Universidade do Vale do Paraíba
Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento

DANILO MACIEL LOPES GUSMÃO

ESTUDO MULTI-TÉCNICA DAS REGIÕES HII ULTRACOMPACTAS

São José dos Campos, SP
2015

DANILO MACIEL LOPES GUSMÃO

ESTUDO MULTI-TÉCNICA DAS REGIÕES HII ULTRACOMPACTAS

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia, como complementação dos créditos necessários para a obtenção do título de Doutor em Física e Astronomia.

Orientadores: Prof. Dr. Cassio Leandro Dal Ri Barbosa Prof. Dr. Irapuan Rodrigues de Oliveira Filho

São José dos Campos, SP
2015

Fundação Valeparaibana de Ensino

BIBLIOTECA

TERMO DE AUTORIZAÇÃO DE DIVULGAÇÃO DA OBRA

Ficha catalográfica

Gusmão, Danilo Maciel Lopes
Estudo Multi-técnica das regiões HIII ultracompactas / Danilo Maciel Lopes Gusmão; orientador, Cassio Leandro Dal Ri Barbosa; co-orientador Irapuan Rodrigues de Oliveira Filho. - São José dos Campos, SP, 2015.
164 p.

Tese (Doutorado) - Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos. Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia.

Inclui referências

1. Física e Astronomia. 2. Mapas de linha. 3. Espectroscopia. 4. UCHIII. 5. PCA. I. Barbosa, Cassio Leandro Dal Ri, orient. II. Oliveira Filho, Irapuan Rodrigues de, co-orient. III. Universidade do Vale do Paraíba. Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia. IV. Título.

Eu, Danilo Maciel Lopes Gusmão, autor(a) da obra acima referenciada:

Autorizo a divulgação total ou parcial da obra impressa, digital ou fixada em outro tipo de mídia, bem como, a sua reprodução total ou parcial, devendo o usuário da reprodução atribuir os créditos ao autor da obra, citando a fonte.

Declaro, para todos os fins e efeitos de direito, que o Trabalho foi elaborado respeitando os princípios da moral e da ética e não violou qualquer direito de propriedade intelectual sob pena de responder civil, criminal, ética e profissionalmente por meus atos.

São José dos Campos, 10 de Dezembro de 2015.

Danilo M. L Gusmão

Autor(a) da Obra

Data da defesa: 23 / 09 / 15

DANILO MACIEL LOPES GUSMÃO

"ESTUDO MULTI TÉCNICA DE REGIÕES HII ULTRACOMPACTAS."

Tese aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Doutor em Física e Astronomia, do Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia, do Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento da Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, SP, pela seguinte banca examinadora:

Prof. Dr. **ALEXANDRE SOARES DE OLIVEIRA** (UNIVAP)_____
Prof. Dr. **IRAPUAN RODRIGUES DE OLIVEIRA FILHO** (UNIVAP)_____
Prof. Dr. **CÁSSIO LEANDRO DAL RI BARBOSA** ( )_____
Prof. Dr. **AUGUSTO DAMINELI NETO** (USP)_____
Prof. Dr. **GABRIEL RODRIGUES HICKEL** (UNIFEI)_____

Profª. Dra. Sandra Maria Fonseca da Costa
Diretora do IP&D – UniVap
São José dos Campos, 23 de setembro de 2015.

"Se mesmo depois da exaustão total da sua mente e do seu corpo, você ainda tiver algo que não consegue abandonar, então essa é a sua verdade, que ninguém pode tirar de você."

Samurai X

Dedico esse trabalho a Cassia. Pessoa que sempre me apoio.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu irmão, Fernando Maciel Lopes de Gusmão, e familiares por ficar sempre ao meu lado em todos os momentos, bons e ruins. Agradeço a todos amigos que acompanharam esta minha jornada, principalmente, Priscila Freitas, Deise Rosa e Evelyn Martins. Agradeço também a todos os professores do Laboratório de Física e Astronomia que tiveram tanta paciência comigo e me ajudaram em minhas diversas dificuldades. Um agradecimento especial a pessoa que iluminou minha visa, Michele Nunes dos Santos. E não podendo esquecer, agradeço também a Cecilia de Cássia Maciel, que não pode ver essa fase de minha vida completa, porém sem seus incentivos não teria sido possível chegar tão longe.

Um agradecimento especial ao meu orientador, Prof. Dr. Cássio Leandro Dal Ri Barbosa, pela paciência, ajuda, compreensão e oportunidade em estudar esta área fascinante. Por fim, agradeço a Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior (CAPES) pela bolsa de doutorado concedida e a Universidade do Vale do Paraíba (UNIVAP) pela isenção das mensalidades, que possibilitaram a concretização deste trabalho.

ESTUDO MULTI-TÉCNICA DAS REGIÕES HII ULTRACOMPACTAS

RESUMO

Estrelas de alta massa ainda em processo de formação são obscurecidas por gás e poeira, o que dificulta o estudo desses objetos. A fase mais promissora para se obter informação sobre os processos envolvidos corresponde à fase de região HII ultracompacta, quando a acreção já terminou, ou já se reduziu de modo a diminuir a opacidade da região. Neste trabalho foram estudadas 19 regiões UCHII com o espectrógrafo de campo integral no infravermelho próximo NIFS do Gemini com o auxílio de óptica adaptativa, com o objetivo de se obter o tipo espetral do objeto ionizante. Para atingir esse objetivo foram usados 3 métodos: espectroscopia direta, mapas de linha de emissão e tomogramas PCA. Com a combinação dos 3 métodos foi possível estimar o tipo espectral de 21 fontes, todas entre o tipo espectral B3-O5, mas sendo duas delas Supergigantes luminosas M. De todos os métodos, a tomografia PCA se mostrou a mais promissora com taxa de detecção de linhas fotosféricas maior que a espectroscopia direta, mas também por evidenciar a dinâmica do gás circundante e/ou estruturas na região estudada.

Palavras-chave: UCHII, PCA, Mapas de Linhas, Espectroscopia.

MULTI-TECHNIQUE STUDIES OF ULTRACOMPACTAS REGIONS H II

ABSTRACT

High mass stars still in the process of formation are obscured by gas and dust, which make them hard to study. The most promising phase to obtain information about the processes involved corresponds to the phase of Ultracompact HII region, when the accretion already finished, or is greatly reduced, reducing also the opacity of the region. In this work, we studied 19 UCHII regions with the Gemini integral-field near-infrared spectrograph NIFS, with the aid of adaptive optics, to obtain the spectral type of the ionizing object. To reach this goal, we used 3 methods: direct spectroscopy, emission line maps and PCA tomograms. With the combination of these 3 methods it was possible to estimate the spectral type of 21 sources, all between spectral type of B3-O5, but which 2 of them are luminous M supergiants. Of all methods, the PCA tomography proved to be the most promising as the detection rate of photospheric lines is higher than the other methods, but also because it can show the dynamics of the surrounding gas and/or structures at the studied region.

Keywords: UCHII, PCA, Line Maps, Spectroscopy

SUMÁRIO

Pág.

1 Introdução 20

1.1 Estrelas Massivas 20

1.2 Formação das Estrelas Massivas 22

1.3 Regiões H II Ultracompactas 24

1.4 Critério de Escolha da Amostra 28

1.5 Descrição dos alvos 29

1.6 Objetivos deste trabalho 42

2 Observação e Redução de dados 44

2.1 As Observações 44

2.1.1 O NIFS 44

2.1.2 Processo de observação 45

2.2 Redução de Dados 46

2.2.1 Redução do Cubo de Dados 46

2.2.2 Redução dos dados Espectroscópicos 47

3 Técnicas de Análise de Dados 51

3.1 Mapas em faixas espectrais 51

3.2 Espectroscopia unidimensional de fontes puntiformes 53

3.2.1 Classificação Espectral 53

3.2.1.1 Linhas fotosféricas 53

3.2.1.2 Modelos de Fotoionização 54

3.3 Tomografia de Análise de Componente Principal - PCA 57

3.3.1 Maximizando o PCA 60

3.3.2 PCA 62

4 Análises das Regiões Individuais 63

4.1 Região G5.97-1.17 63

4.1.1 Mapas em faixas espectrais 63

4.1.2 Espectroscopia unidimensional de fonte puntiforme 64

4.1.2.1 Fonte 1 64
4.1.2.2 Fonte 23 66
4.1.2.3 Fonte 24 66
4.1.3 PCA 69
4.1.4 Discussão dos resultados 72
4.2 Região G77.965-0.006A 75
4.2.1 Mapas de faixa espectral 75
4.2.2 Espectroscopia unidimensional de fonte puntiforme 76
4.2.2.1 Fonte 18 76
4.2.2.2 Fonte 25 76
4.2.3 PCA 79
4.2.4 Discussão dos resultados 79
4.3 Região G77.965-0.006B 83
4.3.1 Mapas de faixas espectrais 83
4.3.2 Espectroscopia unidimensional de fonte puntiforme 83
4.3.2.1 Fonte 19 84
4.3.2.2 Fonte 20 86
4.3.2.3 Fonte 21 86
4.3.3 PCA 89
4.3.4 Discussão dos resultados 94
4.4 Região G78.4+2.6 94
4.4.1 Mapas de faixa espectral 94
4.4.2 Espectroscopia unidimensional de fonte puntiforme 95
4.4.3 PCA 97
4.4.4 Discussão dos resultados 97
5 Espectroscopia e PCA para as demais UCHII 100
5.1 G6.55-0.10 100
5.1.1 Espectroscopia unidimensional de fonte puntiforme 100
5.1.2 PCA 100

5.2 G15.04 -0.6 100
5.2.1 Espectroscopia unidimensional de fonte puntiforme 100
5.2.2 PCA 105
5.3 G18.146-0.284 110
5.3.1 Espectroscopia unidimensional de fonte puntiforme 110
5.3.2 PCA 110
5.4 G23.96 – 0.1 115
5.4.1 Espectroscopia unidimensional de fonte puntiforme 115
5.4.2 PCA 115
5.5 G28.288-0.364 121
5.5.1 Espectroscopia unidimensional de fonte puntiforme 121
5.5.2 PCA 124
5.6 G29.96-0.0 131
5.6.1 Espectroscopia unidimensional de fonte puntiforme 131
5.6.2 PCA 133
5.7 G45.12+0.1A 137
5.7.1 Espectroscopia unidimensional de fonte puntiforme 137
5.7.2 PCA 139
5.8 G48.609+0.027 146
5.8.1 Espectroscopia unidimensional de fonte puntiforme 146
5.8.2 PCA 146
5.9 G53.605+0.046 146
5.9.1 Espectroscopia unidimensional de fonte puntiforme 146
5.9.2 PCA 151
5.10 G70.965-1.6 155
5.10.1 Espectroscopia unidimensional de fonte puntiforme 155
5.10.2 PCA 155
6 Discussões e Análise dos Resultados 164
6.1 Discussão sobre o PCA e as regiões UCHII 164

6.2 Taxa de sucesso na detecção de linhas fotosféricas 165
6.3 Comparação com a faixa de rádio 166
6.4 Precisão na classificação espectral 166
6.5 PCA e contaminação nebular 168
7 Conclusões 169
REFERÊNCIAS 171

LISTA DE FIGURAS

Pág.

1 Distribuição das estrelas pela função de massa inicial. 21
2 Fase de formação de estrelas massivas. 22
3 Região HII Esférica ou Compacta. 25
4 Região HII Núcleo-halo 26
5 Região HII Cometária 26
6 Região HII Bipolar 27
7 Região HII Irregular 27
8 Região HII Casulo 28
9 Localização da região G5.97-1.17 30
10 Uma esquematização da produção das *proplyds* (à esquerda) e a visualização na nebulosa de Órion (à direita) 31
11 Região G6.55-0.10. 31
12 Localização da região G15.04 -0.6 na M7 32
13 Localização da região G18.146-0.284 33
14 Localização da região G23.96 – 0.1 34
15 Localização da região G28.288-0.364 35
16 Localização da região G29.96-0.0 36
17 Localização da região G45.12+0.1 37
18 Imagem da região G48.609+0.027 38
19 Localização da região G53.605+0.046 39
20 Região G70.293-1.6. 40
21 Imagem da região G77.965-0.006 na banda K. 41
22 Imagem da região G78.4+2.6 na banda K. 42

23 espectrógrafo de campo integral (IFU) no infravermelho próximo (NIFS) . . . 44
24 Ilustração esquematizada de um cubo de dados 45
25 Exemplo de um cubo de dados. 48
26 Espectro da estrela hip 99719, exemplo de uma estrela do tipo A0 V. 49
27 Espectro referente à fonte na região G78.438+2.659. 50

28 Exemplo de mapa de faixa espectral. 52
29 Imagen tiradas em 4 diferentes fatias do cubo de dados da G5.97-1.17. 58
30 Exemplo da aplicação da reamostragem do cubo da região G5.97-1.17. 60
31 Exemplo da aplicação do filtro espacial *Butterworth*. 61

32 Mapas de faixas espectrais da região G5.97-1.17 63
33 Imagem da região G5.97 – 1.17 e espectro da fonte 1 normalizado pelo contínuo. 65

34 Imagem da região G5.97 – 1.17 e espectro da fonte 23 normalizado pelo contínuo 67
35 Imagem da região G5.97 – 1.17 e espectros da fonte 24 calibrado em fluxo. . . 68
36 Gráfico da razão entre as intensidades medidas do He I (2,058 μm) e o Brγ. . 69
37 Tomograma 1 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G5.97-1.17. A região está toda correlacionada, sendo a região mais clara a região com maior correlação. 70
38 Tomograma 2 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G5.97-1.17. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas. . . . 71
39 Tomograma 4 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G5.97-1.17. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas. . . . 73
40 Tomograma 5 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G5.97-1.17. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas. . . . 74
41 Mapas de faixa espectral da região G77.965-0.006A 75
42 Espectro normalizado pelo contínuo da fonte 18 que está localizada ao centro da região G77.965-0.006A. 77
43 Localização da fonte 25 na região G77.965-0.006A e seu espectro calibrado em fluxo. 78
44 Tomograma 1 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G77.965-0.006A. O campo está todo correlacionado, sendo a região mais clara a de maior correlação. 80
45 Tomograma 2 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G77.965-0.006A. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho. 81
46 Tomograma 3 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G77.965-0.006A.As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho. 82
47 Mapas de faixas espectrais da região G77.965-0.006B 84
48 Imagem da região G77.965-0.006B com destaque para a fonte 19 e seu espectro da mesma normalizado pelo contínuo e suavizado na ordem 3. 85
49 Imagem da regiãoG77.965-0.006B e espectros da fonte 20 calibrado em fluxo. . 87
50 Localização da fonte 21 na região G77.965-0.006B e seu espectro calibrado em fluxo. 88
51 Tomograma 1 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G77.965-0.006B. As regiões está toda correlacionada, sendo a região mais clara a região com maior correlação. 90

52 Tomograma 2 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G77.965-0.006B. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas. 91
53 Tomograma 3 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G77.965-0.006B.As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas. 92
54 Tomograma 4 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G77.965-0.006B. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelha nos tomogramas. 93
55 Mapas de faixas espectrais da região G78.4+2.6 95
56 Imagem da região G78.438+2.659 e espectro da fonte 22 normalizado e suavizado. A imagem mostra a fonte detectada na região. A região demarcada pelo círculo representa o local e o tamanho da abertura de extração do espectro. As linhas fotosféricas utilizadas para a classificação espectral são demarcadas pelas linhas verticais tracejadas e o nome do elemento que a forma. 96
57 Tomograma 1 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G78.4+2.6. As regiões está toda correlacionada, sendo a região mais clara a região com maior correlação. 98
58 Tomograma 2 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G78.4+2.6. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas. . . . 99
59 Imagem da região G6.55-0.10 e espectro da fonte 2. A região demarcada pelo círculo representa o local e o tamanho da abertura de extração do espectro. As linhas detectadas são indicadas pelas linhas verticais tracejadas. 101
60 Tomograma 1 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G6.55-0.10. O campo está todo correlacionada, sendo a região mais clara de maior correlação. 102
61 Tomograma 2 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G6.55-0.10.As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas. . . . 103
62 Imagem da região G15.04-0.6 e espectro normalizado da fonte 3. A região demarcada pelo círculo representa o local e o tamanho da abertura de extração do espectro. No espectro está contida a localização das linhas detectadas são indicadas pelas linhas verticais tracejadas. 104
63 Tomograma 1 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G15.04-0.6. O campo está todo correlacionada, sendo a região mais clara de maior correlação. 106

64 Tomograma 2 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G15.04-0.6. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas. . . . 107
65 Tomograma 3 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G15.04-0.6. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas. . . . 108
66 Tomograma 4 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G15.04-0.6. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas. . . . 109
67 Imagem da região G18.146-0.284 e espectro normalizado da fonte 4. A região demarcada pelo círculo representa o local e o tamanho da abertura de extração do espectro. As linhas utilizadas detectadas são indicadas pelas linhas verticais tracejadas. 111
68 Tomograma 1 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G18.146-0.284. O campo está todo correlacionada, sendo a região mais clara de maior correlação. 112
69 Tomograma 2 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G18.146-0.284. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas. . . 113
70 Tomograma 3 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G18.146-0.284. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas. . . 114
71 Imagem da região G23.96 – 0.1 e espectro normalizado da fonte 5. A região demarcada pelo círculo representa o local e o tamanho da abertura de extração do espectro. As linhas detectadas são indicadas pelas linhas verticais tracejadas.116
72 Imagem da região G23.96 – 0.1 e espectro da fonte 6. A região demarcada pelo círculo representa o local e o tamanho da abertura de extração do espectro. As linhas detectadas são indicadas pelas de linhas verticais tracejadas. 117
73 Tomograma 1 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G23.96 – 0.1. O campo está todo correlacionada, sendo a região mais clara de maior correlação. 118
74 Tomograma 2 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G23.96 – 0.1. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas. . . 119
75 Tomograma 3 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G23.96 – 0.1.As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas. . . 120

76 Imagens região G28.288-0.364. A região demarcada pelo círculo representa o local e o tamanho da abertura de extração do espectro. A parte superior esquerda mostra a localidade da fonte 7, a parte superior direita mostra a localidade da fonte 8, a parte inferior esquerda mostra a fonte 9 e por fim parte inferior direita mostra o local da fonte 10. 121
77 Espectros para cada fonte presente na região G28.288-0.364. As linhas detectadas são indicadas pelas linhas verticais tracejadas. O primeiro espectro refere-se à fonte 7 e o segundo à fonte 8. 122
78 Espectros para cada fonte presente na região G28.288-0.364. As linhas detectadas são indicadas pelas linhas verticais tracejadas. O primeiro espectro refere-se à fonte 9 e o segundo à fonte 10. 123
79 Tomograma 1 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G28.288-0.364. O campo está todo correlacionada, sendo a região mais clara de maior correlação. 125
80 Tomograma 2 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G28.288-0.364. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas. . . 126
81 Tomograma 3 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G28.288-0.364. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas. . . 127
82 Tomograma 4 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G28.288-0.364. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas. . . 128
83 Tomograma 5 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G28.288-0.364. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas. . . 129
84 Tomograma 6 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G28.288-0.364. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas. . . 130
85 Tomograma 7 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G28.288-0.364. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas. . . 131
86 Imagem da região G29.96-0.0 e espectro da fonte 11. A região demarcada pelo círculo representa o local e o tamanho da abertura de extração do espectro. As linhas detectadas são indicadas pelas linhas verticais tracejadas. 132
87 Tomograma 1 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G29.96-0.0. O campo está todo correlacionada, sendo a região mais clara de maior correlação. 134

88 Tomograma 2 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G29.96-0.0. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas. . . . 135
89 Tomograma 3 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G29.96-0.0. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas. . . . 136
90 Imagens da região G45.12+0.1A. A região demarcada pelo círculo representa o local e o tamanho da abertura de extração do espectro. A imagem à esquerda mostra a posição da fonte 12 e a imagem à direita mostra a posição da fonte 13.137
91 Espectros para cada fonte presente na G45.12+0.1A. As linhas detectadas são indicadas pelas linhas verticais tracejadas. A figura acima mostra a o espectro da fonte 12 e a abaixo mostra o espectro da fonte 13. 138
92 Tomograma 1 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G45.12+0.1A. O campo está todo correlacionada, sendo a região mais clara de maior correlação. 140
93 Tomograma 2 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G45.12+0.1A.As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas. . . 141
94 Tomograma 3 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G45.12+0.1A.As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas. . . 142
95 Tomograma 4 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G45.12+0.1A. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas. . . 143
96 Tomograma 5 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G45.12+0.1A.As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas. . . 144
97 Tomograma 6 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G45.12+0.1A. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas. . . 145
98 Imagem da região G48.609+0.027 e espectro da fonte 14. A região demarcada pelo círculo representa o local e o tamanho da abertura de extração do espectro. As linhas detectadas são indicadas pelas linhas verticais tracejadas. 147
99 Tomograma 1 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G48.609+0.027. O campo está todo correlacionada, sendo a região mais clara de maior correlação. 148
100 Tomograma 2 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G48.609+0.027. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas.149

101 Imagem da região G53.605+0.046 e espectro normalizado da fonte 15. A região demarcada pelo círculo representa o local e o tamanho da abertura de extração do espectro. As linhas detectadas são indicadas pelas linhas verticais tracejadas. 150
102 Imagem região G53.605+0.046 e espectro normalizado da fonte 16. A região demarcada pelo círculo representa o local e o tamanho da abertura de extração do espectro. As linhas detectadas são indicadas pelas linhas verticais tracejadas. 151
103 Tomograma 1 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G53.605+0.046. O campo está todo correlacionada, sendo a região mais clara de maior correlação. 152
104 Tomograma 2 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G53.605+0.046. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas. 153
105 Imagem região G70.965-1.6 e espectro da fonte 17. A região demarcada pelo círculo representa o local e o tamanho da abertura de extração do espectro. As linhas detectadas são indicadas pelas linhas verticais tracejadas. 156
106 Tomograma 1 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G70.965-1.6. O campo está todo correlacionada, sendo a região mais clara de maior correlação. 157
107 Tomograma 2 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G70.965-1.6. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas. . . 158
108 Tomograma 3 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G70.965-1.6. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas. . . 160
109 Tomograma 4 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G70.965-1.6 As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas. . . 161
110 Tomograma 5 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G70.965-1.6. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas. . . 162
111 Tomograma 5 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G70.965-1.6. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas. . . 163

LISTA DE TABELAS

Pág.

1 Lista das Regiões H II selecionadas. 29

2 Informações sobre os alvos observados. 47
3 Tamanhos das aberturas de extração em segundos de arcos utilizados para cada fonte. 47
4 Magnitudes das estrelas telúricas usadas. 49

5 Intervalos utilizados para a criação de cada mapa. 52
6 Comportamento das linhas para cada tipo espectral. 54
7 Informações dos cubos após as remoções dos da área especais sem dados e uniformização da cobertura espectral 59

8 Fluxos das linhas detectadas. 122
9 Fluxos e razão de linhas corrigidas para as fontes detectadas. 124

10 Classificação espectral das fontes observadas e estudadas neste trabalho. . . . 165
11 Classificação espectral obitda por este trabalho das fontes observadas e classificação em rádio. 167

1 Introdução

As mais belas visões em um céu à noite são as estrelas, que estão distribuídas em nossa Galáxia e por todo o Universo conhecido. Como tudo em nosso Universo, as estrelas passam por um processo evolutivo que pode ser divido em três fases: formação, sequencia principal e estágios finais. Nestes processos, as bilhões de estrelas modificam o ambiente próximo a elas, deixando-o mais dinâmico. Dentre todas as estrelas, as que imprimem maior influência no meio e contêm características marcantes, como intensa radiação ultravioleta e deposição de *momentum* mecânico, são as estrelas de alta massa ou estrelas massivas. Entretanto, o entendimento completo de suas fases iniciais ainda não foi estabelecido, o que motiva diversos estudos em busca de respostas para suprir essa lacuna de entendimento. Nas seções seguintes serão abordados os principais tópicos relacionados ao objeto alvo deste estudo: as estrelas de alta massa em estágio inicial de formação.

1.1 Estrelas Massivas

Um pequeno grupo de estrelas que influenciam profundamente o ambiente a sua volta, enriquecendo-o quimicamente através de violentas explosões de supernovas são as estrelas massivas. Pequenas em número, estas estrelas são raras, representando uma ínfima parte do total de estrelas no Universo. Este fato foi verificado pelo trabalho de Salpeter (1955) na forma de uma lei empírica, que vem se mostrando universal, mais conhecida como função de massa inicial (IMF). A IMF consiste em uma lei de potência de expoente negativo, conforme mostra a Equação 1, servindo como estimativa da quantidade de estrelas que seriam formadas em um dado intervalo de massa.

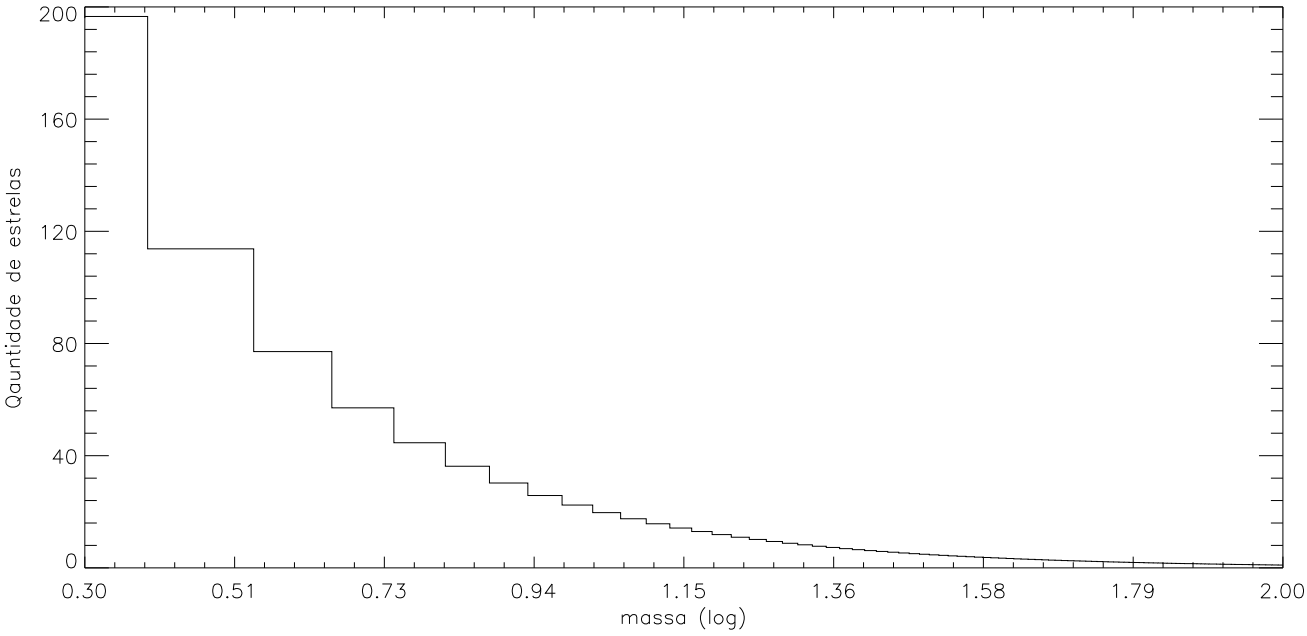
$$\xi(M_\star) \; = \; \frac{\partial N_\star}{\partial \log M_\star} = \left(\frac{M_\star}{M_\odot}\right)^\alpha \tag{1}$$

Nesta equação α = -2.35; $M_\star$ = a massa de uma estrela e N = o número de estrelas.

A Figura 1 representa o comportamento dessa lei de potência para estrelas entre 2 a 100 $M_\odot$ normalizada para uma estrela com 100 $M_\odot$.

As estrelas massivas podem ser definidas como estrelas com massa acima de 10 $M_\odot$, posicionadas na classificação espectral entre O2 e B3 e que ao final da sua evolução explodem como supernovas, formando um buraco negro ou uma estrela de nêutron com a matéria remanescente de seu núcleo. Elas são as estrelas mais luminosas da Sequência Principal, com luminosidades entre 10^4 $L_\odot$ e 10^6 $L_\odot$ e apresentando uma temperatura efetiva entre 25.000 K e 50.000 K (MASSEY, 2011). Desta forma, elas são as principais responsáveis pela emissão ultravioleta de origem estelar, que produz as nebulosas foto-ionizadas conhecidas como regiões H II e, consequentemente, ressaltando a estrutura morfológica das galáxias espirais.

Figura 1 - Distribuição das estrelas pela função de massa inicial para um intervalo de massa entre 2 e 100 $M_\odot$ com o expoente encontrado por Salpeter (1955) e normalizada para a criação de 1 estrela com 100 $M_\odot$.



Fonte: Autor.

:

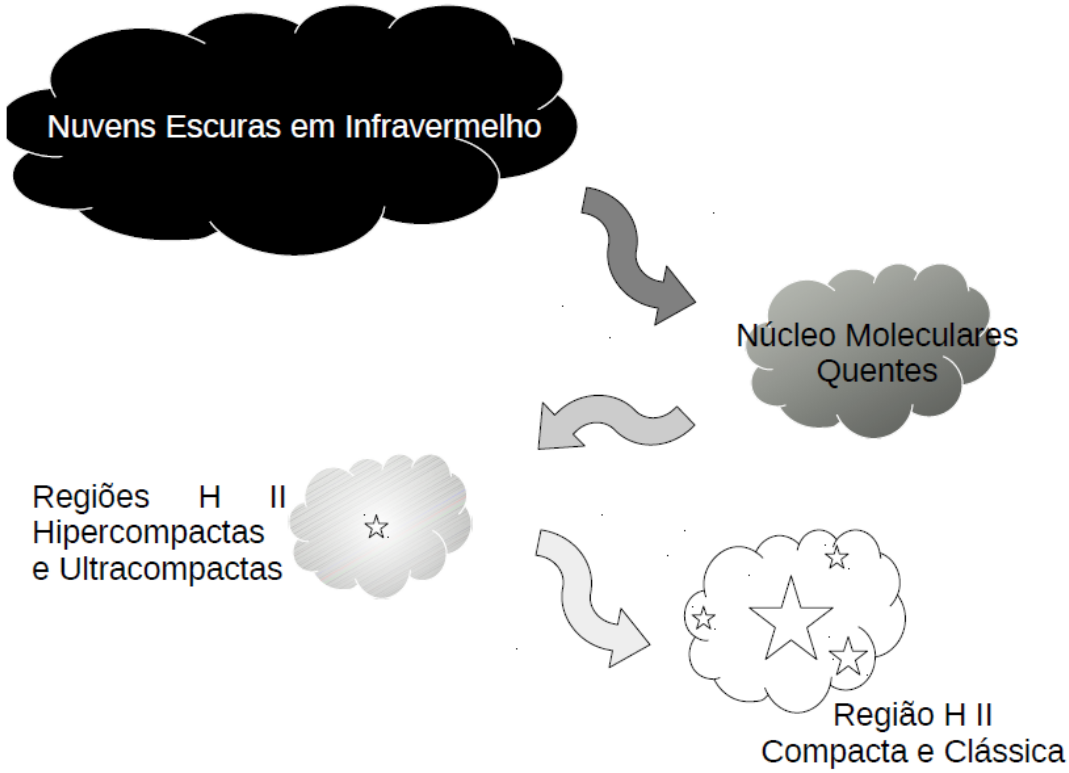
Estas estrelas são encontradas em forte concentração nos braços espirais da Galáxia (WOOD; CHURCHWELL, 1989a) dentro de aglomerados massivos de estrelas jovens (10^3 - 10^5 $M_\odot$) que apresentam estrelas espalhadas em todas as nuvens progenitoras, conhecidos como associações OB. Elas apresentam um tempo de vida menor que 10^7 anos.

$$t_{SP} = \frac{E_{SP}/E_{SP\odot}}{L/L_\odot}\ 10^{10} anos, \tag{2}$$

Nesta equação t_{SP} o tempo da estrela na Sequencia Principal,
$E_{SP\odot}$ a energia disponível do Sol,
$L_\odot$ a luminosidade solar.

Estrelas massivas apresentam forte tendência de possuírem uma ou mais companheiras, visto que aproximadamente 70% das estrelas massivas estão relacionadas a sistemas binários ou múltiplos. A resposta plausível para esta alta ocorrência é a formação de estrelas de alta massa ocorrer no centro de suas nuvens moleculares (BONNELL; BATE; ZINNECKER, 1998) e a existência dos processos de formação que se espera que ocorram nas fases iniciais de formação estelar, tal como a presença do disco ASSIMÉTRICO (KRUMHOLZ *et al.*, 2009).

Figura 2 - Fase de formação de estrelas massivas, conforme por Zinnecker e Yorke (2007). Por esse diagrama simplificado, há 4 etapas principais: Nuvens escuras em Infravermelho, Núcleo Molecular Quente, Região HII Hipercompacta e Ultracompacta e Região H II Compacta e Clássica



Fonte: Autor.

:

1.2 Formação das Estrelas Massivas

Para as estrelas massivas, a fase obscurecida ou a fase de formação é curta em termos absolutos, menor que 10^6 anos, e perdurando por até 15% de seu tempo de vida após ter iniciado a queima de hidrogênio e sua entrada na Sequência Principal (CHURCHWELL, 2002). Segundo Zinnecker e Yorke (2007), para as estrelas massivas, esse estágio embebido pode ser divido em 4 fases intermediárias de evolução, no interior de uma nuvem molecular gigante, conforme pode ser visto na Figura 2. As Nuvens moleculares gigantes que são regiões que apresentam tamanhos entre 1 e 200 pc e valores de sua massa variam de 10 $M_\odot$ até as mais massivas com 10^6 $M_\odot$ (Schulz, N. S. , 2005).

A primeira fase, chamada de "nuvens escuras em infravermelho", apresenta a maior massa e a menor temperatura dentre todas as etapas, semelhantes às encontradas nas nuvens moleculares gigantes. Pela baixa temperatura, sua faixa de emissão é predominante no comprimento de onda em rádio. As altas densidades e a massa dessa região são essenciais para o inicio do processo de formação de estrelas massivas (SRIDHARAN; WILLIAMS; FULLER, 2005). Na segunda fase, denominada "núcleos moleculares quen-

tes", os *masers* em comprimento de onda no infravermelho longínquo e um gás morno e denso são detectáveis, oriundos de choques e da contração do gás no ponto de maior densidade. Nesse instante há expectativa da criação de um disco de acreção e um objeto compacto (KURTZ *et al.*, 2000). Já na terceira fase, conhecida como regiões "HII hipercompactas e ultracompactas", a região se torna pequena e densa. É neste estágio que deve ocorrer o pico de acreção e crescimento do jovem objeto e pode-se observar, por meio da espectroscopia na banda K (BARBOSA *et al.*, 2008; BIK *et al.*, 2008) e de fotometria (BEUTHER; WALSH; LONGMORE, 2009) no comprimento de onda no infravermelho próximo, eventuais detecções indiretas de um disco de acreção. É nessa fase que se espera que ocorra a inversão da predominância das forças atuantes, na qual a força da pressão da radiação e ventos se tornam mais eficientes que a força gravitacional e começam a dissipar o gás que circunda a estrela em formação. Por fim, na última fase, a nuvem é desfeita e a estrela de alta massa é revelada. O gás remanescente, hidrogênio, é totalmente ionizado pela fonte, dando origem a uma região HII compacta podendo ser detectadas na faixa do ótico.

Devido ao fato de as estrelas ficarem obscurecidas por tanto tempo, o estudo de seus processos de formação dificultado, tornando árdua a tarefa de achar uma resposta efetiva para a pergunta: como tais estrelas podem adquirir massas de até 100 $M_{\odot}$, já que a massa limite para que a estrela atinja a luminosidade limite de Eddington na acreção esférica (Equação 3), considerando uma opacidade efetiva de $k_{eff} = 5$ cm^2 g^{-1} (valor típico de regiões onde ocorre a formação das estrelas massivas), é da ordem de 20 $M_{\odot}$, para casos extrapolados da formação de estrelas de baixa massa (KRUMHOLZ *et al.*, 2009)?

$$\frac{k_{eff}\ L}{4\ \pi\ r^2\ c} < \frac{G\ M_{\star}}{r^2} \tag{3}$$

Na equação, L a luminosidade da estrela;
r o raio da estrela;
$M_{\star}$ a massa da estrela em massa solares;
c e G são os valores da velocidade da luz e da constante gravitacional, respectivamente.

Onde a luminosidade limite de Eddington é a relação entre a força gravitacional e a força de pressão da radiação para que ocorra a acreção de matéria por um objeto estelar. Na qual, para valores maiores que 10 $M_{\odot}$, a força da pressão da radiação se torna mais intensa que a força gravitacional impossibilitando a acreção continue.

Atualmente, muitos trabalhos propõem diversos mecanismos para que a acreção continue até formar estrelas mais massivas, acreção pelo equador e alimentado por "*fingers*" de instabilidade. Entretanto, nenhum desses cenários ainda é conclusivo.

1.3 Regiões H II Ultracompactas

Como dito anteriormente, as teorias que tentam fornecer respostas para a questão da formação estelar ainda não são conclusivas. Contudo, elas têm algo em comum: a formação de uma região H II Ultracompacta (UCHII). Nesta etapa seria possível observar:

Presença de Disco de Acreção: Diversas evidências observacionais de um disco de acreção em torno de jovens e massivos objetos estelares foram detectadas. Porém, pela alta extinção existente nas regiões UCHII, apenas observações indiretas do disco foram feitas por meio do uso do perfil da linha da banda CO em emissão, presente em 2,3 - 2,5 μm (GEBALLE; PERSSON, 1987; CHANDLER; CARLSTROM; SCOVILLE, 1995; BARBOSA *et al.*, 2008; BLUM; MCGREGOR, 2008). Essa banda vibracional-rotacional traz informação cinemática do gás neutro ao redor da estrela (SCOVILLE; HALL; RIDGWAY; KLEINMANN, 1979) e está localizada a 5 - 10 UA da estrela (BIK *et al.*, 2008).

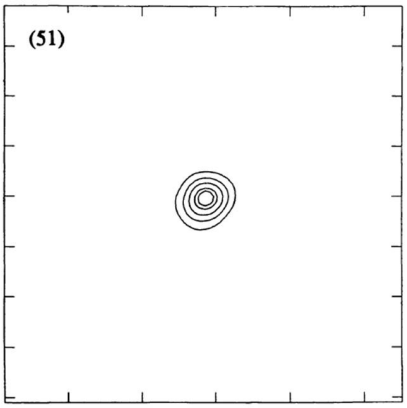
Emissão do Contínuo em Rádio: Observação em rádio proporciona evidenciar contínuos das fontes ionizantes, uma vez que a poeira não causa extinção significativa nesses comprimentos de onda. Desta maneira, é possível estimar as localizações de possíveis candidatas as regiões UCHII. Já o tipo espectral de estrelas massivas pode ser estimado pela densidade de fluxo em comprimento de onda em rádio dessas regiões, que tem relação com a luminosidade total das estrelas. Exemplos de trabalhos são Israel (1976), Felli, Tofani e D'Addario (1974), com observação de diversas regiões com baixa resolução espacial, e Colley (1980), Felli, Churchwell e Massi (1984) com observações com alta resolução para fontes individuais.

Os primeiros a usarem interferometria em ondas de rádio,com alta resolução angular e os catálogos de fontes em infravermelho distante (FIR), como Infrared Astronomical Satellite (IRAS), para uma larga amostra de regiões candidatas à região UCHII, foram Wood e Churchwell (1989b) e Kurtz, Churchwell e Wood (1994). Eles elaboraram dois catálogos que juntos apresentam cerca de 200 candidatas a regiões UCHII, classificadas em cinco distintas morfologias: cometária, esférica, núcleo-halo, concha e irregular ou múltiplos picos. Uma sexta morfologia foi adicionada por Churchwell (2002), a bipolar. Esses dois catálogos também apresentam uma classificação espectral de aproximadamente 35% das estrelas ionizantes.

Fotosfera Estelar: Com o uso da espectroscopia em infravermelho, diversos trabalhos têm sido feitos para estudar mais profundamente as estrelas embebidas nas regiões UCHII (DOHERTY; PUXLEY; DOYON; BRAND, 1994; LUMSDEN; PUXLEY, 1996; BIK; KAPER; WATERS, 2006; BARBOSA *et al.*, 2008; BLUM; MCGREGOR, 2009).

Mas, os primeiros a detectarem uma linha fotosférica de estrela ionizante foram

Figura 3 - Exemplo de uma região HII Esférica ou Compacta observada em rádio, G45.07+0.13, apresentando sua forma simétrica sem a presença de uma emissão estendida.



Fonte: Wood e Churchwell (1989b).

:

Watson e Hanson (1997) em seu estudo sobre a região G29.96-0.02, determinando o tipo espectral da estrela ionizante como O8. Após este trabalho, mais alguns autores conseguiram observar as fotosferas das estrelas em regiões UCHII (BLUM; MCGREGOR, 2008; BIK; KAPER; HANSON; SMITS, 2005; HANSON; LUHMAN; RIEKE, 2002).

Mesmo com estes esforços, apenas 9 ou aproximadamente 4% das regiões classificadas como UCHII em rádio tiveram suas fontes ionizantes classificadas espectralmente por essa técnica (HANSON; LUHMAN; RIEKE, 2002; BIK; KAPER; HANSON; SMITS, 2005; WATSON; HANSON, 1997).

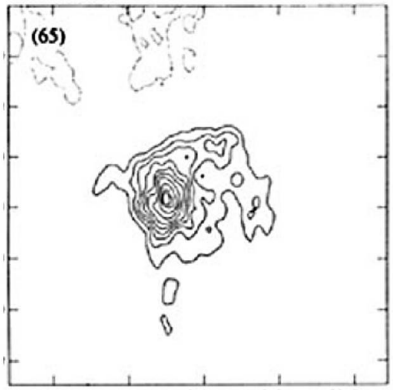
As regiões UCHIIs são regiões HII pequenas, com um diâmetro da ordem de 0,1 pc, apresentando uma densidade eletrônica de 10^4 cm^{-3} (CHURCHWELL, 2002). Pela idade, pela dinâmica do gás ionizado e molecular, pela densidade do ambiente e pelo movimento da região HII em relação ao ambiente médio, as UCHII podem ser dividas em 6 tipos morfológicos (CHURCHWELL, 2002), como mencionado anteriormente e que são apresentados a seguir.

Esférica ou Compacta: Região que pode ter seu brilho facilmente modelado por duas gaussianas espaciais. São objetos brilhantes e com o gás circundante bem simétrico, como mostrado na Figura 3. Esta morfologia pode ser a mesma que a cometária, onde a cauda estaria na parte de trás do seu núcleo sem ser observada.

Núcleo-halo: Região caracterizada por um pico simples e brilhante, que se encontra geralmente ao centro do halo de baixo brilho, como mostrada na Figura 4.

Cometárias: Região com frente de ionização de forma parabólica, dando o aspecto cometário à região (Figura 5). A parte do "núcleo" é a região de maior brilho que decresce por sobre a parte estendida da cauda.

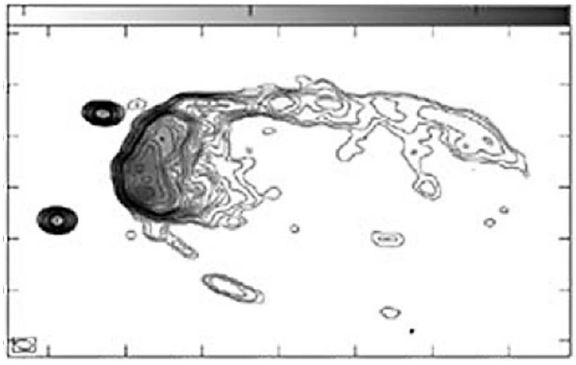
Figura 4 - Exemplo de uma região HII Núcleo-halo observada em rádio, G23.71C0.17, com uma fonte de intenso brilho deslocada à esquerda do centro da imagem e seu halo, com uma intensidade mais baixa.



Fonte: Churchwell (2002).

:

Figura 5 - Região HII Cometária observada em rádio, G34.26C0.15, com seu núcleo em forma parabólica e a presença de uma cauda na parte direita da imagem. É possível verificar o núcleo com brilho predominante na região.

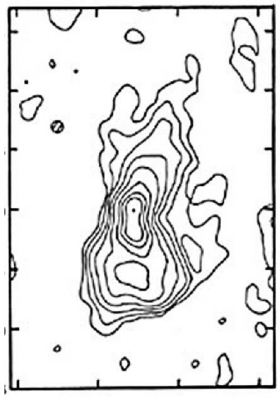


Fonte: Churchwell (2002).

:

:

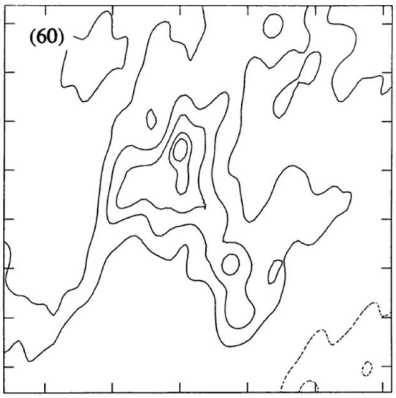
Figura 6 - Exemplo de região HII Bipolar observada em rádio, NGC7538 IRS1, com um centro apresentando um brilho mais intenso e duas asas de emissão estendida, o que lhe dá a forma de uma ampulheta.



Fonte: Churchwell (2002).

:

Figura 7 - Exemplo de região HII Irregular com forma irregular observada em rádio, G23.71+0.17, na qual não é possível determinar a fonte e uma morfologia.



Fonte:Wood e Churchwell (1989b).

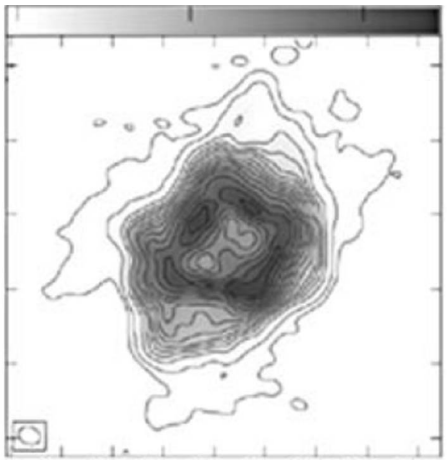
:

Bipolar: Região com duas alongadas asas com um brilho mais fraco do que a região central (Figura 6). Segundo Churchwell (2002), tais regiões apresentam um alto gradiente de velocidades e a presença das linhas largas de recombinação em rádio.

Irregular: Região com diversos picos e com um fraco brilho no halo, Figura 7. Tais regiões são associadas à emissão estendida do plano da Galáxia.

Casulo: O gás do envoltório aparece com uma emissão em forma de anel, quando o gás é opticamente fino, e com disco uniforme quando o gás é opticamente espesso, Figura 8

Figura 8 - Exemplo de região HII casulo, G5.89 − 0.39, com o gás com intenso brilho em forma de anel.



Fonte: Churchwell (2002).

:

1.4 Critério de Escolha da Amostra

Com o objetivo de estudar as UCHII, a escolha da amostra deste trabalho foi efetuada em projeto de observação elaborado por Cassio Barbosa com a colaboração de Robert Blum e Danilo Gusmão que usaram dois catálogos em rádio de possíveis regiões UCHII: Kurtz, Churchwell e Wood (1994) e Wood e Churchwell (1989b). Esses dois catálogos contém aproximadamente 200 possíveis regiões H II do hemisfério norte celeste com pelo menos uma contrapartida associada a estrelas massivas. Este catálogos é baseados na emissão em rádio (contagem de fótons de *Lymman*) destas regiões. Para algumas situações específicas (morfologia), algumas regiões tiveram sua fonte ionizante classificada em tipo espectral.

Dentre estas duas centenas de regiões UCHII presentes nos catálogos, selecionamos 19 (cerca de 10% regiões) com amiores fluxos na banda K (NIR) para serem os albos de observações deste trabalho. Todas as regiões selecionadas apresentavam contrapartidas NIR nas imagens do 2MASS. As informações das regiões selecionadas podem ser vistas na Tabela 1. Para todas essas regiões da Tabela 1 foi aplicada a técnica de espectroscopia e a técnica PCA (que será discutida no Capítulo 3) para tentar classificar espectralmente a fonte ionizante e verificar estruturas na região.

Após esta primeira seleção, a amostra foi reduzida novamente para apenas quatro regiões UCHII para aplicar um método de análise adicional: o mapa em faixas espectrais. Essas regiões foram escolhidas por apresentarem quatro diferentes ambientes em seus campos:

1) uma estrela isolada com linhas fotosféricas detectáveis (Região G78.4+2.6),

2) região com estrela obscurecida (Região G5.97 – 1.17),

Tabela 1 - Lista das Regiões H II selecionadas.

Região	α **J2000**	δ **J2000**
G5.97-1.17	18 03 40.330	-24 22 42.64
G6.55-0.10	18 00 50.000	-23 20 33.25
G15.04-0.6	18 20 24.600	-16 11 39.46
G18.146-0.284	18 25 01.110	-13 15 40.33
G23.96+0.1	18 34 25.240	-07 54 45.52
G28.288-0.364A	18 44 18.100	-04 17 55.57
G28.288-0.364B	18 44 18.290	-04 17 55.57
G29.96-0.0	18 46 04.040	-02 39 21.74
G45.12+0.1A	19 13 27.870	10 53 36.41
G45.12+0.1B	19 13 28.137	10 53 43.41
G45.12+0.1C	19 13 28.003	10 53 38.41
G48.609+0.027	19 20 30.600	13 55 38.06
G53.605+0.046	19 30 18.980	18 20 03.64
G70.293-1.6A	20 01 45.710	33 32 42.13
G70.293-1.6B	20 01 45.922	33 32 40.53
G70.293-1.6C	20 01 46.183	33 32 35.53
G77.965-0.006A	20 29 36.890	39 01 22.52
G77.965-0.006B	20 29 37.300	39 01 13.92
G78.438+2.659	20 19 39.320	40 56 35.89

3) um aglomerado de estrelas com e sem linhas fotosféricas detectáveis em seu espectro (Região G77.965-0.006B) e

4) um aglomerado com mais de uma estrela com linhas fotosféricas detectáveis em seu espectro (Região G77.965-0.006A).

A presença de pelo menos uma estrela com linhas fotosféricas visíveis em todas as regiões escolhidas é imprescindível para o estudo, pois existem poucos trabalhos na literatura com o objetivo de verificar o comportamentos desses dois métodos para classificar a fonte embebida nas regiões UCHII. As demais situações de ambientes selecionadas servem para verificar as eficiências dos métodos PCA e Mapa em faixas espectrais.

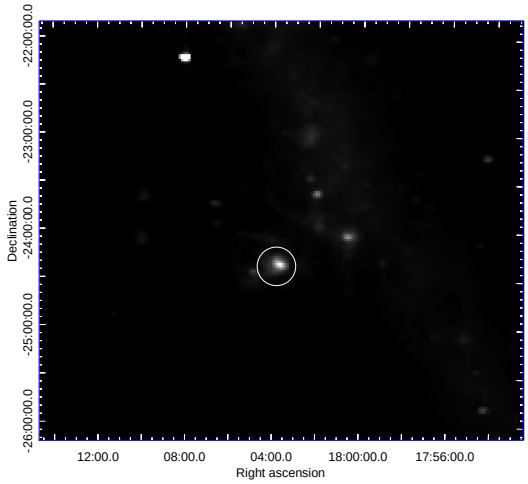
1.5 Descrição dos alvos

G5.97 – 1.17

A região G5.97-1.17 (Figura 9) é uma região H II ultracompacta do tipo núcleo-halo com uma estrela com tipo espectral estimado em B0, por contínuo em rádio (WOOD; CHURCHWELL, 1989b). Ela está a 2.7" de distância do centro de M8, a Nebulosa da Lagoa. A região H II M8 está centrada no denso aglomerado estelar NGC 6523, o qual apresenta como estrela mais massiva a estrela O7 V Herschel 36 (Her 36, HD 164740).

Segundo Stecklum *et al.* (1998), a região G5.97-1.17 seria, na realidade, um disco circunstelar ionizado externamente, similar ao que é visto apenas nas *proplyds* em Órion.

Figura 9 - Localização da região G5.97-1.17. A imagem obtida pelo IRIS, a nova geração de imagem do satélite astronômico em infravermelho (IRAS), em 12 μm traz a região G5.97-1.17 demarcada pelo círculo branco.



Fonte: NASA/IPAC Infrared Science Archive (2015).

:

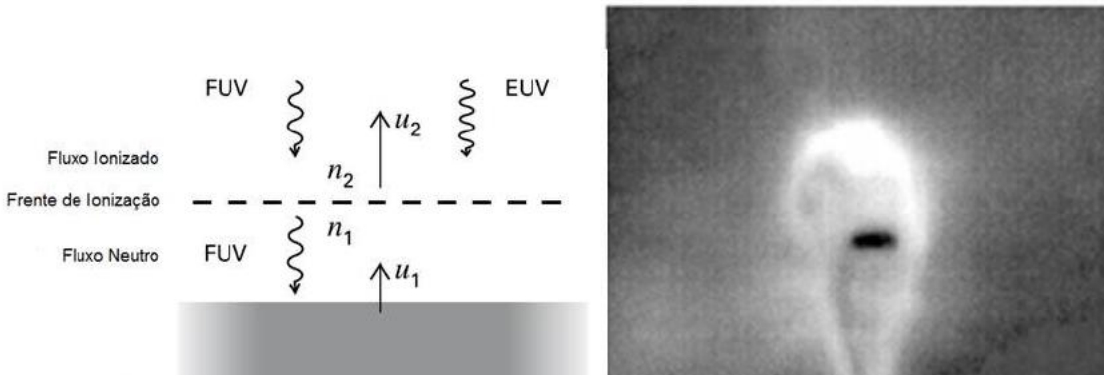
Proplyds vem da contração de "disco protoplanetário" e é um dos fenômenos em que estrelas de alta massa afetam outras estrelas em formação próximas a elas. Esse processo ocorre em estrelas jovens envolvidas por um disco circunstelar, que é foto-evaporado pela radiação do ultravioleta distante, com energias entre 6 e 13.6 eV, condizente com a produzida por estrelas de alta massa próxima. O gás aquecido do disco se move como um vento, até encontrar a radiação do contínuo de *Lyman*, que não conseguiu penetrar tão profundamente no disco, formando um aro brilhante de ionização (Figura 10) (Sthaler, S. W. and Palla, F. , 2004). Os argumentos de Stecklum *et al.* (1998) para tal conclusão são baseados no valor do fluxo em rádio recebido na região G5.97-1.17, que é condizente com o número de fótons ionizados produzidos pela Herschel 36 e pela presença de uma cauda que aponta para da Her 36; nas suas observações das linhas de Hα, N[II] e uma imagem combinada dos filtros estreitos de O[III], Hα e S[II].

G6.55-0.10

A região G6.55-0.10 dista 14,5 Kpc do Sol e possui uma estrela O intermediária, classificada pelo número de fótons do contínuo de *Lyman* e luminosidade (SIMPSON; RUBIN, 1990). Esta estrela também foi classificada como O9, utilizando observações em comprimento de onda em rádio, por Churchwell, Walmsley e Cesaroni (1990). Chen, Gao e Xiong (1995), utilizando observações do IRAS de baixa resolução espacial não conseguiram classificar o tipo do objeto presente na região.

Wood e Churchwell (1989b) classificaram morfologicamente essa região como UCHII não resolvida, salientando que este objeto possui um alongamento norte-sul evidente em observações de rádio (KIM; KOO, 2001). Uma imagem mostrando este alongamento é apresentado na Figura 11. Na direção de G655-0.10 foi observada a presença

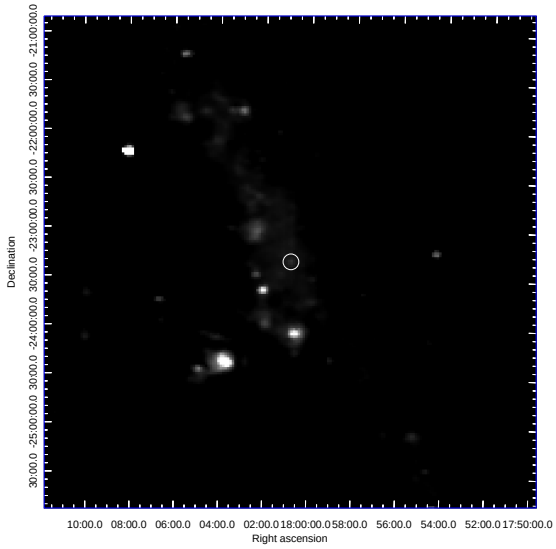
Figura 10 - Uma esquematização da produção das *proplyds* (à direita) e a visualização na nuvens de Órion (à esquerda).



Fonte: Sthaler, S. W. and Palla, F. (2004).

:

Figura 11 - A imagem obtida pelo IRIS em 12 μm traz a região G6.55-0.10 demarcada pelo círculo branco.



Fonte: NASA/IPAC Infrared Science Archive (2015).

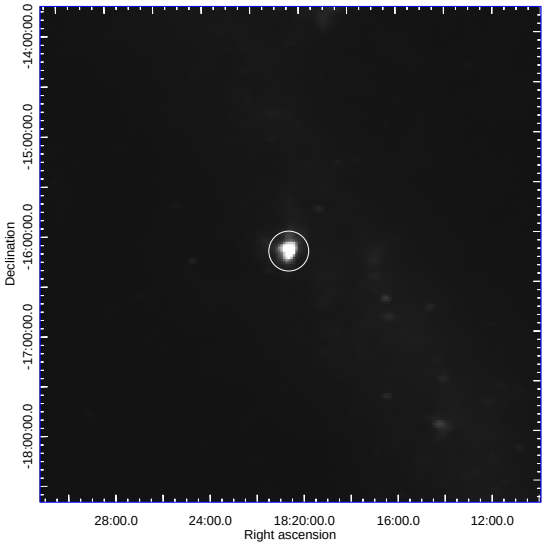
:

de *maser* de água, OH em 1612 MHz e 1720 MHz e o *maser* de CH3OH em 6.668 GHz (CHAN; HENNING; SCHREYER, 1996). Também foram detectadas as linhas de NH_3 em 23.69 GHz e 23.72 GHz (CHAN; HENNING; SCHREYER, 1996). Essas evidências indicam que a região G6.55-0.10 é uma candidata a possuir um objeto estelar jovem e massivo (MYSO).

G15.04 -0.6

Região pertencente a nebulosa M17 e que dista 2,1 Kpc do Sol (WOOD; CHUR-

Figura 12 - A imagem obtida pelo IRIS em 12 μm traz a região G15.04-0.6 demarcada pelo círculo branco.



Fonte: NASA/IPAC Infrared Science Archive (2015).

:

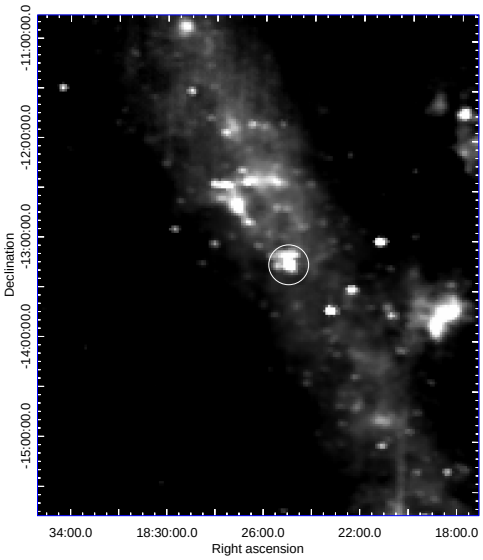
CHWELL, 1989b). É classificada como região HII pelo excesso de avermelhamento em seu espectro (VOLK; COHEN, 1989; CHEN; GAO; XIONG, 1995). Também é classificada como uma região UCHII com morfologia esférica por Wood e Churchwell (1989b) e irregular por Walsh, Burton, Hyland e Robinson (1998), com fonte de emissão em infravermelho distante associada com a região H II M17 (FAISON *et al.*, 1998). A fonte ionizante deste objeto é classificada como B0 em distintos trabalhos, em diferentes comprimentos de onda, e.g. Wood e Churchwell (1989b) em rádio; Faison *et al.* (1998), em FIR e Doherty, Puxley, Doyon e Brand (1994), em NIR.

Nessa região foram detectadas *masers* de OH excitados em 6035 e 6030 MHZ (COHEN; MASHEDER; WALKER, 1991; BAUDRY; DESMURS; WILSON; COHEN, 1997) e *masers* de água, referente a formação estelar (PALAGI *et al.*, 1993). Pelos resultados de Shepherd e Churchwell (1996) analisando o perfil da linha de ^{12}CO, a principal fonte não deve estar na fase de rápida acreção, acompanhada de efluxos bipolares. Na Figura 12 destaca-se a localização da região G15.04-0.6 em M7.

G18.146-0.284

Esta região está a 4,2 Kpc do Sol e é classificada como cometária, com uma estrela B0, por Kurtz, Churchwell e Wood (1994). Ela [e mostrada na Figura 13. Esta estrela também foi classificada como O5.5 por (WALSH; HYLAND; ROBINSON; BURTON, 1997), que utilizou os quatros fluxos (12, 25, 60 e 100 μm), obtidos pelo IRAS. Ela foi estudada por Alvarez *et al.* (2004), através de fotometria no infravermelho. Estudos de Crowther e Conti (2003) e Alvarez *et al.* (2004), mostraram que essa região UCHII possui um aglomerado no qual três fontes, puderam ser classificadas como estrelas O6, O7 e B0

Figura 13 - A imagem obtida pelo IRIS em 12 μm traz a região G18.146-0.284 demarcada pelo círculo branco.



