946), fomentou as idéias relativas a existência de objetos do Sistema Solar além da órbita de Netuno, em um momento em que nem o cinturão de Kuiper e nem a nuvem de Oort eram conhecidos (Barucci et al., 2008). Em 1949 K. Edgeworth (Edgeworth, 1949) e em 1951 G. Kuiper (Kuiper, 1951), postularam a existência de um disco de detritos além da órbita de Netuno, baseados na hipótese de que o material que estava nesta zona não tinha se unido para formar um planeta pois a escala de tempo de acreção naquela região era maior que a quantidade de material disponível, acarretando na formação de vários corpos menores ao invés de um único corpo com toda a massa disponível (Irwin et al., 1995).

Antes da descoberta observacional dos objetos pertencentes a esse disco de detritos, Julio Fernández (Fernández, 1980) mostrou que essa região poderia ser a fonte dos cometas de curto período, aqueles que possuem período menor que 200 anos. O modelo de Fernández envolve planetesimais em órbitas quase-circulares e em baixas inclinações, essa era a estrutura esperada da região além de Netuno. Esses objetos seriam restos do disco protoplanetário. Por causa disto as primeiras procuras por esses objetos foram concentradas em torno do plano da eclíptica. Diversas procuras foram feitas e, em 1992, o primeiro TNO (da sigla em inglês para *Trans Neptunian Object*) foi descoberto: 1992 QB₁ (Jewitt and Luu, 1993). Atualmente, esta população conta com mais de 1900 objetos conhecidos (Fonte: *Minor Planet Center*¹).

O estudo da composição superficial dos TNOs fornece informações essenciais sobre as condições iniciais do Sistema Solar a grandes distâncias do Sol. A região transnetuniana pode ser considerada um "sítio arqueológico", onde a natureza dos materiais de construção planetária pode ser examinada, pois quando os TNOs fo-

¹<http://www.minorplanetcenter.net/iau/mpc.html>

ram formados eles retiveram materiais voláteis como Metano (CH_4), Água (H_2O), Metanol (CH_3OH), dentre outros e não voláteis, tais como os silicatos (Barucci et al., 2008) que se formaram na nebulosa antes mesmo da formação do Sistema Solar. Ainda que o intemperismo espacial através da radiação solar, raios cósmicos, poeira interplanetária e as colisões possam ter afetado a camada superior da superfície desses objetos, os TNOs representam o material mais pristino disponível para investigação a partir da Terra. A análise das propriedades desses corpos de gelo como remanescentes dos planetesimais externos é essencial para a compreensão da formação e da evolução desta população. Além disso, o conhecimento da natureza da constituição de toda a população pode fornecer restrições sobre os processos que dominaram a evolução da nebulosa solar primordial, bem como de outros sistemas planetários (Barucci et al., 2008).

Devido ao baixo brilho aparente observado na Terra proveniente dos TNOs, a primeira técnica a ser utilizada para o estudo das suas propriedades superficiais foi a fotometria multibanda na faixa visível do espectro eletromagnético. Levantamentos fotométricos observaram vários objetos e revelaram uma diversidade de cores surpreendente pois esperava-se que a região transnetuniana fosse povoada apenas por objetos em órbitas quase circulares, sujeitas a baixa evolução colisional e por isso, deveriam ter uma pequena dispersão na distribuição de cores. Várias análises estatísticas foram aplicadas e uma vasta gama de possíveis correlações entre as cores no óptico, parâmetros físicos e orbitais foram investigadas (Doressoundiram et al., 2008; Tegler et al., 2008). Esta técnica também pode fornecer restrições para a composição superficial da população como, por exemplo, as cores, que podem ser influenciadas não só pela composição mas também pelos efeitos dispersivos nos regolitos e pela geometria de observação. Portanto, a fotometria pode nos dar informações valiosas sobre os TNOs, todavia limitadas. Para conhecer a composição superficial da população, temos de usar técnicas de observações espectroscópicas e por isto, essa será a técnica utilizada neste trabalho e será abordada ainda neste capítulo.

Através da espectroscopia de reflexão é possível estudar os espectros dos materiais presentes nas superfícies dos TNOs, a forma em que se encontram e de que forma essa análise nos ajuda a entender o cenário de acreção através do qual o Sistema Solar foi formado. No entanto, estudar essa região não é trivial. Como os TNOs refletem a luz que é emitida pelo Sol, cujo fluxo cai com o inverso do quadrado da distância, e eles estão situados na fronteira do Sistema Solar, a radiação que chega até eles é pouca e a quantidade de brilho que observamos na Terra proveniente deles também é pois a radiação refletida por eles também decai com o quadrado da distância, por esta razão, o brilho aparente dos TNOs é muito fraco. Desta forma, os espectros obtidos pelos maiores telescópios terrestres apresentam, em geral, baixa relação sinal ruído e acabam por não permitir a identificação de algumas bandas

de absorção, tornando necessária a aplicação de técnicas de filtragem para serem devidamente analisados.

Com isto em mente, nós propomos neste trabalho a aplicação de algumas técnicas de filtragem para tentar reduzir a quantidade de ruído em todo o espectro, principalmente na região além de $2 \mu m$. As técnicas escolhidas foram o *Rebinning*, *Runing Box*, a Transformada de *Fourier* e as *Wavelets*. No entanto ficou claro a partir dos testes realizados que a aplicação das três primeiras técnicas não produziram resultados satisfatórios. Por esta razão optamos por trabalhar apenas com a técnica das *Wavelets*, que será abordada em detalhe no Capítulo 3.

Os TNOs possuem ampla variedade dinâmica, dispendo de objetos com altas e baixas excentricidades e inclinações, inseridos em ressonâncias e orbitando a região entre os planetas gigantes. Por isto eles foram divididos em grupos com características dinâmicas semelhantes para serem estudados com mais detalhes. Devido a perturbações, encontros próximos, colisões ou migrações a configuração atual da região transnetuniana pode não ser a primordial e analisar estes grupos atualmente pode nos auxiliar a compreender a evolução dinâmica da parte externa do Sistema Solar. Na próxima seção (1.2) utilizamos a classificação feita por Gladman et al. (2008) para analisar a região transnetuniana dinamicamente.

1.2 Grupos dinâmicos

A população de objetos transnetunianos está dividida em grupos dinâmicos, de acordo com suas características orbitais. A partir da classificação de Gladman et al. (2008) os TNOs podem ser separados em cinco grupos (Figura 1.1): I) objetos clássicos; II) objetos ressonantes; III) objetos dispersados; IV) objetos destacados e V) Centauros.

I) Objetos clássicos: não estão situados em nenhuma ressonância de movimentos médios com Netuno, possuem baixas excentricidades e, em sua maioria, possuem semieixo maior entre 42 e 48 UA. Estes objetos possuem uma grande distribuição de inclinação e são subdivididos em duas classes: o cinturão clássico quente (aqueles que possuem um amplo intervalo de inclinação) e o cinturão clássico frio (aqueles que estão situados em um intervalo de baixas inclinações).

II) Objetos ressonantes: são os TNOs que estão capturados em alguma ressonância de movimento médio com Netuno. Os TNOs capturados na ressonância 3:2 com Netuno, por exemplo, são chamados de Plutinos, devido a presença de Plutão nesta ressonância.

II) Objetos dispersados ou espalhados: são os TNOs que vivenciaram encontros próximos com Netuno resultando em uma variação do semieixo principal em mais de 1.5 UA.

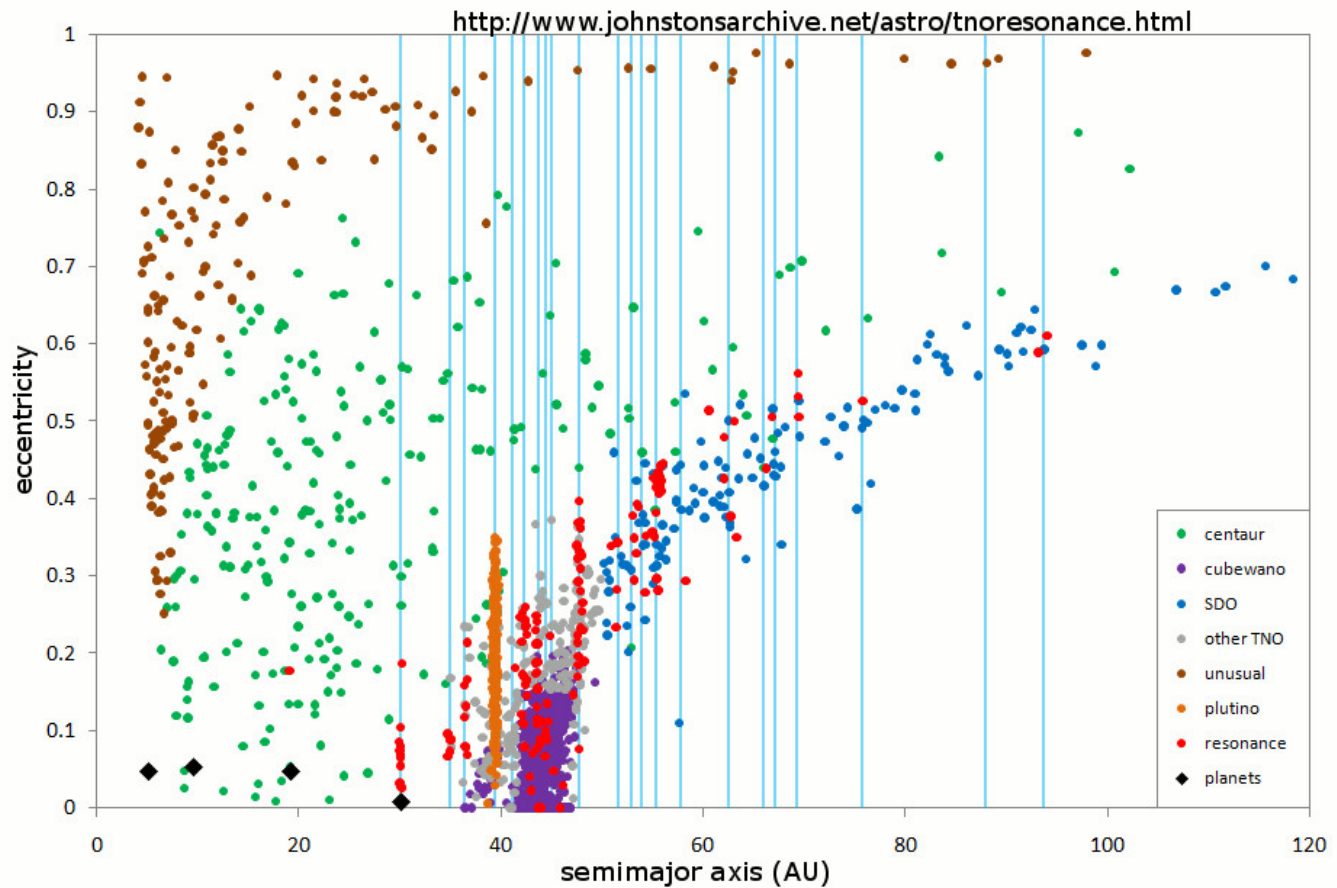


Figura 1.1: Gráfico de semi-eixo maior *versus* excentricidade para os TNOs. Os planetas da região externa do Sistema Solar são mostrados em losangos pretos; os pontos verdes representam os Centauros; os objetos Clássicos (ou cubewanos) são representados por pontos lilás; os Plutinos aparecem na cor laranja e os demais TNOs em ressonância aparecem em vermelho. Em azul são representados os objetos espalhados e nas cores cinza e marrom claro, os TNOs ainda não classificados. As linhas em ciano representam as localizações das ressonâncias de movimento médio com Netuno. Fonte: <http://www.johnstonsarchive.net/astro/tnos.html>

IV) Objetos destacados: são aqueles com órbitas muito excêntrica ($e > 0.24$) e com semieixo maior depois da ressonância de movimento médio 2:1 com Netuno.

V) Centauros: são objetos que provavelmente tiveram a sua origem na região transnetuniana mas que devido a algum tipo de perturbação ou colisão foram ejetados de lá para a região entre os planetas gigantes. Atualmente estes objetos são aqueles com órbitas instáveis entre Júpiter e Netuno. No restante do texto, chamaremos genericamente de TNOs a todos os objetos da região transnetuniana, inclusive os centauros e Tritão.

Para estudar essa variedade de objetos transnetunianos, utilizaremos a técnica de espectroscopia. Através das observações espectroscópicas disponíveis na literatura, diferentes comportamentos espectrais têm sido observados nos TNOs, eles vão de

espectros 'lisos'² a espectros ricos em assinaturas de gelos, principalmente H_2O , CH_4 , CH_3OH e N_2 (Barucci et al., 2008).

1.3 Espectroscopia

A espectroscopia é o estudo da interação da luz com a matéria e de sua intensidade como uma função do comprimento de onda na qual foi emitida, refletida ou espalhada a partir de um sólido, líquido ou gás. Quando um feixe de fótons encontra um mineral, alguns dos fótons são refletidos a partir da superfície do mineral, alguns deles atravessam a superfície e outros são absorvidos. Os fótons que são refletidos ou refratados pela superfície são chamados de espalhados. Estes fótons podem encontrar outra superfície ou ser espalhados novamente para longe, de modo que tornam-se detectáveis.

Os fótons podem ser absorvidos pelos minerais por vários processos. A variedade de processos de absorção e sua dependência com o comprimento de onda nos permite deduzir informações sobre a química de um mineral a partir de sua luz refletida. Um dos principais métodos para detectar gelos nos objetos transnetunianos é através do estudo da luz refletida do Sol pela superfície do corpo em estudo (espectroscopia de reflectância) (Mastrapa et al., 2013). As moléculas que compõem os gelos nos objetos em estudo absorvem a luz que foi emitida pelo Sol em comprimentos de ondas específicos, por isso, a espectroscopia de reflectância no infravermelho próximo pode ser utilizada para detectar o grupo funcional das moléculas que compõem as superfícies dos TNOs.

A janela espectral presente entre 0,4 e 2,5 μm é a mais sensível disponível a partir do solo para caracterizar as principais fases dos minerais e gelos presentes nos TNOs, pois, a partir de 2,5 μm , os componentes da nossa atmosfera absorvem quase toda radiação eletromagnética que chega até ela. Características espectrais diagnósticas de silicatos, hidrocarbonetos, feldspatos, orgânicos e minerais contendo água estão presentes nas regiões espectrais do visível e do infravermelho próximo (NIR, do inglês *Near Infrared*)(Barucci et al., 2008).

Contudo a maioria dos TNOs conhecidos são demasiadamente fracos para serem analisados espectroscopicamente, mesmo com os maiores telescópios do mundo. Por isso apenas os corpos mais brilhantes são selecionados como alvos de observação. Ainda assim, os tempos de exposição necessários são geralmente longos, podendo variar de 1 a quase 3 horas (vide Barucci et al., 2011). Através da espectroscopia, faremos o estudo dos gelos que provavelmente compõem os TNOs e a sua distribuição na parte externa do Sistema Solar.

²Sem estruturas relacionadas com absorção ou emissão.

1.4 Gelos na região transnetuniana

No ramo das Ciências Planetárias, os gelos são tidos como qualquer material volátil que está no estado sólido, como gelo de água, gelo de metano entre outros.

Os principais elementos que estavam presentes na formação do Sistema Solar foram: hidrogênio (H), nitrogênio (N), carbono (C) e oxigênio (O)³. Outros elementos também estavam presentes, como hélio (He) e neônio (Ne), porém eles não interagiram pois são gases nobres. Quando os CHON foram combinados quimicamente, eles produziram moléculas com baixas temperaturas de condensação (voláteis) sendo a molécula de H_2O o mais refratário⁴ desses. Sob determinadas condições induzidas pela presença do H_2 algumas moléculas são esperadas, tais como: CH_4, H_2O, NH_3, CO ou N_2 . Em menores quantidades são esperadas: $CH_3OH, HCN, HCNO$, etc. Primeiramente, todos esses voláteis condensaram em proporções que variaram de acordo com a temperatura e a energia de interação molecular, e por último, formaram os gelos que constituem os corpos do Sistema Solar externo (Clark et al., 2013).

Os gelos nas superfícies dos TNOs podem existir nas formas cristalinas ou amorfas⁵, com cada gelo possuindo geralmente uma variedade de fases para ambos os casos. A ocorrência de uma fase em particular depende das condições de formação, principalmente da temperatura e do estado inicial (gasoso ou líquido), subsequentemente das evoluções térmica e irradiativa (Mastrapa et al., 2013). Contudo, os gelos nas superfícies dos TNOs não aparecem necessariamente puros; eles podem conter outros gelos ou impurezas. Essas misturas podem existir em muitas formas, dando origem a estruturas comuns (como gelos de água, metano, nitrogênio) ou até mesmo as que são raramente identificadas nos corpos da parte externa do Sistema Solar. Como cada gelo possui peculiaridades, a seguir falaremos de alguns gelos que serão mencionados no restante do trabalho.

1.4.1 Água

O gelo d'água (H_2O) pode ser encontrado nas superfícies planetárias do Sistema Solar, nas formas cristalina ou amorfa (Hobbs, 1974). Abaixo de $\sim 135K$, espera-se que o gelo amorfo condense a partir da fase de vapor se a taxa de crescimento for lenta. A diferença espectral entre os tipos cristalino e amorfo são mostradas nos espectros da figura 1.2, onde utilizamos as constantes ópticas disponibilizadas no

³Muitas vezes citados como CHON.

⁴Material que resiste ao calor ou elementos/compostos com ponto de fusão ou dissociação à altas temperaturas que permanecem em formações mesmo após o aquecimento.

⁵Os sólidos se classificam em dois grandes grupos: cristalinos, se têm ordenação interna uniforme, e não-cristalinos ou amorfos, quando sua estrutura interior se assemelha mais a dos líquidos, carente de uma rede de cristalização (vide capítulo 6 de De Pater and Lissauer, 2001).

trabalho de Grundy and Schmitt (1998) para calcular os espectros de reflectância em diversos tamanhos de partículas. No gelo amorfo as bandas de absorção são mais deslocadas para comprimentos de onda menores e a banda em $1,65 \mu m$ é muito fraca.

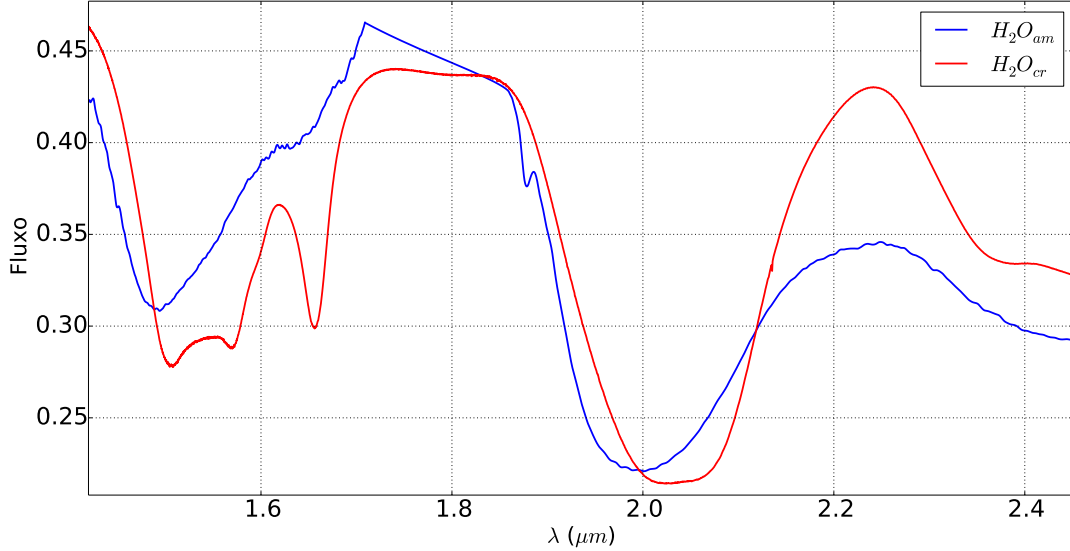


Figura 1.2: Gelo de água amorfo (azul) *versus* cristalino (vermelho) calculado a partir de constantes ópticas para partículas de $20 \mu m$ de tamanho.

1.4.2 Metano

O metano (CH_4) merece atenção especial por ser o menor e mais simples alcano, bem como ser o hidrocarboneto mais observado como um gelo em corpos do Sistema Solar (Clark et al., 2013). A dependência do seu espectro com a temperatura no intervalo entre $0,7$ e $5 \mu m$ revelou mudanças sutis. Essas mudanças oferecem um potencial para o sensoriamento remoto da temperatura do gelo de CH_4 na superfície dos TNOs (Grundy et al., 2002). Quando as moléculas estão misturadas, elas exibem um comportamento espectral diferente, neste caso, sempre que as moléculas de CH_4 estão dispersas no gelo de Nitrogênio (N_2) elas apresentam um deslocamento sutil no comprimento de onda para o azul (Quirico and Schmitt, 1997). Esta propriedade permite distinguir remotamente o CH_4 puro tão bem quanto possibilita detectar pequenas quantidades de gelo de N_2 que são difíceis de serem identificadas através da fraca absorção apresentada em $\sim 2,16 \mu m$. Na figura 1.3, mostramos o espectro de reflectância de metano no NIR calculado para partículas de $20 \mu m$ de tamanho a partir das constantes ópticas disponibilizadas no trabalho de Schmitt et al. (1998).

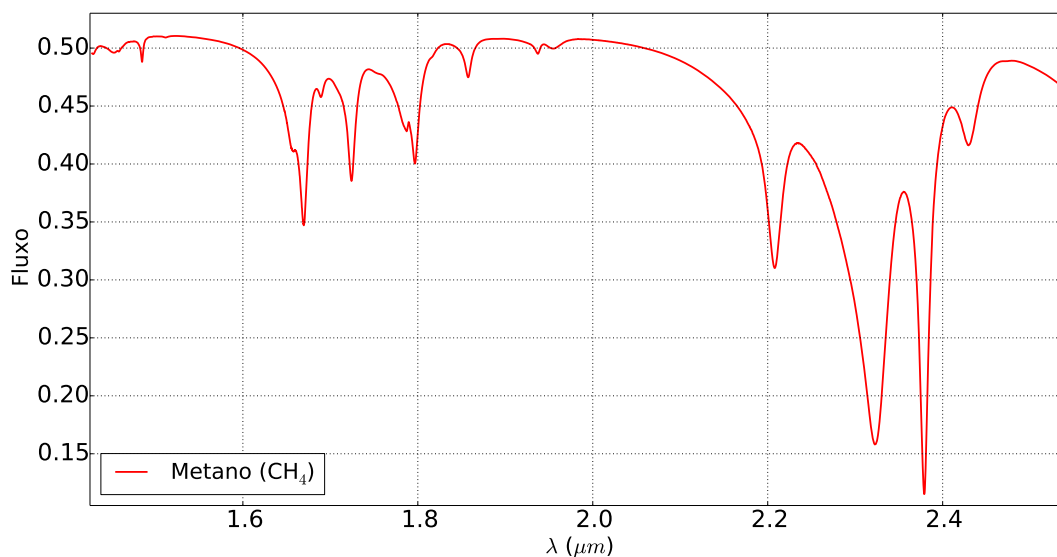


Figura 1.3: Espectro de reflectância para o gelo de metano CH_4 calculado para partículas de $20 \mu m$ de tamanho.

1.4.3 Metanol

O Metanol (CH_3OH) é mais volátil do que o H_2O e foi relatado na superfície de alguns TNOs. Considerando que a superfície de um TNO é formada por grãos de gelo, essa molécula poderia se formar de 2 maneiras: nas superfícies dos grãos de poeira cobertas primeiramente por gelo através da hidrogenação do CO em nuvens interestelares escuras (Garrod and Pauly, 2011), ou dos elétrons liberados quando ocorre uma mistura entre os gelos $H_2O - CH_4$ (Wada et al., 2006), seguido por uma rápida reação íon-molecular ou reação de inserção: $CH_2 + H_2O$. A confirmação da presença do gelo de CH_3OH na superfície de objetos dinamicamente diferentes poderiam nos dar restrições claras sobre os processos evolutivos que atuaram na formação do Sistema Solar (Merlin et al., 2012). Na figura 1.4, mostramos o espectro de reflectância do metanol no NIR.

1.4.4 Nitrogênio

Nas condições normais de temperatura e pressão do Sistema Solar externo, o nitrogênio (N_2) costuma aparecer de maneiras distintas, podendo ser encontrados nos TNOs nas fases alfa (cúbica) e beta (hexagonal). O comprimento de onda no qual a absorção deste gelo ocorre é em $\sim 2,16 \mu m$ (vide figura 1.5). As bandas de Nitrogênio alfa são bem estreitas nos comprimentos de onda do NIR, como sua intensidade integrada é similar a do Nitrogênio beta, é muito difícil detectar o N_2 na fase alfa na superfície dos TNOs (de Bergh et al., 2013).

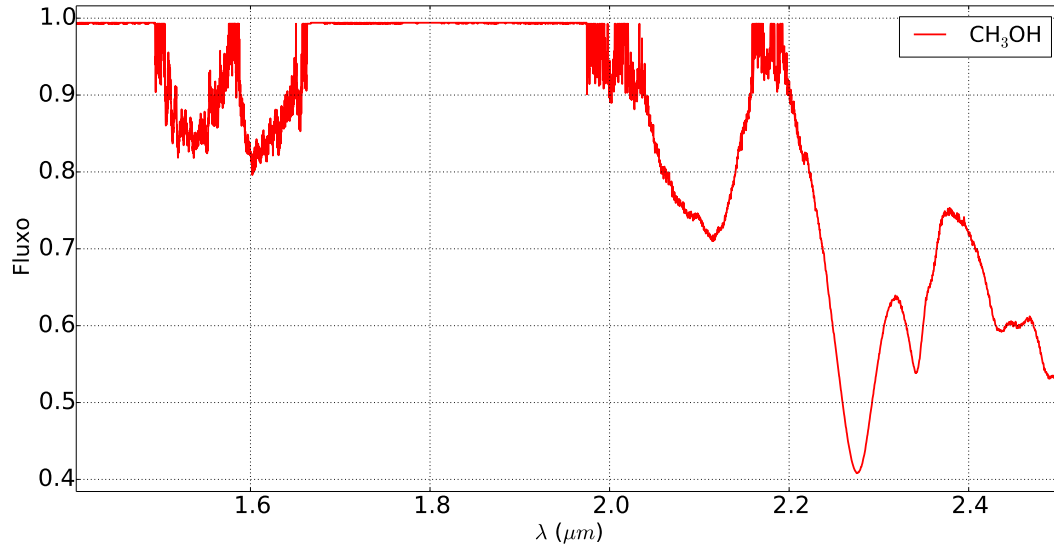


Figura 1.4: Espectro de reflectância teórico para o gelo de Metanol.

1.4.5 Amônia

A amônia pura (NH_3) ainda não foi detectada nos TNOs, no entanto ela pode estar presente nos TNOs no estado hidratado. Os gelos de NH_3 e H_2O são termicamente instáveis na presença um do outro e se combinam para formar NH_3 hidratado, dependendo da proporção relativa de cada um deles (de Bergh et al., 2013). Amônia hidratada inclui: $NH_3 \cdot H_2O$, $2NH_3 \cdot H_2O$ e $NH_3 \cdot 2H_2O$, todos os quais são compostos estequiométricos que têm pressões mais baixas no estado gasoso que no estado sólido para o NH_3 . Os espectros de laboratório para amônia hidratada diferem muito, devido a proporção utilizada por cada grupo; mesmo assim, a presença de amônia ou amônia hidratada no espectro de alguns objetos (Caronte, Orcus) têm sido sugerida (Barucci et al., 2010). A confirmação da presença de amônia nos TNOs teria implicações importantes sobre a composição da nebulosa solar primitiva, em regiões de baixa densidade mais afastadas do Sol.

Com o intuito de otimizar nosso trabalho, traçamos os principais objetivos para este mestrado:

- Reduzir a maior quantidade possível de ruído dos espectros da amostra de TNOs, que será apresentado no capítulo 2;
- Procurar a técnica que mais respeite as bandas de absorção nos espectros no NIR;
- Comparar os espectros da amostra com os espectros obtidos a partir de cons-

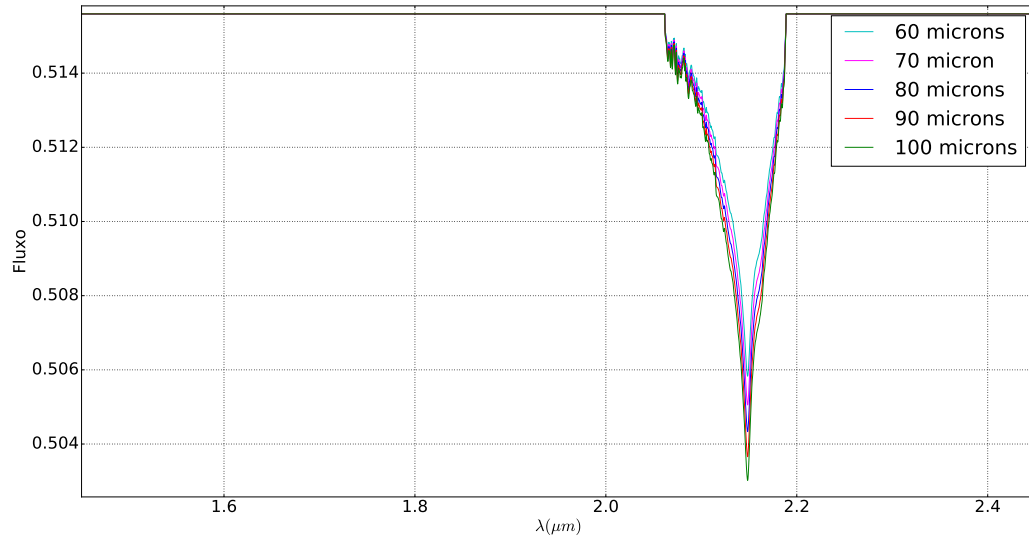


Figura 1.5: Espectro de reflectância teórico para o gelo de Nitrogênio (N_2) calculado para vários tamanhos de partículas no intervalo de interesse para a nossa amostra de TNOs. A profundidade da banda de absorção é de $\sim 0,01$, tornando muito difícil identificá-lo nos espectros dos TNOs.

tantes ópticas medidas em laboratório de alguns gelos de interesse astrofísico como metanol, metano e água;

- Estudar a possível distribuição desses gelos no Sistema Solar exterior.

Dando sequência a essa dissertação, no capítulo 2, apresentamos os dados que foram estudados durante o Mestrado e, no capítulo 3, as técnicas que foram utilizadas serão abordadas. No capítulo 4, mostramos os resultados e, para finalizar, no capítulo 5 mostramos as conclusões obtidas e fazemos as considerações finais. As referências utilizadas são mostradas no último capítulo.

Capítulo 2

Dados

A faixa espectral do infravermelho próximo, entre 1,4 e 2,5 μm é a região mais diagnóstica para determinar a presença de gelos a partir do solo. Assinaturas de gelo de água estão presentes em $\sim 1,5, 1,65$ e $2,0 \mu m$ e as assinaturas de outros gelos, incluindo os que são devidos ao CH_4 , em aproximadamente 1,5, 1,65, 1,7, 1,8, 2,2 e $2,3 \mu m$, CH_3OH a $2,27 \mu m$.

Os espectros do NIR no intervalo que abrange as bandas H e K (entre 1,4 e 2,4 μm) dos objetos transnetunianos que foram analisados neste mestrado foram obtidos entre 2007 e 2008, com o espectrógrafo SINFONI da unidade 4 do Very Large Telescope (PI: Dra. M.A. Barucci). A região do NIR é essencial para estudos de composição de superfície dos TNOs pois a maior parte dos gelos de interesse astrofísico apresentam assinaturas espectrais nela. No entanto, a análise e interpretação destes espectros é de difícil realização devido ao baixo brilho aparente da maior parte desses objetos.

2.1 SINFONI

O SINFONI (sigla em inglês para *Spectrograph for Integral Field Observations in the Near Infrared*) fornece um imageamento espectroscópico em 3D no intervalo espectral entre 1,05 e 2,45 μm , correspondente ao infravermelho próximo (NIR). Este instrumento é composto por uma combinação do módulo de óptica adaptativa desenvolvido pelo *European Southern Observatory* (ESO) com o espectrômetro de imagens no infravermelho para campos fracos, desenvolvido pelo Instituto Max Planck de Física extraterrestre (Eisenhauer et al., 2003).

SINFONI têm três ópticas dianteiras diferentes, que resultam em campos de visão (FoVs, do inglês *Field of Views*) de 8,0 segundos de arco \times 8,0 segundos de arco (doravante designados 8,0 segundos de arco), 3,2 segundos de arco \times 3,2 segundos de arco (doravante designados 3,2 segundos de arco) e 0,8 segundos de arco \times 0,8 segundos de arco (doravante designados 0,8 segundos de arco). Estas três ópticas

dianteiras têm píxeis espaciais (spaxels) de 0,125 segundos de arco \times 0,250 segundos de arco (escala spaxel de 250 mas), com 0,05 segundos de arco \times 0,10 segundos de arco (escala spaxel de 100 mas) e 0,0125 arcsec \times 0,0250 arcsec (escala spaxel de 25 mas), respectivamente. A óptica dianteira com um FoV de 0,8 segundos de arco permite observações com uma resolução espacial de cerca de 0,056 segundos de arco em um comprimento de onda de 2,2 μm (que é uma resolução limitada perto da difração), quando a óptica adaptativa (OA) é aplicada. O detector do SINFONI possui um CCD de 2048 \times 2048 pixels.

A luz incidente no campo de visão do SINFONI passa pela região pré-óptica, que têm três sub-áreas principais. Na primeira destas sub-áreas, a componente da luz que está relacionada com a emissão térmica de fundo é retirada. A segunda sub-área é uma roda de filtro motorizada que seleciona um dos quatro filtros disponíveis: J, H, K e H + K. Uma vez que o filtro H + K corresponde às bandas H e K em conjunto, uma maior cobertura espectral é proporcionada, no entanto, ocorre uma perda na resolução espectral. A terceira sub-área é composta pelas próprias ópticas dianteiras disponíveis (com FoVs de 8,0, 3,2 e 0,8 segundos de arco).

Depois de passar através da região pré-óptica, a luz é transferida para o 'fatiador de imagem'. Nesta região, a luz é dividida em várias partes por um grupo de 32 espelhos pequenos. Após esta divisão, a luz passa por um segundo grupo de espelhos grandes, onde todas as fatias são reconfiguradas de uma maneira que, no final do processo, todas elas ficam dispostas em um formato semelhante a uma fenda. A luz é então transferida para o colimador, onde é redirecionada para a região que contém as redes de difração (que geram os espectros). Por fim, a luz é transferida para o detector do instrumento, a partir de então, os dados devem ser reduzidos e a ciência desejada começa a ser realizada.

A resolução espacial utilizada nas observações apresentadas neste trabalho foi de 0,25 segundos de arco com um FoV correspondente a 8 segundos de arco na banda H+K (entre 1,4 e 2,4 μm) com uma resolução espectral de ~ 1500 ao longo de todo o espectro (resolução espectral: $\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$). Todo o trabalho realizado durante o mestrado foi iniciado com os dados já reduzidos e prontos para serem analisados.

2.2 Espectros

Ao todo, 68 espectros de 50 objetos do Cinturão de Kuiper foram analisados. Alguns objetos possuíam mais de um espectro, neste caso, unimo-os para que o sinal fosse ampliado. Segue abaixo a tabela com a numeração, nome e classificação dinâmica, como descrito anteriormente, dos TNOs da amostra.

Tabela 2.1: TNOs da Amostra

Número	Nome	Classificação
2060	Chiron	Centauro
5145	Pholus	Centauro
10199	Chariklo	Centauro
15874	1996 TL ₆₆	Espalhado
19308	1996 TO ₆₆	Clássico
26375	1999 DE ₉	Ressonante
28978	Ixion	Ressonante
32532	Thereus	Centauro
38628	Huya	Ressonante
42355	Typhon	Espalhado
44594	1999 OX ₃	Espalhado
47171	1999 TC ₃₆	Ressonante
47932	2000 GN ₁₇₁	Ressonante
50000	Quaoar	Clássico
52872	Okyrhoe	Centauro
54598	Bienor	Centauro
55565	2002 AW ₁₉₇	Clássico
55576	Amycus	Centauro
55637	2002 UX ₂₅	Clássico
55638	2002 VE ₉₅	Ressonante
60558	Echeclus	Centauro
73480	2002 PN ₃₄	Espalhado
83982	Crantor	Centauro
90377	Sedna	Destacado
90568	2004 GV ₉	Clássico

Continuação		
90482	Orcus	Ressonante
95626	2002 GZ ₃₂	Centauro
119951	2002 KX ₁₄	Clássico
120061	2003 CO ₁	Centauro
120132	2003 FY ₁₂₈	Destacado
120348	2004 TY ₃₆₄	Clássico
134340	Plutão	Ressonante
136108	Haumea	Clássico
136199	Eris	Destacado
144897	2004 UX ₁₀	Clássico
145451	2005 RM ₄₃	Destacado
145452	2005 RN ₄₃	Clássico
145453	2005 RR ₄₃	Clássico
174567	Varda	Clássico
208996	2003 AZ ₈₄	Ressonante
229762	2007 UK ₁₂₆	Destacado
250112	2002 KY ₁₄	Centauro
281371	2008 FC ₇₆	Centauro
307616	2003 QW ₉₀	Clássico
309737	2008 SJ ₂₃₆	Centauro
	2003 UZ ₄₁₃	Ressonante
	2007 UM ₁₂₆	Centauro
	2007 VH ₃₀₅	Centauro
	Caronte	Satélite
	Tritão ¹	Satélite

Realizando uma comparação visual dos espectros de alguns dos objetos da amostra (vide figuras 2.1 e 2.2), podemos notar algumas características. Os Centauros estão mais próximos do Sol, mas nem por isso seus espectros são mais nítidos (vide o espectro de 2060 Chiron, que possui $215,6 \pm 9,9$ km de diâmetro (Fornasier, S. et al., 2013), na figura 2.2) pois o tamanho dos centauros é pequeno quando comparado com o tamanho médio da população presente na região além de Netuno. 143340 Plutão e 47932 2000 GN₁₇₁ estão aproximadamente a mesma distância do Sol (ambos na ressonância 2:3 com Netuno) e seus espectros são bastante distintos. Como 134340 Plutão é aproximadamente 10 vezes maior que 47932 2000 GN₁₇₁, com 2374 km de diâmetro (Fonte: *New Horizons*), o espectro dele é menos ruidoso e apresenta várias bandas de absorção, que não são vistas em 47932 2000 GN₁₇₁, que possui apenas $147,1^{+20,7}_{-17,8}$ km de diâmetro (Mommert et al., 2012). Por sua vez, 136199 Eris faz parte dos TNOs destacados, com um semieixo maior de ~ 67 UA e tamanho similar ao de 134340 Plutão, com 2326 ± 12 km de diâmetro (Lellouch, E.

¹Acredita-se que Tritão teve sua origem na Região transnetuniana e que durante a evolução do Sistema Solar, ele foi capturado por Netuno.

et al., 2013) e apresenta um espectro mais nítido do que o de 2060 Chiron, que está a ~ 13 UA do Sol (vide figuras 2.1 e 2.2), todavia não tão bom quanto o de 134340 Plutão, que está a 39,6 UA do Sol.

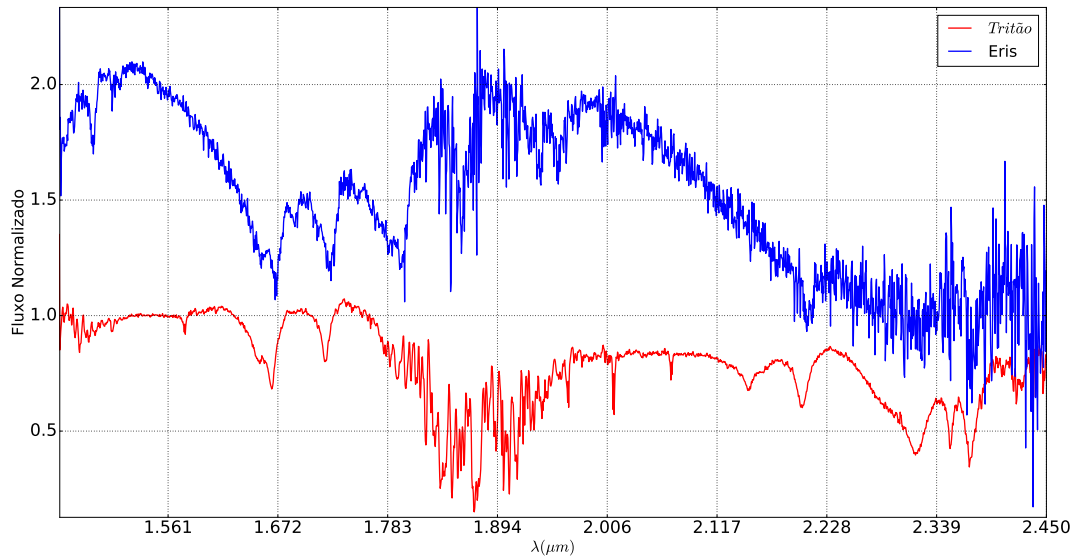


Figura 2.1: Espectro normalizado de 134340 Plutão (em vermelho) e 136199 Eris (em azul). Analisando os espectros destes objetos, podemos perceber que a quantidade de ruído deles é baixa e algumas bandas de absorção associadas ao Metano podem ser identificadas. Para melhor visibilidade, o espectro de 136199 Eris foi deslocado arbitrariamente em 1 unidade para cima.