Fonte: NASA/IPAC Infrared Science Archive (2015).

:

(ALVAREZ *et al.*, 2004). Entre essas fontes, a 144 (06) é a principal candidata a ser a fonte ionizante. Alvarez *et al.* (2004) notaram que a fonte 144 é a mais obscurecida dos objetos analisados, apresentando $A_v \approx 30$ mag.

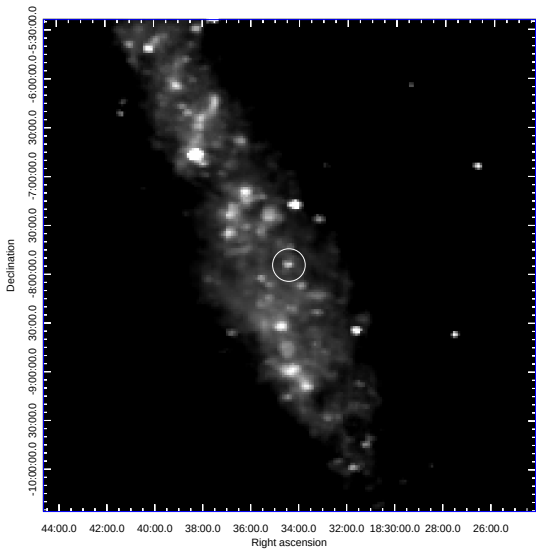
G18.146-0.284 não apresenta emissão de *maser* de água (CODELLA *et al.*, 1995; KURTZ; HOFNER, 2005), metanol (VAN DER WALT; GAYLARD; MACLEOD, 1995; WALSH; HYLAND; ROBINSON; BURTON, 1997) e não possui características da presença de efluxos (SHEPHERD; CHURCHWELL, 1996)

G23.96 – 0.1

G23.96-0.1 é classificada morfologicamente como uma região de múltiplos picos (WOOD; CHURCHWELL, 1989b) com indícios de possuir um aglomerado de estrelas massivas jovens. No sub-mm são observados 4 *clumps* sendo 1 relacionado à região UCHII (THOMPSON *et al.*, 2006). O tipo espectral derivado pelo número de fótons ionizantes, obtido em 21 cm, é condizente com estrelas O8–O9.5, utilizando a distância estimada para 4,7–2,5 kpc por Crowther e Furness (2008) (KIM; KOO, 2001). Análises no infravermelho distante indicam que o seu tipo espectral é de O9–B0 (SIMPSON *et al.*, 1995; AFFLERBACH; CHURCHWELL; WERNER, 1997). A região G23.96 – 0.1 é mostrado na Figura 14.

Hanson, Luhman e Rieke (2002) utilizando dados com resolução moderada ($\Delta\lambda/\lambda$=1200), obtiveram a classificação de O7–O8. Crowther e Furness (2008) fizeram inspeção da região nas bandas H e K, classificaram a fonte associada como O7-O8. Por fim, com o uso de modelos estelares e comparando com razão de linha entre He e H, Crowther e Furness (2008) determinaram que a fonte possui uma temperatura efetiva de

Figura 14 - Localização da região G23.96 – 0.1. A imagem obtida pelo IRIS em 12 μm traz a região G23.96-0.1 demarcada pelo círculo branco.



Fonte: NASA/IPAC Infrared Science Archive (2015).

:

$3{,}8 \times 10^4$ K, que condiz com estrelas de tipo espectral de O6-O6.5, conforme a calibração de Martins, Schaerer e Hillier (2005).

G28.288-0.364

Esta região, mostrada na Figura 15, tem excesso de avermelhamento no contínuo e foi classificada por Kurtz, Churchwell e Wood (1994) como UCHII do tipo núcleo-halo com uma estrela do tipo espectral O9.5. Simpson e Rubin (1990) fizeram um extenso trabalho sobre abundância de neônio e enxofre e determinaram que a fonte da região G28.288-0.364 seria condizente com uma estrela O8, conforme calibrações de Martins, Schaerer e Hillier (2005). Essa região é formada por 4 núcleos, que juntos, apresentam uma massa total de 1460 $M_\odot$, sendo que o maior núcleo apresenta uma massa de 440 $M_\odot$ (RATHBORNE; JACKSON; SIMON, 2006).

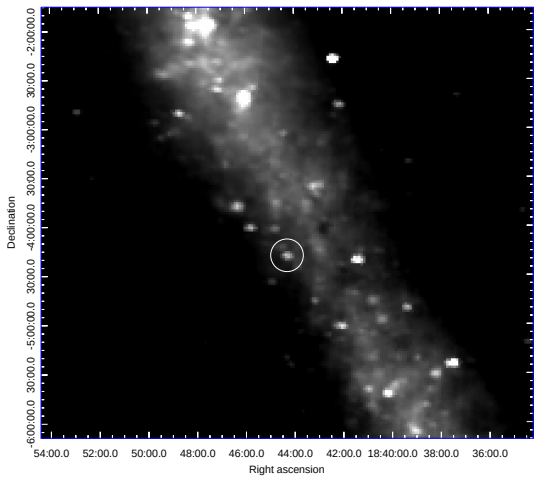
Masers de OH1665, OH1667, CH3OH6 e CH3OH12 foram detectados nessa região, como também linhas de NH_3 em 23.6 GHz, NH_3 em 23.7 GHz (CHAN; HENNING; SCHREYER, 1996). A região também foi selecionada como candidata a UCHII por Cyganowski *et al.* (2008), por apresentar efluxos.

G29.96-0.0

Esta é uma região UCHII, com formação de estrelas extensamente estudada em diversos comprimentos de onda e com várias características determinadas.

Sua distância ao Sol foi estimada em 9 kpc por Pratap, Megeath e Bergin (1999) e posteriormente corrigida para 6 Kpc, por Russeil *et al.* (2011). Sua estrutura foi observada em rádio e classificada como cometária por Wood e Churchwell (1989b), como pode ser visto na Figura 16. Diversas observações desta região foram realizadas: Afflerbach, Churchwell, Hofner e Kurtz (1994) determinaram a presença de um arco de choque. Contudo,

Figura 15 - A imagem obtida pelo IRIS em 12 μm traz a região G28.288-0.364 demarcada pelo círculo branco.



Fonte: NASA/IPAC Infrared Science Archive (2015).

:

Lumsden e Hoare (1999) afirmaram que o mecanismo determinante da cinemática do gás é o modelo da bolha de champanhe. Outro estudo foi de Kim e Koo (2001) estudaram o envelope estendido da região.

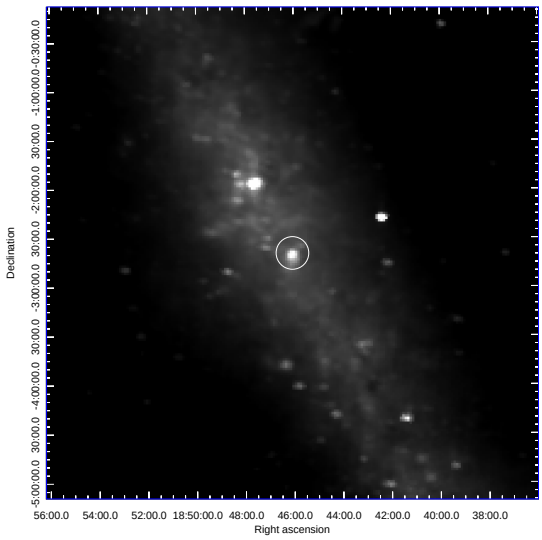
G29.96-0.0 foi a primeira região UCHII a ter sua fonte ionizante determinada e suas linhas fotosféricas observadas, sendo classificada espectralmente no intervalo de O5 a O6 (WATSON; HANSON, 1997; MARTÍN-HERNÁNDEZ *et al.*, 2003). Porém, sua classificação vem divergindo em diversos trabalhos. Trabalhos usando linhas nebulares no infravermelho médio (MIR) classificam a fonte entre O9 - O6 (MORISSET *et al.*, 2002; WATARAI; MATSUHARA; TAKAHASHI; MATSUMOTO, 1998); por meio de fotometria na banda K seu tipo espectral é classificado como mais quentes que O5 (WATSON *et al.*, 1997); por meio da emissão de fótons do contínuo de *Lyman* a fonte ionizante é classificada entre O7.5-O5.5 (WOOD; CHURCHWELL, 1989b); Beltrán *et al.* (2013) estudaram o aglomerado dentro da região, com observações no FIR e MIR e determinaram que as fontes ali presentes são condizentes com estrelas B0, sendo apenas uma fonte classificada como O6, supondo a calibração de Martins, Schaerer e Hillier (2005).

Outras observações desta região são: um núcleo quente próximo ao centro ionizado por uma fonte profundamente embebida (DE BUIZER *et al.*, 2002), além de diversos *masers* de água e metanol (WALSH *et al.*, 2003).

G45.12+0.1

Região já muito estudada nas faixas do infravermelho, submilimétrico e rádio. É uma região UCHII com suas fontes ionizantes obscurecidas e tem a perspectiva de apresentar uma fonte extremamente massiva, sendo ela a fonte mais quente da amostra escolhida. Ela está próxima da G45.07+0.13, localizando-se a norte da mesma, conforme

Figura 16 - A imagem obtida pelo IRIS em 12 μm traz a região G29.96-0.0 demarcada pelo círculo branco.



Fonte: NASA/IPAC Infrared Science Archive (2015).

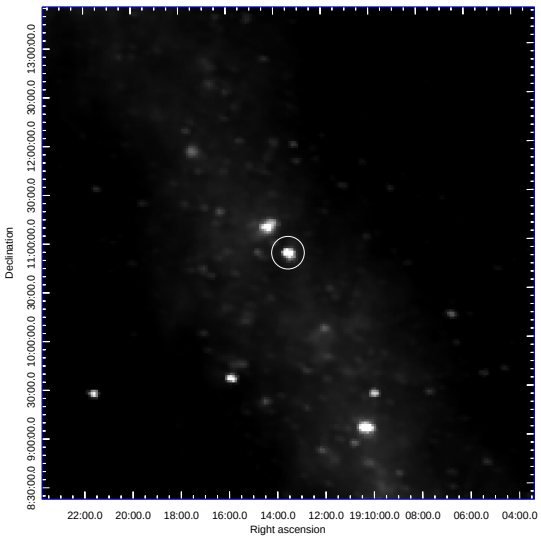
:

pode ser visto na Figura 17 (HUNTER; PHILLIPS; MENTEN, 1997).

A região G45.12+0.1 foi classificada morfologicamente como cometária (WOOD; CHURCHWELL, 1989b) e com um aglomerado contendo entre 4 e 20 fontes (VIG *et al.*, 2006). Em rádio, a candidata à fonte ionizante da região é classificada espectralmente entre O5-O6 (WOOD; CHURCHWELL, 1989b; VIG *et al.*, 2006). Com o uso de fluxos no infravermelho, a fonte foi classificada como O5, para caso de uma única fonte no interior da região ou O6.5 para a estrela de maior massa (CHURCHWELL; WALMSLEY; CESARONI, 1990). Já por espectroscopia no infravermelho próximo, Lumsden e Puxley (1996) fizeram um amplo estudo usando o problema de transferência radiativa e as linhas detectadas. Determinaram que a fonte apresenta temperaturas entre 38000-42000 K (O6-O5); porém, com o uso de modelos de fotoionização, a fonte poderia ser classificada como mais quente que uma O intermediária. Em trabalho mais recente, usando razões de linhas no infravermelho próximo e modelos de fotoionização, Lumsden *et al.* (2003), encontraram um tipo espectral de O5. Com o uso da linha de [Ne II] (12,8 μm), Takahashi, Matsuhara, Watarai e Matsumoto (2000) obtiveram um tipo espectral mais frio, sendo que seus resultados a classificam entre O7.5-O6.5, com o uso da calibração de Martins, Schaerer e Hillier (2005).

G45.12+0.1 apresenta *maser* de OH e linhas moleculares de NH_3, CS e ^{13}C (CHAN; HENNING; SCHREYER, 1996). Estas linhas moleculares indicam que a região apresenta uma intensa radiação e efluxos bipolares (HUNTER; PHILLIPS; MENTEN, 1997). Desta forma, a região deve apresentar, por essas características, uma fonte em estágio inicial de formação, na qual se espera que esteja acontecendo uma acreção mais intensa. Outros detalhes da região são a não evidência de *maser* de água e CH_3OH (CHAN;

Figura 17 - A imagem obtida pelo IRIS em 12 μm traz a região G45.12+0.1 demarcada pelo círculo branco.



Fonte: NASA/IPAC Infrared Science Archive (2015).

:

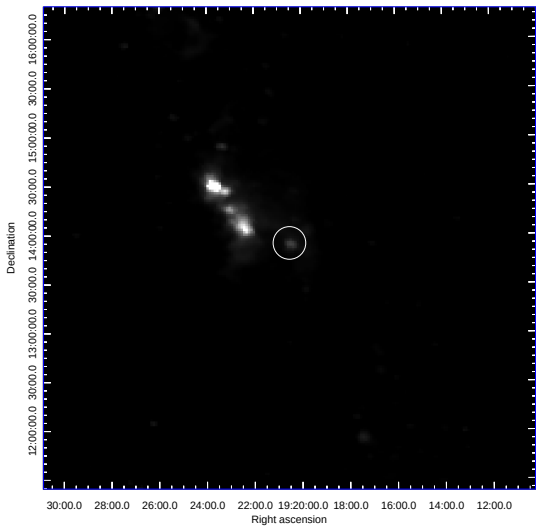
HENNING; SCHREYER, 1996), a extinção visual em torno de 23 - 25 *mag*, a ausência de evidências de choque de gás quente e a presença de um disco remanescente (LUMSDEN; PUXLEY, 1996). Também já foi analisada a distribuição de energia espectral por Faison *et al.* (1998).

G48.609+0.027

Região que dista 9,7 Kpc do Sol e é classificada morfologicamente como uma região UCHII irregular por Kurtz, Churchwell e Wood (1994). A região G48.609+0.027 faz parte de um trio de regiões UCHII, que em conjunto, formam a região G48.609+0.02, sendo ela localizada ao norte das demais, conforme pode ser visto na Figura 18. Pela proximidade as regiões UCHII, poucos trabalhos distinguiram-nas, sendo o trabalho de De Buizer, Radomski, Telesco e Piña (2005), que apresenta uma análise separada destas regiões usando fotometria no infravermelho médio. Eles encontrou valores entre O9-B1.5 para o tipo espectral da fonte ionizante da região G48.609+0.027.

Os demais trabalhos trataram e estimaram o tipo espectral da fontes ionizantes, utilizando o trio de regiões presentes. Karnik *et al.* (1999), por meio de observações no infravermelho distante, determinaram que a região G48.609+0.02 teria uma estrela mais quente que O3 pela calibração de Martins, Schaerer e Hillier (2005). Porém, em um trabalho complementar no infravermelho médio, Karnik e Ghosh (1999) verificaram que a região contém duas fontes ionizantes e usando modelos com geometria cilíndrica, determinaram que a luminosidade das fontes é da ordem de 6×10^5. Esses valores são condizentes com estrelas do tipo espectral O3-O4. Por fim, observações em rádio em 21 cm de Kurtz, Watson, Hofner e Otte (1999) apresentam estimativa do tipo espectral das fontes ionizantes entre B0 - O7.5 e também detectaram uma emissão estendida que pode

Figura 18 - A imagem obtida pelo IRIS em 12 μm traz a região G48.609+0.027 demarcada pelo círculo branco.



Fonte: NASA/IPAC Infrared Science Archive (2015).

:

estar relacionadas a região UCHII. Isto pode indicar que a região tenha diversas fontes de ionização.

A região G48.609+0.02 apresenta emissão de *maser* de água (PALAGI *et al.*, 1993; KURTZ; HOFNER, 2005). Também foram detectadas linhas moleculares de CS (2-1) (BRONFMAN; NYMAN; MAY, 1996) e emissão de efluxos (LÓPEZ-SEPULCRE *et al.*, 2009). Nenhum *maser* de OH foi encontrado relacionado à região.

G53.605+0.046

Região UCHII com poucos estudos na literatura, sobretudo, em relação ao tipo espectral da sua fonte ionizante. Tem sua morfologia classificada como "não resolvida", por Kurtz, Churchwell e Wood (1994) e com uma extinção visual máxima estimada de 255 *mag* (BEUTHER *et al.*, 2002). Não apresenta *maser* de metanol (VAN DER WALT; GAYLARD; MACLEOD, 1995). Foi confirmada como uma região candidata a UCHII, pela emissão de CS(2- 1) por Bronfman, Nyman e May (1996), linha que indica altas densidades de gás molecular, como esperado em regiões de formação de estrelas OB. Os trabalhos de Sridharan *et al.* (2002) e Zhang *et al.* (2005) detectaram efluxos bipolares nessa região.

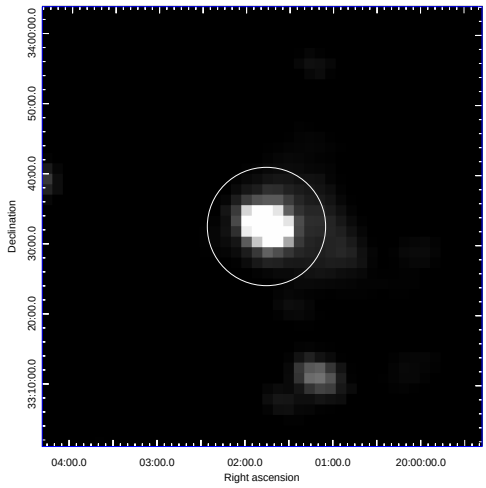
Molinari, Brand, Cesaroni e Palla (1996), utilizando a emissão de amônia, determinaram uma distância cinemática de 2,11 Kpc e luminosidade de 1,63 $\times$ 10^4 $L_\odot$, valor baixo e incompatível com valores de estrelas de tipo O (MARTINS; SCHAERER; HILLIER, 2005) e B.

A região G53.605+0.046 pode ser vista na Figura 19.

G70.293-1.6

A região G70.293-1.6, também conhecida como K3-50A (Figura 20), é uma região

Figura 19 - Localização da região G53.605+0.046. A imagem obtida pelo IRIS em 12 μm traz a região G53.605+0.046 demarcada pelo círculo branco.



Fonte: NASA/IPAC Infrared Science Archive (2015).

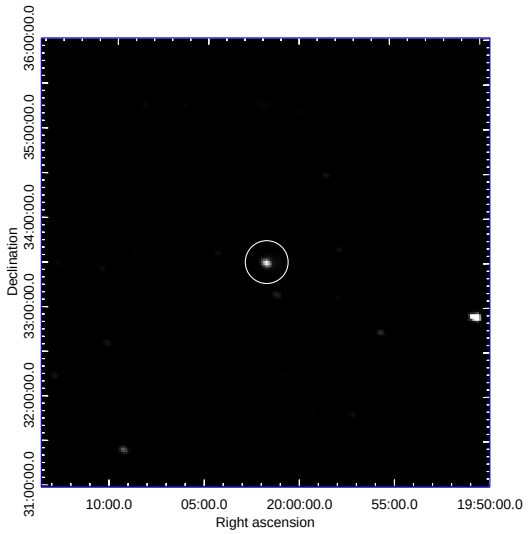
:

UCHII que já foi objeto de estudo em diversos comprimentos de ondas. Kurtz, Churchwell e Wood (1994) classificaram esta região como núcleo-halo. Originalmente, foi classificada como parte de uma nebulosa planetária (KOHOUTEK, 1965) e só só veio a ser classificada como uma região H II, por Wynn-Williams (1969). Ela é a mais intensa de 4 regiões que compõem a região K3-50 próxima à NGC 6857. Sua distância do Sol foi estimada por Harris (1975) em 10 Kpc e atualizada para valores entre 7 e 8.7 Kpc por Blum e McGregor (2009) e Okamoto *et al.* (2003). Pela distribuição do material local e pelo gradiente de velocidade, efluxos bipolares de alta velocidade são esperados na região (DEPREE; GOSS; PALMER; RUBIN, 1994), o que foi confirmado pelos mapas de HCO^+, $H^{13}CO^+$ e SiO de Howard, Koerner e Pipher (1997) e pela linha molecular de ^{13}CO (HOWARD; PIPHER; FORREST; DE PREE, 1996). Outra característica da região é a presença de *maser* OH (HARVEY-SMITH; COHEN, 2005).

A região G70.293-1.6 apresenta um aglomerado de estrelas de alta massa, sendo que a fonte principal foi classificada como O4, utilizando observações em em rádio (COLLEY; SCOTT, 1977; KURTZ; CHURCHWELL; WOOD, 1994). Em infravermelho, Howard, Pipher, Forrest e de Pree (1996) observaram a região através de fotometria nas bandas *J*, *H*, *K* e *L* e determinaram que esta região apresenta emissão de uma estrela mais quente que O6. Já Blum e McGregor (2009), usando razões de linhas de emissão presentes na banda *K*, determinaram que o tipo espectral, considerando apenas uma fonte, está entre O4 e O5, mesmo valor encontrado pelas observações de rádio. Em infravermelho médio, Okamoto *et al.* (2003) fizeram um estudo detalhado da região e determinaram que a fonte presente no aglomerado deve ser classificada entre O8 e B0.

Para este estudo, foram feitos três apontamentos para a G70.293-1.6, contudo,

Figura 20 - Região G70.293-1.6 e as fontes que a formam. A imagem obtida pelo IRIS em 12 μm traz a região G70.293-1.6 demarcada pelo círculo branco.



Fonte: NASA/IPAC Infrared Science Archive (2015).

:

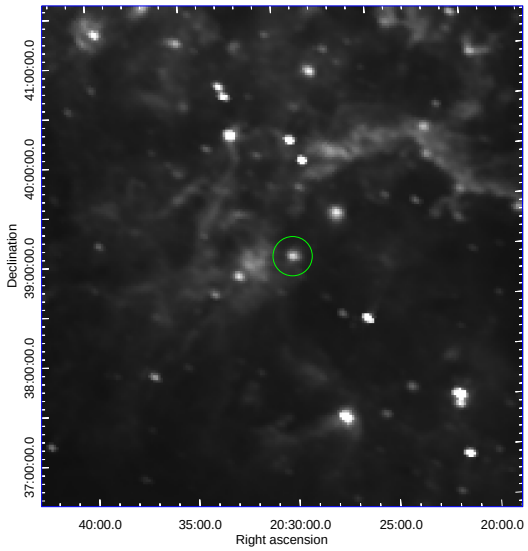
em apenas um apontamento uma fonte foi observada: G70.293-1.6A. A localização dessa fonte é condizente com a fonte 3 de Okamoto *et al.* (2003), nomeada OKYM3. Ela está no centro da K3-50A e tem sua fonte classificada como O6-O9 por Okamoto *et al.* (2003).

G77.965-0.006

A região de Cisne, nos apresenta um dos complexos mais ricos com formação estelar, jovens objetos, associações OB e dezenas de regiões HII de nossa Galáxia (LE DUIGOU; KNODLSEDER, 2002). A região G77.965-0.006, Figura 21, se encontra ao sul da região de Cisne com um pequeno aglomerado contendo 3 estrelas em processo de formação, estando a cerca de 10.1 kpc (HARRIS; CLEGG, 1983) ou 4.4 kpc, segundo (KURTZ; CHURCHWELL; WOOD, 1994). Nos primeiros estudos da região G77.965-0.006, em rádio (YANG; WEST, 1964; PRICE; MARCOTTE; MURDOCK, 1982), essa pequena região não foi detectada, principalmente pelo uso de baixa resolução instrumental da época, sendo apenas visualizada por Downes e Rinehart (1966) e nomeada como DR9. Posteriormente, foi catalogada no infravermelho por Gullixson *et al.* (1983). Esta região apresenta um excesso de avermelhamento em infravermelho (VOLK; KWOK; STENCEL; BRUGEL, 1991) e foi classificada como contendo um objeto jovem e massivo, por Odenwald e Schwartz (1993). Chan, Henning e Schreyer (1995), determinaram emissão de CS, o que é um ótimo indicador de regiões de formação estelar. A confirmação da existência de um estrela massiva em seu interior, sendo a região classificada como região UCHII, veio como o trabalho de Kurtz, Churchwell e Wood (1994).

A região foi classificada morfologicamente como irregular,contendo pelo menos 4 estrelas massivas em formação (ALVAREZ *et al.*, 2004). Duas estrelas próximas entre si e

Figura 21 - A imagem obtida pelo IRIS em 12 μm traz a região G77.695-0.006 demarcada pelo círculo branco.



Fonte: NASA/IPAC Infrared Science Archive (2015).

:

que coincidem com a localização da fonte em rádio de Kurtz, Churchwell e Wood (1994), são consideradas como as fontes de ionização da UCHII, sendo classificadas como B1, L = 4000 $L_{\odot}$ (ODENWALD, 1989) e O8 e B2, por fotometria no infravermelho (ALVAREZ *et al.*, 2004). Uma terceira fonte, ao sul, foi classificada como O9.5 - B1, no infravermelho médio Odenwald e Schwartz (1993), no FIR (LE DUIGOU; KNODLSEDER, 2002) e em 3.6 cm (KURTZ; WATSON; HOFNER; OTTE, 1999). Esta fonte também foi classificada como O8 por fotometria no infravermelho próximo (ALVAREZ *et al.*, 2004). Há também, uma fonte próxima da localização da região UCHII, bem como outras classificadas como BO e as demais são classificadas como estrelas de baixa massa ou estrelas de fundo (HANSON; LUHMAN; RIEKE, 2002; ALVAREZ *et al.*, 2004).

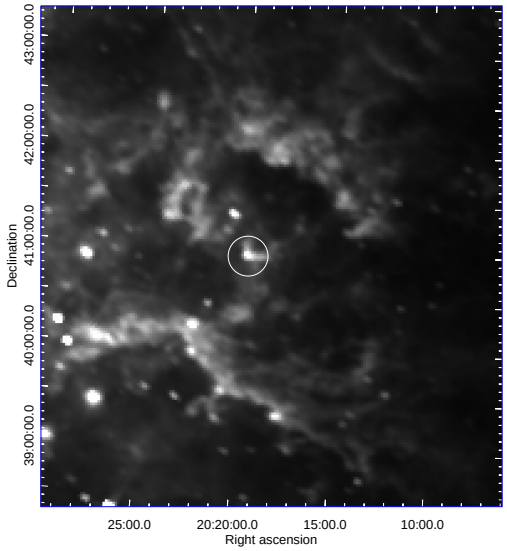
Nenhuma emissão de *maser* de água (PALLA *et al.*, 1991; KURTZ; HOFNER, 2005) ou de metanol (SCHUTTE; VAN DER WALT; GAYLARD; MACLEOD, 1993) foi detectada, na direção desta região, indicando ela já está em fase final de formação.

Para a região G77.965-0.006 foram realizados dois apontamentos, sendo o primeiro chamado de G77.965-0.006A e o segundo G77.965-0.006B. A região G77.965-0.006A apresenta duas fontes e a região G77.965-0.006B é constituída por três fontes.

G78.4+2.6

G78.4+2.6, mostrada na Figura 22, é uma região UCHII associada à fonte IRAS 20178+4046, de classificação morfológica cometária, com luminosidade no infravermelho de 7 $\times$ 10^4 $L_{\odot}$ (KURTZ; CHURCHWELL; WOOD, 1994) e com uma emissão estendida que não está diretamente conectada com a componente ultracompacta (KURTZ; WATSON; HOFNER; OTTE, 1999). Sua distância cinemática foi estimada entre 1,5 Kpc e

Figura 22 - A imagem obtida pelo IRIS em 12 μm traz a região G78.4+2.6 demarcada pelo círculo branco.



Fonte: NASA/IPAC Infrared Science Archive (2015).

:

3,3 Kpc (CASWELL *et al.*, 1975; SCHNEIDER *et al.*, 2006; KURTZ; CHURCHWELL; WOOD, 1994). Não apresenta emissão de *masers* (KURTZ; HOFNER, 2005). Recentemente, Klaassen, Testi e Beuther (2012) observaram a presença de *infall* e a não existência de efluxos, tendo classificado ca região como H II hipercompacta (HCHII).

Essa região era considerada como detentora de uma única estrela, classificada entre B0 e B0.5, pela emissão do contínuo em rádio e por meio de observações no infravermelho médio (KURTZ; CHURCHWELL; WOOD, 1994; CROWTHER; CONTI, 2003). Porém, com observações mais acuradas no infravermelho próximo e médio, foi constatada, nos arredores da fonte central da região, a presença de alguns aglomerados com pelo menos 13 estrelas em diferentes estágios evolutivos. (TEJ *et al.*, 2007; NERIA; GóMEZ; RODRíGUEZ, 2010). Tej *et al.* (2007) encontraram 9 estrelas com tipo espectral mais quentes que B0.5, espalhadas em três partes: profundamente embebidas na região ionizada compacta, no envelope da principal fonte ionizante da região e em um pequeno aglomerado localizado ao sul da região. Neria, Gómez e Rodríguez (2010) encontraram 4 fontes, além da G78.4+2.6, com tipos espectrais mais frios que uma B2. Utilizando espectroscopia no intervalo entre 3 e 13 μm Faison *et al.* (1998), estimaram o tipo espectral como B0.5 , que utilizaram observação .

1.6 Objetivos deste trabalho

Atualmente, apenas 9 ou aproximadamente 4% das regiões UCHII catalogadas por Kurtz, Churchwell e Wood (1994) e Wood e Churchwell (1989b) tiveram suas fontes ionizantes classificadas espectralmente por linhas fotosféricas. Para tentar melhorar esta

estatística e indicar novos métodos para ajudar na classificação e no estudo da formação de estrelas de alta massa, este trabalho tem como objetivos:

1) Estudar as estrelas de alta massa em suas fases finais de formação com a espectroscopia, pelo PCA e mapas de linhas;

2) Classificar espectralmente as fontes observadas nas regiões UCHII, quando possível;

3) Verificar estruturas presentes na região com o auxilio da técnica PCA;

4) Comparar os três métodos utilizados em 4 regiões escolhida anteriormente;

5) Verificar as eficiências dos métodos no estudo de formação de estrelas de alta massas.

Esta tese está estruturada em mais 9 capítulos. O Capítulo 2 traz informações sobre os procedimentos utilizados nas observações e os processos utilizados na redução de dados. O Capítulo 3 expõe as metodologias utilizadas na análise dos dados para todas as regiões. O Capítulo 4 apresenta os resultados e a discussão sobre a região G5.97-1.17. O Capítulo 5 apresenta os resultados e a discussão sobre a região G77.965-0.006A e o Capítulo 6 traz os resultados sobre a região G77.965-0.006B e sua discussão. O Capítulo 7 mostra os resultados e a discussão da região G78.4+2.6. O Capítulo 8 traz a espectroscopia e o PCA das demais fontes observadas e a discussão das classificações encontradas. O Capítulo 9 apresenta a comparação entre os métodos e as discussão dos resultados encontrado nos Capítulos anteriores, indicando a eficiência de cada métodos para o estudo das estrelas massivas em formação. Por fim, o Capítulo 10 traz as conclusões deste trabalho.

2 Observação e Redução de dados

2.1 As Observações

2.1.1 O NIFS

O projeto de observação GN-2011A-Q-34 foi elaborado por Cassio Barbosa com a colaboração de Robert Blum e Danilo Gusmão. As observações foram realizadas no observatório Gemini Norte (Figura 23) localizado no topo do vulcão dormente de 4.200 m de altura em Mauna Kea, Hawaii.

Figura 23 - Imagem do espectrógrafo de campo integral (IFU) no infravermelho próximo (NIFS).

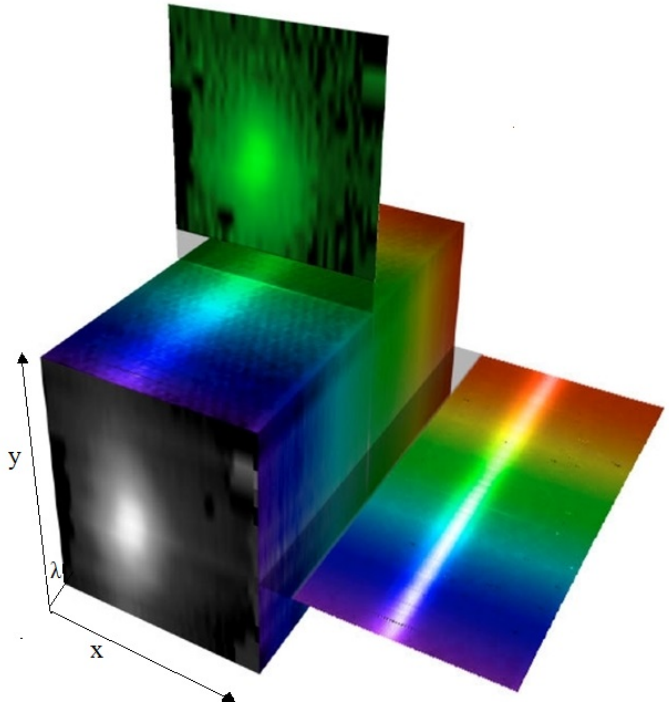
Fonte: GEMINI OBSERVATORY (2015)

:

O instrumento utilizado, acoplado ao foco Cassegrain do telescópio, foi o espectrógrafo de campo integral (IFU) no infravermelho próximo (NIFS) que apresenta um campo de visada de 3" × 3", dividido em 29 fatias, e pixels espaciais, ou *spaxels*, retangulares de 0.103" × 0.043". O detector do instrumento é um Hawaii II, com 2048 x 2048 pixels de tamanho físico de 18 μm. Tal detector apresenta uma camada de HgCdTe que tem sensibilidade a radiação no infravermelho próximo entre 1 e 2,6 μm.

A escolha deste instrumento se deu, primeiramente, porque ele permite o estudo das regiões por IFU, produzindo cubos de dados. Os cubos de dados possuem duas dimensões espaciais (eixos x e y) e uma dimensão espectral (eixo z), como exemplificado na Figura 24. Sendo assim, o cubo de dados permite o estudo de imagens de regiões em comprimentos de ondas específicos e também permite obter um espectro unidimensional em qualquer região do campo de visada do instrumento. O espectrógrafo NIFS possibilita a observação no infravermelho próximo em quatro bandas: Z, J, H e K, que abrangem desde 0,94 até 2,4 μm. Para o presente trabalho, foi utilizada a banda K que abrange o comprimento de onda desde 2,0 a 2,4 μm, com o comprimento de onda central em 2,2 μm e com uma resolução espectral de $\left(\frac{\lambda}{\Delta\lambda}\right) \sim 5300$. A banda K foi escolhida por representar a região espectral do NIR em que a extinção por poeira é menor ($A_K = 0{,}1\ A_V$; onde A_K

Figura 24 - Ilustração esquematizada de um cubo de dados, onde o cubo tem uma representação espacial da imagem (eixo x e y) e as cores representam a dimensão espectral (eixo z). Por esta esquematização, percebe-se que cada par de coordenadas x e y da imagem apresenta um espectro específico. Fonte: adaptado de McDermid (2011).



Fonte: Autor.

:

e A_V são o avermelhamento nas bandas K e V, respectivamente).

Conjuntamente com NIFS foi utilizado o módulo de óptica adaptativa ALTAIR para obter uma melhor resolução espacial. Este instrumento, que tem seu melhor desempenho nas bandas J e K, usa 177 espelhos deformáveis para corrigir a frente de onda da imagem com base nas variações rápidas de i,a fonte puntiforme. Estas correções são feitas continuamente, com amostragem de milissegundos, o que possibilita a melhora da Função de Fonte Puntiforme (PSF). Desta forma, uma observação com a óptica adaptativa ALTAIR pode obter uma resolução espacial da ordem de 0,1" no NIR. Para nossos alvos, utilizamos o modo de fonte a laser, devido ao fato de não existirem estrelas intensas o suficiente nas proximidades das regiões observadas, para o modo de fonte estelar.

2.1.2 Processo de observação

A observação de ciência constituiu-se de 8 curtas observações consecutivas das regiões estudadas com deslocamento de pontilhamento (*dithering*) de 0,125". Também foram feitas 8 observações seguidas de um céu "vazio", com o mesmo tempo de exposição da fonte e mesmo padrão de pontilhamento da observação de ciência, com o objetivo de remover a emissão de fundo de céu. Essa metodologia de observação foi escolhida para maximizar os resultados da técnica denominada Análise de Componente Principal (PCA) (Steiner, comunicação privada) e por ajudar na reconstrução da PSF. Ao final ou ao início

de cada observação de ciência foi efetuada uma exposição de 30 segundos de uma lâmpada de argônio e xenônio para realizar a calibração em comprimento de onda.

Com a utilização do módulo da Unidade de Calibração do Gemini (GCAL - *Gemini Facility Calibration Unit*), foram obtidos os dados para o processo de correção espacial e calibração das imagens de ciência. Eles foram obtidos antes ou após a observação de ciência. Os primeiros dados de calibração são 6 *flats* que foram tomados de dia com o domo iluminado para computar a eficiência quântica do detector quando registra altas contagens de fótons e cinco vezes com o domo sem iluminação para computar a eficiência quântica do detector quando registra baixas contagens. Foram observadas uma ou duas imagens de *dark* com obturador fechado e considerando o mesmo tempo de exposição da observação da lâmpada de argônio e xenônio. Isto foi utilizado com o objetivo de remover o ruído térmico do detector nos dados de ciência. Por fim, foram feitas duas máscaras *Ronchis* que produzem a correção espacial dos cubos de dados, determinando curvaturas e flexões do instrumento, e um *dark* ao final da observação para zerar a contagem de fótons do detector. Todas as etapas foram realizadas seguindo o padrão do observatório.

Foram também observadas estrelas do tipo espectral A0V próximas ao alvo com mesma massa de ar das fontes para serem usados na remoção das linhas de absorção atmosférica. A escolha de estrelas com esse tipo espectral se deve ao fato de seus espectros serem relativamente pobres em metais e só apresentarem uma única linha de absorção do hidrogênio (Brγ) na banda *K*. Aquisições dos cubos das regiões UCHII foram efetuadas apontando-se para o objeto mais brilhante do campo e depois corrigindo a posição com pequenos deslocamentos.

Ao total foram detectadas 25 fontes em 19 regiões observadas e cada fonte encontrada foi numerada de 1 a 25. Todas as informações sobre as observações de cada região são apresentadas na Tabela 2.

2.2 Redução de Dados

2.2.1 Redução do Cubo de Dados

A redução de dados foi feita em ambiente IRAF com uso da versão 10 do pacote Gemini, seguindo o processo padrão de redução de dados para o NIFS. Com os dados obtidos com a GCAL foi possível fazer a correção de pixels ruins, a correção de *flat-field*, a correção espacial nas imagens, com o uso da máscara *Ronchi* e a calibração em comprimento de onda nos espectros. Também foi removida a emissão de fundo de céu com a mediana das 8 imagens do céu "vazio", adquirida no processo de observação.

Para a remoção das linhas telúricas foi criado um espectro de absorção atmosférica para cada região UCHII. Estes espectros foram extraídos de cada estrela A0V usando uma abertura de extração de 0,5" de raio, valor padrão da redução. Posteriormente, foi removida manualmente a linha de absorção do Brγ com a ferramenta **splot**, do pacote NOAO do

Tabela 2 - Informações sobre os alvos observados.

Região	**Magnitude (K)**	**Tempo de Exposição(s)**	**Data da Observação**	**Nomenclatura da Fonte Detectada**	**Estrela Telúrica**
G5.97-1.17	6.911	10 x 8	24-05-2011	1,23,24	hip 84147
G6.55-0.10	-	30 x 8	15-07-2011	2	hip 84147
G15.04-0.6	-	30 x 8	13-07-2011	3	hip 90232
G18.146-0.284	11.19	45 x 8	13-07-2011	4	hip 90232
G23.96+0.1	9.936	30 x 8	13-07-2011	5,6	hip 86049
G28.288-0.364A	7.323	15 x 8	15-06-2011	7,8,9,10	hip 89634
G28.288-0.364B	-	15 x 8	13-07-2011	-	hip 89634
G29.96-0.0	-	10 x 8	13-07-2011	11	hip 89634
G45.12+0.1A	7.854	15 x 8	13-07-2011	12,13	hip 88429
G45.12+0.1B	-	15 x 8	13-07-2011	-	hip 88429
G45.12+0.1C	-	15 x 8	19-07-2011	-	hip 88429
G48.609+0.027	7.997	10 x 8	20-05-2011	14	hip 95487
G53.605+0.046	8.769	10 x 8	20-05-2011	15,16	hip 95487
G70.965-1.6A	7.8	10 x 8	18-06-2011	17	hip 99719
G70.965-1.6B	-	10 x 8	18-06-2011	-	hip 99719
G70.965-1.6C	-	10 x 8	18-06-2011	-	hip 99719
G77.965-0.006A	-	30 x 8	24-05-2011	18, 25	hip 99719
G77.965-0.006B	-	30 x 8	24-05-2011	19,20,21	hip 99719
G78.438+2.659	9.15	30 x 8	19-07-2011	22	hip 99719

IRAF. Utilizando-se esses espectros de absorções telúricas, foram feitas as remoções das linhas telúricas em todos os dados de ciência. Por fim, o cubo de dados foi construído com escala de pixel padrão de 0.05" × 0.05".

Um exemplo de cubo pode ser visto na Figura 25 e os demais cubos podem ser vistos do capítulo 4.1 até o capítulo 4.4.

2.2.2 Redução dos dados Espectroscópicos

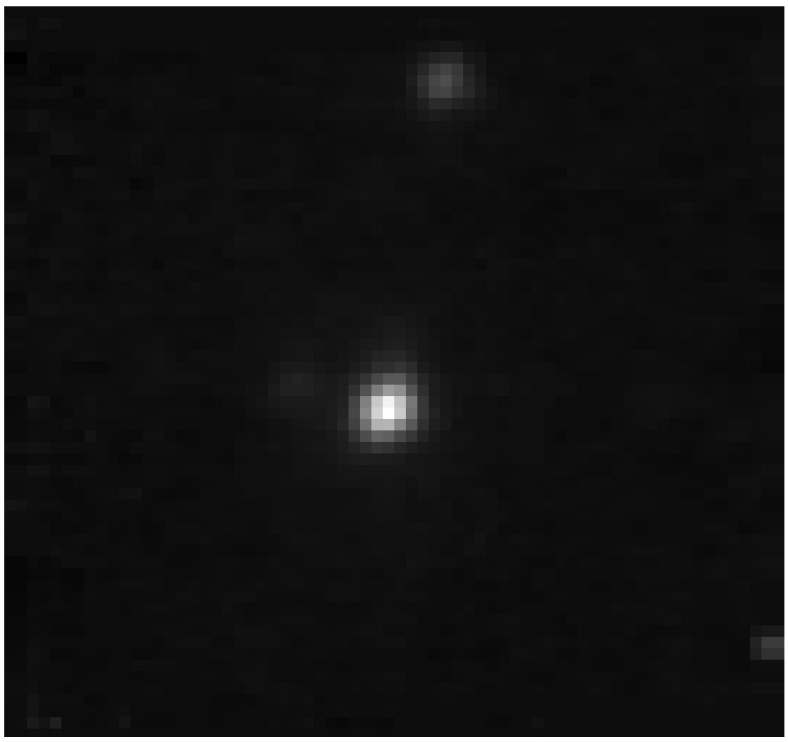
Após executar os processos descritos na seção anterior, foram extraídos espectros unidimensionais das fontes relacionadas com aberturas circulares variando conforme a necessidade de cada região do estudo, como pode ser visto na Tabela 3, considerando-se a existência de emissão nebular na região.

Tabela 3 - Tamanhos das aberturas de extração em segundos de arcos utilizados para cada fonte.

Fontes	**Abertura circular (")**
1- 20 e 22	0.5
21	0.4
23, 24 e 25	0.3

Para a remoção das linhas telúricas e a calibração de fluxo em espectros foi utili-

Figura 25 - Exemplo de um cubo de dados referente à região G23.96+0.1. A imagem corresponde ao comprimento de onda de 2,2416 μm que coincide com a fatia 1020 do cubo.



Fonte: Autor.

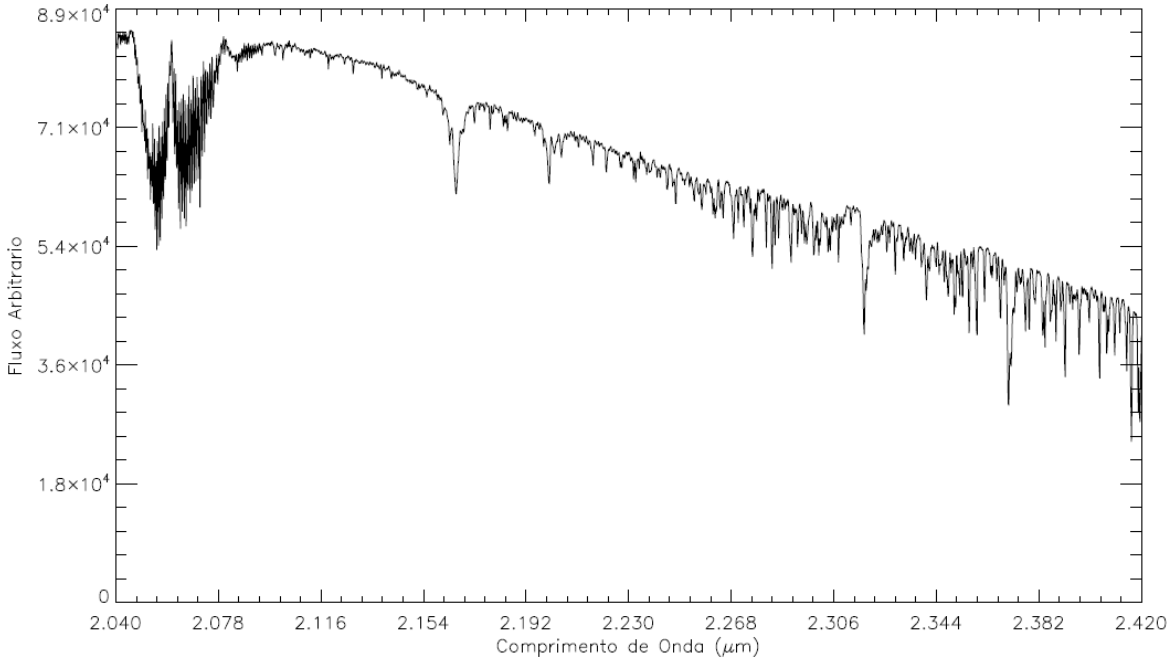
:

zada a rotina **xtellcor general**[1] escrita em IDL (VACCA; CUSHING; RAYNER, 2003). Esta rotina apresenta um método padronizado de remoção das linhas telúricas e calibração em fluxo nos espectros, usando observações de estrelas do tipo A0V e um modelo do espectro intrínseco da estrela Vega (α Lira), em alta resolução. Esse procedimento é realizado através das magnitudes B e V das estrelas A0V observadas, do avermelhamento interestelar deduzido das magnitudes B e V e do escalonamento do fluxo a partir do modelo do espectro de Vega. Um exemplo de espectro A0V utilizado, pode ser visto na Figura 26. As informações utilizadas das estrelas telúricas pelo **xtellcor general** são apresentados na Tabela 4. Quando necessário, os espectros foram normalizados pelo contínuo.

Um exemplo de espectro obtido após toda a redução de dados pode ser visto na Figura 27. Os demais espectros analisados nesse trabalho serão apresentados nos capítulos 4.1 -5.

[1]Website onde podem ser encontradas as rotinas é http://irtfweb.ifa.hawaii.edu/ spex/

Figura 26 - Espectro da estrela hip 99719, exemplo de uma estrela do tipo A0 V.



Fonte: Autor.

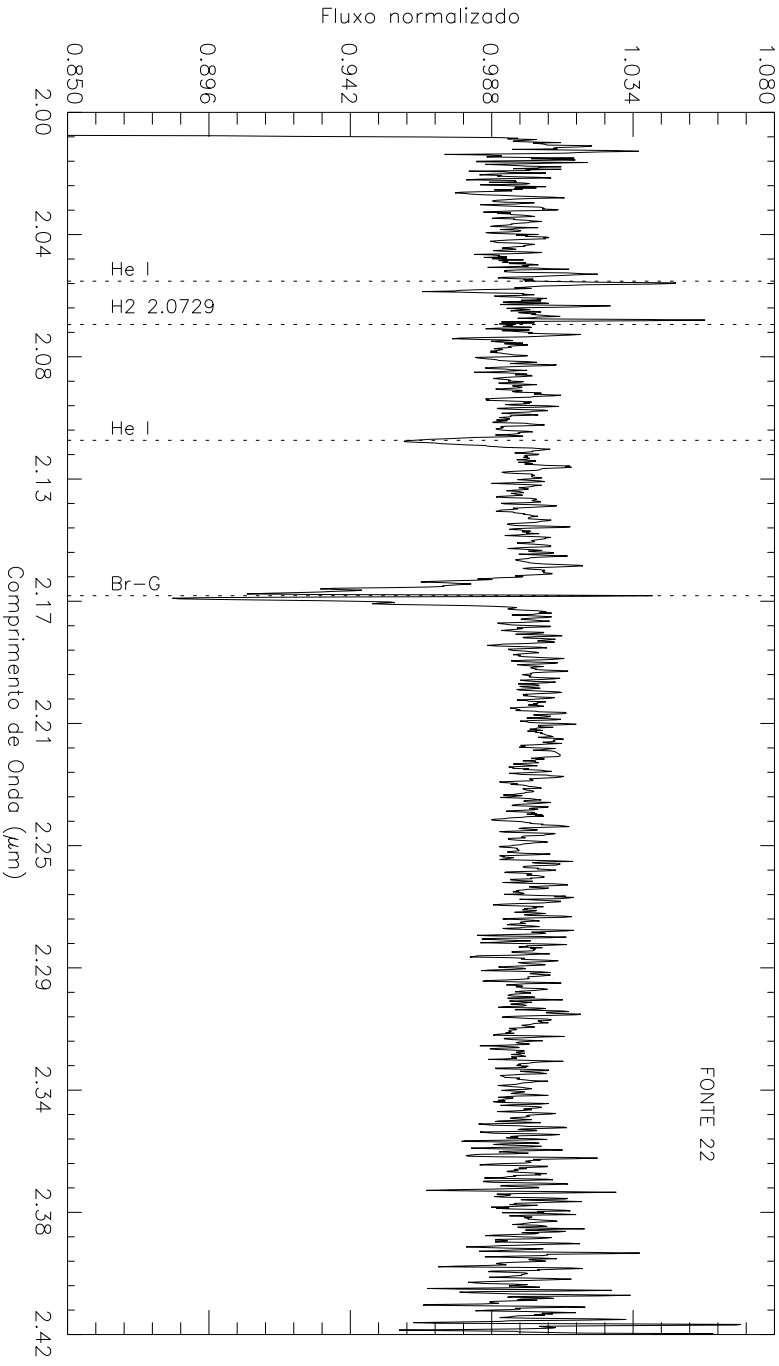
:

Tabela 4 - Magnitudes das estrelas telúricas usadas.

Estrela Telúrica	**Magnitude** (B)	(V)	**Referências**
hip 84147	6.479	6.511	(1)
hip 86049	6.920	6.880	(2)
hip 88429	6.450	6.420	(3)
hip 89634	9.126	8.884	(2)
hip 90232	8.590	8.300	(2)
hip 90484	8.000	7.840	(2)
hip 95487	6.294	6.303	(1)
hip 99719	6.458	6.473	(1)

(1) - Gontcharov (2006); (2) - Høg *et al.* (2000); (3) - Oja (1991).

Figura 27 - Espectro referente à fonte na região G78.438+2.659 e a localização das linhas fotosféricas existentes no intervalo de observação são indicadas pelas linhas tracejadas.



Fonte: Autor.

3 Técnicas de Análise de Dados

Neste trabalho foram utilizados três tipos de análise: a espectroscopia, mapas de linhas de emissão e a metodologia PCA. A espectroscopia unidimensional foi aplicada em todas as fontes puntiformes, com o intuito de obter o tipo espectral das fontes ionizantes nas regiões UCHII a partir de linhas fotosféricas observadas e investigar possíveis estruturas circunstelares associadas ao seu processo de formação, tais como discos de acreção e efluxos. Os mapas de linhas apresentam imagens das regiões, em comprimentos de onda específicos. A metodologia PCA foi aplicada em todas as regiões e foi utilizada diretamente nos cubos de dados, para obter características cinemáticas e físicas das fontes puntiformes, do gás e da poeira. Os detalhes dos procedimentos utilizados são apresentados nas próximas Seções.

3.1 Mapas em faixas espectrais

Uma possibilidade que os IFUs nos oferecem é o estudo de imagens fatiadas em pequenos intervalos de comprimentos de onda específicos. Desta forma, é possível entender o comportamento da linha escolhida em todo o campo de visada do IFU. Comparando-se as imagens e espectros é possível verificar e determinar a posição de fontes ionizantes e em alguns casos, ressaltar e estudar estruturas produzidas pela estrela ionizante, tais como jatos e frente de choques.

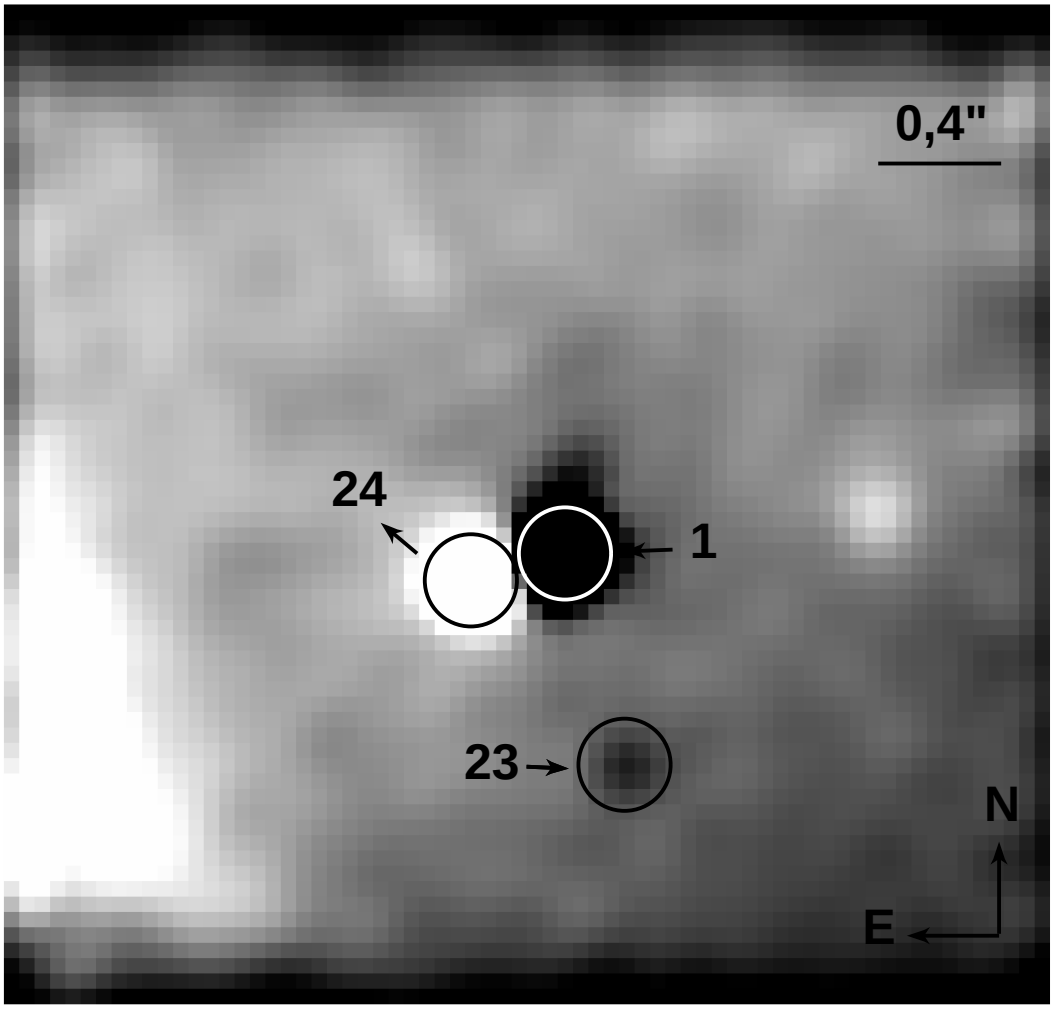
Para obter as imagens dos cubos de dados, foi utilizada a ferramenta **nfmap** do pacote *GEMINI*. O **nfmap** efetua a subtração do contínuo adjacente em cada imagem obtida, produzindo, assim,um mapa com a emissão ou absorção apenas no intervalo de comprimento de onda desejado. Um exemplo de um mapa obtido de um cubo de dados pode ser visto na Figura 28. Neste mapa foi possível detectar uma fonte, em uma imagem monocromática no comprimento de onda do Brγ (2,166 μm), em absorção e outra adjacente em emissão, provavelmente mais jovem.

As principais imagens foram produzidas nas linhas de Brγ (2,166 μm), He I (2,058 μm), He I (2,1127 μm). Estas linhas têm origem em ambientes com um campo de radiação intenso, o que pode revelar candidatos a estrelas de alta massa. Também foram extraídas as imagens na linha He II (2,1885 μm), onde apenas estrelas mais quentes que tipo espectral O intermediário aparecer (HANSON; LUHMAN; RIEKE, 2002). Essas imagens foram usadas para auxiliar na identificação da origem de linhas fracas de He II nos espectros unidimensionais.

Mapas produzidos em regiões do contínuo tiveram o intervalo de extração escolhido afastado de linhas intensas para ter apenas informação do contínuo.

Os intervalos de comprimento de onda utilizados para criar os mapas podem ser vistos na Tabela 5 e os detalhes dos mapas obtidos e as sua discussão para cada região de estudo serão apresentados nos capítulos 4.1 a 4.4, onde cada região será discutida separadamente.

Figura 28 - Exemplo de mapa de em faixa espectral da região G5.97-1.17. Nele foi possível detectar uma fonte com a linha de Brγ em absorção (fonte 1), mais velha, e outra adjacente (fonte 24), provavelmente mais jovem, com Brγ em emissão. Os locais da fonte são indicados pelos círculos.



Fonte: Autor.

:

Tabela 5 - Intervalos utilizados para a criação de cada mapa.

Linha	**Intervalo Inicial** (μ**m**)	**Intervalo Final** (μ**m**)	**Valor central** (μ**m**)
Contínuo	2,25	2,27	2,26
Brγ	2,15	2,17	2,16
He I	2,04	2,06	2,05
He I	2,111	2,113	2,112
He II	2,184	2,194	2,189

3.2 Espectroscopia unidimensional de fontes puntiformes

A espectroscopia com abertura circular das regiões UCHII tem o objetivo primário de classificar o objeto ionizante, caso ele não esteja profundamente embebido e nenhuma linha é detectada. Além disso, também pode produzir informações relevantes sobre o material que o circunda, através das linhas nebulares presentes nos espectros. Para este trabalho, o objetivo inicial da espectroscopia é determinar o tipo espectral por meio de linhas fotosféricas detectadas nos espectros, depois de compará-las com os atlas de Hanson, Conti e Rieke (1996) e Hanson *et al.* (2005).

3.2.1 Classificação Espectral

A classificação espectral da fonte ionizante foi obtida mediante dois métodos: pela detecção direta das linhas fotosféricas e por linhas nebulares. Quando as linhas fotosféricas puderam ser observadas, foi usada a comparação destas linhas com espectros de catálogos da literatura, que estabelecem a classificação espectral de modo direto. Quando apenas linhas nebulares foram identificadas, foi utilizado o programa de fotoionização *CLOUDY* (FERLAND *et al.*, 1998) para identificar a temperatura efetiva da fonte ionizante.

3.2.1.1 Linhas fotosféricas

A classificação espectral das fontes usando a espectroscopia no NIR é realizada por comparação visual dos espectros observados, com os espectros padrões das estrelas OB dos atlas de Hanson, Conti e Rieke (1996), com baixa resolução (R = 800 e R=3.000), e Hanson *et al.* (2005), com resolução média (com valores de 8.000 e 12.000). Estes atlas foram elaborados por meio de observações no NIR das estrelas padrões, com diversas temperaturas e luminosidades e seus tipos espectrais foram determinados, usando a classificação já existente para essas fontes no comprimento de onda no visível. Desta forma, é possível determinar o tipo espectral para um intervalo espectral de estrelas em diferentes classes de luminosidade, dentre elas, as estrelas em formação embebidas em regiões UCHII, alvo de nosso trabalho.

Nos comprimentos de onda do visível, as linhas que identificam os tipos espectrais e que são produzidas nas fotosferas das estrelas são as linhas de Hidrogênio, Hélio, Nitrogênio e Carbono (HANSON; CONTI; RIEKE, 1996), sendo as duas primeiras em absorção e o restante em emissão. No NIR os espectros estelares apresentam poucas linhas desses elementos, o que dificulta uma grande diferenciação entre os tipos espectrais, sendo a classificação, nesta região do espectro, mais imprecisa do que a efetuada nos comprimentos de onda no visível.

As linhas de Hélio e Hidrogênio apresentam uma forte dependência da temperatura e da luminosidade estelar. Os espectros de estrelas OB no NIR podem apresentar uma única linha de Hidrogênio, H I (4 - 7) (Brγ), em 2,1661 μm e três linhas de Hélio

Tabela 6 - Comportamento das linhas para cada tipo espectral.

Tipo Espectral	**C IV 2,078 μm**	**He I 2,1127 μm**	**N III 2,1155 μm**	**Brγ 2,1661 μm**	**He II 2,1885 μm**
O3 - O4	i	i	e	a	a
O5 - O6	e	i	e	a	a
O7 - O8	f/i	a	e	a	a
O9 - B3	i	a	i	a	i
B4 - B7	i	i	i	a	i

i= inexistente, a = absorção, e= emissão e f= fraca emissão

neutro: o singleto He I (2s ^{1}S - 2p ^{1}P^o) em 2,058 μm, o tripleto He I (3p ^{3}P^o - 4s ^{3}S) em 2,1126 μm e o singleto He I (3p ^{1}p^o - 4s ^{1}S) em 2,1137 μm. Por fim, também pode ser detectada nos espectros, uma linha de Hélio uma vez ionizado, o He II (7 - 10), em 2,1885 μm. Entretanto, a linha He I em 2,058 μm, que tem uma forte dependência da temperatura da fonte, não foi utilizada no processo de classificação espectral. A razão para isso é que ela se encontra em uma região espectral de forte absorção da atmosfera terrestre.

Outras linhas que podem ser observadas são: o tripleto de C IV (3p ^{2}P^o - 3d ^{2}D) em 2,069, 2,078 e 2,083 μm, sendo as duas primeiras mais fortes e a terceira mais fraca, portanto mais difícil de ser observada (BIK; KAPER; HANSON; SMITS, 2005), e a complexa linha de N III em 2,115 μm. Dentre todas as linhas, a única presente em todos os tipos espectrais entre O3 e B3, é a linha de Brγ, cuja diferença para cada tipo espectral é o aumento de sua intensidade nas B quentes em relação às O quentes. As linhas de He I em 2,1126 e 2,1137 μm necessitam de um alto poder de resolução (maior que 10.000) para serem resolvidas, caso contrário, como neste trabalho, elas são vistas como uma só linha em 2,1127 μm (HANSON *et al.*, 2005). Elas se tornam detectáveis nas estrelas de tipo espectral B quentes e permanecem visíveis até O7 - O8 dando lugar ao He II que aumenta sua intensidade até as O quentes. As linhas de Carbono só estão presentes em estrelas O quentes. Já as linhas de Nitrogênio estão presentes apenas nas estrelas com tipo espectral mais quente que O8.

As demais linhas de elementos, tais como, Ferro, Magnésio, Hidrogênio molecular e outros elementos e moléculas que podem ser identificados nos espectros, são relacionadas ao gás ou ao disco que envolve as estrelas (BIK; KAPER; WATERS, 2006). Desta forma, não podem ser usadas para a classificação espectral da fonte ionizante. A Tabela 6 sintetiza o esquema das principais linhas usadas na classificação espectral, por meio desse método.

3.2.1.2 Modelos de Fotoionização

Para as fontes mais embebidas em que não foi possível detectar linhas fotosféricas em seus espectros, utilizamos as razões entre linhas nebulares observadas e comparadas com valores preditos por modelos de fotoionização, obtidos com o *software CLOUDY* 10 (FERLAND *et al.*, 1998). Com esse método é possível estimar a temperatura da estrela que

produz os efeitos observados nas linhas nebulares, assumindo uma única fonte embebida. Com essa estimativa é possível associar um tipo espectral à fonte puntiforme.

CLOUDY é um código para simular condições físicas dentro de nuvens no meio interestelar. Com este código podemos simular estruturas térmicas, estruturas de ionização e estruturas químicas em uma nuvem no meio interestelar, além de simular um espectro sintético para comparar com o observado. Os limites de temperatura para o gás modelado variam de temperaturas baixas, condizentes com o aquecimento por raios cósmicos de fundo, até temperaturas de 10^{10} K condizentes com núcleos ativos de galáxias (FERLAND *et al.*, 1998). Versões mais modernas que o *CLOUDY* 07 incorporam modelos de atmosfera estelar para gerar distribuições do espectros de energia (SED) de diversos tipos de estrelas, de modo que é possível determinar a natureza da fonte ionizante embebida. Atualmente, muitos trabalhos utilizam grades de modelos de ionização para analisar as linhas no infravermelho e indetificar as fontes de ionização presentes nas regiões UCHII (BLUM; DAMINELI, 1999; BLUM; MCGREGOR, 2008; BLUM; MCGREGOR, 2009, dentre outras.).

Para o presente estudo foi utilizada a versão 10 do *CLOUDY*, com os seguintes parâmetros que definiram o ambiente e as características da fonte ionizantes das UCHII:

Temperatura efetiva é a temperatura de um corpo negro que emite a mesma quantidade de energia por unidade de área e por unidade de tempo da fonte observada. Ela pode ser definida através do fluxo observado e do raio estelar R , conforme mostra a Eq. 4. Com esta informação, o *CLOUDY* pode sintetizar o espectro.

$$T_{eff}^4 = \frac{L_\star}{4\pi R^2 \sigma} \tag{4}$$

Onde R é o raio da estrela, σ é a constante de Stefan-Boltzmann e $L_\star$ é a luminosidade da estrela.

Para os modelos elaborados, o valor escolhido para temperatura refere-se à temperatura da fonte mais quente da região. Este é um dos principais parâmetros utilizados, pois definirá o tipo espectral da estrela observada. Foi utilizada a variação de 25.000 a 50.000 K, em intervalos de 1.000 K. Por ter valores condizentes com a variação da temperatura efetiva dos tipos espectrais de estrelas de alta massa (MARTINS; SCHAERER; HILLIER, 2005; BLUM; MCGREGOR, 2009), entre B3-O3.

fluxo ionizante é definido como o fluxo superficial de fótons capazes de ionizar o Hidrogênio, que se difundem pela nuvem que circunda a estrela, formando a região UCHII (Eq. 5). Esse fluxo também é proporcional à profundidade óptica nas linhas excitadas, tais como as linhas de Balmer (FERLAND; SHIELDS; NETZER, 1979). Esse parâmetro dará a informação da intensidade do contínuo para os modelos. Neste trabalho, tal parâmetro variou entre 12,0 e 16,0 em intervalos de 0,25, como

descrito por Blum e McGregor (2008), para condizer com os ambientes de formação de estrelas massivas.

$$\Phi(H) \equiv \frac{Q(H)}{4\pi r_o^2} \equiv \frac{R_{estrela}^2}{r_o} \int_{v_1}^{v_2} \frac{\pi F_v}{hv}\, dv\ [s^{-1}cm^{-2}] \quad (5)$$

Onde r_o é a separação entre o centro da fonte e a face iluminada da nuvem, F'_v é o fluxo na frequência v.

Modelos de atmosfera estelar Contém informações da SED potenciais para uma fonte ionizante de UCHII. A grade de atmosferas estelares utilizada nos modelos foi a grade *TLUSTY*, de estrelas O e B (LANZ; HUBENY, 2003; LANZ; HUBENY, 2007). Nessa grade, as SEDs são produzidas pelas estrelas O e B que estão em equilíbrio hidrostático e fora do equilíbrio térmico local (NLTE).

Metalicidade da atmosfera estelar é a quantidade de "metais", elementos químicos diferentes de H e He, presentes no modelo de atmosfera estelar. Para este trabalho foi escolhida a metalicidade solar (log(Z) = 0).

Densidade e Raio Foram escolhidos valores típicos para regiões UCHII, 10^4 cm^{-3} e 5 $\times$ 10^{16} cm, respectivamente (CHURCHWELL, 2002).

Abundância é a composição química do gás circunstelar utilizada. Para esse estudo foi usada a mesma composição encontrada no meio interestelar médio (ISM), no qual a razão entre He e H é de 0,1 e que inclui os efeitos da poeira (BLUM; DAMINELI, 1999). O demais elementos e suas proporções podem ser vistos em Ferland *et al.* (1998).

Geometria A configuração espacial da nuvem escolhida como fechada e esférica. Nesta configuração, o fator de cobertura do gás é maior e a emissão de cada elemento de volume da nuvem é isotrópica. Essa geometria é usualmente assumida para regiões HII e nebulosas planetárias. Como o próprio autor do *software* comenta, as diferenças entre as geometrias adotadas são usualmente pequenas e pouco interferem nos resultados.

Para melhores precisão nos resultados também foram adicionados aos cálculos, a radiação cósmica de fundo e o fluxo de raios cósmicos padrão do *software*.

Dos diversos resultados obtidos pelos modelos no *CLOUDY*, utilizamos apenas as intensidades estimadas para três linhas no infravermelho, Brγ (2,166 μm), He I (2,058 μm) e He I (2,1127 μm), relativas a fonte ionizante. A escolha dessas linhas para o cálculo das razões entre H e He se deu porque elas são próximas entre si e dependem fortemente da temperatura da fonte ionizante, já que as linhas do He provaram ser um excelente medidor

da temperatura estelar (KENNICUTT JR.; BRESOLIN; FRENCH; MARTIN, 2000).

Por se encontrar em uma região com forte absorção da atmosfera terrestre, o fluxo da linha He I em 2,058 μm só foi usado na razão de linhas para determinar a temperatura efetiva quando a linha de He I em 2,1127 μm não foi detectada nos espectros. Outro fator para a escolha preferencial da linha de He I em 2,1127 μm foi a sua localização, no espectros mais próxima da linha de Brγ, minimizando os efeitos do avermelhamento diferencial. Desta forma, comparando-se a razão obtida pelos modelos de fotoionização e a razão obtida dos espectros observados é possível estabelecer um intervalo de temperatura no qual a fonte ionizante se enquadra.

Para que se obtenha um valor de temperatura mais preciso para essa fonte, é necessário conhecer o fluxo de emissão da poeira nas regiões. Assim, a razão entre este fluxo e o fluxo da linha de Brγ possibilitaria a resolução da degenerescência produzida pela combinação da temperatura estelar com o fluxo ionizante, como visto nos trabalhos de Blum e Damineli (1999), Blum e McGregor (2008), Blum e McGregor (2009). O pico de emissão da poeira está situado próximo dos 100 μm, entretanto, para essa faixa espectral existem apenas as observações do satélite IRAS. Tais observações apresentam um campo de visada muito extenso (2' $\times$ 2') comparados com o tamanho da regiões UCHII e assim esses dados não puderam ser usados neste estudo, já que o fluxo detectado poderia abranger a emissão de outras fontes próximas. Desta forma, este trabalho estimou o tipo espectral das fontes ionizantes dentro de um intervalo de temperatura possível[1].

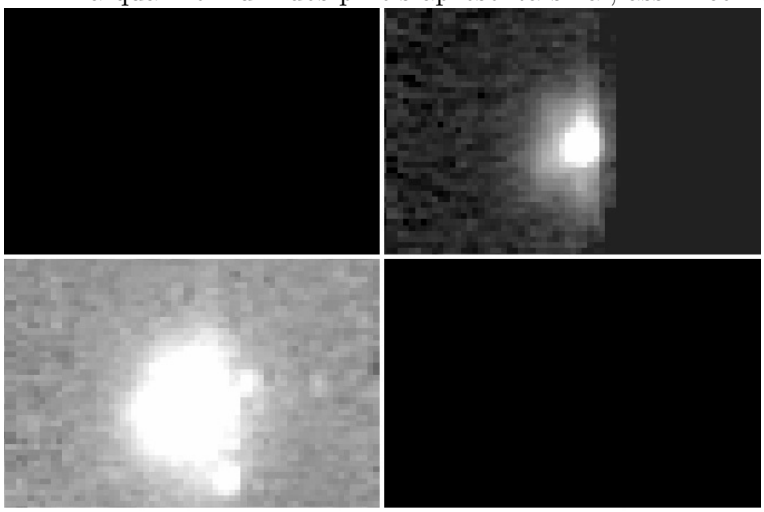
3.3 Tomografia de Análise de Componente Principal - PCA

Após o processo de redução inicial descrito na seção 2.2, foram removido as regiões sem sinais dos cubos de dados, antes de iniciar qualquer processamento com o PCA. Essas regiões são os cortes das colunas iniciais de pixels das matriz foto-sensíveis, que geralmente não apresentam dados que possam ser utilizados.

Outro fato relevante foi que por razões instrumentais os intervalos espectrais das primeiras e últimas colunas diferem bastante das restantes (Figura 29) e por isso, ambos os limites espectrais também tiveram que ser excluídos dos cubos. Deste modo, os cubos não apresentaram mais uma faixa espectral com 2040 fatias iniciais, valor padrão na redução de dados, e sim um total de 192, a fim de garantir que todo o cubo tivesse a mesma cobertura em comprimento de onda. Na Tabela 7 podem ser vistas as informações sobre o início e fim do comprimento de onda que abrange o cubo, para cada região, após o corte, além da quantidade de *pixels* espaciais em x e y, antes e depois do corte.

[1]Os dados do satélite Herschell foram liberados após a conclusão deste trabalho

Figura 29 - Imagens de 4 diferentes fatias do cubo de dados da G5.97-1.17 que ilustram os pixels sem sinais e condições de uso e que foram removidas antes de iniciar a metodologia PCA. A imagem *superior à esquerda* representa a primeira fatia do cubo, onde não existe exposição da fonte em nenhum pixel. A imagem *superior à direita* representa a 40ª fatia do cubo onde pixels sem sinais são visíveis. A imagem *inferior à esquerda* representa a 1920ª fatia do cubo, mostrando o mesmo comportamento que a imagem anterior. Por fim, a imagem *inferior à direita* temos a 2040ª e última fatia do cubo, na qual nenhum dos pixels apresenta sinal, assim como a primeira fatia.



Fonte: Autor.

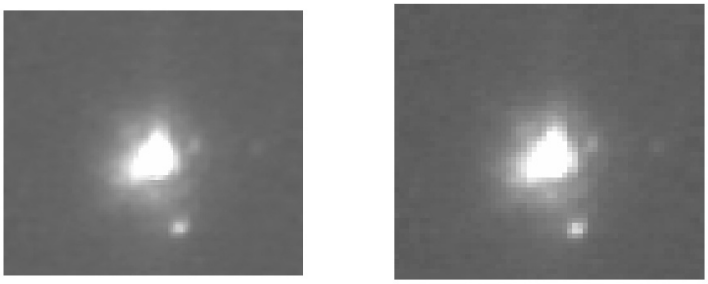
:

Tabela 7 - Informações dos cubos após as remoções dos da área especais sem dados e uniformização da cobertura espectral

Região	**Fatias Espectrais Inicias removidas**	**Fatias Espectrais Finais removidas**	**Pixels Espaciais Removidos**		**Pixels Espaciais Remanescentes**
			x	y	
G5.97-1.17	62	58	7	11	61 x 54
G6.55-0.10	62	60	6	7	58 x 56
G15.04-0.6	62	58	8	11	60 x 54
G18.146-0.284	62	58	8	11	60 x 54
G23.96+0.1	62	58	7	11	61 x 54
G28.288-0.364A	62	58	8	11	60 x 54
G28.288-0.364B					
G29.96-0.0	62	58	7	11	60 x 54
G45.12+0.1A	62	58	8	11	60 x 55
G45.12+0.1B*					
G45.12+0.1C*					
G48.609+0.027	62	58	9	17	59 x 54
G53.605+0.046	62	58	7	10	60 x 55
G70.965-1.6A	62	58	5	10	60 x 55
G70.965-1.6B*					
G70.965-1.6C*					
G77.965-0.006A	62	58	9	16	63 x 55
G77.965-0.006B	62	58	12	13	63 x 55
G78.438+2.659	62	58	8	11	60 x 55

59

Figura 30 - Exemplo da aplicação da reamostragem do cubo da região G5.97-1.17. A imagem à esquerda representa o cubo de dados após a reamostragem e a direita antes da reamostragem.



Fonte: Autor.

:

3.3.1 Maximizando o PCA

Para melhorar o desempenho da metodologia da Tomografia PCA, os cubos de dados foram processados em duas etapas preliminares anteriores ao PCA: a Reamostragem Espacial e a Filtragem Espacial de *Butterworth*. Todo o tratamento foi efetuado através de rotinas escritas em IDL[2], assim como a respectiva documentação. Neste estudo não será feita a descrição matemática de cada etapa em detalhes, mas sim, apenas uma explicação de sua funcionalidade. Para maiores informações e explicação matemática detalhada dos métodos, vide Menezes, Steiner e Ricci (2014).

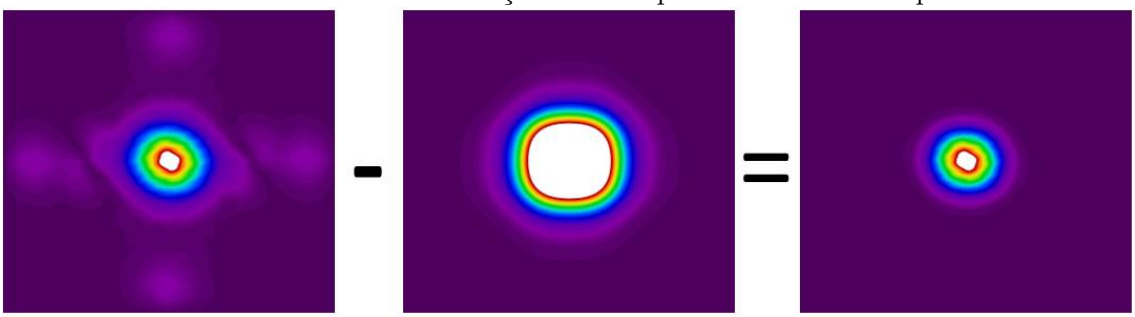
O primeiro tratamento dos cubos de dados consiste em diminuir os pixels espaciais para melhorar a visualização de estruturas presentes nas regiões estudadas (Figura 30). Para nosso estudo, os *pixels* espaciais foram divididos pela metade, de modo a se chegar, no final do processo, a pixels espaciais de 0,025" de lado. Esse valor foi escolhido apenas para manter o tamanho dos pixels espaciais múltiplos ao dos pixels obtidos após a redução padrão do NIFS. Este processo equivale a uma reamostragem espacial dos cubos de dados e o principal motivo de seu emprego é para suavizar as estruturas.

Como discutido em Menezes, Steiner e Ricci (2014), nenhuma informação é perdida nesse processo, entretanto, são adicionadas componentes de altas frequências aos dados.

Com os cubos reamostrados, foi realizada a filtragem espacial *Butterworth* para remover os ruídos e as componentes de altas frequências, sendo este último efeito amplificado durante a etapa de reamostragem. Este tratamento consiste em aplicar um filtro com formato elíptico e outro com formato retangular (Equação 6) na imagem no domínio das frequências espaciais (após aplicação da transformada de *Fourier*), removendo as altas frequências dos dados que se concentram na periferia da imagem, nesse domínio. Esse formato de filtro foi escolhido devido aos pixels do detector do NIFS serem retangulares.

[2]podem ser obtidas no site http://www.astro.iag.usp.br/pcatomography/

Figura 31 - Exemplo da aplicação do filtro espacial *Butterworth* no cubo G5.97-1.17. A imagem à esquerda é referente ao cubo no espaço da frequências antes da aplicação, nele são visíveis as componentes de altas frequências nas bordas. A imagem ao centro representa o filtro. Por fim, a imagem à direita representa o cubo após a aplicação do filtro. Nela é visível a remoção das componentes de alta frequência.



Fonte: Autor.

:

$$F = \left\{ \frac{1}{1 + \left[\sqrt{\left(\frac{u-u_0}{a}\right)^2 + \left(\frac{v-v_0}{b}\right)^2} \right]^{2n}} \right\} \cdot \left\{ \frac{1}{1 + \left[\left| \frac{u-u_0}{c} \right| \right]^{2n}} \cdot \frac{1}{1 + \left[\left| \frac{v-v_0}{d} \right| \right]^{2n}} \right\} \tag{6}$$

A Equação 6, (u_0, v_0) representa as coordenadas do centro da imagem submetida à transformada de *Fourier*, a corresponde à frequência de corte (em pixels) ao longo do eixo horizontal da parte elíptica do filtro, b corresponde à frequência de corte (em pixels) ao longo do eixo vertical da parte elíptica do filtro, c corresponde à frequência de corte (em pixels) ao longo do eixo horizontal da parte retangular do filtro, d corresponde à frequência de corte (em pixels) ao longo do eixo vertical da parte retangular do filtro e n corresponde à ordem da filtragem.

Diferentemente da reamostragem, o processamento de filtro espacial *Butterworth* gera uma perda de dados. Por isso, é preciso ser cuidadoso ao estipular os valores de corte do filtro. Para esse caso, a frequência de corte que se mostrou mais adequada nos eixos horizontal e vertical e que, portanto, foi utilizada no procedimento para a remoção das altas frequências com o mínimo de perda de informações nos cubos, foi de n= 0,35 com filtragem de ordem igual a 2. A Figura 31 traz uma comparação dos cubos antes e após a filtragem.

Os autores dessas rotinas também recomendam o uso de mais dois tipos de tratamento: a correção da refração atmosférica diferencial e a deconvolução de Richardson-Lucy. Entretanto, eles não foram efetuados. A correção da refração atmosférica diferencial, que elimina os efeitos atmosféricos ao longo do espectro, não foi feita porque gera um efeito muito pequeno no infravermelho próximo, como mencionado em Menezes, Steiner e Ricci (2014). Já a deconvolução de Richardson-Lucy, que reverte a convolução provocada pela atmosfera terrestre na PSF da fonte, não foi usada por o ALTAIR já produziu este pro-

cesso.

3.3.2 PCA

A Tomografia PCA é uma técnica recentemente desenvolvida por Steiner, Menezes, Ricci e Oliveira (2009), para extrair informações de cubos de dados, produzindo uma rotina que executa essa técnica foi escrita em linguagem IDL. A tomografia PCA consiste em facilitar a interpretação dos diversos resultados que os cubos de dados proporcionam, agrupando as informações associadas a cada tipo de dado correlacionado, em conjuntos de variáveis. Todo esse processo é feito transformando os cubos de dados em matrizes de covariância e fazendo uma transformação ortogonal linear para expressar os dados em novos sistemas de coordenadas não correlacionados. Sendo assim, a primeira coordenada apresenta a maior variância dos dados, a segunda apresenta a segunda maior variância e assim por diante. Essas novas coordenadas são chamadas de autovalores.

Como os cubos de dados apresentam duas dimensões espaciais formadas de pixels espaciais e uma dimensão espectral, a tomografia PCA produz um auto espectro em função do comprimento de onda e um tomograma com uma imagem espacial, ambos referentes aos dados de todos os autovalores. Deste modo, ao analisar cada autovalor é possível determinar informações espectrais e espaciais para os mesmos. Porém, nos autovalores maiores, o ruído se sobrepõe ao sinal, desta forma, apenas alguns poucos autovalores podem ser utilizados para cada região. Assim, para determinar quais autovalores seriam escolhidos, foi analisado o auto espectros um a um até que nenhum dado fosse detectado.

Outra ressalva que deve ser levada em consideração é que os auto espectros não podem ser usados para cálculos de razões de linhas e medidas das linhas, tal como largura à meia altura (FWHM), por exemplo, já que ele não são linhas e não trazem informações de intensidade e fluxo. Assim, segundo Steiner, Menezes, Ricci e Oliveira (2009), esse é um método não parametrizado que não depende de ajustes, experiências ou habilidades. Ele apenas resulta em uma única e objetiva resposta cabendo ao analisador perguntar e procurar estratégias para explicar tais respostas.

4 Análises das Regiões Individuais

4.1 Região G5.97-1.17

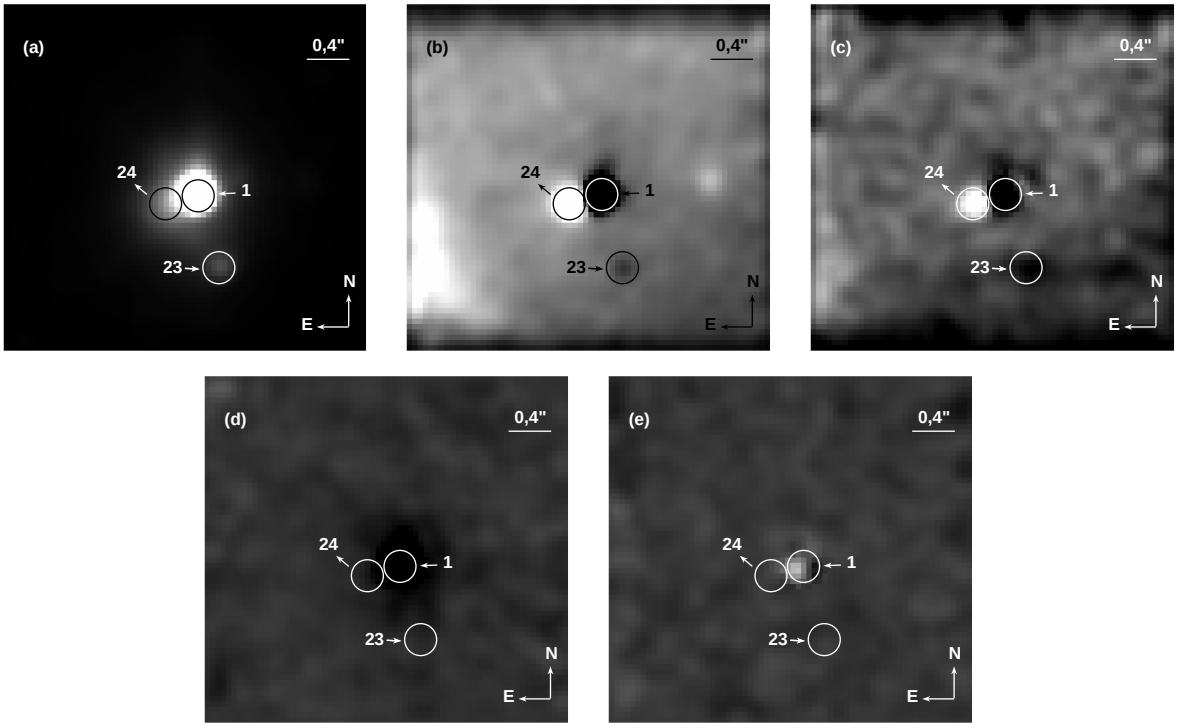
4.1.1 Mapas em faixas espectrais

A Figura 32 apresenta os mapas de linhas obtidos para a região G5.97-1.17. Nesta imagem podemos ver 5 tipos de mapas: o contínuo, Brγ (2,166 μm), He I (2,1127 μm), He II (2,1885 μm) e He I (2,058 μm), respectivamente, como descrito no Capítulo 3. Todos os mapas de faixas espectrais tiveram o contínuo removido, exceto o mapa do painel (a).

Observando o mapa do contínuo, Figura 32(a), é possível verificar a existência de uma fonte no centro que está presente em todos os mapas. Este fato sugere que o objeto 1 seja a principal fonte da região. Nesta imagem também é possível ver um alongamento da emissão à leste, como uma cauda, parecida com as imagens de Kim e Koo (2001) em 21 cm. Por fim, uma segunda fonte, nomeada como fonte 23, muito menos intensa que a fonte 1 é detectada ao sul.

No mapa em Brγ e He I (2,058 μm) (Figura 32(b) e 32(c), respectivamente) é observada uma segunda fonte em absorção nomeada fonte 23. Pelo fato de a fonte 23

Figura 32 - Mapas de faixas espectrais da região G5.97-1.17, onde são apresentados os mapas: (a) do contínuo, (b) das linhas de Brγ (2,166 μm), (c) do He I (2,058 μm), (d) do He I (2,1127 μm) e (e) do He II (2,1885 μm). Os intervalos do comprimento de onda de cada mapa são descritos na Seção 3.1. Cada pixel equivale a 0,05"x0,05" e os círculos presentes em cada mapa indicam a localização e os números indicam a nomenclatura adotada para cada fonte encontrada na região.



Fonte: Autor.

:

estar em absorção apenas nessas faixas espectrais ela foi assumida como uma estrela em fase de formação mais avançada por ainda estar embebida. Nesses dois mapas também é detectada uma terceira fonte à leste da fonte 1 e nomeada fonte 24. A localização da fonte 24 condiz com o alongamento da fonte 1 conforme pode ser visto na Figura 32(b). Deste modo, a presença da cauda seria a emissão do contínuo da fonte 24 presente naquele ponto. Pelo fato de a fonte 24 ser observada apenas em emissão nos mapas das linhas de Brγ (2,166 μm) e He I (2,058 μm), as linhas mais intensas, a fonte 24 deve estar embebida pelo gás e em um estágio evolutivo mais recente que as fontes 1 e 23. Pois estes mapas estão representando o que será detectados pela espectroscopia.

Os mapas de He I (2,1127 μm) (Figura 32(d)) mostraram apenas a fonte 1 em absorção e e He II (2,1885 μm) mostram a fonte com o centro deslocado em emissão. Este último fato é interpretado com excesso de ruído nesta estreita faixa espectral em nosso dados. Porém, pelas informações obtidas, este objeto deve estar em sua fase final de formação e que deve ser a estrela mais quente da região.

4.1.2 Espectroscopia unidimensional de fonte puntiforme

Para a espectroscopia, foi realizada a extração das três fontes evidenciadas pelos mapas de linhas. A função de dispersão de ponto (PSF) da fonte 1 tem FWHM de 1,79" e, para a fonte 24, não foi possível determinar este parâmetro, o que indica que o brilho da fonte 24 não é intensa o suficiente ou que a mesma não é puntual.

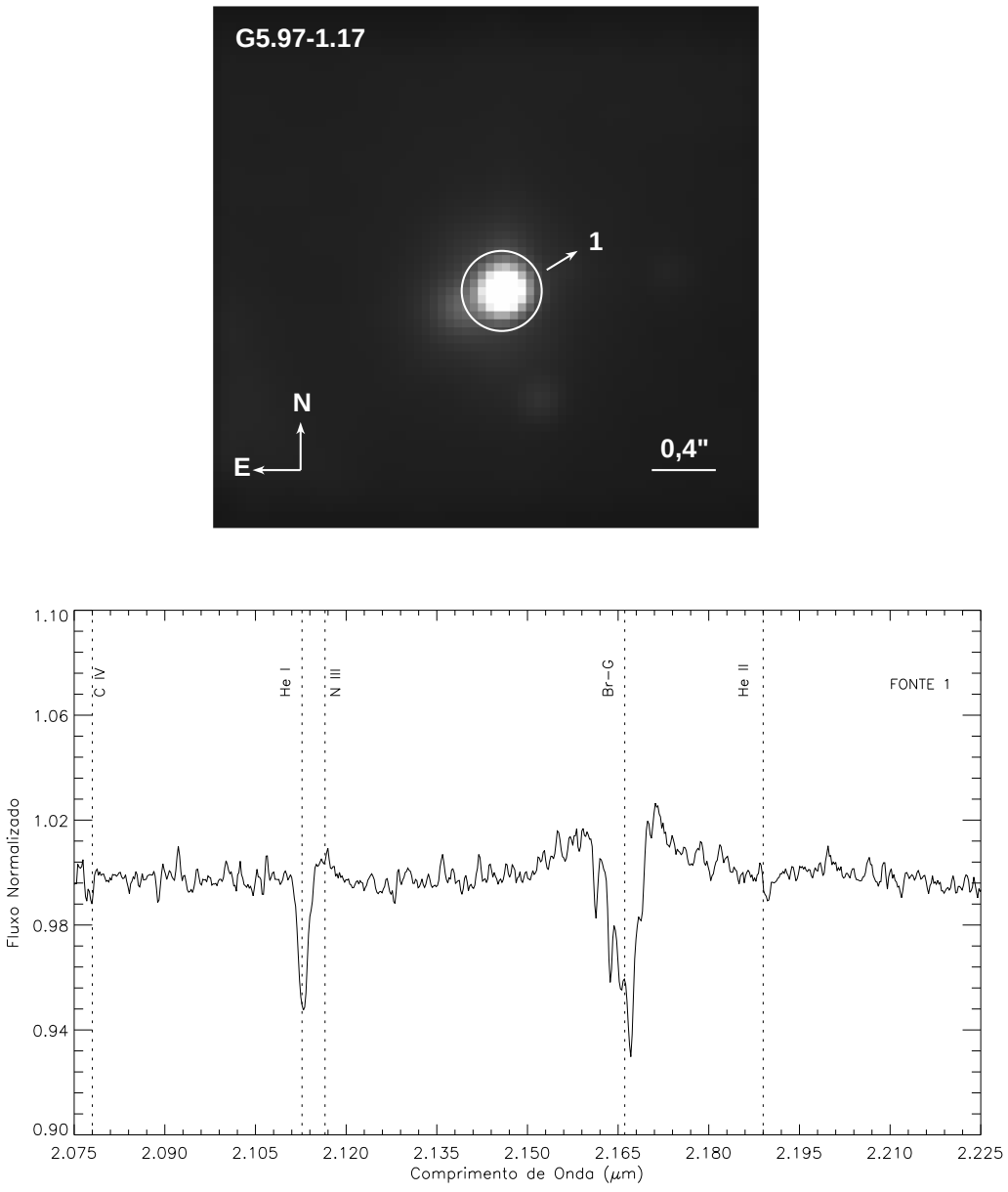
4.1.2.1 Fonte 1

A Figura 33 traz o espectro obtido para a fonte 1 que está localizada no centro da região G5.97-1.17. Nesta Figura podemos ver sua localização e seu espectro unidimensional normalizado pelo contínuo.

O espectro obtido tem uma baixa relação sinal/ruído igual à 80. Entretanto, as linhas de Brγ (2,166 μm), He I (2,1127 μm) e N III (2,115 μm) são facilmente detectadas, sendo que a primeira e a segunda linhas citadas apresentaram uma forte e larga absorção e a terceira, diferentemente das demais, foi detectada com uma fraca absorção. Apenas com a presença dessas três linhas, a estrela já poderia ser classificada como uma O6, mesma classificação de Wood e Churchwell (1989b).

A linha de He II (2,1885 μm) apresenta uma detecção marginal e pela baixa relação sinal/ruído, sua confirmação é questionável. Entretanto, como essa linha foi detectada no mapa de faixa espectral (Figura 32(e)), é possível afirmar sua existência em absorção no espectro. Com este novo resultado, a classificação espectral da fonte 1 seria mais quente do que a classificação estimada por Wood e Churchwell (1989b). Por outro lado, como a linha de He I (2,1127 μm) apresenta uma forte absorção, característica não vista nas estrelas O quentes, seu tipo espectral fica confirmada como uma estrela O6. Este resultado

Figura 33 - Imagem da região G5.97 – 1.17 e espectro da fonte 1 normalizado pelo contínuo e suavizado. A imagem mostra as fontes detectadas na região. A região demarcada pelo circulo representa o local e o tamanho da abertura de extração do espectro. As linhas fotosféricas utilizadas para a classificação espectral são representadas pelas linhas verticais tracejadas.



Fonte: Autor.

:

condiz com as estimativas de Stecklum *et al.* (1998), que a classificou com uma estrela de tipo espectral O7 a partir do número de fótons ionizantes.

A diferença entre o tipo espectral estimado por esse trabalho e o encontrado por Wood e Churchwell (1989b) (B0) pode ser explicada através da baixa densidade de gás presente na região, resultando em tipos espectrais subestimados nas observações em rádio. Essa argumentação se torna viável por essa fonte ter suas linhas fotosféricas detectáveis, indicando a relativa baixa densidade do material circunstelar (ZINNECKER; YORKE, 2007; CARPENTER; SNELL; SCHLOERB; SKRUTSKIE, 1993). Assim sendo, a fonte 1 é classificada como O6.

4.1.2.2 Fonte 23

O espectro da fonte 23, apresenta apenas as linhas de Brγ, He I (2,058 μm) em absorção e emissão e por fim a linha de He I (2,11278 μm) apenas em fraca absorção, como pode ser visto na Figura 34. Essa característica indica uma componente nebular no espectro extraído, fator que provocou a diferença encontrada no mapa de faixa espectral. Como mais nenhuma linha foi observada, o tipo espectral desta fonte seria condizente com uma estrela com um tipo espectral B2. O raio de extração foi de 0,25".

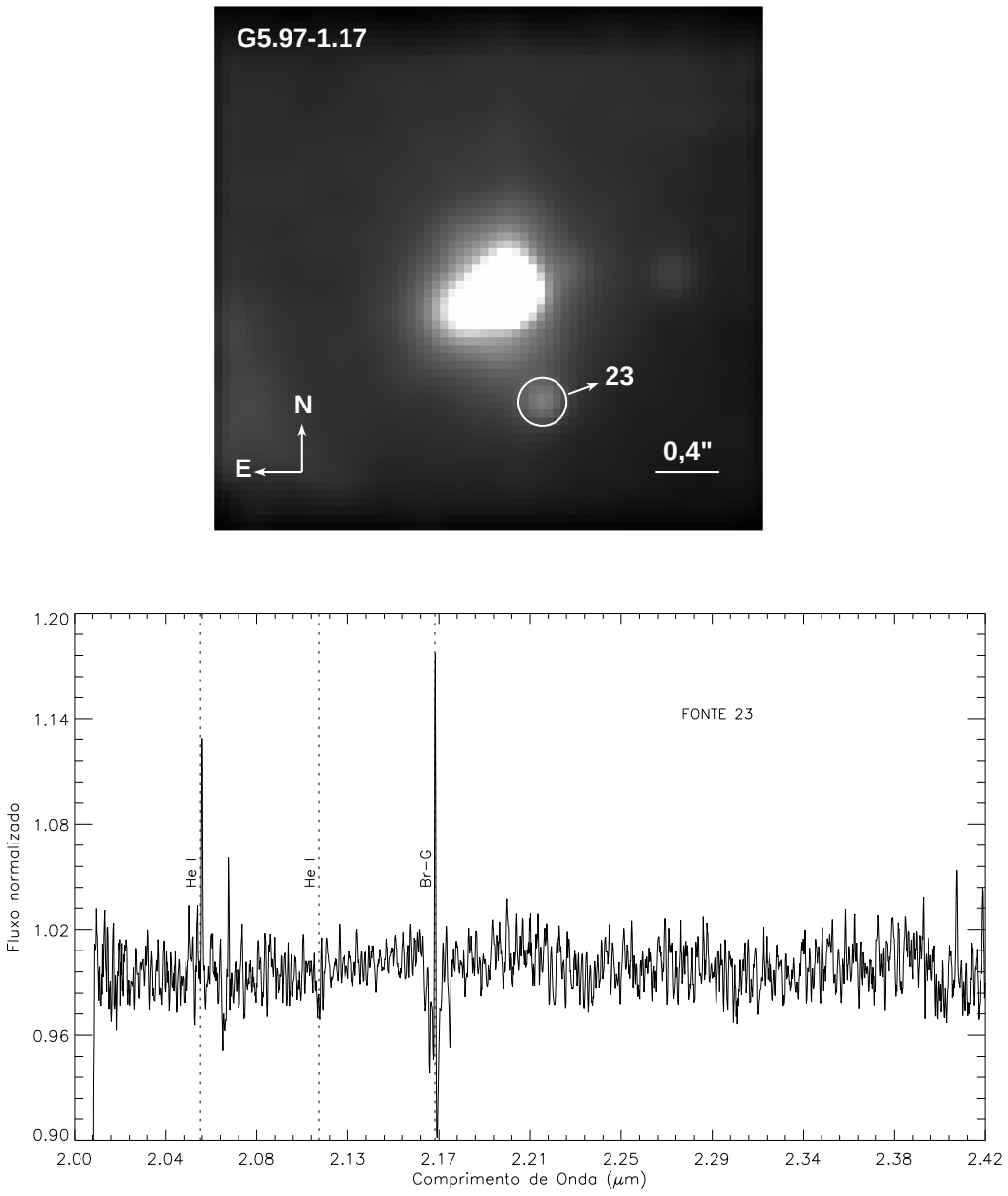
4.1.2.3 Fonte 24

Para a fonte 24, foi extraído um espectro com abertura de 0.3", mostrado na Figura 35. Como esperado pelos resultados obtidos nos mapas de linhas, apenas as linhas de Brγ, He I (2,058 μm) e He I (2,117 μm) foram observadas. Entretanto, as linhas detectadas Brγ e He I (2,117 μm) apresentam uma pequena absorção, este fato ocorre pode ser explicado pela proximidades da fonte 1. O espectro da fonte 24 pode ser visto na parte inferior da Figura 35.

Por a fonte 24 apresentar as linhas de Brγ e He I (2,058 μm) em emissão, onde estes apresentam um fluxo integrado de 2,59 $\times$ 10^{-13} erg s^{-1} cm^{-2} $\mathring{A}^{-1}$ e 1,26 $\times$ 10^{-13} erg s^{-1} cm^{-2} $\mathring{A}^{-1}$, respectivamente. Estes valores geram uma razão entre as linhas ($F_{Br\gamma}/F_{HeI}$ de 0,486. Com a determinação desse valor, foi possível estimar um intervalo de temperatura para essa fonte por meio dos modelos gerados pelo *CLOUDY*, mostrado na Figura 36. O intervalo encontrado foi entre 25.000 K e 34.400 K. A estrela deve ter o tipo espectral deve ser entre O8 e B2 (MARTINS; SCHAERER; HILLIER, 2005). Porém, como não foi possível estimar o fluxo da poeira produzida apenas por essa fonte, essa classificação não pode ser mais precisa.

A Figura 36 traz informações obtidas pelos modelos do *software* de fotoionização, onde cada linha representa o valor da razão de linha utilizada. A primeira linha à esquerda tem o valor de 0,1 e a última linha 0,6. A linha vermelha traz o valor para a razão de linha encontrada para a região. Como os valores se repetem para diversas combinações de

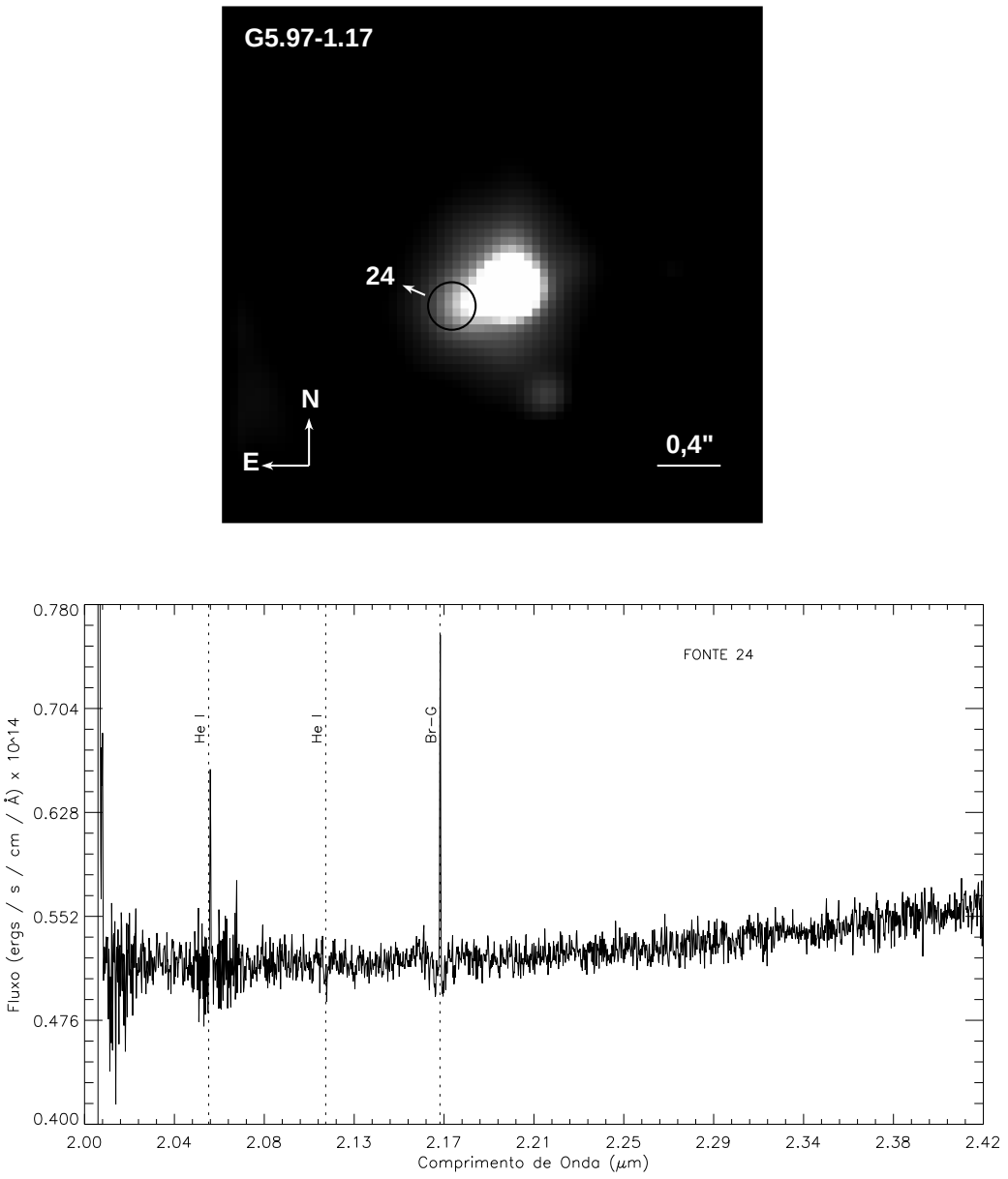
Figura 34 - Imagem da região G5.97 – 1.17 e espectro da fonte 23 normalizado pelo contínuo. A região demarcada pelo circulo representa o local de onde foi extraído o espectro da fonte 24 e o tamanho da abertura de extração do espectro. As linhas detectadas são representadas pelas linhas verticais tracejadas.



Fonte: Autor.

:

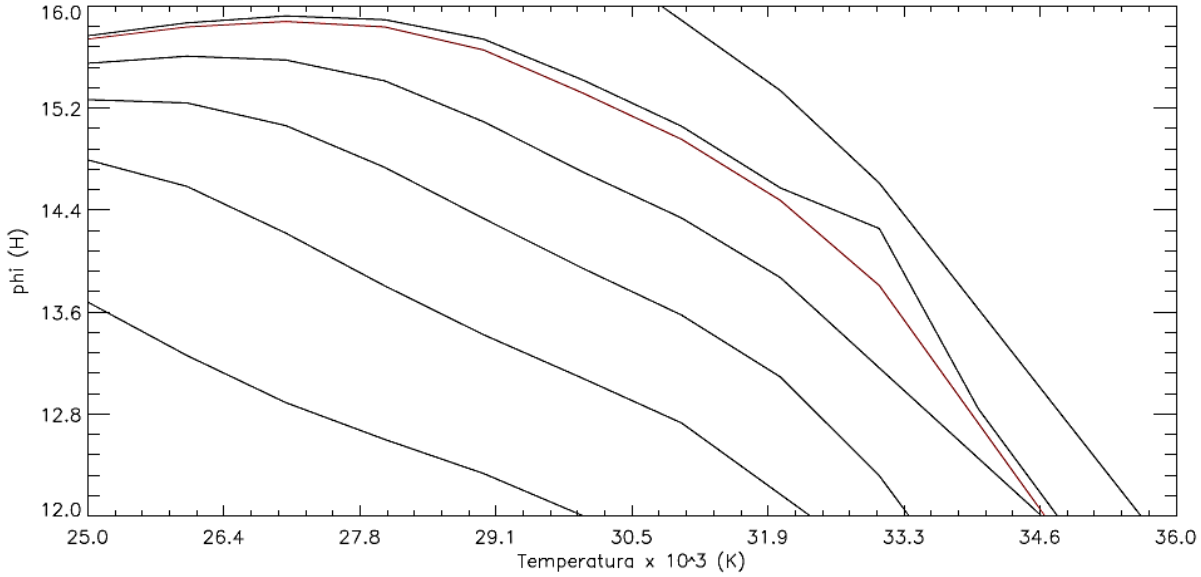
Figura 35 - Imagem da região G5.97 – 1.17 e espectro da fonte 24 calibrado em fluxo. A região demarcada pelo circulo branco representa o local de onde foi extraído o espectro da fonte 24 e o tamanho da abertura de extração do espectro. As linhas detectadas são representadas pelas linhas verticais tracejadas.



Fonte: Autor.

:

Figura 36 - Gráfico da razão entre o He I (2,058 μm) e o Brγ. A grade foi gerada pelos modelos de ionização do *CLOUDY*. Os valores dos contornos pretos são valores encontrados nas razões de linhas pelos modelos no intervalo entre 0,1 e 0,6, espaçadas em 0,1. Já o contorno em vermelho representa a razão de linha encontrada para a fonte 24.



Fonte: Autor.

:

temperatura e Φ(H), só foi possível estimar um intervalo de tipo espectral para a fonte 24. Para refinar este resultado, é necessária observação no comprimento de onda em 100 μm, pois neste comprimento de onda se obtém o pico da emissão térmica da poeira.

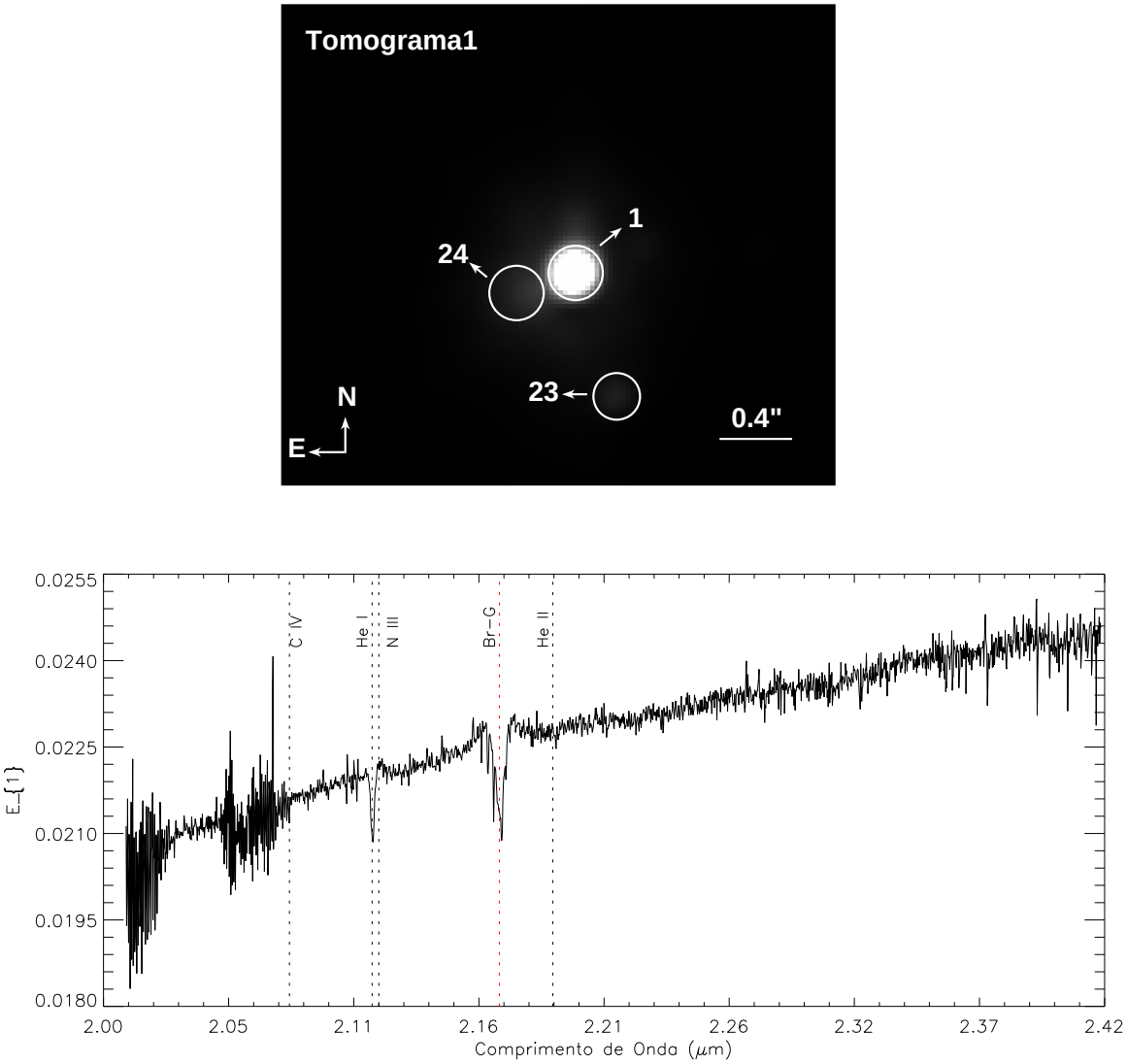
Entretanto, se a absorção das linhas detectadas em Brγ e He I (2,117 μm) não for explicado pela proximidades da fonte 1, esta fonte pode ser classificada espectralmente como uma estrela B2, resultado dentro do intervalo obtido usando o *CLOUDY*.

4.1.3 PCA

O PCA foi realizado para o cubo de dados correspondente à região G5.97-1.17. Apenas os 5 primeiros autovalores foram usados nas análises. Para os autovalores maiores que 5, o ruído domina os auto espectros, o que impossibilita seu uso.

A Figura 37 apresenta o primeiro tomograma e seu primeiro auto espectro. O primeiro autovalor representa mais que 99% da variância do cubo de dados. Seu auto espectro apresenta correlações com as linhas de Brγ, He I (2.1227 μm), He II (2.1885 μm) e N III (2.1255 μm), sendo todas estas linhas de componentes largas. Isso pode indica que essas linhas são provenientes da fotosfera estelar. Neste caso, a fonte está localizada na área com maior intensidade, área correlacionada (em emissão), do tomograma associado. Esse fato confirma os resultados da espectroscopia, sendo a fonte 1 a fonte originária de tais linhas. Uma pequena extensão em correlação foi notada à leste da fonte 1 no tomograma, imagem semelhante à encontrada por Stecklum *et al.* (1998), conforme discutido

Figura 37 - Tomograma 1 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G5.97-1.17. A região está toda correlacionada, sendo a região mais clara a região com maior correlação.



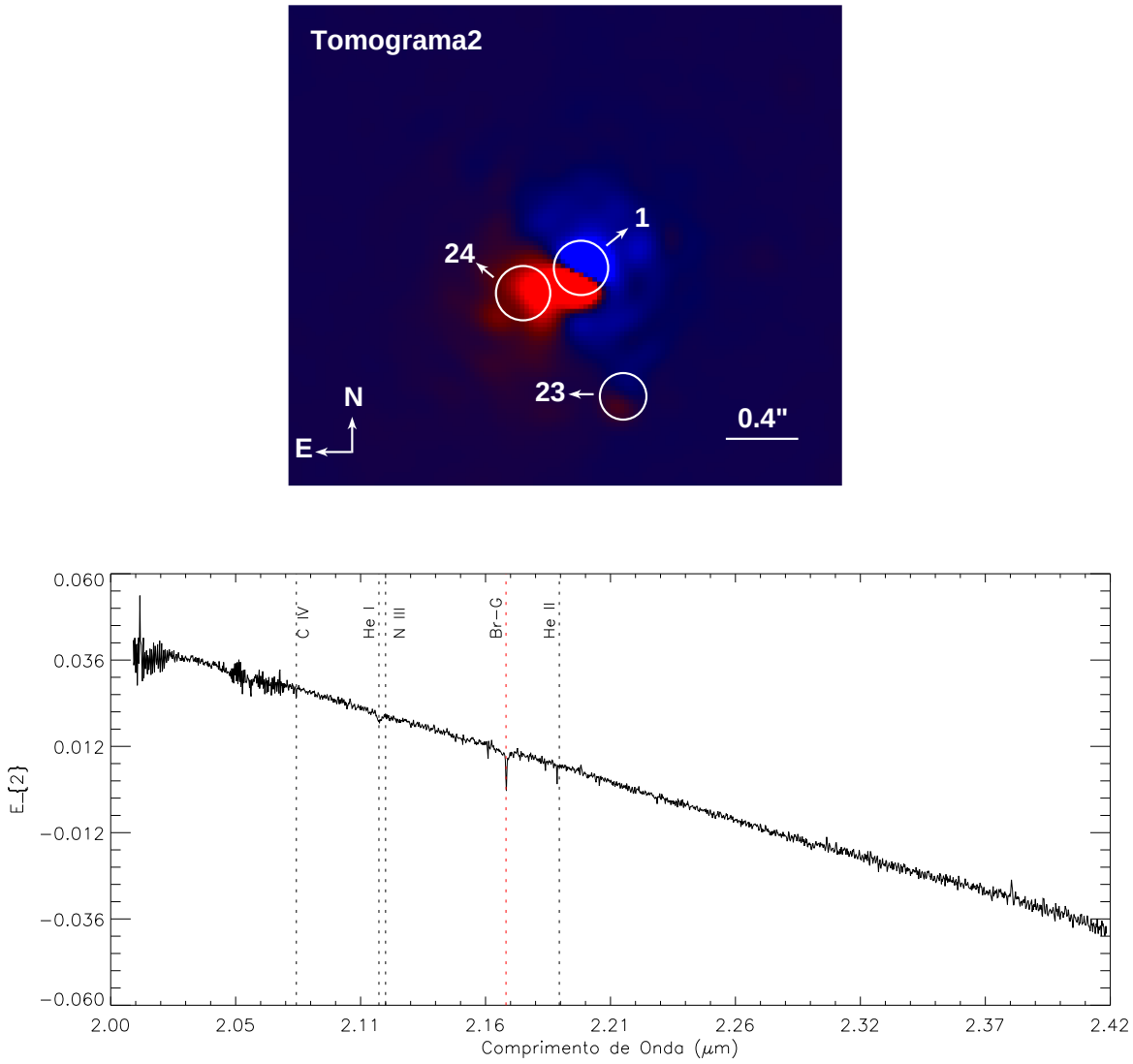
Fonte: Autor.

:

no Capítulo 1. Entretanto, conforme foi verificado nos outros métodos desse trabalho, essa estrutura aparenta ser outro objeto, nomeada como fonte 24. A fonte 23 é marginalmente detectada no tomograma. Isso confirma que a fonte 1 seria o objeto ionizante para esse campo de estudo. As demais correlações e anti-correlações são referentes ao ruído presente e às influências das linhas telúricas que não foram totalmente removidas no processo de redução dos dados.

O tomograma 2 com seu respectivo auto espectro pode visto na Figura 38 e representa aproximadamente 0,3% da variância do cubo de dados. O segundo auto espectro apresenta correlação com os comprimentos de ondas menores e uma anti-correlação com os comprimentos de onda maiores, sendo em 2,24 μm inversão entre os dois regimes. Este comportamento também foi verificado por Menezes, Steiner e Ricci (2014) em galáxias

Figura 38 - Tomograma 2 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G5.97-1.17. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas.



Fonte: Autor.

:

de núcleo ativos (AGNs), e estes autores concluem que este comportamento nos auto espectros estabelece um diferencial entre espectros mais avermelhados e espectros mais azulados no cubo de dados. Essa característica é interpretada como a emissão térmica de gás e poeira que circundam as fontes. Um ponto importante a ser observado é o comportamento de todas as linhas fotosféricas no auto espectro; todas estão correlacionada. Nenhuma evidência das demais fontes foi encontrada nesse autovalor. Outro ponto interessante é a confirmação da presença da linha de He II (2.1885 μm) e, consequentemente, o tipo espectral estimado na espectroscopia.

Já o autovalor 3 é essencialmente ruído nos extremos do auto espectro, onde era esperado as informações para este autovalor. Como não pode ser analisado não será apresentado. Esse autovalor representa 0.011125% da variância dos dados.

O auto espectro e tomograma 4 (Figura 39) têm uma significância menor que 0,003%. No auto espectro vemos que a faixa intermediária do contínuo está anti-correlacionada e os extremos estão correlacionados. Entretanto, as linhas de Brγ e He I (2.1227 μm) apresentam anti-correlação e correlação na representação do auto espectro. Essa característica distingue a emissão nebular e fotosféricas para cada fonte presente. As linhas de Brγ e He I (2.1227 μm) e o contínuo anti-correlacionados são representados no tomograma pela região anti-correlacionada, na mesma posição da fonte 1. Já as linhas de Brγ e He I (2.1227 μm) e o contínuo correlacionados no auto espectro são associados pela regiões correlacionadas no tomograma, mesma localidade da fonte 24. Outro fato que deve ser mencionado é a existência de uma possível extensão da fonte 24 abaixo da fonte 1, que deve ser associado ao gás circunstelar. Provavelmente esse é o gás remanescente que está obscurecendo a fonte e que deve contribuir no avermelhamento na fonte 1, como foi visto no segundo autovalor. Essencialmente, o tomograma 4 apresenta a componente nebular presente no cubo de dados original, indicando inclusive sua distribuição espacial

O tomograma 5 e seu respectivo auto espectro são apresentado na Figura 40. Este autovalor é, em sua maioria, dominado por ruído, sendo a única informação vista a anti-correlação do tomograma que está associada às linhas de Brγ e He I (2,058 μm). Estas linhas estão relacionadas a fonte 1 e devem representar a ionização da nebulosa nas suas proximidades. Este autovalor representa 0,000745% da significância do cubo de dados.