A maior parte dos espectros analisados durante o mestrado são como mostrado na figura 2: possuem baixa relação sinal-ruído, tornando difícil identificar as assinaturas espectrais dos gelos que os compõem (todos os espectros encontram-se no Apêndice A) ou são 'lisos'. Por isso, antes de analisá-los precisamos reduzir ao máximo a quantidade de ruído. No capítulo 3, mostraremos como isto foi feito.

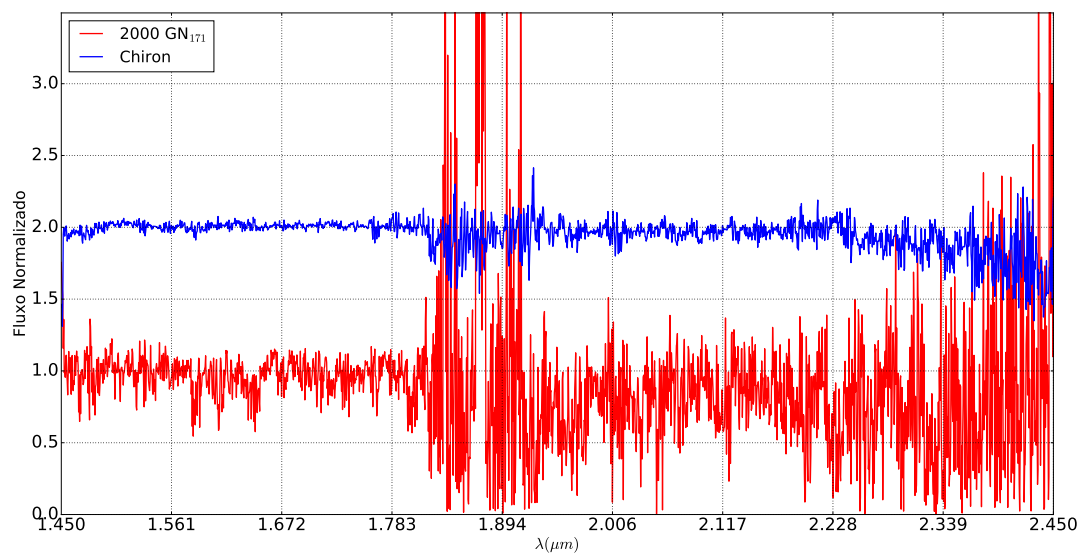


Figura 2.2: Espectro de 2060 Chiron (em azul) e 47932 2000 GN₁₇₁ (em vermelho). O espectro de 2060 Chiron não possui bandas de absorção, por isso é considerado 'liso' enquanto o espectro de 47932 2000 GN₁₇₁ apresenta bastante ruído, pouco sinal e não nos permite visualizar com clareza a presença de alguma banda de absorção. Para melhor visibilidade, o espectro de Chiron foi deslocado arbitrariamente em 1 unidade para cima.

Capítulo 3

Metodologia

Este capítulo está dividido em duas partes principais. Na primeira, abordamos as técnicas utilizadas neste trabalho para filtrar os espectros e explicamos porque escolhemos as *wavelets*, e na segunda falamos de como realizamos as comparações entre os espectros filtrados (utilizando as *wavelets*) e os espectros dos gelos de interesse astrofísico, mostrando inclusive alguns exemplos com os espectros dos objetos da nossa amostra.

Para analisar os espectros da amostra, testamos algumas técnicas de filtragem, como *Rebinning*, *Running Box*, Transformada de *Fourier* e *Wavelets*. A aplicação destas técnicas visa reduzir a maior quantidade possível de ruído do espectro, respeitando o máximo possível o sinal. Após filtrar o espectro, iniciaremos o processo de comparação do espectro filtrado com espectros gerados a partir de constantes ópticas obtidas em laboratório para os gelos que compõe os objetos da região transnetuniana a fim de inferir com maior confiabilidade a presença ou ausência destes minerais nos TNOs da nossa amostra. Não esperamos que os espectros da nossa amostra sejam totalmente similares aos espectros de comparação porque os espectros de comparação foram obtidos a partir de dados de laboratórios em condições que não são idênticas as condições nas quais os TNOs se encontram no espaço, da mesma forma como a superfície dos TNOs não é pura como a dos gelos de laboratório mas estão misturadas com outros minerais e produtos de intemperismo espacial.

3.1 Técnicas de filtragem

3.1.1 Rebinning e Running Box

O *Rebinning* do espectro consiste em selecionar intervalos (bins) em comprimento de onda com uma quantidade n de pontos e calcular a média neste intervalo. Assim o espectro original com N elementos é reduzido a uma dimensão N/n onde o ruído é menor e cada bin é adjacente ao anterior. Porém a resolução espectral é menor que

no espectro original. No *Runing box* também escolhemos um bin de dimensão n , mas neste caso, o cálculo das médias não necessariamente é feito em bins adjacentes e não superpostos. Por isso é necessário definir um 'passo'¹ para o cálculo das médias. Note-se que o *Rebinning* é um caso particular do *Runing box* quando o passo é igual ao tamanho do bin escolhido.

Como exemplo de um TNO de tamanho grande, apresentamos na figura 3.1 o espectro de Tritão. Esse objeto possui um raio de $1352,6 \pm 2,4$ km (vide capítulo 1 de De Pater and Lissauer, 2001) e está a ~ 30 UA do Sol, por isso seu espectro possui uma boa relação sinal-ruído, todavia, ainda há ruído nele.

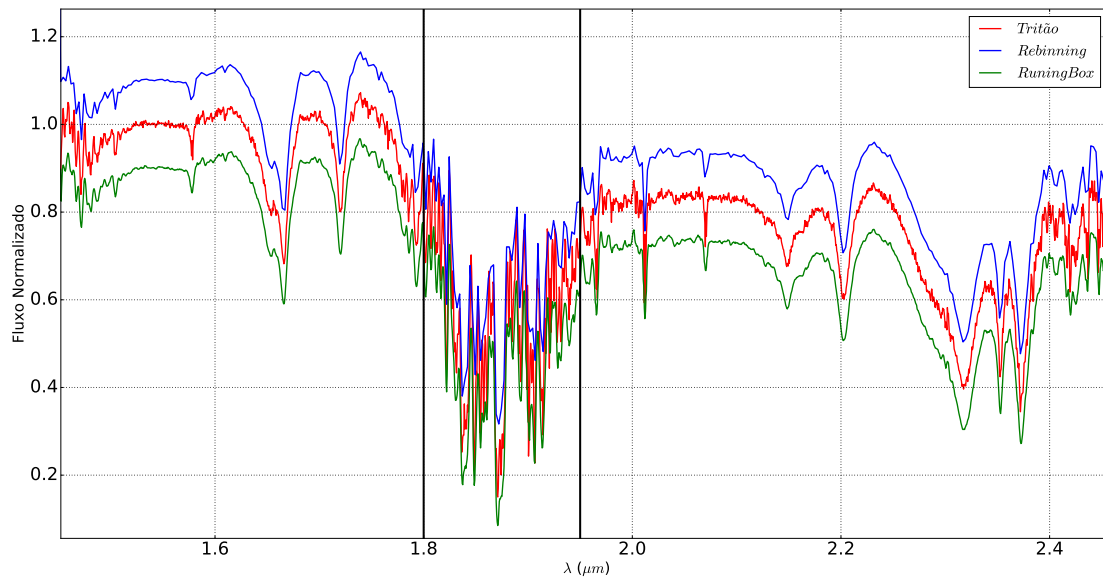


Figura 3.1: Espectro do possível TNO capturado Tritão sem nenhum tratamento em vermelho, com Rebinng em azul e, em verde, com Runing Box. A região entre as barras pretas é a região do espectro onde a atmosfera terrestre mais interfere, por isso ela não é levada em consideração no momento de avaliar o resultado da técnica. Os espectros foram deslocados em 0,1 unidade em fluxo para melhor visualização.

Ambas as técnicas diminuíram o ruído, no entanto, quando ampliamos o intervalo entre 1,6 e 1,7 μm , na figura 3.2, percebemos que nenhuma das técnicas preservou as propriedades do sinal na região próxima a 1,665 μm , como também alterou a forma e a posição da banda de absorção referente ao metano.

Ainda como exemplificação, aplicamos a mesma técnica para o espectro do centauro 250112 2002 KY₁₄ (figura 3.4), que pode ser considerado análogo a um TNO pequeno, ele possui um diâmetro de 47^{+3}_{-4} km (Duffard, R. et al., 2014) e orbita o Sol a aproximadamente 12,7 UA. O espectro não possui uma boa relação sinal-ruído.

Escolhendo uma região aleatória para ampliação do espectro (figura 3.4), podemos notar como as técnicas modificaram o espectro de maneira que poderiam

¹O passo refere-se a quantidade de pontos através do qual a caixa irá se deslocar.

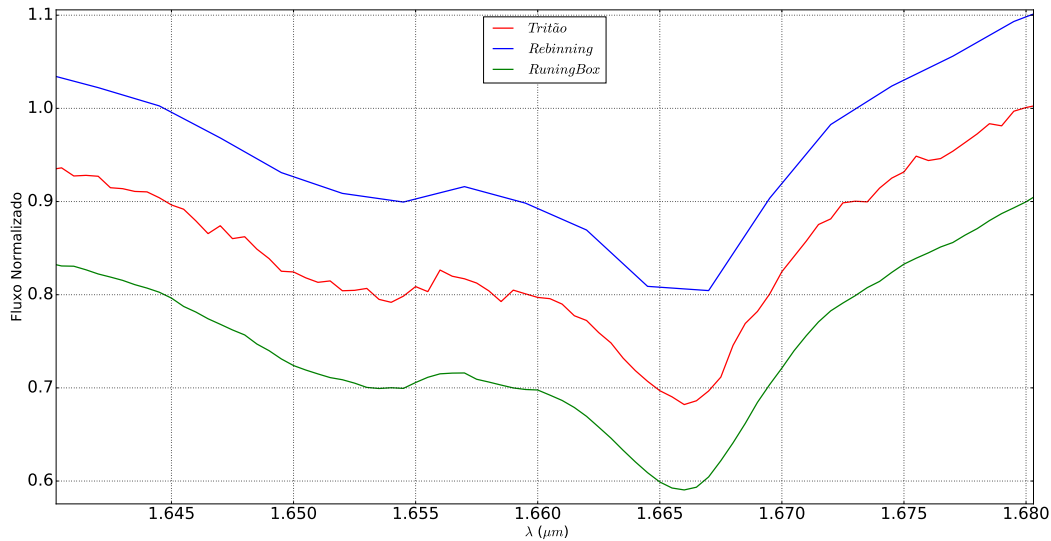


Figura 3.2: Zoom de um intervalo aleatório entre 1,64 e 1,68 μm de Tritão, sem alteração nas cores da legenda.

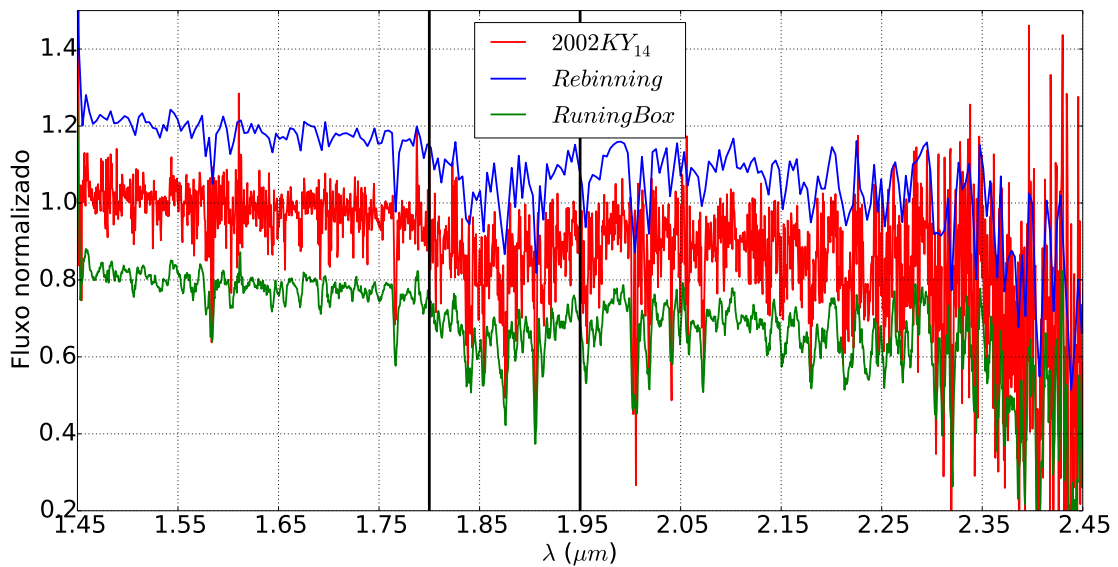


Figura 3.3: Espectro do Centauro 250112 2002 KY_{14} sem nenhum tratamento em vermelho, com Rebinng em azul e, em verde, com Runing Box. A região entre as barras pretas é a região do espectro onde a atmosfera terrestre mais interfere, por isso ela não é levada em consideração no momento de avaliar o resultado da técnica. Os espectros foram deslocados em 0,2 unidades em fluxo para melhor visualização.

deformar possíveis bandas de absorção.

Através da comparação dos resultados das técnicas *Rebinning* e *Runing Box* em espectros com muito ou pouco ruído e de tamanhos variados, foi possível perceber que o *Rebinning* elimina o ruído mas diminui a resolução, modifica as bandas de absorção que podem até não ser mais identificadas. O *Runing Box* também elimina o ruído, diminui a resolução e modifica a localização do sinal, levando informação de

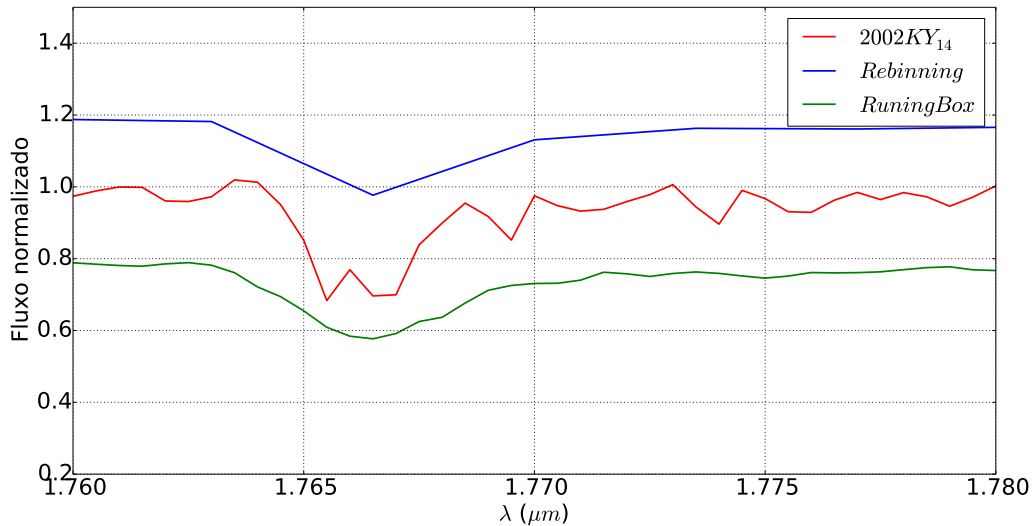


Figura 3.4: Zoom de um intervalo aleatório entre 1,76 e 1,78 μm de 250112 2002 KY₁₄ sem alteração nas cores da legenda.

um ponto a outro. Desta maneira, estas técnicas não serviram para os nossos fins científicos e por isto foram descartadas para o tratamento dos espectros da nossa amostra.

3.1.2 Transformada de Fourier

Funções que não são periódicas podem ser expressas em termos de integrais de senos e cossenos, desde que sejam multiplicadas por um fator de peso: a transformada de Fourier. O processamento de espectros através desta técnica ocorre em 3 passos:

- o espectro é transformado do domínio espacial para o domínio da frequência através da transformada de Fourier e coeficientes são associados a cada frequência;
- a filtragem é iniciada: os coeficientes de alta frequência são descartados pois é onde a maior quantidade de ruído está localizada;
- para que o espectro filtrado possa ser interpretado, a transformada inversa de Fourier é aplicada pois é ela que vai passar o espectro do domínio da frequência para o domínio espacial.

Na figura 3.5 o espectro de Tritão é mostrado antes e depois da aplicação da técnica aqui mencionada. Podemos notar que o espectro filtrado não corresponde ao espectro original com menos ruído.

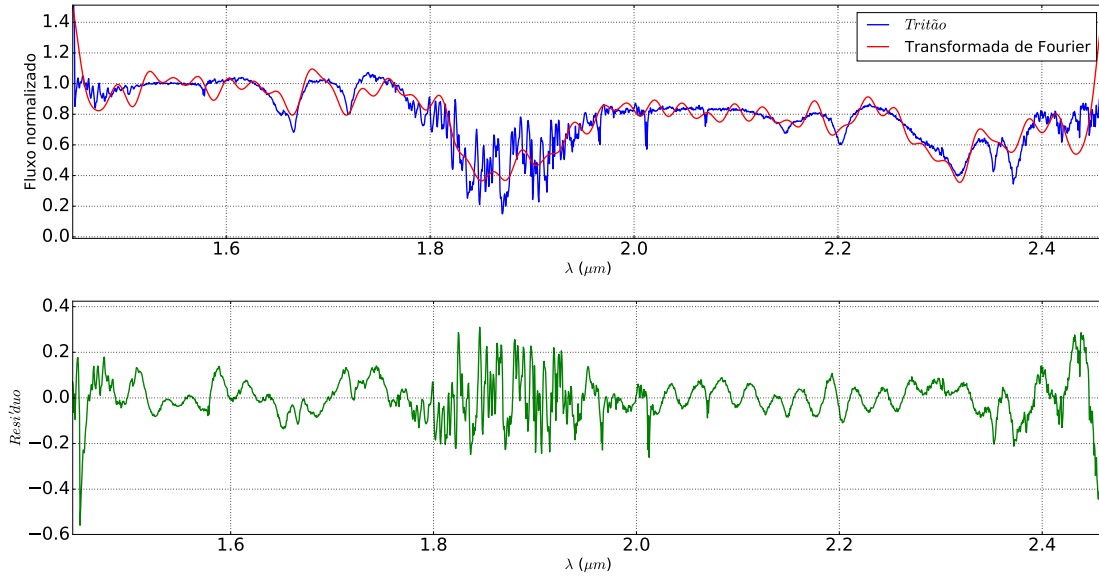


Figura 3.5: Espectro de Tritão sem tratamento, em azul, e filtrado com a transformada de Fourier, em vermelho. Mostramos em verde a diferença entre o espectro original e o filtrado.

Ampliando novamente o intervalo entre $1,64$ e $1,68 \mu m$, é possível perceber que a forma do espectro filtrado não concorda com o espectro original.

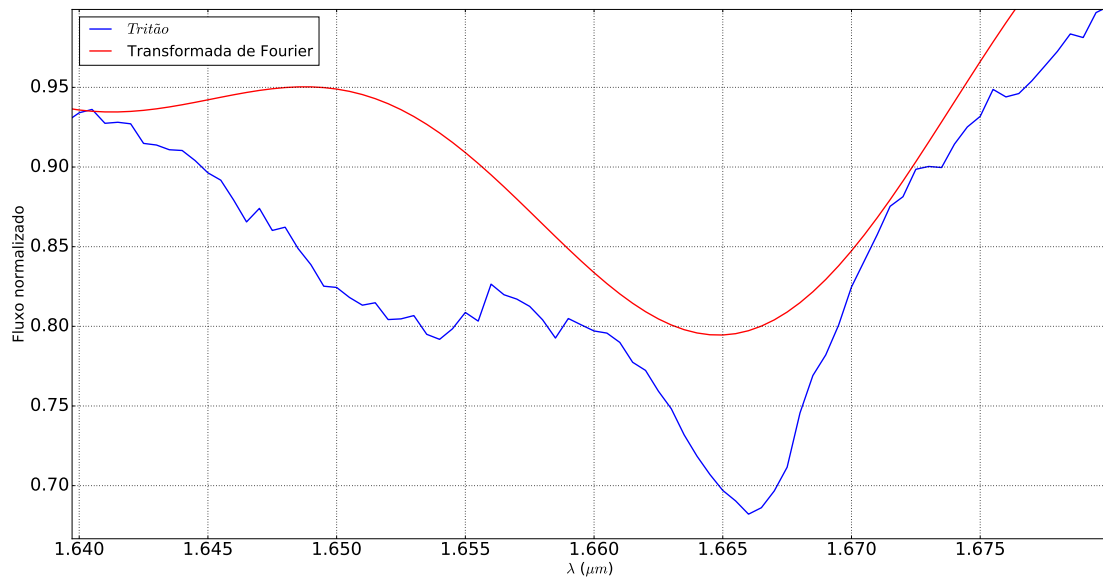


Figura 3.6: Zoom do intervalo mostrado na figura 3.2 agora com a aplicação da Transformada de Fourier. Não houve alteração nas cores da legenda.

Ainda a título de exemplo, realizamos a mesma análise para o Centauro 250112 2002 KY₁₄, e ficou ainda mais evidente a discrepância entre o espectro original e o filtrado (figura 3.7) principalmente na banda H, onde é possível visualizarmos a inserção de estruturas que não estavam presentes no espectro original.

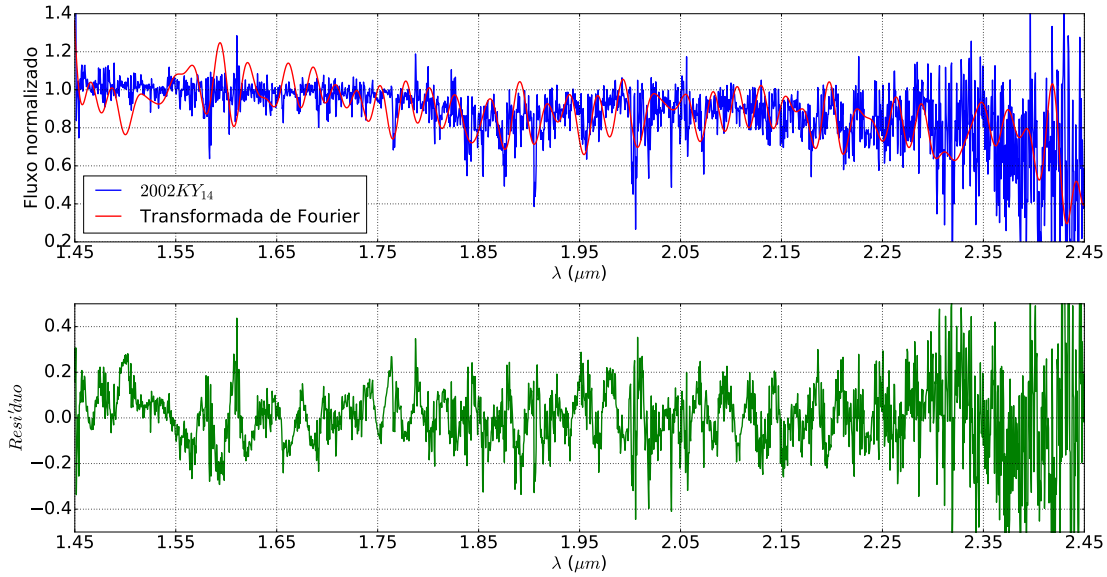


Figura 3.7: Espectro de 250112 2002 KY₁₄ sem tratamento, em azul, e filtrado com a transformada de Fourier, em vermelho. Mostramos em verde a diferença entre o espectro original e o filtrado.

A partir destes resultados foi possível concluir que a Transformada de Fourier não funcionou para analisar a nossa amostra pois apesar dela não requerer que o sinal de entrada seja periódico no intervalo de análise, o ruído deve ser periódico (requisito que nossos espectros não satisfazem). Por causa disto, o sinal 'filtrado' não é fiel ao sinal original pois o espectro final ficou com as estruturas de absorção modificadas, não permitindo medir profundidade e posição das mesmas, além de ter introduzido estruturas que não são reais. Por estes motivos, esta técnica também foi descartada para utilização em nossos espectros.

3.1.3 Wavelets

Wavelets são funções matemáticas. Uma função *wavelet* é definida como uma função $\psi \in L^2(\mathbb{R})$, de quadrado integrável e bem localizada, ou seja, apresentam um domínio finito e conseguem representar bem estruturas como picos e saliências, que são comuns nos espectros de TNOs.

As transformadas *wavelets* são mecanismos que possibilitam a decomposição ou a quebra dos sinais, permitindo analisar os dados em diferentes domínios de frequências com a resolução de cada componente amarrada à sua escala, por isso, a análise através das *wavelets* é de multi-resolução. A idéia é simples: separar a informação para ser analisada em uma parte "principal" e em outra "residual". Desta forma, as *wavelets* constituem uma ferramenta matemática para decompor funções hierarquicamente, permitindo que uma dada função seja descrita em termos

brutos e em formas que apresentam detalhes que vão desde os menos delicados aos mais finos.

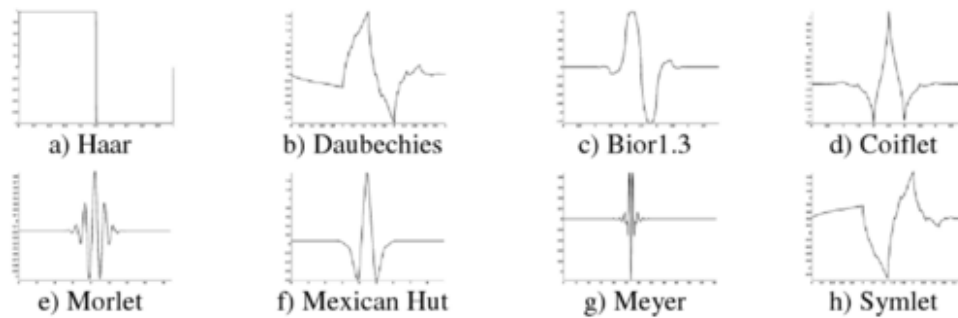


Figura 3.8: Tipos de Wavelets: a) Haar b) Daubechies c) Bior1.3 d) Coiflet e) Morlet f) Mexican Hat g) Meyer h) Symlet (Kim, 2013).

Na figura 3.8 mostramos algumas famílias de *wavelets* (Kim, 2013). Cada *wavelet* possui uma família de funções com propriedades matemáticas similares, sendo nomeadas com o nome da família mais um número, por exemplo, *wavelet Bior 1*, *wavelet Bior 2*, e assim sucessivamente, tendo a *wavelet Bior 2* o dobro de modo de limpezas da *wavelet Bior 1*. Para obter resultados mais satisfatórios é necessário que a Wavelet escolhida seja similar aos dados aos quais ela será aplicada. Por esta razão, escolhemos a *Wavelet Coiflet 4* para filtrar os espectros da amostra no modo discreto.

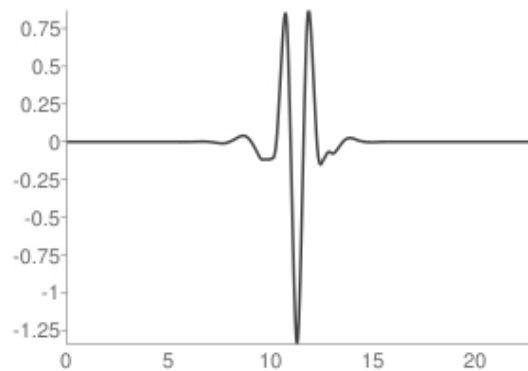


Figura 3.9: Forma da Wavelet escolhida para filtrar os espectros da nossa amostra. Fonte: <http://wavelets.pybytes.com/wavelet/coif4/>

Após a escolha da *Wavelet Coiflet 4* realizamos alguns testes afim de analisar o resultado da aplicação desta *wavelet* nos dados da nossa amostra. Por isso, realizamos a filtragem no TNO Tritão utilizando a *Coiflet 4* em escalas que variaram da 1 até a 10 (vide figura 3.10).

Após este procedimento, comparamos a distribuição do resíduos de todas as escalas e escolhemos a escala 5 para este objeto pois esta escala foi a que apresentou

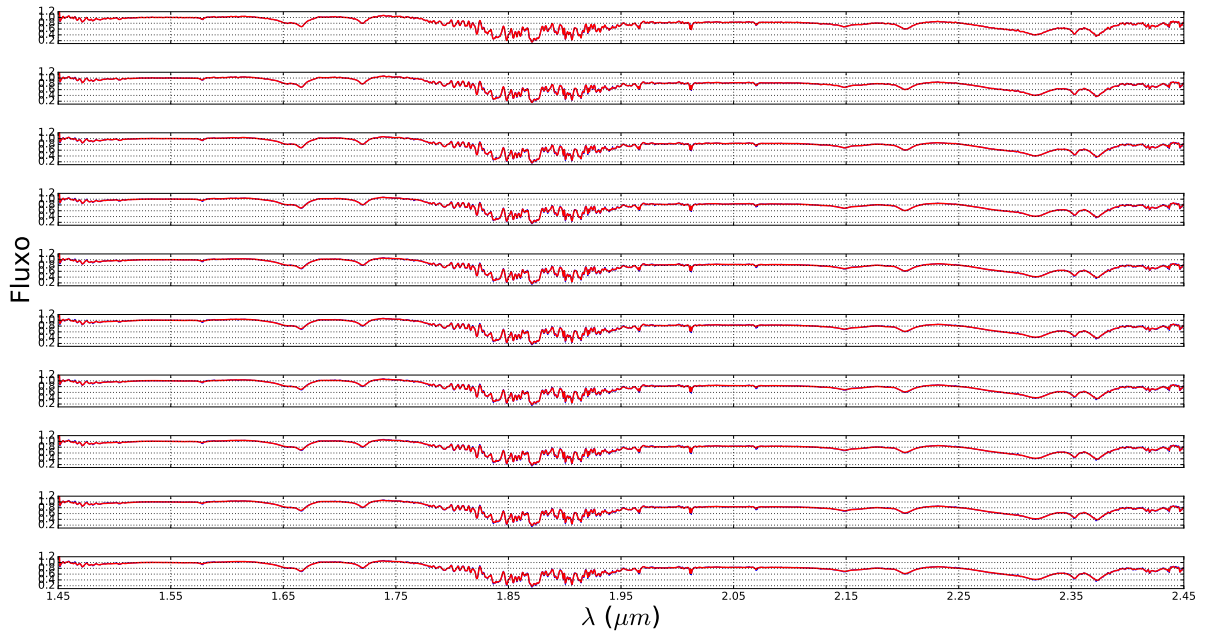


Figura 3.10: Espectro de Tritão sem tratamento em azul, filtrado na *wavelet coiflet* 4 escalas de 1 a 10 em vermelho, sendo o primeiro gráfico na escala 1 e o último na escala 10. Como este espectro possui uma boa relação sinal ruído, pouca diferença é notada entre os resultados das diversas escalas.

a forma mais similar a do espectro e retirou a maior quantidade possível de ruído, simultaneamente (vide figura 3.11).

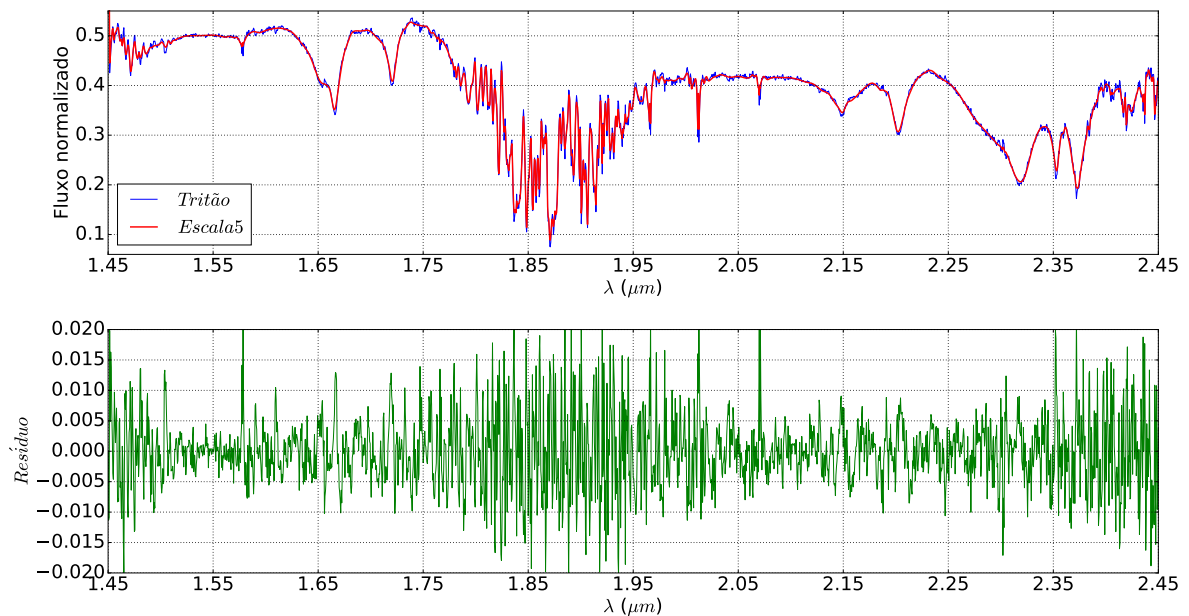


Figura 3.11: Espectro de Tritão sem tratamento em azul, filtrado na Wavelet Coiflet 4 escala 5 em vermelho e a diferença entre o espectro original e filtrado é mostrado em verde.

Depois da fase de testes conseguimos concluir que a aplicação das *wavelets* al-

cançou os objetivos estipulados para este trabalho. Por isso, escolhemos esta técnica para continuar a filtragem dos espectros pertencentes ao conjunto de dados. Para filtrar os demais espectros, montamos um algoritmo que será detalhado na seção 3.2. Todos os espectros da amostra com o seu espectro original, filtrado na *Coiflet 4* e a diferença entre o espectro original e filtrado encontram-se no Apêndice A.

3.2 Comparações

A filtragem foi realizada com um script em *Python* que utiliza como dados de entrada o espectro do TNO, permite que o usuário selecione a *wavelet* e a escala na qual ele deseja que o espectro seja filtrado, fornecendo como dado de saída o espectro original, filtrado e o resíduo. Realizamos a filtragem com a *wavelet coiflet 4* em escalas que variaram de 1 a 10 e um dos critérios de escolha da escala foi a distribuição de resíduos, priorizamos as escalas que mais respeitaram a forma e retiraram ruído do espectro, simultaneamente.

Após a filtragem dos espectros, iniciamos o processo de comparação dos espectros filtrados da nossa amostra com os espectros modelados a partir das constantes ópticas obtidas em laboratório para os gelos de interesse astrofísico deste trabalho, que são: água, metano e metanol.

Para isso, tomamos as constantes ópticas disponíveis nos trabalhos de Schmitt et al. (1998) e Grundy and Schmitt (1998) para os gelos de água e metano, respectivamente, e utilizamos a Teoria de Reflectância Bidirecional de Hapke (1981). Neste modelo desenvolve-se uma solução analítica aproximada para a equação de transferência radiativa, descrevendo o espalhamento da luz a partir das partículas da superfície, utilizando os índices de refração do meio e o suposto tamanho da partícula. Esta teoria é útil para interpretações espectroscópicas de reflectância das superfícies de laboratório, por isso foi a escolhida para reproduzir os espectros de reflectância para esses gelos no intervalo espectral entre 1,4 e 2,4 μm para diversos tamanhos de partículas.

Após obter os espectros de reflexão para os gelos acima citados, iniciamos o processo de comparação e validação dos resultados obtidos. Estes processos foram divididos em 4 etapas.

Na primeira etapa, montamos um algoritmo que compara o espectro na *wavelet coiflet 4* filtrado em escalas que variam de 1 a 10 com os espectros de reflectância dos gelos de água e metano para tamanhos de partículas que variam entre 15 e 100 μm . O objetivo desta comparação é calcular a diferença entre o espectro filtrado em uma determinada escala e o espectro de gelo para determinado tamanho de partícula. Desta maneira o algoritmo diz com qual escala o espectro da nossa amostra apresenta menor discrepância para com o espectro de gelo modelado para determinado

tamanho de partícula, indicando assim, qual dos espectros de gelo mais se assemelha ao espectro filtrado do TNO da amostra.

Na segunda etapa verificamos visualmente se a primeira etapa foi bem sucedida. Essa verificação foi realizada visualmente pois procuramos identificar se a técnica não introduziu alguma estrutura no espectro filtrado que não é correspondente ao espectro original. Averiguamos a escala que foi indicada como a que melhor filtra os espectros, comparamos com o espectro do gelo em questão no tamanho de partícula considerado ideal e buscamos pelas bandas de absorção nos comprimentos de onda característicos. Se nestes comprimentos de onda existe uma banda nítida, ou seja, de tamanho, forma e profundidade do espectro do gelo, na mesma localização da banda no espectro teórico, dizemos que o gelo está presente na superfície do objeto. Se no local onde deveria existir a banda de absorção, existe alguma estrutura similar a banda porém com um ruído que não permita visualizar com clareza a citada banda, dizemos que pode haver o gelo no objeto, no entanto, o ruído não nos permite afirmar se este gelo realmente está lá. Disto isto, esclarecemos que o objetivo deste trabalho não é modelar os espectros da amostra de maneira a fazê-los coincidir com os modelos de gelo. Queremos compará-los a fim de identificar possíveis bandas de absorção, principalmente na região além de $2 \mu m$, que é dominada basicamente por ruído.

A terceira etapa consiste de realizar uma busca na literatura a fim de verificar se outros pesquisadores já analisaram algum espectro dos objetos do nosso conjunto de dados e, se eles encontraram resultados similares aos nossos. Desta forma, é possível avaliar se a técnica realmente funcionou pois para os objetos que já possuem os citados gelos, devemos identificá-los também através da nossa análise. E, além disso, esperamos encontrar indícios da presença de outro tipo de gelo nos objetos já analisados por outrem e/ou para os espectros com grande quantidade de ruído, esperamos identificar as bandas de absorção que anteriormente o ruído escondia.

Buscando encontrar alguma correlação na detecção dos gelos nos TNOs, na última etapa deste trabalho, agrupamos os objetos segundo sua composição, localização na parte externa do Sistema Solar e tamanho, a fim de descobrir a localização destes gelos na região transnetuniana ou se a composição está relacionada com o tamanho de cada TNO.

Nas subseções a seguir, mostramos alguns exemplos de como as comparações com os gelos de água, metano e metanol foram realizadas neste trabalho.

3.2.1 Água

O TNO 136108 Haumea possui $1239,5_{-57,8}^{+68,7}$ km de diâmetro (Fornasier, S. et al., 2013) e é conhecido por possuir gelo de água na forma cristalina (Trujillo et al.,

2007). Na figura 3.12 vemos o espectro filtrado na *Wavelet Coiflet 4* na escala 6 comparado com o modelo de gelo de água cristalina constituído por uma partícula de tamanho $15\mu m$ e foi possível visualizar as bandas referentes a esse gelo em $1,65$ e $2,0\mu m$.

Na região próxima a $2,2\mu m$ no espectro filtrado de 136108 Haumea foi possível identificar uma fraca banda de absorção similar a presente em Caronte associada ao gelo de amônia hidratada ($NH_3.nH_2O$). Apesar de não haver indicações na literatura da presença deste gelo em 136108 Haumea, a presença de amônia hidratada é esperada na composição interna de satélites formados principalmente por gelo e nos cometas (Croft et al., 1988). Se confirmada, a presença deste material na superfície é surpreendente porque ele deve ser rapidamente destruído pela radiação ultravioleta e por partículas carregadas (Strazzulla and Palumbo, 1998) não durando mais de ~ 20 milhões de anos em Caronte (Cooper et al., 2004). Por isso, acreditamos que o material que observamos estava no interior do objeto e que algum mecanismo (criovulcanismo, impacto ou convecção) está reabastecendo o material na superfície.

A parte final deste espectro, a região além de $2,3\mu m$, não é compatível com o espectro teórico do gelo de água. Por este motivo, comparamos o espectro do TNO 136108 Haumea com o espectro do gelo de metanol. Não existem indícios na literatura da presença de metanol na superfície deste TNO, no entanto, esta inclinação pode ser devido a presença deste gelo ou algum outro que possua absorções nesta região espectral. Na seção 4.2.3 continuaremos abordando esta possibilidade.

O TNO Ressonante 38628 Huya tem $458,0 \pm 9,2$ km de diâmetro (Fornasier, S. et al., 2013) e está situado na ressonância de movimento médio 3:2 com Netuno. Barucci et al. (2011) classificou a presença de gelo de água neste objeto como variável e não conseguiu detectá-la. Através da aplicação da *Wavelet Coiflet 4* na escala 7, foi possível visualizar uma possível banda de absorção próxima a $2\mu m$. Apesar da quantidade de ruído e da forma do espectro não serem totalmente similar ao espectro de gelo de água nesta região (vide figura 3.13), é possível considerar a queda no espectro na região próxima a $2\mu m$ uma banda de absorção, possivelmente do gelo de água, no entanto precisamos de dados de maior qualidade para podermos confirmar a presença deste gelo na superfície deste objeto. Ao lado desta banda, parece haver outra banda de absorção que pode ser devido a presença de metanol da superfície deste TNO, na seção 4.2.3 continuaremos abordando esta possibilidade.

3.2.2 Metano

O TNO 134340 Plutão tem 2300 km (Fonte: *New Horizons*) e está situado na ressonância de movimento médio 3:2 com Netuno. Da literatura sabíamos que este famoso objeto possui metano e, através da filtragem com a *Wavelet Coiflet 4* na

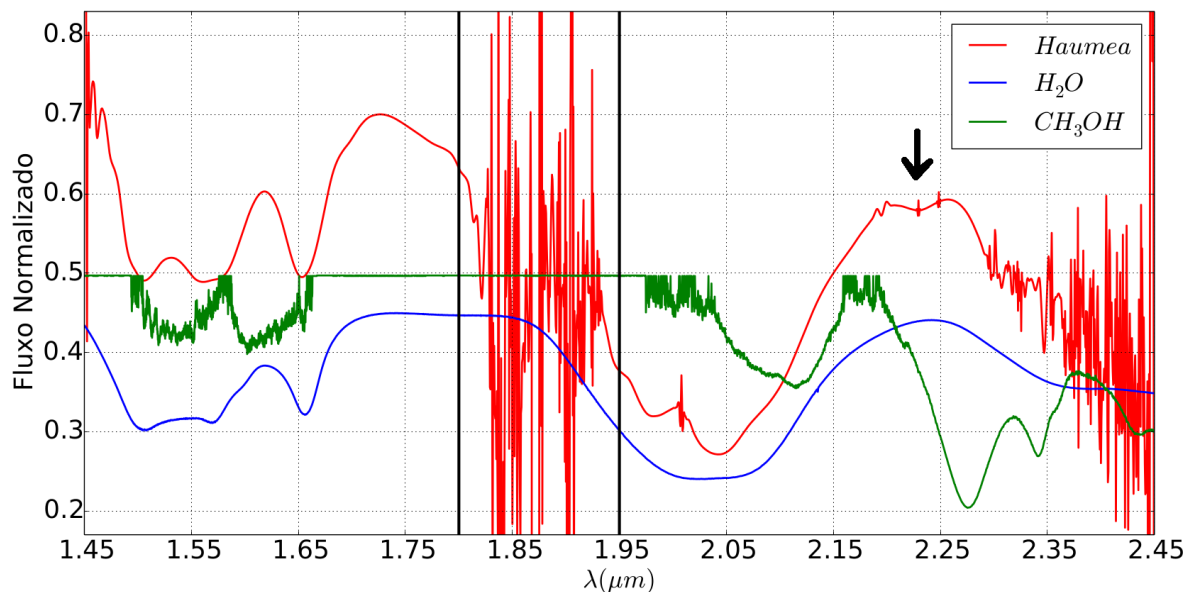


Figura 3.12: O espectro de 136108 Hamuea é mostrado em vermelho. Este espectro possui uma boa relação sinal ruído e através da aplicação da *Wavelet Coiflet 4* na escala 6, foi possível reconhecer as bandas de absorção do gelo de água (mostrado em azul) nos comprimentos de onda de 1,65 e 2 μm , respectivamente. A rasa banda de absorção indicada pela seta pode ser uma assinatura de amônia hidratada, como observado no espectro de Caronte (figura 4.4). Em verde é mostrado o espectro do gelo de metanol que pode ser o causador da discrepância observada na região além de 2,3 μm entre o espectro deste TNO e o espectro de gelo de água. A região entre barras pretas é onde a atmosfera mais interage e por isso ela é desconsiderada nas análises.

escala 3, conseguimos reconhecer as bandas de absorção referentes a este hidrocarboneto no nosso espectro próximas a 1,5, 1,65, 1,7, 1,8, 2,2, 2,3 e 2,4 μm , sendo a banda em aproximadamente 2,16 μm referente ao nitrogênio (vide figura 3.14). No caso deste espectro, não era estritamente necessário a aplicação da *wavelet* para a detecção das bandas de absorção, no entanto, através deste teste foi possível notar que a *wavelet* respeitou a forma e as posições de todas as bandas de absorção presentes no espectro mostrado.

3.2.3 Metanol

O TNO 120348 2004 TY₃₆₄ possui 512^{+37}_{-40} km de diâmetro (Lellouch, E. et al., 2013), pertence ao cinturão clássico dos TNOs e de acordo com a literatura, poderia possuir o gelo metanol (Merlin et al., 2012). Através da filtragem do espectro da nossa amostra com a *Wavelet Coiflet 4* escala 5 foi possível identificar algumas absorções na região próxima a 2,3 μm que podem estar associadas com a presença de metanol na superfície deste objeto (vide figura 3.15).

O Centauro 83982 Crantor possui apenas 59^{+11}_{-12} km de diâmetro (Duffard, R.

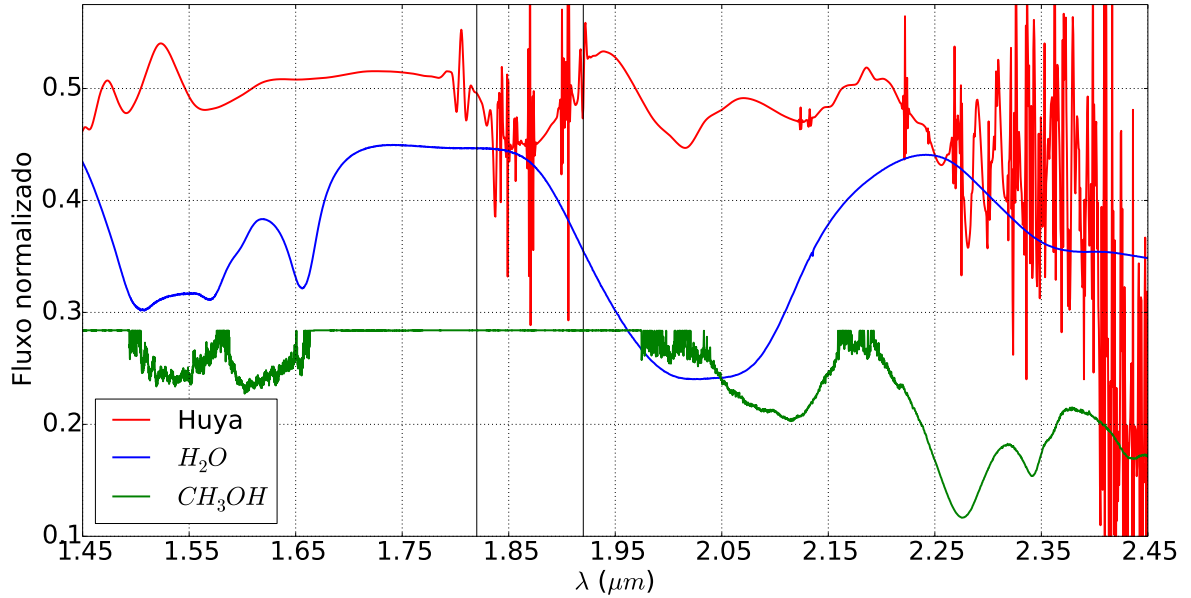


Figura 3.13: O espectro do TNO 38628 Huya filtrado na *Wavelet Coiflet 4* na escala 7 é mostrado em vermelho e está sendo comparado com o espectro de gelo de água cristalina composto por partículas de $15 \mu m$ mostrado em azul. Em verde é mostrado o espectro de metanol. A região entre barras pretas é onde a atmosfera mais interage e por isso ela é desconsiderada nas análises.

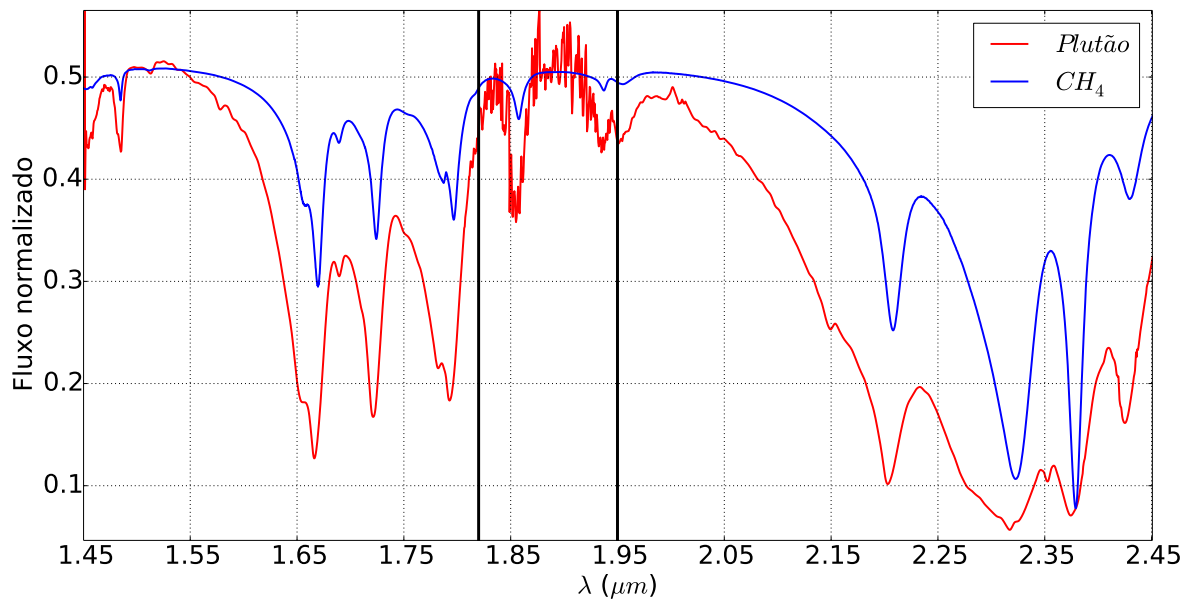


Figura 3.14: O espectro de 134340 Plutão já filtrado na *Wavelet Coiflet 4* escala 5 é mostrado em vermelho e o espectro de metano para uma partícula de $40 \mu m$ é mostrado em azul. Este espectro é a soma de dois espectros obtidos em datas diferentes. A região entre as barras pretas foi desconsiderada pois é onde a atmosfera terrestre mais interfere no espectro.

et al., 2014) e de acordo com o trabalho de Alvarez-Candal et al. (2007) este centauro possivelmente tem metanol em sua composição superficial. Após a aplicação da

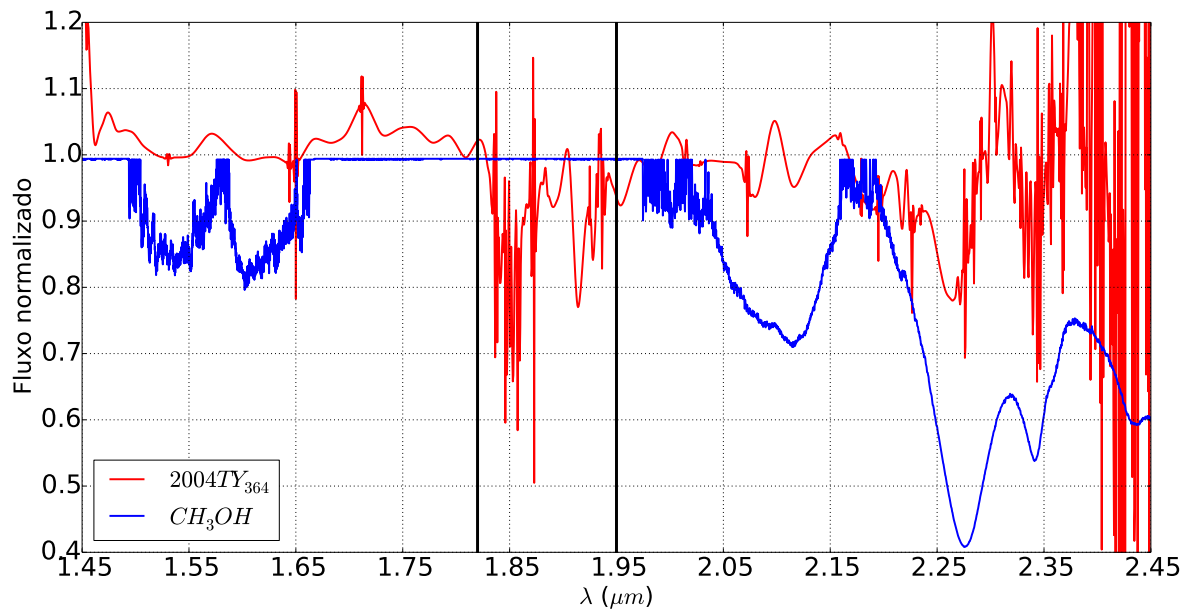


Figura 3.15: O espectro de 120348 2004 TY_{364} é mostrado em vermelho e em azul o espectro de metanol (CH_3OH). Apesar da quantidade de ruído, é possível notar que a forma do espectro do TNO é similar ao espectro de metanol. A região entre as barras pretas foi desconsiderada pois é onde a atmosfera terrestre mais interfere no espectro.

Wavelet Coiflet 4 escala 8, foi possível identificar a presença de bandas de absorção nas regiões próximas a $2,3 \mu m$, que são semelhantes as estruturas encontradas no espectro de metanol (vide figura 3.16). Como veremos na seção 4.2.1, este TNO também possui gelo de água em sua composição superficial, levando-nos a crer que pode existir alguma correlação entre os gelos de água e metanol na superfície dos TNOs.

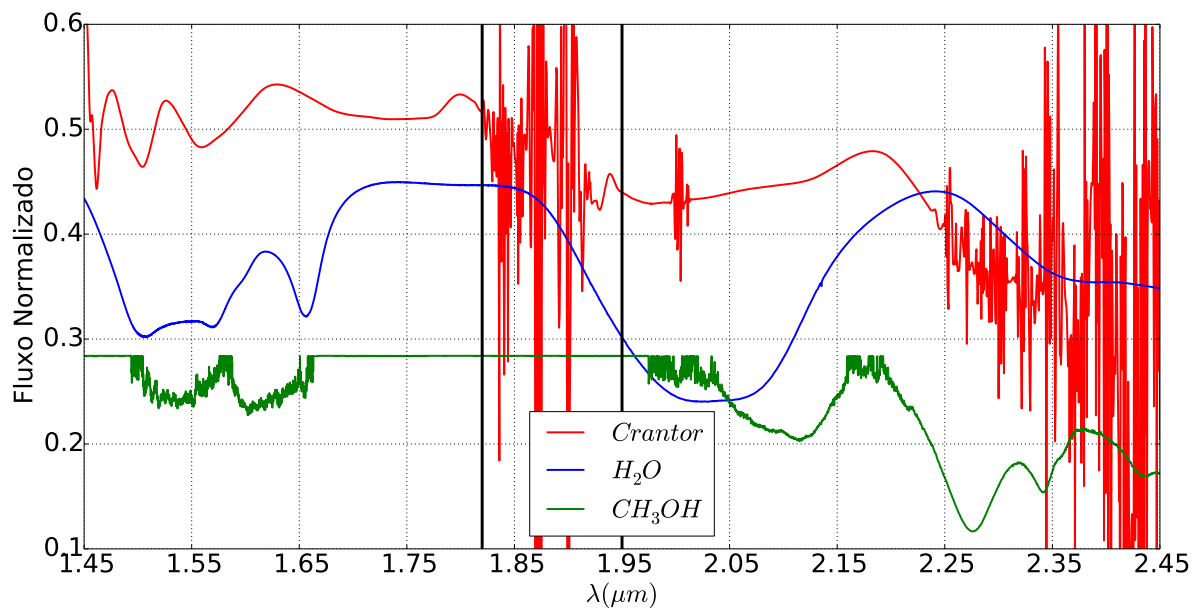


Figura 3.16: O espectro de 83982 Crantor é mostrado em vermelho e em verde o espectro de metanol (CH_3OH). Apesar da quantidade de ruído, é possível notar que a forma do espectro do TNO é similar ao espectro de metanol. Em azul, mostramos o espectro de gelo de água, que será abordado na seção 4.2.1. A região entre as barras pretas foi desconsiderada pois é onde a atmosfera terrestre mais interfere no espectro.

Capítulo 4

Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados, análise e discussões do trabalho. Ele está dividido em três partes contendo a análise da técnica na seção 4.1; os TNOs e seus possíveis gelos superficiais na seção 4.2 e, por fim, na seção 4.3, a distribuição desses gelos na parte externa do Sistema Solar.

4.1 Filtragem

Todos os espectros da amostra foram filtrados com a *Wavelet Coiflet 4* nas escalas mostradas na tabela 4.1 e seus espectros filtrados podem ser vistos no Apêndice A.

A aplicação desta técnica removeu uma parcela significativa do ruído, permitindo a visualização de bandas de absorção nos espectros da amostra. No entanto, percebemos que no início do espectro ($\lambda < 1,5\mu m$) foram inseridas algumas estruturas. Estas estruturas podem ser devidas a tentativa feita pelas *wavelets* de filtrar esta parte do espectro, onde o efeito de borda é dominante. Por este motivo, não levamos em consideração algumas das estruturas que aparecem nesta região. No demais, a maior parte das bandas de absorção foram encontradas em espectros de boa qualidade, que correspondem a objetos com mais de 500 km de diâmetro, que são considerados TNOs de médio e grande tamanho (Brown, 2012). Essas bandas já foram citadas na literatura e por isso conferem credibilidade a técnica aplicada, pois as *wavelets* não removem estruturas quando são bem utilizadas.

Os TNOs com diâmetro menor que 500 km, principalmente os centauros, que têm diâmetros típicos da ordem de poucas centenas de quilômetros, geraram espectros sem estruturas e com baixa relação sinal ruído. As *wavelets* filtraram estes espectros, no entanto, não foi possível encontrar bandas de absorção neles. Duas causas distintas podem estar associadas com esse resultado. A primeira, devido à falta de qualidade do espectro e a segunda, a incapacidade destes objetos manterem os voláteis que adquiriram na época de acreção até os dias atuais devido a sua baixa massa (Schaller and Brown, 2007).

Tabela 4.1: Resultados da filtragem

Escala	Numeração	Nome	Continuação		
3	134340	Plutão			
5	120348	2004 TY ₃₆₄			
5	136199	Eris	8	19308	1996 TO ₆₆
5		Tritão	8	145451	2005 RM ₄₃
6	47932	2000 GN ₁₇₁	8	47171	1999 TC ₃₆
6	95626	2002 GZ ₃₂	8	55565	2002 AW ₁₉₇
6	73480	2002 PN ₃₄	8	55637	2002 UX ₂₅
6	120061	2003 CO ₁	8	55638	2002 VE ₉₅
6	307616	2003 QW ₉₀	8	208996	2003 AZ ₈₄
6	10199	Chariklo	8	229762	2007 UK ₁₂₆
6	136108	Haumea	8	90482	Orcus
6	52872	Okyrhoe	8	83982	Crantor
6	42355	Typhon	9	281371	2008 FC ₇₆
6	119951	2002 KX ₁₄	9	5145	Pholus
6		2003 UZ ₄₁₃	10	26375	1999 DE ₉
7	15874	1996 TL ₆₆	10	44594	1999 OX ₃
7	119951	2002 KX ₁₄	10	90568	2004 GV ₉
7	120132	2003 FY ₁₂₈	10	144897	2004 UX ₁₀
7	145452	2005 RN ₄₃	10	2060	Chiron
7	145453	2005 RR ₄₃	10	60558	Echeclus
7	309737	2008 SJ ₂₃₆	10	28978	Ixion
7	54598	Bienor	10	90377	Sedna
7	55576	Amycus	10	32532	Thereus
7	38628	Huya	10	174567	Varda
7	50000	Quaoar	10		2007 UM ₁₂₆
7		Caronte			
7		2007 VH ₃₀₅			

Detalhamos a seguir, os espectros que possuem bandas de absorção e que foram compatíveis com um ou mais modelos de gelo que foram utilizados para realizar a comparação. Mostramos também os espectros de TNOs que possuem indícios de serem constituídos por algum desses gelos, mas que não mostraram todos as estruturas características do espectro de gelo com o qual foram comparados e por causa disto, não afirmamos que eles os possuem, ainda assim esclarecemos as razões que nos fazem crer que esses TNOs poderiam possuí-los.

4.2 Comparação com modelos de gelo

Através de um algoritmo comparamos todos os espectros filtrados com os modelos de gelo obtidos através das constantes ópticas medidas em laboratório para diversos tamanhos de partículas, que variavam de 20 a 100 μm para as moléculas de água, metano e metanol. A lógica do programa é simples: quanto menor a diferença entre

os fluxos do espectro e do modelo para um determinado tamanho de partícula, maior é a chance do determinado espectro possuir o gelo com o qual está sendo comparado.

Depois que obtivemos os resultados do algoritmo, iniciamos uma análise mais refinada dos espectros através do processo de comparação visual. A finalidade desta comparação é legitimar a analogia realizada computacionalmente, analisando as semelhanças entre as formas do espectro e do modelo, além de identificar as localizações e formas das possíveis bandas de absorção nos espectros da nossa amostra.

Embora a comparação tenha sido realizada através de espectros de reflexão obtidos com as constantes ópticas medidas em laboratório para os gelos acima mencionados, as condições em que as constantes foram tomadas são diferentes das condições nas quais os gelos se encontram nas superfícies dos TNOs. Por isto, as estruturas identificadas nos espectros da amostra não serão necessariamente idênticas aos espectros modelados, especialmente para os gelos que não dominam o espectro, isto é, que não sejam H_2O ou CH_4 .

4.2.1 Gelo de Água

Dos TNOs da nossa amostra, 6 possuem evidentes bandas de absorção de gelo de água, são eles: 136108 Haumea , 50000 Quaoar, 145453 2005 RR₄₃, 19308 1996 TO₆₆, Caronte e 90482 Orcus.

Na seção 3.2.1 fizemos a comparação do espectro do TNO 136108 Haumea com o espectro de gelo de água (figura 3.12).

50000 Quaoar é um TNO clássico que possui um diâmetro de (1111 ± 5) km (Braga-Ribas et al., 2013) e possui gelo de água em sua composição superficial (Dalle Ore, C. Morea et al., 2009). Através da comparação de seu espectro com o espectro de gelo de água modelado para uma partícula de $25 \mu m$, conseguimos reconhecer este gelo na superfície de Quaoar (vide figura 4.1) pois o espectro do TNO se assemelha com o modelo como um todo, exibindo as principais bandas de absorção características do gelo de água em seu espectro.

O TNO 145453 2005 RR₄₃ é classificado como clássico e é um membro da família colisional de 136108 Hamuea (Brown et al., 2007). Neste mesmo trabalho, foi confirmada a presença de uma profunda banda de absorção no espectro desse objeto próxima a $2 \mu m$, referente ao gelo de água. O espectro da nossa amostra pertencente a este TNO possui bastante ruído, principalmente em sua parte final, onde podemos notar que a eficiência do detector começa a diminuir. Ainda assim, após a filtragem comparamos seu espectro com o espectro de gelo de água modelado para uma partícula de $60 \mu m$ e conseguimos identificar a banda citada na literatura (figura 4.2). Na parte final do espectro, uma possível banda de absorção próxima a $2.27 \mu m$ pode ser associada ao gelo de metanol, por isso na figura 4.2, inserimos o espectro

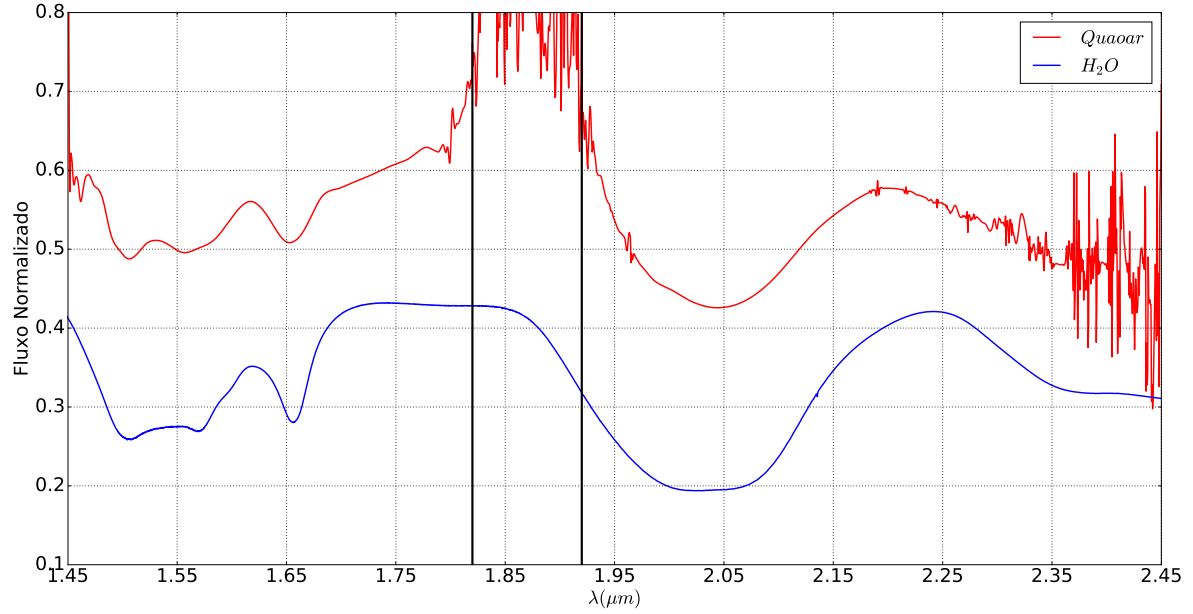


Figura 4.1: O espectro filtrado do TNO 50000 Quaoar é mostrado na cor vermelha e é comparado com o espectro modelado de gelo de água mostrado em azul. A região entre barras pretas é a parte do espectro onde a atmosfera mais interage, por isso ela pode ser desconsiderada.

do metanol e o discutiremos na seção 4.2.3.

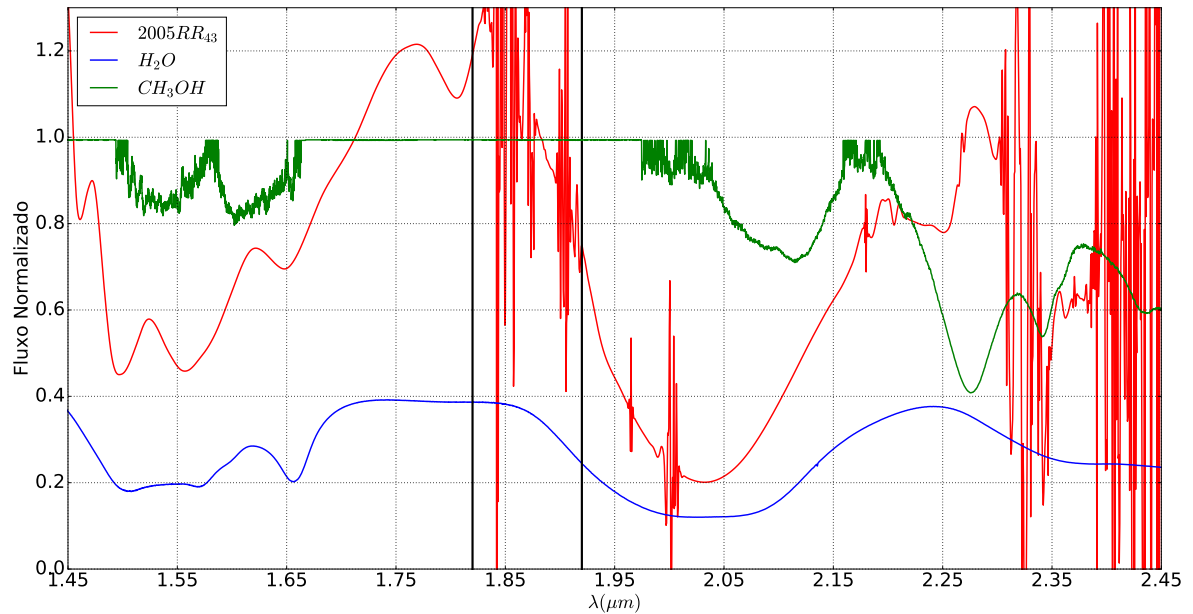


Figura 4.2: O espectro filtrado do TNO 145453 2005 RR₄₃ é mostrado na cor vermelha e é comparado com o espectro modelado de gelo de água mostrado em azul. A região entre barras pretas é a parte do espectro onde a atmosfera mais interage, por isso ela pode ser desconsiderada.

O TNO 19308 1996 TO₆₆ é classificado como clássico e também é um membro da

família colisional de 136108 Haumea (Brown et al., 2007). Da literatura já sabíamos que este TNO possui gelo de água cristalina em sua composição superficial (Brown et al., 1999). O espectro da nossa amostra pertencente a este TNO possui bastante ruído, principalmente em sua parte final, mesmo assim, após a filtragem comparamos seu espectro com o espectro de gelo de água teórico para uma partícula de $30 \mu m$ e conseguimos reconhecer as bandas presentes em 1.65 e $2 \mu m$ (vide figura 4.3).

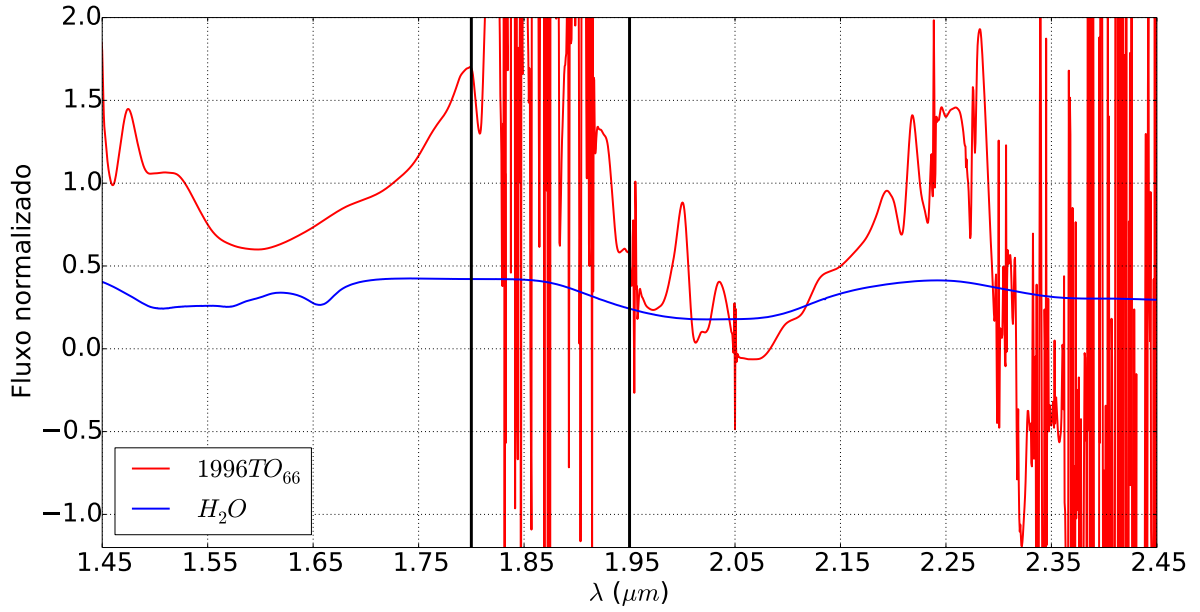


Figura 4.3: O espectro filtrado do TNO 19308 1996 TO₆₆ é mostrado na cor vermelha e é comparado com o espectro modelado de gelo de água mostrado em azul. A região entre barras pretas é a parte do espectro onde a atmosfera mais interage, por isso ela pode ser desconsiderada.

Caronte possui um raio de 606 ± 3 km (Person et al., 2006). O espectro deste TNO ressonante possui pouco ruído e foi possível identificar as bandas de absorção correspondente ao gelo de água já prevista pela literatura (Stern, 1992). A comparação do espectro deste TNO foi realizada com o espectro de gelo de água modelado para uma partícula de $25 \mu m$ (vide figura 4.4). Como citado na seção 3.2.1, Caronte possui uma banda de absorção próxima a $2,2 \mu m$ (indicada pela seta) que está associada a presença de amônia hidratada em sua superfície (Brown and Calvin, 2000). Como explicado anteriormente, vários processos podem realizar o reabastecimento de amônia hidratada na superfície de Caronte, no entanto, o criovulcanismo fornece o cenário mais plausível (Cook et al., 2007).

O TNO ressonante 90482 Orcus possui um diâmetro de 957.8 ± 24.1 km (Fornasier, S. et al., 2013) e do trabalho de Fornasier et al. (2004) já sabíamos que este TNO possui gelo de água em sua composição superficial. A comparação do espectro deste TNO foi realizada com o espectro de gelo de água modelado para uma partícula de $15 \mu m$ (vide figura 4.5) e nos possibilitou o reconhecimento do gelo de

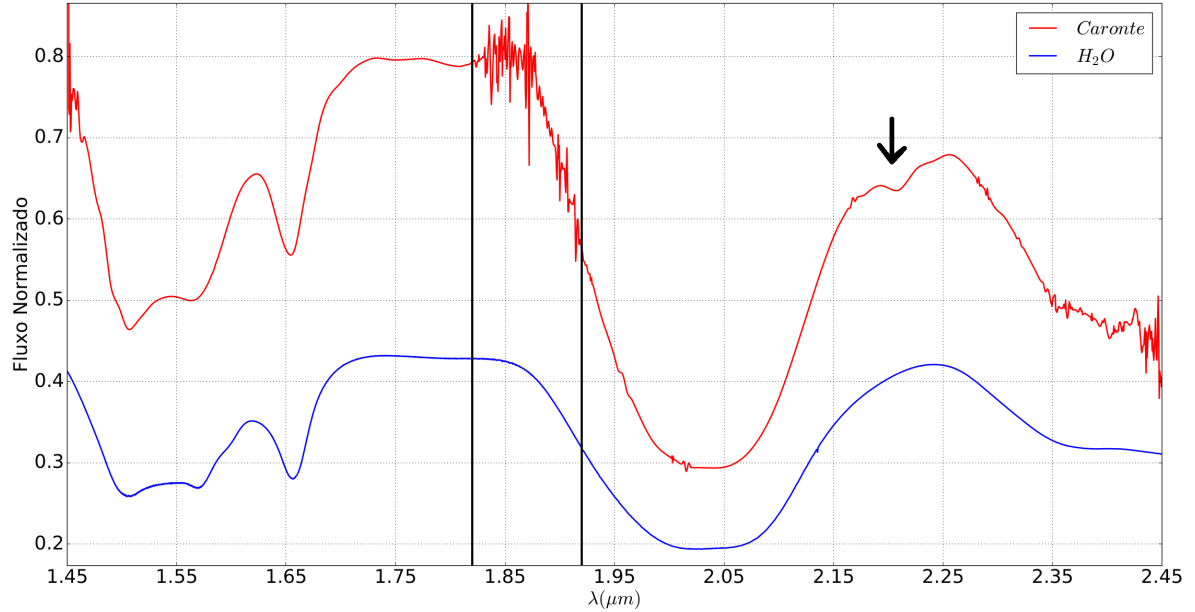


Figura 4.4: O espectro filtrado de Caronte é mostrado na cor vermelha e é comparado com o espectro modelado de gelo de água mostrado em azul. A região entre barras pretas é a parte do espectro onde a atmosfera mais interage, por isso ela pode ser desconsiderada. Este espectro também apresenta na região próxima a $2.23 \mu m$ uma pequena banda de absorção que é associada à amônia hidratada em sua composição superficial. Esta banda está indicada pela seta na figura.

água no espectro da nossa amostra. Possivelmente exista também gelo de metanol em sua superfície, esta possibilidade será abordada na subseção 4.2.3.

Alguns TNOs da amostra, como 120061 2003 CO₁, 5145 Pholus, 38628 Huya e 83982 Crantor possuem fortes indícios de possuírem gelo de água em sua composição superficial, no entanto, o ruído presente após a filtragem ainda não possibilitou a identificação das bandas de absorção, sendo necessários dados de melhor qualidade para tal diagnóstico.

Na seção 3.2.1 fizemos a comparação do espectro do TNO ressonante 38628 Huya com o espectro de gelo de água (figura 3.13) e na seção 4.2.3, analisaremos sua composição a respeito do gelo de metanol.

O centauro 120061 2003 CO₁ possui 94 ± 5 km de diâmetro (Duffard, R. et al., 2014) e, apesar de várias tentativas, ainda não foi identificada nenhuma banda de absorção referente ao gelo de água neste objeto (Barucci et al., 2011). Na comparação do espectro deste TNO com o espectro de gelo de água amorfa modelado para uma partícula de $40 \mu m$, encontramos uma fraca e larga banda de absorção próxima a região de $2 \mu m$, que é assinatura do gelo de água (vide figura 4.6).

O centauro 5145 Pholus possui pouco mais de 100 km de diâmetro (Duffard, R. et al., 2014) e da literatura, sabemos que ele possui gelo de água (Cruikshank et al., 1998) e, mais adiante veremos, que ele também possui gelo de metanol. No entanto,

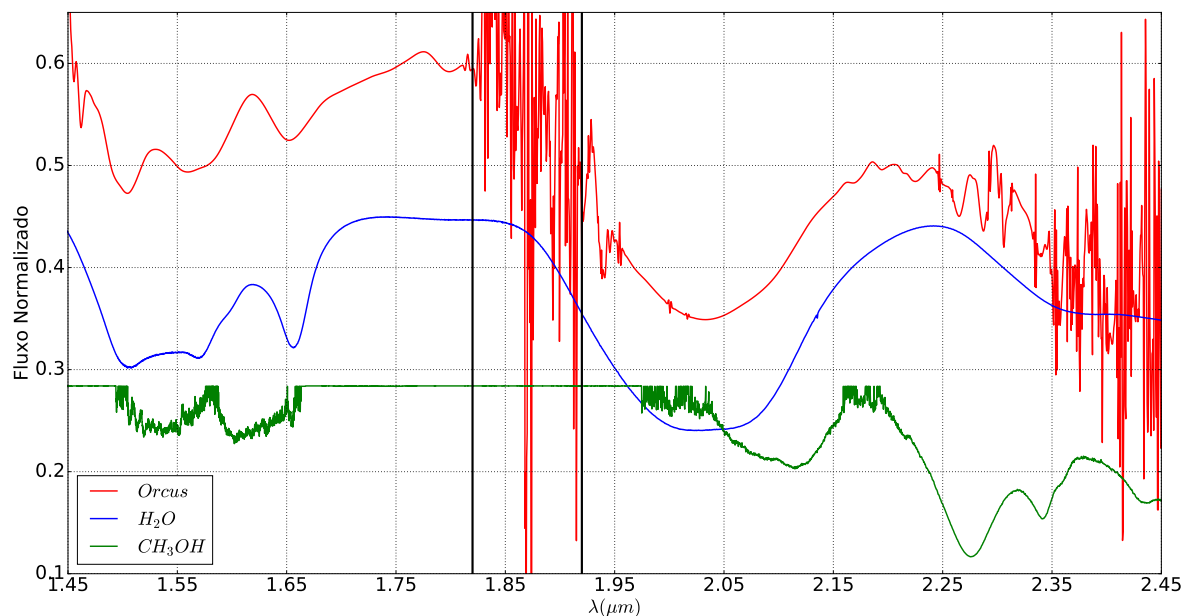


Figura 4.5: O espectro filtrado do TNO 90482 Orcus é mostrado na cor vermelha e é comparado com o espectro modelado de gelo de água mostrado em azul. A região entre barras pretas é a parte do espectro onde a atmosfera mais interage, por isso ela pode ser desconsiderada. Este espectro também apresenta possíveis indícios de possuir metanol em sua composição superficial, por isso o espectro de metanol é mostrado em verde.

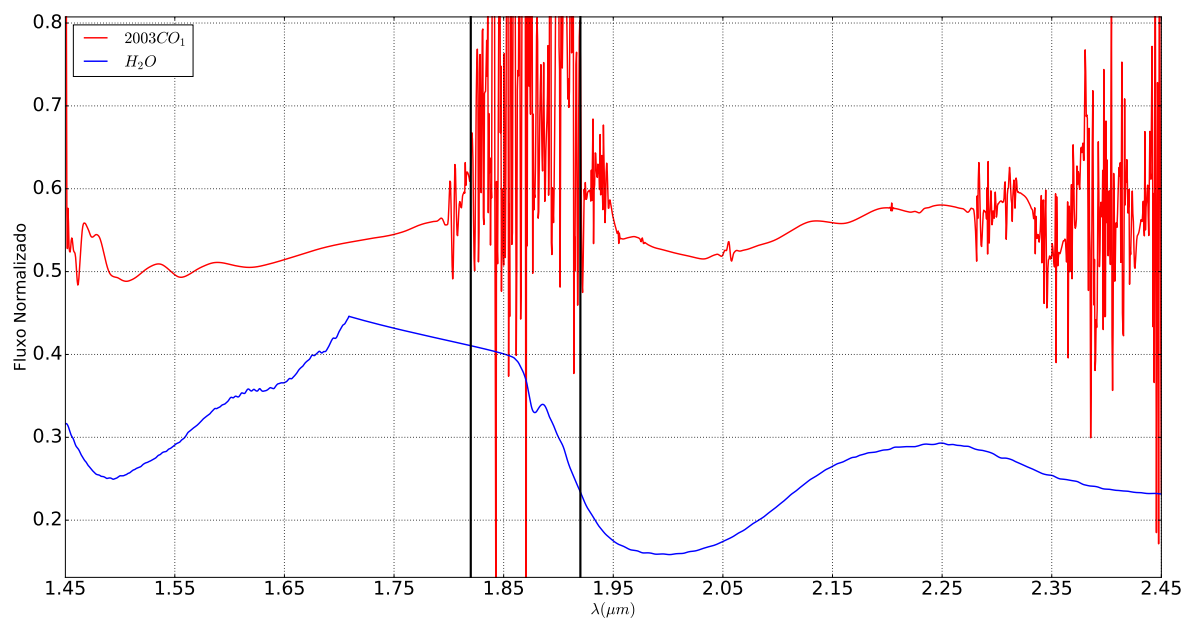


Figura 4.6: O espectro filtrado do TNO 120061 2003 CO₁ é mostrado na cor vermelha e é comparado com o espectro de gelo de água mostrado em azul. A região entre barras pretas é a parte do espectro onde a atmosfera mais interage, por isso ela pode ser desconsiderada.

o espectro que possuímos deste centauro não nos permitiu visualizar com clareza a presença de alguma banda de absorção referente ao gelo de água. Ainda assim, o fluxo presente na região de $1,68 \mu m$ (região sem estrutura) é maior que o fluxo na região próxima a $2 \mu m$, colocando este TNO então como um possível candidato, dentre os espectros da nossa amostra, a possuir gelo de água em sua superfície (vide figura 4.7).