4.1.4 Discussão dos resultados

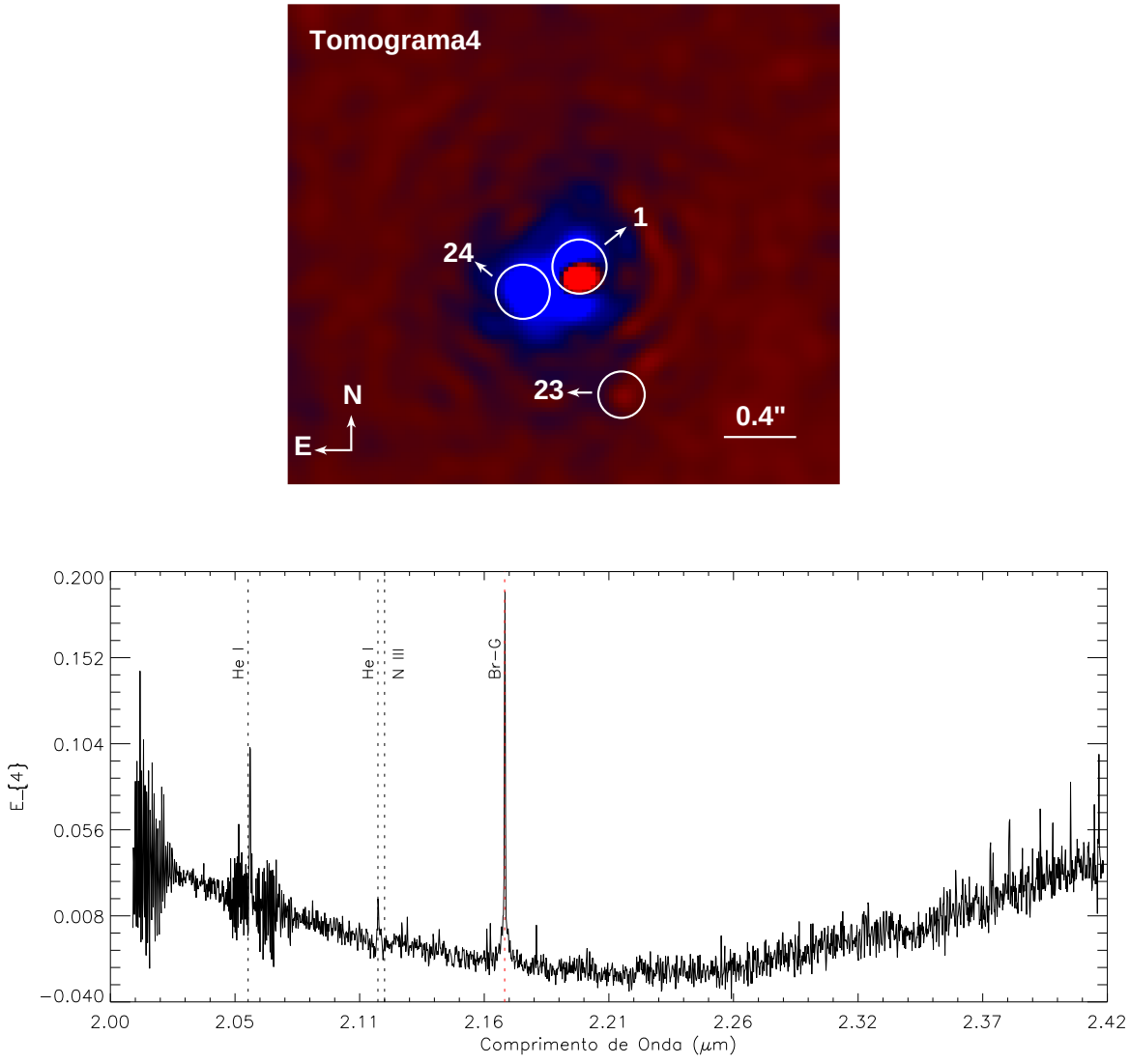
A partir das observações no infravermelho, com o espectrógrafo NIFS, foi possível fazer uma análise da região G5.97-1.17, localizada na Nebulosa da Lagoa. Com o campo de visada de 3"× 3", foram detectados três objetos.

O objeto mais intenso, fonte 1, está localizado no centro do campo e é, provavelmente, o objeto de maior massa e a principal fonte ionizante da região UCHII, de acordo com as análises apresentadas nas seções anteriores. Ele deve estar na fase final de sua formação, por isso sua fotosfera já é acessível, por causa da ação dos ventos e da sua intensa radiação, que dissiparam o gás circunstelar o suficiente, para detectar as linhas fotosféricas. Este objeto apresenta um tipo espectral compatível com o de uma estrela O6 e pelas características encontradas, esta fonte não deve ser considerada como uma *Proplyds* como sugerido por Stecklum *et al.* (1998). Entretanto, o gás ainda não foi totalmente dissipado, principalmente na região próxima à fonte 24, como os resultados da tomografia PCA indicam.

O segundo objeto está localizado à Leste da fonte 1 e foi nomeado fonte 24. Este objeto apresenta um tipo espectral entre O8 e B2, conforme foi obtido pelo *CLOUDY*, sendo fortemente obscurecida pelo material circunstelar, conforme observado pelo PCA, caso confirme que o objeto seja puntiforme.

Por fim, o último objeto detectado, fonte 23, está localizado na parte Sul do

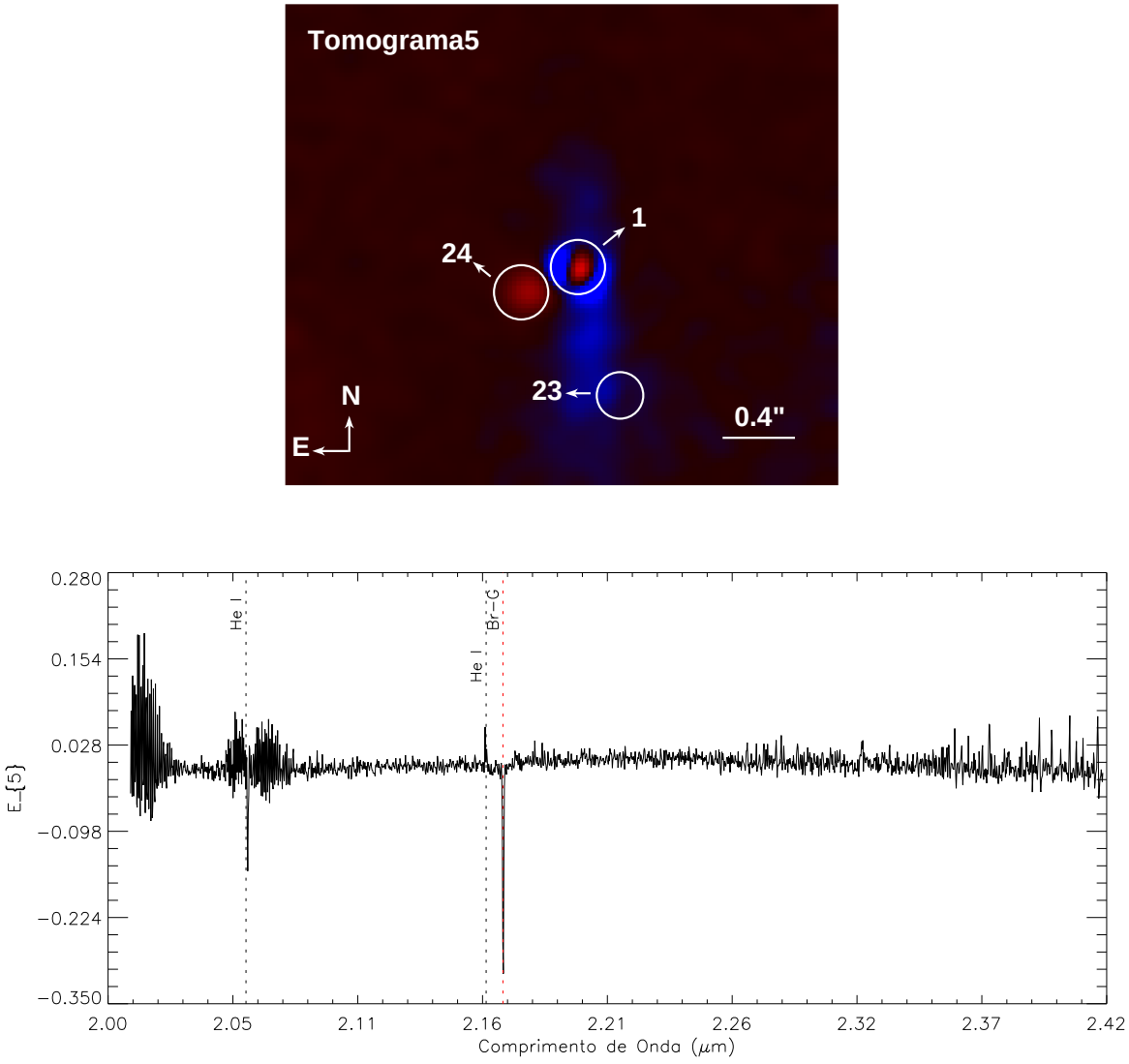
Figura 39 - Tomograma 4 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G5.97-1.17. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas.



Fonte: Autor.

:

Figura 40 - Tomograma 5 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G5.97-1.17. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas.



Fonte: Autor.

:

campo do NIFS. O espectro desta estrela condiz com a classificação espectral de uma estrela B2.

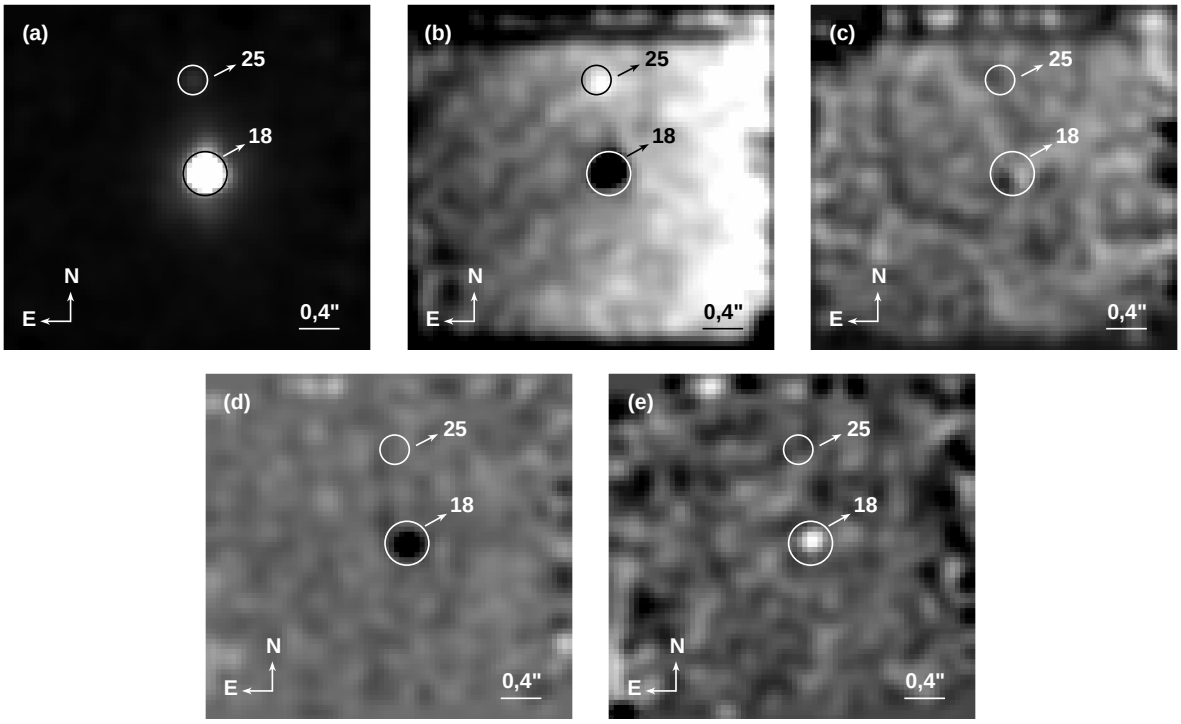
4.2 Região G77.965-0.006A

4.2.1 Mapas de faixa espectral

A Figura 41 mostra os mapas obtidos para a região G77.965-0.006A. Nela, podemos ver ver os mapas de: contínuo, Brγ (2,166 μm), He I (2,1127 μm), He II (2,1885 μm) e He I (2,058 μm), respectivamente, como descrito no Capítulo 3. Todos os mapas de faixa espectral tiveram o contínuo removido, exceto o mapa do contínuo.

Observando o mapa do contínuo, Figura 41(a), duas fontes são detectadas, a fonte 18 e a 25. A fonte 18 é vista em todos os mapas exceto o mapa de He I (2,058 μm) devido ao baixo sinal/ruído da imagem. Pela presença nos mapas Figura 41(b) e Figura 41(d) é possível sugerir que a fonte 18 é a fonte principal e mais quente do campo. A detecção na imagem de He I (2,1127 μm), indica que a fonte 18 pode ser classificada como mais quente que uma estrela B quente. A emissão detectada no mapa de He II (2,1885 μm) é um ruído, conforme será mostrado pelos demais métodos.

Figura 41 - Mapas de faixa espectral da região G77.965-0.006A, onde são apresentados: o mapa do contínuo (a), das linhas de Brγ (b), do He I (2,058 μm) (c), do He I (2,1127 μm) (d) e do He II (2,1885 μm) (e). Os intervalos do comprimento de onda de cada mapa são descritos na Seção 3.1. Cada lado do pixel equivale a 0,05"x0,05" e círculos e os números presentes em cada mapa indicam a localização e a nomenclatura, respectivamente, adotadas para cada fonte encontrada.



Fonte: Autor.

:

A fonte 25 é detectada no mapa de Brγ e sua não detecção nos mapas de He I (2,1127 μm) e He II (2,1885 μm) indica que essa estrela deve ser uma estrela de baixa massa ou massa intermediária.

Dentre todos os mapas, o que chama mais atenção é o mapa de Brγ, Figura 41(b), no qual é possível ver uma emissão estendida produzida pelo gás neutro de Hidrogênio. Ele está relacionado a um gás intra-glomerado que se localiza a oeste da fonte.

4.2.2 Espectroscopia unidimensional de fonte puntiforme

4.2.2.1 Fonte 18

O espectro da fonte 18 foi obtido com aberturas de extração de 0,5", mostrado na Figura 42. Nele uma forte absorção das linhas de Brγ e He I (2,1127 μm), conforme visto nos mapas de faixa espectral (Figura 41(b)). A linha de N III (2,155 μm) não foi detectada, o que restringe seu tipo espectral a um intervalo entre O9 e B2. Um refinamento desta classificação pode ser obtido com observações na banda H, pois teríamos mais linhas para comparação. A componente fina em emissão na linha de Brγ é proveniente de contaminação nebular no espectro.

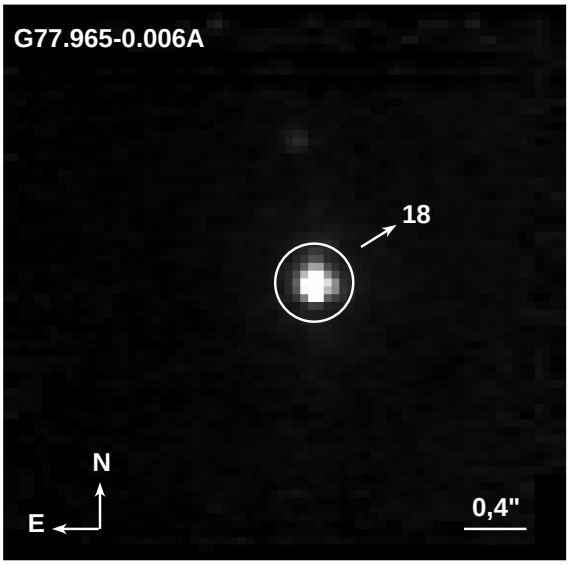
O valor encontrado para a classificação espectral se mostrou condizente com os trabalhos de Odenwald e Schwartz (1993), Le Duigou e Knodlseder (2002) e Kurtz, Watson, Hofner e Otte (1999) que obtiveram um valor entre O9.5 e B1, se considerarmos a fonte 18 como a fonte ionizante da região. Entretanto, Alvarez *et al.* (2004) sugerem o tipo espectral O8 baseando no diagrama cor-cor da região. Para sugerir esse tipo espectral, a linha de N III deveria ter sido detectada nos espectros deste trabalho, o que não aconteceu. Dessa forma, a fonte ionizante desta região deve ser mais fria do que sugerida por Alvarez *et al.* (2004).

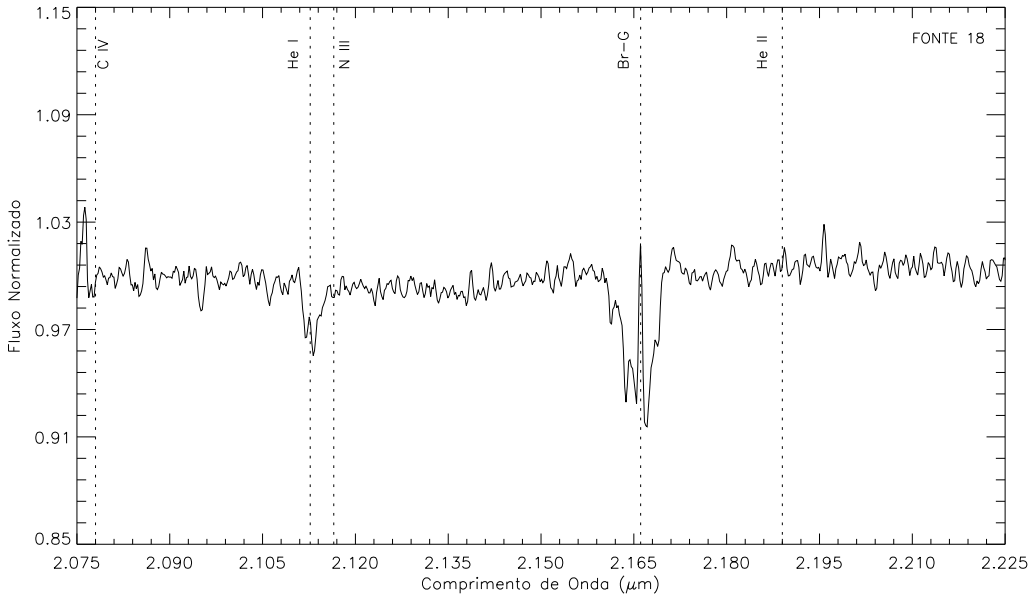
4.2.2.2 Fonte 25

Já para a fonte 25, foi extraído um espectro com abertura de 0.3"para evitar excesso de contaminação nebular no espectro. Como esperado pelas observações dos mapas de faixas espectrais, apenas as linhas de Brγ e He I (2,058 μm) em emissão foram observadas. A localização e espectro da fonte 25 podem ser vistos na Figura 43.

Para minimizar a contaminação nebular no espectro da fonte 25 foi subtraído um espectro nebular com mesma abertura de seu espectro. A posição escolhida está à mesma distância da fonte 18, porém, ao sul do campo. Ao final da subtração o espectro obtido foi apenas ruído. A explicação para isso é o fato de a razão sinal/ruído do espectro original ser baixa para a operação de subtração realizada ou que ela seja uma intensificação da emissão nebular na visada. Assim, nenhuma informação pode ser obtida desta fonte.

Figura 42 - Espectro normalizado pelo contínuo da fonte 18 que está localizada ao centro da região G77.965-0.006A. A região demarcada pelo círculo branco representa o local de onde foi extraído o espectro da fonte 18 e o tamanho da abertura de extração do espectro. No espectro, as linhas utilizadas para a classificação espectral são indicadas pelas linhas verticais tracejadas.

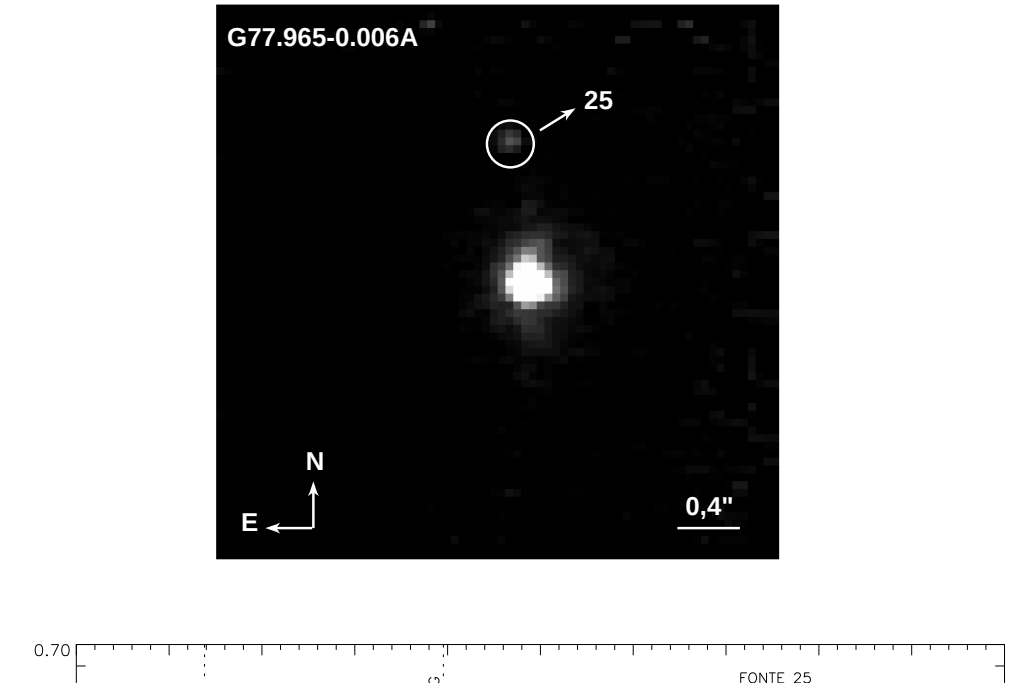




Fonte: Autor.

:

Figura 43 - Localização da fonte 25 na região G77.965-0.006A e seu espectro calibrado em fluxo. A região demarcada pelo círculo branco representa o local de onde foi extraído o espectro da fonte 25 e o tamanho da abertura de extração do espectro. As linhas utilizadas para a classificação espectral são mostrada pelas linhas verticais tracejadas.



Fonte: Autor.

:

4.2.3 PCA

Após o processamento do cubo de dados para a região G77.965-0.006A, como descrito na seção 3.3.2, foram obtidas as significâncias para cada autovalor. Por meio da análise dos autovalores, foi decidido usar apenas os 3 primeiros autovetores, pois nos autovalores posteriores, o ruído predomina sobre o sinal.

No primeiro autovalor, Figura 44, notamos que o auto espectro apresenta uma baixa correlação para a linha de Brγ, separando a componente fina em emissão vista na Figura 42. Já a linha de He I (2,1127 μm) apresenta uma correlação menos intensa comparando com o contínuo visto no auto espectro. Para esse caso, a fonte originária dessas linhas está localizada na área mais intensa do tomograma associado. Este fato confirma que estas linhas são produzidas pela fonte 18. Considerando-se que o auto espectro corresponde a mais que 99% do espectro, é possível afirmar que o tipo espectral adequado para a fonte esteja presente no intervalo entre O9 e B2. Uma linha desconhecida em 2,095 μm apresenta uma baixa correlação, assim como a linha de Brγ. A linha em 2,095 μm é um artefato intensificado durante o processamento do PCA. Assim, para todos os tomogramas analisados, iremos desconsiderar essa linha na discussão e interpretação dos dados. As demais correlações presentes são referentes a linhas telúricas que não foram totalmente removidas nos processos de redução de dados. Esse autovalor explica 99,65% da variância do cubo de dados.

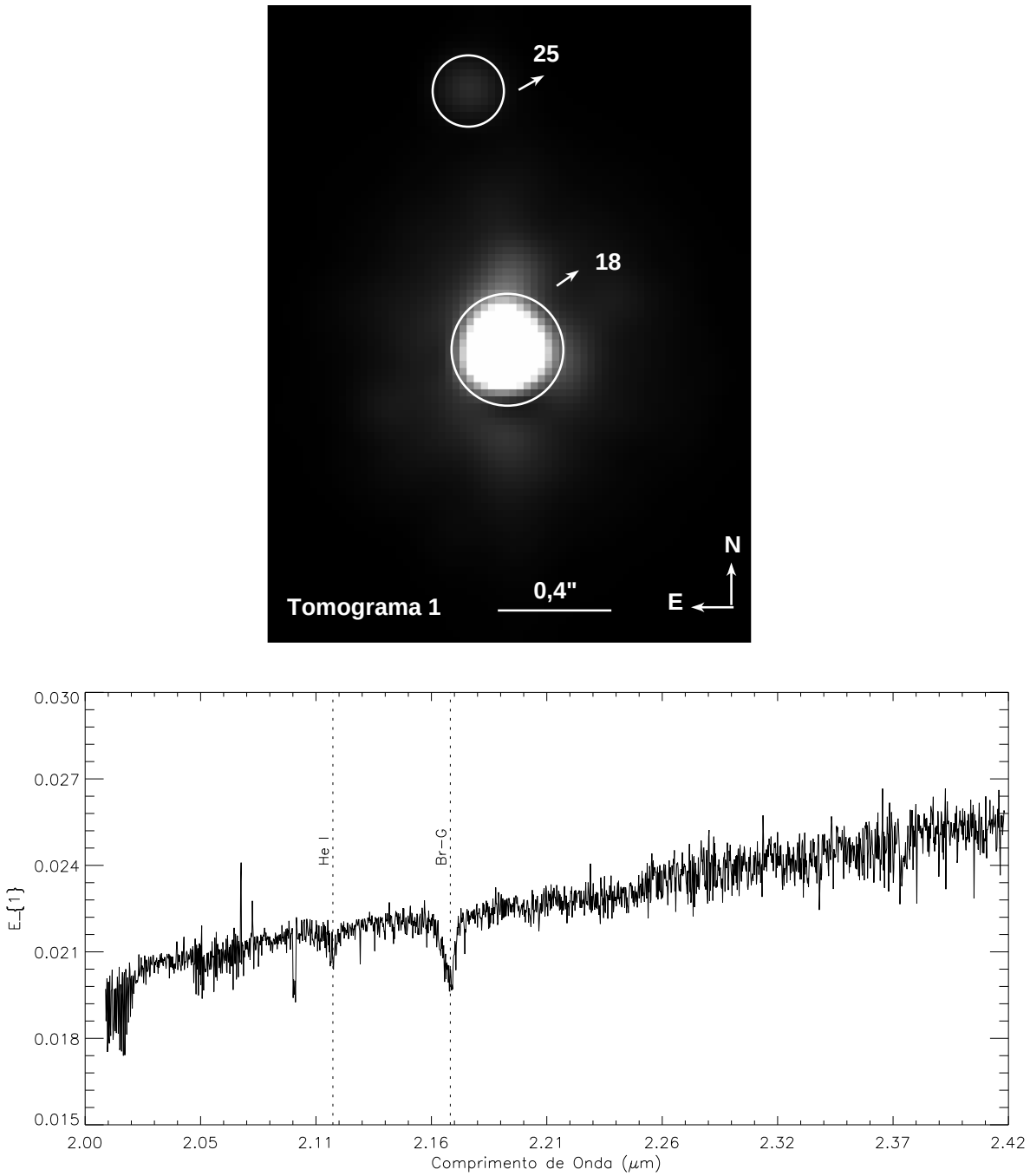
O autovalor 2 (Figura 45) representa 0,12% da significância do cubo de dados. O segundo auto espectro apresenta correlação com os comprimentos de onda mais curtos do espectro e uma anti-correlação com os comprimentos de onda maiores do mesmo. Esta característica foi verificada por Menezes, Steiner e Ricci (2014), em seus objetos, que concluíram que esse comportamento nos auto espectros estabelece um diferencial entre a parte avermelhada e azulada do espectro no cubo de dados; nos dois extremos do auto espectro encontram-se as maiores correlações e anti-correlações. O motivo para este diferencial é o avermelhamento existente na região, onde a parte anti-correlacionada que tem seu início em 2,25 μm parece estar relacionada a este fenômeno. Nenhuma linha foi detectada, talvez pelo alto de ruído já presente no auto espectro.

Já o autovalor 3 (Figura 46) apresenta um perfil de correlação e anti-correlação no tomograma, além de uma emissão estendida à sudoeste, que pode estar relacionada a um disco de acreção. Porém nenhuma informação pode ser obtida pois, o auto espectro é dominado por ruído. Esse autovalor representa 0,01% da variância dos dados.

4.2.4 Discussão dos resultados

Duas fontes foram detectadas no campo de visada do apontamento da região G77.965-0.006A. O primeiro objeto, fonte 18, é a estrela referência nos trabalhos Odenwald e Schwartz (1993), Le Duigou e Knodlseder (2002), Kurtz, Watson, Hofner e Otte (1999)

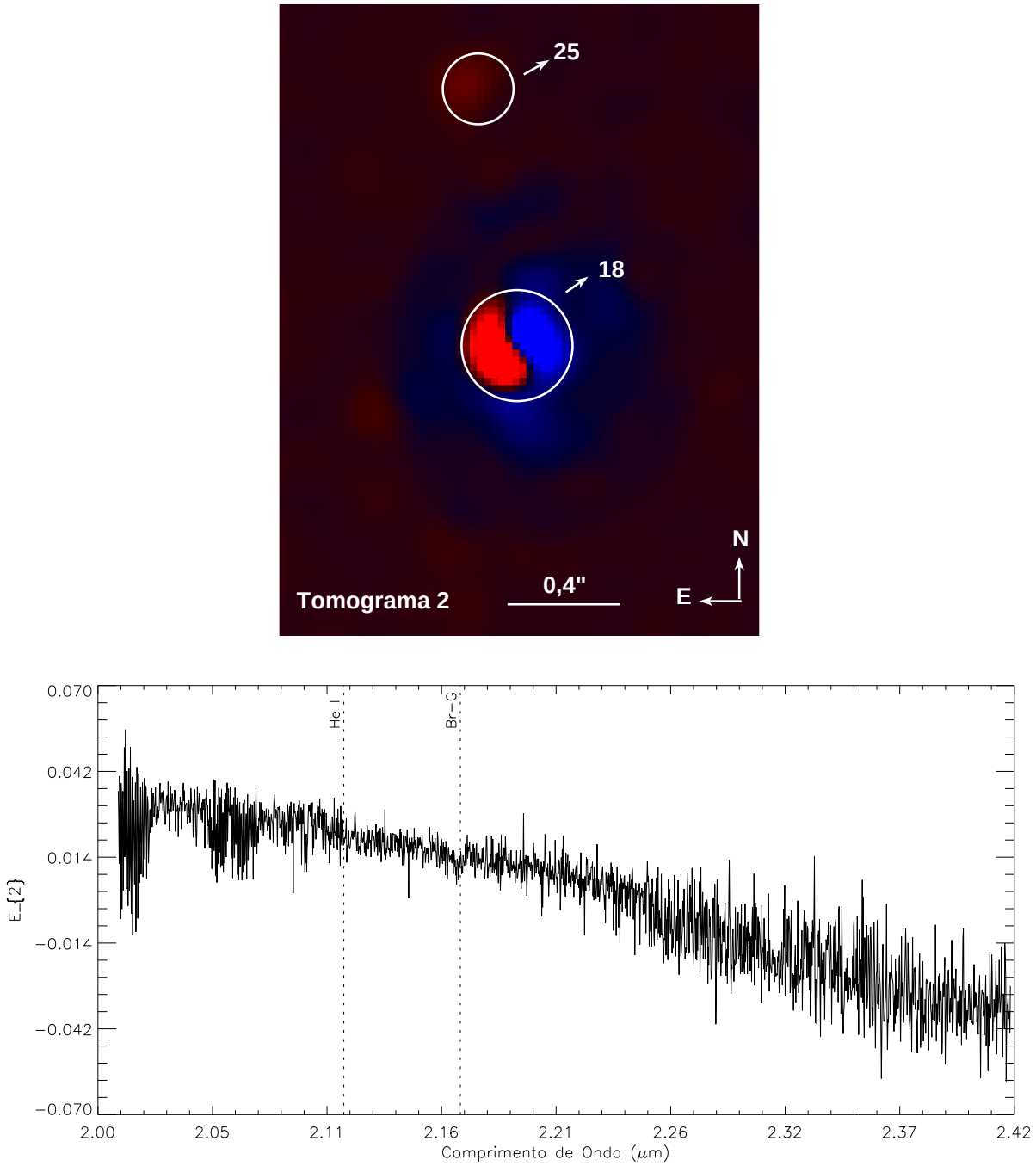
Figura 44 - Tomograma 1 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G77.965-0.006A. O campo está todo correlacionado, sendo a região mais clara a de maior correlação.



Fonte: Autor.

:

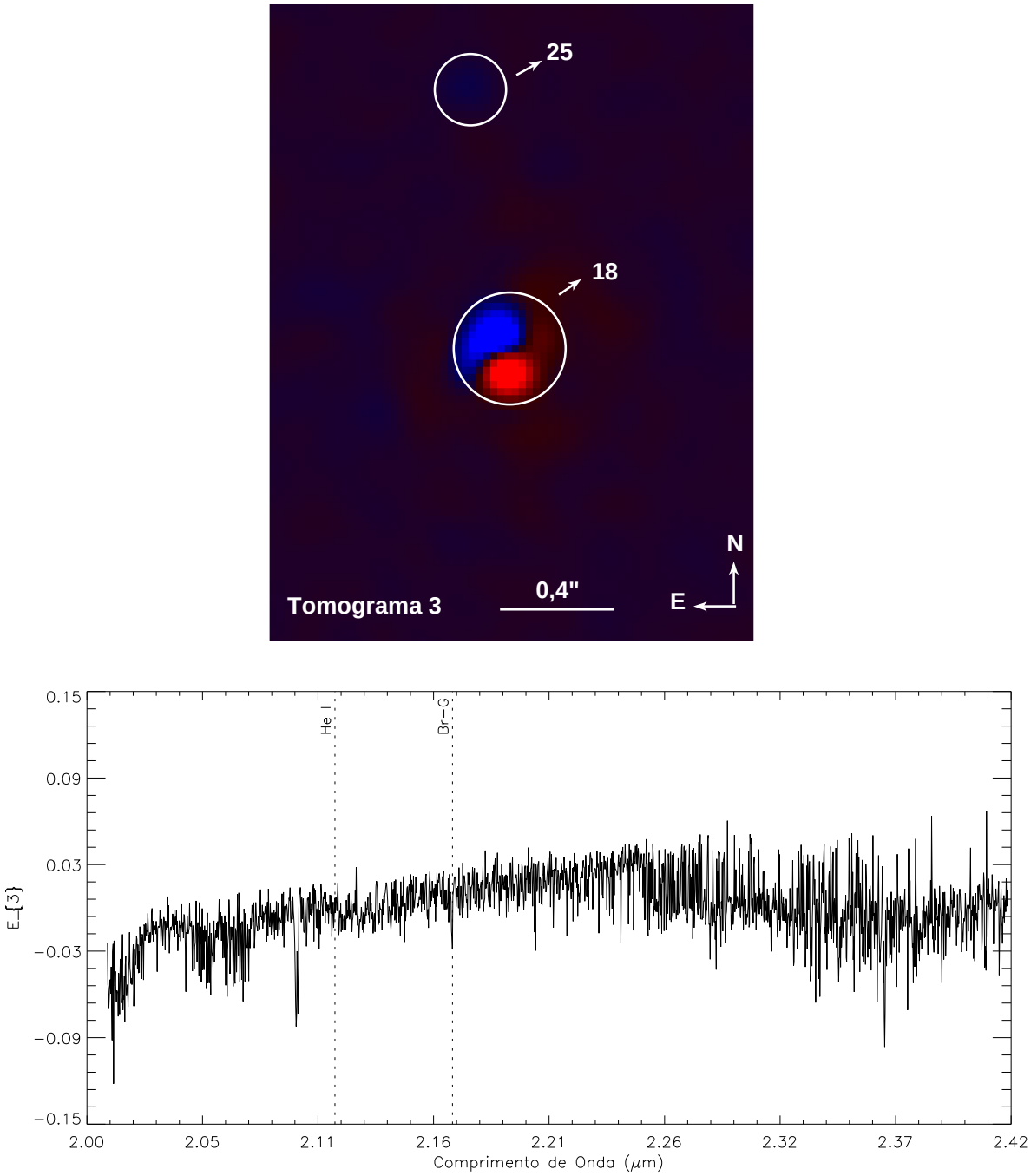
Figura 45 - Tomograma 2 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G77.965-0.006A. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho.



Fonte: Autor.

:

Figura 46 - Tomograma 3 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G77.965-0.006A.As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho.



Fonte: Autor.

:

e neste estudo ela teve seu tipo espectral estimado entre O9 e B2 por todos os métodos utilizados. Este resultado está em conformidade com o tipo espectral obtido pelas observações em rádio e em infravermelho próximo na literatura, como mostrado na seção 1.5. Assim, essa estrela é indicada a ser a fonte mais quente desta região. Porém, com apenas a detecção das linhas de He I e Brγ não foi possível definir com precisão o seu tipo espectral. Para refinar estes resultados, observações complementares são necessárias, como por exemplo a banda H. A existência de um disco foi apontada pelo terceiro autovalor produzido pela tomografia PCA, contudo devido ao alto ruído presente neste autovalor não foi possível estabelecer sua assinatura.

O segundo objeto, fonte 25, não foi detectado pelo PCA, indicando este objeto apresenta uma fraca emissão e nenhuma informação foi obtida para essa fonte.

4.3 Região G77.965-0.006B

Três objetos foram detectados na região G77.965-0.006B, onde a fonte 19 coincide com a estrela 7 de Alvarez *et al.* (2004), a fonte 20 é citada por Hanson, Luhman e Rieke (2002) e a fonte 21 não foi detectada em trabalhos anteriores. A pequena população de objetos no campo da região G77.965-0.006B será estudada nas próximas subseções.

4.3.1 Mapas de faixas espectrais

A Figura 47 traz os mapas obtidos para a região G77.965-0.006B com os 3 objetos detectados, as fontes 19, 20 e 21.

Os objetos 19 e 20 são as fontes mais intensas dessa região, como é visto no mapa do contínuo. Elas estão presentes em quase todos os mapas, exceto na Figura 47(d) onde nenhuma fonte foi detectada e Figura 47(c) onde é observada apenas a fonte 19. A fonte 21 só é detectada no mapa do contínuo, sugerindo uma natureza mais fria que os demais objetos.

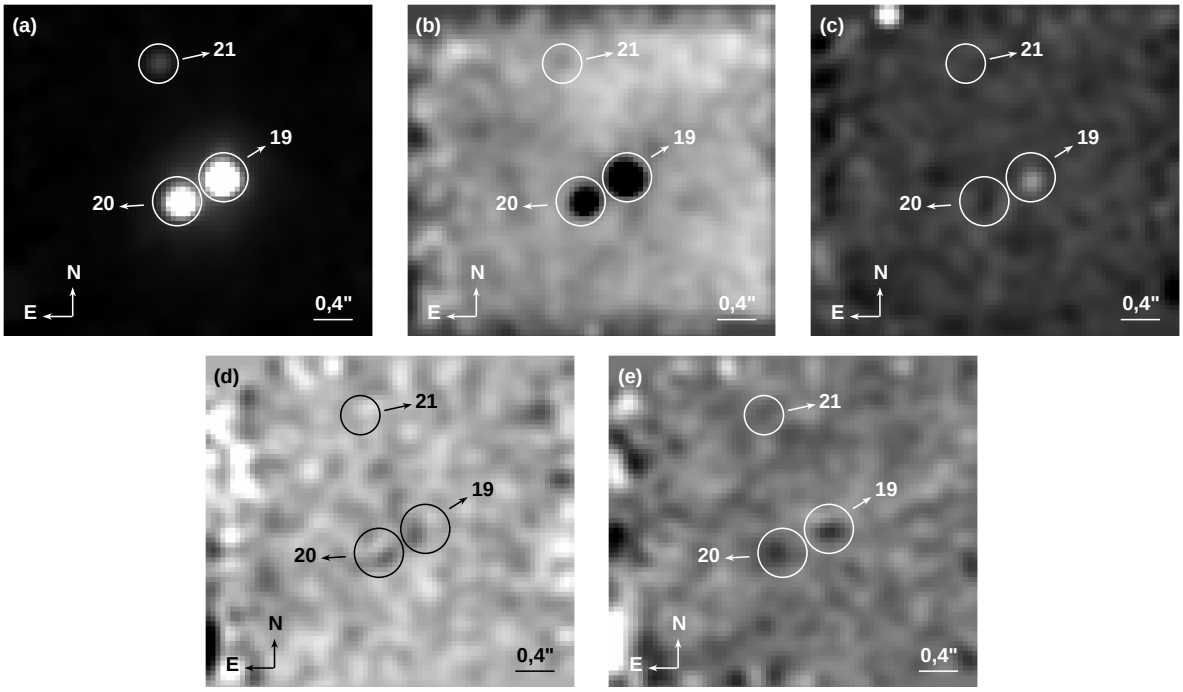
O objeto 19 apresenta absorção em, Brγ e He II e o tipo espectral sugerido é mais quente que o de uma estrela B2, mesmo resultado encontrado por Alvarez *et al.* (2004) para a estrela mais quente. O que refinará a classificação será a detecção das linhas de N III e C IV na espectroscopia ou no PCA. Nenhuma conclusão foi obtida para a fonte 20.

No mapa 47(d) não foi possível estimar nenhum resultado pelo excesso de ruído existente.

4.3.2 Espectroscopia unidimensional de fonte puntiforme

Nesta subseção serão apresentados os espectros das três fontes detectadas no campo da G77.965-0.006B. Foi obtido a FWHM da PSF dos objetos 19 e 20 para checar se há contaminação entre eles em seus espectros. O valor obtido de FWHM para ambas as estrelas foi de 0,6", o que evidencia a contaminação considerando que a distância angular

Figura 47 - Mapas de faixas espectrais da região G77.965-0.006B, onde são apresentados: o mapa do contínuo (a), das linhas de Brγ (b), do He I (2,058 μm) (c), do He I (2,1127 μm) (d) e do He II em 2,1885 μm (e). Os intervalos do comprimento de onda de cada mapa são descritos na Seção 3.1. Cada pixel equivale a 0,05" de lado e os números presentes em cada mapa indicam a localização e a nomenclatura adotadas para cada fonte encontrada.



Fonte: Autor.

:

entre as fontes é de 0,4". Deste modo, a interpretação dos resultados obtidos nas subseções a seguir levará essa informação em consideração.

4.3.2.1 Fonte 19

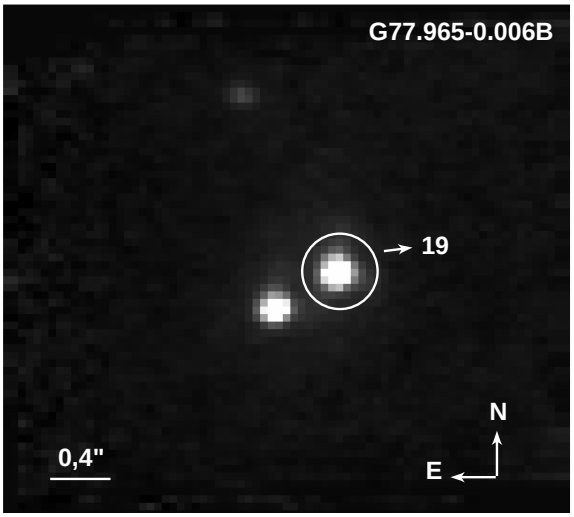
O espectro do objeto 19 é apresentado na Figura 48. No espectro, são detectadas as linhas de He I (2,1127 μm) e Brγ bem definidas e largas em absorção, que possibilitam restringir o tipo espectral em um objeto mais frio que uma estrela O6. Para que fosse mais quente, a estrela deveria apresentar a linha de N III (2,1155 μm) e a presença da linha de C IV (2,071 μm) em emissão, o que não é visto nesse caso. As linhas detectadas em emissão são oriundas da contaminação nebular nos espectros.

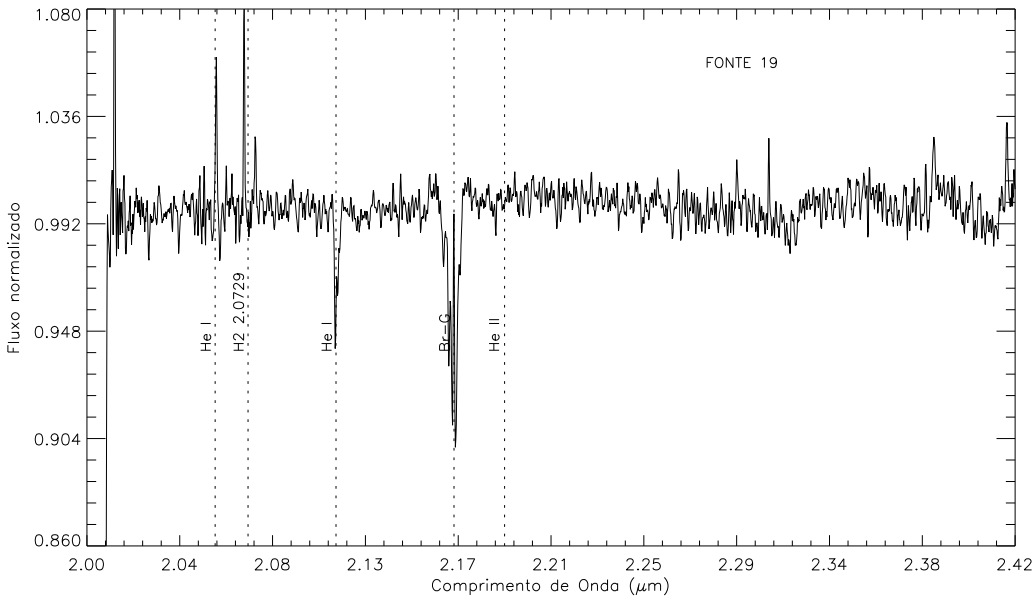
Mesmo em tipos mais frios, a linha de N III em 2,1155 μm aparece em uma fraca emissão até B0, quando não é mais detectada. Na fonte 19, essa linha não foi detectada, o que estabelece uma restrição para o tipo espectral de O9 a B2.

A confirmação do tipo espectral da fonte 19 é feita pela não detecção da linha de He II. Assim, esta fonte pode ser classificada como tipo B2.

O espectro em comprimentos de onda maiores que 2,280 μm é contaminação pela proximidade da fonte 20, já que é nesta fonte que é vista a emissão da banda de CO, como

Figura 48 - Imagem da região G77.965-0.006B com destaque para a fonte 19 e seu espectro da mesma normalizado pelo contínuo e suavizado na ordem 3. A imagem mostra as fontes detectadas na região. A região demarcada pelo círculo branco representa o local de onde foi extraído o espectro da fonte 19 e o tamanho da abertura de extração do espectro. As linhas utilizadas para a classificação espectral são indicadas pelas linhas verticais tracejadas.





Fonte: Autor.

:

será mostrado na subseção abaixo. Há também contaminação nos comprimentos menores que 2,280 μm, porém a emissão da fonte 19 é mais intensa e predomina no espectro extraído.

4.3.2.2 Fonte 20

O segundo espectro extraído na região G77.965-0.006B é visto na Figura 49. Neste espectro foi detectada uma única linha fotosférica, Brγ, que também apresenta uma componente de emissão nebular. Nenhuma outra linha fotosférica foi detectada. Assim, as linhas de Brγ, He I em aborção e a linha He II vista no mapa de faixas espectrais são da fonte 19, cuja PSF se sobrepõe à PSF da fonte 20.

Outra característica desse espectro é a presença das bandas de CO em emissão. Essa emissão é associada à presença de um disco de acreção, tanto para estrelas de baixa massa (NAJITA *et al.*, 1996) como para os objetos estelares jovens e massivos (CHANDLER; CARLSTROM; SCOVILLE, 1995; BIK; THI, 2004; BLUM *et al.*, 2004). Essa emissão é procedente do material neutro, em temperaturas entre 2000 e 5000 K, para densidades de 10^{10} cm^{-3} que está localizado no interior do disco próximo à estrela, entre 5 e 10 UA (BIK *et al.*, 2008). Pelo perfil das cabeças presentes na banda é possível estimar algumas características do disco, como ângulo de inclinação ou velocidade de rotação, conforme pode ser visto nos trabalhos Bik e Thi (2004), Blum *et al.* (2004). Um estudo mais detalhado para essa estrutura é necessária para melhores conclusões.

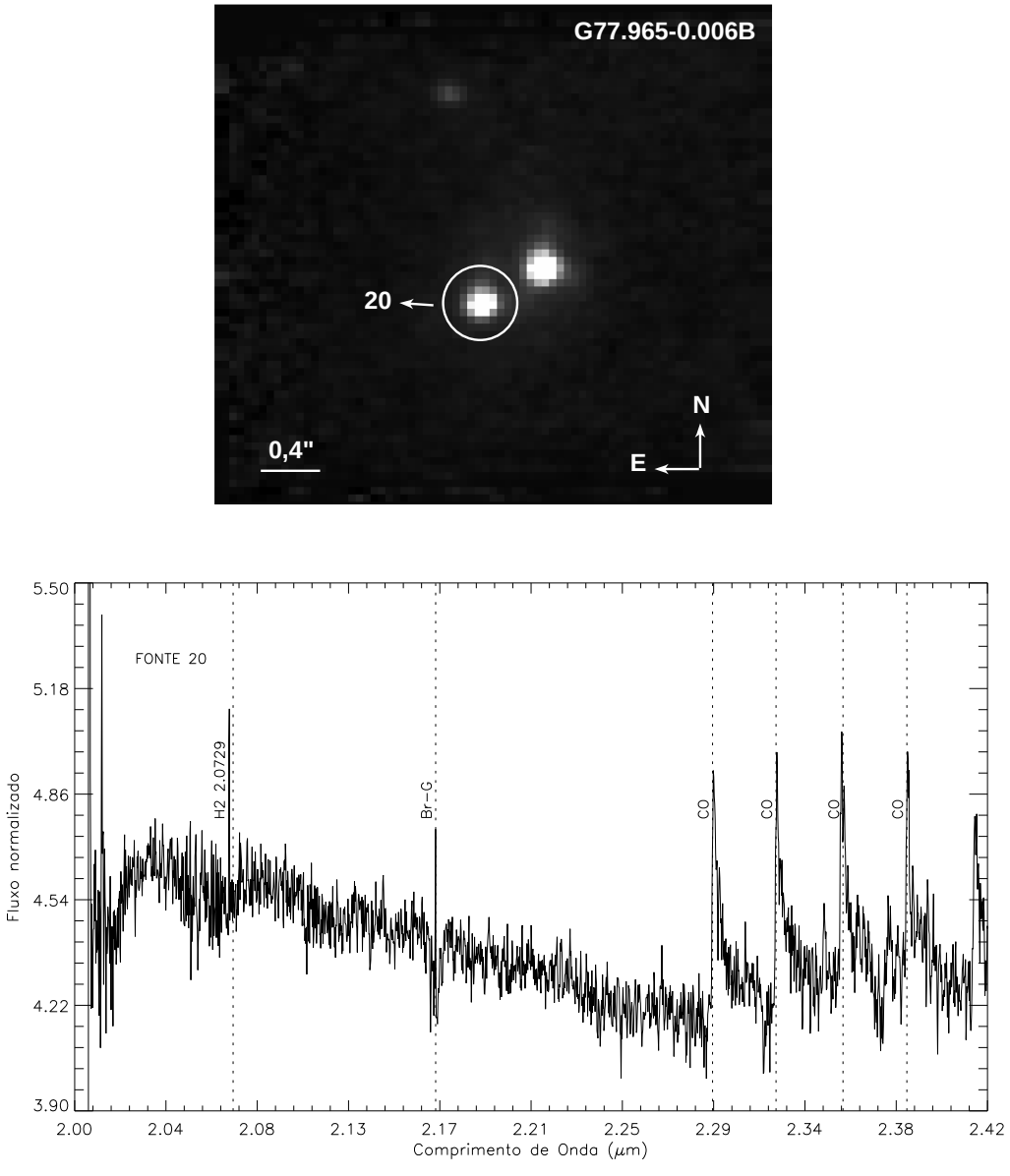
Devido à falta de detecção das linhas de He I nebulares, provavelmente pela baixa razão sinal/ruído e pela contaminação da fonte 19, não foi possível estimar o tipo espectral dessa fonte pela razão de linhas. Porém, pela presença do disco de acreção, a fonte ainda deve estar em uma das fases mais iniciais de formação e suas linhas fotosféricas ainda devem estar obscurecidas pelo gás que a envolve. Por todas essas características o objeto deve ser classificado apenas como um objeto jovem em formação.

4.3.2.3 Fonte 21

O último objeto que teve seu espectro extraído para essa região foi a fonte 21. O espectro foi extraído com abertura de 0.3"para evitar um excesso de contaminação nebular nos espectros e apenas as linhas de Brγ e He I em 2,058 μm em emissão foram observadas, conforme é mostrado na Figura 50. O fluxo para estas linhas são 4,760 $\times$ 10^{-15} erg s^{-1} cm^{-2} Å^{-1} e 1,698 $\times$ 10^{-13} erg s^{-1} cm^{-2} Å^{-1} , respectivamente. Assim, a razão calculada entre elas foi de 0,356.

Comparando com a grade obtida pelo *CLOUDY* a fonte foi estimada como sendo uma estrela com temperatura restrita entre 25000 K e 26000 K. Assim, o tipo espectral esperado para este objeto é de B1 (REMIE; LAMERS, 1982).

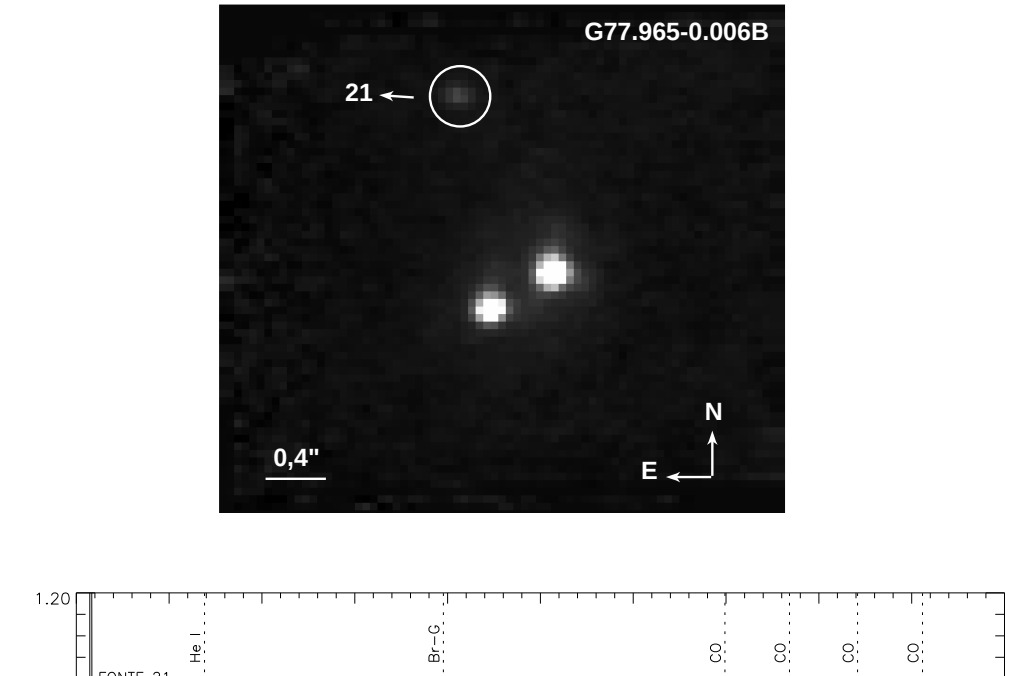
Figura 49 - Imagem da região G77.965-0.006B e espectro da fonte 20 calibrado em fluxo. A região demarcada pelo círculo branco representa o local de onde foi extraído o espectro da fonte 20 e o tamanho da abertura de extração do espectro. As linhas detectadas são indicadas pelas linhas verticais tracejadas.



Fonte: Autor.

:

Figura 50 - Localização da fonte 21 na região G77.965-0.006B e seu espectro calibrado em fluxo. A região demarcada pelo círculo branco representa o local de onde foi extraído o espectro da fonte 21 e o tamanho da abertura de extração do espectro. As linhas detectadas são indicadas pelas linhas verticais tracejadas.



Fonte: Autor.

:

4.3.3 PCA

Na análise PCA para a região G77.965-0.006B, apenas os quatro autovalores foram utilizados. Para os demais autovalores, o ruído domina o sinal impossibilitando a obtenção de qualquer informação útil.

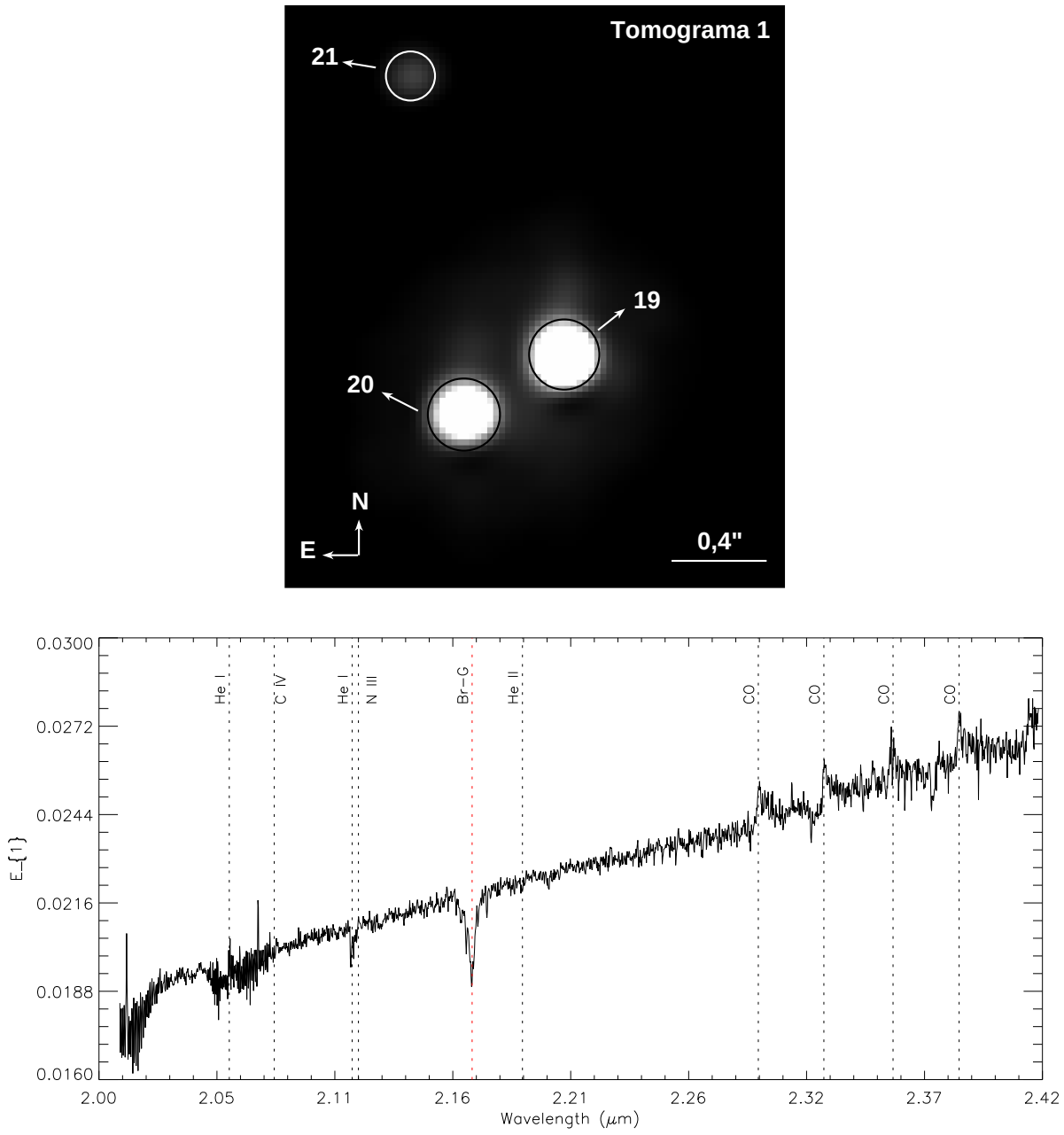
No primeiro autovalor, Figura 51, é verificado que o auto espectro é associado às componentes das estrelas 19 e 20, indicando que ambas são objetos com grande significância para o cubo. São também perceptíveis as linhas de Brγ e He I (2,1127 μm). Como o auto espectro é as somas das informações com mesmas significâncias para o cubo de dados, as informações das fontes 19 e 20 estão misturadas e não é possível determinar as posições para cada correlação no tomograma associado a esse auto espectro. Outro aspecto interessante é a presença das bandas de CO com as maiores correlações. Assim, pelas informações obtidas pela espectroscopia, pode-se determinar que as linhas de CO são produzidas pela fonte 20 e o que é visto neste autovalor é a contaminação da PSF da fonte 20 na fonte 19. Este autovalor explica 99,45% da variância do cubo de dados.