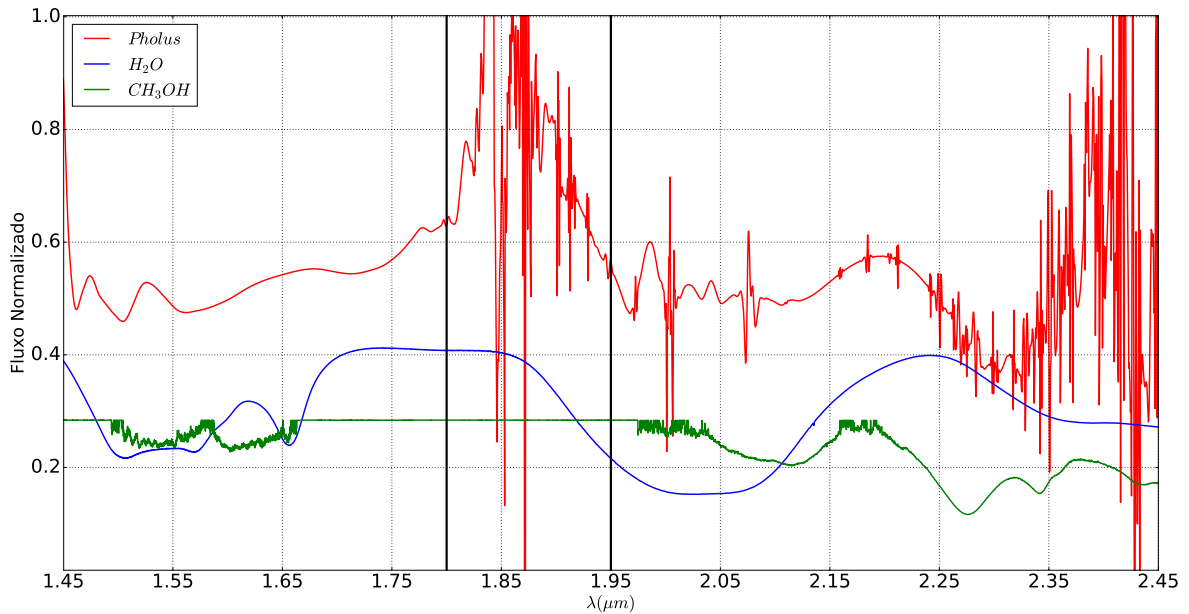


Figura 4.7: O espectro filtrado do TNO 5145 Pholus é mostrado na cor vermelha e é comparado com o espectro de gelo de água mostrado em azul. Em verde é mostrado o espectro de metanol, que será discutido na seção 4.2.3. A região entre barras pretas é a parte do espectro onde a atmosfera mais interage, por isso ela pode ser desconsiderada.

O centauro 83982 Crantor possui 59^{+11}_{-12} km de diâmetro (Duffard, R. et al., 2014). Doressoundiram et al. (2005) mostraram que ele possui gelo de água em sua superfície e, como dito anteriormente na seção 3.2.3, este objeto também possui gelo de metanol em sua composição. Na nossa análise, não conseguimos detectar alguma banda de absorção referente ao gelo de água, no entanto, o fluxo presente na região de $1,7 \mu m$ (região sem estrutura) é maior que o fluxo na região próxima a $2 \mu m$, colocando este TNO então como um possível candidato, dentre os espectros da nossa amostra, a possuir gelo de água em sua superfície (vide figura 3.16).

4.2.2 Gelo de Metano

Dos objetos da nossa amostra 3 apresentam claras bandas de absorção associadas com o gelo de metano, são eles: 134340 Plutão, 136199 Eris e Tritão.

Na seção 3.2.2 fizemos a comparação do espectro do TNO ressonante 134340 Plutão com o espectro do gelo de metano (vide figura 3.14).

136199 Eris possui 2326 ± 12 km de diâmetro (Lellouch, E. et al., 2013) e é classificado como um TNO destacado. Da literatura, sabe-se que ele possui gelo de metano em sua composição superficial (Brown et al., 2005). Na figura 4.8 fizemos a comparação do espectro de 136199 Eris com o modelo do gelo de metano obtido a partir de constantes ópticas para partículas do tamanho de $40 \mu m$ e, através desta análise, conseguimos reconhecer várias assinaturas deste gelo no referido TNO (vide figura 4.8).

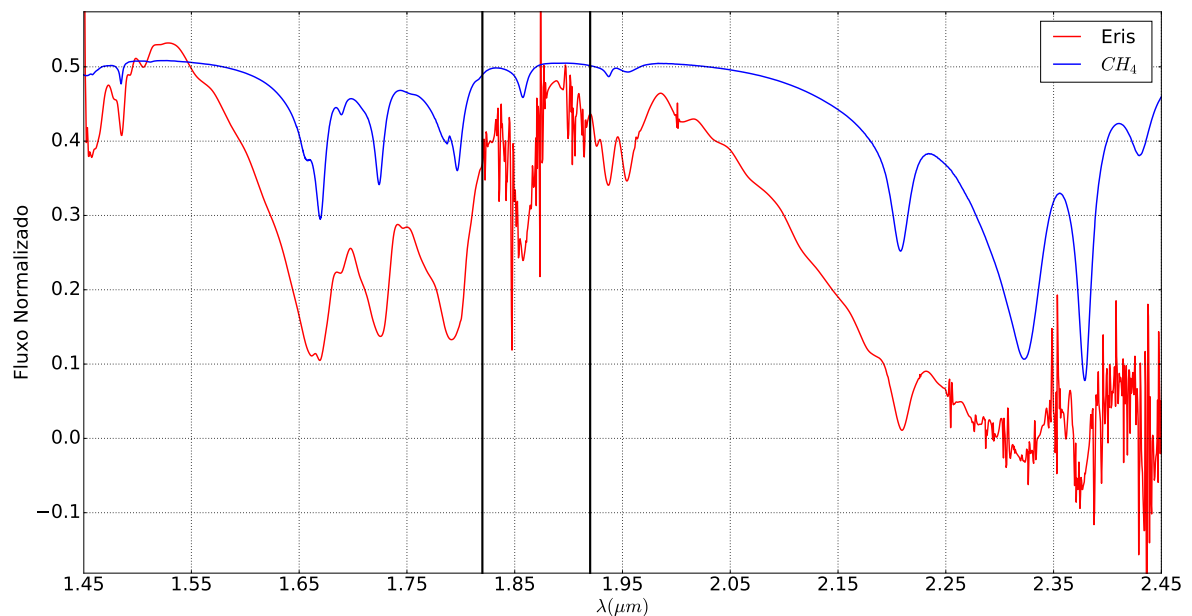


Figura 4.8: O espectro filtrado do TNO 136199 Eris é mostrado na cor vermelha e é comparado com o espectro de gelo de metano mostrado em azul. A região entre barras pretas é a parte do espectro onde a atmosfera mais interage, por isso ela pode ser desconsiderada.

Tritão é um satélite do planeta Netuno e devido ao seu movimento retrógrado, acredita-se que ele tenha sido capturado por Netuno quando já estava completamente formado (Agnor and Hamilton, 2006). A análise espectral presente na literatura da superfície de Tritão mostra que, dentre outros gelos, Tritão também contém metano (Cruikshank et al., 1993) e, através da comparação com o espectro do gelo de metano modelado para partículas de $40 \mu m$ de tamanho, foi possível reconhecer a presença deste gelo no espectro de Tritão da nossa amostra (vide figura 4.9).

4.2.3 Gelo de Metanol

Dos TNOs da nossa amostra, 9 objetos podem possuir gelo de metanol em sua composição. A absorção deste gelo em nossos espectros ocorre nos comprimentos de

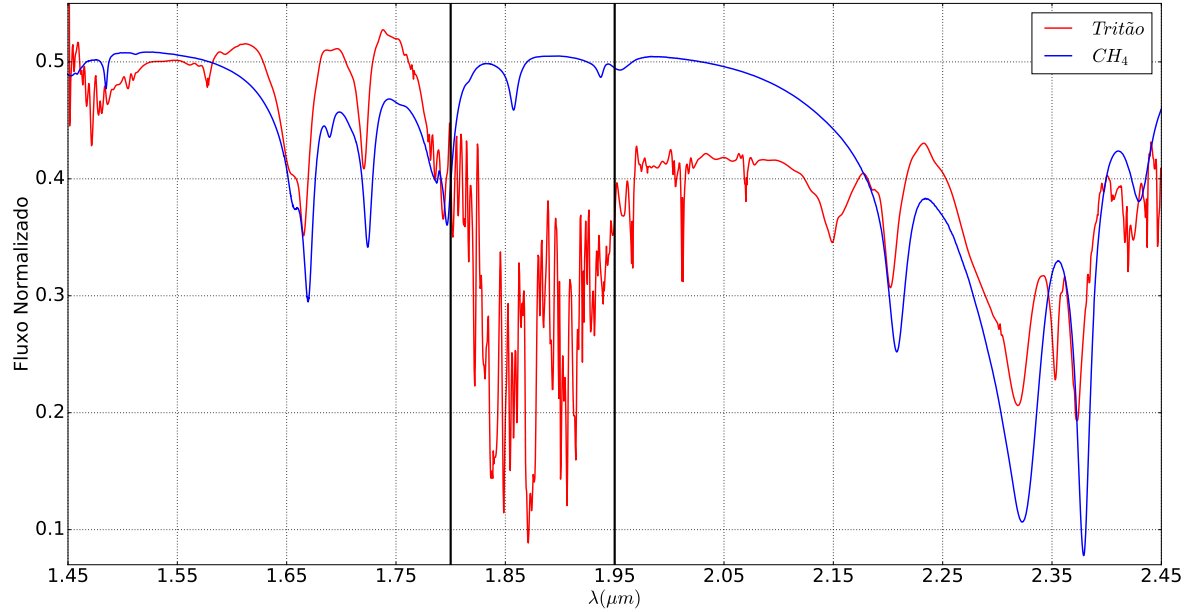


Figura 4.9: O espectro filtrado de Tritão é mostrado na cor vermelha e é comparado com o espectro de gelo de metano mostrado em azul. A região entre barras pretas é a parte do espectro onde a atmosfera mais interage, por isso ela pode ser desconsiderada.

onda além de $2 \mu m$ e nesta região, a quantidade de ruído cresce para os espectros da nossa amostra, pois, como explicado anteriormente, a eficiência do instrumento é menor nesta região. Por este motivo, não afirmamos que estes gelos estão lá mas que existem indícios para que estejam. Os objetos são: 120348 2004 TY₃₆₄, 83982 Crantor, 90482 Orcus, 55637 2002 UX₂₅, 38628 Huya, 5145 Pholus, 307616 2003 QW₉₀, 136108 Haumea e 145453 2005 RR₄₃.

Na seção 3.2.3, fizemos a comparação dos espectros dos objetos 120348 2004 TY₃₆₄ (figura 3.15) e 83982 Crantor (figura 3.16) com o espectro do gelo de metanol.

O TNO 90482 Orcus foi apresentado na seção 4.2.1 e, da literatura, não percebemos indicações de que este TNO possua gelo de metanol em sua composição superficial. No entanto, na comparação de seu espectro com o espectro de metanol, encontramos algumas coincidências na região próxima a $2,3 \mu m$ que poderia indicar a presença deste gelo (vide figura 4.5).

O TNO clássico 55637 2002 UX₂₅ possui 692 ± 23 km de diâmetro (Fornasier, S. et al., 2013). Da literatura, não há indicações de que este TNO possua gelo de metanol em sua superfície (Barkume et al., 2008), no entanto, apesar do ruído presente neste espectro mesmo após a filtragem, conseguimos identificar uma banda de absorção que pode ser devida a sua presença no comprimento de onda próximo a $2,3 \mu m$ (vide figura 4.10).

O TNO 38628 Huya foi apresentado na seção 3.2.1 e ele também não apresenta

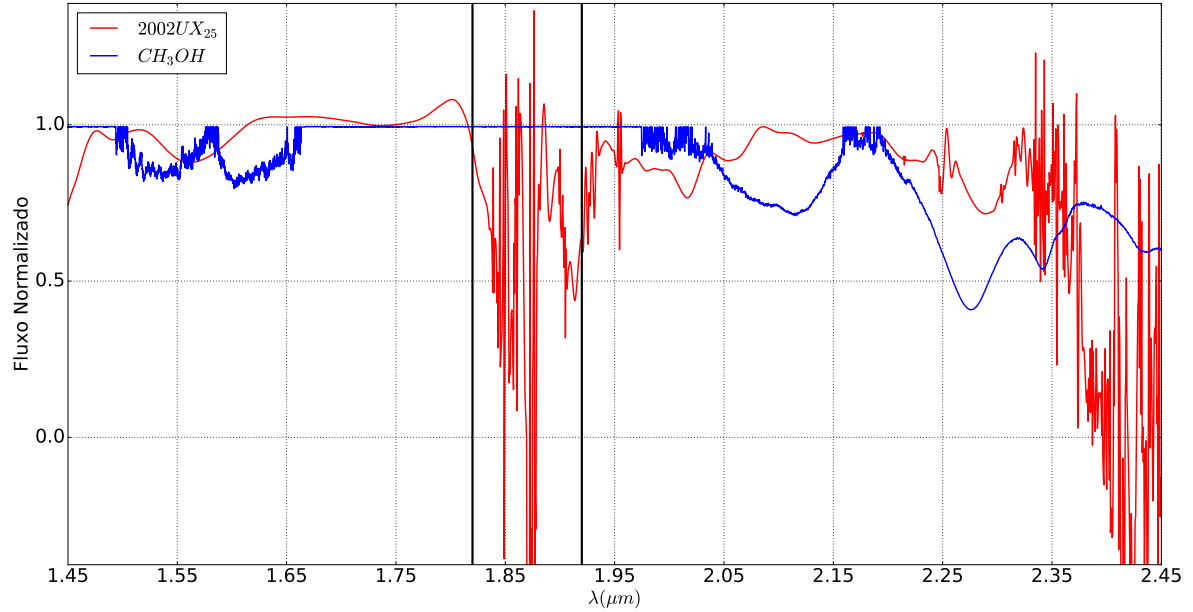


Figura 4.10: O espectro filtrado do TNO 55637 2002 UX₂₅ é mostrado na cor vermelha e é comparado com o espectro do gelo de metanol mostrado em azul. A região entre barras pretas é a parte do espectro onde a atmosfera mais interage, por isso ela pode ser desconsiderada.

indícios de possuir gelo de metanol em sua composição superficial. Ainda assim, na comparação de seu espectro com o modelo de metanol, encontramos algumas estruturas que poderiam ser absorções referentes ao gelo de metanol (vide figura 3.13). No entanto, a quantidade de ruído que ainda se encontra nesta região do espectro, não nos permite afirmar a presença ou ausência deste gelo no referido TNO.

O TNO 5145 Pholus foi apresentado na seção 4.2.1 e de acordo com o trabalho de Merlin et al. (2012), este centauro possui o gelo metanol em sua composição superficial. Apesar da quantidade de ruído próximo a região final do espectro, que é onde ocorre a absorção mais profunda deste gelo, atrapalhar a identificação, é possível notar que a forma do nosso espectro concorda com a forma presente no modelo de metanol (vide figura 4.7), permitindo assim afirmar, a partir da nossa análise, que este objeto possui esse gelo em sua composição superficial.

O TNO clássico 307616 2003 QW₉₀ não possui indicações na literatura de possuir gelo de metanol em sua superfície. No entanto, através da nossa análise, encontramos algumas bandas de absorção na região próxima a 2,3 μm que poderiam ser associadas com a presença de metanol na superfície deste objeto (vide figura 4.11).

136108 Haumea e 145453 2005 RR₄₃ já foram apresentados nas seções 3.2.1 e 4.2.1, respectivamente. Acredita-se que o TNO 145453 2005 RR₄₃ é um membro colisional da família de 136108 Haumea, por isso, acreditamos que a composição

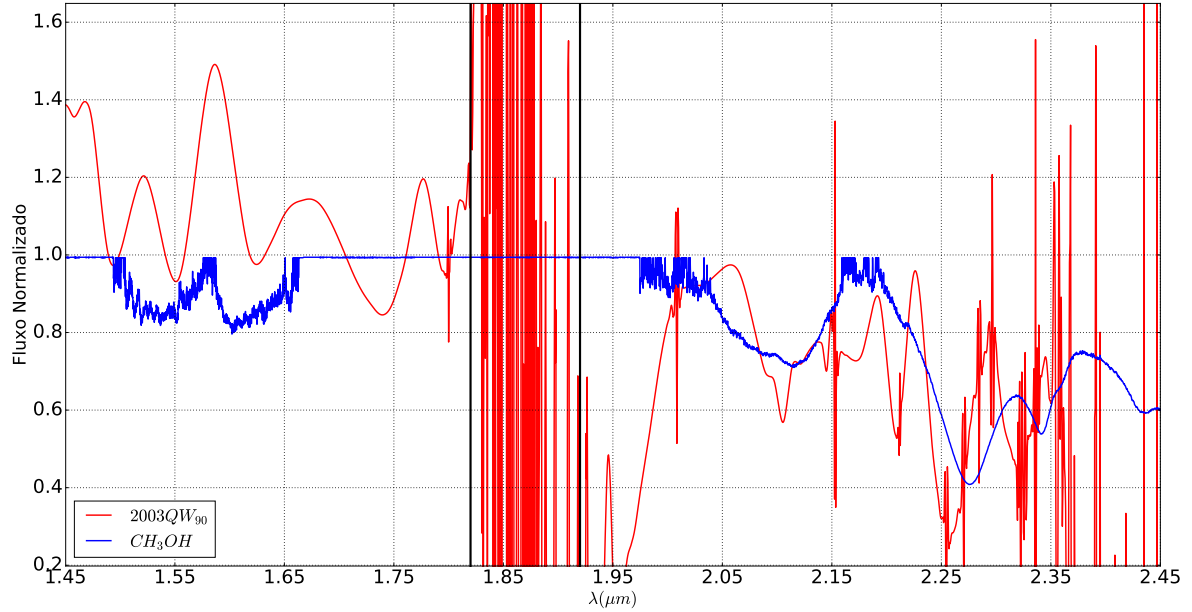


Figura 4.11: O espectro filtrado do TNO 307616 2003 QW₉₀ é mostrado na cor vermelha e é comparado com o espectro do gelo de metanol mostrado em azul. A região entre barras pretas é a parte do espectro onde a atmosfera mais interage, por isso ela pode ser desconsiderada.

deles é similar, sendo a banda de gelo de água em $2,0 \mu m$ comum entre esses objetos. No entanto, quando comparamos esses espectros com o espectro do gelo de metanol, encontramos algumas estruturas na parte final do espectro que poderiam ser associadas com a presença deste gelo ou outros gelos com absorções nesta região do espectro na superfície desses objetos (vide figuras 3.12 e 4.2).

4.3 Distribuição dos gelos

Após as filtragens e comparações, iniciamos o processo de análise da distribuição dos gelos de água, metano e metanol na parte externa do Sistema Solar, a fim de localizar possíveis agrupamentos destes gelos na região transnetuniana. Com esta finalidade, plotamos na figura 4.12 um gráfico de semieixo maior *versus* excentricidade e na figura 4.13, um gráfico de semieixo maior *versus* inclinação incluindo todos os objetos do nosso conjunto de dados. As informações de semieixo, excentricidade e inclinação, foram retiradas do banco de dados do *Astorb* (The Asteroid Orbital Elements Database)¹ e, diâmetro, dos dados publicados pelo programa *TNOs are cool public database*². Como discutido anteriormente, os TNOs pequenos (diâmetros inferiores a 500 km) possuem espectros com bastante ruído e sem bandas de ab-

¹<http://cdsarc.u-strasbg.fr/pub/cats/B/astorb/astorb.html>

²<http://public-tnosarecool.lesia.obspm.fr/Published-results.html>

sorção aparentes enquanto nos TNOs grandes, o reconhecimento e a identificação das estruturas espectrais é mais simples. Por isso, os TNOs grandes e pequenos são representados por símbolos diferentes em nossos gráficos.

Na figura 4.12, é possível notar que a maior parte dos gelos reconhecidos e identificados da nossa amostra, encontram-se próximos a ressonância 3:2 com Netuno. No entanto, não é possível observar uma homogeneidade nos gelos desta ressonância, além do mais, a quantidade de objetos sem estruturas identificadas nesta região é maior que a quantidade de objetos com gelos de água, metano e metanol. Podemos notar também que a maior parte dos objetos que podem ter água em sua composição superficial, possuem excentricidade menor que 0,3 (com exceção de 2 centauros).

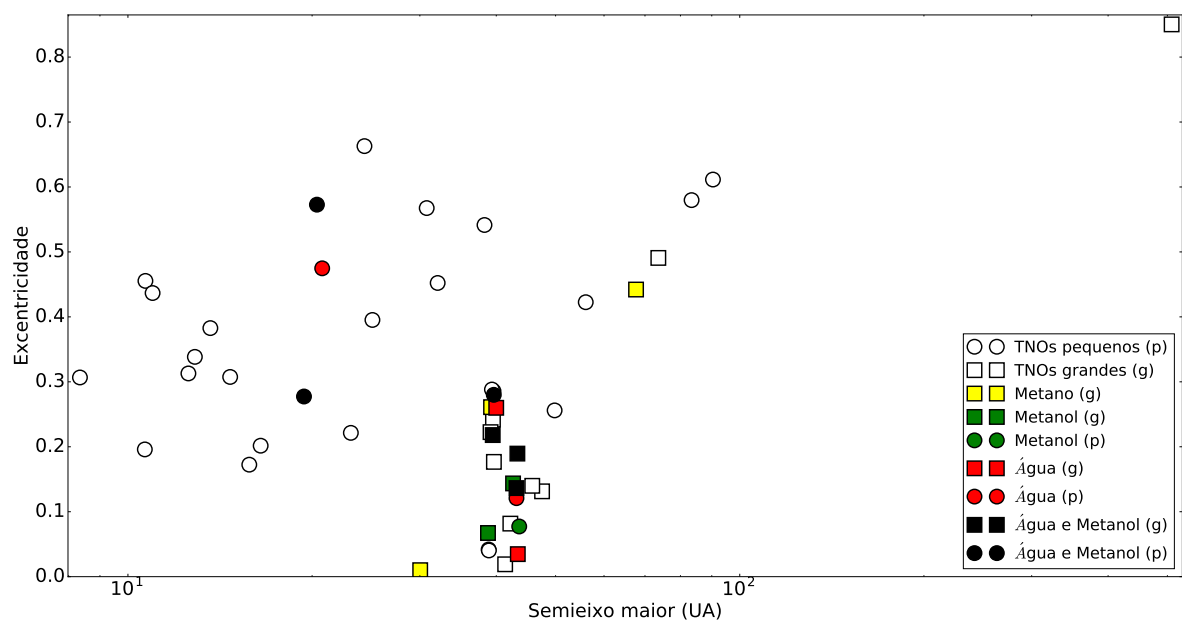


Figura 4.12: Círculos, referem-se a objetos com menos de 500 km de diâmetro e quadrados, aos objetos com mais de 500 km de diâmetro. O preenchimento branco foi atribuído aos objetos que não apresentaram estruturas compatíveis com os gelos comparados; vermelho aos objetos com gelo de metano; azul aos objetos com gelo de metanol; roxo aos objetos com gelo de água e em preto os objetos que possuem gelo de água e gelo de metanol.

A variação de inclinação nos TNOs é ampla, como pode ser observado na figura 4.13. Podemos notar neste gráfico, que os objetos que possuem gelo de água estão aproximadamente no intervalo de inclinações entre 10 e 30° (com exceção de um TNO clássico) como pode ser melhor observado na figura 4.15.

Analisando a distribuição dos gelos individualmente, mostramos nas figuras 4.14 e 4.15, os gráficos de semieixo maior *versus* excentricidade e semieixo maior *versus* inclinação para os TNOs da amostra que possuem pelo menos 1 dos gelos com os quais foram comparados neste trabalho.

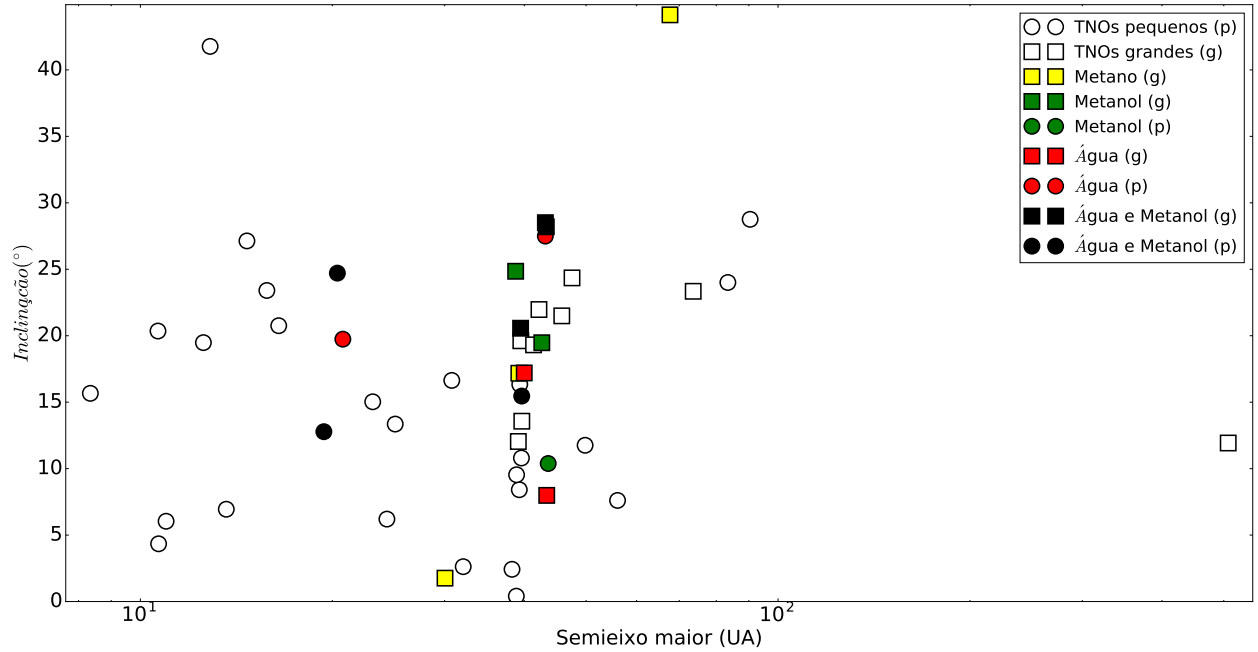


Figura 4.13: Idem à figura 4.12.

Analisando a figura 4.14, notamos que não há agrupamento para o gelo de metano, no entanto, ele está confirmado apenas nos TNOs da nossa amostra com mais de 2000 km de diâmetro. Com exceção de um centauro, todos os objetos que podem possuir gelo de metanol de acordo com a análise realizada neste trabalho, possuem excentricidade menor que 0,3.

A distribuição de inclinação observada para os objetos que podem ter gelo de metanol (figura 4.15), é similar a distribuição de inclinação observada para os TNOs que possuem gelo de água. Dos 9 objetos da nossa amostra que são candidatos a terem gelo de metanol, 6 também possuem gelo de água. Levando em consideração que o intervalo de inclinação e de excentricidade é semelhante para os dois gelos, acreditamos que o gelo de metanol tem mais chances de ser encontrado em objetos que possuem gelo de água em sua composição superficial.

Realizando uma análise do tamanho dos objetos que possuem gelo de água, notamos que este gelo se concentra nos objetos com diâmetros entre 200 e 1240 km, com exceção de 2 centauros, que possuem menos de 100 km de diâmetro (2003 CO₁ e Crantor). O gelo de metanol foi identificado em alguns dos objetos da nossa amostra com diâmetros entre 60 e 1240 km. Esperamos encontrar metanol nos TNOs pois esta molécula é observada na coma dos cometas. Entretanto, não esperamos que esta molécula apareça na superfície de objetos considerados pequenos pois eles não têm tamanho suficiente para reter hidrocarbonetos, acabando por perdê-los em pouco tempo e deixar a superfície avermelhada (Brunetto et al., 2006). Desta forma, o metanol que estamos observando na superfície desses TNOs deve ter sido recen-

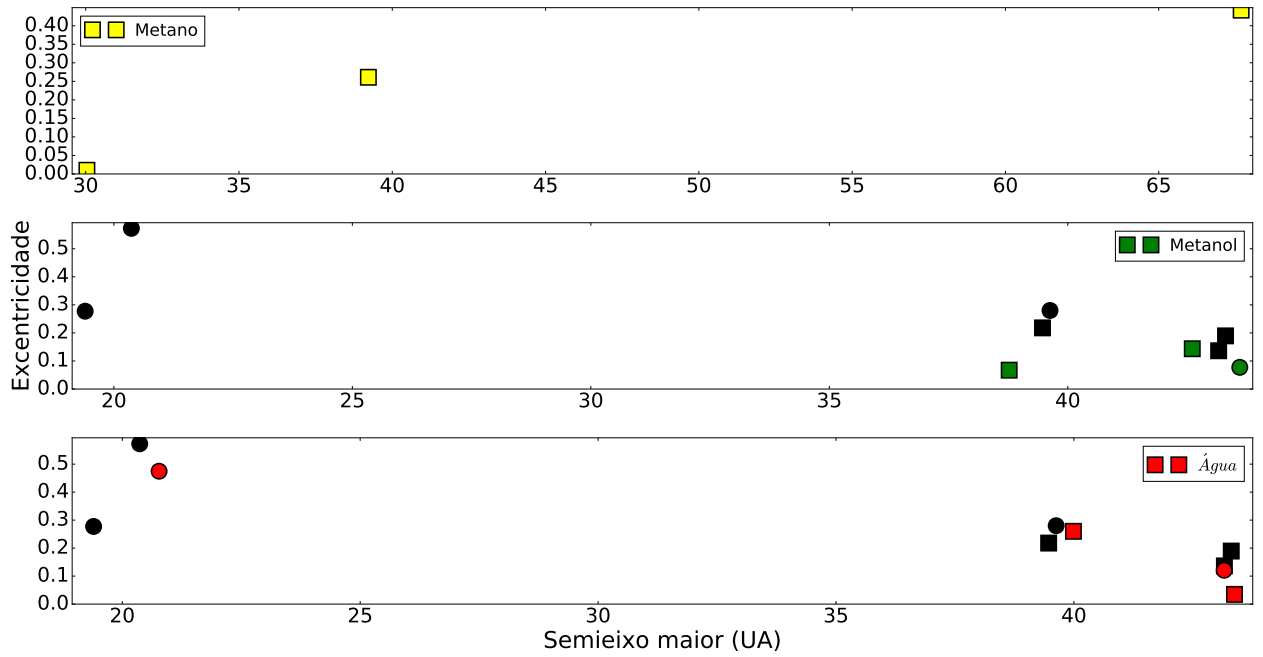


Figura 4.14: Legenda: círculos, referem-se a objetos com menos de 500 km de diâmetro e quadrados, aos objetos com mais de 500 km de diâmetro. O preenchimento vermelho foi atribuído aos objetos com gelo de metano; azul aos objetos com gelo de metanol; roxo aos objetos com gelo de água e em preto os objetos que possuem gelo de água e gelo de metanol.

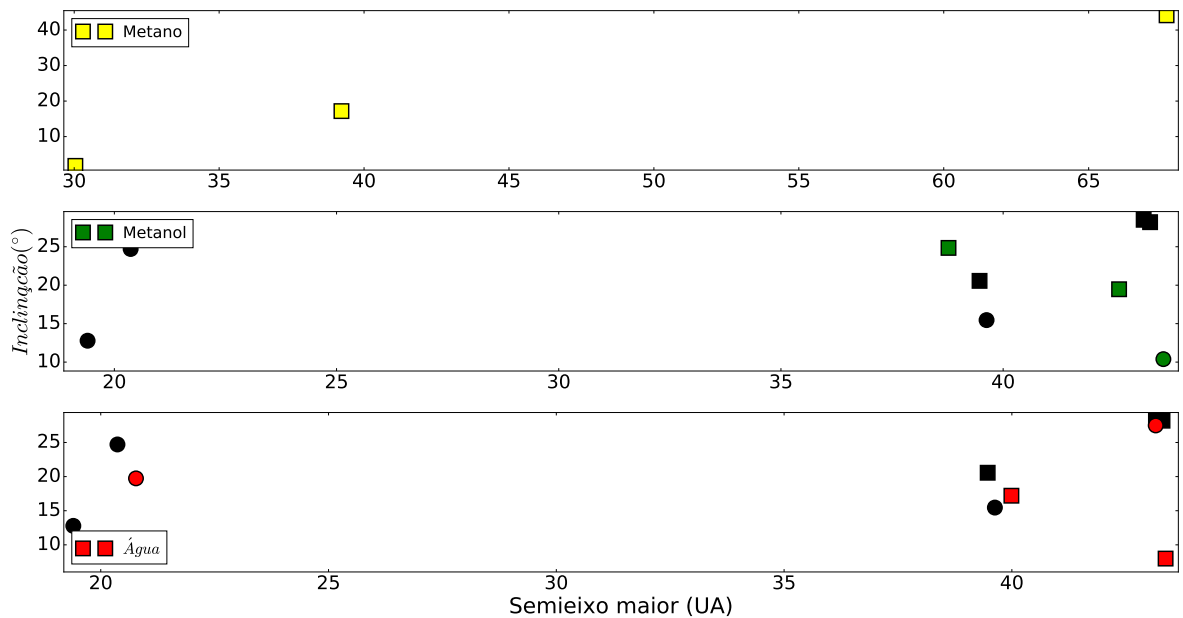


Figura 4.15: Idem à figura 4.14.

temente exposto por algum mecanismo que revelou alguma camada mais interna. No caso de 2005 RR₄₃, estimamos que a detecção de metanol em sua superfície é possivelmente causada por um evento colisional, o que é muito interessante pois da

mesma maneira que existe indícios de haver metanol nele, existe o mesmo indício para Haumea. No entanto, mais dados são necessários para podermos afirmar a presença do metanol na família colisional de Haumea. Como dito anteriormente, o gelo de metano só apareceu nos objetos da nossa amostra com mais de 2000 km de diâmetro, esse resultado não nos surpreende pois o hidrogênio é facilmente retido por objetos grandes.

Capítulo 5

Conclusão e Considerações Finais

Neste trabalho apresentamos uma análise de 50 espectros de objetos transnetunianos que foram obtidos com o espectrógrafo SINFONI do VLT/ESO entre 2007 e 2008. A maior parte dos espectros que compunham a amostra possuíam baixa relação sinal ruído, por conta disto, foi necessário utilizar algumas técnicas de filtragem para eliminar a maior quantidade possível de ruído sem modificar as estruturas principais, que seriam analisadas posteriormente quando comparadas com espectros de gelos com a finalidade de identificar os materiais que compõem a superfície dos TNOs.

Testamos algumas técnicas de filtragem para tentar reduzir a quantidade de ruído dos espectros, elas foram: *Rebinning*, o *Runing Box*, a Transformada de Fourier e as *Wavelets*. O *Rebinning* e o *Runing Box* deformaram e mudaram a posição das bandas de absorção enquanto a Transformada de Fourier incluiu estruturas nos nossos dados, por isso, elas não foram escolhidas para continuar o tratamento. Optamos por utilizar as *wavelets*, que são funções capazes de decompor, descrever ou representar uma série de dados em uma base que facilita a análise do sinal em diferentes escalas. Esta ferramenta mostrou-se poderosa para a remoção do ruído dos espectros sem alterar a posição e a forma das bandas de absorção, por isto, optamos por ela para dar continuidade ao trabalho.

Após a filtragem dos espectros, iniciamos o processo de comparação dos espectros filtrados da amostra com os espectros obtidos através de constantes ópticas medidas em laboratório para os gelos de água, metano e metanol, a fim de identificá-los ou reconhecê-los nos TNOs da nossa amostra. Na tabela 5.1, mostramos o resultado das comparações indicando o nome do objeto, o gelo que ele possui em sua composição superficial (símbolo: +) e, se existe indício da presença de outro tipo de gelo, necessitando de dados de melhor qualidade para realizar a confirmação (símbolo: *) considerando apenas o resultado da nossa análise.

Então, dos 50 objetos analisados, 10 possuem gelo de água, 9 possuem gelo de metanol e 3 possuem gelo de metano em sua composição superficial. Analisando a

Tabela 5.1: Resultados das comparações

Objeto	Gelo(s)
5145 Pholus	H ₂ O(+), CH ₃ OH(+)
19308 1996 TO ₆₆	H ₂ O(+),
38628 Huya	H ₂ O(*), CH ₃ OH(*)
50000 Quaoar	H ₂ O(+)
55637 2002 UX ₂₅	CH ₃ OH(+)
83982 Crantor	H ₂ O(*), CH ₃ OH(+)
90482 Orcus	H ₂ O(+), CH ₃ OH(*)
120061 2003 CO ₁	H ₂ O(*)
120348 2004 TY ₃₆₄	CH ₃ OH(+)
134340 Plutão	CH ₄ (+)
136108 Haumea	H ₂ O(+), CH ₃ OH(*), NH ₃ OH(*)
136199 Eris	CH ₄ (+)
145453 2005 RR ₄₃	H ₂ O(+), CH ₃ OH(*)
307616 2003 QW ₉₀	CH ₃ OH(*)
Caronte	H ₂ O(+)
Tritão	CH ₄ (+)

distribuição destes gelos na região transnetuniana através de gráficos de semieixo *versus* excentricidade e semieixo *versus* inclinação, foi possível notar que os objetos que possuem gelo de água e gelo de metanol ocupam o mesmo intervalo de excentricidade e inclinação, sugerindo que os candidatos a possuir gelo de metanol, também devem possuir gelo de água, como observado para 4 objetos da nossa amostra, que possuem os dois gelos. Infelizmente, para alguns dos TNOs pequenos da nossa amostra, não foi possível identificar os gelos de estudo em sua composição superficial, pois eles possuem baixa relação sinal ruído e menos estruturas nos espectros, mesmo quando observados com um telescópio de grande porte.

Em suma, neste trabalho vimos que mesmo utilizando dados dos maiores e melhores telescópios do mundo, a informação que podemos utilizar ainda é limitada devido ao pouco brilho aparente dos TNOs. Utilizando técnicas de filtragem, nós tentamos extrair a informação subjacente ao ruído e assim poder entender um pouco mais da distribuição de gelos, especialmente aqueles que possuem pequenas bandas de absorção, no Sistema Solar exterior. Esperamos que no futuro, com o advento de novos instrumentos e telescópios terrestres, como o *European Extremely Large Telescope* e o *Giant Magellan Telescope*, ou a partir do espaço, como o *James Webb Space Telescope*, nós possamos confirmar algumas das detecções feitas neste trabalho, assim como estender nosso conhecimento a objetos menores, que hoje são praticamente impossíveis de se observarem.

Em um futuro próximo, continuaremos utilizando a técnica *wavelets* pra filtrar espectros pois esta técnica alcançou os objetivos traçados para a amostra utilizada

neste trabalho. Pretendemos também obter espectros dos TNOs que conseguiram reter metano em sua composição superficial, a princípio, Eris, Tritão e Plutão, que foram confirmados nesta dissertação e Sedna e Quaoar, que não foram confirmados neste trabalho. Desta forma, todo o conhecimento construído no decorrer do mestrado, será utilizado para o doutorado.