O autovalor 2 apresentado na Figura 45 apresenta 0,35% de significância do cubo de dados. O segundo auto espectro apresenta correlação com os comprimentos de onda menores do espectro e uma anti-correlação com os comprimentos de onda maiores do mesmo. Esse comportamento encontrado diferencia as fontes de emissão presentes na região, em que as partes anti-correlacionadas representam principalmente a fonte 20 e as regiões correlacionas indicam a fonte 19. As áreas correlacionadas são as regiões com intensidades positivas e as áreas anti-correlacionadas sãs as regiões com intensidades negativas, como representado pela barra de cores. Deste modo, é possível determinar que as linhas Brγ e He I (2,1127 μm) são produzidas pela fonte 19. A banda molecular de CO é relacionada à fonte 20. Estes resultados confirmam os estudos da espectroscopia da sessão anterior.

O terceiro autovalor, Figura 53, mostra novamente a linha de Brγ, agora como anti-correlação no auto espectro, deve estar relacionada à emissão da fonte 19. Estas regiões são associadas às áreas em azul claro no tomograma. Outro ponto que deve ser ressaltado é o fato de haver fortes correlações e anti-correlações na extremidade azul do espectro que devem ser associadas ao comportamento visto na região da fonte 19 no tomograma. Para a fonte 20, o tomograma é referente à cinemática vista nas asas azuis (correlacionada) e asas vermelhas (anti-correlacionadas) das primeiras cabeças da banda molecular de CO no auto espectro, indicando uma rotação horária. Este autovalor explica 0,025% da variância do cubo de dados.

O quarto autovalor, Figura 54, apresenta também uma asa azul anti-correlacionada e uma asa vermelha correlacionada das primeiras cabeças da banda molecular de CO no auto espectro. As áreas correlacionadas são as regiões com intensidades positivas e as áreas anti-correlacionadas são as regiões com intensidades negativas, como representado pela barra de cores. Essa informação deve ser tratada como um comple-

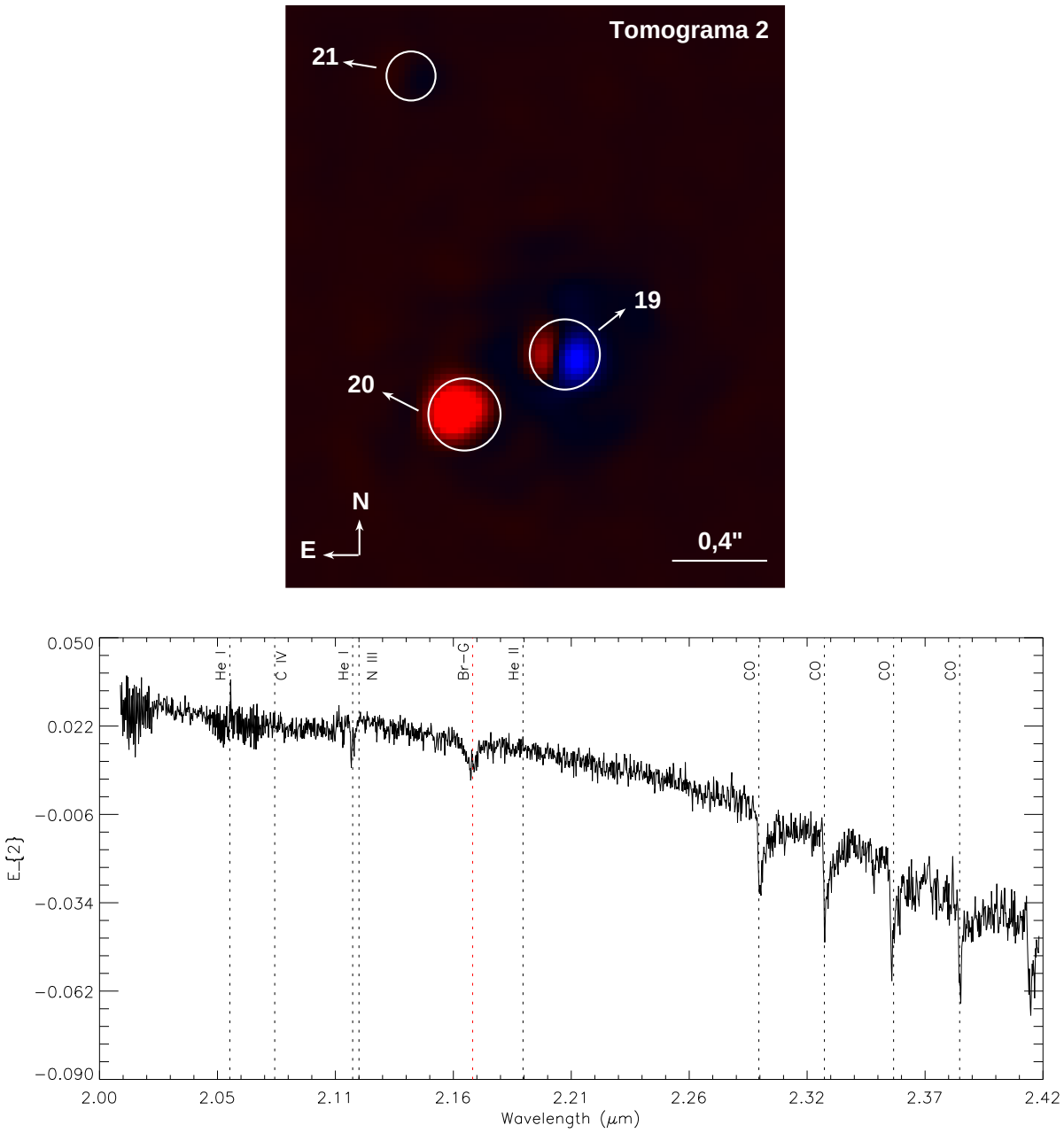
Figura 51 - Tomograma 1 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G77.965-0.006B. As regiões está toda correlacionada, sendo a região mais clara a região com maior correlação.



Fonte: Autor.

:

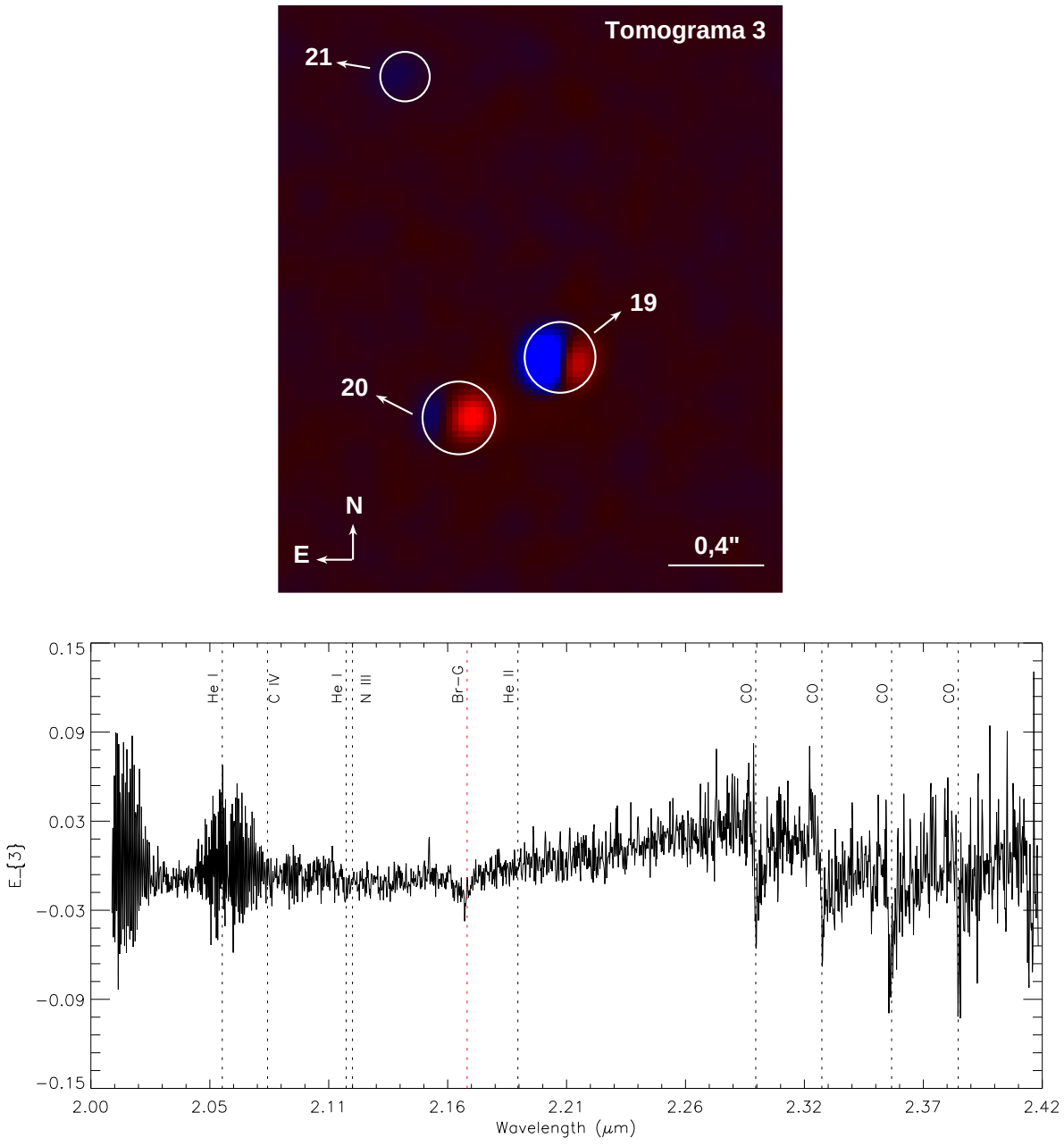
Figura 52 - Tomograma 2 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G77.965-0.006B. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas.



Fonte: Autor.

:

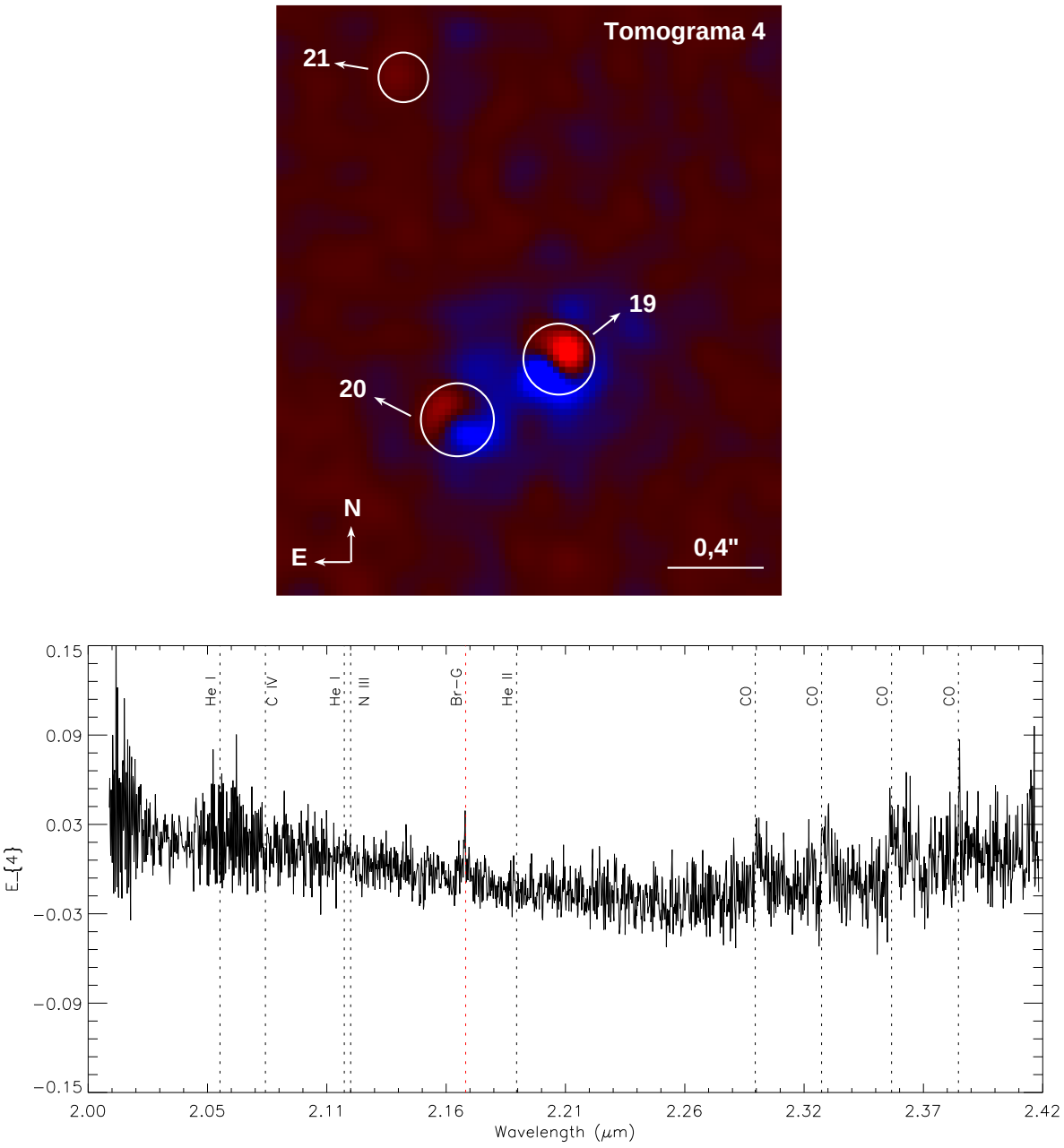
Figura 53 - Tomograma 3 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G77.965-0.006B.As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas.



Fonte: Autor.

:

Figura 54 - Tomograma 4 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G77.965-0.006B. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelha nos tomogramas.



Fonte: Autor.

:

mento dos resultados encontrados no terceiro autovalor. Assim, pelo posicionamento das asas vermelhas e azuis no tomograma e analisando pelo efeito Doopler, confirma que a rotação do disco seja horária. No auto espectro também foi detectada uma correlação da linha de Brγ, que está associada às regiões em vermelho claro no tomograma e está correlação deve indicar regiões mais próximas da estrela. Este autovalor explica 0,008% da variância do cubo de dados.

Nenhuma informação relevante sobre a fonte 21 foi encontrada na tomografia

PCA, o que indica que essa fonte não apresenta relevância na emissão e na ionização dessa região.

4.3.4 Discussão dos resultados

A região G77.965-0.006B revelou três fontes que foram nomeadas de como fonte 19, 20 e 21.

A fonte 19 foi analisada pelos 3 métodos propostos neste trabalho e seu tipo espectral foi estimado como B2 pela presença das linhas fotosféricas de He I (2,1127 μm), Brγ. A origem destas linhas foi confirmada pela tomografia PCA, que conseguiu evidenciar com melhor clareza do que a espectroscopia a emissão de cada fonte. O espectro da fonte 19 mostrou-se contaminado pela emissão da fonte 20 no comprimento de onda maiores que 2,7 μm. A fonte 19 é o único dos objetos deste apontamento a exibir linhas fotosféricas, o que é indicativo de seu estado evolutivo mais avançado em relação às fontes 20 e 21. Por este motivo, ele deve ser o o objeto ionizante da região G77.965-0.006B.

A fonte 20 está em uma fase de formação inicial com o gás e poeira obscurecendo suas linhas fotosféricas, o que se constata pelo fato de a fonte apresentar um disco de acreção com rotação horária. Conforme os tomogramas do PCA indicam.

Por fim, a fonte 21 foi classificada como B1 apenas pela espectroscopia.

4.4 Região G78.4+2.6

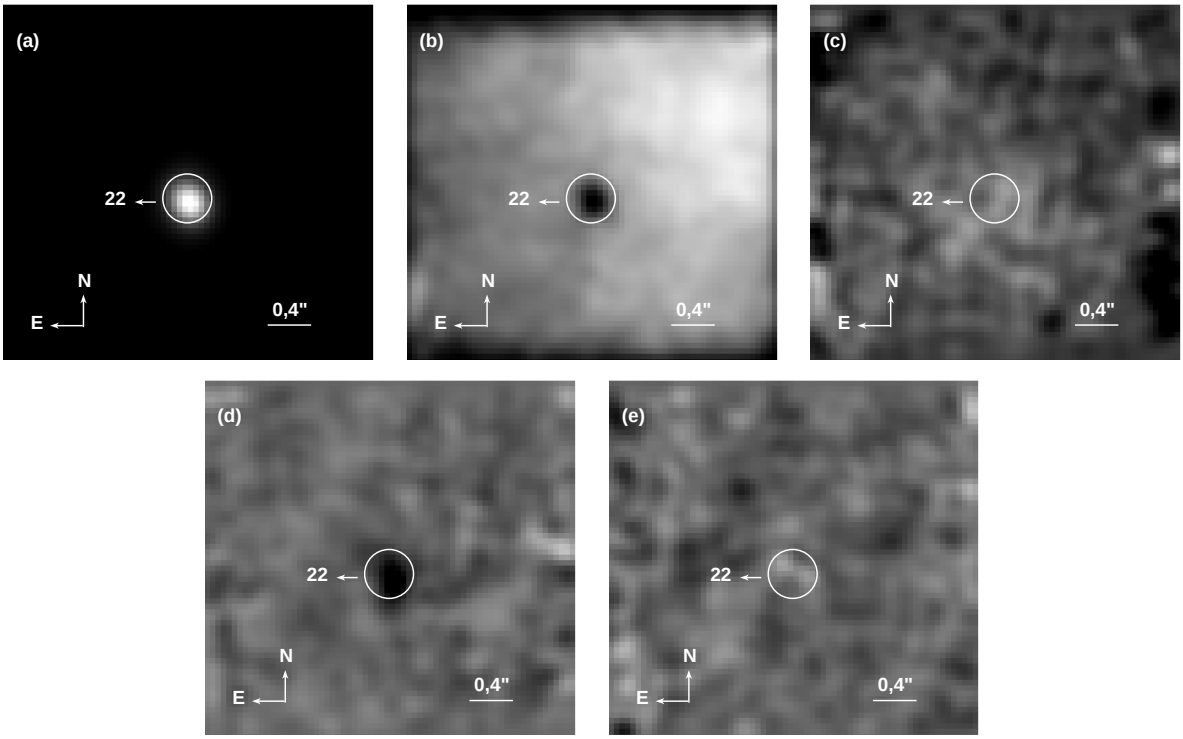
4.4.1 Mapas de faixa espectral

A Figura 55 mostra os mapas de faixas espectrais obtidos para a região G78.4+2.6. Nesta figura podemos ver 5 mapas de faixas espectrais distintos: o contínuo em um comprimento de onda específico, Brγ, He I (2,058 μm), He I (2,1127 μm) e He II (2,1885 μm), respectivamente. Como descrito no Capitulo 3, os mapas tiveram o contínuo adjacente removido com exceção do mapa do contínuo.

Os mapas mostram que a fonte apresenta absorção em Brγ e He I (2,1127 μm). Isto sugere que a estrela já se encontra em uma fase mais evoluída de sua formação, quando suas linhas fotosféricas podem ser detectadas. Porém, por não mostrar absorção no mapa de He II (2,1885 μm), essa estrela não deve corresponder a uma estrela com tipo espectral mais quente que O7. O mapa de He I (2,058 μm) não mostra nenhuma outra fonte no campo.

Uma característica notável dentre todos os mapas é vista no mapa de Brγ, uma emissão estendida com um gradiente à oeste da fonte 22 (Figura 55b). Esta emissão pode ser associada à ionização por outras fontes encontradas por Neria, Gómez e Rodríguez (2010), o que condiz com a morfologia da região nas imagens de Tej *et al.* (2007) e Neria, Gómez e Rodríguez (2010) observadas no infravermelho próximo. Isto poderia ser explicado pela presença do aglomerado citado anteriormente na Seção 1.5.

Figura 55 - Mapas de faixas espectrais da região G78.4+2.6 suavizado em grau 3, onde são apresentados os mapas: do contínuo (a), das linhas de Brγ (b), do He I (2,058 μm) (c), do He I (2,1127 μm) (d) e do He II (2,1885 μm) (e). Os intervalos do comprimento de onda de cada mapa são descritos na Seção 3.1 e a barra de cores indica a intensidade em unidades arbitrárias em cada pixel. Cada pixel equivale a 0,05"x0,05" e os números presentes em cada mapa indicam a localização e a nomenclatura adotada para cada fonte encontrada na região.



Fonte: Autor.

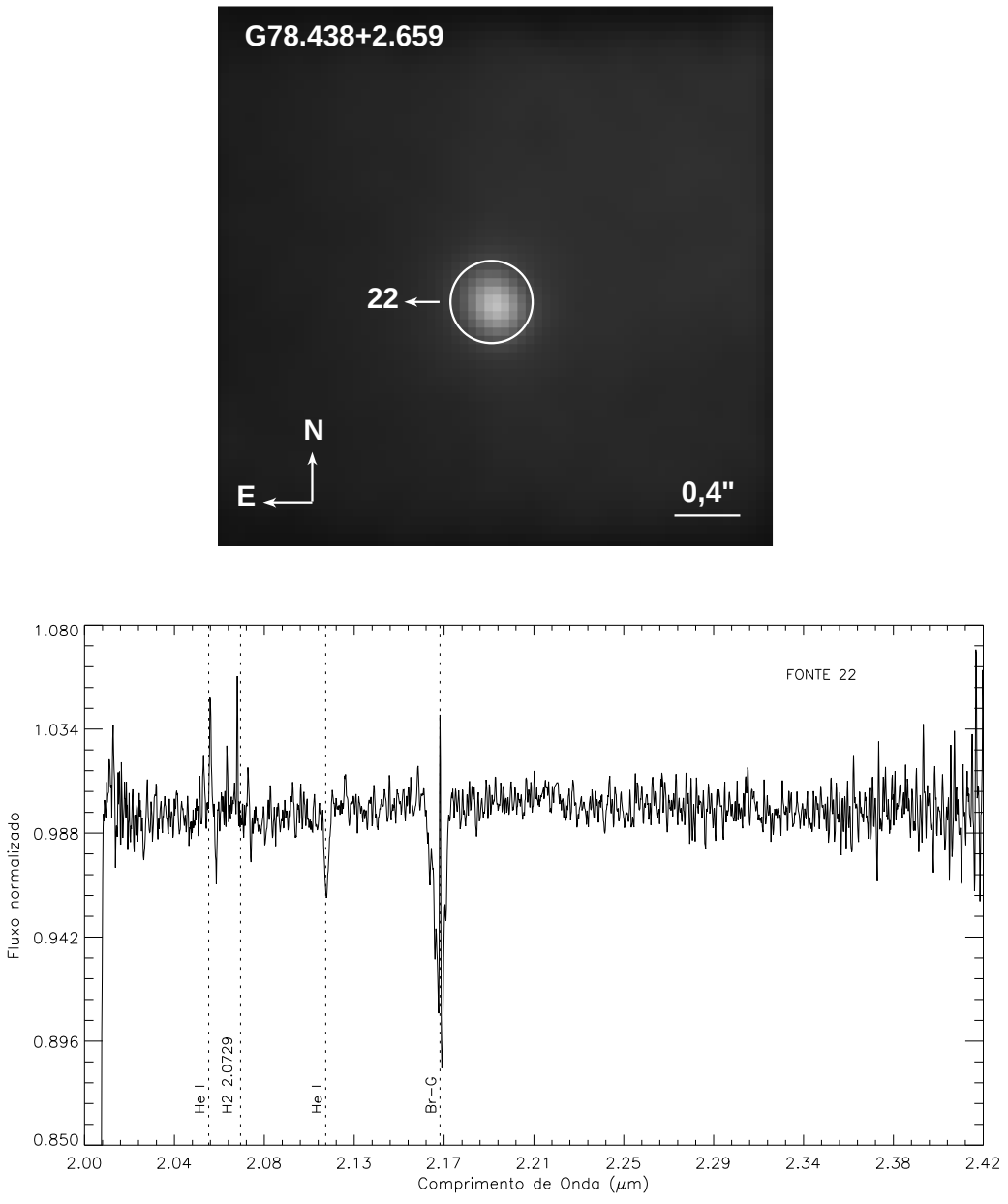
:

4.4.2 Espectroscopia unidimensional de fonte puntiforme

A Figura 56 traz o espectro normalizado e suavizado obtido para a fonte 22 e a sua localização na região G78.4+2.6. Por este espectro pode-se verificar a presença da linha de absorção do Brγ e do He I (2,1127 μm). Pela presença destas duas linhas, a estrela ionizante pode ser classificada como tipo espectral entre O9.5 e B2. O limitante superior para esse caso, é a não detecção da linha de N III (2,115 μm) em emissão. Para uma classificação mais precisa seria necessário um espectro complementar na banda H, por exemplo. A fina componente em emissão de Brγ é produzida pela contaminação nebular no espectro.

Existe evidência da existência da linha de He I (2,058 μm) e uma linha de H_2 (2,07 μm), que indica o excesso de contaminação nebular no espectro. As demais linhas vistas em 2,32 μm e 2,37 μm são referentes às linhas telúricas que não foram totalmente removidas na redução utilizada.

Figura 56 - Imagem da região G78.438+2.659 e espectro da fonte 22 normalizado e suavizado. A imagem mostra a fonte detectada na região. A região demarcada pelo círculo representa o local e o tamanho da abertura de extração do espectro. As linhas fotosféricas utilizadas para a classificação espectral são demarcadas pelas linhas verticais tracejadas e o nome do elemento que a forma.



Fonte: Autor.

:

4.4.3 PCA

Com o tratamento pelo método do PCA, conforme descrito no Capítulo 3, ficou definido o uso dos 2 primeiros autovalores para essa região. Para os autovalores maiores que o segundo autovalor, o ruído já é dominante nos auto espectros.

O autovalor 1 é mostrado na Figura 57 e apresenta 99,8% de significância dos dados. Pode-se verificar que o auto espectro apresentado é correlacionado para as linhas de Brγ e He I (2,1127 μm). Esta característica indica que o autovalor está associado às linhas fotosféricas da fonte e confirmando o que foi obtido da espectroscopia. Para este caso, a origem das linhas está localizada na área menos intensa do tomograma associado, que é associado à fonte 22. Outro fato relevante presente no auto espectro é a presença de uma maior correlação para comprimentos de onda maiores, sendo esta área relacionada às regiões mais intensas no tomograma associado. Isso indica a presença de gás e poeira quentes no espectro da fonte 22. As demais correlações presentes são referentes à linhas telúricas que não foram totalmente removidas nos processos de redução de dados, conforme visto na seção anterior.

O autovalor 2 é apresentado na Figura 58 e apresenta 0,08% da significância do cubo de dados. O segundo auto espectro apresenta correlação em comprimentos de onda menores do espectro e anti-correlação em comprimentos de onda maiores. Esse comportamento também foi verificado por Menezes, Steiner e Ricci (2014) em seus objetos, e conclui-se que este comportamento nos auto espectros estabelece um diferencial entre espectros mais avermelhados e espectros mais azulados neste cubo de dados. Relacionando esta informação com o tomograma, as partes azuis representam a parte correlacionada do auto espectro e as partes vermelhas indicam as regiões anti-correlacionas do auto espectro. O comportamento visto neste autovalor descreve a influência do gás que envolve a fonte.

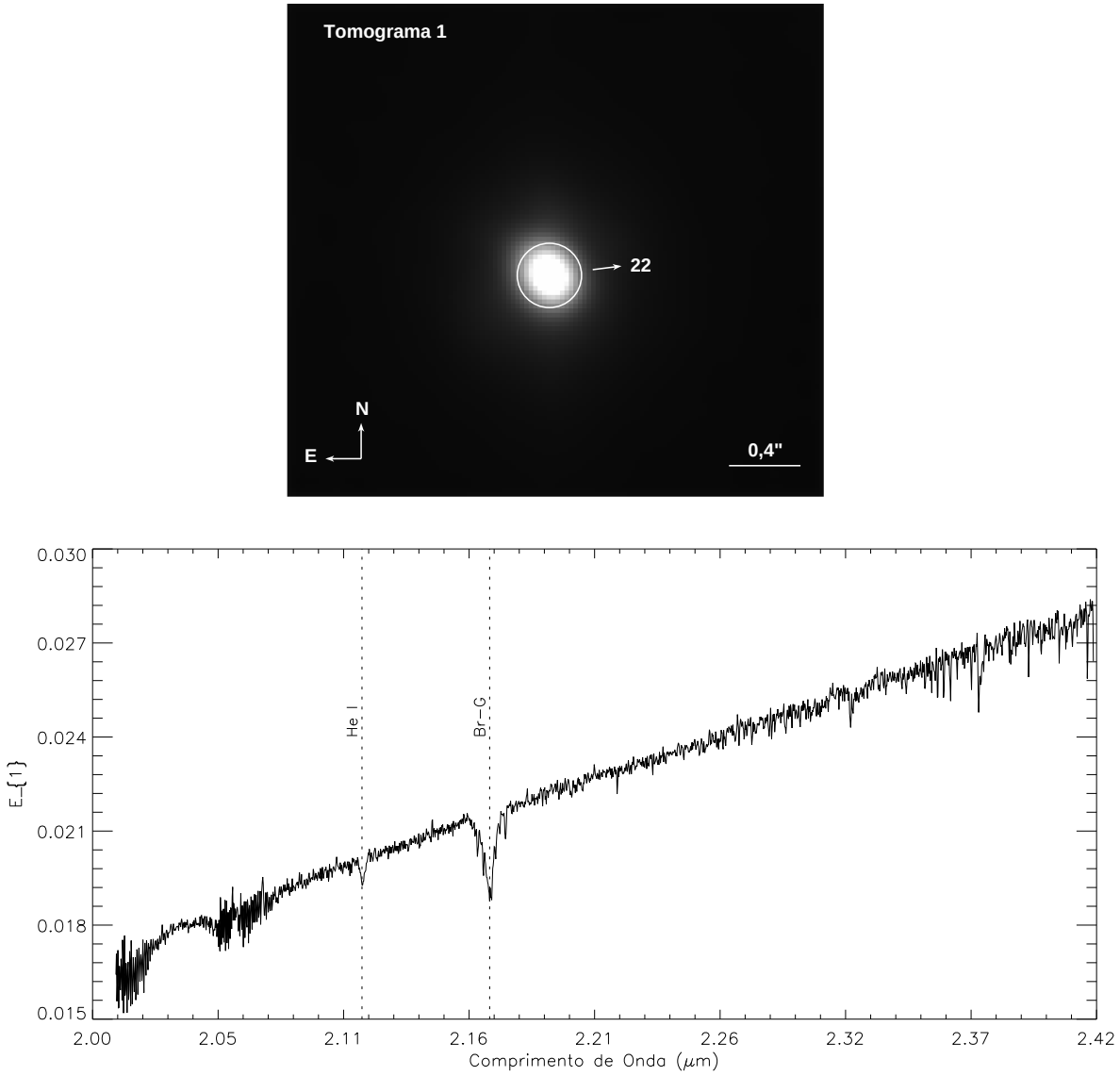
4.4.4 Discussão dos resultados

Com as observações no infravermelho com o espectrógrafo NIFS, foi possível fazer uma análise da região G78.4+2.6. Com o campo de visada de 3"$\times$ 3", sendo detectado um objeto: a fonte 22.

A fonte 22 da região G78.4+2.6 teve seu tipo espectral estimado entre O9.5 e B2, conforme a detecção das linhas de Brγ e He I (2,1127 μm). Este resultado está em conformidade com o tipo espectral obtido pelas observações em rádio (KURTZ; CHURCHWELL; WOOD, 1994; CROWTHER; CONTI, 2003) e pela fotometria em infravermelho próximo (NERIA; GóMEZ; RODRíGUEZ, 2010).

Utilizando somente as linhas de He I (2,1127 μm) e Brγ não foi possível definir com precisão o tipo espectral da fonte. Apenas com observações complementares na banda H é que seria possível refinar esta classificação.

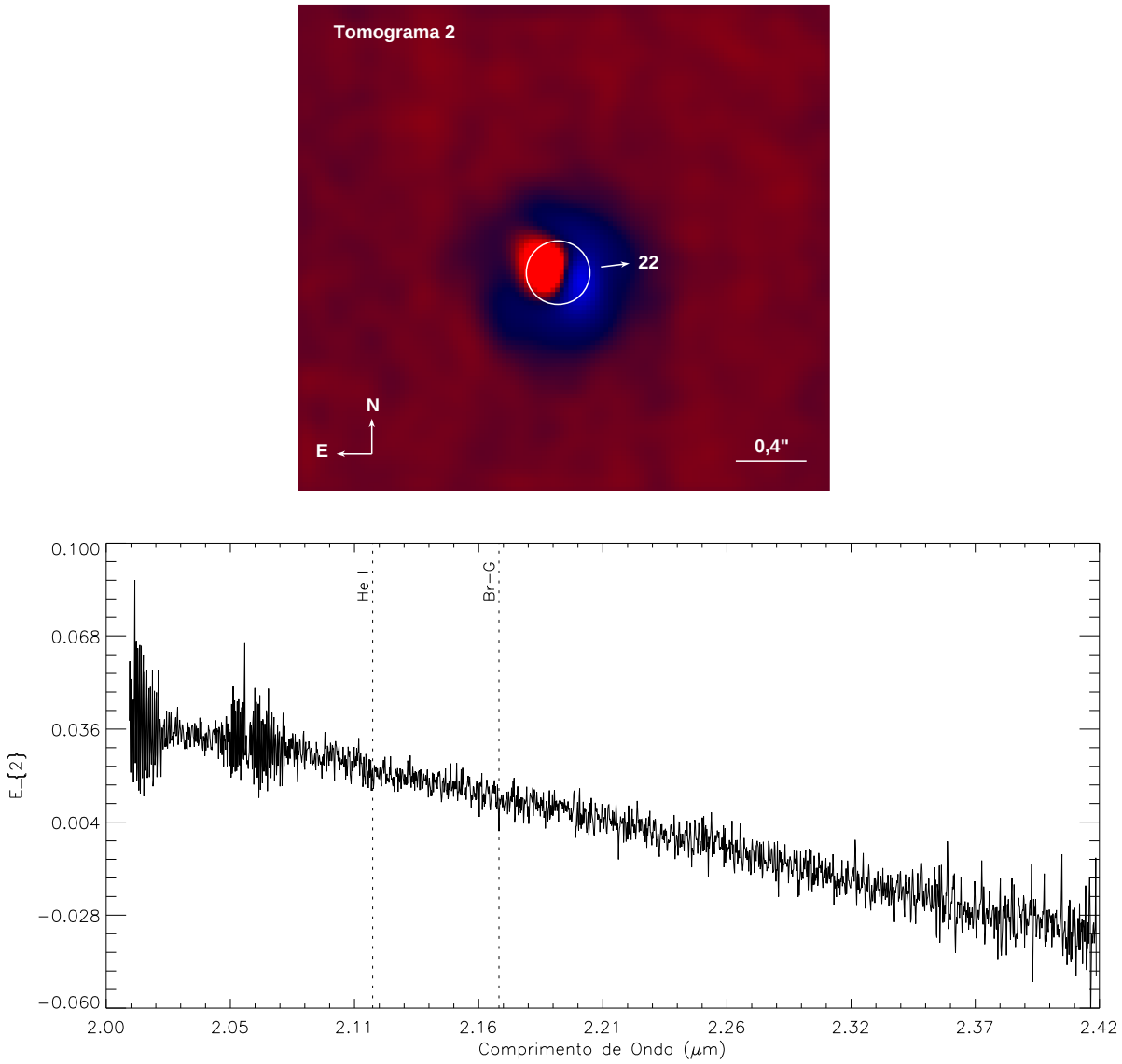
Figura 57 - Tomograma 1 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G78.4+2.6. As regiões está toda correlacionada, sendo a região mais clara a região com maior correlação.



Fonte: Autor.

:

Figura 58 - Tomograma 2 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G78.4+2.6. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas.



Fonte: Autor.

:

5 Espectroscopia e PCA para as demais UCHII

Neste Capítulo apresentamos os resultados para as regiões G6.55-0.10, G15.04 -0.6, G18.146-0.284, G23.96, G28.288-0.364, G29.96-0.0, G45.12+0.1A , G48.609+0.027, G53.605+0.046 e G70.965-1.6 obtidos apenas pela espectroscopia unidimensional de fonte puntiforme e PCA.

5.1 G6.55-0.10

5.1.1 Espectroscopia unidimensional de fonte puntiforme

A região apresenta apenas uma fonte, Figura 59, que se encontra ao centro do campo. Seu espectro apresenta banda de CO em absorção e as linhas de Na I (2,207 μm), Ca I (2,2636 μm), Al I (2,117 μm) e Fe I (2,239 μm), também em absorção. Por isso, o objeto foi classificado como uma estrela de baixa massa. Comparando com o catálogo de Hanson, Conti e Rieke (1996), Kleinmann e Hall (1986), esta fonte poderia ser classificada como uma supergigante, indicado que esta não seria a região contrapartida em NIR da UCHII detectada em rádio.

5.1.2 PCA

A Figura 60 apresenta o primeiro tomograma e seu primeiro auto espectro. O primeiro autovalor representa mais que 99% da variância do cubo de dados. Seu auto espectro apresenta correlações com as linhas de Na I (2,207 μm), Ca I (2,2636 μm), Al I (2,117 μm) e Fe I (2,239 μm), semelhante ao espectro extraído na seção anterior. Assim, o tipo espectral estimado é o mesmo que o encontrado na seção anterior.

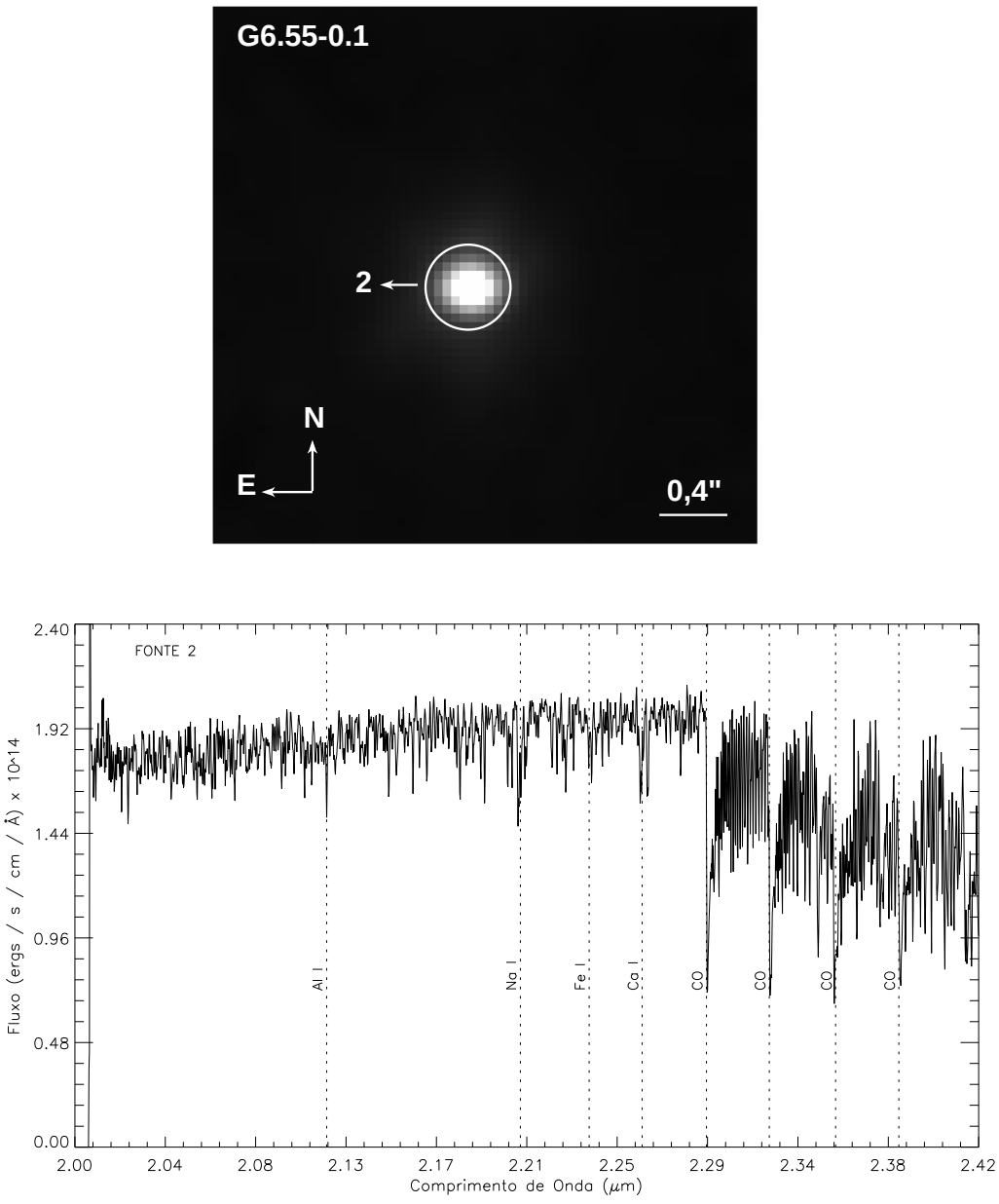
A Figura 61 o segundo tomograma e seu auto espectro apresenta correlação com os comprimentos de ondas menores e uma anti-correlação com os comprimentos de onda maiores, sendo em 2,24 μm a transição entre essas duas regiões. Assim, ao visualizar o tomograma associado, vemos que as linhas de CO e Ca I estão ao sul da fonte, enquanto, as linhas Al I e Na I estão ao norte da fonte. Indicando a significância do gás envolto da estrela. A linha de Fe I é vista com fraca correlação e está envolvendo a fonte e deve ser relacionado ao material perdido pela própria estrela, conforme é esperado para estrelas deste tipo espectral (HANSON; CONTI; RIEKE, 1996).

5.2 G15.04 -0.6

5.2.1 Espectroscopia unidimensional de fonte puntiforme

A fonte apresentada na Figura 62 pode ser classificada como uma estrela mais quente que O9 principalmente pela presença da linha de He II (2,188 μm) em absorção. Essa linha está presente em todos os espectros de estrelas do tipo O em conjunto com as linhas de Brγ, como discutido por Hanson, Conti e Rieke (1996) e Hanson *et al.* (2005).

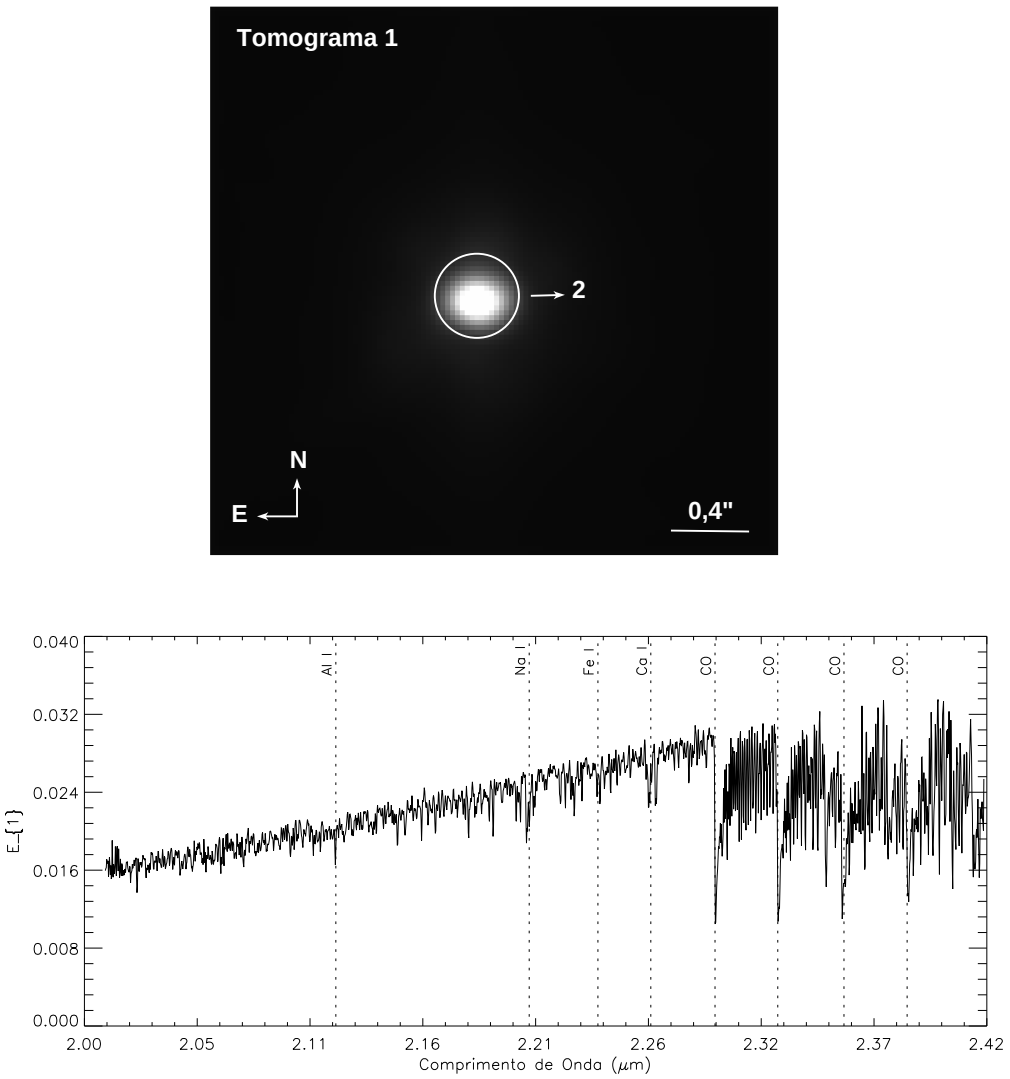
Figura 59 - Imagem da região G6.55-0.10 e espectro da fonte 2. A região demarcada pelo círculo representa o local e o tamanho da abertura de extração do espectro. As linhas detectadas são indicadas pelas linhas verticais tracejadas.



Fonte: Autor.

:

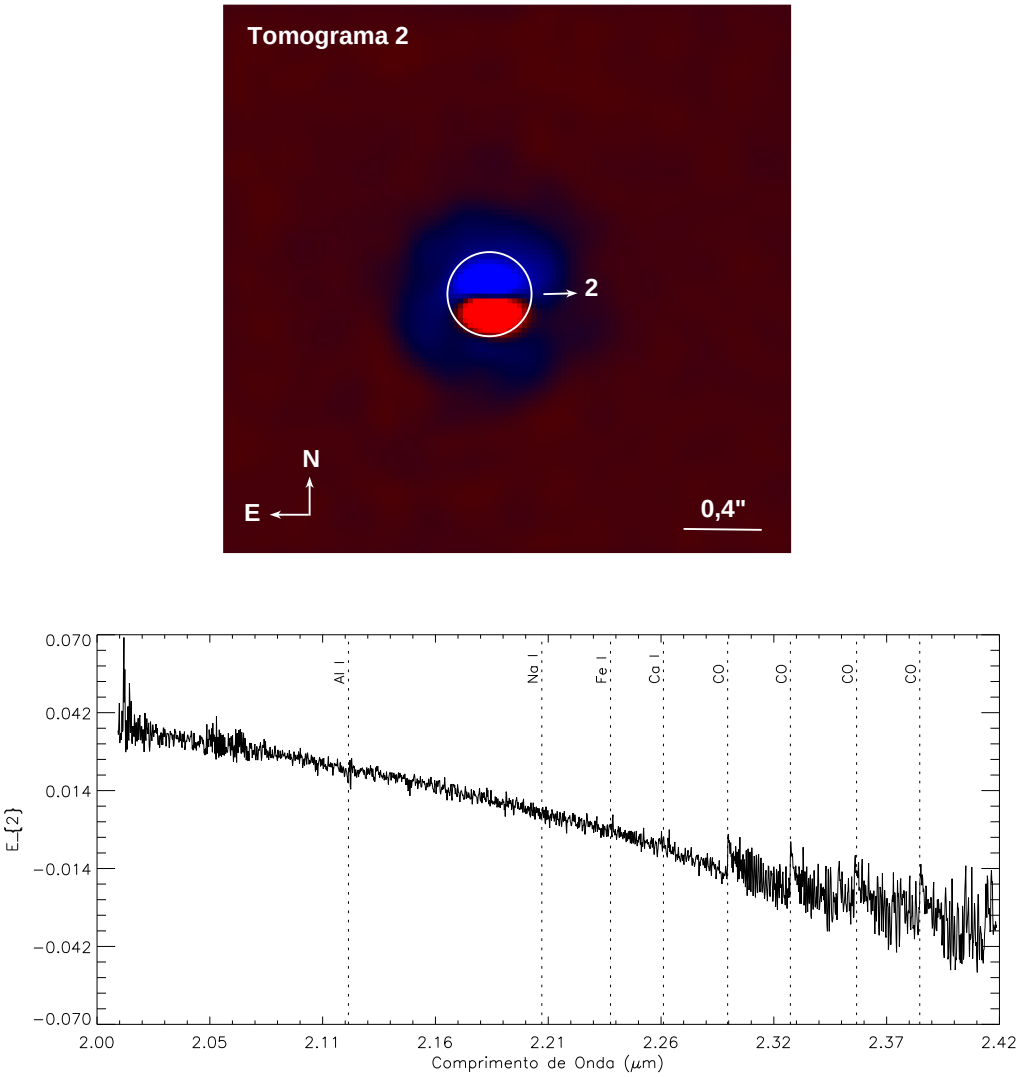
Figura 60 - Tomograma 1 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G6.55-0.10. O campo está todo correlacionada, sendo a região mais clara de maior correlação.



Fonte: Autor.

:

Figura 61 - Tomograma 2 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G6.55-0.10.As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas.

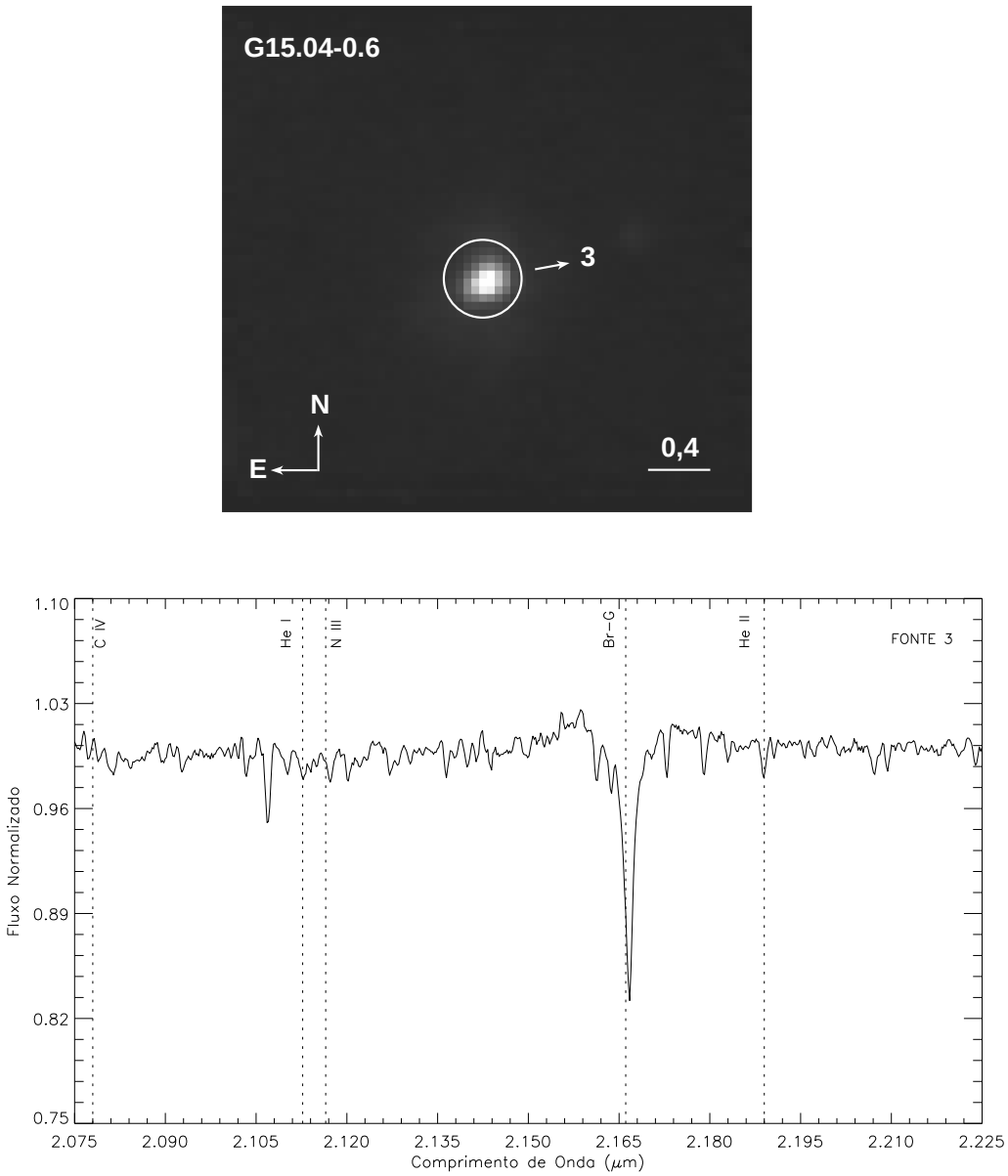


Fonte: Autor.

:

Entretanto, as linhas de N III (2,115 μm) ou de He I (2,112 μm) não foram detectadas, muito provavelmente pelo baixo sinal/ruído no espectro, o que impede que o tipo espectral possa ser refinado. Para confirmar este resultado uma nova observação com melhor relação sinal/ruído é necessária.

Figura 62 - Imagem da região G15.04-0.6 e espectro normalizado da fonte 3. A região demarcada pelo círculo representa o local e o tamanho da abertura de extração do espectro. No espectro está contida a localização das linhas detectadas são indicadas pelas linhas verticais tracejadas.



Fonte: Autor.

:

A classificação obtida neste trabalho identificou a fonte 3 como sendo mais quente que o tipo espectral apresentado por Wood e Churchwell (1989b), Faison *et al.* (1998) e

Doherty, Puxley, Doyon e Brand (1994), que a classificaram como estrela B0. A diferença encontrada nos resultados pode ser explicada pela baixa densidade do gás circunstelar na região. Como a fotosfera da fonte já está visível, o gás deve ter sido parcialmente dissipado pelos ventos estelares e pela radiação. Assim, observações em rádio resultam em tipos espectrais de menos luminosidades.

5.2.2 PCA

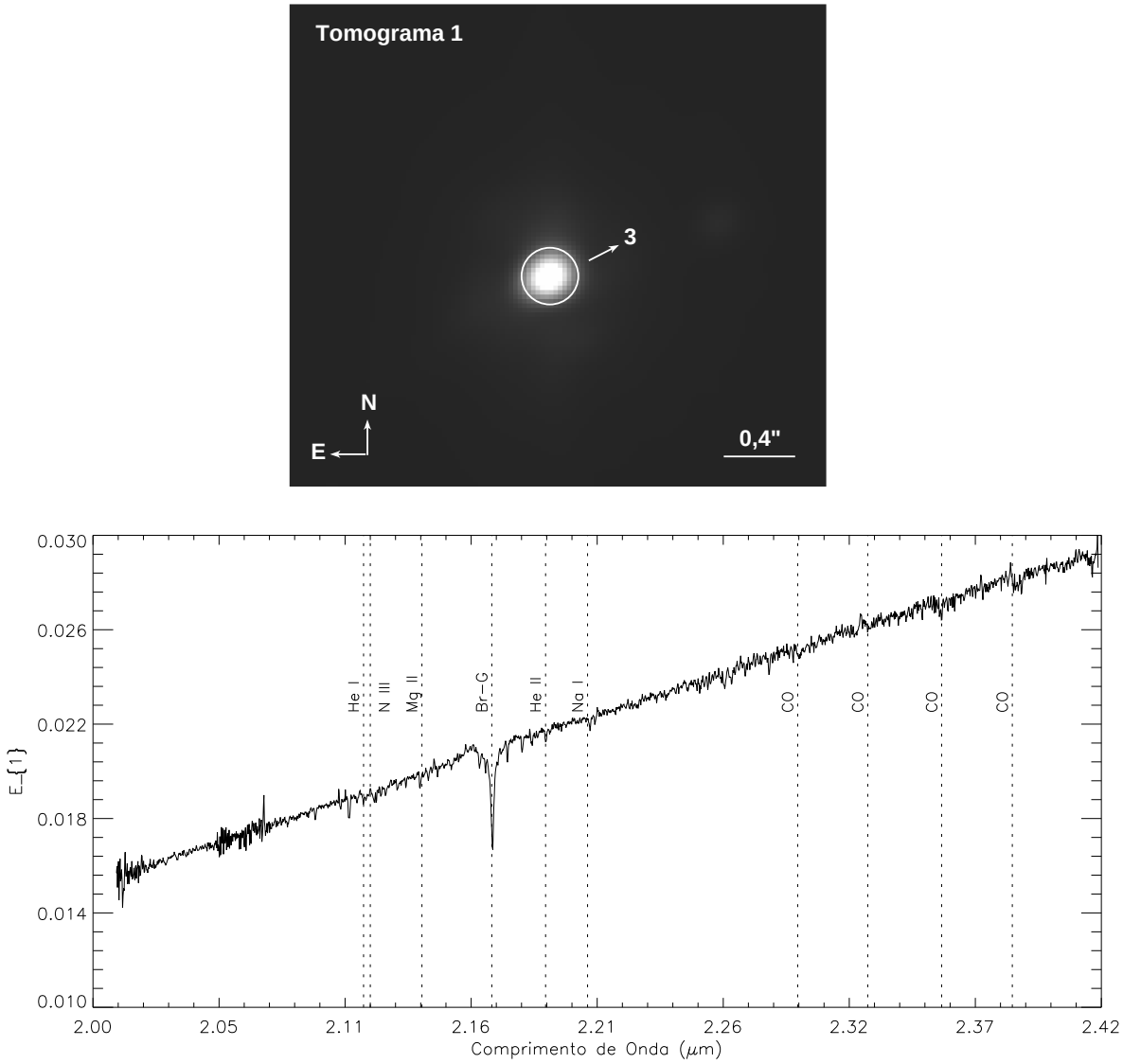
A Figura 63 apresenta o primeiro tomograma e seu primeiro auto espectro. O primeiro auto espectro apresenta correlações com as linhas fotosféricas de Brγ, He I (2,1227 μm), He II (2,1885 μm), N III (2,1255 μm). Os resultados deste autovalor diferem do espectro da espectroscopia pela detecção da linha de He I (2,1227 μm) e N III (2,1255 μm). Assim, o tipo espectral pelo PCA pode ser melhor refinado e o tipo espectral estimado para essa fonte é O7 (HANSON; CONTI; RIEKE, 1996). Outro ponto interessante, é a presença de uma correlação à oeste da fonte 3, indicando uma possível fonte embebida ou ofuscada pela fonte ionizante. Esse autovalor explica aproximadamente 99,80% do cubo de dados.

O segundo autovalor é mostrado na Figura 64 e representa 0,1% da significância do cubo de dados. Novamente, é visto em seu auto espectro a correlação com os comprimentos de ondas menores e uma anti-correlação com os comprimentos de onda maiores, sendo em 2,24 μm a transição entre essas duas regiões. A linha de Brγ também é vista em correlação. Pela sua intensidade, tal linha deve ser relacionada ao gás que está circundando a fonte, conforme pode ser visto em azul claro no tomograma associado.

O terceiro autovalor, mostrado na Figura 65, apresenta uma linha desconhecida e correlacionada em 2,118 μm , que pode evidenciar efluxos na região, e a linha de Brγ com asas correlacionada e anti-correlacionada, o que sugere que o gás possas estar em movimento A primeira é uma linha desconhecida e que não foi vista em nenhuma região UCHII anteriormente e desta forma foi tratada como artefato. Este autovalor explica 0.01% do cubo de dados.

O quarto autovalor utilizado é mostrado na Figura 66 e representa menos que 0,002% das informações do cubo de dados. Porém, é neste autovalor que o PCA trouxe as informações do gás em volta da fonte. No tomograma vemos duas regiões distintas: uma à noroeste e outra à sudeste. A primeira é condizente com as emissões das linhas de hidrogênio molecular. As linhas de H_2 do auto espectro associado ao tomograma correspondente mostram a nuvem molecular em que a região UCHII está embebida, reforçando a hipótese de efluxos em 2,118 μm na região, caso seja considerado o efeito chamagne.

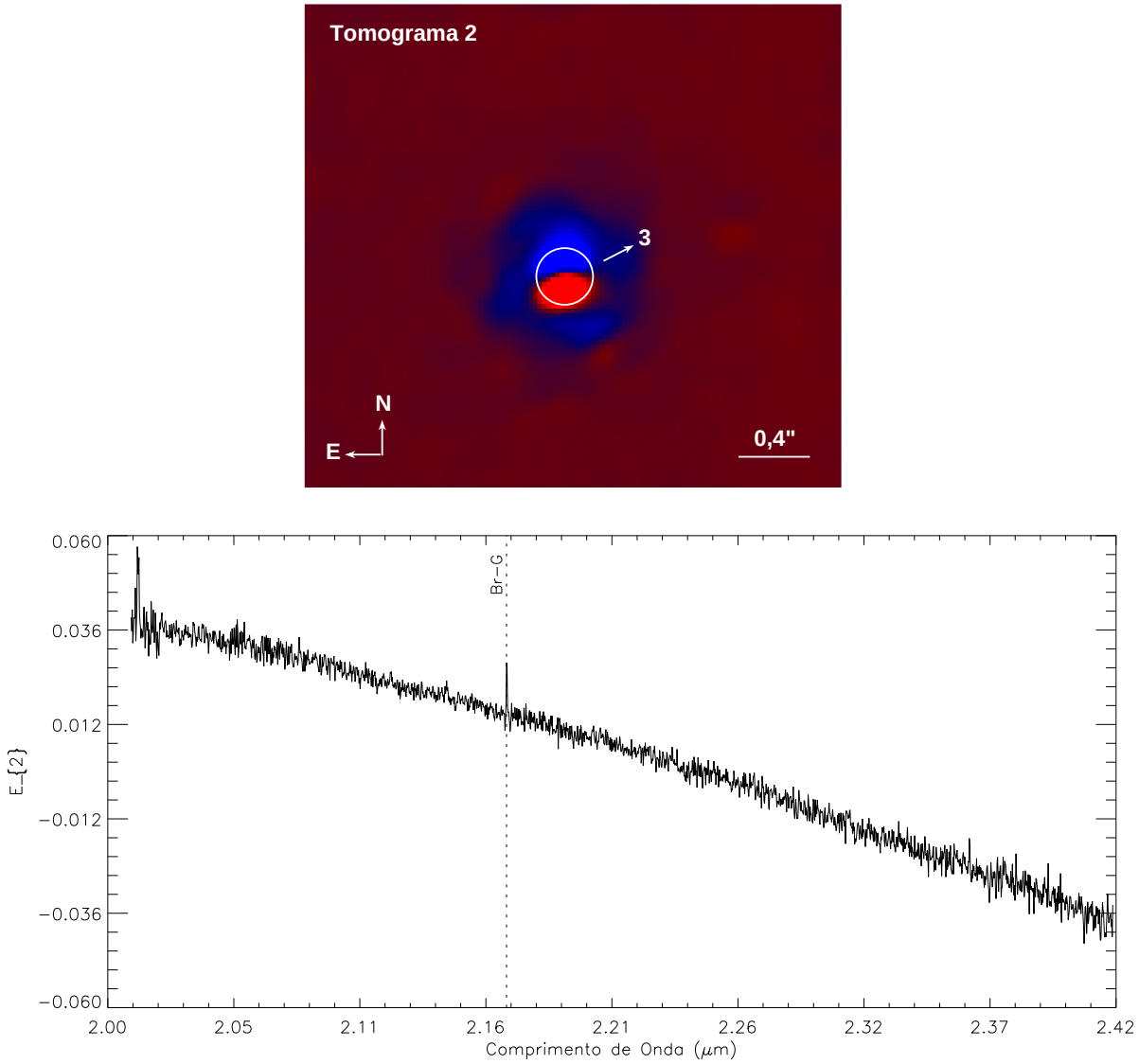
Figura 63 - Tomograma 1 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G15.04-0.6. O campo está todo correlacionada, sendo a região mais clara de maior correlação.



Fonte: Autor.

:

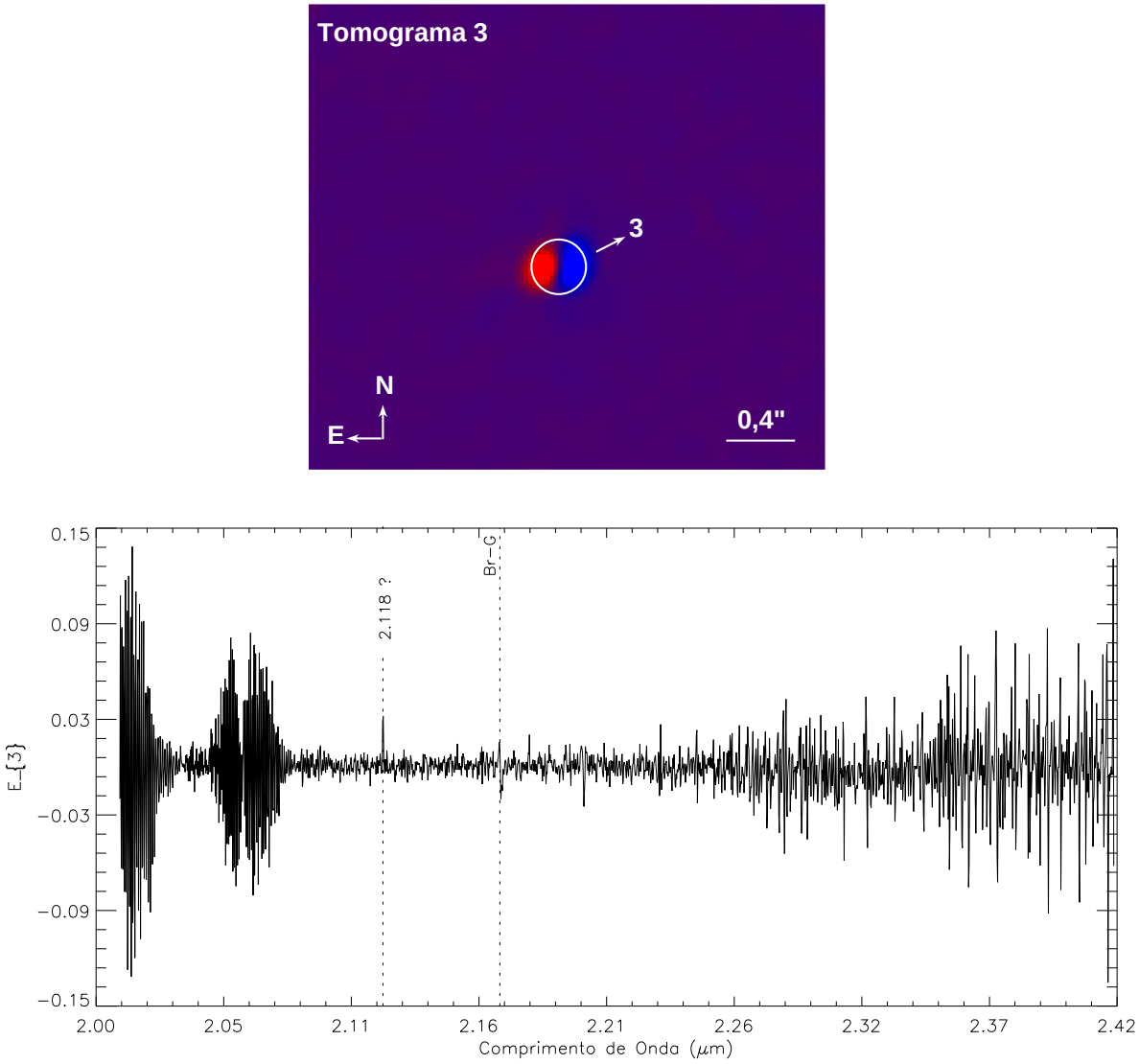
Figura 64 - Tomograma 2 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G15.04-0.6. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas.



Fonte: Autor.

:

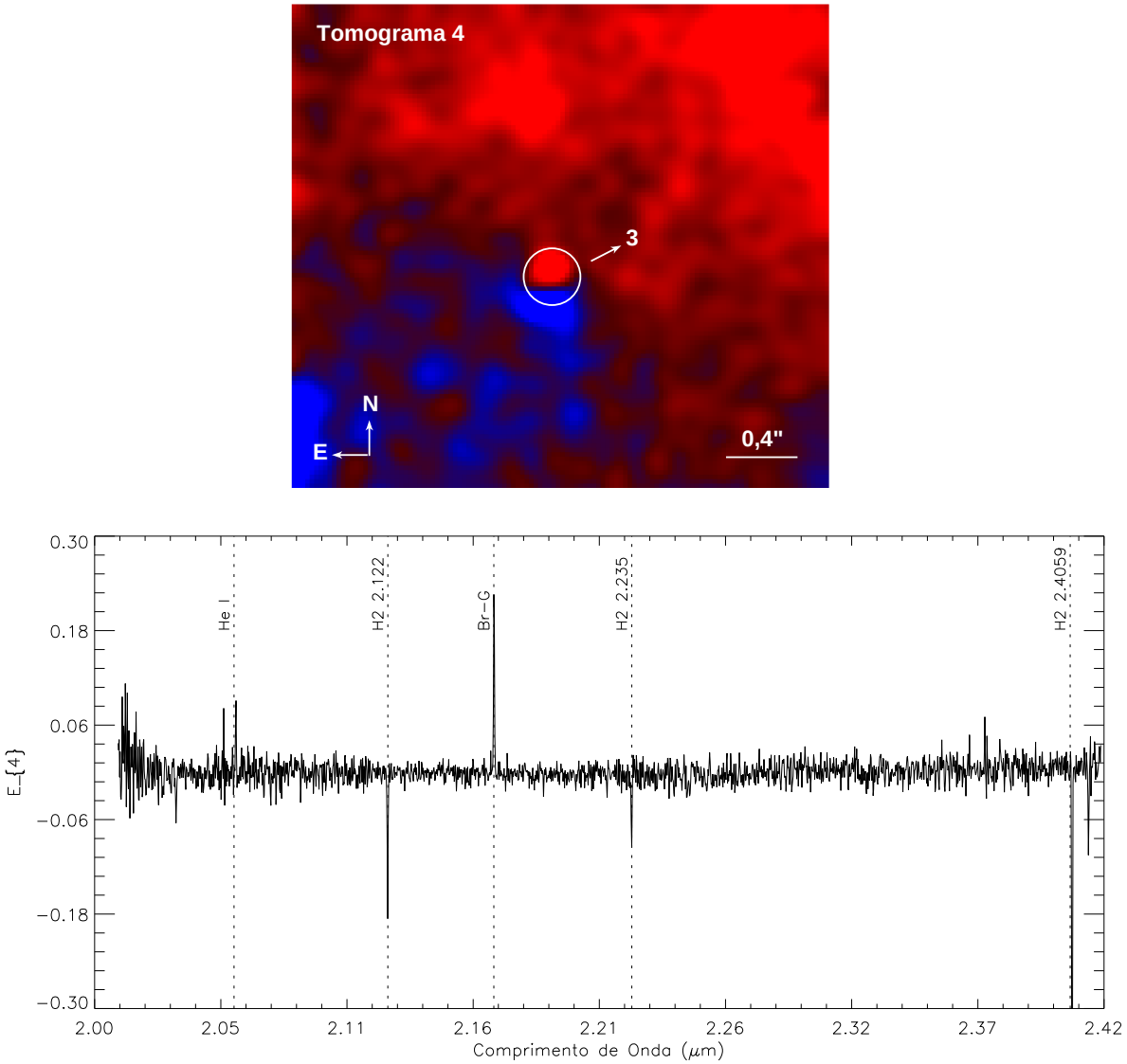
Figura 65 - Tomograma 3 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G15.04-0.6. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas.



Fonte: Autor.

:

Figura 66 - Tomograma 4 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G15.04-0.6. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas.



Fonte: Autor.

:

5.3 G18.146-0.284

5.3.1 Espectroscopia unidimensional de fonte puntiforme

A Figura 67 mostra o espectro do objeto que coincide espacialmente com a fonte 144 de Alvarez *et al.* (2004), onde é vista a linha de Brγ em absorção e emissão. Também é detectada a de He II (2,188 μm). As linhas de He I (2,112 μm) em absorção e N III (2.115 μm) em emissão podem ser evidenciadas no espectro. Portanto, o tipo espectral esperado para a fonte nessa região seria de mais quente que O7. Observações com melhores sinal/ruído e em bandas complementares seriam necessárias para que se obtivesse uma classificação mais precisa.

A classificação deste trabalho condiz com os resultados de Crowther e Conti (2003) e Alvarez *et al.* (2004).

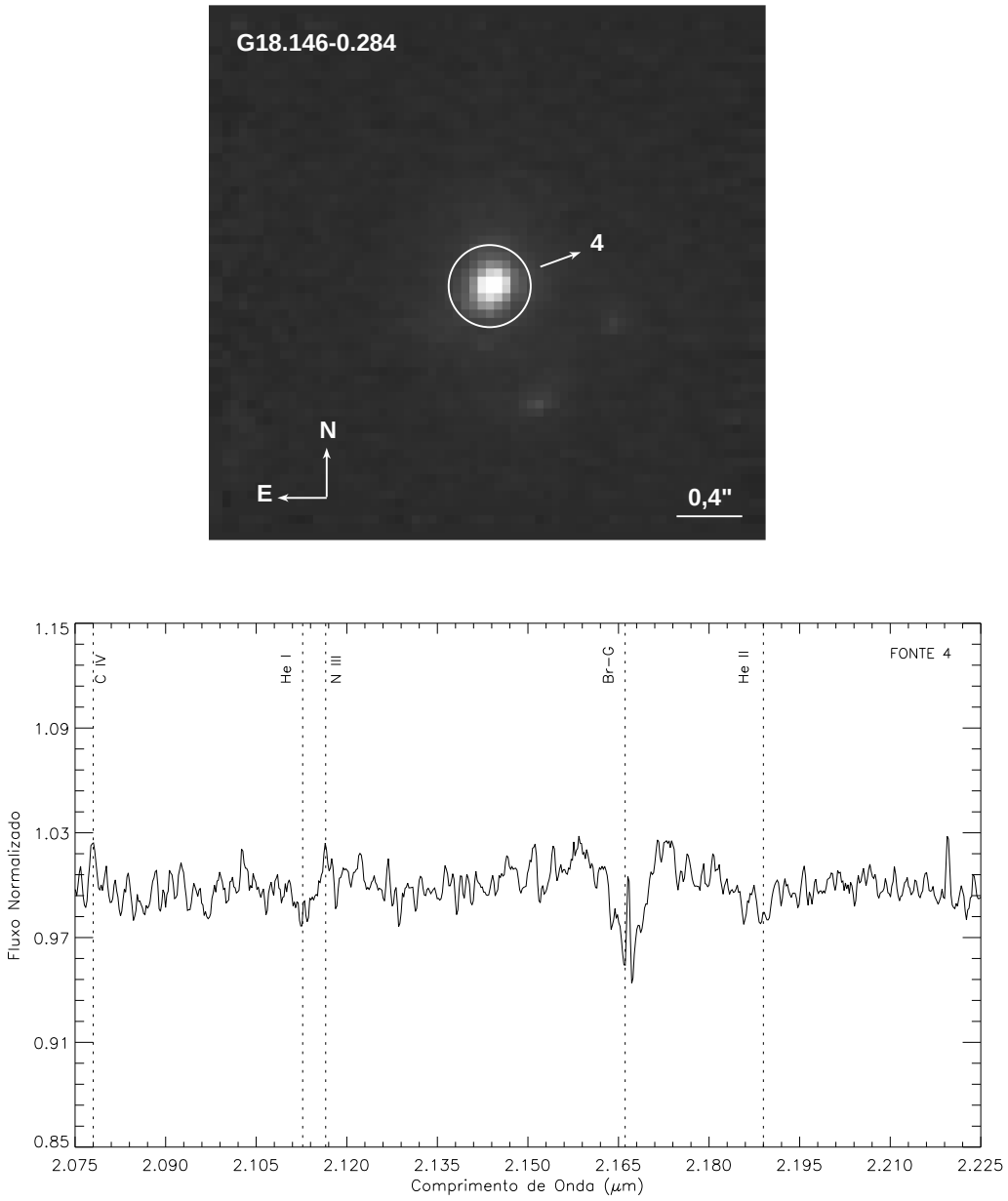
5.3.2 PCA

A Figura 68 apresenta o primeiro tomograma e seu primeiro auto espectro. O primeiro auto espectro apresenta correlações com as linhas fotosféricas de Brγ, He I (2,1227 μm), He II (2,1885 μm), N III (2,1255 μm). Assim, o tipo espectral estimado pelo PCA desta fonte é O7. Esse valor mais preciso ocorreu porque o PCA conseguir detectar as fracas linhas de He I (2,1227 μm) e N III (2,1255 μm) no seu auto espectro. Outro fato interessante, é a detecção das linhas nebulares de [Fe III] (2,218 μm) e H_2 (2,2101 μm), que sugere que o gás tenha alta densidade. Outro ponto, é a existência de duas possíveis fontes ao sul da fonte 4. Esse autovalor explica aproximadamente 99,80% do cubo de dados.

O segundo autovalor é mostrado na Figura 69 e representa 0,12% da significância do cubo de dados. Novamente, é visto em seu auto espectro a correlação para comprimentos de onda menor e uma anti-correlação, para comprimentos de onda maior, sendo em 2,26 μm a transição entre essas duas regiões. Nenhuma linha foi detectada neste autovalor.

O terceiro autovalor é mostrado na Figura 70 e representa aproximadamente 0,04% das informações do cubo de dados. Este autovalor traz informações do gás da região. Ele mostra em seu auto espectro apenas linhas nebulares Brγ, He I (2,058 μm) e as linhas de H_2 (2,122 μm) e (2,235 μm). Esta informações, com a representação vista no tomograma associado permite a interpretação da existência de um segundo objeto a oeste da fonte 4 ou apenas a presença de uma emissão estendida. Caso exista este segundo objeto, ele estaria embebido por apresentar as linhas nebulares de Brγ e He I (2,058 μm). Desta forma, este objeto deve estar em uma fase mais recente de evolução do que a fonte 4. A presença de outro objeto próximo à fonte 4 foi sugerida por outros trabalhos (CROWTHER; CONTI, 2003; ALVAREZ *et al.*, 2004), o que corrobora esta interpretação.

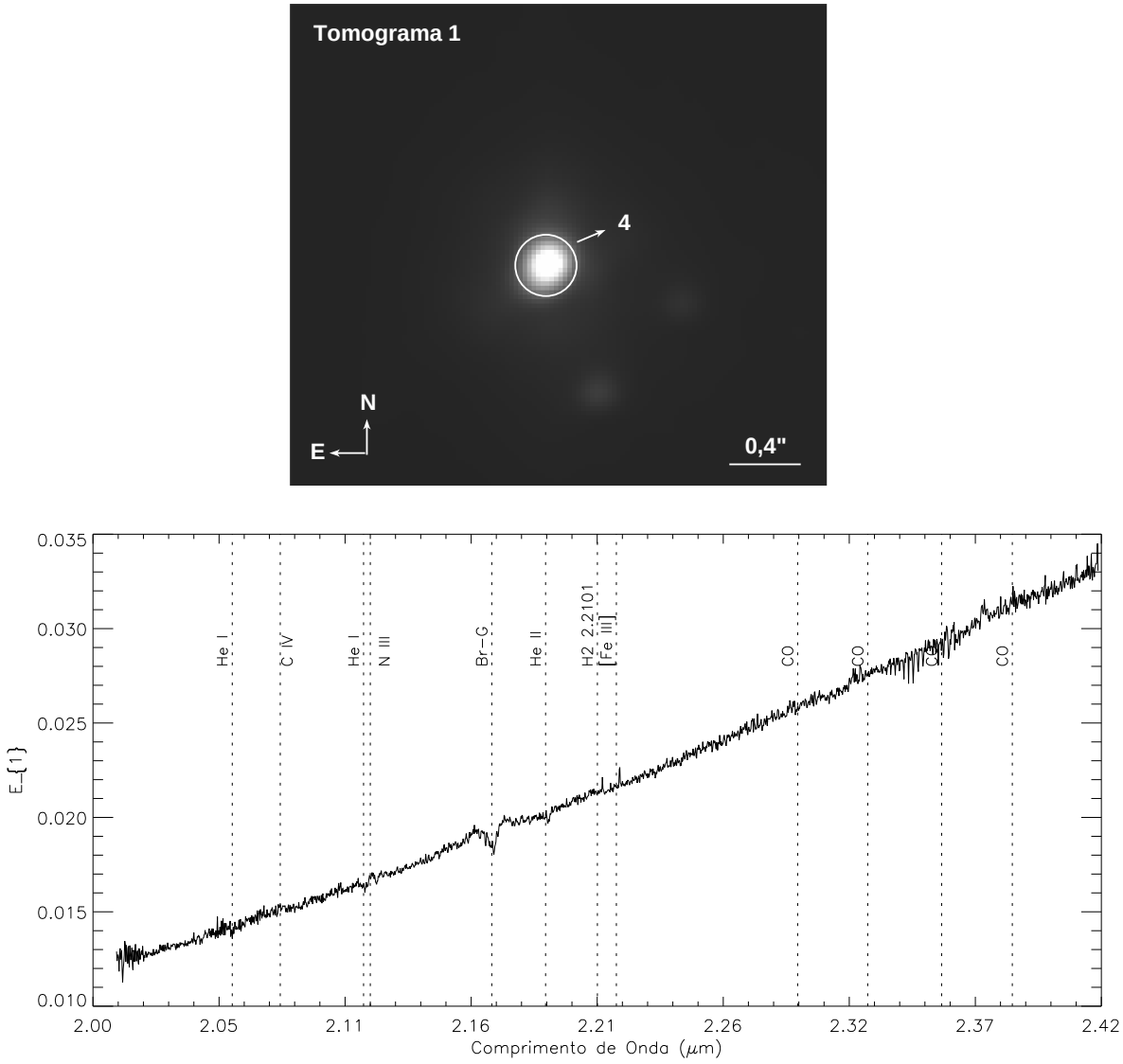
Figura 67 - Imagem da região G18.146-0.284 e espectro normalizado da fonte 4. A região demarcada pelo círculo representa o local e o tamanho da abertura de extração do espectro. As linhas utilizadas detectadas são indicadas pelas linhas verticais tracejadas.



Fonte: Autor.

:

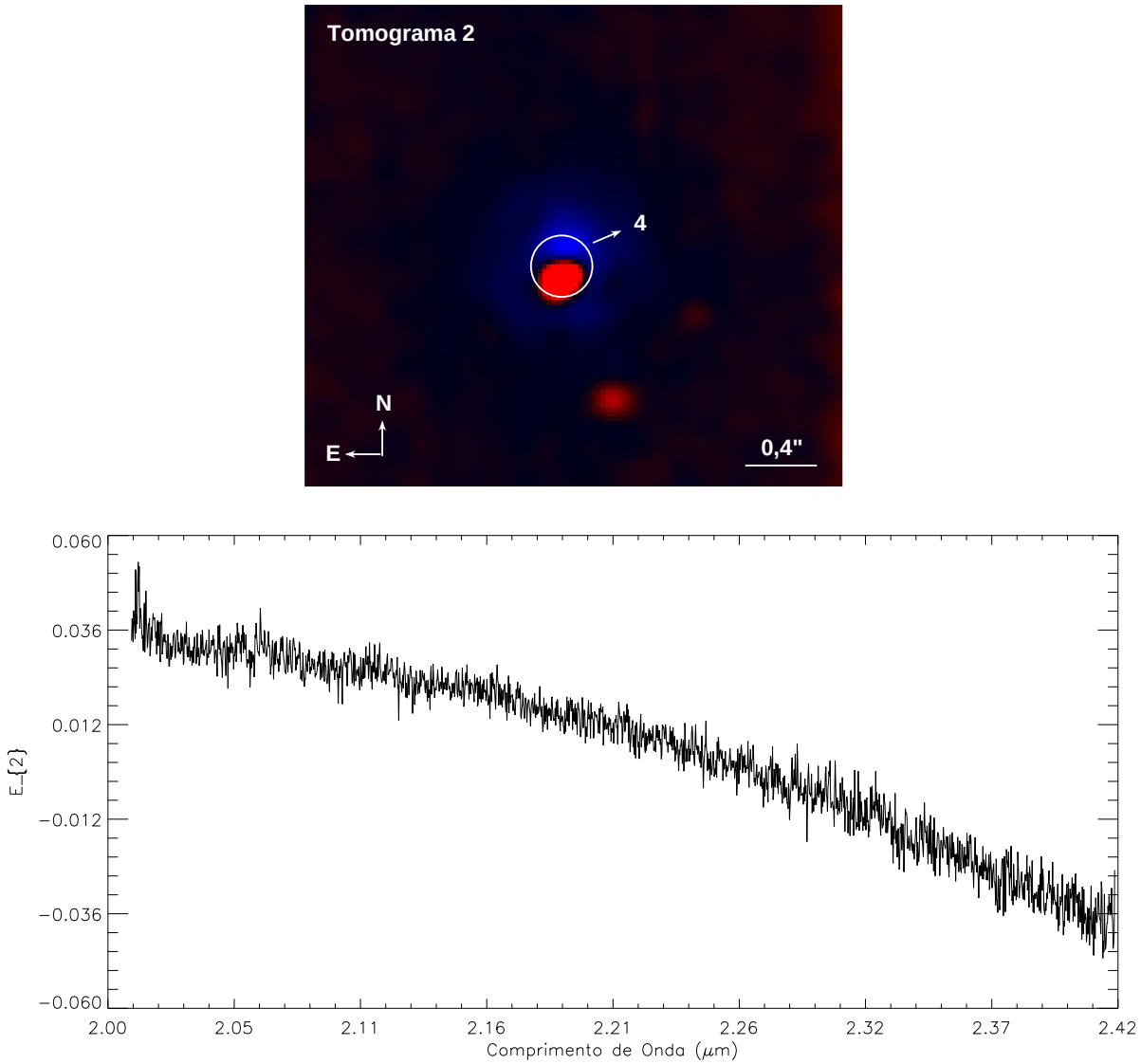
Figura 68 - Tomograma 1 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G18.146-0.284. O campo está todo correlacionada, sendo a região mais clara de maior correlação.



Fonte: Autor.

:

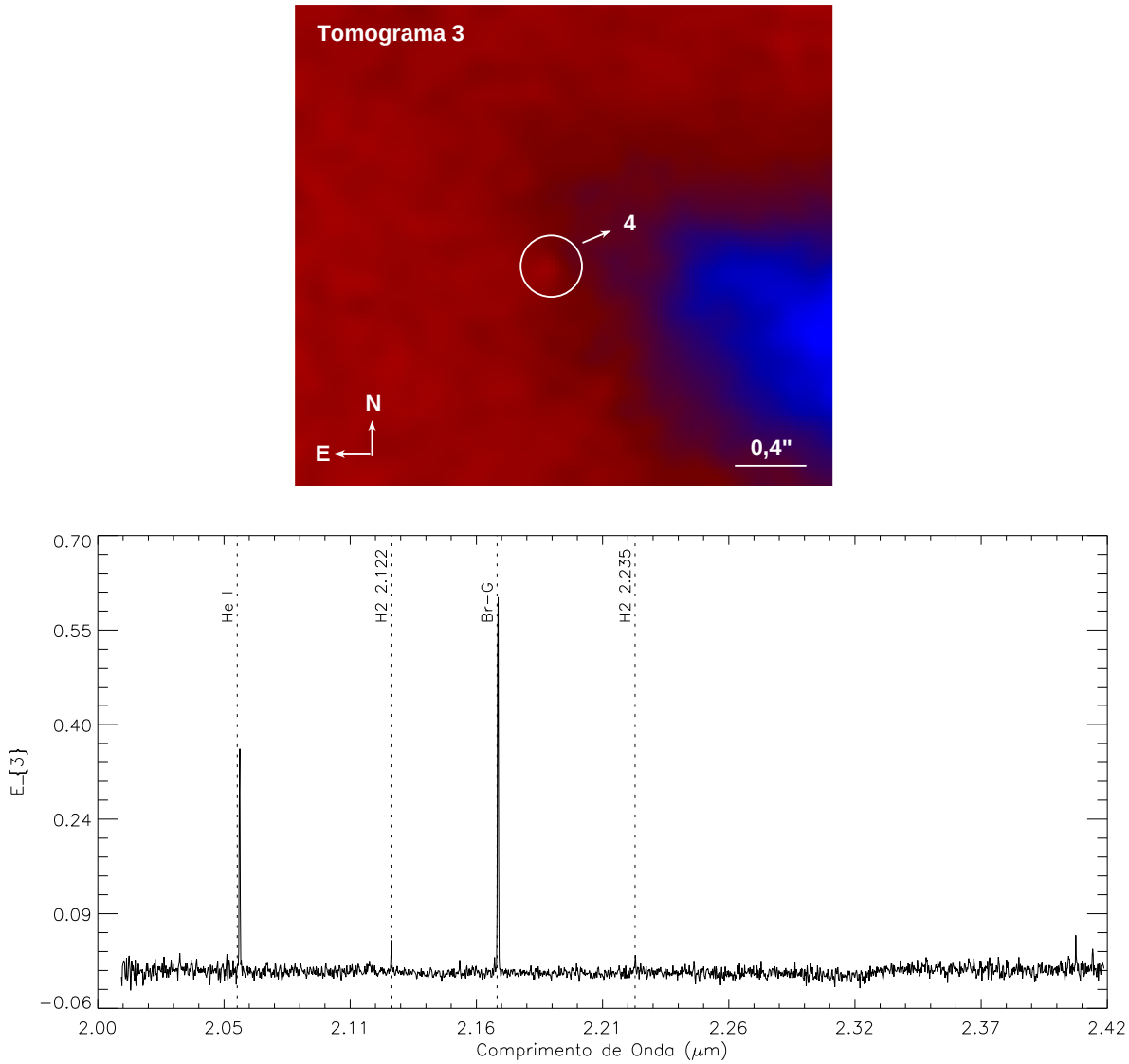
Figura 69 - Tomograma 2 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G18.146-0.284. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas.



Fonte: Autor.

:

Figura 70 - Tomograma 3 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G18.146-0.284. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas.



Fonte: Autor.

:

5.4 G23.96 – 0.1

5.4.1 Espectroscopia unidimensional de fonte puntiforme

O espectro extraído da região UCHII para a fonte 5, Figura 71, mostra as linhas de N III (2,115 μm) em emissão e da He I (2,112 μm) em absorção, o que está de acordo com as estimativas de Hanson, Luhman e Rieke (2002). A linha de He II (2,188 μm) também é visível em fraca emissão, mostrando que a estrela pode ser classificada como uma estrela do tipo O7. Este resultado é condizente com trabalhos de Hanson, Luhman e Rieke (2002) e Crowther e Furness (2008), principalmente com os valores obtidos da razão de linhas. A componente fina em emissão de Brγ é oriunda da contaminação nebular no espectro.

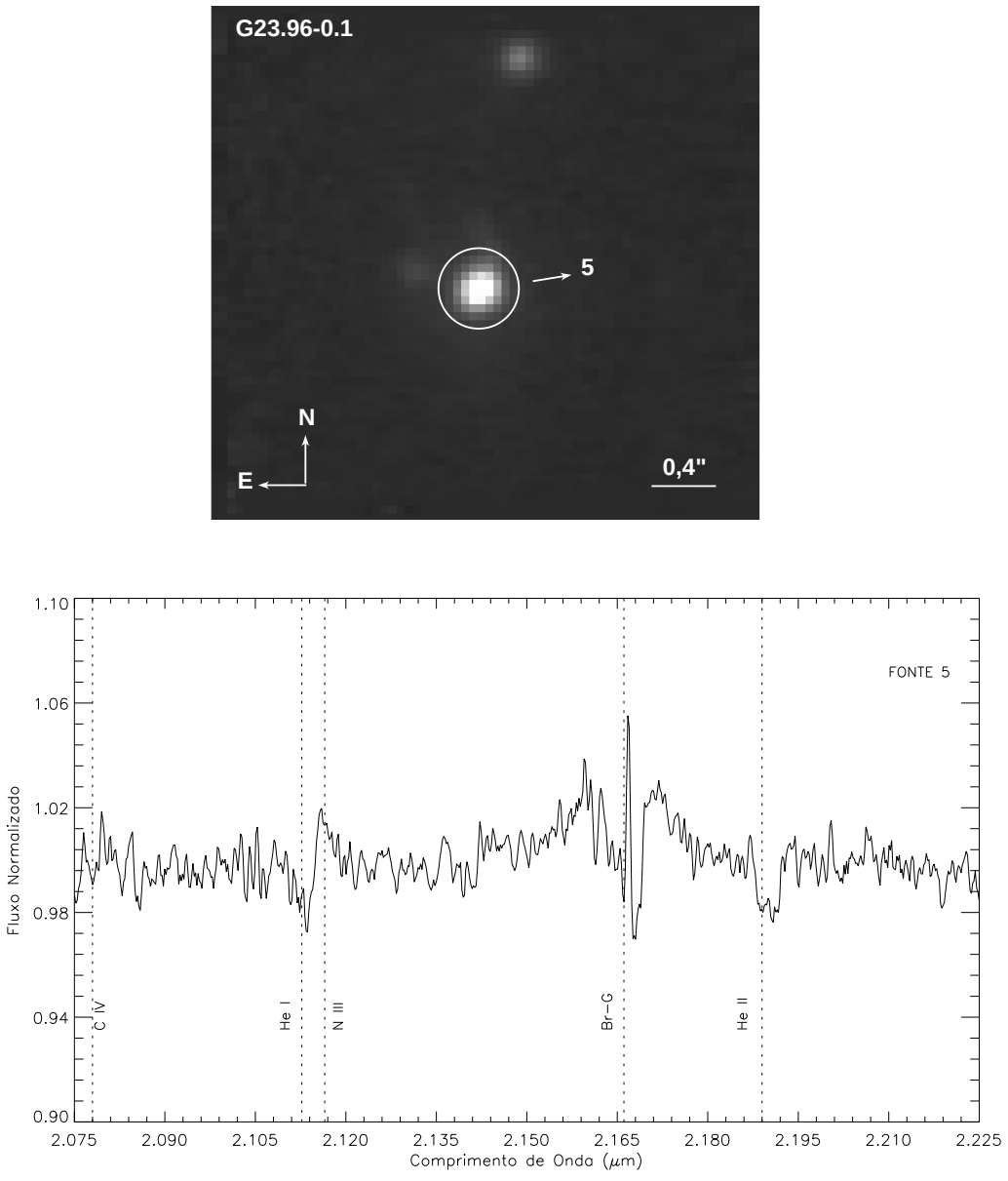
Na fonte 6, que se encontra ao norte da fonte 5, só foram detectadas linhas nebulares, conforme podemos ver na Figura 72. Esta fonte foi estuda por Crowther e Furness (2008) e nomeada em seu trabalho como fonte 2. Porém, nenhuma classificação para tal fonte foi determinada. As linhas detectadas no espectro desta fonte foram as linhas de Brγ e He I (2,058 μm), ambas em emissão. O fluxo medido foi de 9,13 $\times$ 10^{-15} erg s^{-1} cm^{-2} Å^{-1} para o Brγ e 7,8 $\times$ 10^{-15} erg s^{-1} cm^{-2} Å^{-1} para a linha de o He I (2,058 μm). A razão de linha entre o He I e Brγ foi de 0,85. Com base este valor e comparando com os modelos do CLOUDY, assim como foi feito para fonte 24 no Capítulo 4.1, o tipo espectral estimado está no intervalo entre O3 e O7.

5.4.2 PCA

A Figura 73 apresenta o primeiro tomograma e seu auto espectro correspondente. O primeiro auto espectro apresenta correlações com as linhas fotosféricas de He I(2,058 μm), Brγ, He I (2,1227 μm), He II (2,1885 μm), N III (2,1255 μm). Assim, o tipo espectral estimado pelo PCA essa fonte é O7 comparando com os catálogos de Hanson, Conti e Rieke (1996). Pelo tomograma associado é verificado que a origem das emissões é a fonte 5 e que a mesma é a mais intensa da região. A fonte 6 se destaca no tomograma e deve só contribuir no contínuo nos comprimentos de onda menores no auto espectro. Outro fato relevante visto neste autovalor são as presenças de cinco pontos de fraca correlação espalhados pelo campo, sendo a mais relevante a que se encontra à leste da fonte 5. Estes pontos podem ser objetos ofuscados pelas duas fontes mais intensas da região e serem os objetos do aglomerado apontado por Thompson *et al.* (2006). Este autovalor explica 99,3% do cubo de dados.

No segundo autovalor, Figura 74, vemos o mesmo comportamento encontrado nos segundos autovalores das regiões analisadas anteriormente. Este comportamento de separação é referente à fonte 5. A fonte 6 só apresenta anti-correlação, como é mostrado no tomograma. Assim, as linhas de He I(2,058 μm) e Brγ vistas no auto espectro são

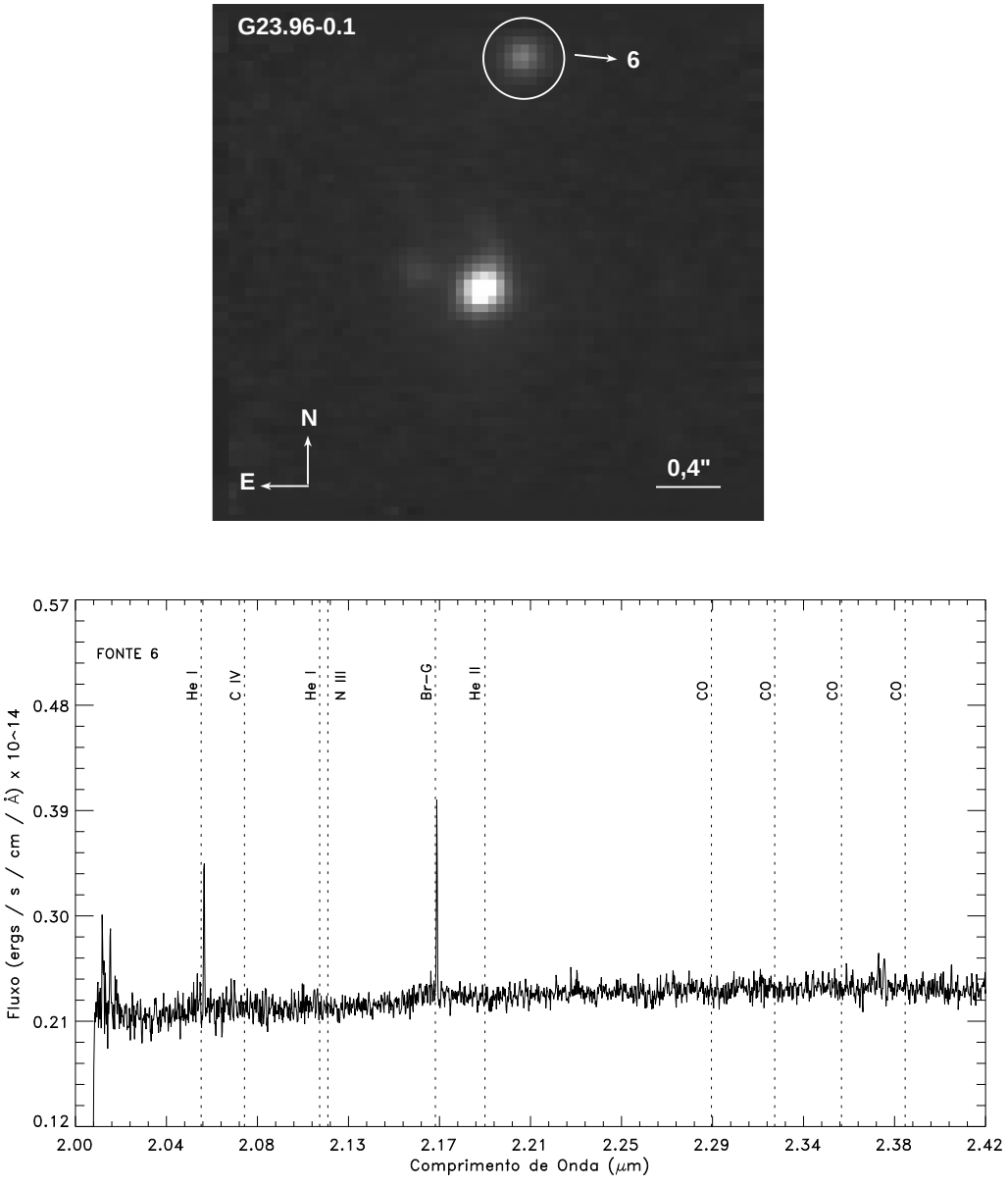
Figura 71 - Imagem da região G23.96 – 0.1 e espectro normalizado da fonte 5. A região demarcada pelo círculo representa o local e o tamanho da abertura de extração do espectro. As linhas detectadas são indicadas pelas linhas verticais tracejadas.



Fonte: Autor.

:

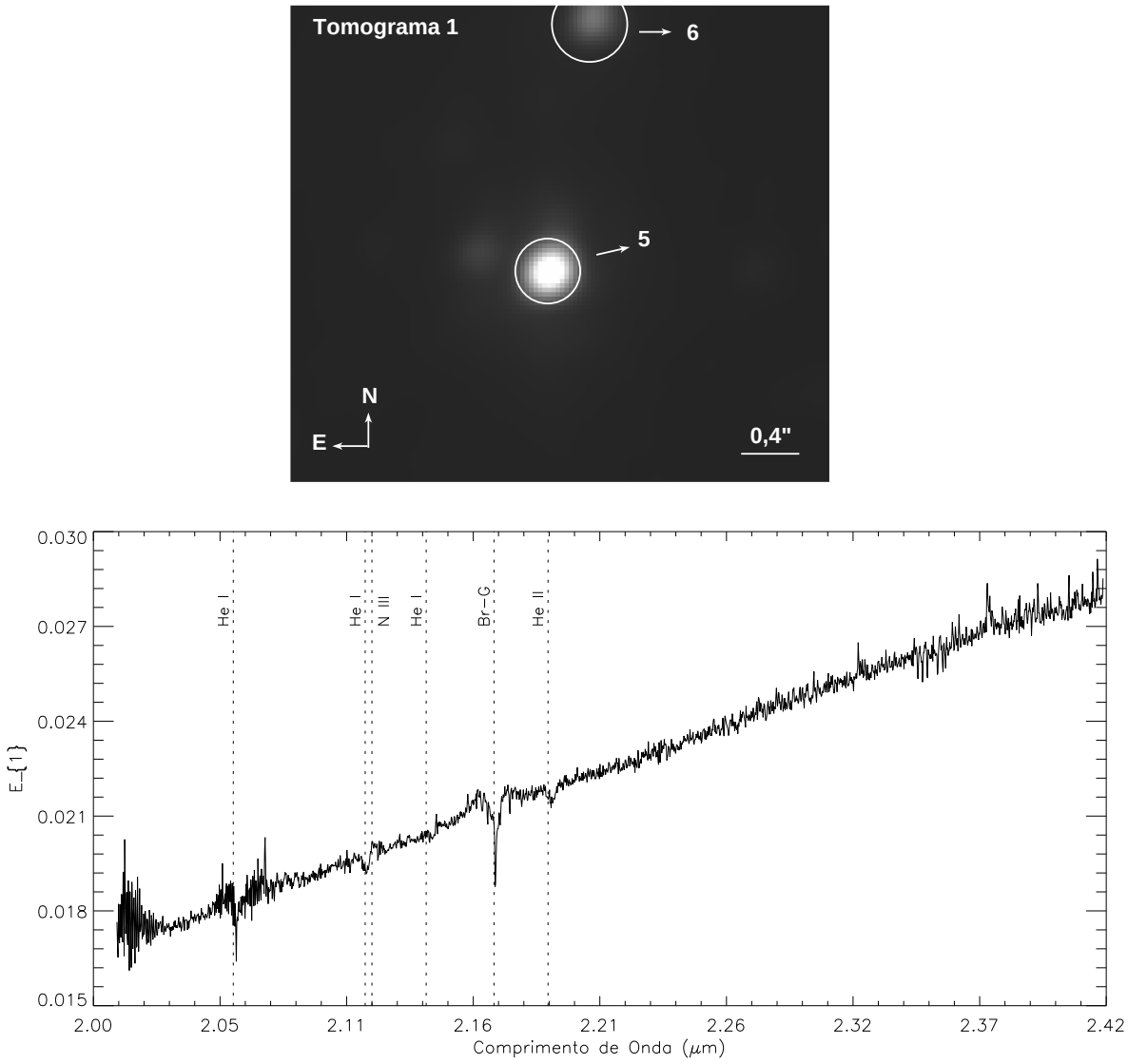
Figura 72 - Imagem da região G23.96 – 0.1 e espectro da fonte 6. A região demarcada pelo círculo representa o local e o tamanho da abertura de extração do espectro. As linhas detectadas são indicadas pelas de linhas verticais tracejadas.



Fonte: Autor.

:

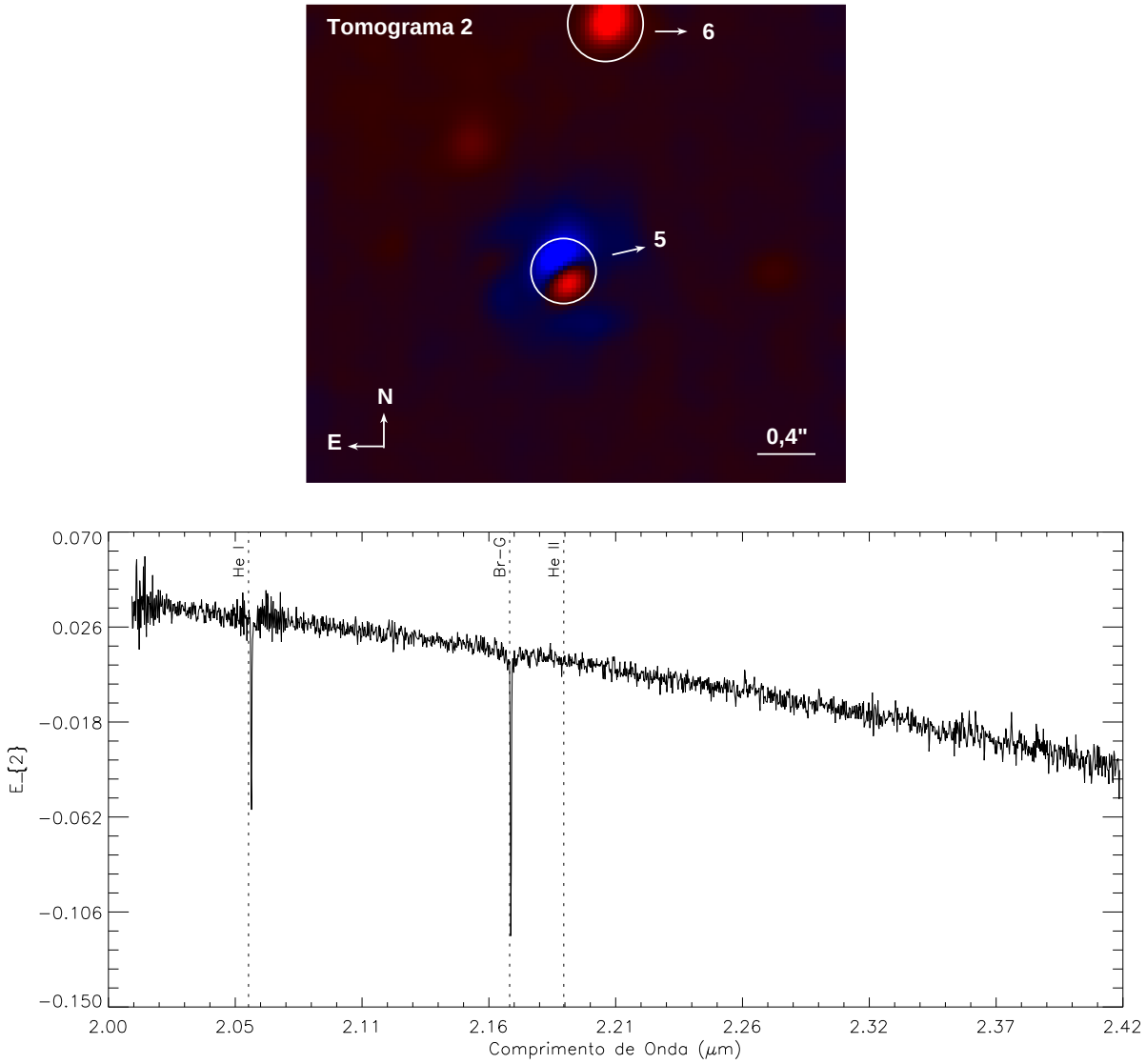
Figura 73 - Tomograma 1 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G23.96 – 0.1. O campo está todo correlacionada, sendo a região mais clara de maior correlação.



Fonte: Autor.

:

Figura 74 - Tomograma 2 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G23.96 – 0.1. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas.



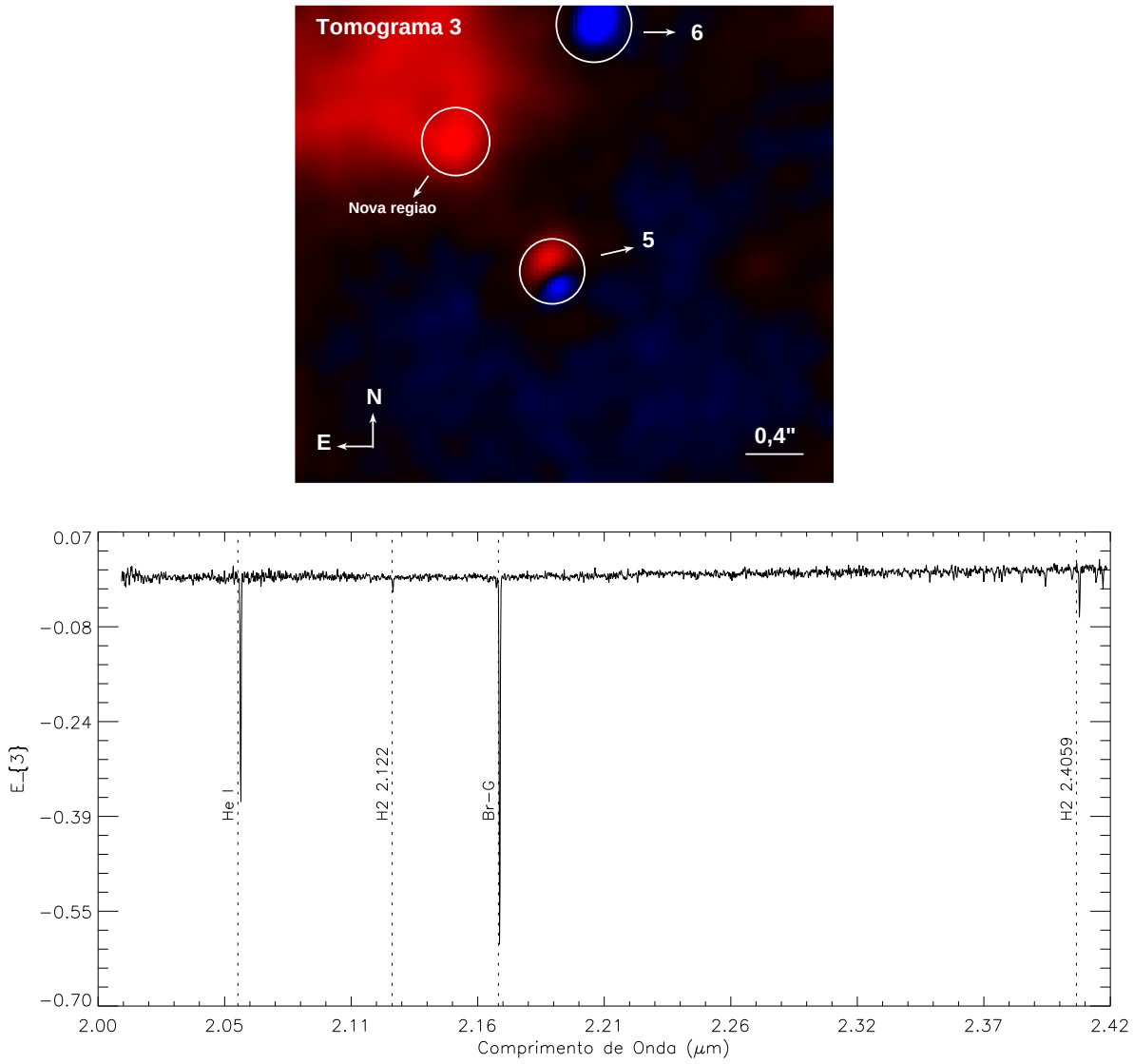
Fonte: Autor.

:

desta fonte. Os pontos espalhados não apresentaram significância para esse autovalor, que explica 0,4% do cubo de dados.

O terceiro autovalor, Figura 75, traz informações nebulares no campo. No tomograma é visto uma região anti-correlacionada à nordeste da fonte 5. Esta região é um dos cinco pontos vistos no primeiro tomograma. É nesta região que as linhas de He I(2,058 μm), Brγ, H_2 (2,112 μm) e H_2 (2,409 μm) detectadas no auto espectro são originadas. Este fato indica que esse ponto apresenta uma emissão estendida na direção nordeste. Já a fonte 5 apresenta um pequena anti-correlação, indicando que existe ainda gás emitindo próximo a esta fonte. Por fim, a fonte 6 apresenta apenas correlação no tomograma que deve indicar sua contribuição no contínuo para o auto espectro correspondente.

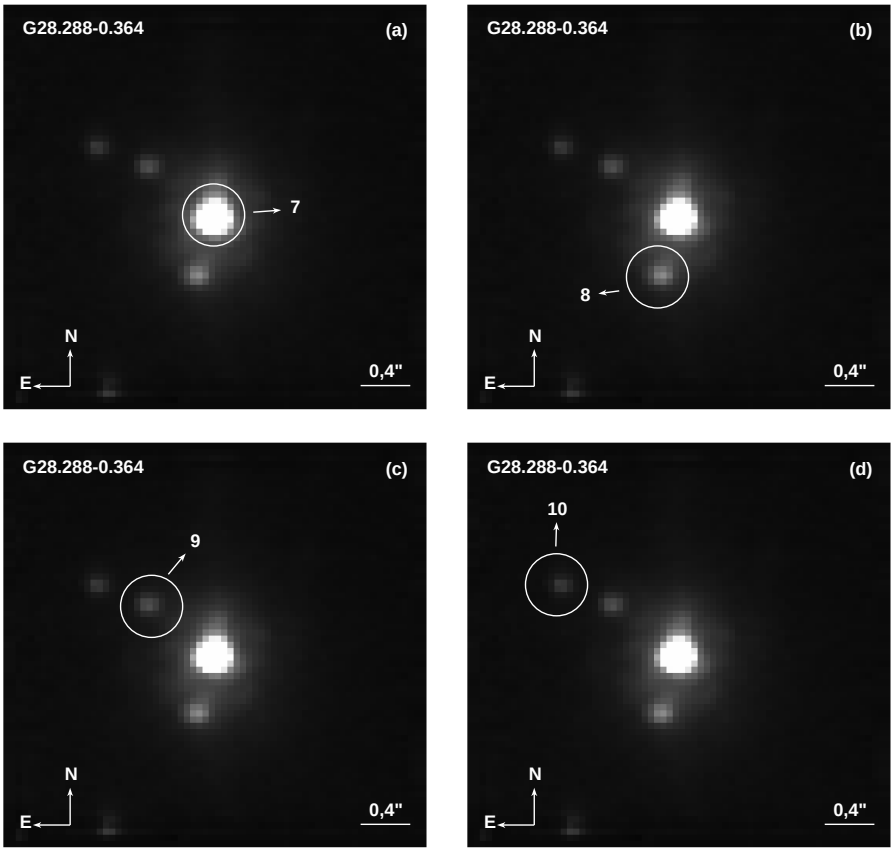
Figura 75 - Tomograma 3 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G23.96 – 0.1.As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas.



Fonte: Autor.

:

Figura 76 - Imagens região G28.288-0.364. A região demarcada pelo círculo representa o local e o tamanho da abertura de extração do espectro. A parte superior esquerda mostra a localidade da fonte 7, a parte superior direita mostra a localidade da fonte 8, a parte inferior esquerda mostra a fonte 9 e por fim parte inferior direita mostra o local da fonte 10.



Fonte: Autor.

:

5.5 G28.288-0.364

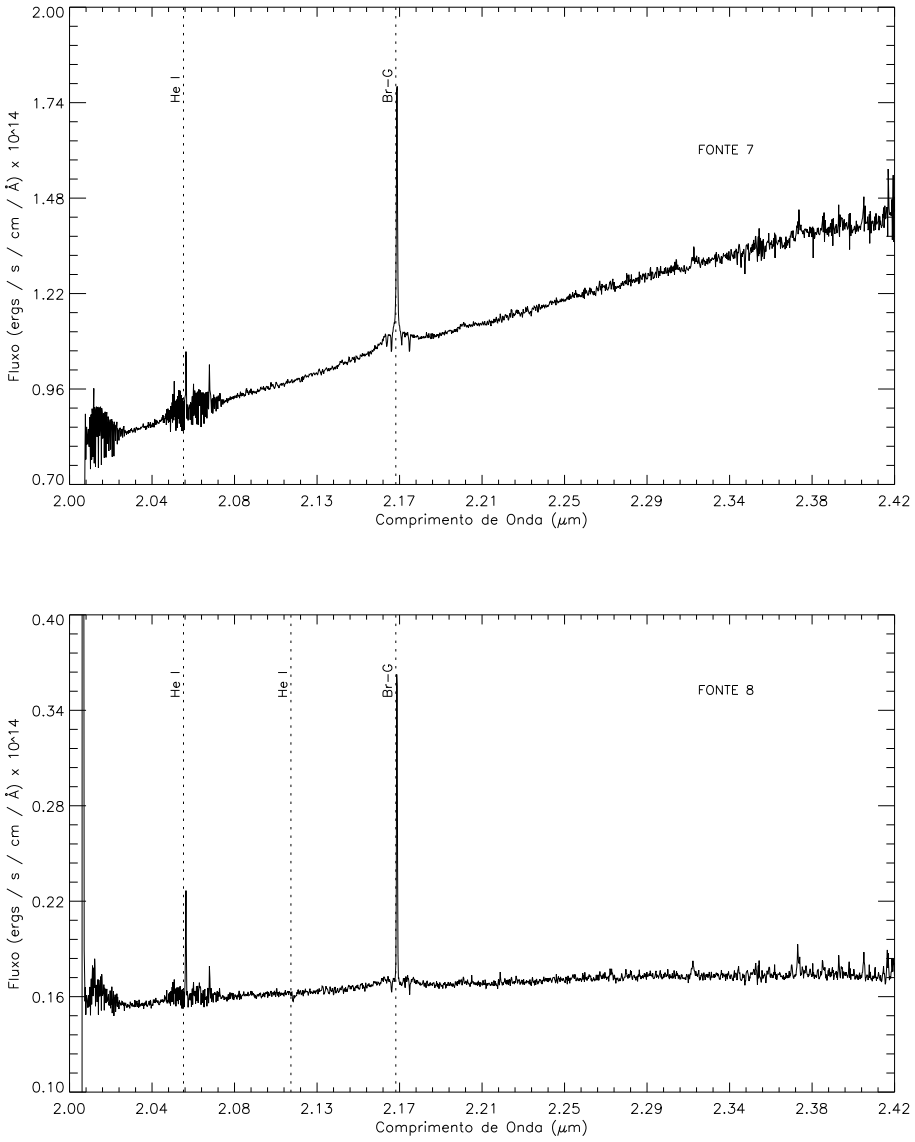
5.5.1 Espectroscopia unidimensional de fonte puntiforme

Na região G28.288-0.364 foram detectadas 4 fontes, que foram nomeadas como fonte 7, 8, 9 e 10. Na Figura 78 podem ser vistas a posição de cada fonte no campo de visada e na Figuras 77 e Figura 78 os espectros de cada fonte observada.

Em todos os espectros foram observadas apenas as linhas de Brγ e He I (2.058 μm) em emissão, exceto a fonte 8 que apresenta a linha de He I (2.1227 μm) em absorção. O fluxo e razão entre a linha de He e de H foram calculados e são apresentados na Tabela 8. Comparando os resultados das razões de linhas com os modelos do CLOUDY, definidos no Capítulo 3, foi determinado um intervalo de temperatura para cada fonte.

Para a fonte 7, a razão de linhas se enquadra em estrelas com temperaturas entre 25000 K e 32500 K. Este valor equivale a estrelas do tipo espectral entre B2 e O9, respectivamente, segundo calibração de Martins, Schaerer e Hillier (2005). Os resultados condizem com os trabalhos de Kurtz, Churchwell e Wood (1994) e Simpson e Rubin (1990).

Figura 77 - Espectros para cada fonte presente na região G28.288-0.364. As linhas detectadas são indicadas pelas linhas verticais tracejadas. O primeiro espectro refere-se à fonte 7 e o segundo à fonte 8.