Referências Bibliográficas

- Agnor, C. B. and Hamilton, D. P. (2006). Neptune’s capture of its moon Triton in a binary–planet gravitational encounter. *Nature*, 441(7090):192–194.
- Alvarez-Candal, A., Barucci, M., Merlin, F., Guilbert, A., and de Bergh, C. (2007). A search for rotational variations on transneptunian objects. *Astronomy & Astrophysics*, 475(1):369–374.
- Barkume, K., Brown, M., and Schaller, E. (2008). Near-infrared spectra of Centaurs and Kuiper belt objects. *The Astronomical Journal*, 135(1):55.
- Barucci, M., Alvarez-Candal, A., Merlin, F., Belskaya, I., De Bergh, C., Perna, D., DeMeo, F., and Fornasier, S. (2011). New insights on ices in Centaur and Transneptunian populations. *Icarus*, 214(1):297–307.
- Barucci, M. A., Alvarez-Candal, A., Belskaya, I., de Bergh, C., DeMeo, F., Dotto, E., Fornasier, S., Merlin, F., Perna, D., de Paris, O., et al. (2010). The Outer Frontiers of the Solar System: Trans-Neptunian Objects and Centaurs. *The Messenger*, 141:15–19.
- Barucci, M. A., Boehnhardt, H., Cruikshank, D., and Morbidelli, A. (2008). The Solar System beyond Neptune: overview and perspectives. *The Solar System Beyond Neptune*, 1:3–10.
- Barucci, M. A., Brown, M. E., Emery, J. P., and Merlin, F. (2008). *Composition and Surface Properties of Transneptunian Objects and Centaurs*, pages 143–160.
- Braga-Ribas, F., Sicardy, B., Ortiz, J. L., Lellouch, E., Tancredi, G., Lecacheux, J., Vieira-Martins, R., Camargo, J. I. B., Assafin, M., Behrend, R., Vachier, F., Colas, F., Morales, N., Maury, A., Emilio, M., Amorim, A., Unda-Sanzana, E., Roland, S., Bruzzone, S., Almeida, L. A., Rodrigues, C. V., Jacques, C., Gil-Hutton, R., Vanzi, L., Milone, A. C., Schoenell, W., Salvo, R., Almenares, L., Jehin, E., Manfroid, J., Sposetti, S., Tanga, P., Klotz, A., Frappa, E., Cacella, P., Colque, J. P., Neves, C., Alvarez,

- E. M., Gillon, M., Pimentel, E., Giacchini, B., Roques, F., Widemann, T., Magalhães, V. S., Thirouin, A., Duffard, R., Leiva, R., Toledo, I., Capeche, J., Beisker, W., Pollock, J., Montaña, C. E. C., Ivarsen, K., Reichart, D., Haislip, J., and Lacluyze, A. (2013). The Size, Shape, Albedo, Density, and Atmospheric Limit of Transneptunian Object (50000) Quaoar from Multi-chord Stellar Occultations. *The Astrophysical Journal*, 773(1):26.
- Brown, M., Trujillo, C., and Rabinowitz, D. (2005). Discovery of a planetary-sized object in the scattered Kuiper belt. *The Astrophysical Journal Letters*, 635(1):L97.
- Brown, M. E. (2012). The Compositions of Kuiper Belt Objects. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 40:467–494.
- Brown, M. E., Barkume, K. M., Ragozzine, D., and Schaller, E. L. (2007). A collisional family of icy objects in the Kuiper belt. *Nature*, 446(7133):294–296.
- Brown, M. E. and Calvin, W. M. (2000). Evidence for crystalline water and ammonia ices on Pluto’s satellite Charon. *Science*, 287(5450):107–109.
- Brown, R. H., Cruikshank, D. P., and Pendleton, Y. (1999). Water ice on Kuiper belt object 1996 TO66. *The Astrophysical Journal Letters*, 519(1):L101.
- Brunetto, R., Barucci, M., Dotto, E., and Strazzulla, G. (2006). Ion irradiation of frozen methanol, methane, and benzene: Linking to the colors of centaurs and trans-neptunian objects. *The Astrophysical Journal*, 644(1):646.
- Clark, R. N., Carlson, R., Grundy, W., and Noll, K. (2013). Observed ices in the Solar System. In *The Science of Solar System Ices*, pages 3–46. Springer.
- Cook, J. C., Desch, S. J., Roush, T. L., Trujillo, C. A., and Geballe, T. (2007). Near-infrared spectroscopy of Charon: Possible evidence for cryovolcanism on Kuiper belt objects. *The Astrophysical Journal*, 663(2):1406.
- Cooper, J. F., Christian, E. R., Richardson, J. D., and Wang, C. (2004). Proton irradiation of Centaur, Kuiper Belt, and Oort Cloud objects at plasma to cosmic ray energy. In *The First Decadal Review of the Edgeworth-Kuiper Belt*, pages 261–277. Springer.
- Croft, S., Lunine, J., and Kargel, J. (1988). Equation of state of ammonia-water liquid: Derivation and planetological applications. *Icarus*, 73(2):279–293.

- Cruikshank, D., Roush, T., Bartholomew, M., Geballe, T., Pendleton, Y., White, S., Bell, J., Davies, J., Owen, T., De Bergh, C., et al. (1998). The composition of centaur 5145 Pholus. *Icarus*, 135(2):389–407.
- Cruikshank, D. P., Roush, T. L., Owen, T. C., Geballe, T. R., de Bergh, C., Schmitt, B., Brown, R. H., and Bartholomew, M. J. (1993). Ices on the surface of Triton. *Science*, 261(5122):742–745.
- Dalle Ore, C. Morea, Barucci, M. A., Emery, J. P., Cruikshank, D. P., Dalle Ore, L. V., Merlin, F., Alvarez-Candal, A., de Bergh, C., Trilling, D. E., Perna, D., Fornasier, S., Mastrapa, R. M. E., and Dotto, E. (2009). Composition of KBO (50000) Quaoar. *A&A*, 501(1):349–357.
- de Bergh, C., Schaller, E., Brown, M., Brunetto, R., Cruikshank, D., and Schmitt, B. (2013). The ices on transneptunian objects and Centaurs. In *The Science of Solar System Ices*, pages 107–146. Springer.
- Doressoundiram, A., Barucci, M., Tozzi, G., Poulet, F., Boehnhardt, H., De Bergh, C., and Peixinho, N. (2005). Spectral characteristics and modeling of the trans-neptunian object (55565) 2002 AW 197 and the Centaurs (55576) 2002 GB 10 and (83982) 2002 GO 9: ESO Large Program on TNOs and Centaurs. *Planetary and Space Science*, 53(14):1501–1509.
- Doressoundiram, A., Boehnhardt, H., Tegler, S. C., and Trujillo, C. (2008). Color properties and trends of the transneptunian objects. *The Solar System Beyond Neptune*, 91.
- Duffard, R., Pinilla-Alonso, N., Santos-Sanz, P., Vilenius, E., Ortiz, J. L., Mueller, T., Fornasier, S., Lellouch, E., Mommert, M., Pal, A., Kiss, C., Mueller, M., Stansberry, J., Delsanti, A., Peixinho, N., and Trilling, D. (2014). “TNOs are Cool”: A survey of the trans-Neptunian region. *A&A*, 564:A92.
- Edgeworth, K. (1949). The origin and evolution of the solar system. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 109(5):600–609.
- Eisenhauer, F., Abuter, R., Bickert, K., Biancat-Marchet, F., Bonnet, H., Brynneel, J., Conzelmann, R. D., Delabre, B., Donaldson, R., Farinato, J., et al. (2003). SINFONI-Integral field spectroscopy at 50 milli-arcsecond resolution with the ESO VLT. In *Astronomical Telescopes and Instrumentation*, pages 1548–1561. International Society for Optics and Photonics.
- Fernández, J. A. (1980). On the existence of a comet belt beyond Neptune. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 192(3):481–491.

- Fornasier, S., Dotto, E., Barucci, M., and Barbieri, C. (2004). Water ice on the surface of the large TNO 2004 DW. *Astronomy & Astrophysics*, 422(2):L43–L46.
- Fornasier, S., Lellouch, E., Müller, T., Santos-Sanz, P., Panuzzo, P., Kiss, C., Lim, T., Mommert, M., Bockelée-Morvan, D., Vilenius, E., Stansberry, J., Tozzi, G. P., Mottola, S., Delsanti, A., Crovisier, J., Duffard, R., Henry, F., Lacerda, P., Barucci, A., and Gicquel, A. (2013). TNOs are Cool: A survey of the trans-Neptunian region. *A&A*, 555:A15.
- Garrod, R. T. and Pauly, T. (2011). On the Formation of CO₂ and Other Interstellar Ices. *The Astrophysical Journal*, 735(1):15.
- Gladman, B., Marsden, B. G., and VanLaerhoven, C. (2008). Nomenclature in the outer Solar System. *The Solar System Beyond Neptune*, 43.
- Grundy, W., Buie, M., and Spencer, J. (2002). Spectroscopy of Pluto and Triton at 3-4 microns: Possible evidence for wide distribution of nonvolatile solids. *The Astronomical Journal*, 124(4):2273.
- Grundy, W. and Schmitt, B. (1998). The temperature-dependent near-infrared absorption spectrum of hexagonal ice. *J. Geophys. Res.*, 103:25809–25822.
- Hapke, B. (1981). Bidirectional reflectance spectroscopy: 1. Theory. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012)*, 86(B4):3039–3054.
- Hobbs, P. V. (1974). Ice physics. *Oxford: Clarendon Press, 1974*, 1.
- Irwin, M., Tremaine, S., and Zytlow, A. N. (1995). A search for slow-moving objects and the luminosity function of the Kuiper belt. *The Astronomical Journal*, 110:3082.
- Jewitt, D. and Luu, J. (1993). Discovery of the candidate Kuiper belt object 1992 QB₁. *Nature*, 362:730–732.
- Kim, C. S. M. S.-W. (2013). Progress in Pattern Recognition, Image Analysis, Computer Vision, and Applications.
- Kuiper, G. P. (1951). On the origin of the solar system. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 37(1):1.
- Lellouch, E., Santos-Sanz, P., Lacerda, P., Mommert, M., Duffard, R., Ortiz, J. L., Müller, T. G., Fornasier, S., Stansberry, J., Kiss, Cs., Vilenius, E., Mueller, M., Peixinho, N., Moreno, R., Groussin, O., Delsanti, A., and

- Harris, A. W. (2013). “TNOs are Cool”: A survey of the trans-Neptunian region. *A&A*, 557:A60.
- Mastrapa, R. M., Grundy, W. M., and Gudipati, M. S. (2013). Amorphous and Crystalline H₂O-Ice. In *The Science of Solar System Ices*, pages 371–408. Springer.
- Merlin, F., Quirico, E., Barucci, M., and De Bergh, C. (2012). Methanol ice on the surface of minor bodies in the solar system. *Astronomy & Astrophysics*, 544:A20.
- Mommert, M., Harris, A., Kiss, C., Pál, A., Santos-Sanz, P., Stansberry, J., Del-santi, A., Vilenius, E., Müller, T., Peixinho, N., et al. (2012). TNOs are cool: A survey of the trans-Neptunian region-V. Physical characterization of 18 Plutinos using Herschel-PACS observations. *Astronomy & Astrophysics*, 541:A93.
- Person, M. J., Elliot, J. L., Gulbis, A. A. S., Pasachoff, J. M., Babcock, B. A., Souza, S. P., and Gangestad, J. (2006). Charon’s Radius and Density from the Combined Data Sets of the 2005 July 11 Occultation. *The Astronomical Journal*, 132(4):1575.
- Quirico, E. and Schmitt, B. (1997). Near-infrared spectroscopy of simple hydrocarbons and carbon oxides diluted in solid N₂ and as pure ices: Implications for Triton and Pluto. *Icarus*, 127(2):354–378.
- Schaller, E. L. and Brown, M. (2007). Volatile loss and retention on Kuiper belt objects. *The Astrophysical Journal Letters*, 659(1):L61.
- Schmitt, B., Quirico, E., Trotta, F., and Grundy, W. (1998). Optical properties of ices from UV to infrared. In *Solar System Ices*, pages 199–240. Springer.
- Stern, S. (1992). The Pluto-Charon system. *Annual review of astronomy and astrophysics*, 30:185–233.
- Strazzulla, G. and Palumbo, M. E. (1998). Evolution of icy surfaces: An experimental approach. *Planetary and space science*, 46(9):1339–1348.
- Tegler, S. C., Bauer, J. M., Romanishin, W., and Peixinho, N. (2008). Colors of centaurs. *The Solar System Beyond Neptune*. Univ. of Arizona Press, Tucson, AZ, USA, pages 105–114.
- Tombaugh, C. W. (1946). The Search for the Ninth Planet, Pluto. *Astronomical Society of the Pacific Leaflets*, 5(209):73.

- Trujillo, C. A., Brown, M. E., Barkume, K. M., Schaller, E. L., and Rabinowitz, D. L. (2007). The surface of 2003 EL61 in the near-infrared. *The Astrophysical Journal*, 655(2):1172.
- Wada, A., Mochizuki, N., and Hiraoka, K. (2006). Methanol Formation from Electron-irradiated Mixed H₂O/CH₄ Ice at 10 K. *The Astrophysical Journal*, 644(1):300.

Apêndice A

Espectros Filtrados

A.1 2060 Chiron

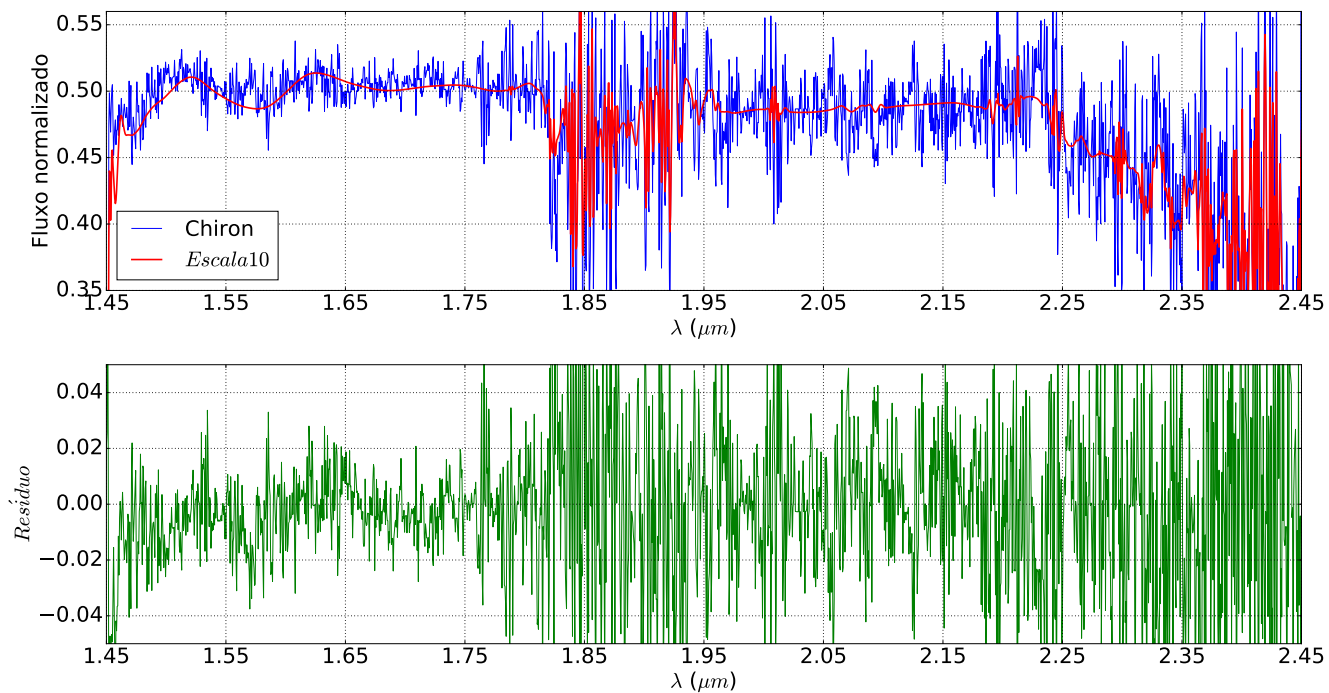


Figura A.1: Espectro do centauro 2060 Chiron (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 10*.

A.2 5145 Pholus

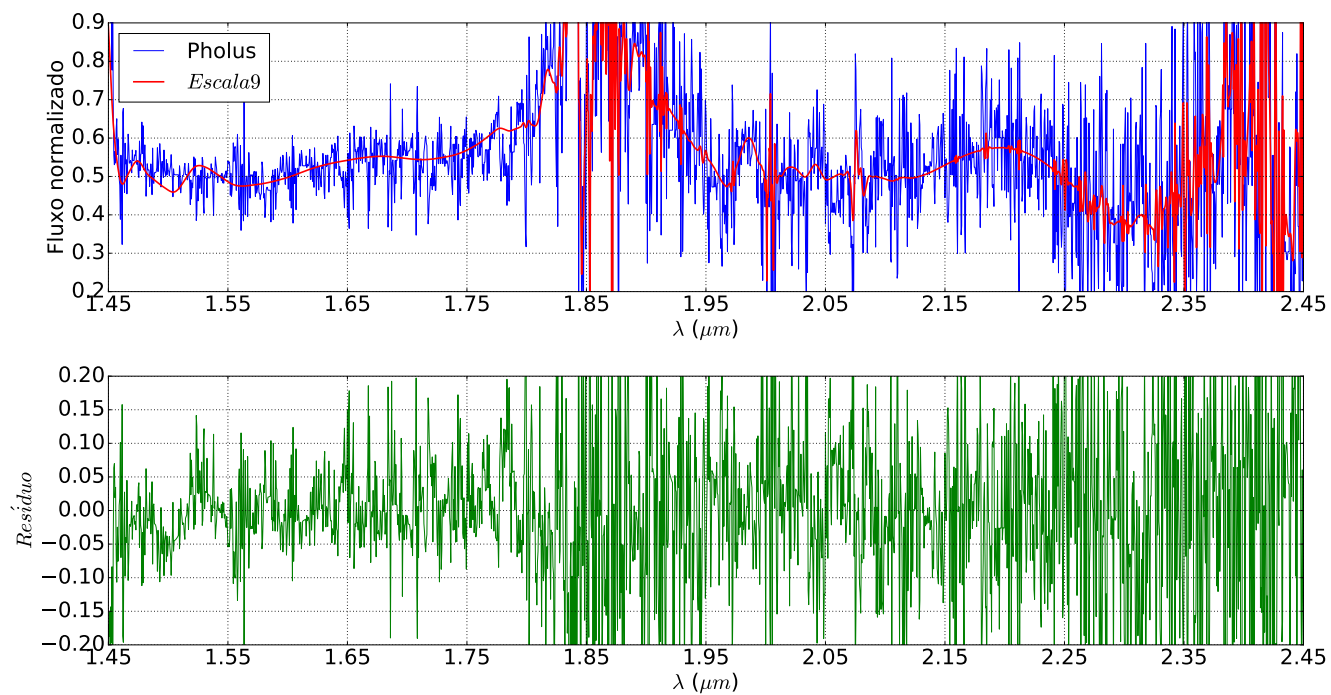


Figura A.2: Espectro do centauro 5145 Pholus (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 9*.

A.3 10199 Chariklo

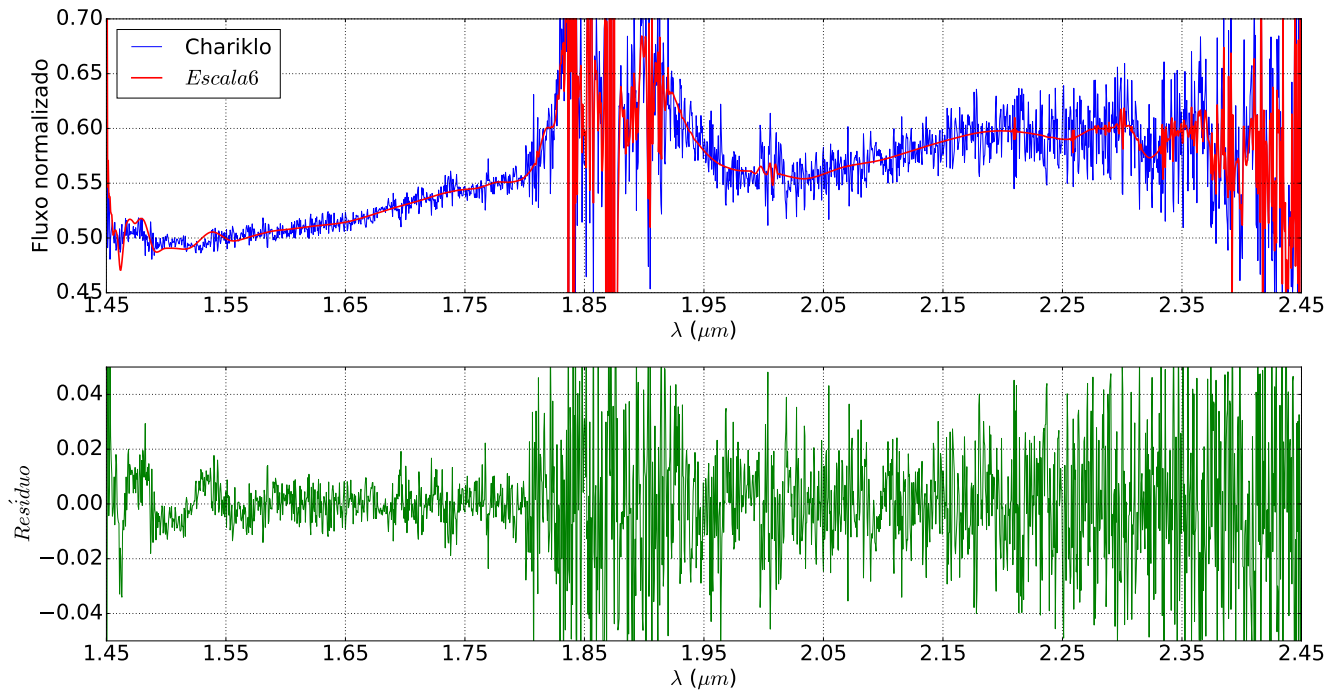


Figura A.3: Espectro do centauro 10199 Chariklo (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 6*. Este espectro é a soma de dois espectros do mesmo objeto obtidos em datas diferentes com o objetivo de reduzir a quantidade de ruído.

A.4 15874 1996 TL₆₆

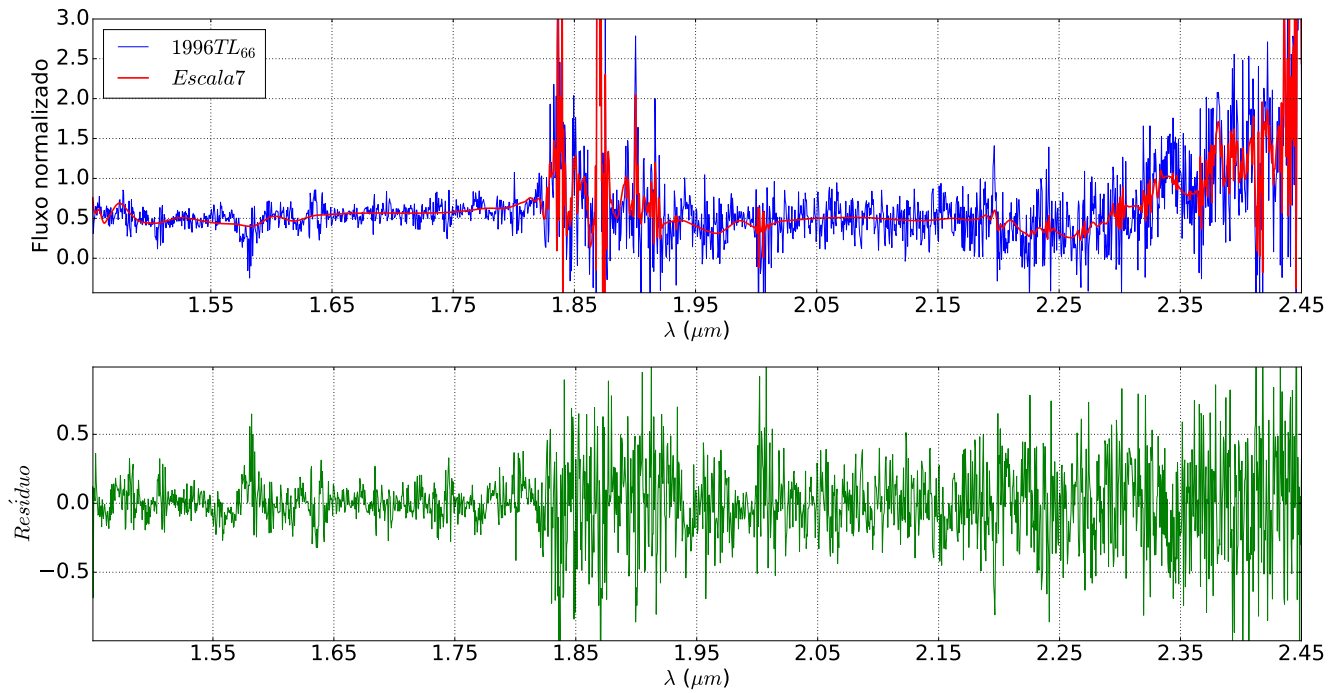


Figura A.4: Espectro do TNO espalhado 15874 1996TL₆₆ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 7*, de acordo com o critério de escolha adotado neste trabalho. Este espectro é a soma de dois espectros do mesmo objeto obtidos em datas diferentes com o objetivo de reduzir a quantidade de ruído.

A.5 19308 1996 TO₆₆

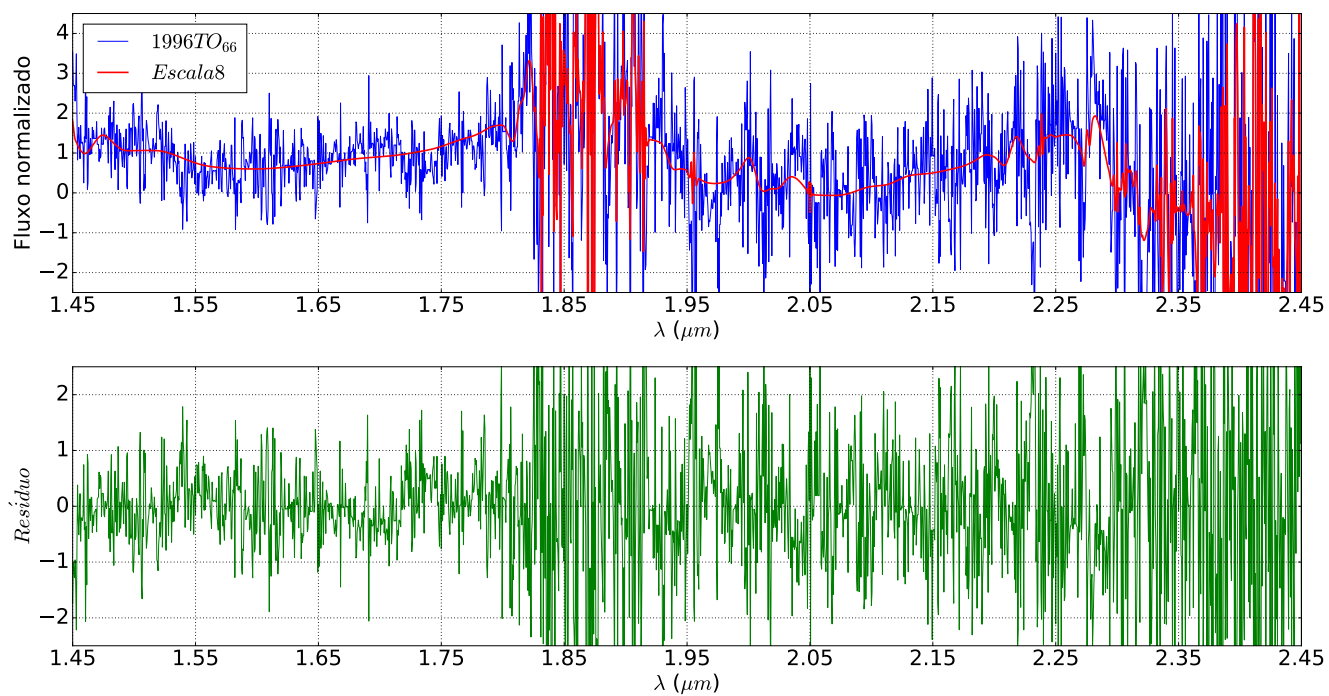


Figura A.5: Espectro do TNO clássico 19308 1996 TO₆₆ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 8*.

A.6 26375 1999 DE₉

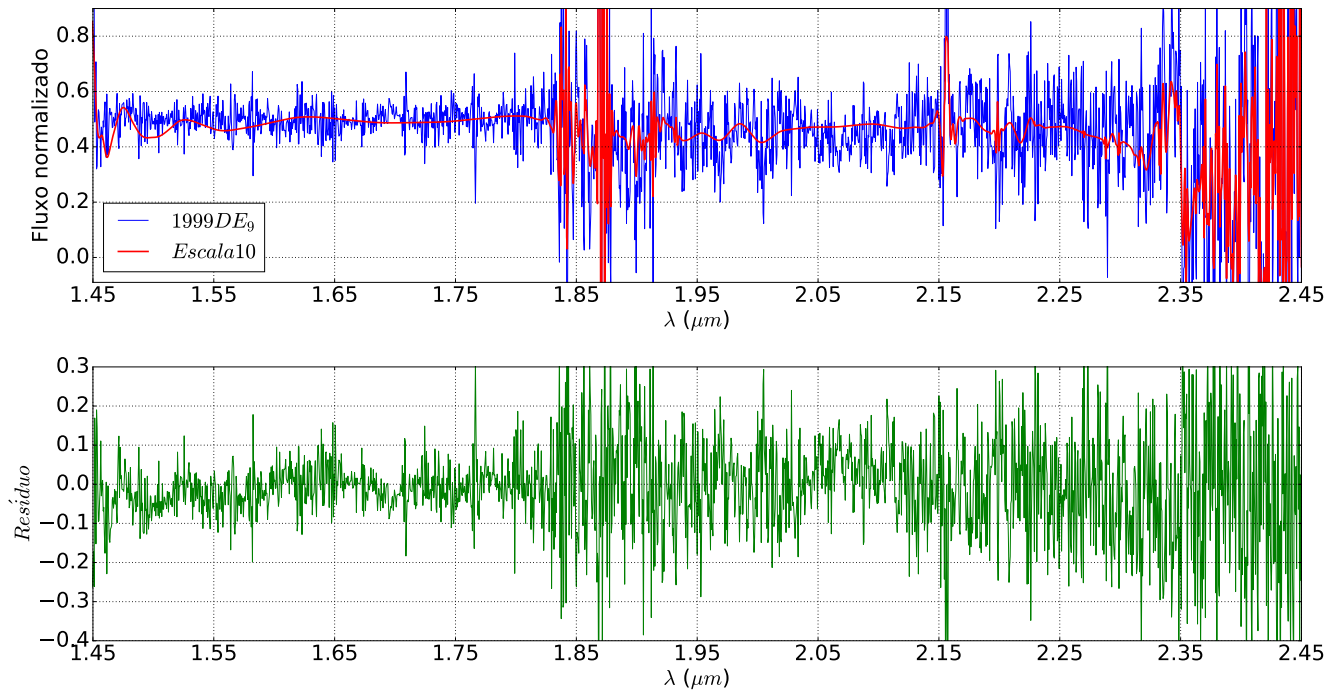


Figura A.6: Espectro do TNO ressonante 26375 1999 DE₉ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 10*. Este espectro é a soma de dois espectros do mesmo objeto obtidos em datas diferentes com o objetivo de reduzir a quantidade de ruído.

A.7 28978 Ixion

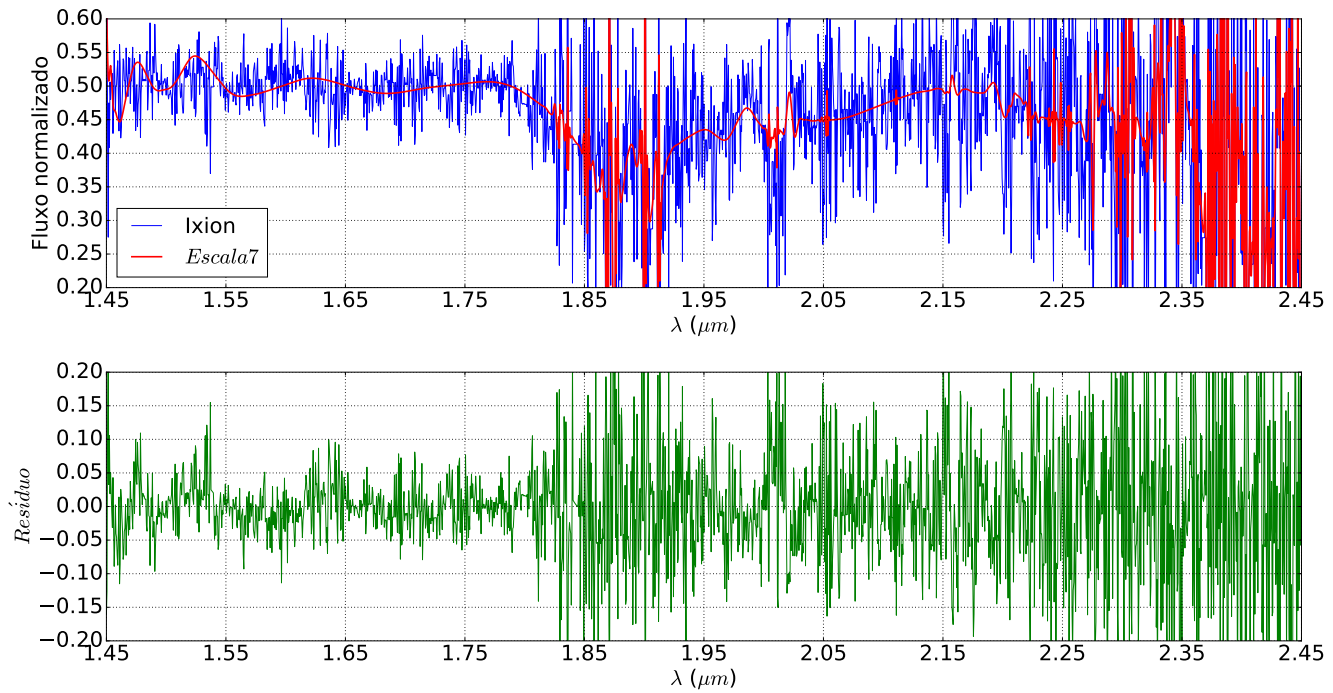


Figura A.7: Espectro do TNO ressonante 28978 Ixion (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 7*.

A.8 32532 Thereus

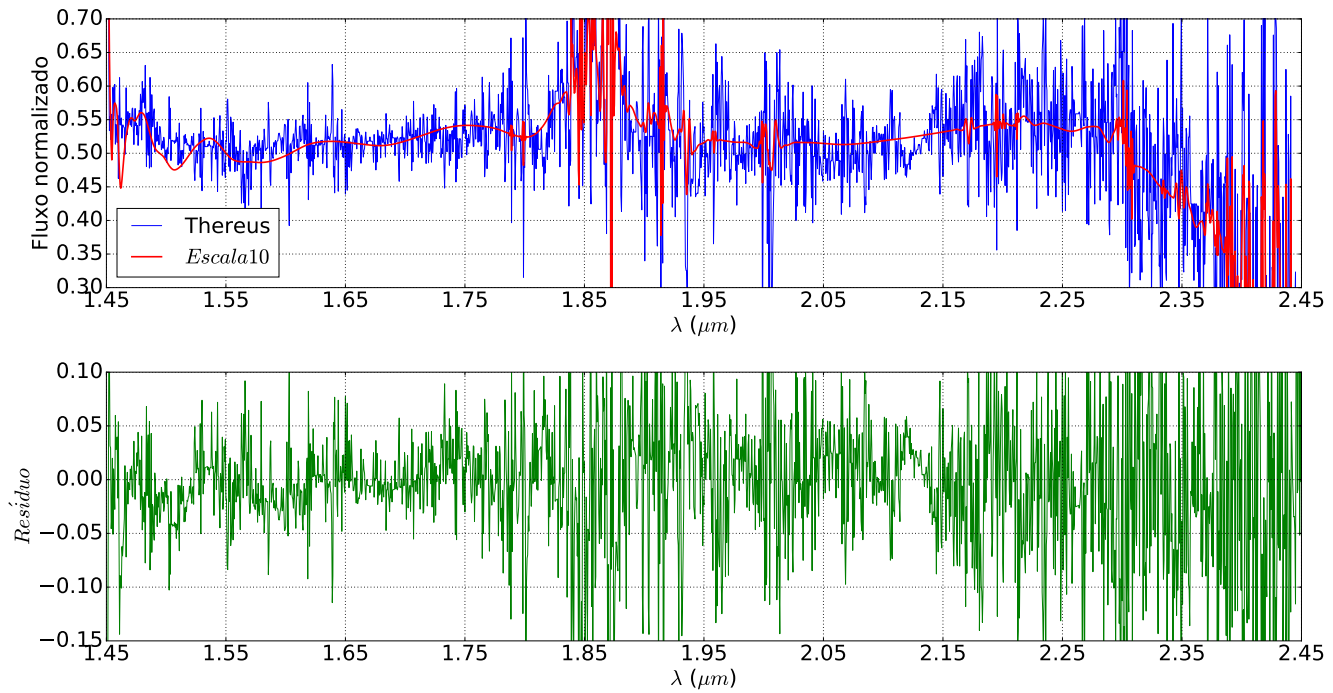


Figura A.8: Espectro do centauro 32532 Thereus (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 10*.

A.9 38628 Huya

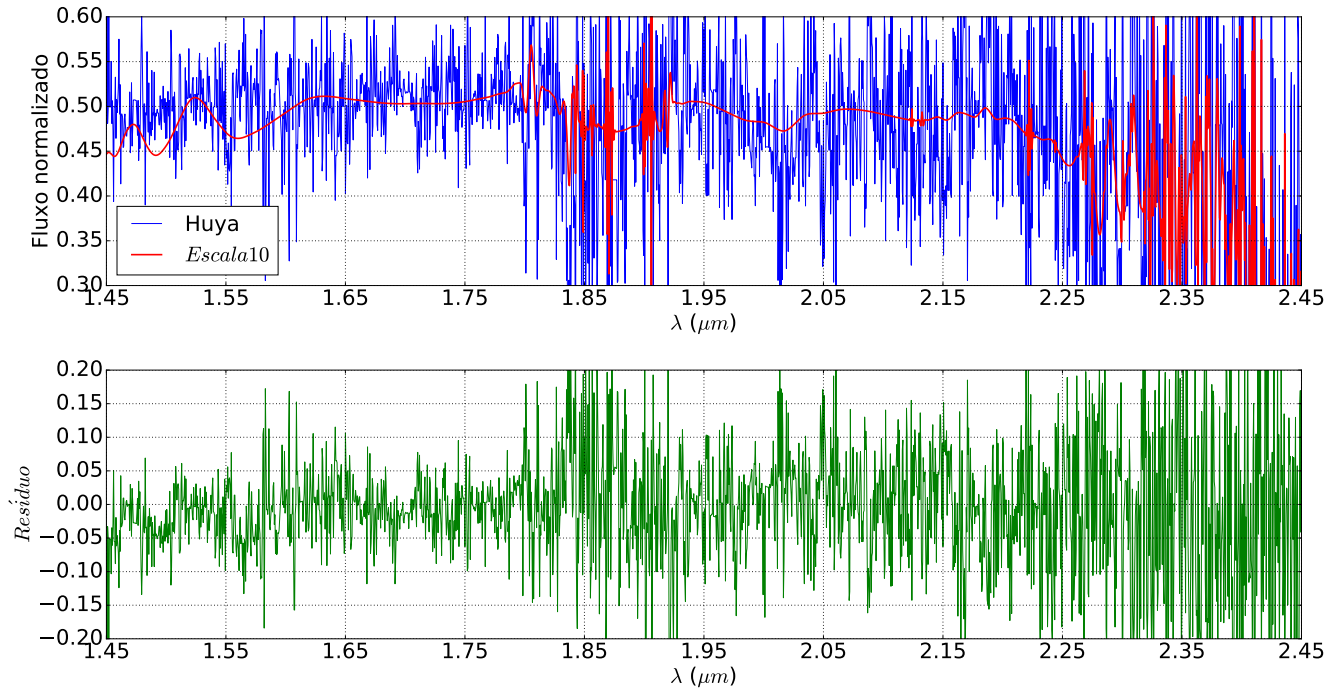


Figura A.9: Espectro do TNO ressonante 38628 Huya (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 10*.

A.10 42355 Typhon

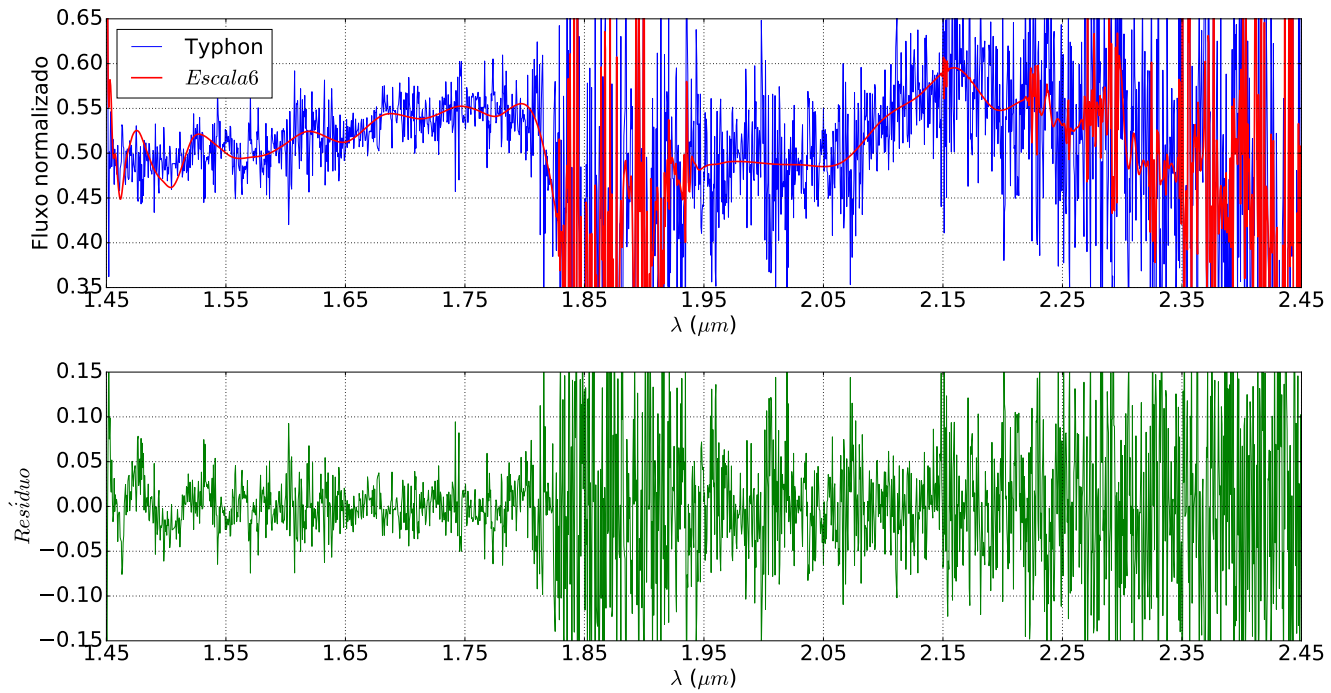


Figura A.10: Espectro do TNO espalhado 42355 Typhon (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 6*. Este espectro é a soma de dois espectros do mesmo objeto obtidos em datas diferentes com o objetivo de reduzir a quantidade de ruído.

A.11 44594 1999 OX₃

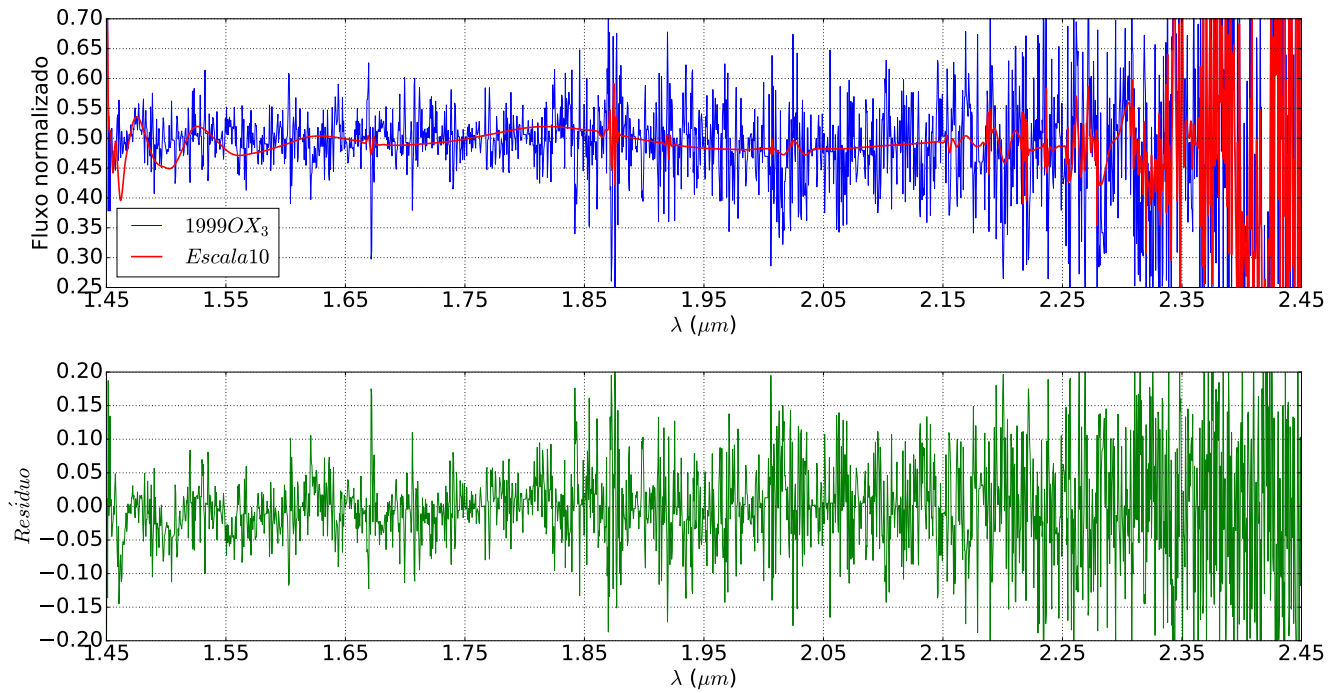


Figura A.11: Espectro do TNO espalhado 44594 1999 OX₃ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 10*.

A.12 47171 1999 TC₃₆

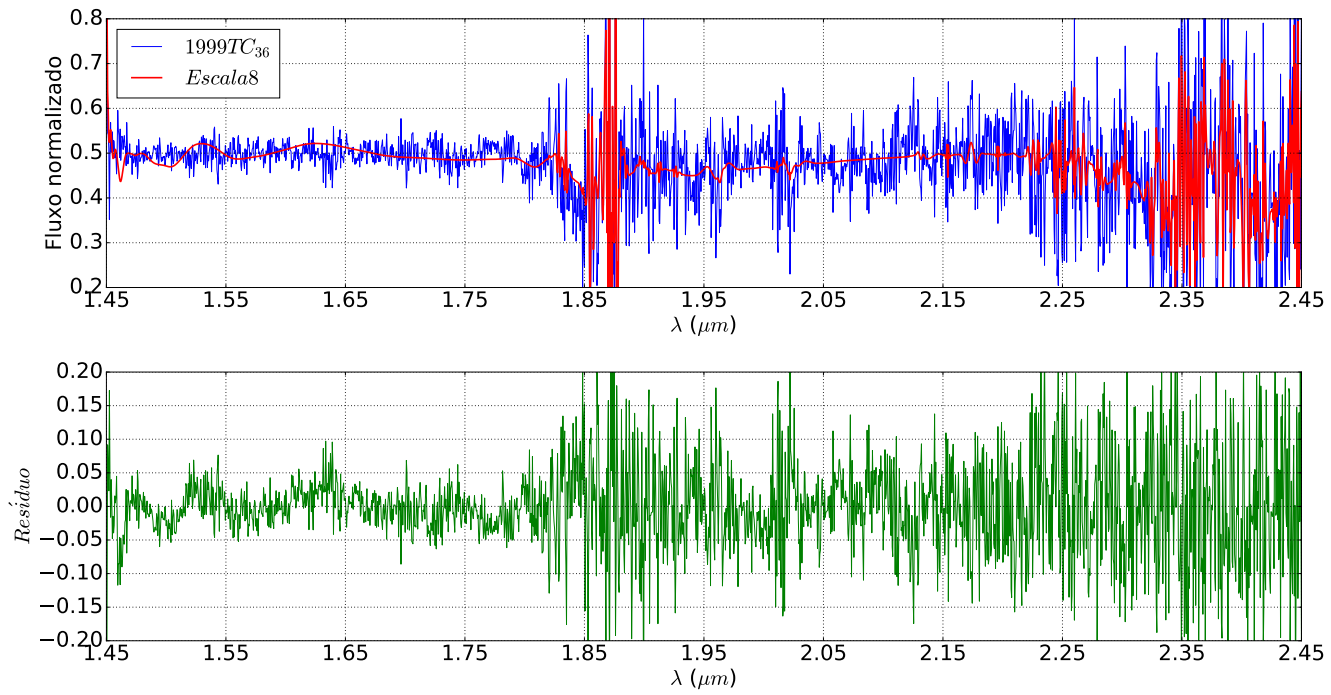


Figura A.12: Espectro do TNO ressonante 47171 1999 TC₃₆ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 8*.

A.13 47932 2000 GN₁₇₁

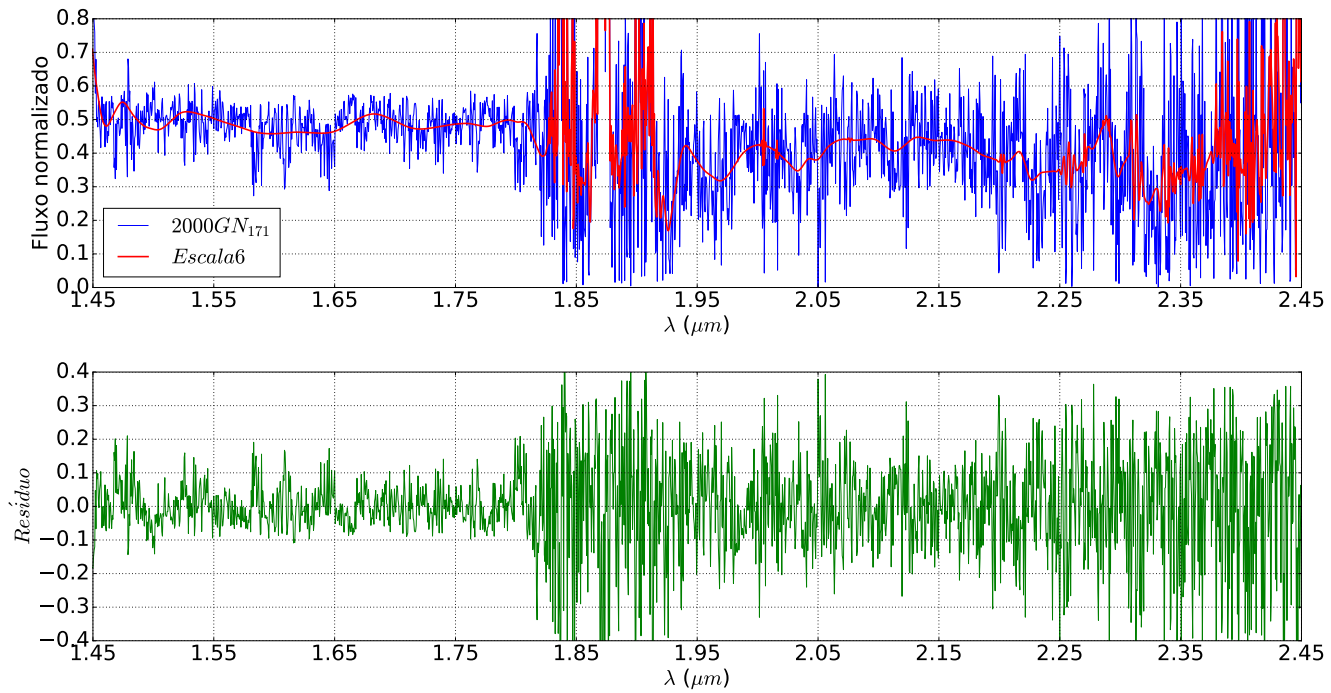


Figura A.13: Espectro do TNO ressonante 47932 2000 GN₁₇₁ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 6*. Este espectro é a soma de dois espectros do mesmo objeto obtidos em datas diferentes com o objetivo de reduzir a quantidade de ruído.

A.14 50000 Quaoar

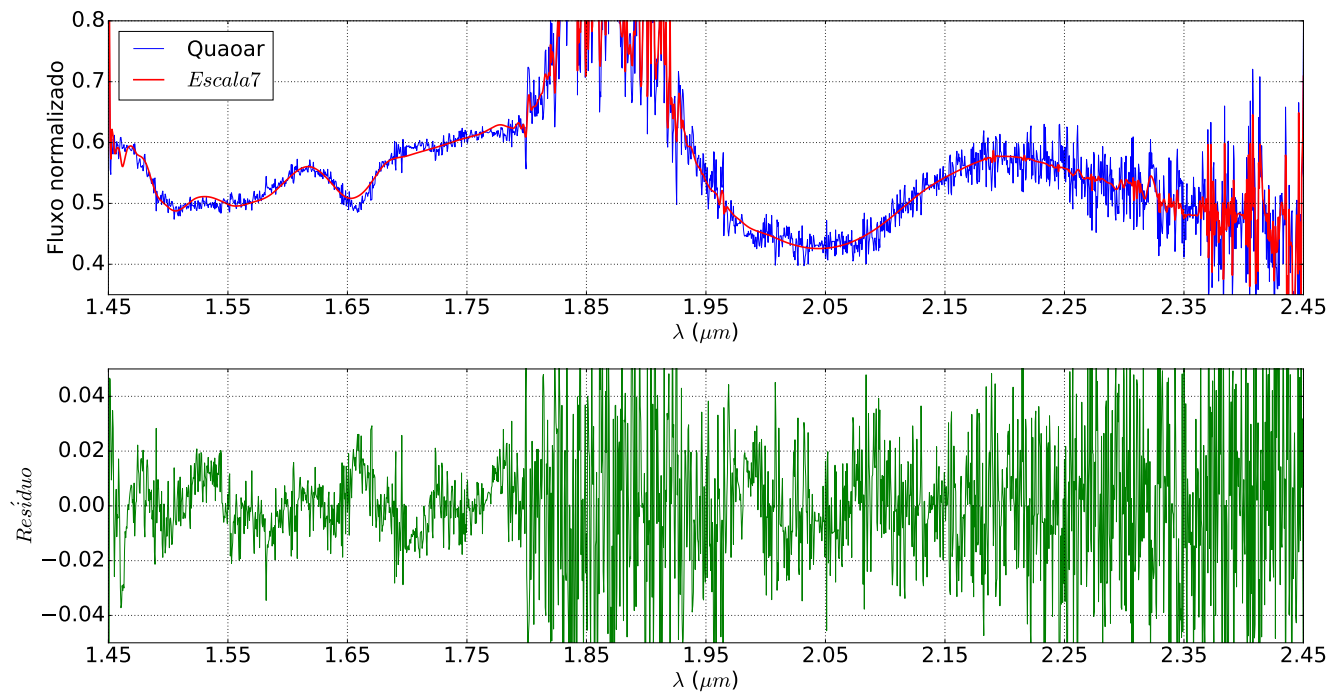


Figura A.14: Espectro do TNO clássico 50000 Quaoar (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 7*.

A.15 52872 Okyrhoe

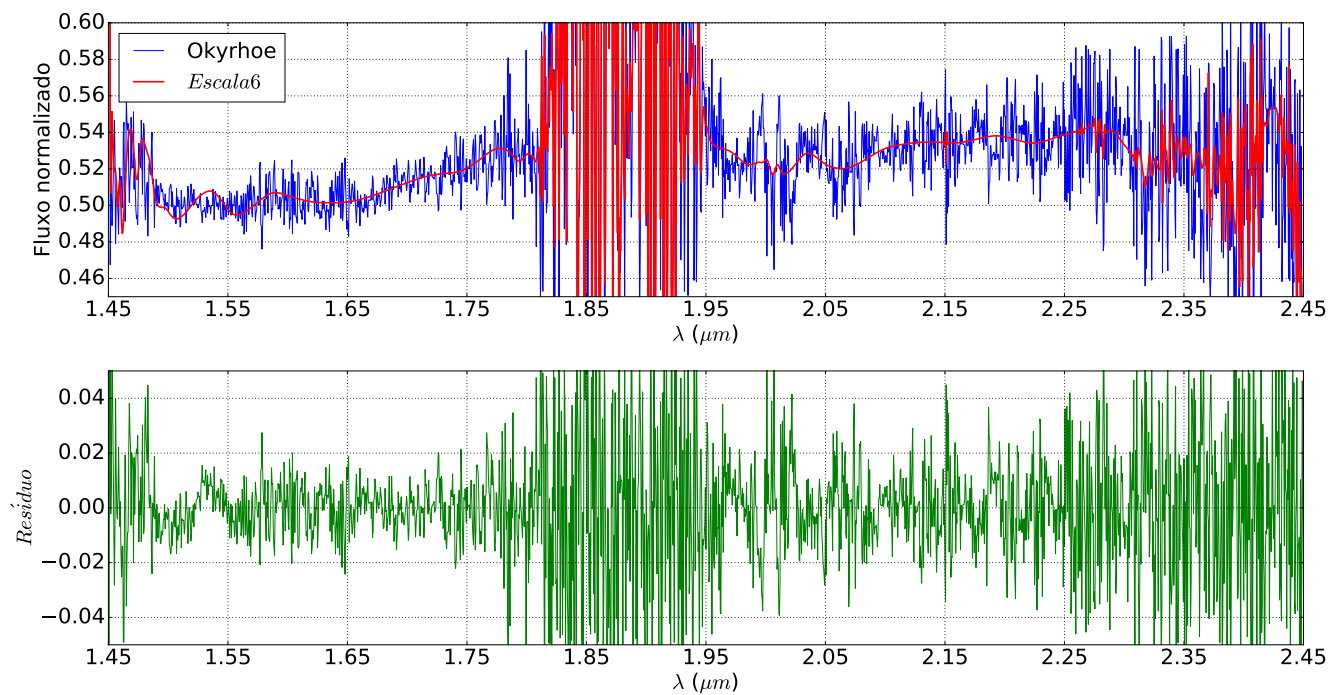


Figura A.15: Espectro do centauro 52872 Okyrhoe (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 6*.

A.16 54598 Bienor

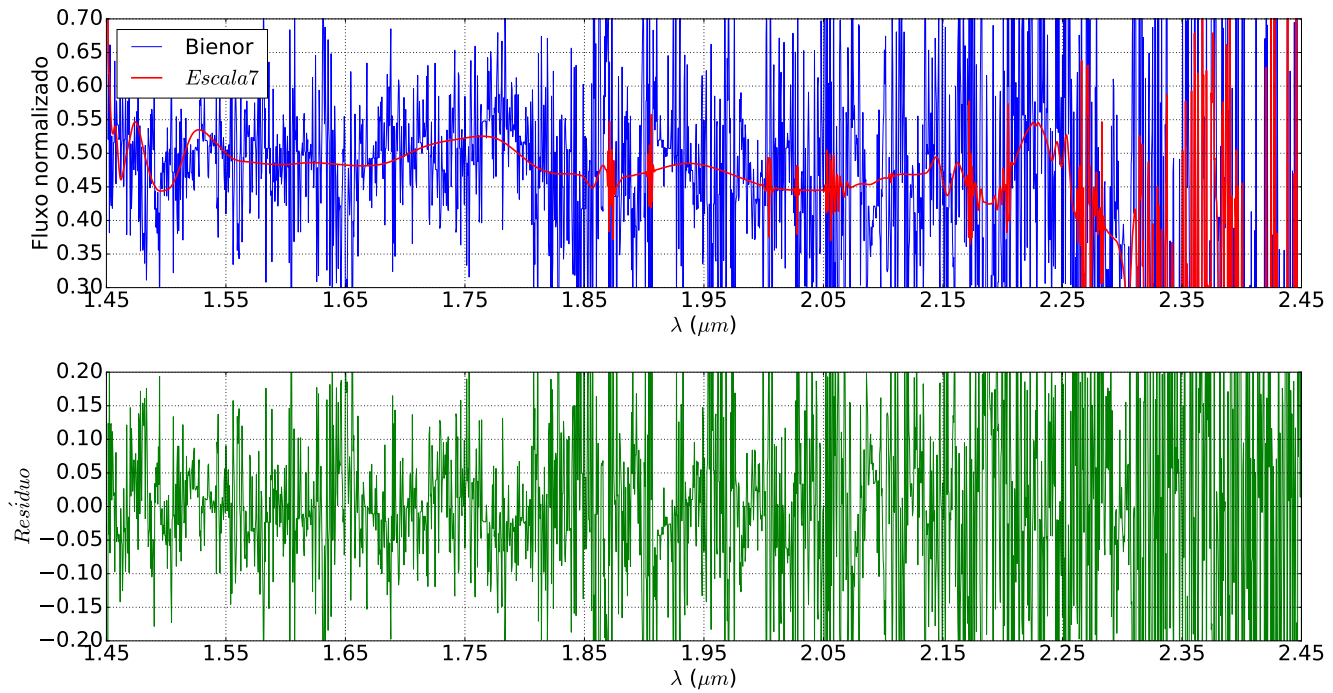


Figura A.16: Espectro do centauro 54598 Bienor (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 7*.

A.17 55565 2002 AW₁₉₇

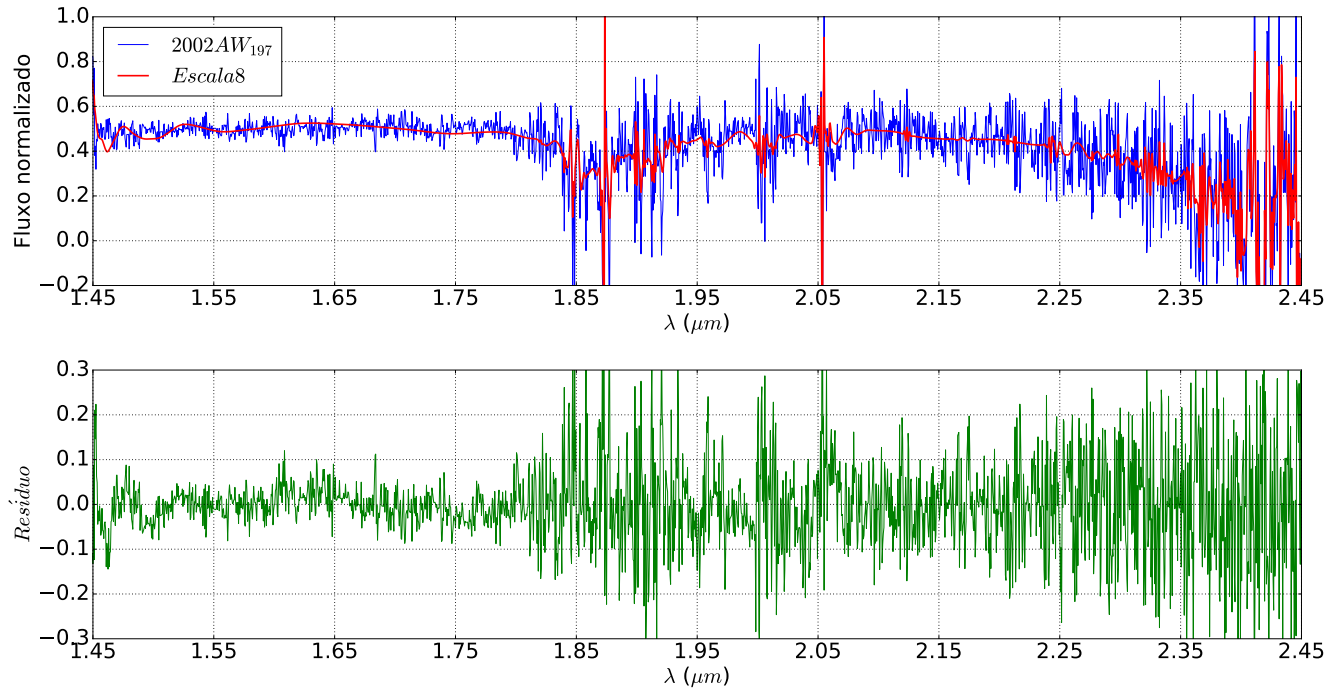


Figura A.17: Espectro do TNO ressonante 55565 2002 AW₁₉₇ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 8*.

A.18 55576 Amycus

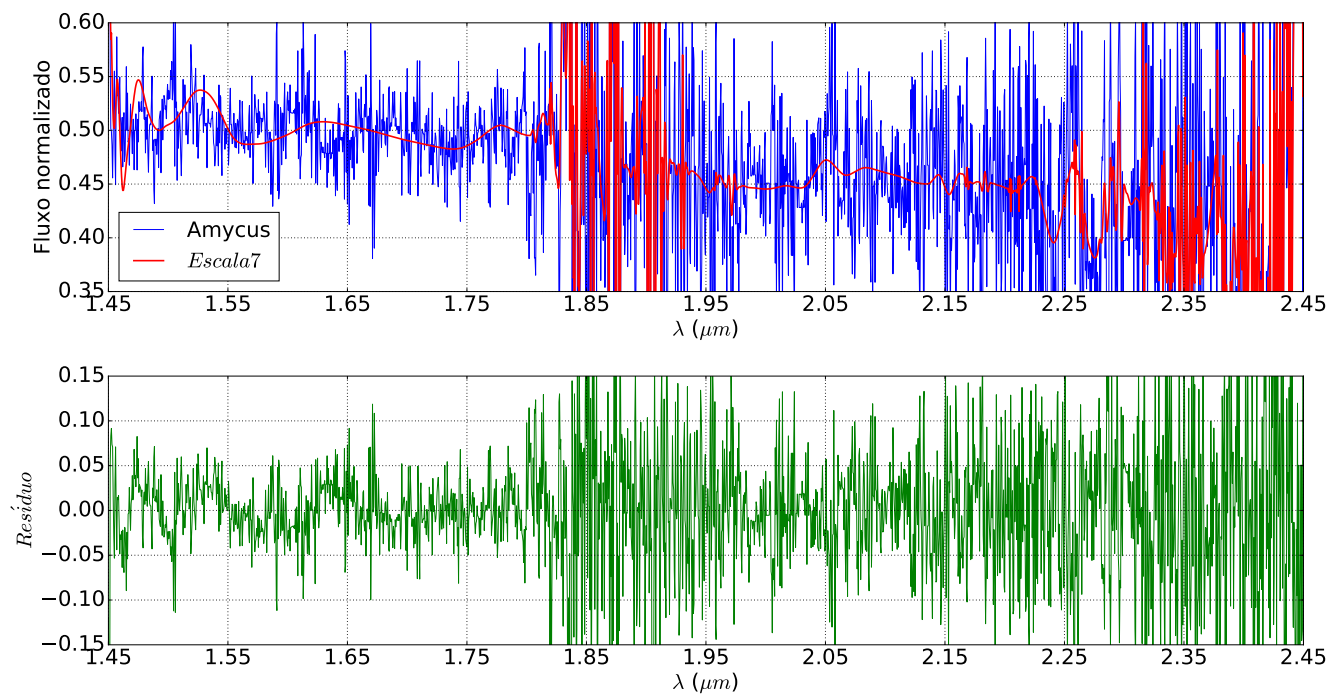


Figura A.18: Espectro do centauro 55576 Amycus (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 7*.

A.19 55637 2002 UX₂₅

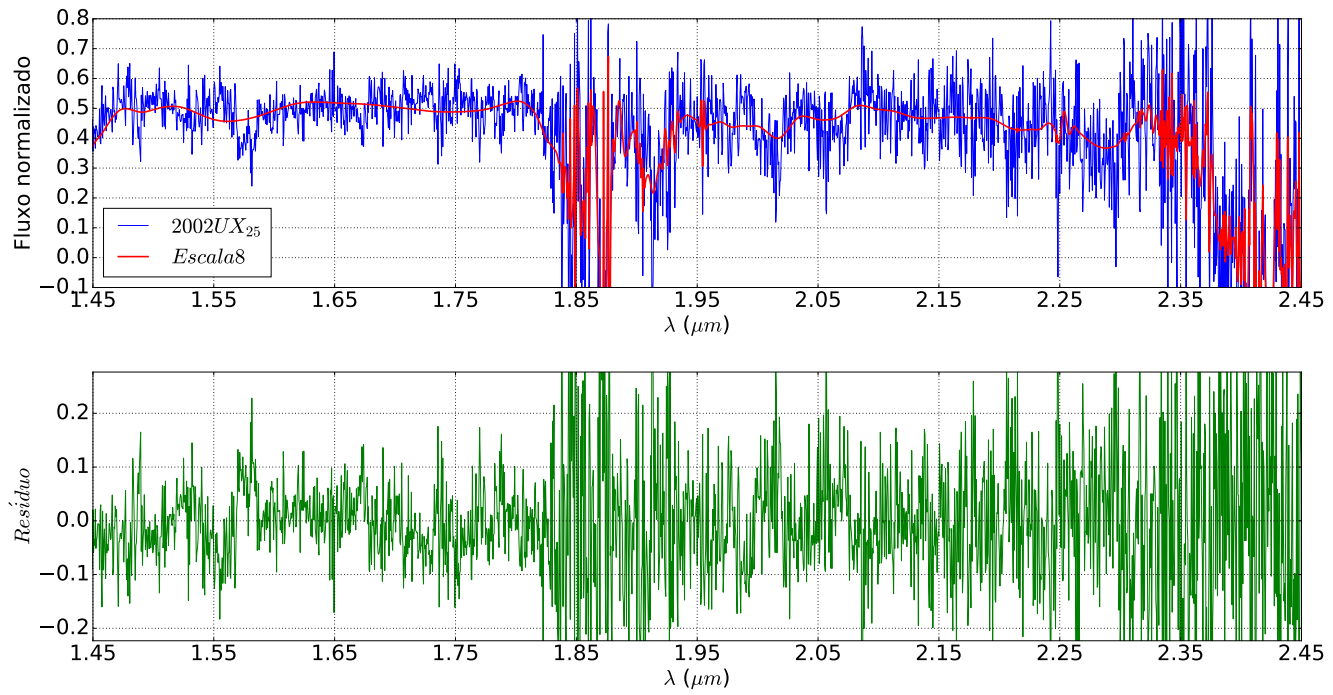


Figura A.19: Espectro do TNO clássico 55367 2002 UX₂₅ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 8*.

A.20 55638 2002 VE₉₅

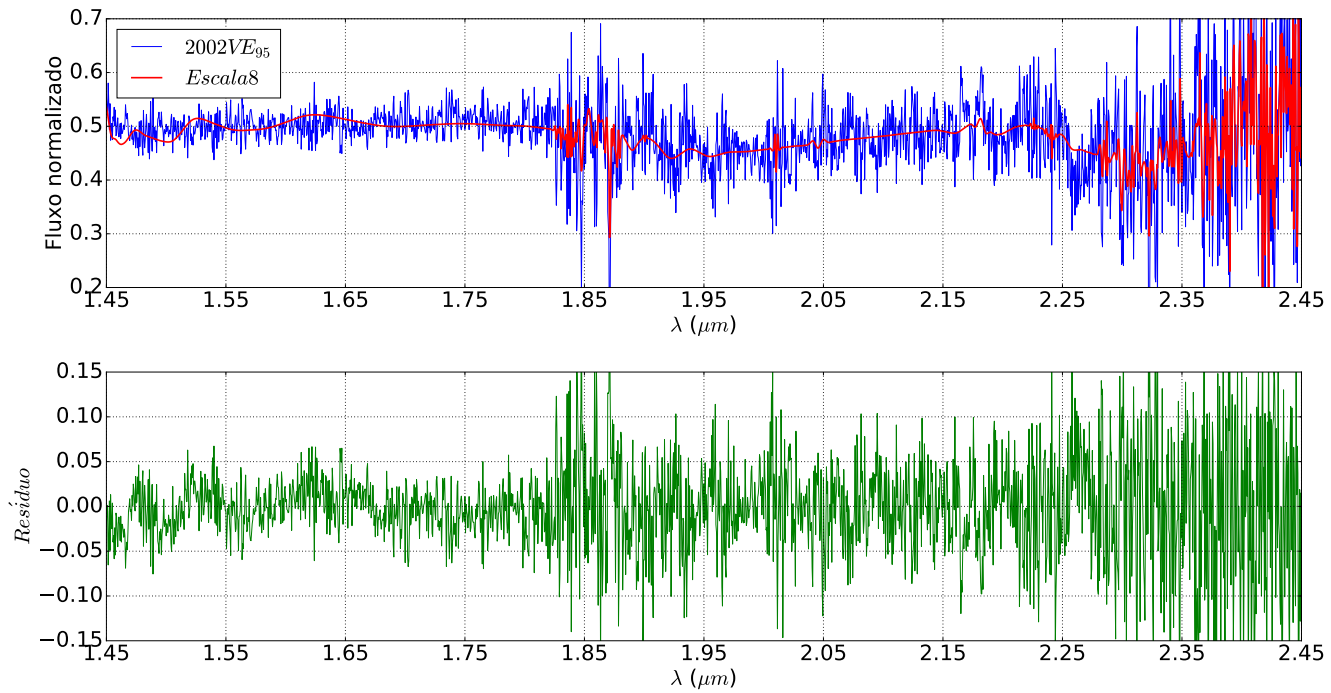


Figura A.20: Espectro do TNO ressonante 55638 2002 VE₉₅ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 8*. Este espectro é a soma de dois espectros do mesmo objeto obtidos em datas diferentes com o objetivo de reduzir a quantidade de ruído.

A.21 60558 Echeclus

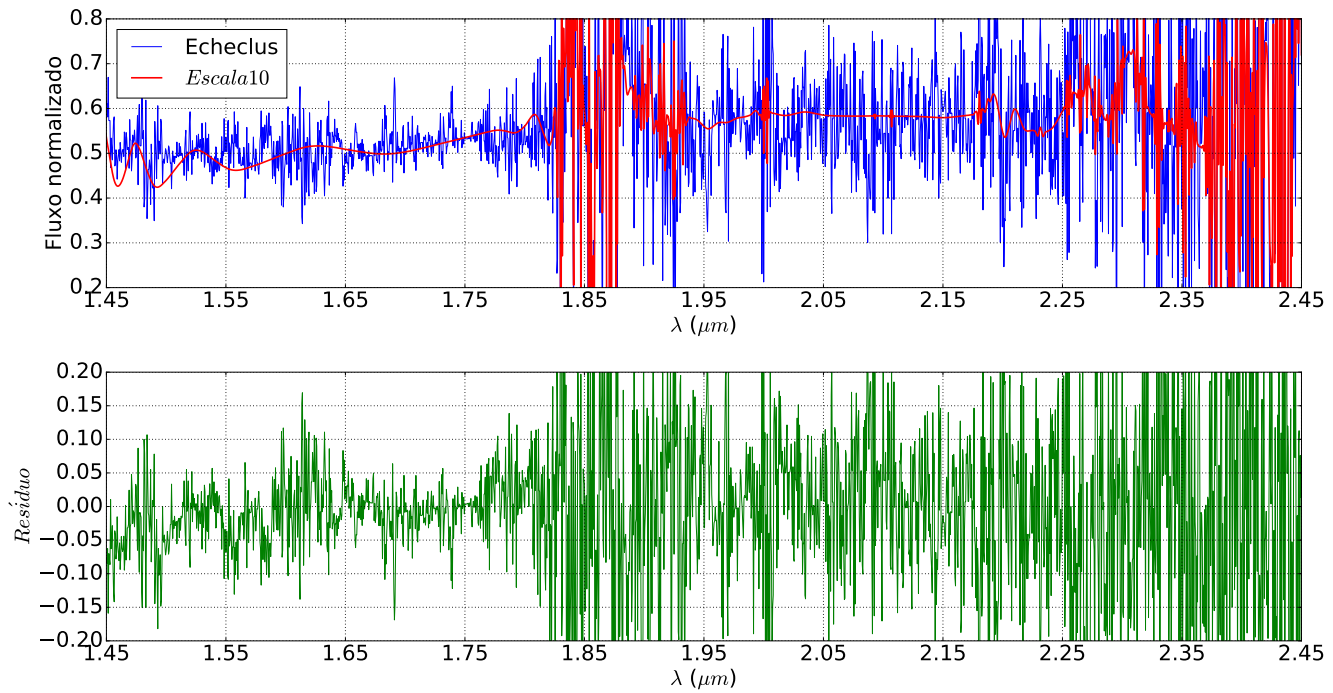


Figura A.21: Espectro do centauro 60558 Echeclus (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 10*.

A.22 73480 2002 PN₃₄

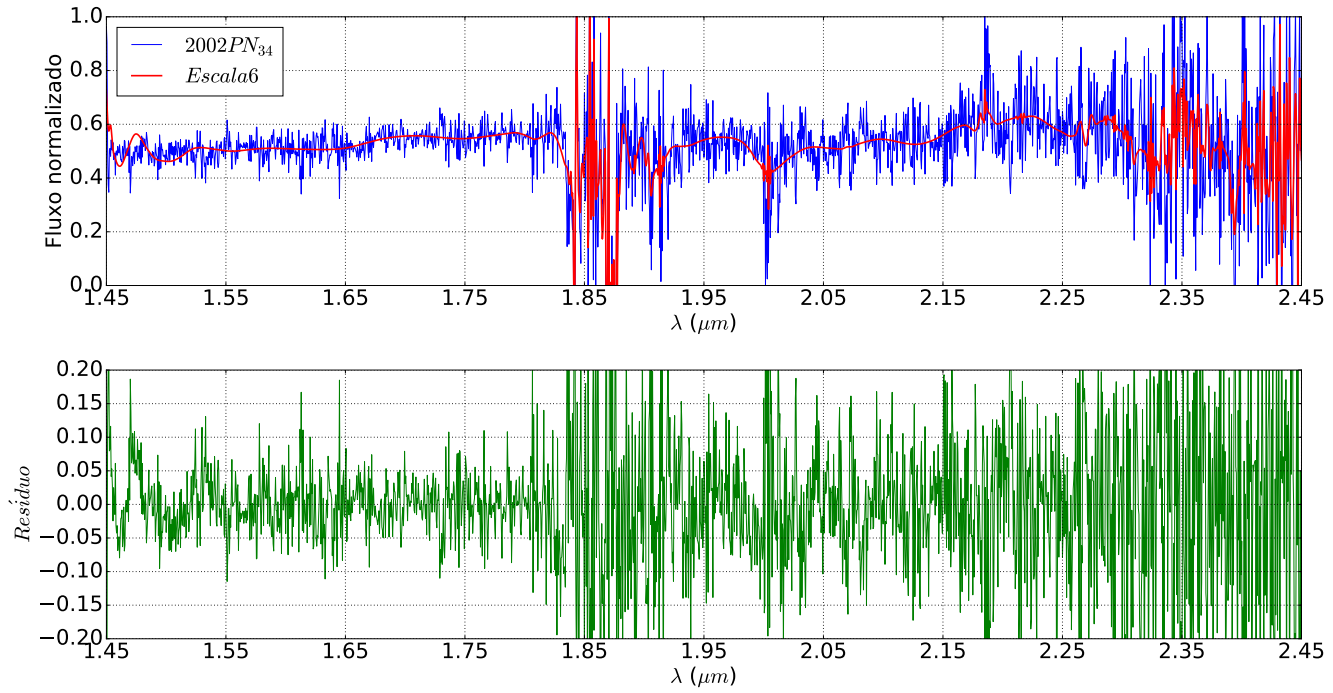


Figura A.22: Espectro do TNO espalhado 73480 2002 PN₃₄ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 6*.

A.23 83982 Crantor

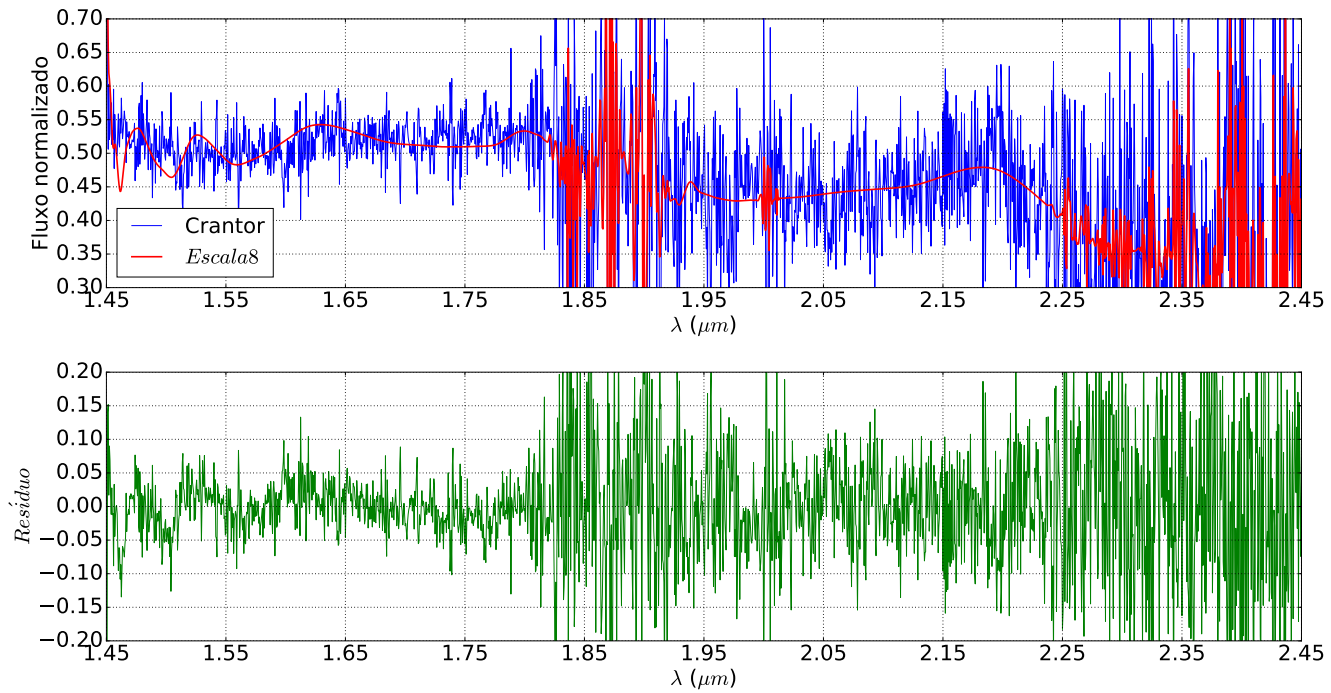


Figura A.23: Espectro do centauro 83982 Crantor (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 10*. Este espectro é a soma de dois espectros do mesmo objeto obtidos em datas diferentes com o objetivo de reduzir a quantidade de ruído.