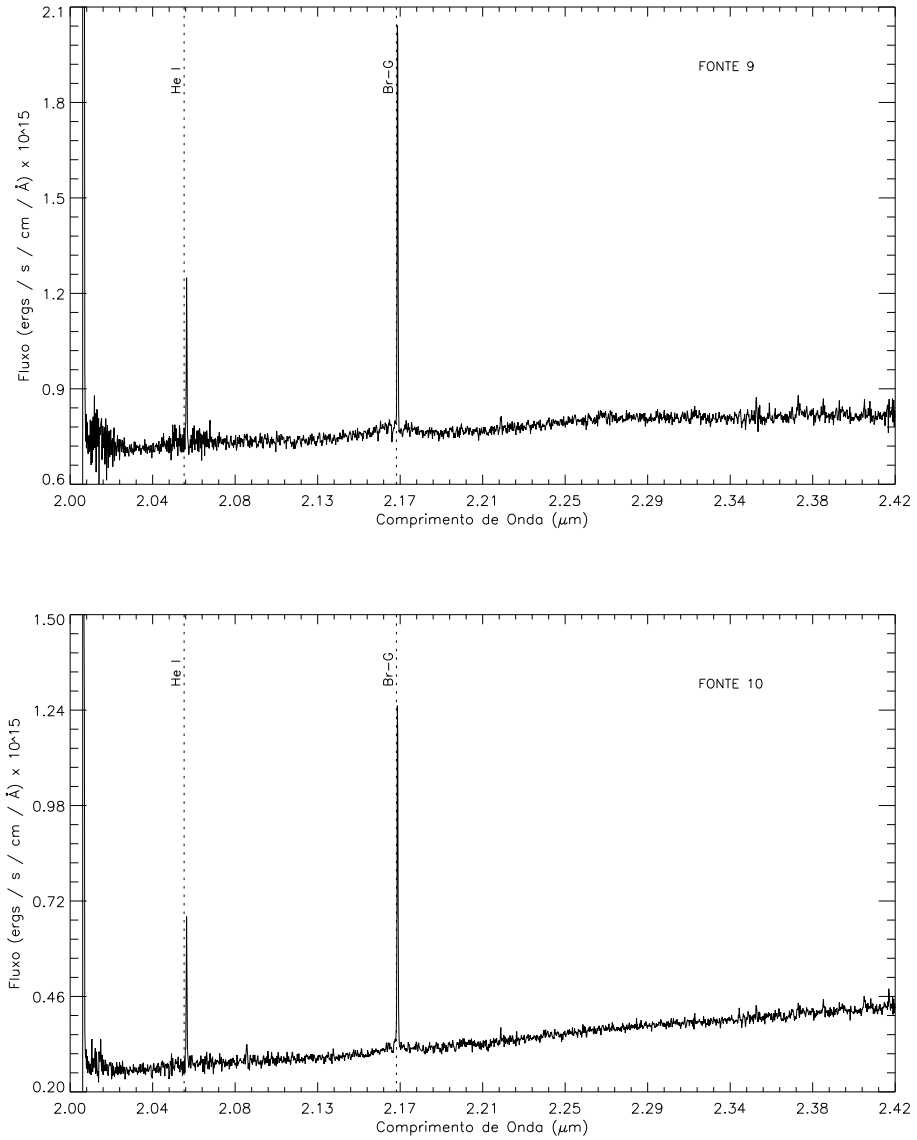
Fonte: Autor.

:

Tabela 8 - Fluxos das linhas detectadas.

Região	**Brγ** x 10^{-15} erg s^{-1} cm^{-2} Å^{-1}	**He I (2.058 μm)** x 10^{-14} erg s^{-1} cm^{-2} Å^{-1}	**razão He I/Brγ**	**tipo espectral**
fonte 7	44,4	8,14	0,18	B2 - O9
fonte 8	11,45	3,4	0,297	$\leq$ O9
fonte 9	7,19	2,056	0,286	$\leq$ O9
fonte 10	5,45	1,7	0,312	$\leq$ O9

Figura 78 - Espectros para cada fonte presente na região G28.288-0.364. As linhas detectadas são indicadas pelas linhas verticais tracejadas. O primeiro espectro refere-se à fonte 9 e o segundo à fonte 10.



Fonte: Autor.

:

Tabela 9 - Fluxos e razão de linhas corrigidas para as fontes detectadas.

Região	**Brγ** 10^{-15} **erg s^{-1} cm^{-2} Å^{-1}**	**He I (2.058 μm)** 10^{-15} **erg s^{-1} cm^{-2} Å^{-1}**	**razão He I/Brγ**	**tipo espectral**
fonte 8	5,88	1,25	0,21	B2 - O8
fonte 9	1,639	-	-	-
fonte 10	-	-	-	-

A razão de linha para as fontes 8, 9 e 10 é um valor 65% maior que o valor encontrado na fonte 7. Considerando a imagem obtida pelo cubo de dados, que pode ser vista na Figura 78, a fonte 7 é o objeto mais intenso da região e que deve contribuir com maior intensidade nas produções das linhas nebulares em todos os espectros da região. Assim, para evitar contaminações nebulares nos espectros das fontes menos intensas foi subtraído delas um espectro nebular 0,8" a sudoeste (ângulo de 212°) da fonte 7 com abertura de 0,5". Assim, dos espectros das fontes 8, 9 e 10 foi subtraído um espectro nebular. Os novos valores para os fluxos medidos da linha de Brγ e linha de He I podem ser vistos na Tabela 9.

A fonte 8, mesmo com a subtração, teve um valor para razão de linha superior que a encontrada para a fonte 7, indicando que ela deva ser mais quente da região. Comparando o valor encontrado com os modelos do CLOUDY, a estrela da fonte 8 está contida no intervalo entre 25.000 K e 33.000 K, o que corresponde um tipo espectral entre B2 e O8, respectivamente. Valor semelhante ao encontrado na fonte 7.

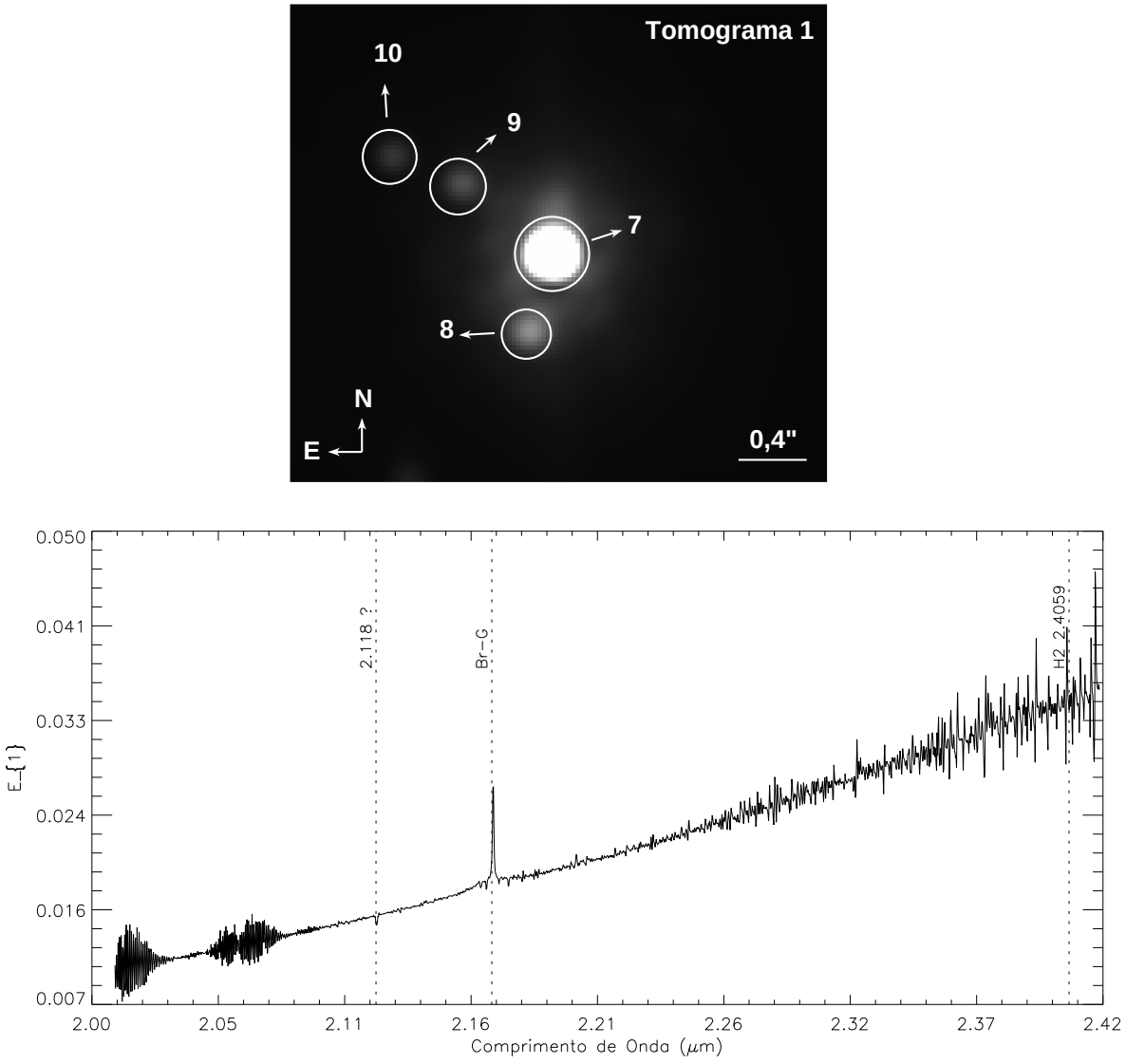
As demais fontes não apresentaram as linhas He I (2.058 μm), o que sugere que as fontes 9 e 10 são estrelas de baixa massa ou profundamente embebidas.

5.5.2 PCA

A Figura 79 apresenta o primeiro tomograma e seu primeiro auto espectro. No tomograma são vistas todas as fontes observadas pela espectroscopia. Já o primeiro auto espectro apresenta correlações com as linhas de Brγ e a linha desconhecida em 2,118 μm. A linha de Brγ deve ser relacionada à emissão nebular, pela forma que foram representadas pelo auto espectro. Pelo tomograma, a fonte 7 é a origem destas linhas por apresentar maiores correlações que os demais objetos. As demais fontes devem apresentar uma fraca contribuição, sendo ela no contínuo do auto espectro. Nenhum tipo espectral pode ser estimado com as linhas detectadas. As linhas visualizadas nos extremos do auto espectro são ruídos remanescente da redução de dados. Este autovalor explica 99,8% do cubo de dados.

No segundo autovalor, Figura 80, vemos o mesmo comportamento encontrado nos segundos autovalores das regiões analisadas anteriormente. A fonte 7 é a única que apresenta em seu auto espectro a correlação com os comprimentos de ondas menores e uma anti-correlação com os comprimentos de onda maiores indicados no tomograma.

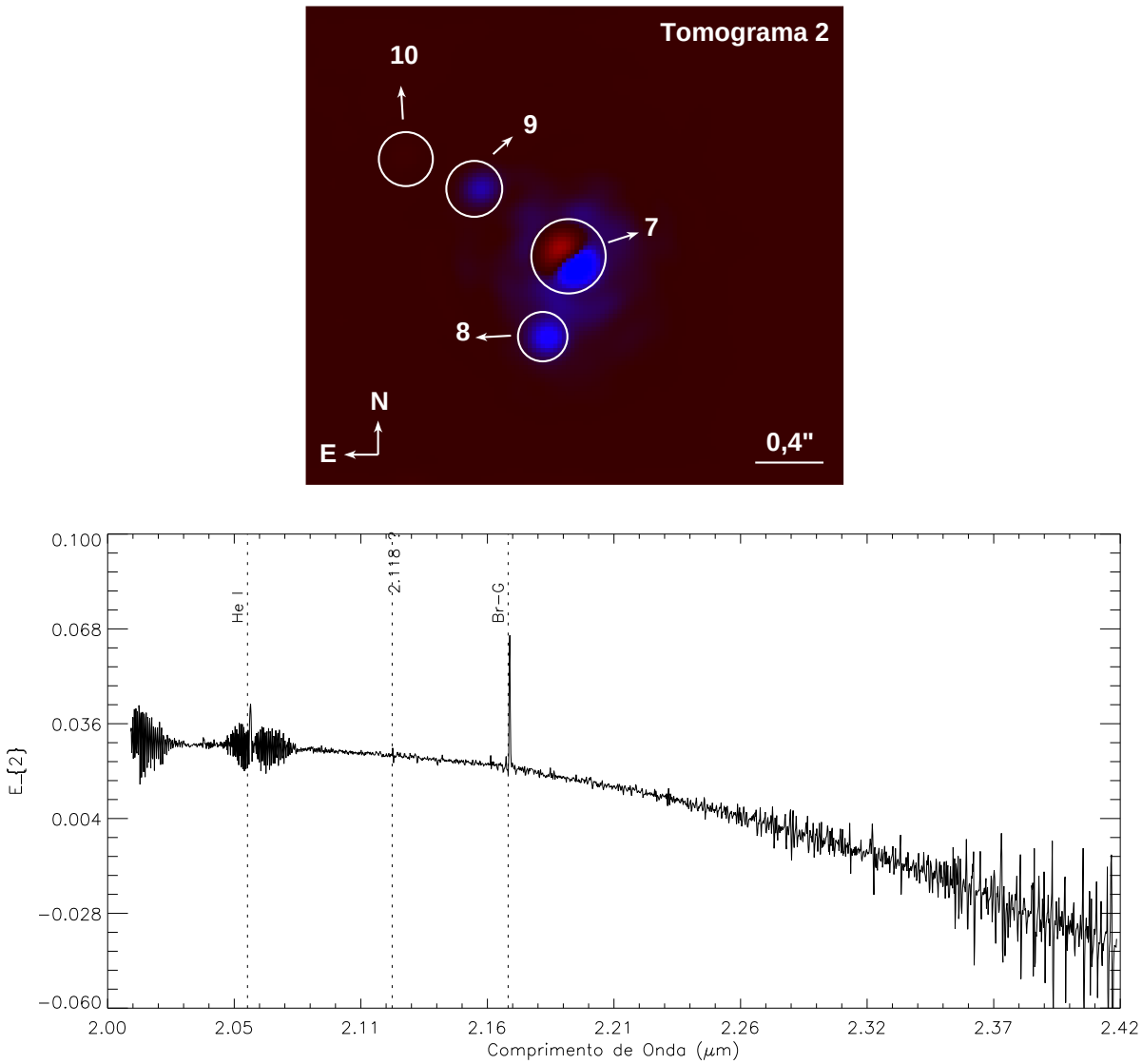
Figura 79 - Tomograma 1 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G28.288-0.364. O campo está todo correlacionada, sendo a região mais clara de maior correlação.



Fonte: Autor.

:

Figura 80 - Tomograma 2 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G28.288-0.364. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas.



Fonte: Autor.

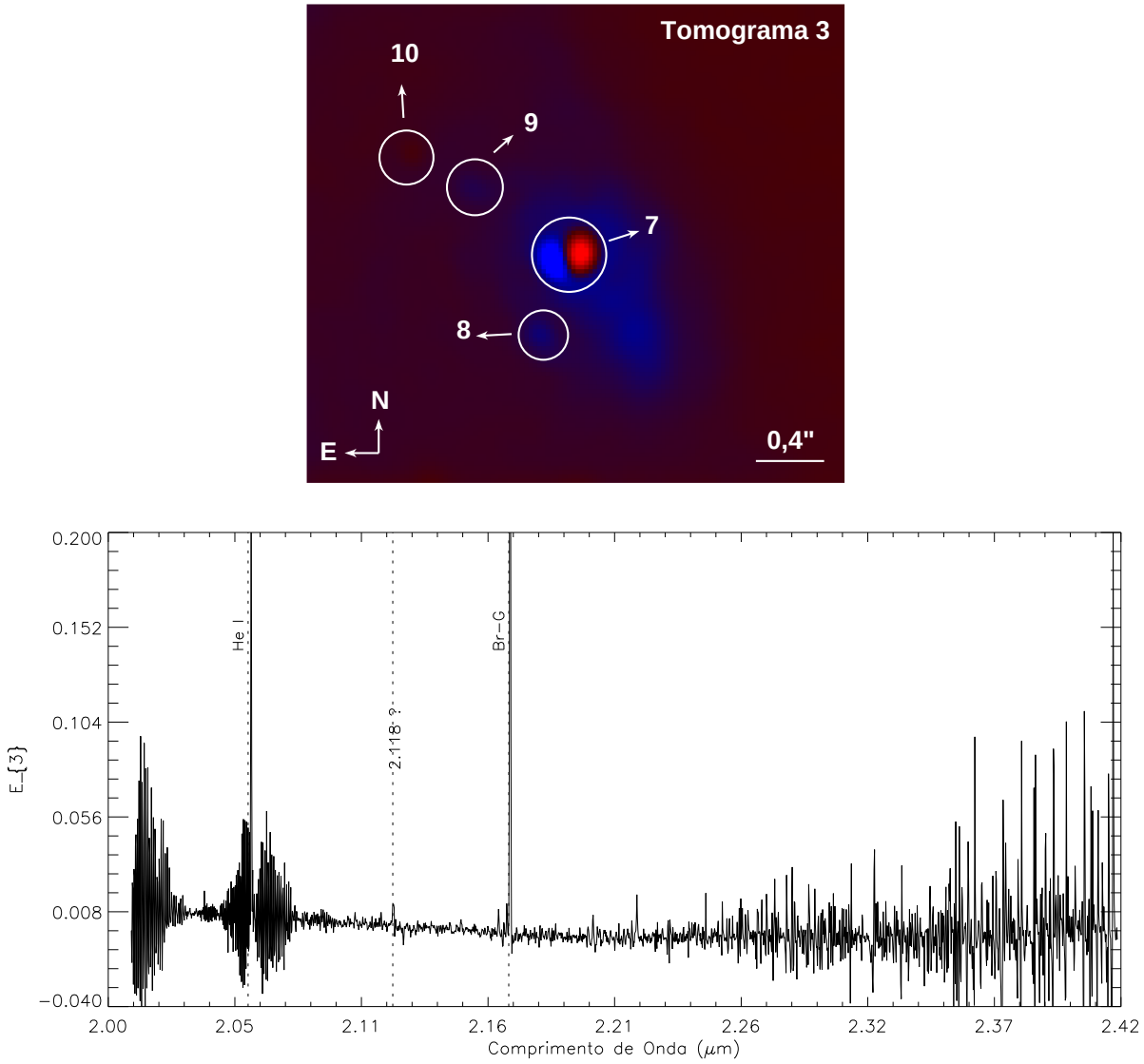
:

As demais fontes apresentam apenas correlação no tomograma, o que indica que elas só contribuíram nos comprimento de ondas menores no auto espectro, sendo a fonte 8 a que apresenta maior correlação entre os objetos mais fracos. Este autovalor explica 0,13% do cubo de dados.

No terceiro autovalor, Figura 81, que explica 0,006%, são detectadas duas linhas com alta correlação no auto espectro, sendo elas a linha de He I (2,058 μm) e Brγ. Estas linhas são originárias da fonte 7 conforme é visto no tomograma. Um estrutura correlacionada é vista à sudoeste da fonte 7, entretanto, nenhuma informação adicional pode ser obtidas devido ao baixo sinal/ruído do auto espectro.

No quarto autovalor, Figura 82 é detectada uma fraca anti-correlação da linha de He I (2,1227 μm), o que indica que esta linha é dominada pelo ruído da medida. Pelo

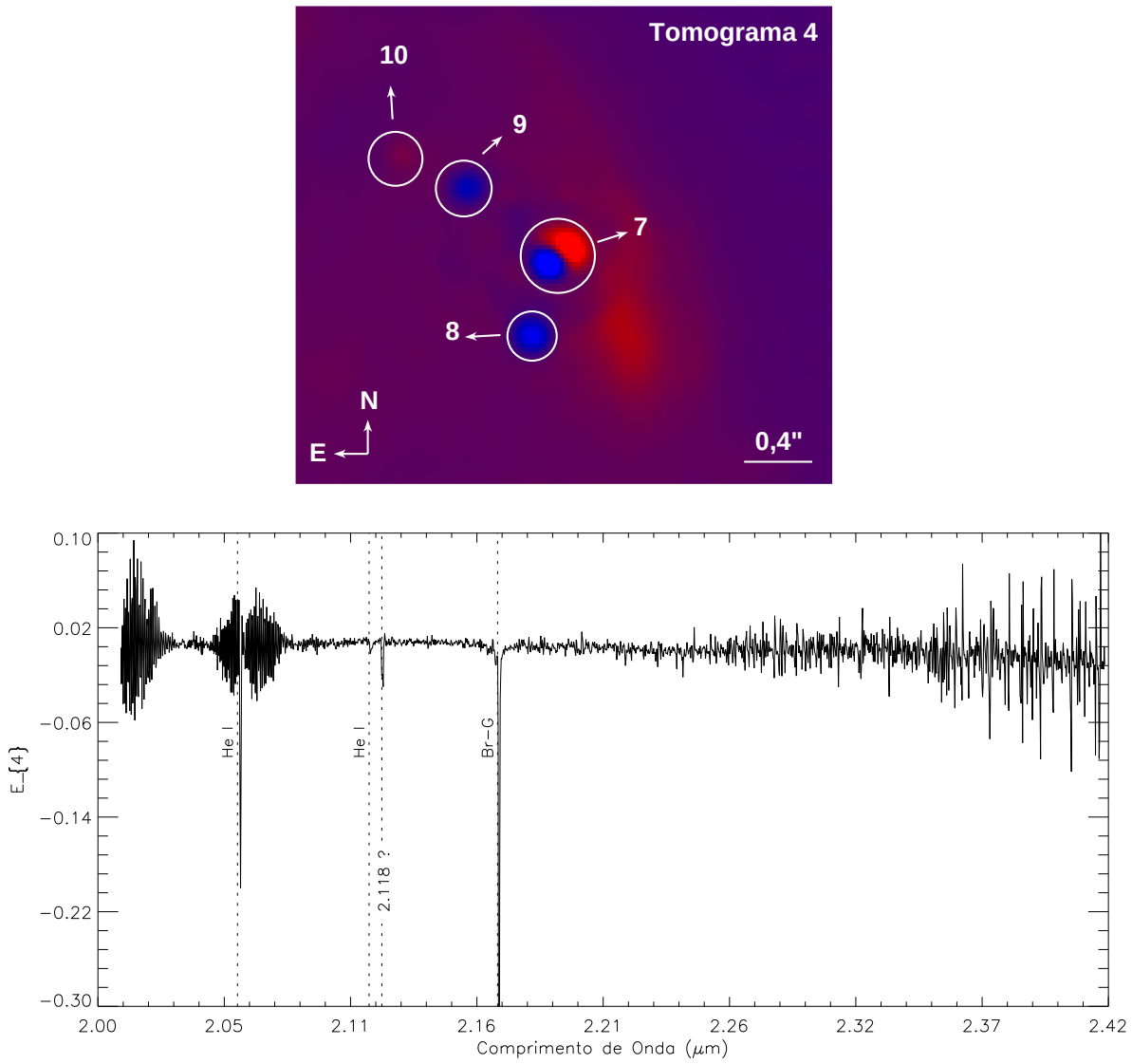
Figura 81 - Tomograma 3 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G28.288-0.364. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas.



Fonte: Autor.

:

Figura 82 - Tomograma 4 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G28.288-0.364. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas.



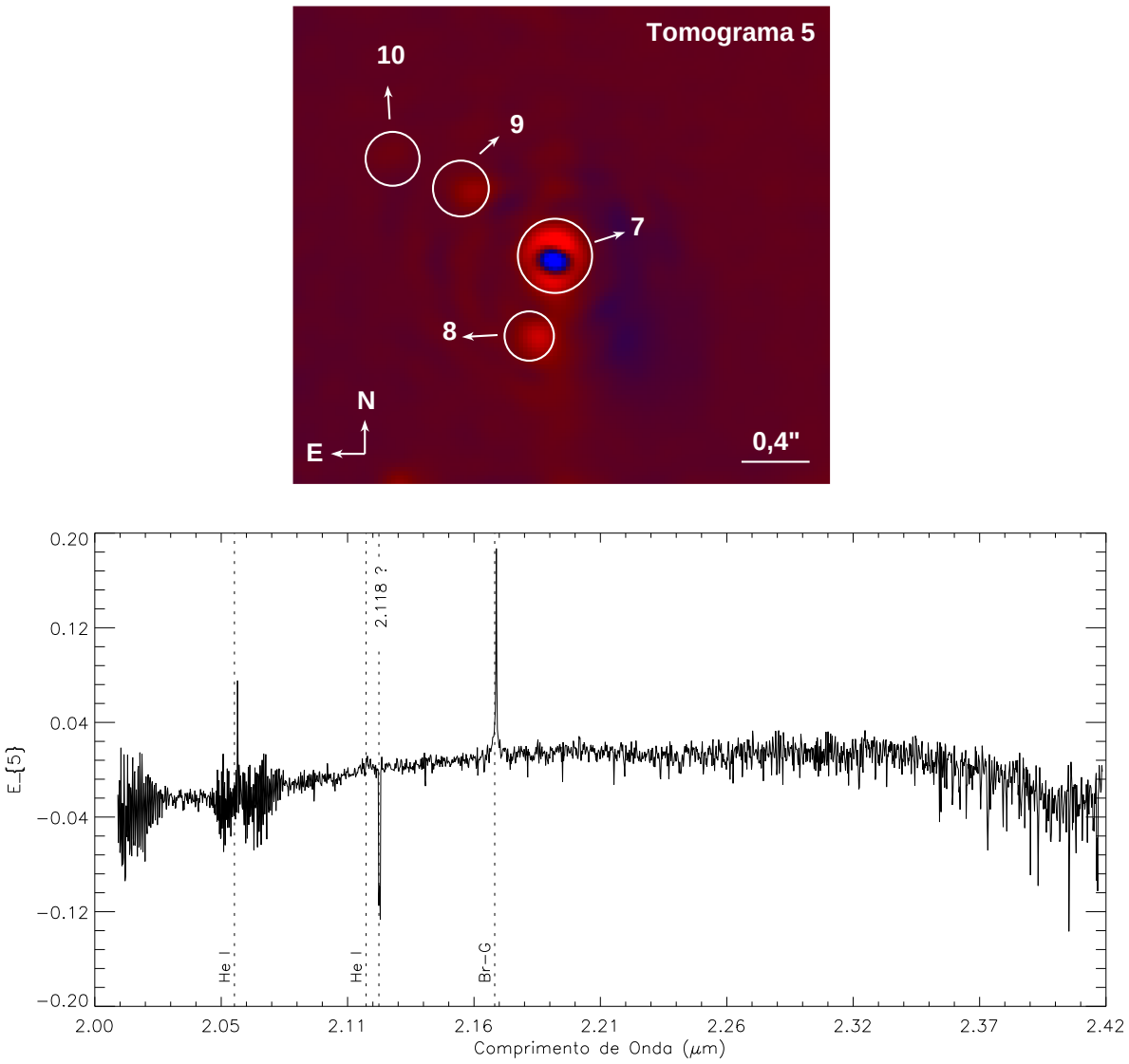
Fonte: Autor.

:

tomograma, esta linha é produzida pela fonte 7, indicando que a mesma deva ser a fonte mais quente da região. A estrutura visualizada a sudoeste da fonte 7 é vista novamente e ela deve estar relacionada com a linha desconhecida em 2,118 μm. As demais fontes observadas no tomograma, estão correlacionadas e nenhuma informação é possível, pelo baixo sinal/ruído visto no auto espectro com intensidade positivas. Este autovalor explica 0,004% das informações contidas no cubo de dados.

Já o quinto autovalor, Figura 83, uma peculiaridade é vista. Uma região anti-correlacionada envolvendo uma região correlacionada no local onde se encontra a fonte 7. Ao analisar o auto espectro associado, é visível que a região correlacionada está relacionada com as linhas de He I (2,1227 μm) e Brγ e a região anti-correlacionada está relacionada aos comprimentos de onda menores que 2 μm. Este comportamento pode evidenciar a

Figura 83 - Tomograma 5 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G28.288-0.364. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas.



Fonte: Autor.

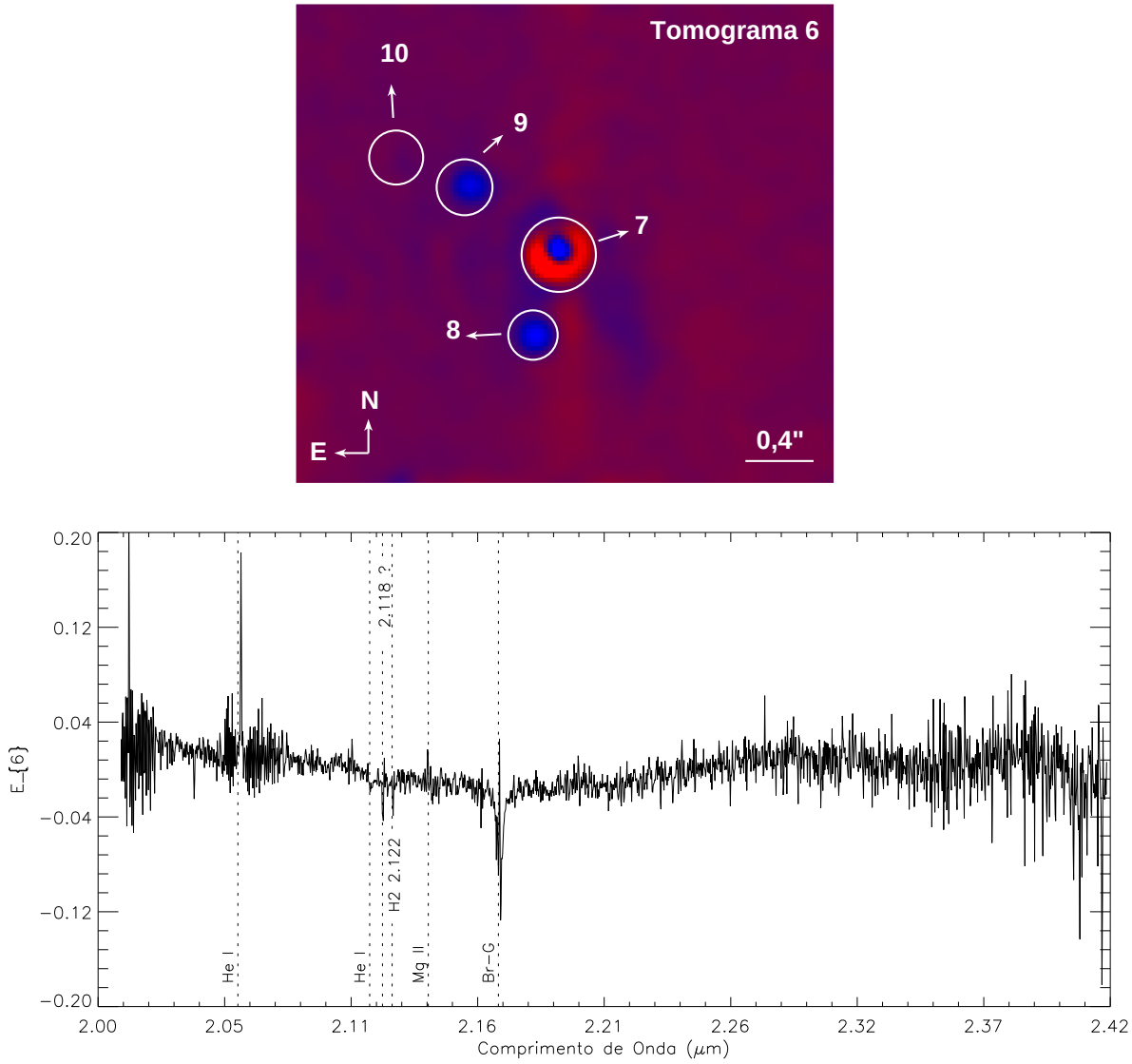
:

área de maior absorção da radiação da fonte. A linha em 2,118 μm detectada no auto espectro está relacionada ao norte da fonte 7 na área em branco do tomograma. As fontes 8 e 9 visualizadas apresentam pouca contribuição no contínuo do auto espectro nos comprimentos de onda menores que 2 μm. Este autovalor explica 0,001%.

O sexto autovalor, Figura 84, traz informações mais relevantes sobre as fontes 8 e 9, indicando que ambas apresentam linhas nebulares de He I (2,058 μm) e Brγ. A fonte 10 já mostra sinal que seja um objeto de baixa massa, por não apresentar nenhuma correlação neste autovalor. Para a fonte 7, as informações são as mesmas apresentadas anteriormente, apenas suas linhas foram apresentadas anti-correlacionadas para distinguir a sua emissão das fontes mais fracas. Este autovalor explica 0,0003%.

O último autovalor analisado para esta região, Figura 85, traz informações sobre

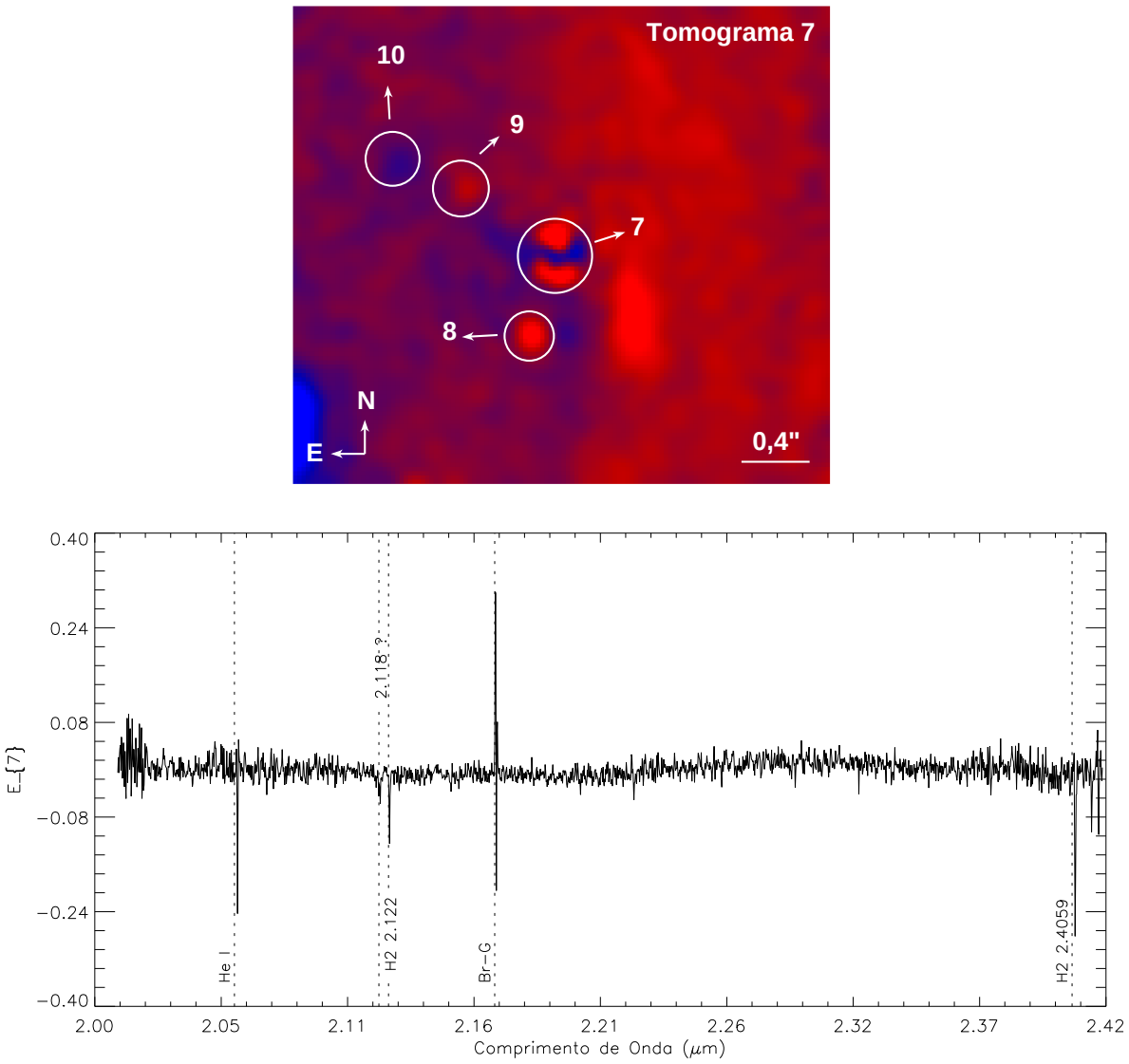
Figura 84 - Tomograma 6 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G28.288-0.364. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas.



Fonte: Autor.

:

Figura 85 - Tomograma 7 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G28.288-0.364. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas.



Fonte: Autor.

:

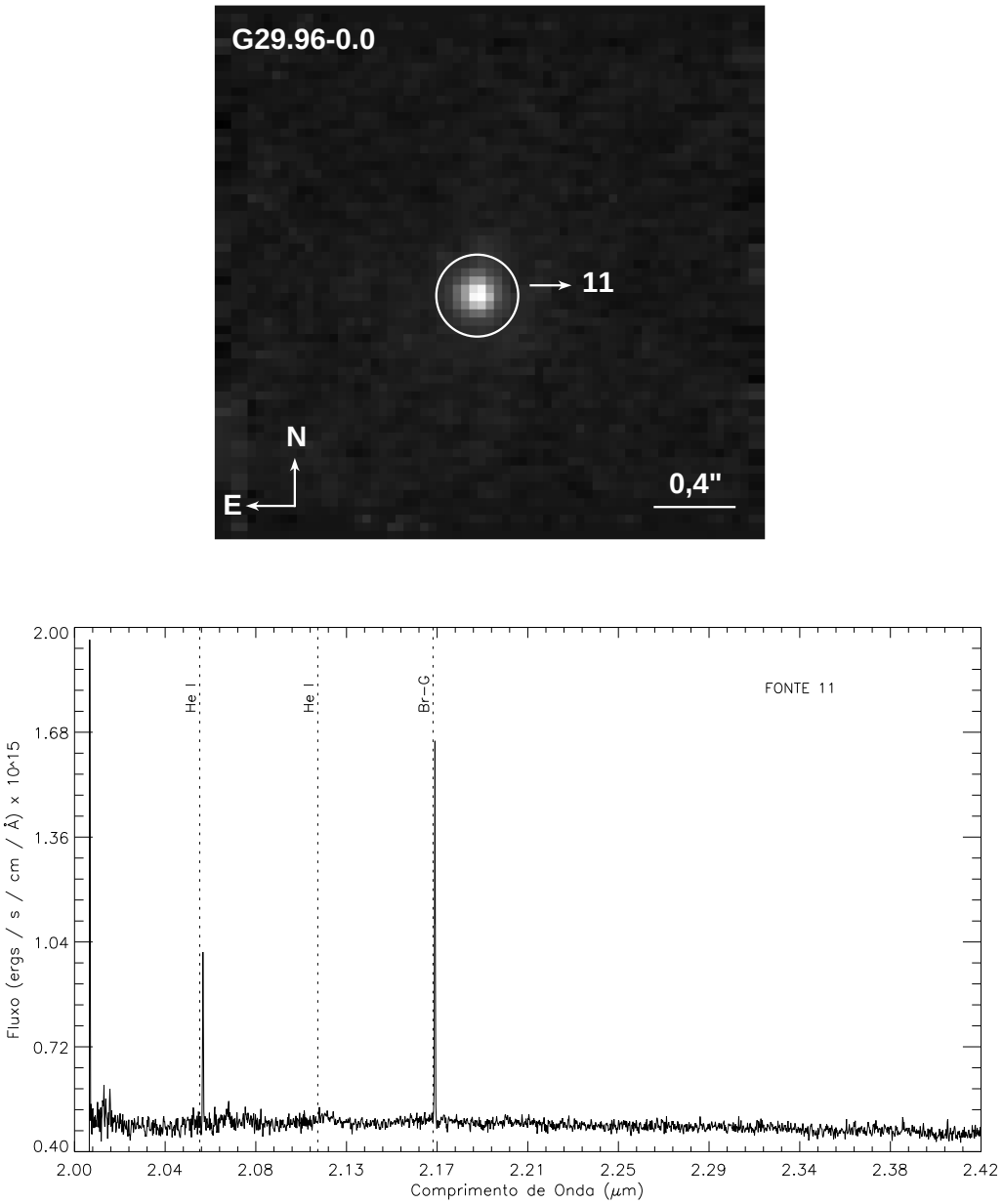
o gás presente no campo de visada. Nele é visto um gás anti-correlacionado à oeste das fontes, indicando um possível disrupção do gás da nuvem natal. À leste é vista uma forte correlação com a linha de Brγ, o que pode indicar a presença de um outro objeto no aglomerado. Este autovalor explica 0,0002% do cubo de dados.

5.6 G29.96-0.0

5.6.1 Espectroscopia unidimensional de fonte puntiforme

Esta é mais uma fonte (Figura 86) para a qual apenas as linhas de Brγ e de He I (2,058 μm) em emissão foram observadas. O espectro obtido difere de outros trabalhos da literatura pela não detecção da linha de He I (2,112 μm), sendo esta diferença

Figura 86 - Imagem da região G29.96-0.0 e espectro da fonte 11. A região demarcada pelo círculo representa o local e o tamanho da abertura de extração do espectro. As linhas detectadas são indicadas pelas linhas verticais tracejadas.



Fonte: Autor.

:

possivelmente causada pela baixa razão sinal/ruído dos dados deste projeto.

Os fluxos medidos para as linhas foram 5,05× 10^{-15} erg s^{-1} cm^{-2} $Å^{-1}$ para o Brγ e 2,39× 10^{-15} erg s^{-1} cm^{-2} $Å^{-1}$ para a linha de He I (2,058 μm). A razão entre as linhas de He I e Brγ foi 0,47, maior valor encontrado entre as fontes observadas na amostra desta tese. Com este valor e comparando com os modelos do CLOUDY, o intervalo espectral encontrado para a fonte 11 está entre O7 e B2 seguindo a calibração de Martins, Schaerer e Hillier (2005).

Esta classificação condiz com os resultados de outros trabalhos em FIR e MIR

que utilizam razões entre linhas de [Ne III] (57 μm), [O III] (52,88 μm), [Ne III] (36 μm) e [S III] (19,33 μm) para determinação do tipo espectral (RUBIN, 1985; SIMPSON *et al.*, 1995; AFFLERBACH; CHURCHWELL; WERNER, 1997; WATARAI; MATSUHARA; TAKAHASHI; MATSUMOTO, 1998). Contudo, este resultado sugere um tipo espectral mais frio que o apresentado em estudos em rádio (WOOD; CHURCHWELL, 1989b; KIM; KOO, 2001) e em outros resultados em NIR com espectroscopia (HANSON; LUHMAN; RIEKE, 2002; WATSON; HANSON, 1997; MARTÍN-HERNÁNDEZ *et al.*, 2003).

Essa diferença em rádio pode acontecer pelo fato de abranger uma área 3 vezes maior que a do NIFS. Já a diferença nos resultados da espectroscopia pode ser explicada pela resolução escolhida em cada trabalho e o método de redução que removeu a contaminação nebular e pode revelar informações aqui não detectadas, como no caso de Watson e Hanson (1997) e Martín-Hernández *et al.* (2003) que conseguiram observar linhas fotosféricas na fonte.

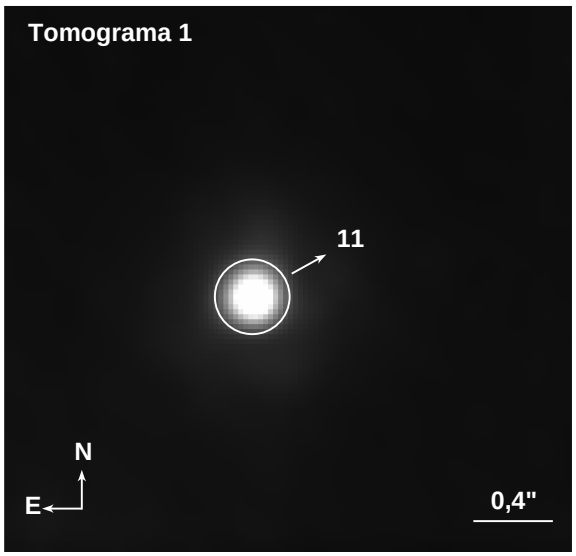
5.6.2 PCA

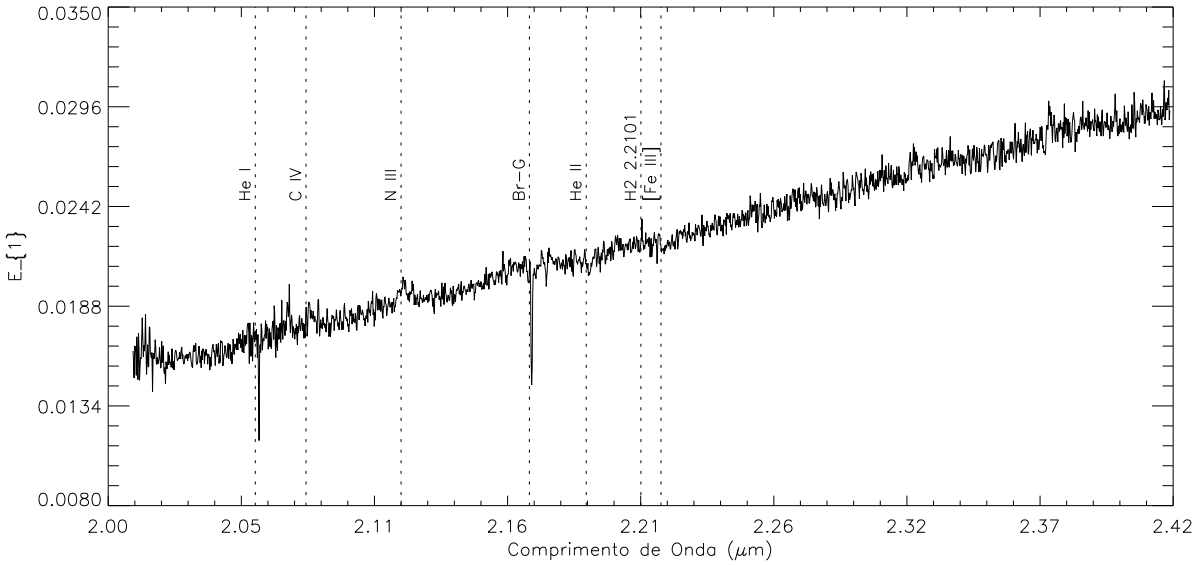
A Figura 87 apresenta o primeiro tomograma e seu primeiro auto espectro. O primeiro auto espectro desta região difere do espectro obtido pela espectroscopia. Ao contrário do que foi visto na espectroscopia, com o uso do PCA foi possível detectar as linhas fotosféricas da fonte 11. As linhas fotosféricas detectadas foram: He I (2,058 μm), Brγ, He II (2,1885 μm), de C IV (2,078 μm) e N III (2,155 μm). Por estas linhas, essa fonte poderia ser classificada como uma estrela do tipo O5-O4 (HANSON; CONTI; RIEKE, 1996; HANSON *et al.*, 2005). Este resultado é condizente com os encontrados por Watson e Hanson (1997), Martín-Hernández *et al.* (2003). Este autovalor explica 92,7% do cubo de dados.

O segundo autovalor, mostrado na Figura 88, detecta o gás que envolve a fonte. No auto espectro foram detectadas as linhas He I (2,058 μm), He I (2.1127 μm), Brγ, [Fe III] (2.218 μm) e [Fe III] (2.242 μm) todas anti-correlacionadas. já no tomograma, a fonte 11 também é visualizada com fraca anti-correlação, o que indica que a fonte ainda está embebida pelo gás. Outro ponto interessante é a concentração das linhas nebulares ao sul do objeto. Este fato pode ser explicado pela morfologia da região UCHII, que seria cometária.

O último autovalor utilizado é mostrado na Figura 89. Nele o ruído quase domina o auto espectro, contudo, é possível verificar que a única linha detectada, Brγ, apresenta asas em anti-correlação e correlação. Este comportamento da linha é relacionado à cinemática do gás circunstelar (RICCI; STEINER; GIANSANTE, 2015; RICCI; STEINER; MENEZES, 2014; MENEZES; STEINER; RICCI, 2014), o tomograma associado indica que a cinemática ocorre em um ângulo de 328°. Contudo, não foi possível estabelecer que tipo de cinemática ela representa. Este autovalor explica 0,1% do cubo de dados. Após este autovalor o ruído domina e nenhuma informação pode ser obtida.

Figura 87 - Tomograma 1 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G29.96-0.0. O campo está todo correlacionada, sendo a região mais clara de maior correlação.

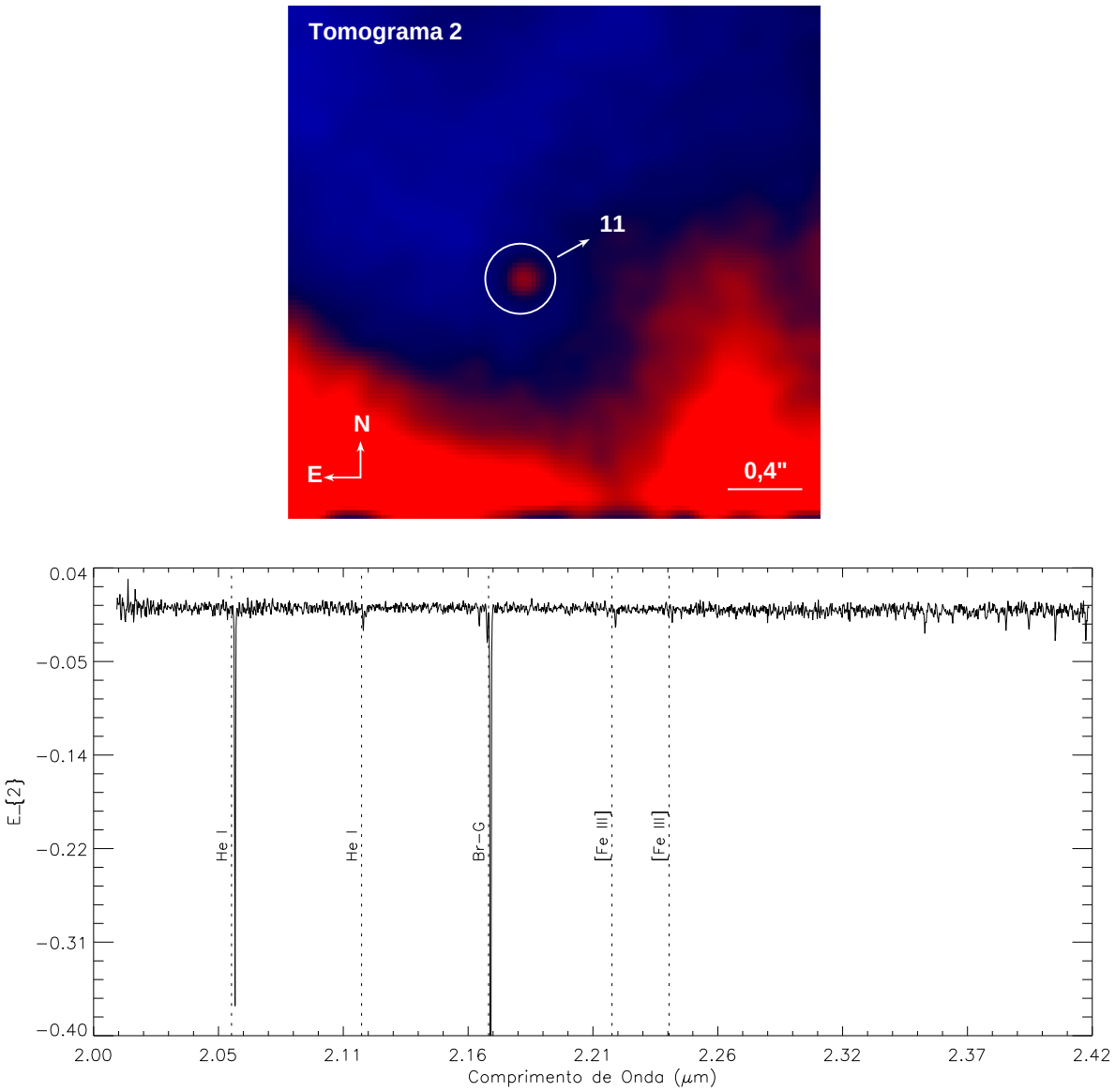




Fonte: Autor.

:

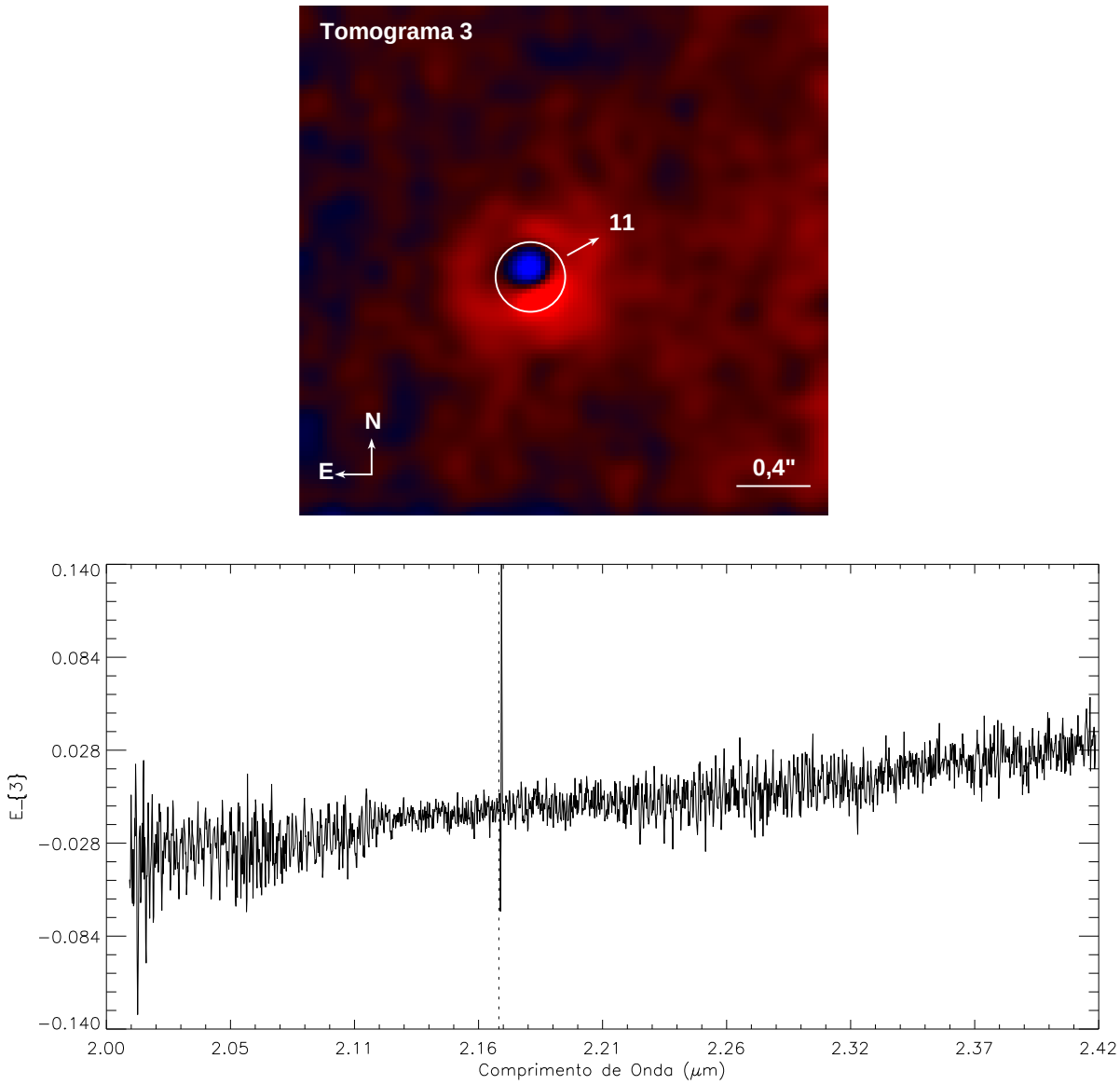
Figura 88 - Tomograma 2 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G29.96-0.0. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas.



Fonte: Autor.

:

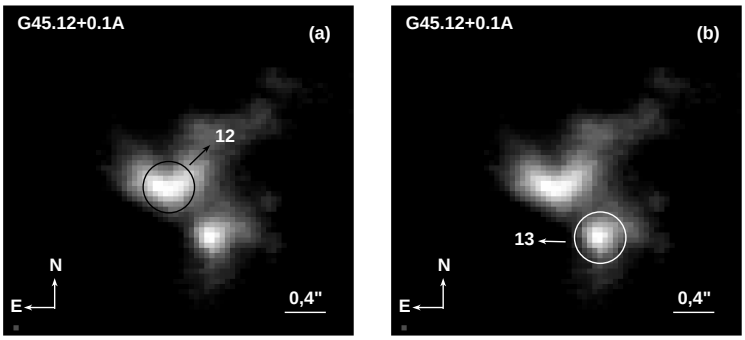
Figura 89 - Tomograma 3 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G29.96-0.0. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas.



Fonte: Autor.

:

Figura 90 - Imagens da região G45.12+0.1A. A região demarcada pelo círculo representa o local e o tamanho da abertura de extração do espectro. A imagem à esquerda mostra a posição da fonte 12 e a imagem à direita mostra a posição da fonte 13.



Fonte: Autor.

:

5.7 G45.12+0.1A

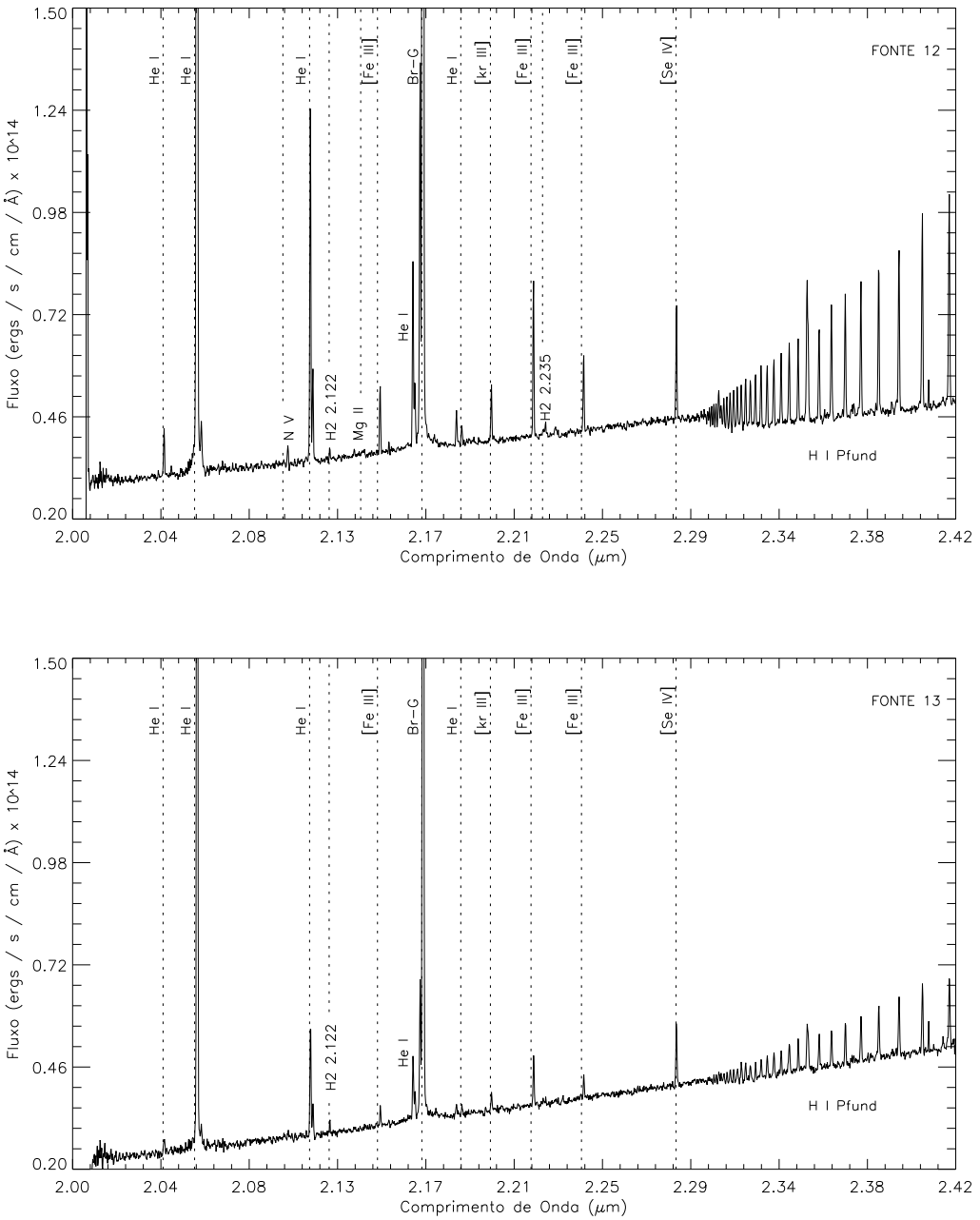
5.7.1 Espectroscopia unidimensional de fonte puntiforme

Região com duas fontes próximas e muita nebulosidade, como pode ser visto na Figura 90, o que explica extinção encontrada por Lumsden e Puxley (1996). Não foi possível resolver completamente duas fontes, sendo HWHM das PSFs obtidas de 1,3". Este fato deve ter ocorrido pela proximidade de 0,5" entre estas fontes o que dificulta a análise dos espectros. Assim, não é possível determinar o espectro de cada fonte sem sobreposição de suas PSFs. Entretanto, foi obtido o tipo espectral para ambas as fontes utilizando as informações obtidas em seus espectros. Como, os resultados aqui encontrados devem ser encarados como aproximações para o tipo espectral.