A.24 90377 Sedna

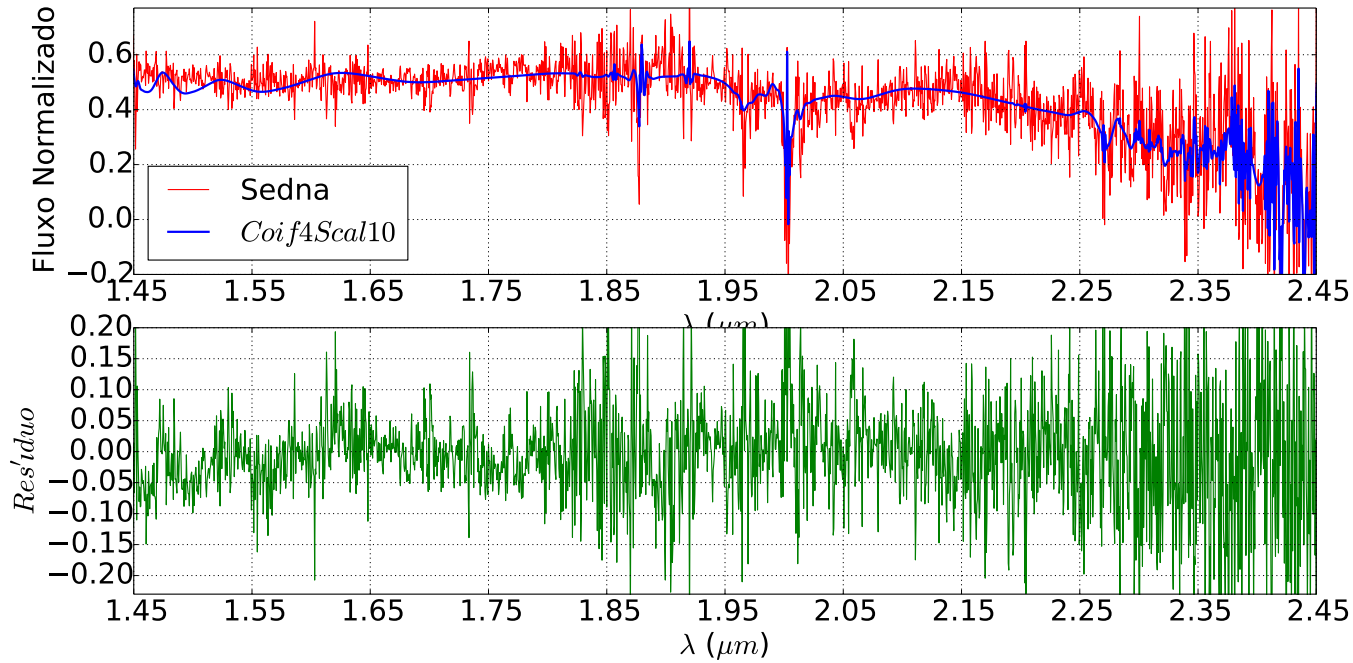


Figura A.24: Espectro do TNO destacado 90377 Sedna (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 10*. Este espectro é a soma de três espectros do mesmo objeto obtidos em datas diferentes com o objetivo de reduzir a quantidade de ruído.

A.25 90568 2004 GV₉

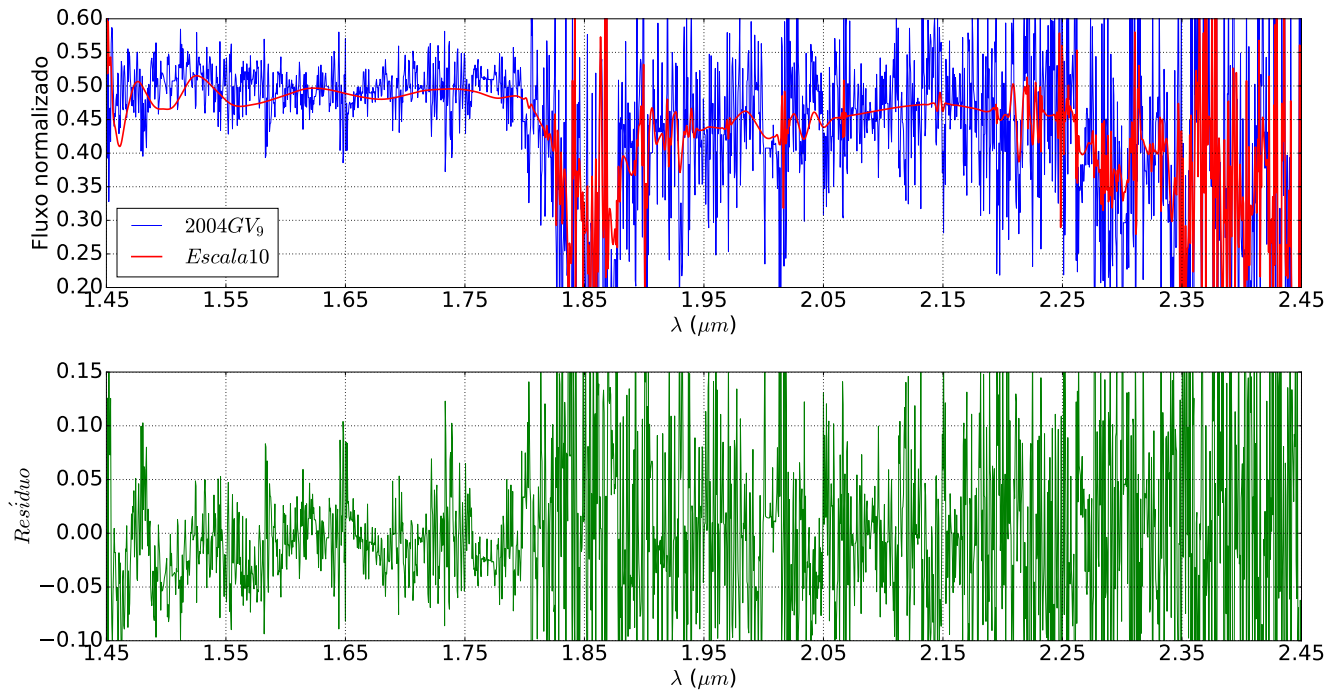


Figura A.25: Espectro do TNO clássico 90568 2004 GV₉ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 10*.

A.26 90482 Orcus

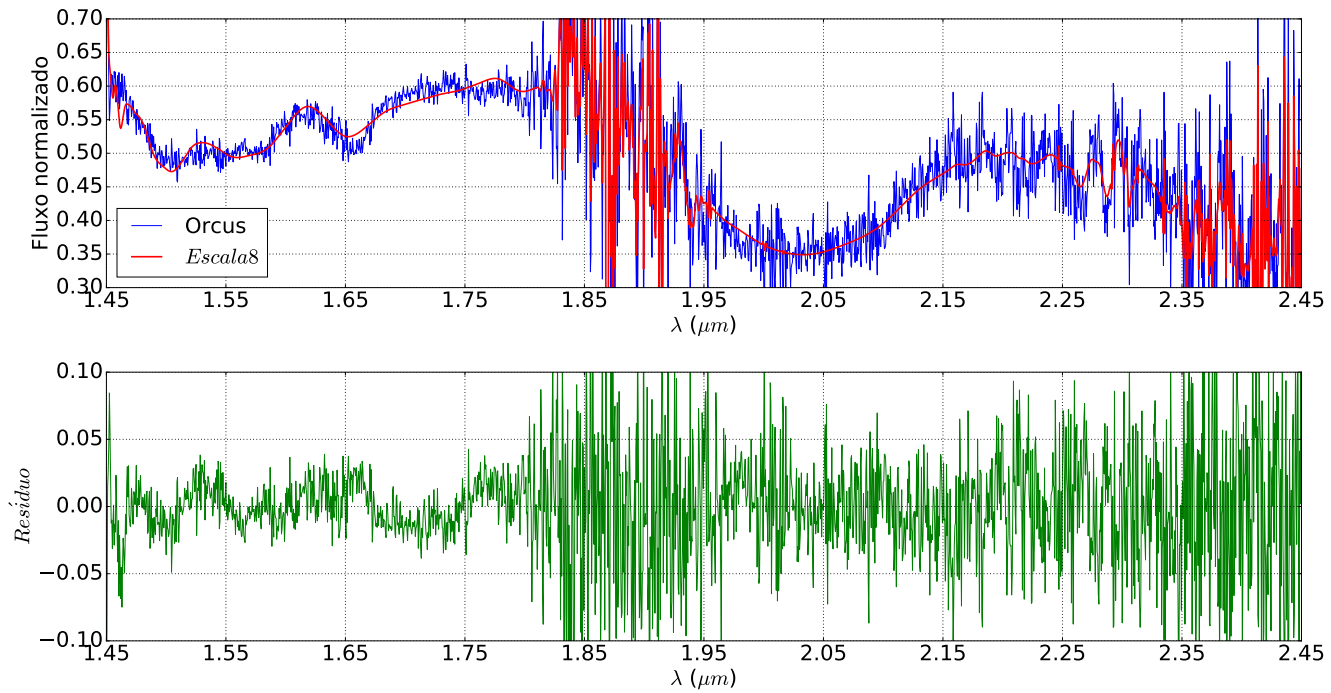


Figura A.26: Espectro do TNO ressonante 90482 Orcus (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 8*. Este espectro é a soma de dois espectros do mesmo objeto obtidos em datas diferentes com o objetivo de reduzir a quantidade de ruído.

A.27 95626 2002 GZ₃₂

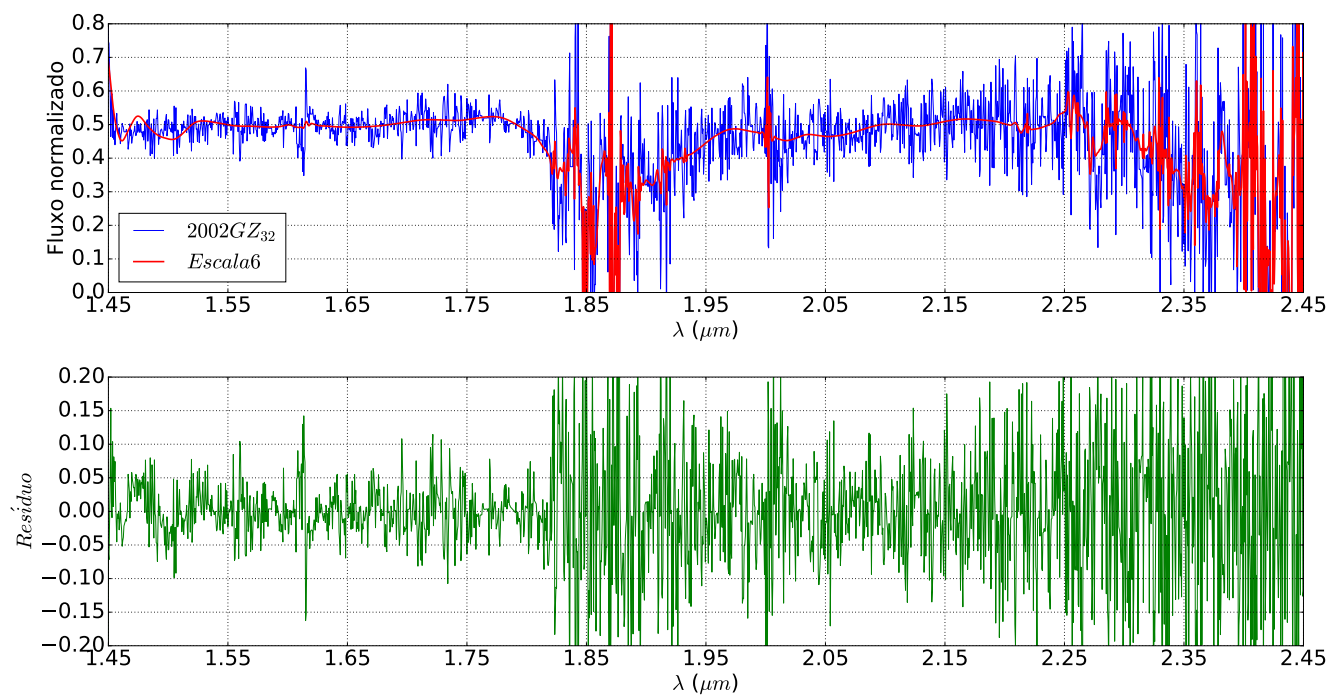


Figura A.27: Espectro do centauro 95626 2002 GZ₃₂ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 6*.

A.28 119951 2002 KX₁₄

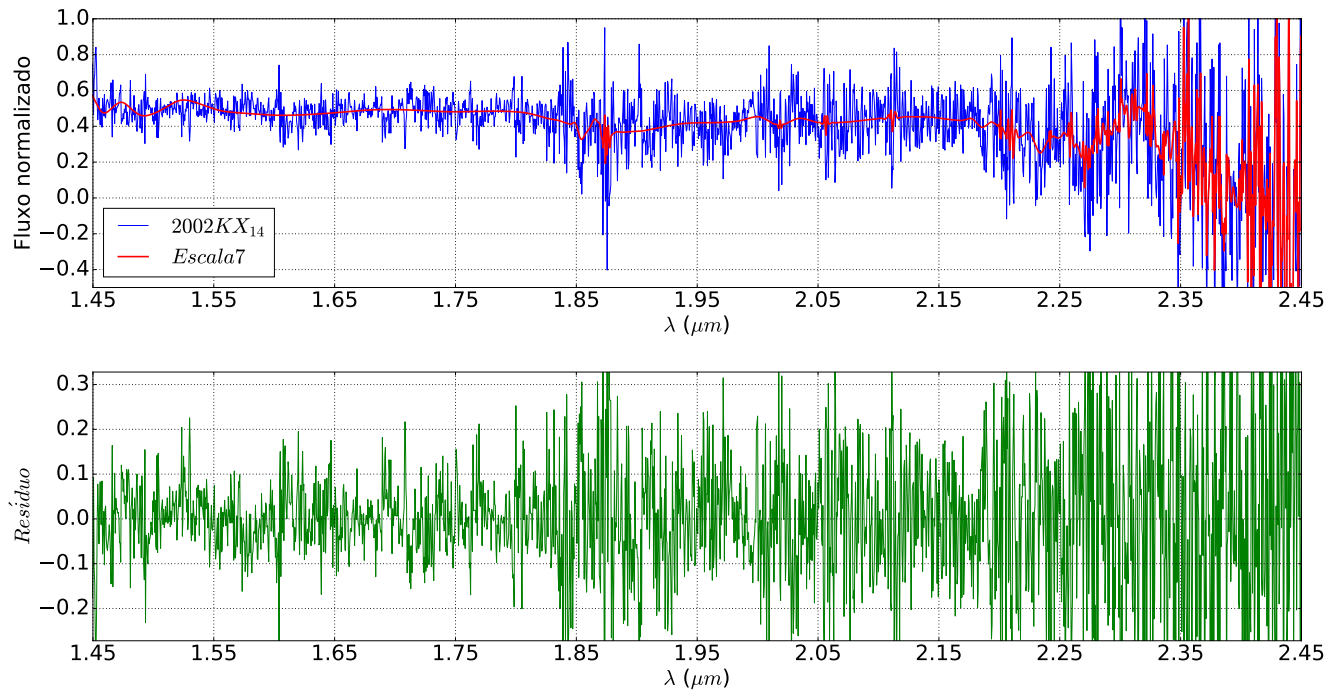


Figura A.28: Espectro do TNO clássico 119951 2002 KX₁₄ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 7*.

A.29 120061 2003 CO₁

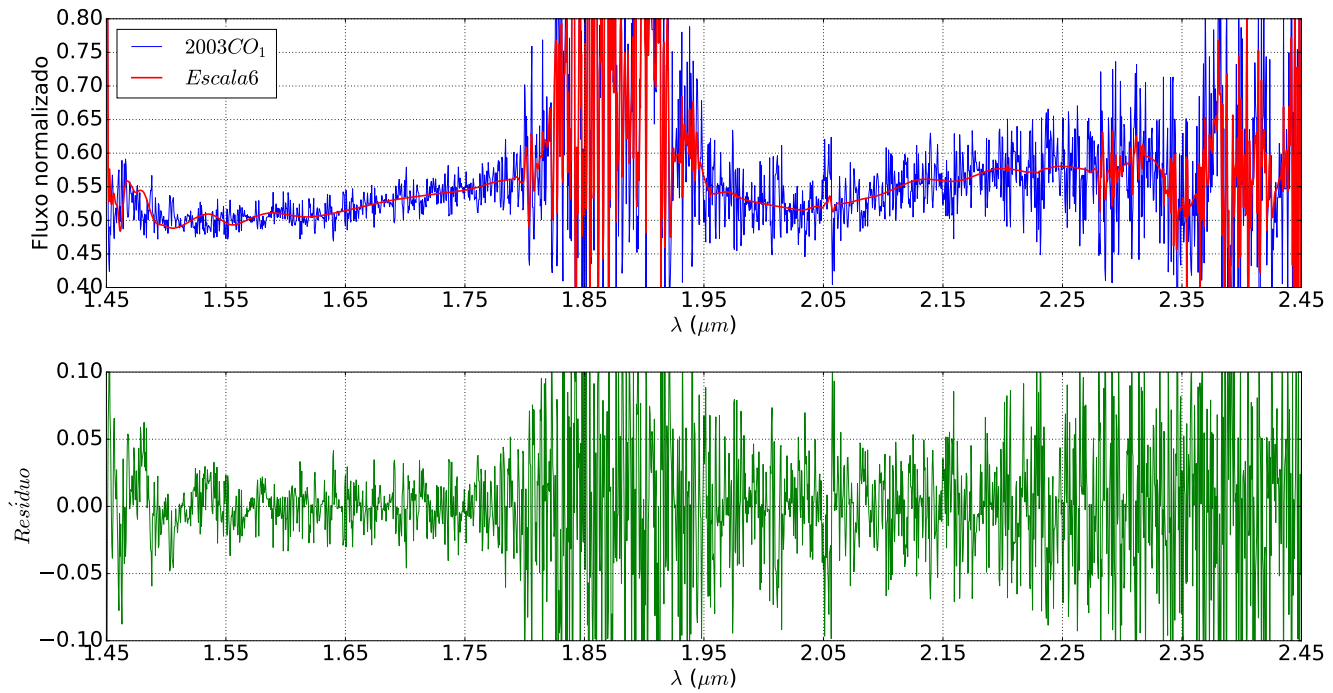


Figura A.29: Espectro do centauro 120061 2003 CO₁ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 6*.

A.30 120132 2003 FY₁₂₈

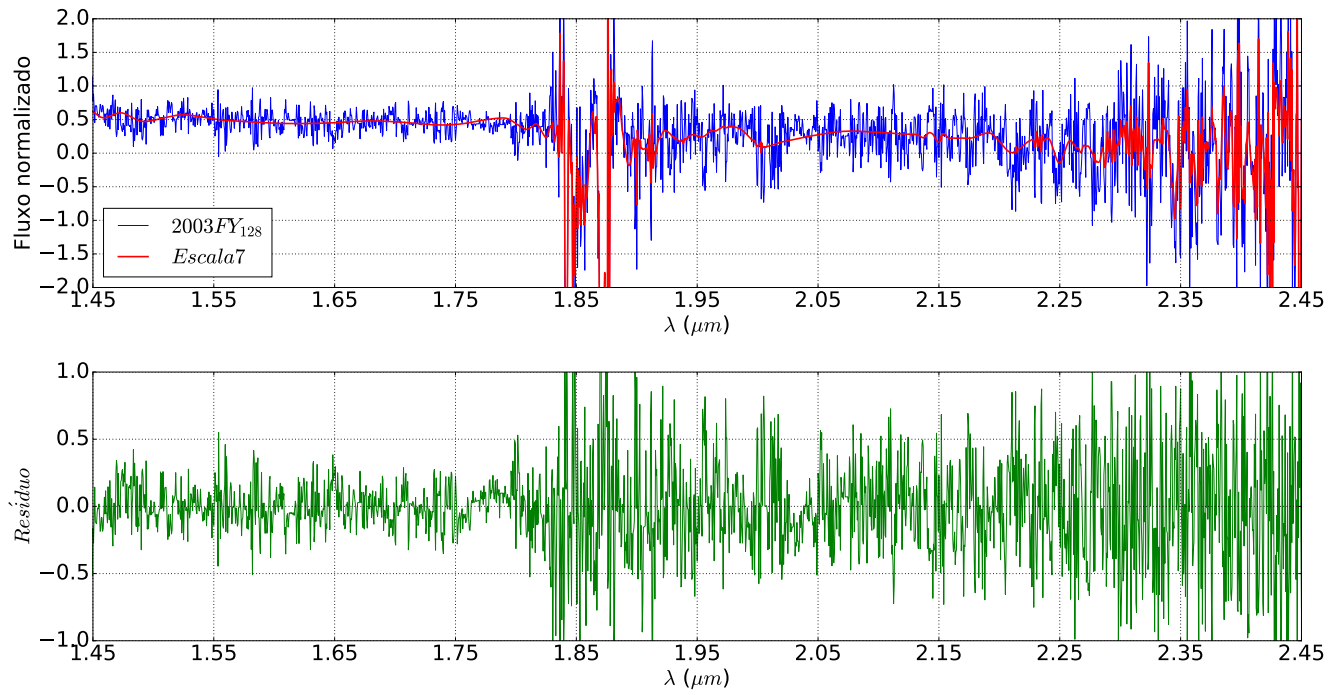


Figura A.30: Espectro do TNO destacado 120132 2003 FY₁₂₈ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 7*.

A.31 120348 2004 TY₃₆₄

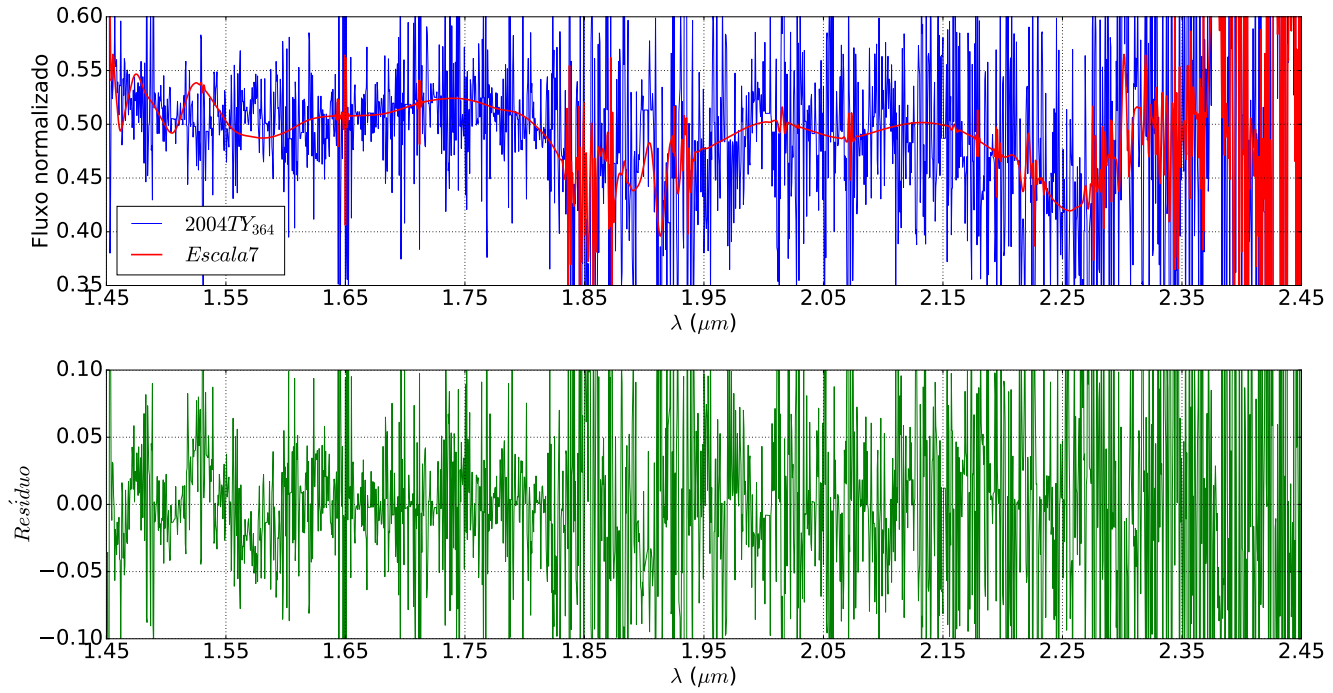


Figura A.31: Espectro do TNO clássico 120348 2004 TY₃₆₄ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 7*.

A.32 134340 Plutão

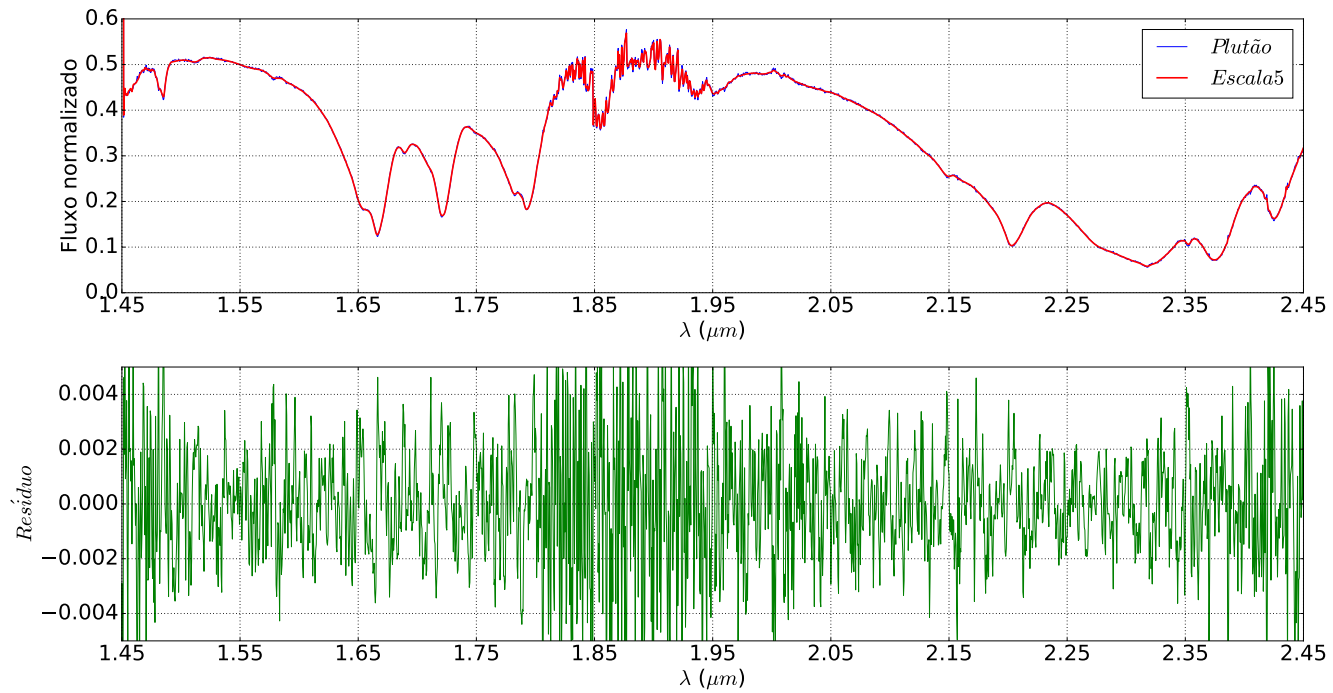


Figura A.32: Espectro do TNO ressonante 134340 Plutão (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 5*. Este espectro é a soma de dois espectros do mesmo objeto obtidos em datas diferentes com o objetivo de reduzir a quantidade de ruído.

A.33 136108 Haumea

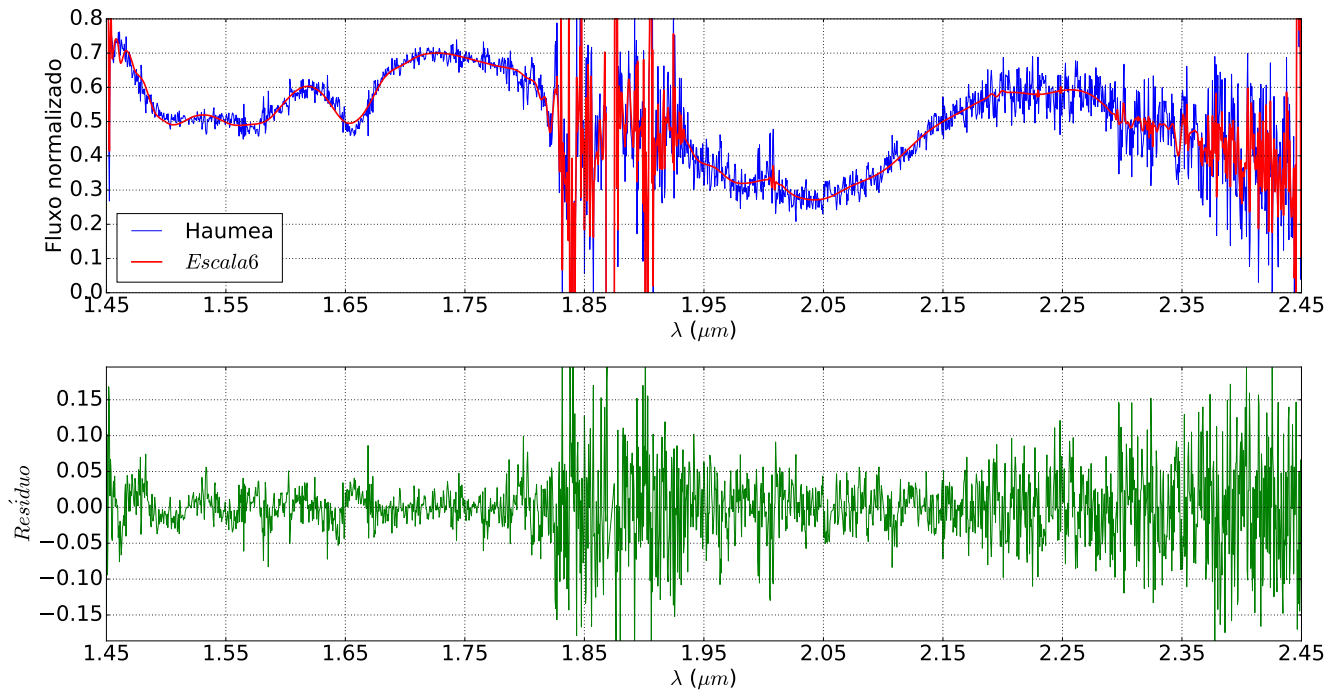


Figura A.33: Espectro do TNO 136108 Haumea (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 6*.

A.34 136199 Eris

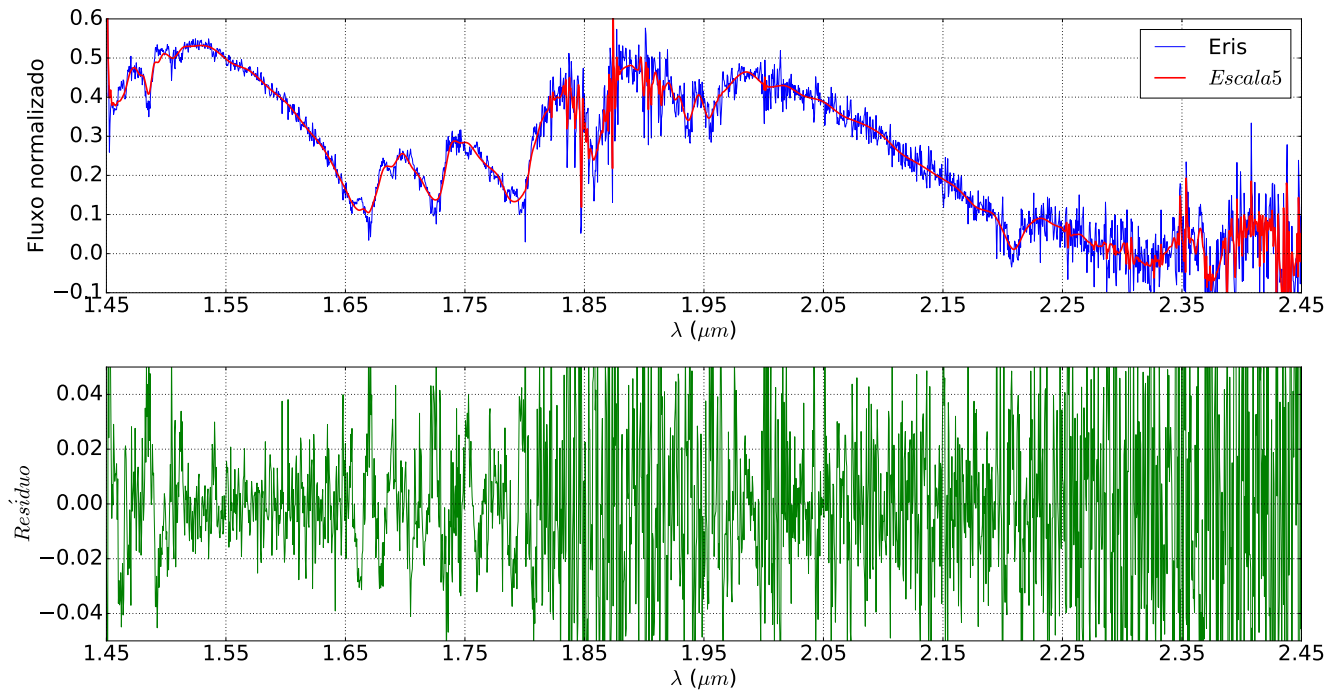


Figura A.34: Espectro do TNO destacado 136199 Eris (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 5*. Este espectro é a soma de dois espectros do mesmo objeto obtidos em datas diferentes com o objetivo de reduzir a quantidade de ruído.

A.35 144897 2004 UX₁₀

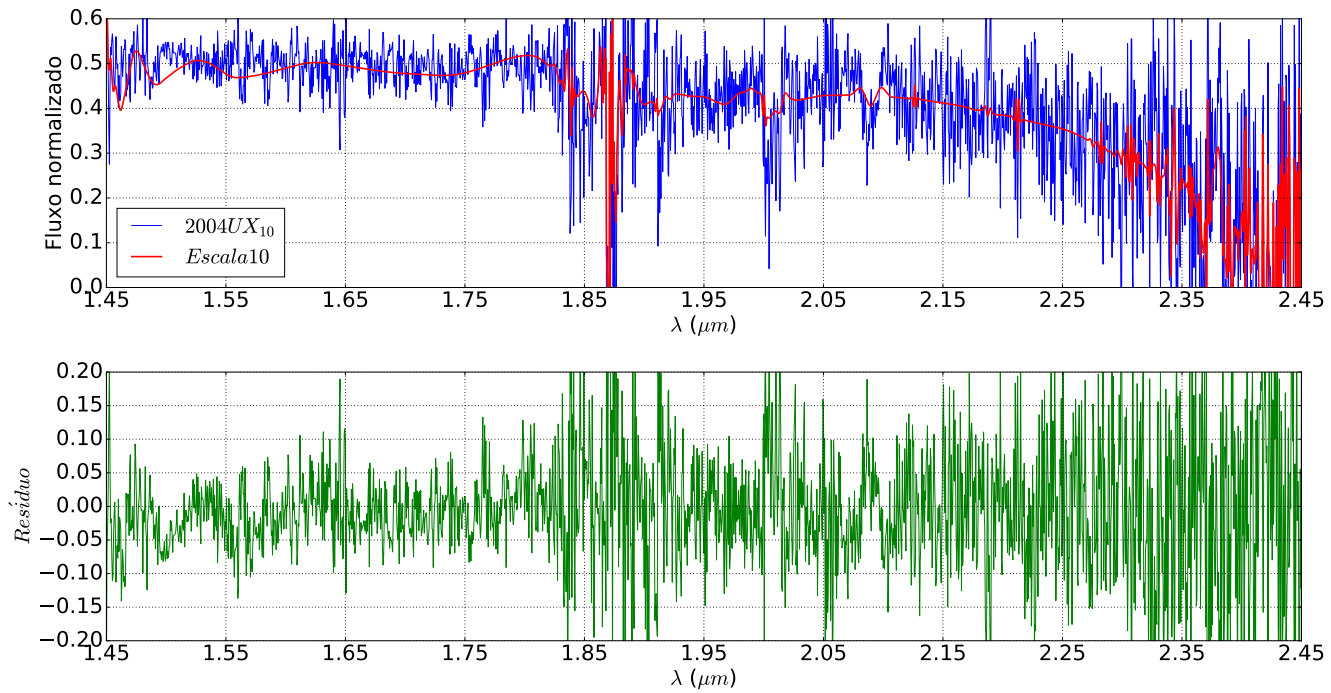


Figura A.35: Espectro do TNO clássico 144897 2004 UX₁₀ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 10*. Este espectro é a soma de dois espectros do mesmo objeto obtidos em datas diferentes com o objetivo de reduzir a quantidade de ruído.

A.36 145451 2005 RM₄₃

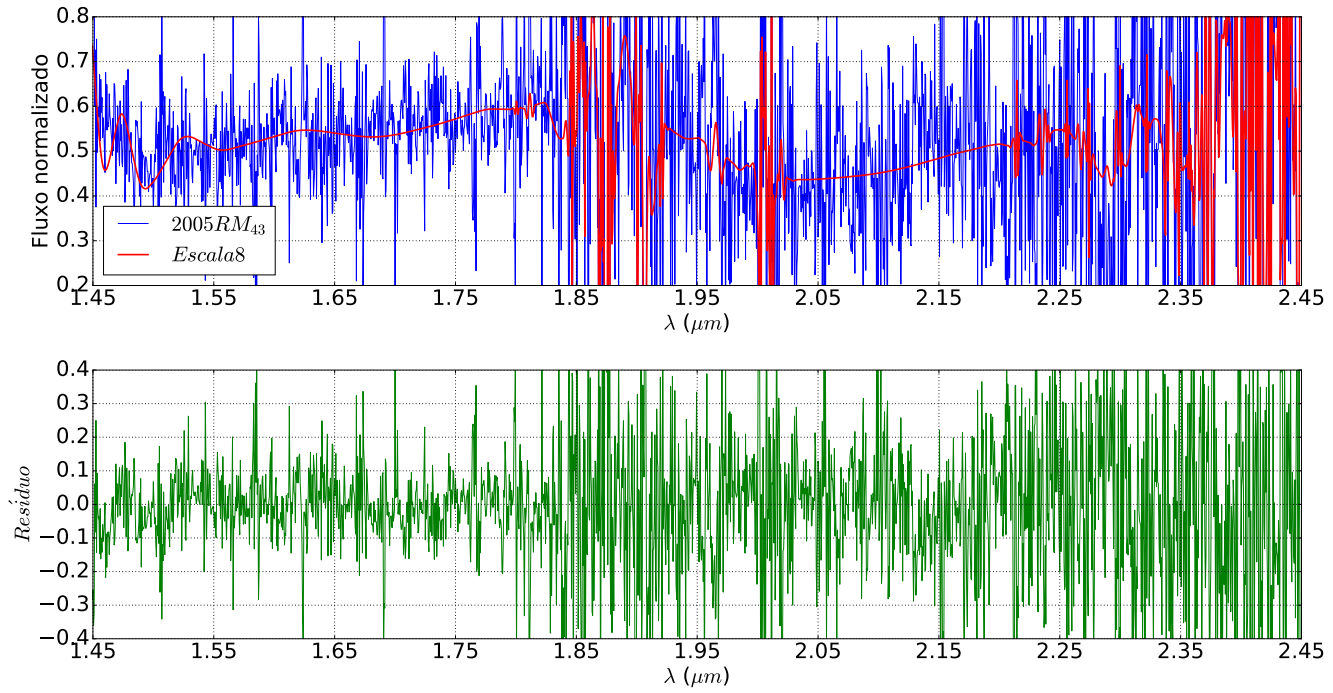


Figura A.36: Espectro do TNO destacado 145451 2005 RM₄₃ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 8*.

A.37 145452 2005 RN₄₃

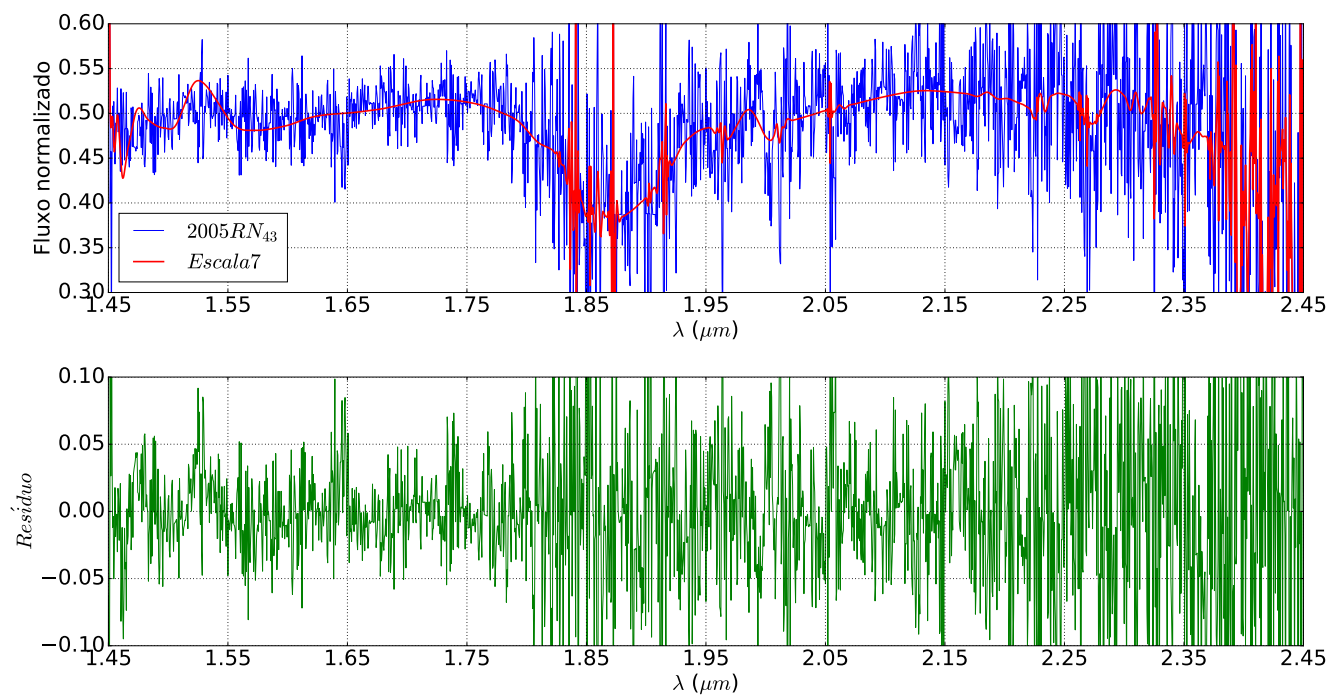


Figura A.37: Espectro do TNO clássico 145452 2005 RN₄₃ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 7*.

A.38 145453 2005 RR₄₃

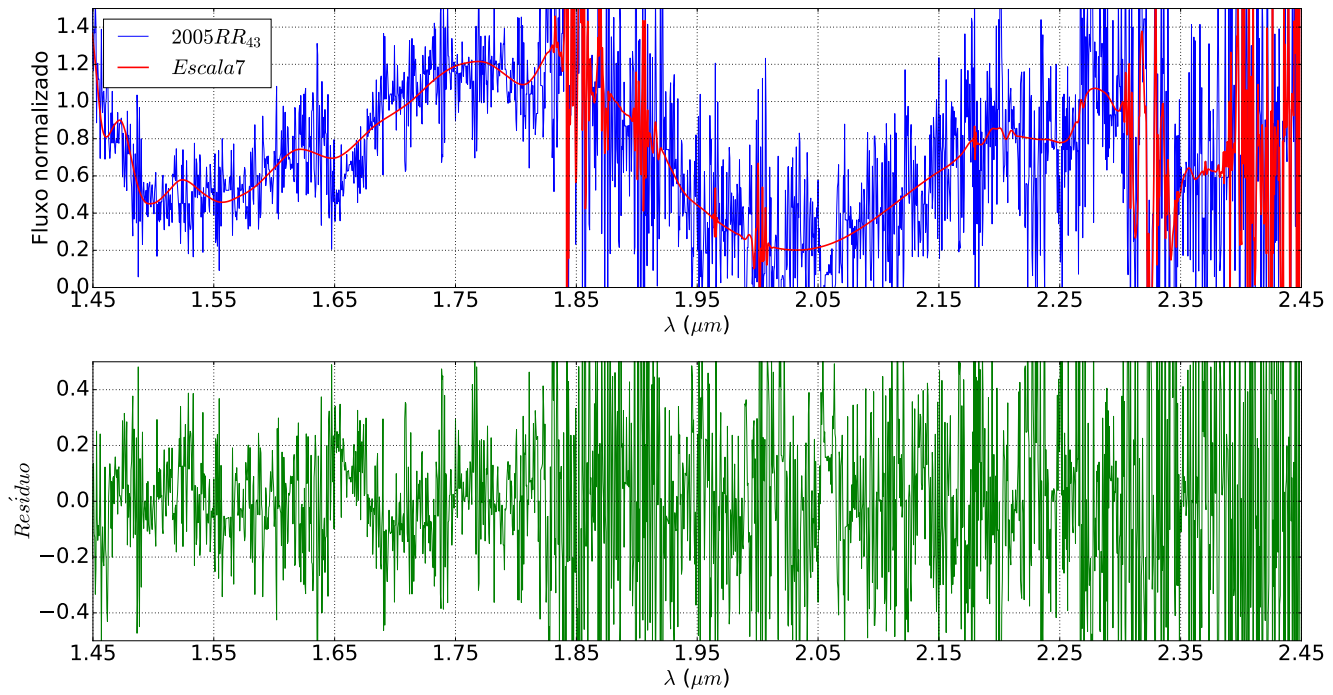


Figura A.38: Espectro do TNO clássico 145453 2005 RR₄₃ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 7*.

A.39 174567 Varda

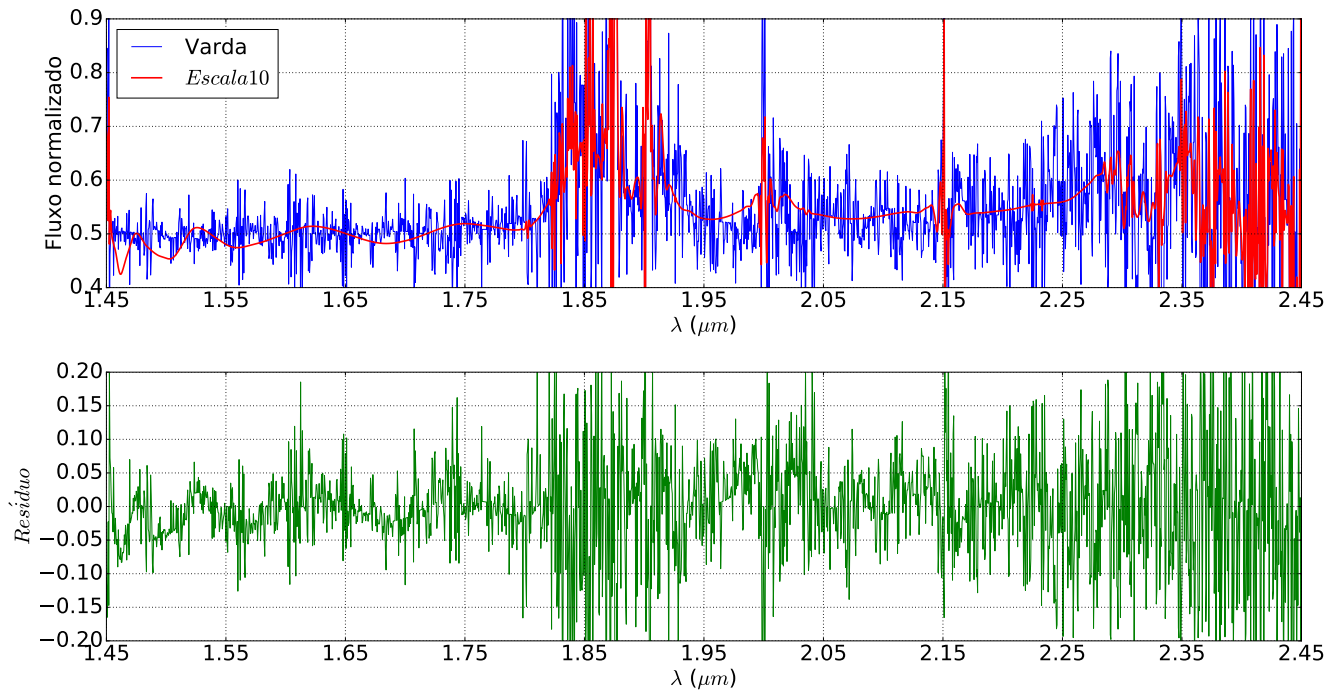


Figura A.39: Espectro do TNO clássico Varda (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 10*.

A.40 208996 2003 AZ₈₄

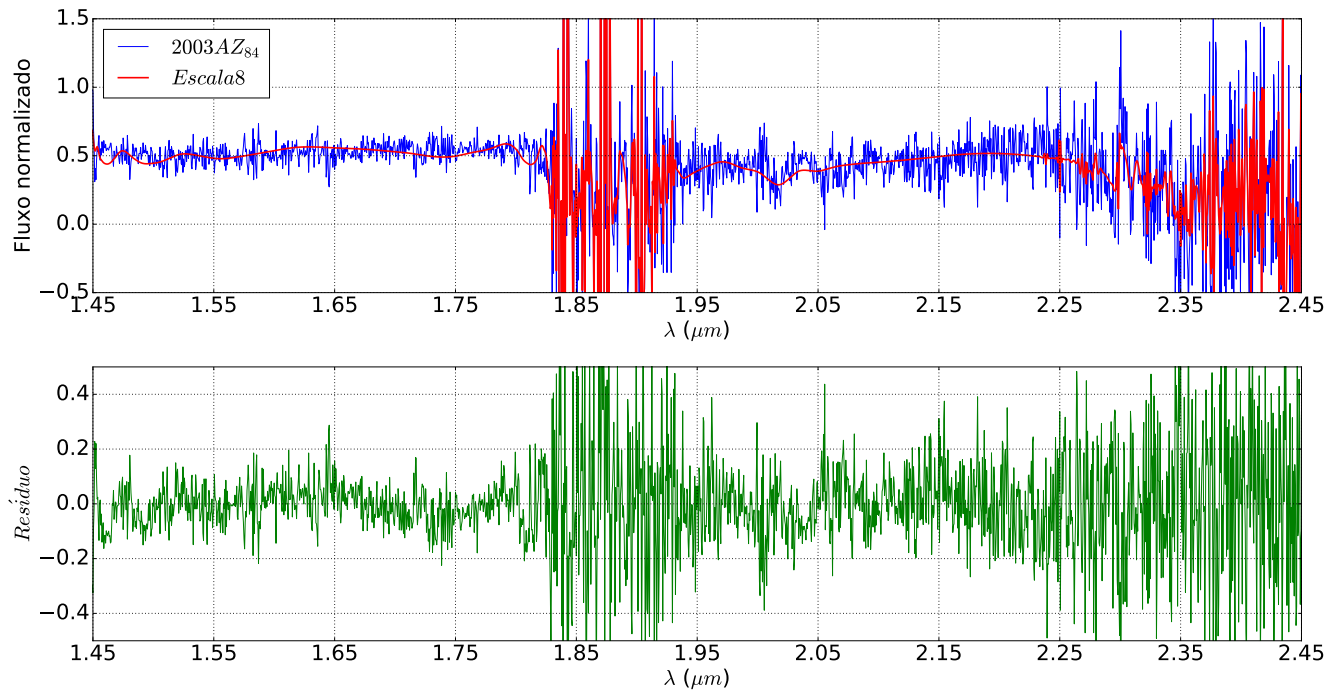


Figura A.40: Espectro do TNO clássico 136108 Haumea (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 8*. Este espectro é a soma de dois espectros do mesmo objeto obtidos em datas diferentes com o objetivo de reduzir a quantidade de ruído.

A.41 229762 2007 UK₁₂₆

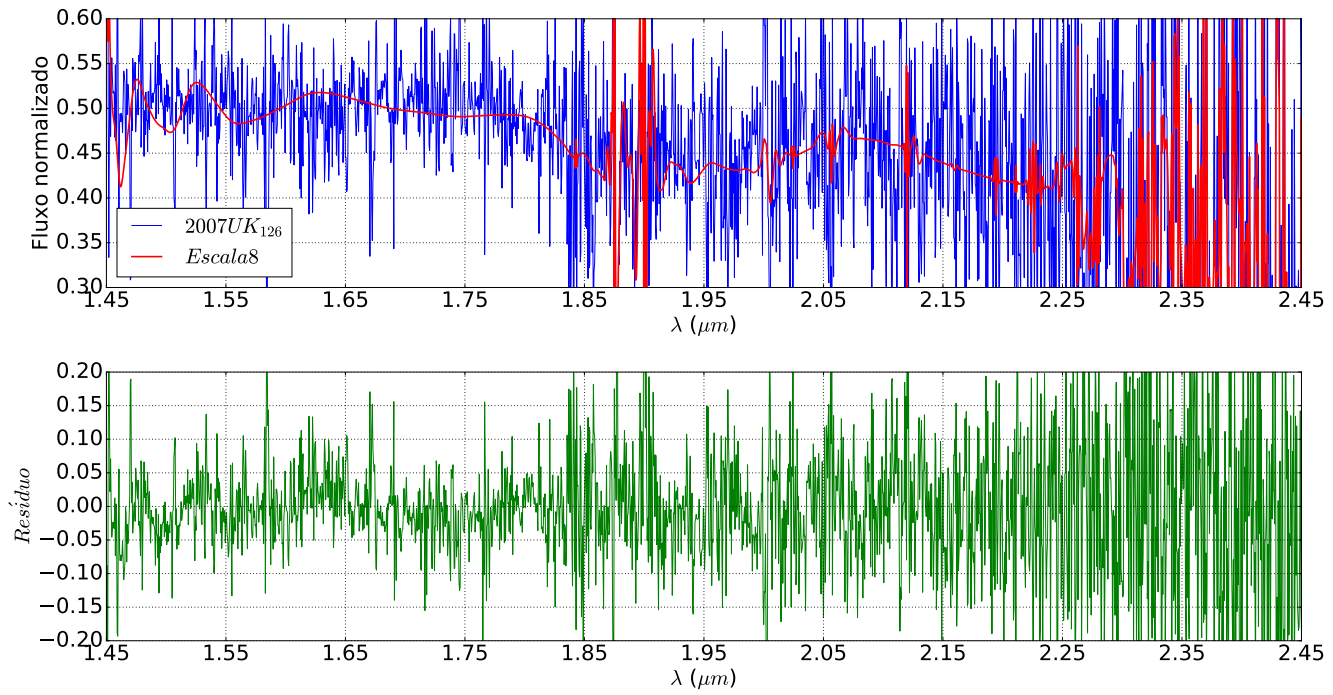


Figura A.41: Espectro do TNO destacado 229762 2007 UK₁₂₆ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 8*.

A.42 250112 2002 KY₁₄

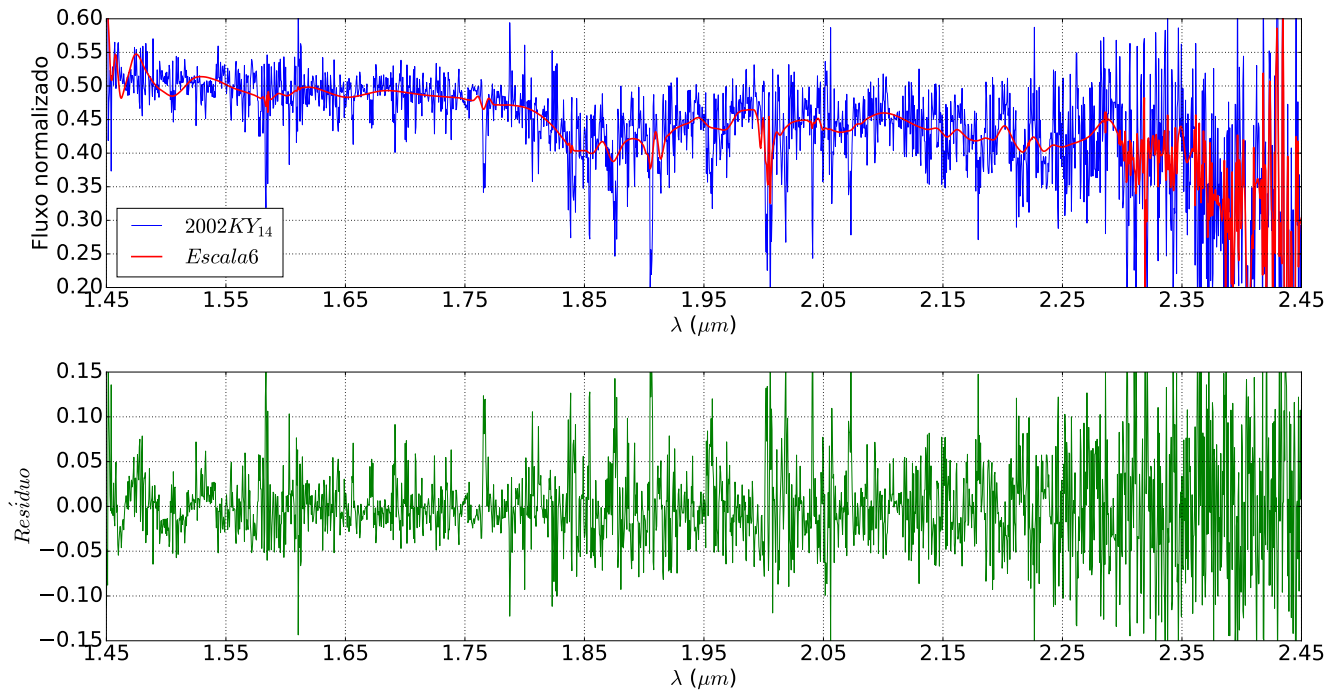


Figura A.42: Espectro do centauro 250112 2002 KY₁₄ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 6*.

A.43 281371 2008 FC₇₆

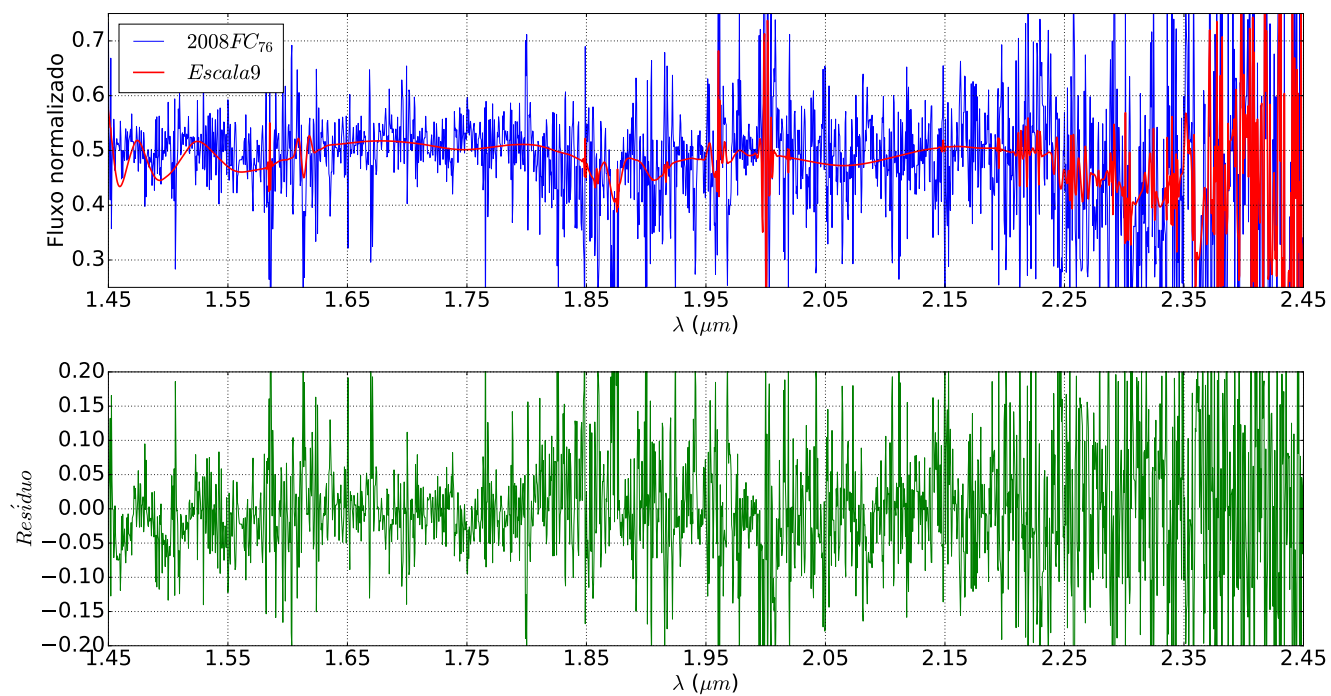


Figura A.43: Espectro do centauro 281371 2008FC₇₆ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 9*.

A.44 307616 2003 QW₉₀

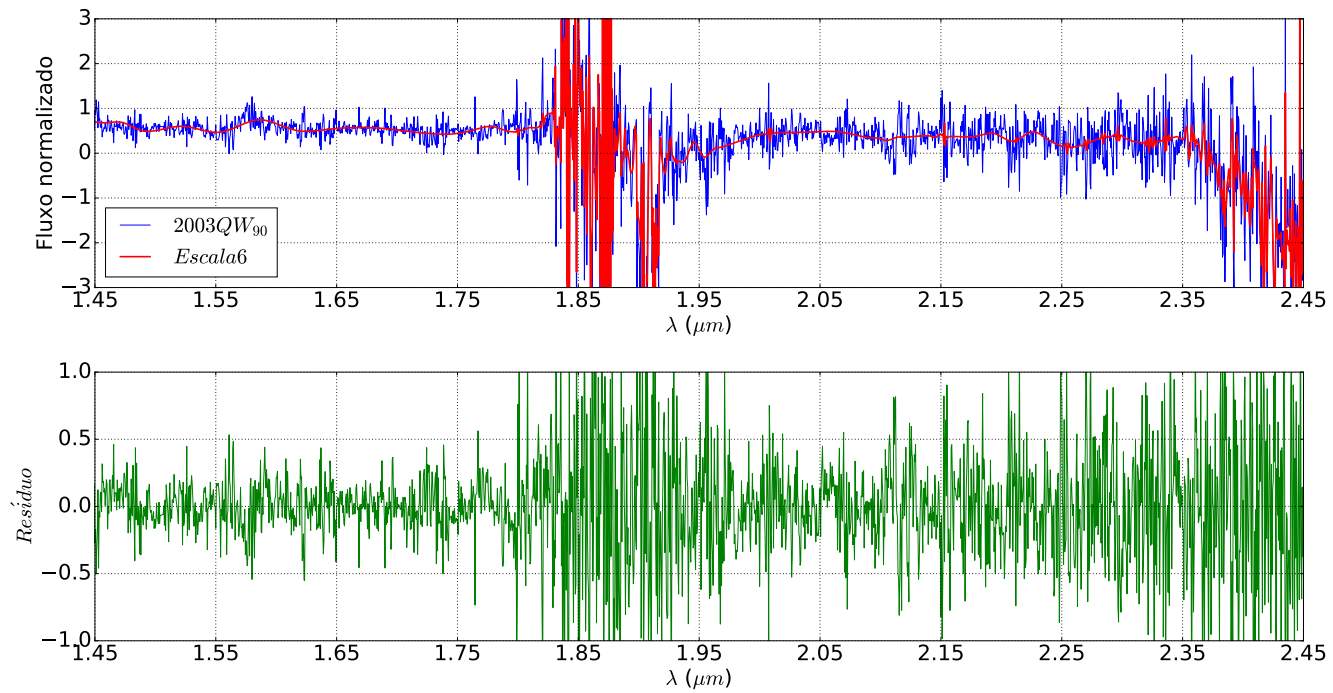


Figura A.44: Espectro do TNO clássico 307616 2003 QW₉₀ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 6*.

A.45 309737 2008 SJ₂₃₆

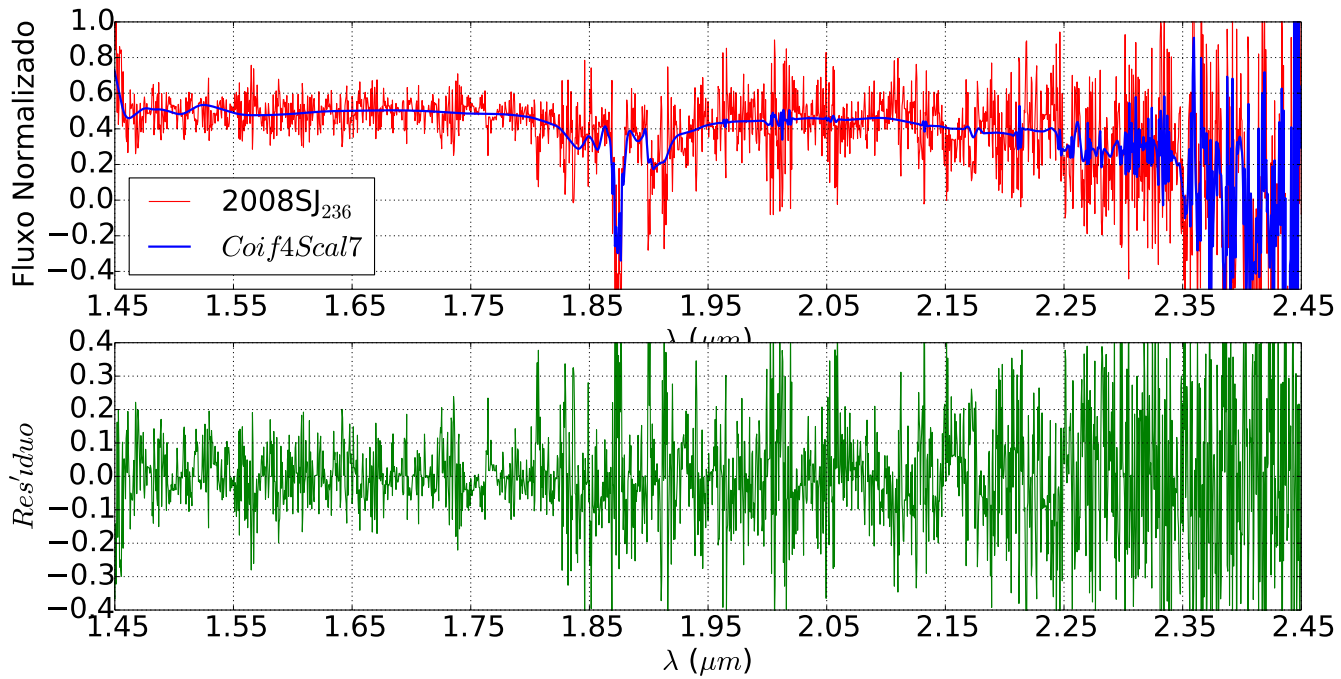


Figura A.45: Espectro do centauro 309737 2008 SJ₂₃₆ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 7*.

A.46 2003 UZ₄₁₃

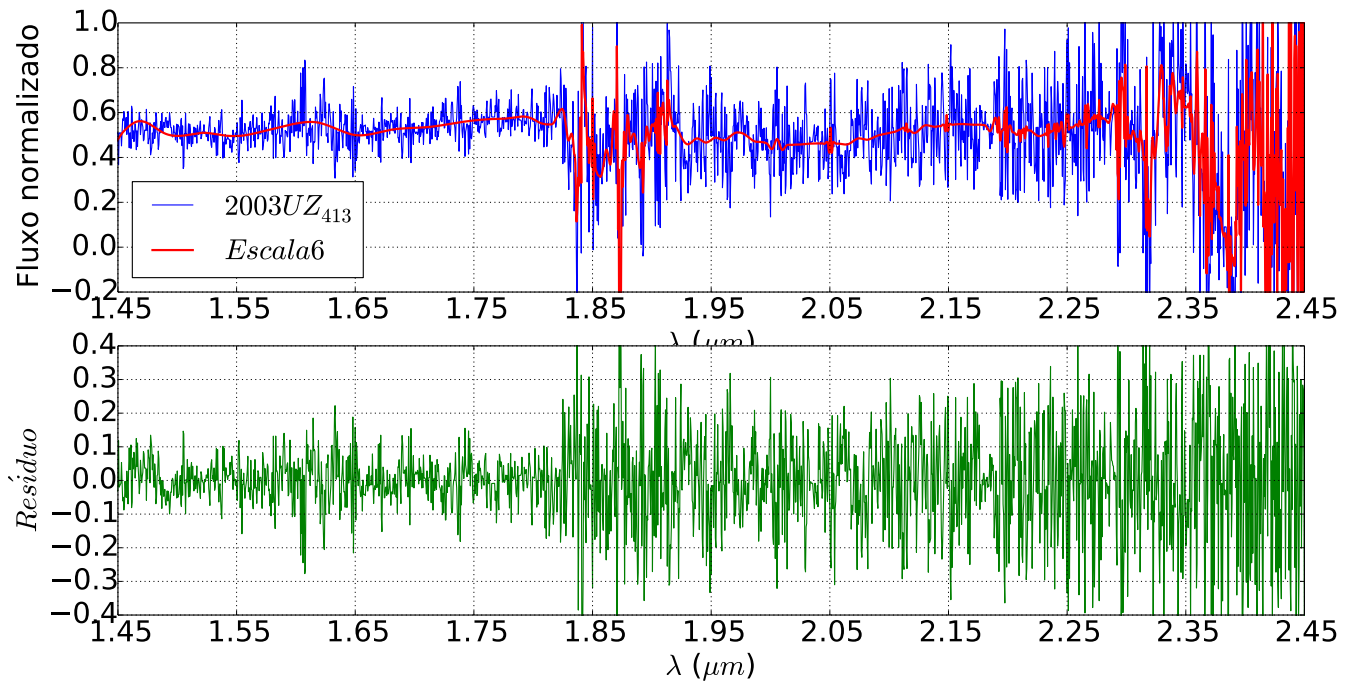


Figura A.46: Espectro do TNO ressonante 2003 UZ₄₁₃ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 6*.

A.47 2007 UM₁₂₆

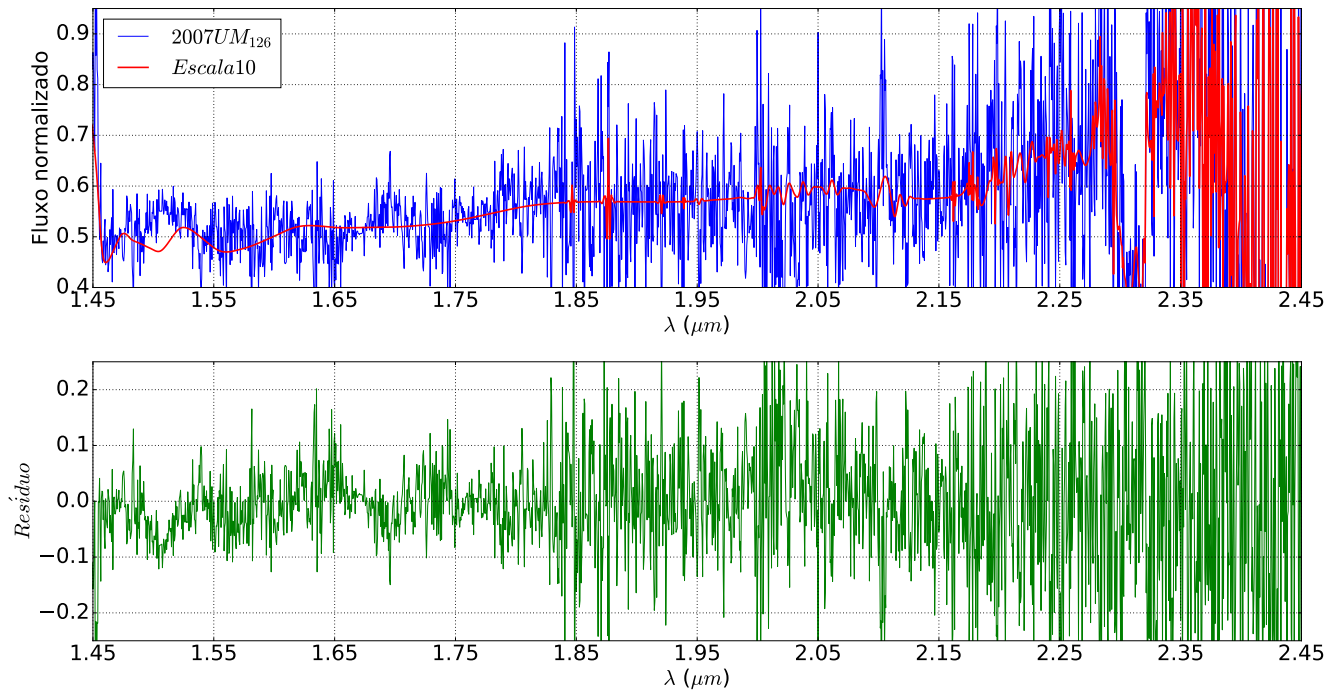


Figura A.47: Espectro do centauro 2007 UM₁₂₆ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 10*.

A.48 2007 VH₃₀₅

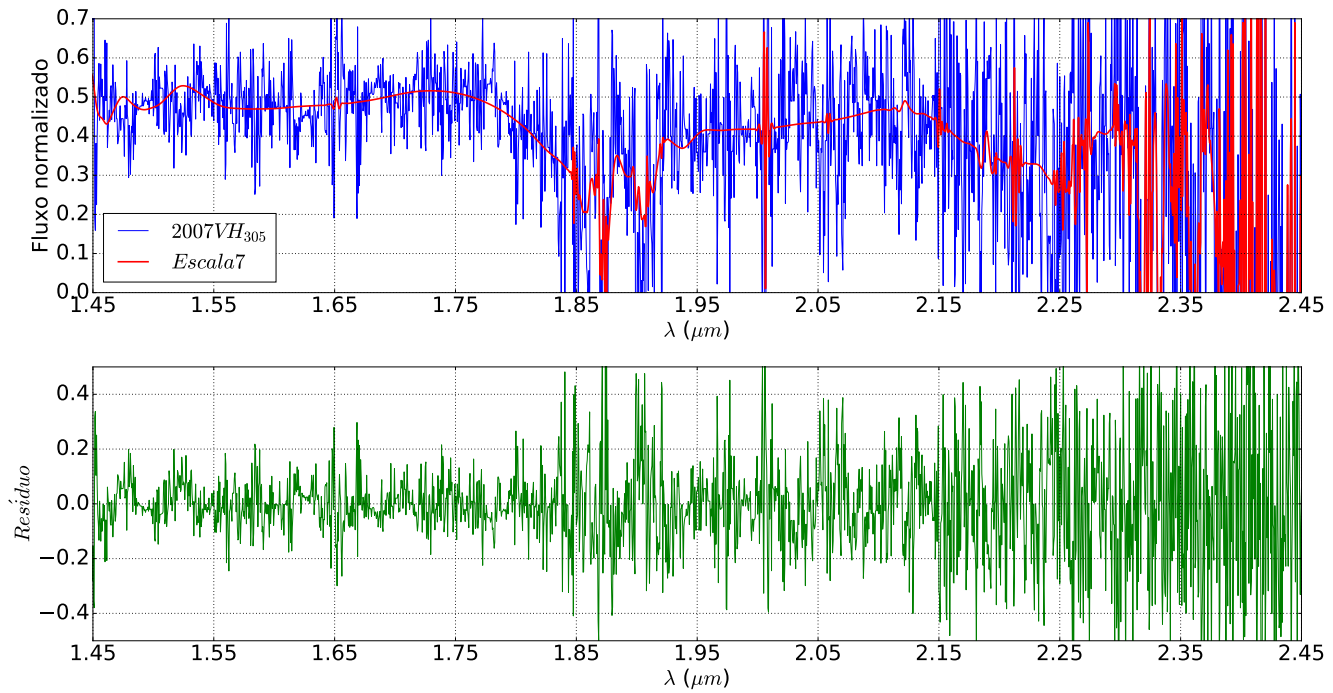


Figura A.48: Espectro do TNO destacado 2007 VH₃₀₅ (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 7*.

A.49 Caronte

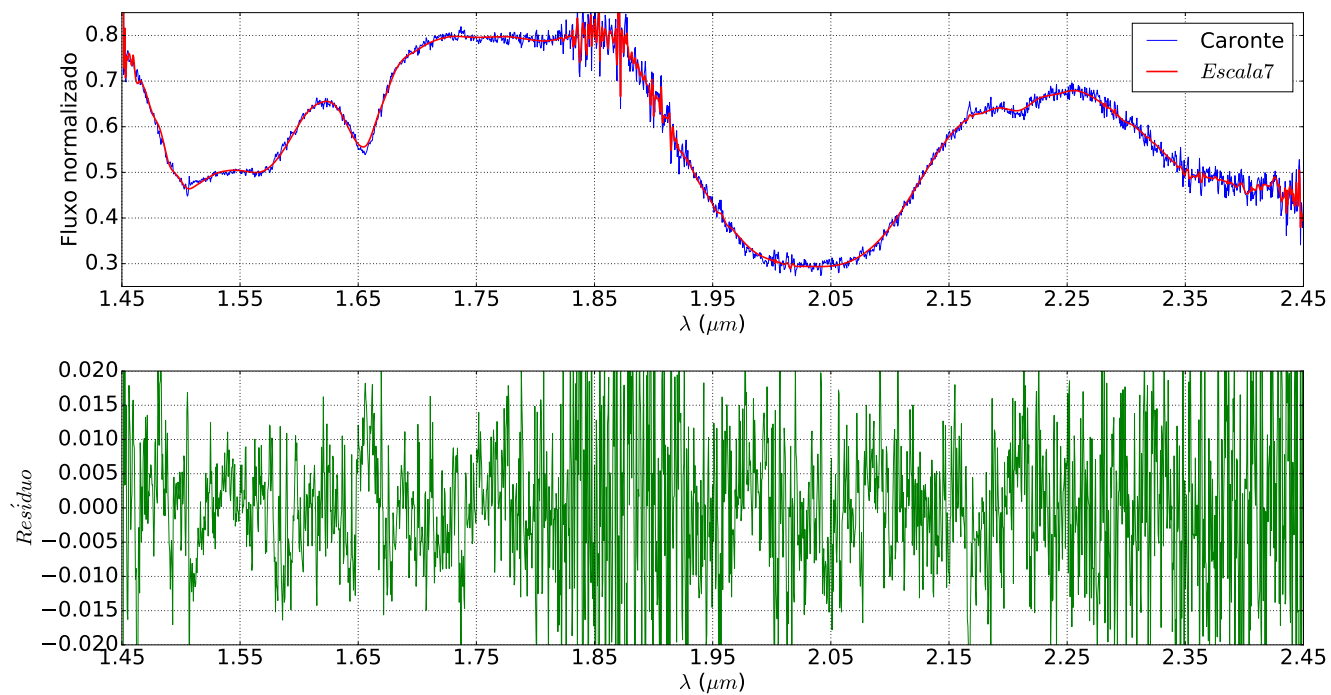


Figura A.49: Espectro de Caronte (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 7*.

A.50 Tritão

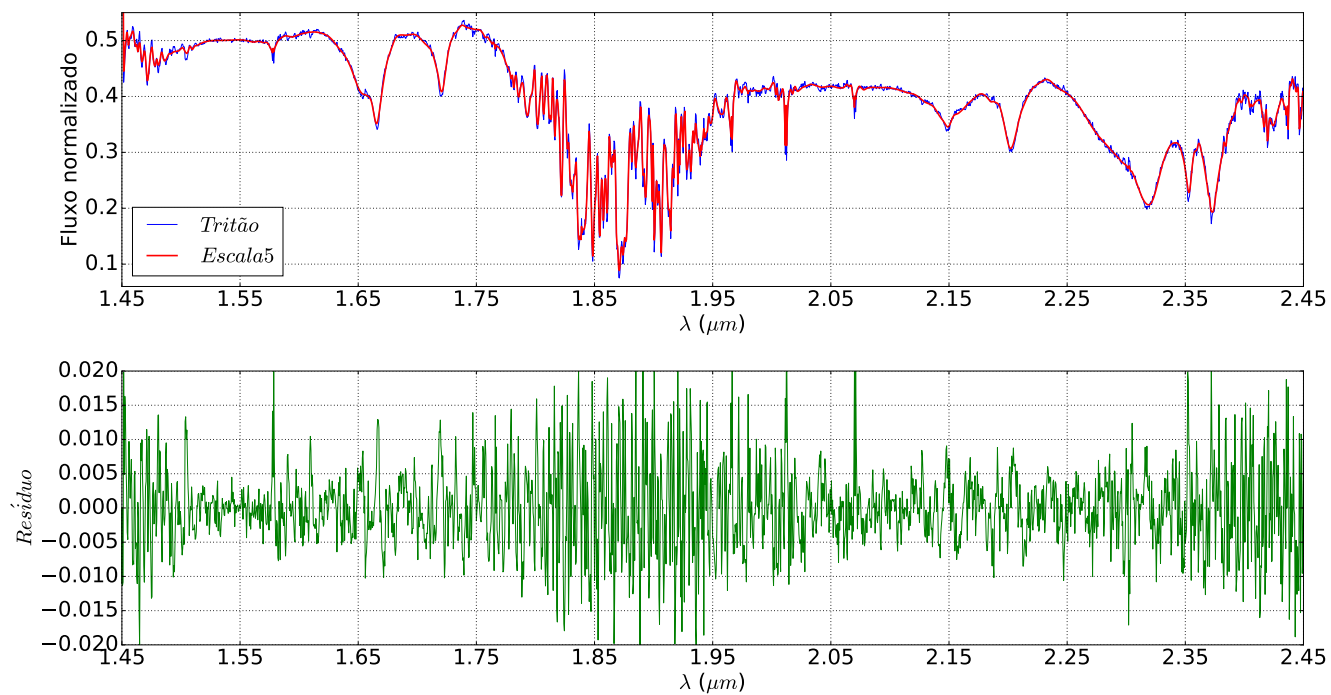


Figura A.50: Espectro de Tritão (em azul), a diferença entre o espectro original e o filtrado está mostrado em verde e em vermelho mostramos o espectro do referido objeto filtrado na *Wavelet Coiflet 4 Escala 5*.