Em virtude do exposto acima, as fontes apresentam espectros semelhantes, diferindo no avermelhamento, com a fonte 13 apresentando um valor maior. Outro fato interessante é que todas as linhas detectadas em ambos os espetros são nebulares. O fluxo medido para o Brγ da fonte 13 é 1,18$\times$ 10^{-12} erg s^{-1} cm^{-2} Å^{-1} e para a fonte 14 é 4,27$\times$ 10^{-13} erg s^{-1} cm^{-2} Å^{-1}. As demais identificações e informações para cada fonte da região são vistas na Tabela **??**.

A detecção das linhas de [Se IV], [Fe III], [Kr III], com potenciais de ionização de 42,9 eV, 30,7 eV e 37,0 eV, respectivamente, não são comuns em UCHIIs. Trabalhos de Hanson, Luhman e Rieke (2002), Bik, Kaper, Hanson e Smits (2005), Bik, Kaper e Waters (2006) não detectaram tais linhas em suas amostras. Estas linhas tinham sidos detectadas apenas em nebulosas planetárias frias (37000 - 56000 K) (GEBALLE; BURTON; ISAACMAN, 1991). Porém, recentes trabalhos de Lumsden e Puxley (1996), Blum e McGregor (2008), Blum e McGregor (2009) também detectaram estas linhas e discutem que estrelas O quentes (mais quentes que estrelas O6) e em densas regiões H II podem produzi-las. Já a detecção das linhas [Fe III] e de HI da série de Pfund mostram que esta região apresenta alta densidade (OKUMURA *et al.*, 2001; BIK *et al.*, 2008)

Figura 91 - Espectros para cada fonte presente na G45.12+0.1A. As linhas detectadas são indicadas pelas linhas verticais tracejadas. A figura acima mostra a o espectro da fonte 12 e a abaixo mostra o espectro da fonte 13.



Fonte: Autor.

:

Utilizando a razão de linhas do He I (2,112 μm) e Brγ e comparando com os modelos feitos no CLOUDY, ambas as fontes podem ser classificadas entre O6 e O3, valor condizente com as linhas detectadas pelas espectroscopia dos objetos. Os resultados também são condizentes com as classificações de Wood e Churchwell (1989b), Vig *et al.* (2006), Blum e McGregor (2008) e Lumsden e Puxley (1996), que encontraram o tipo espectral de mais quente que O6.

5.7.2 PCA

O primeiro autovalor, Figura 92 explica 89,3% do cubo de dados. No tomograma são vistas as fontes 12 e 13, como também um pequeno filamento à noroeste da fonte 12. O auto espectro é semelhante ao encontrado pela fonte 12 na espectroscopia, sendo detectadas as mesmas linhas descritas na Tabela **??**.

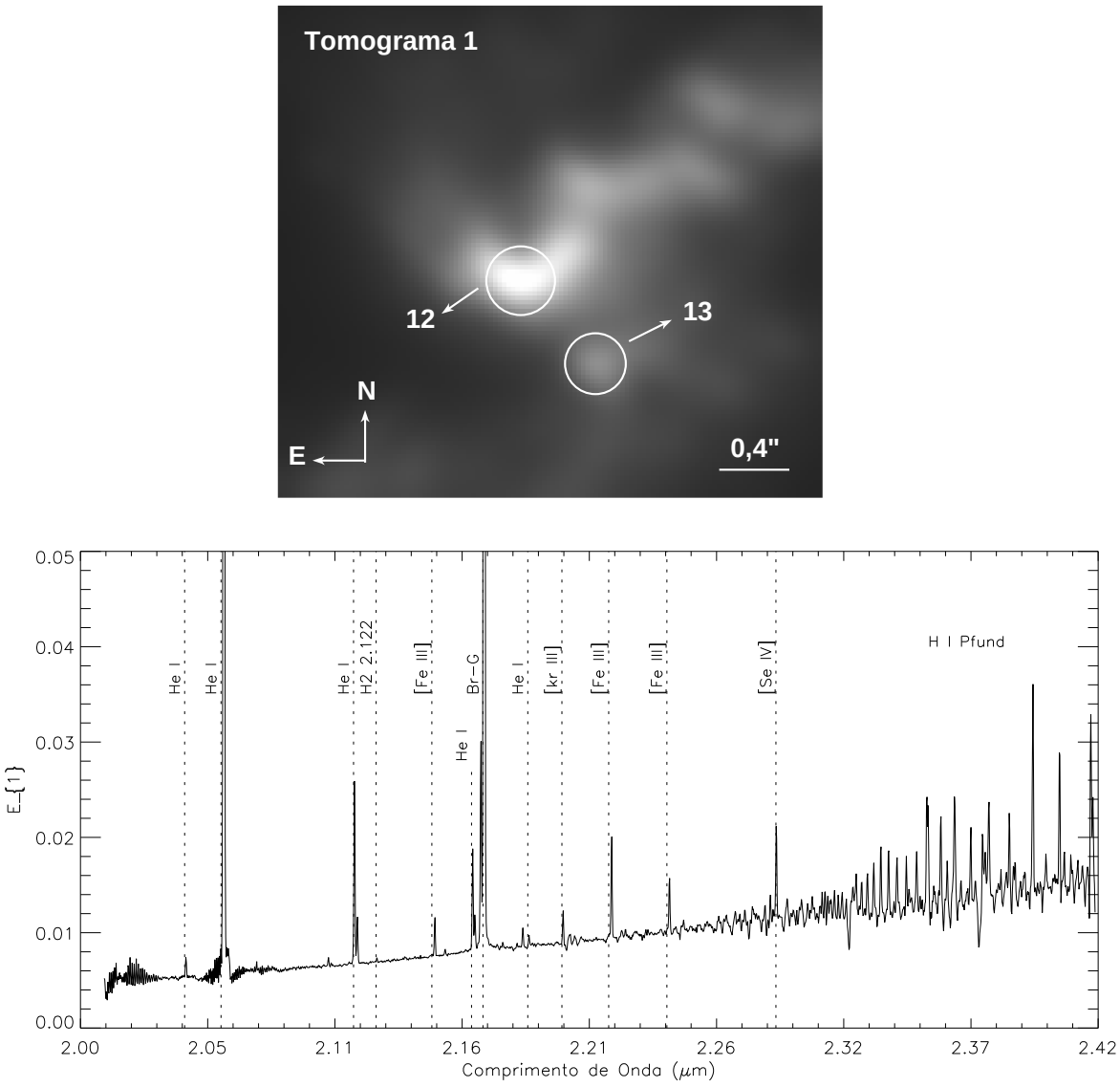
A Figura 93 mostra o segundo autovalor onde são vistas as linhas de He I (2,058 μm) e Brγ em correlação e com o pico da linha em anti-correlação. Nele é evidenciada a fonte 13 correlacionada e o filamento à noroeste da fonte 12 anti-correlacionada. Entretanto, apenas as linhas de He I (2,058 μm) e Brγ anti-correlacionadas são relacionadas ao filamento. As demais linhas identificadas são correlacionadas e são relacionadas à fonte 13, indicando a presença de um fonte quente neste local. Este autovalor explica 7,8% do cubo de dados.

Já o terceiro autovalor mostra asas correlacionadas e anti-correlacionadas para todas as linhas detectadas e que são mostradas na Figura 94. Este comportamento indica a presença de uma cinemática do gás (RICCI; STEINER; GIANSANTE, 2015; RICCI; STEINER; MENEZES, 2014; MENEZES; STEINER; RICCI, 2014) como disco de acreção e efluxos. As características vistas no tomograma associado sugerem a presença de disco de acreção a nordeste (referente às asas correlacionadas) e sudoeste (referente à asa anti-correlacionada) da fonte 12. A falta da detecção da banda de CO pode ser explicada pela alta densidade da região e, assim, apenas as camada externas do disco de acreção são visualizadas (BIK *et al.*, 2008). Este autovalor explica 2% do cubo de dados.

No quarto autovalor todas as estruturas evidenciadas nos autovalores anterior aparecem juntas, conforme é mostrado na Figura 95. As linhas de Brγ, He I (2,112 μm), He I (2,058 μm) e [Se IV] (2,218 μm) correlacionas são relacionadas à fonte 12. Já as linhas de He I (2,058 μm), a série de Pfund e Brγ anti-correlacionadas são relacionadas apenas à fonte 13 e ao filamento. Apenas as linhas de [Fe III] apresentaram asas correlacionadas e anti-correlacionadas sugerindo a presença de uma bolha de gás altamente ionizado se expandindo. Este autovalor explica 0,4% do cubo de dados.

Os autovalores 5 e 6 (Figuras 96 e 97, respectivamente) desvendam o filamento em 3 objetos com presença das linhas de Brγ e He I (2,112 μm). As demais estruturas presente no tomogramas e suas correspondências com o auto espectro não ficaram claras e nenhuma informação revelante pode ser obtida.

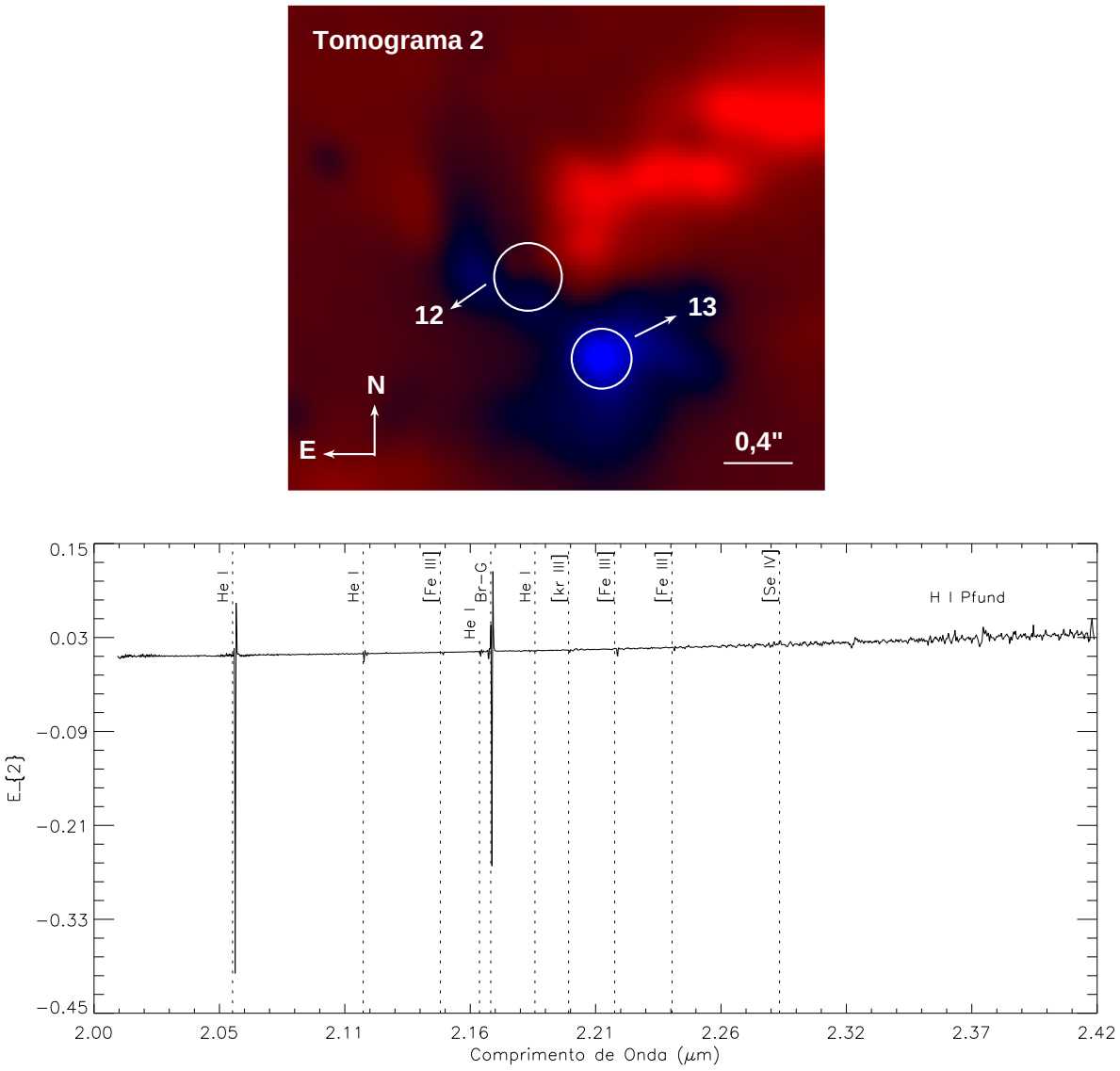
Figura 92 - Tomograma 1 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G45.12+0.1A. O campo está todo correlacionada, sendo a região mais clara de maior correlação.



Fonte: Autor.

:

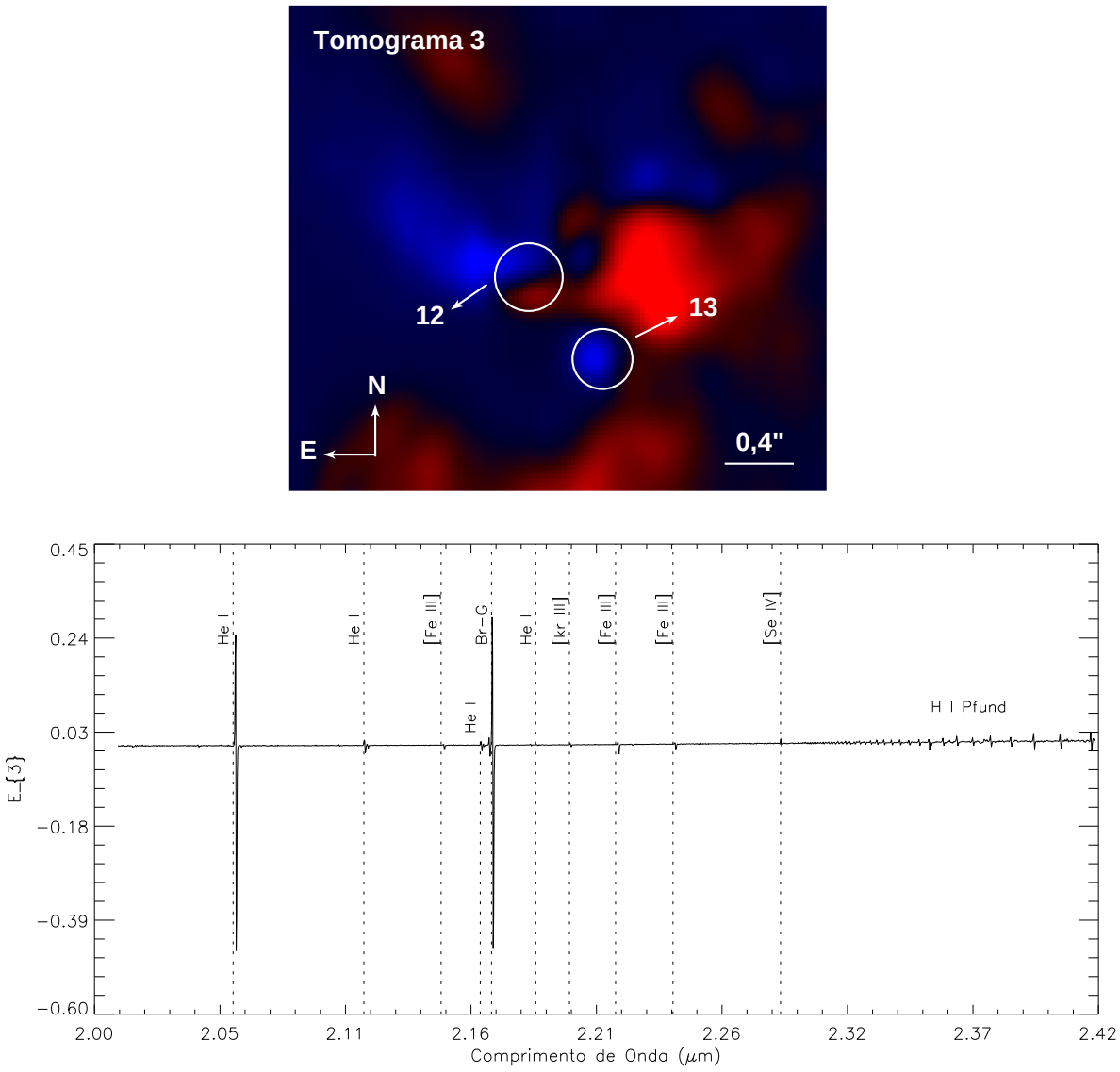
Figura 93 - Tomograma 2 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G45.12+0.1A.As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas.



Fonte: Autor.

:

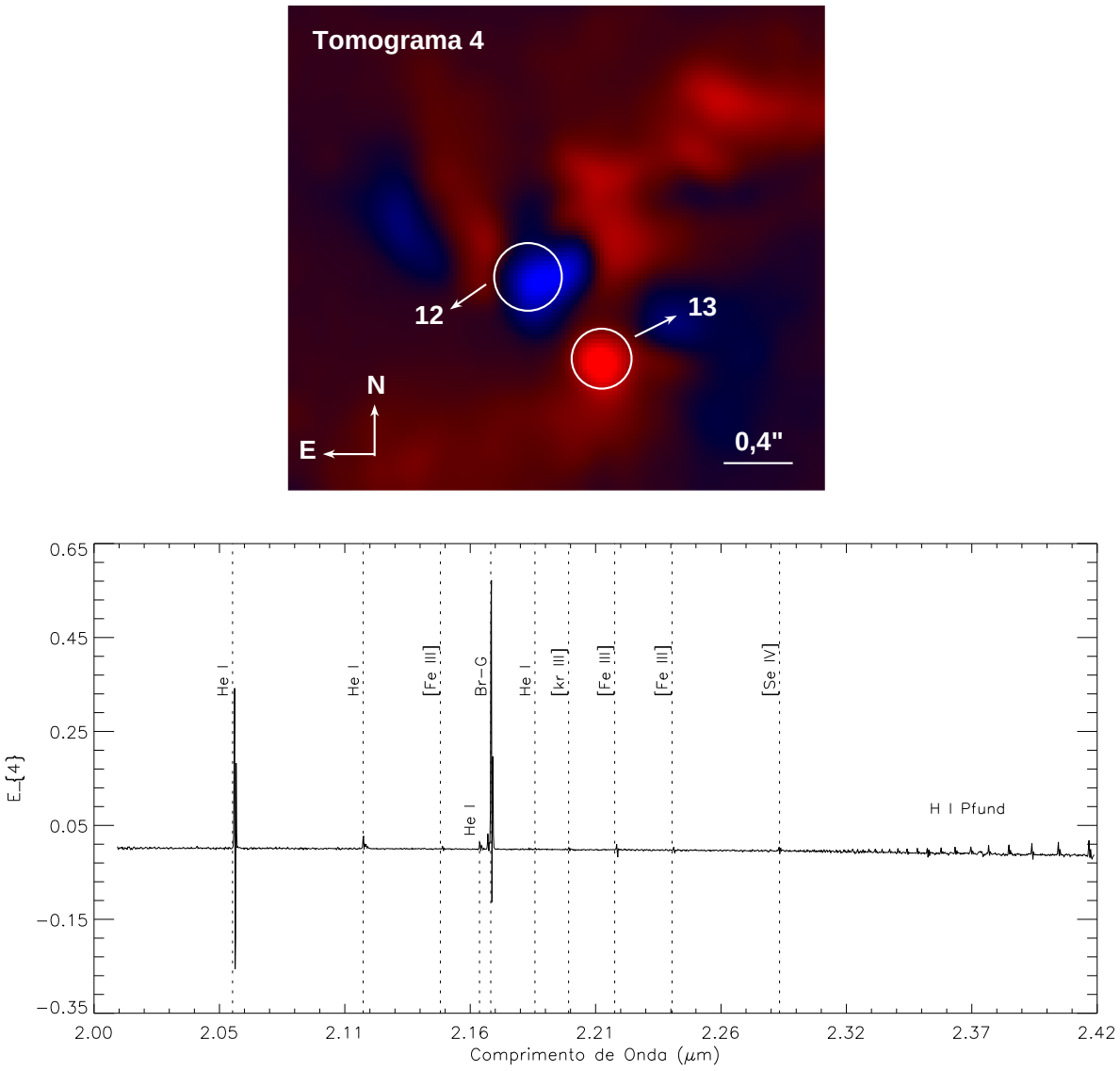
Figura 94 - Tomograma 3 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G45.12+0.1A.As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas.



Fonte: Autor.

:

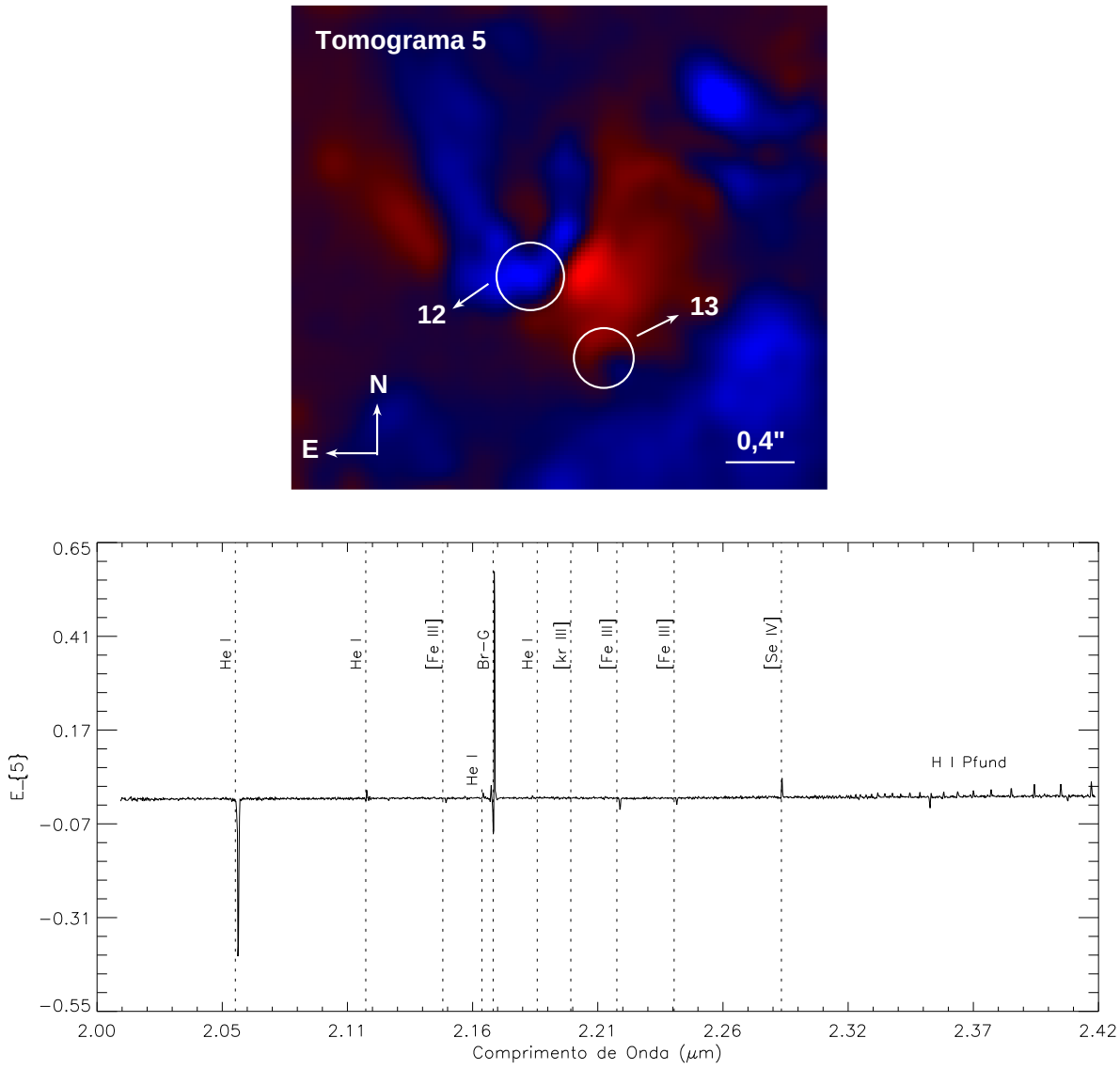
Figura 95 - Tomograma 4 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G45.12+0.1A. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas.



Fonte: Autor.

:

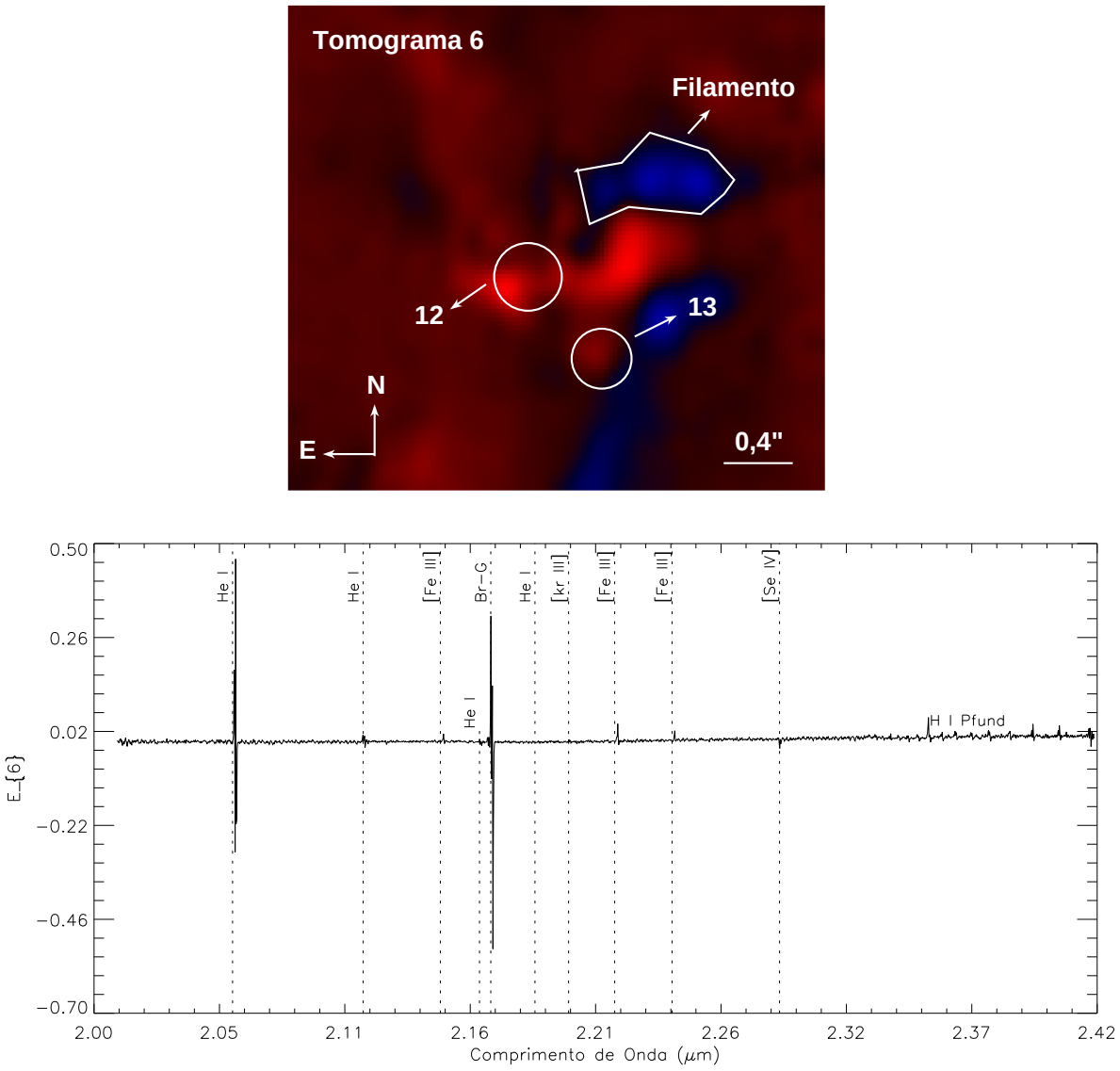
Figura 96 - Tomograma 5 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G45.12+0.1A.As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas.



Fonte: Autor.

:

Figura 97 - Tomograma 6 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G45.12+0.1A. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas.



Fonte: Autor.

:

O autovalores entre 7 - 10 não apresentaram estruturas suficientemente mais intensas e não puderam ser interpretadas e não foram mostrado neste trabalho. Após estes autovalores o ruído domina os autovalores, não apresentando informação relevante para análises.

5.8 G48.609+0.027

5.8.1 Espectroscopia unidimensional de fonte puntiforme

Esta é a segunda região cuja fonte não foi classificada como estrela OB. A Figura 98 mostra a fonte detectada no apontamento das coordenadas em rádio bem como o seu espectro. A região apresenta apenas uma fonte que se encontra ao centro do campo. Seu espectro apresenta banda de CO em absorção e as linhas de Na I (2,207 μm), Ca I (2,2636 μm), Al I (2,117 μm) e Fe I (2,239 μm), também em absorção. Por isso, o objeto não pode ser classificado como uma estrela de alta massa em formação. A comparação com o catálogo de Hanson, Conti e Rieke (1996), Kleinmann e Hall (1986), mostra que esta fonte pode ser classificada como uma supergigante M, assim como a fonte 2 na região G6.55-0.10, indicado que esta não seria a região contrapartida em NIR da UCHII detectada em rádio.

5.8.2 PCA

A Figura 99 apresenta o primeiro tomograma e seu primeiro auto espectro. O primeiro auto espectro desta região se assemelha ao encontrado pela espectroscopia. As linhas detectadas em correlação são: as linhas de Na I (2,207 μm), Ca I (2,2636 μm), Al I (2,117 μm) e Fe I (2,239 μm). Por estes aspectos, essa fonte poderia ser classificada com uma estrela do tipo supergigante M (HANSON; CONTI; RIEKE, 1996). Este autovalor explica 99,9% do cubo de dados.

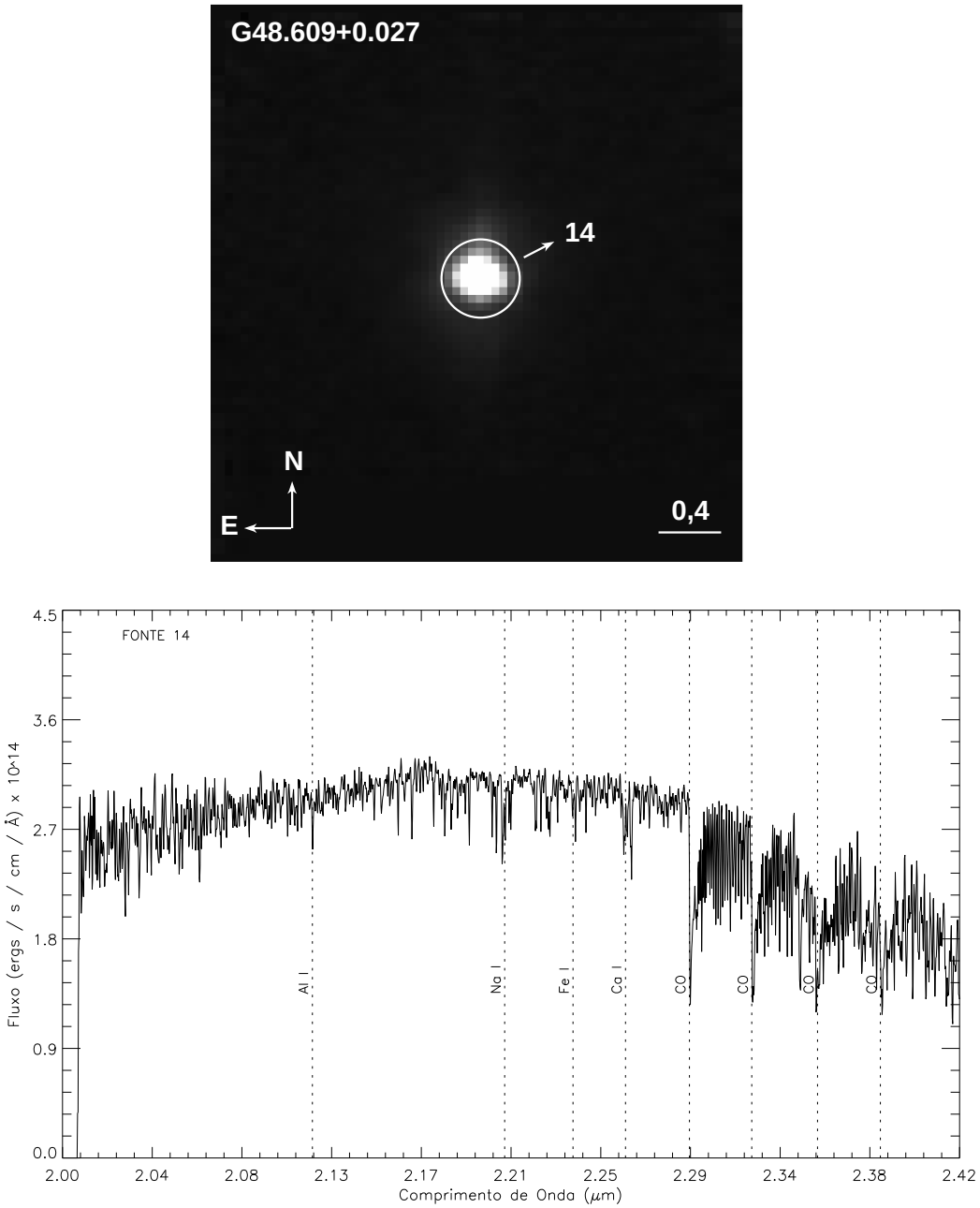
No segundo autovetor (Figura 100), o auto espectro apresenta correlação com os comprimentos de ondas menores e uma anti-correlação com os comprimentos de onda maiores, sendo em 2,24 μm a separação entre essas duas regiões. Assim, ao visualizar o tomograma associado, vemos que as linhas de CO e Ca I estão à leste da fonte, enquanto, as linhas Al I e He I (2.1614 μm) estão à oeste da fonte.

5.9 G53.605+0.046

5.9.1 Espectroscopia unidimensional de fonte puntiforme

Nas imagens do 2MASS nas bandas *J*, *H* e *K* a região mostra um objeto de grande brilho. Com o uso de óptica adaptativa, o objeto foi resolvido em duas fontes pontuais próximas, que pode ser um sistema binário que pode gerar um alargamento das linhas detectadas na espectroscopia, sendo que a fonte mais intensa nomeada de fonte 15, e a

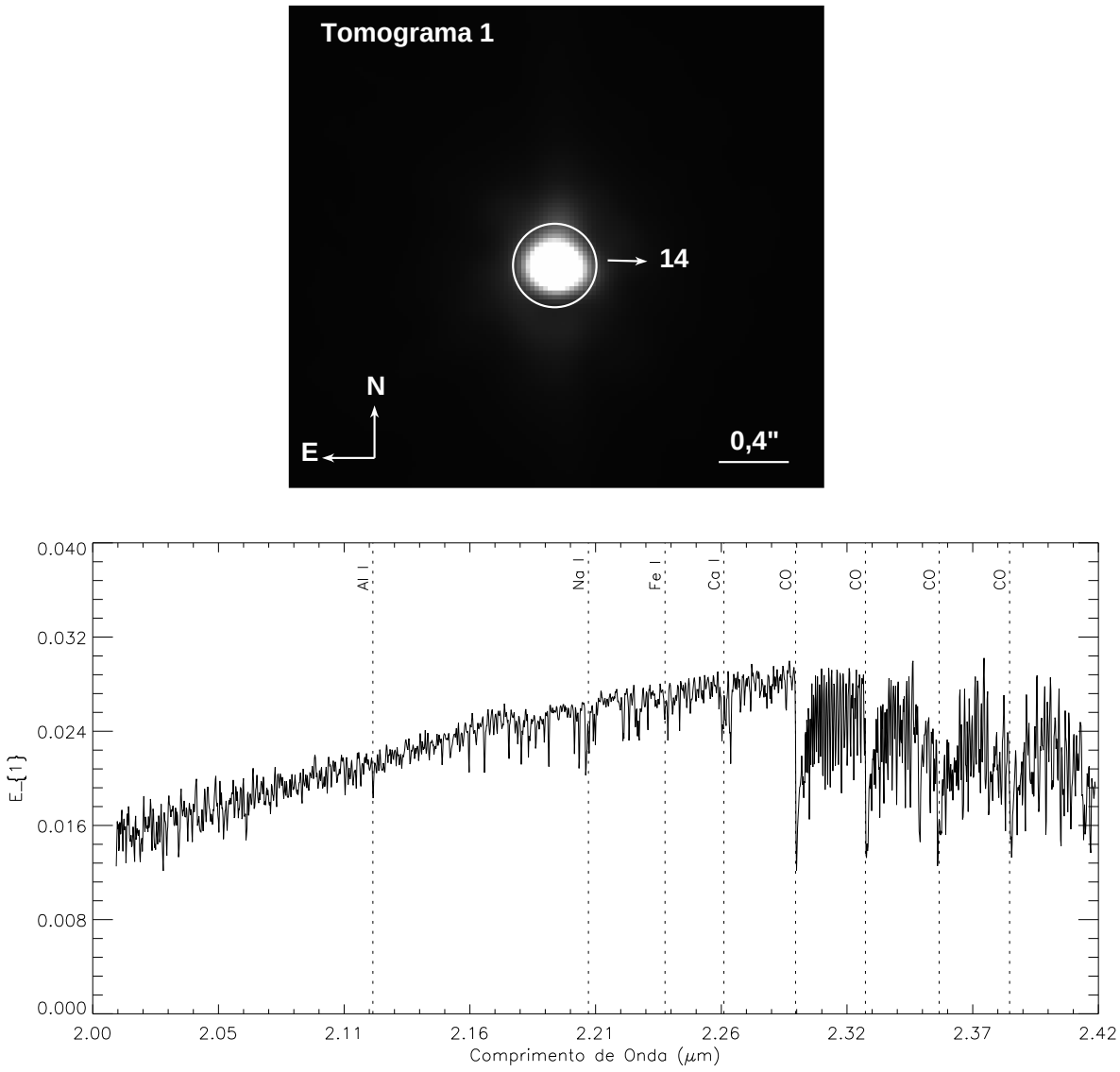
Figura 98 - Imagem da região G48.609+0.027 e espectro da fonte 14. A região demarcada pelo círculo representa o local e o tamanho da abertura de extração do espectro. As linhas detectadas são indicadas pelas linhas verticais tracejadas.



Fonte: Autor.

:

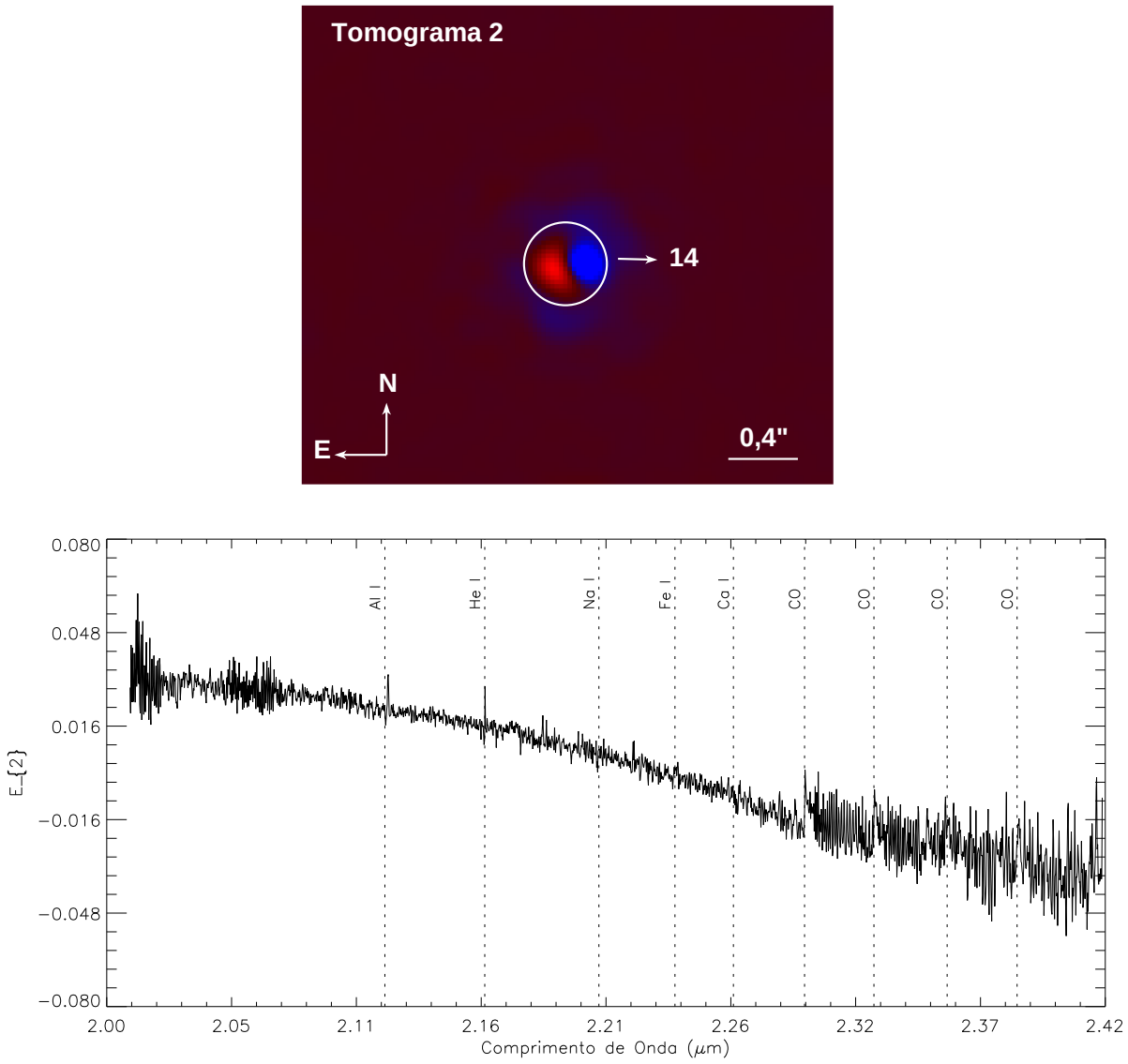
Figura 99 - Tomograma 1 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G48.609+0.027. O campo está todo correlacionada, sendo a região mais clara de maior correlação.



Fonte: Autor.

:

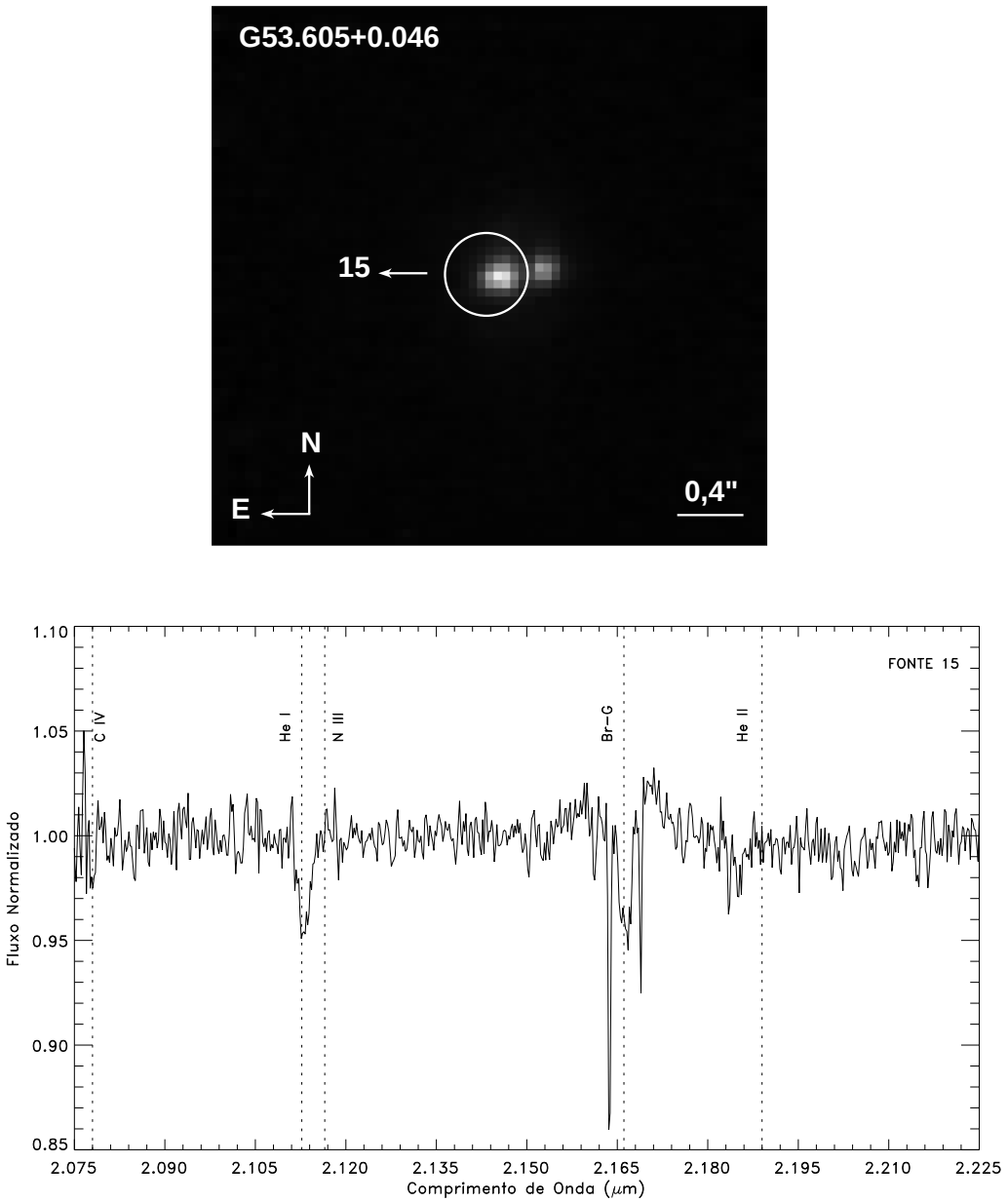
Figura 100 - Tomograma 2 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G48.609+0.027. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas.



Fonte: Autor.

:

Figura 101 - Imagem da região G53.605+0.046 e espectro normalizado da fonte 15. A região demarcada pelo círculo representa o local e o tamanho da abertura de extração do espectro. As linhas detectadas são indicadas pelas linhas verticais tracejadas.



Fonte: Autor.

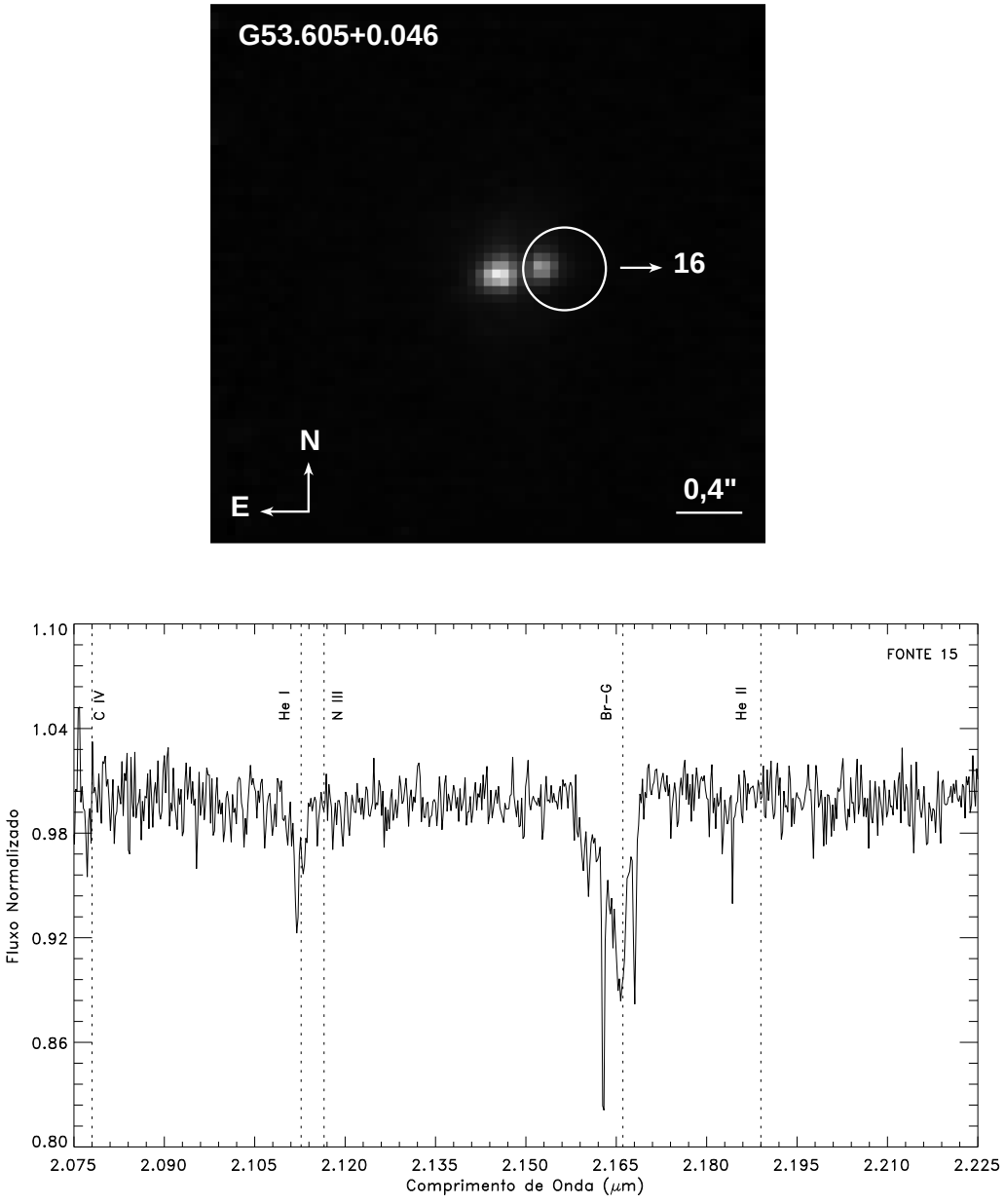
:

mais fraca nomeada fonte 16.

As Figuras 101 e 102 mostram os espectros das fontes 15 e 16, respectivamente. Ambos os espectros apresentam linhas de absorção de Brγ e He I (2,112 μm) e que restringe o tipo espectral entre O9 e B0, primeira classificação por espectroscopia na literatura.

Devido à proximidade entre as fontes (d=0.15") espera-se que o espectro extraído de uma fonte tenha luz proveniente da outra. isto pode mascarar a estimativa para os tipos espectrais obtidos neste trabalho e também dificulta estabelecer qual dos objetos é a fonte ionizante da região UCHII. Com base na sua posição e no seu brilho aparente mais

Figura 102 - Imagem região G53.605+0.046 e espectro normalizado da fonte 16. A região demarcada pelo círculo representa o local e o tamanho da abertura de extração do espectro. As linhas detectadas são indicadas pelas linhas verticais tracejadas.



Fonte: Autor.

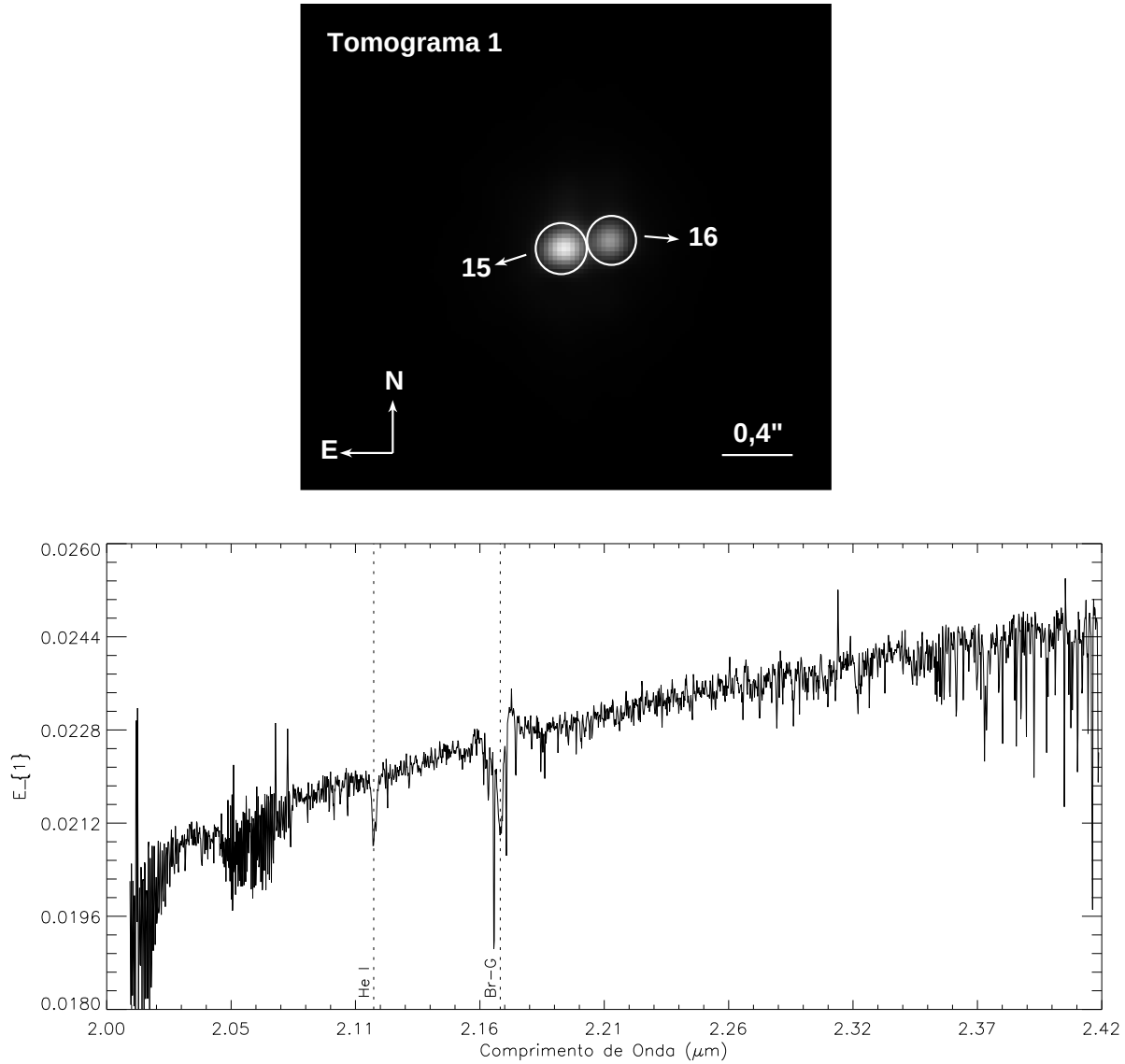
:

intenso, assumimos que a fonte ionizante seja o objeto 15.

5.9.2 PCA

As linhas de He I (2,112 μm) e Brγ aparecem em correlação para as duas fontes. Sua semelhança com o espectro das Figuras 101 e 102 se deve ao fato que este autovalor representa 99,5% da significância do cubo de dados. As linhas vistas para comprimento de onda maiores que 2,32 μm são remanescente do processo de remoção de linhas telúricas na redução de dados. Assim, as duas fontes devem apresentar o mesmo tipo espectral

Figura 103 - Tomograma 1 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G53.605+0.046. O campo está todo correlacionada, sendo a região mais clara de maior correlação.



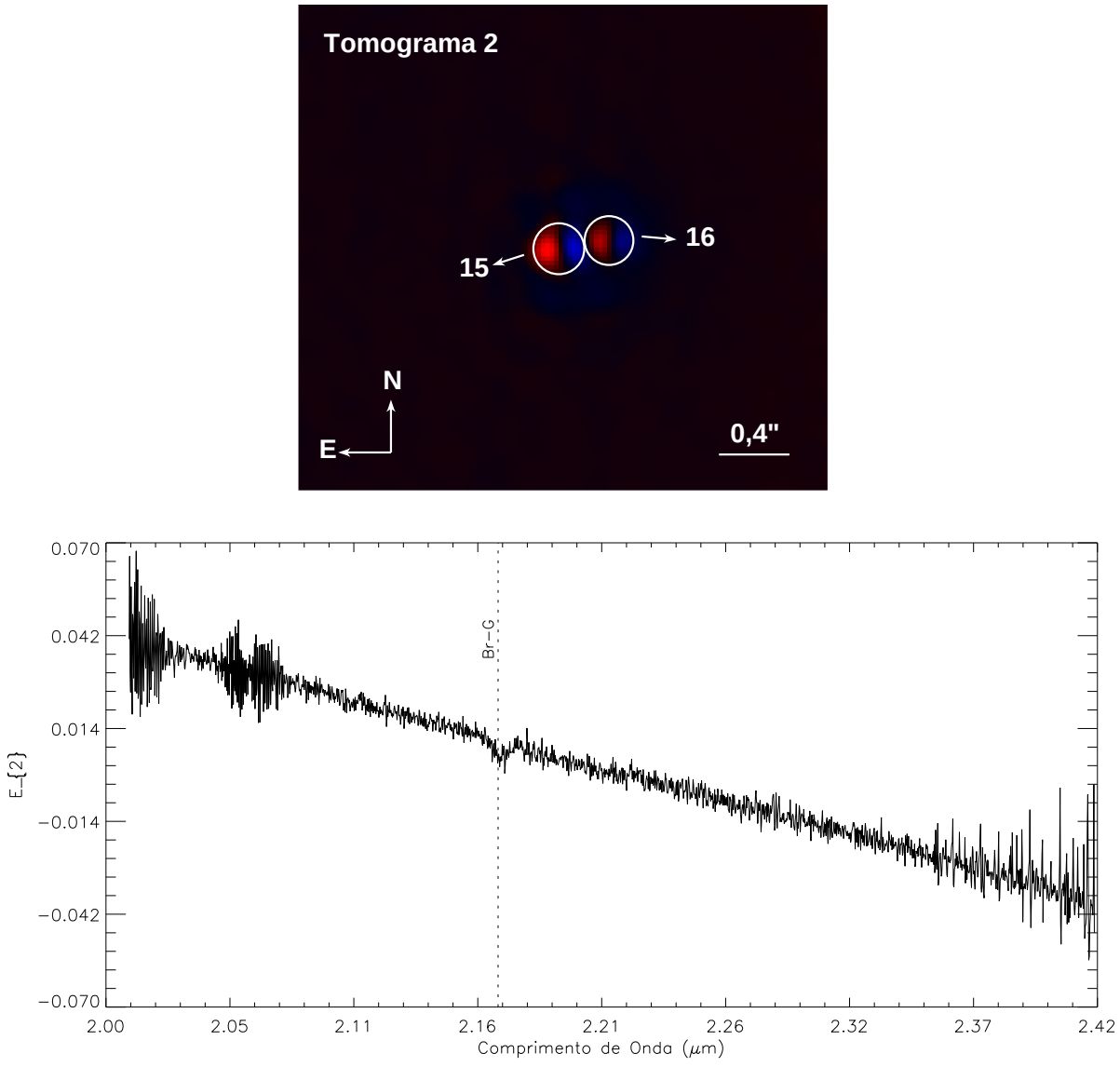
Fonte: Autor.

:

e ao comparar a representação do auto espectro com os catálogos de Hanson, Conti e Rieke (1996), Hanson *et al.* (2005) estes objetos foram classificados como estrelas do tipo espectral entre O9 e B0.

Na Figura 104 é mostrado o segundo autovalor. Como em outras regiões são vistas em seu auto espectro a correlação com os comprimentos de ondas menores e uma anti-correlação com os comprimentos de onda maiores, sendo em 2,24 μm a separação entre essas duas regiões. Também é detectada uma pequena correlação da linha de Brγ. No tomograma associado é visto um mesmo comportamento para duas fontes, indicando que a separação vista no auto espectro é compatível com os dois objetos. Este autovetor explica 0,16% do cubo de dados.

Figura 104 - Tomograma 2 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G53.605+0.046. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas.



Fonte: Autor.

:

O ruído domina os demais autovalores impossibilitando interpretações.

5.10 G70.965-1.6

5.10.1 Espectroscopia unidimensional de fonte puntiforme

A região G70.965-1.6 também é conhecida como região K3-50A e apresenta uma única contrapartida na banda K, sendo nomeada como fonte 17. Ela coincide com a fonte OKYM4 de Okamoto *et al.* (2003) e seu espectro e morfologia podem ser vistos na Figura 105. Posteriormente, essa região foi estudada detalhadamente por Blum e McGregor (2009). No espectro extraído, foram encontradas 4 linhas em emissão, sendo elas: He I (2,058 μm), He I (2,112 μm), Brγ e uma linha de alta excitação, a linha de [Se IV] (2,2867 μm). Nenhuma outra linha foi identificada no espectro. Também é detectado uma emissão estendida em torno da fonte central

Conforme discutido por Blum e McGregor (2008), a presença da linha de selênio é uma indicação de uma estrela O quente e de que a região H II apresenta uma alta densidade, já que o potencial de ionização desta linha é de 42,9 eV (BLUM; MCGREGOR, 2009). Pelas conclusões de Blum e McGregor (2009), a fonte 17 seria condizente com uma fonte muito jovem, por ainda estar embebida em seu casulo e apresentar os indícios citados anteriormente.

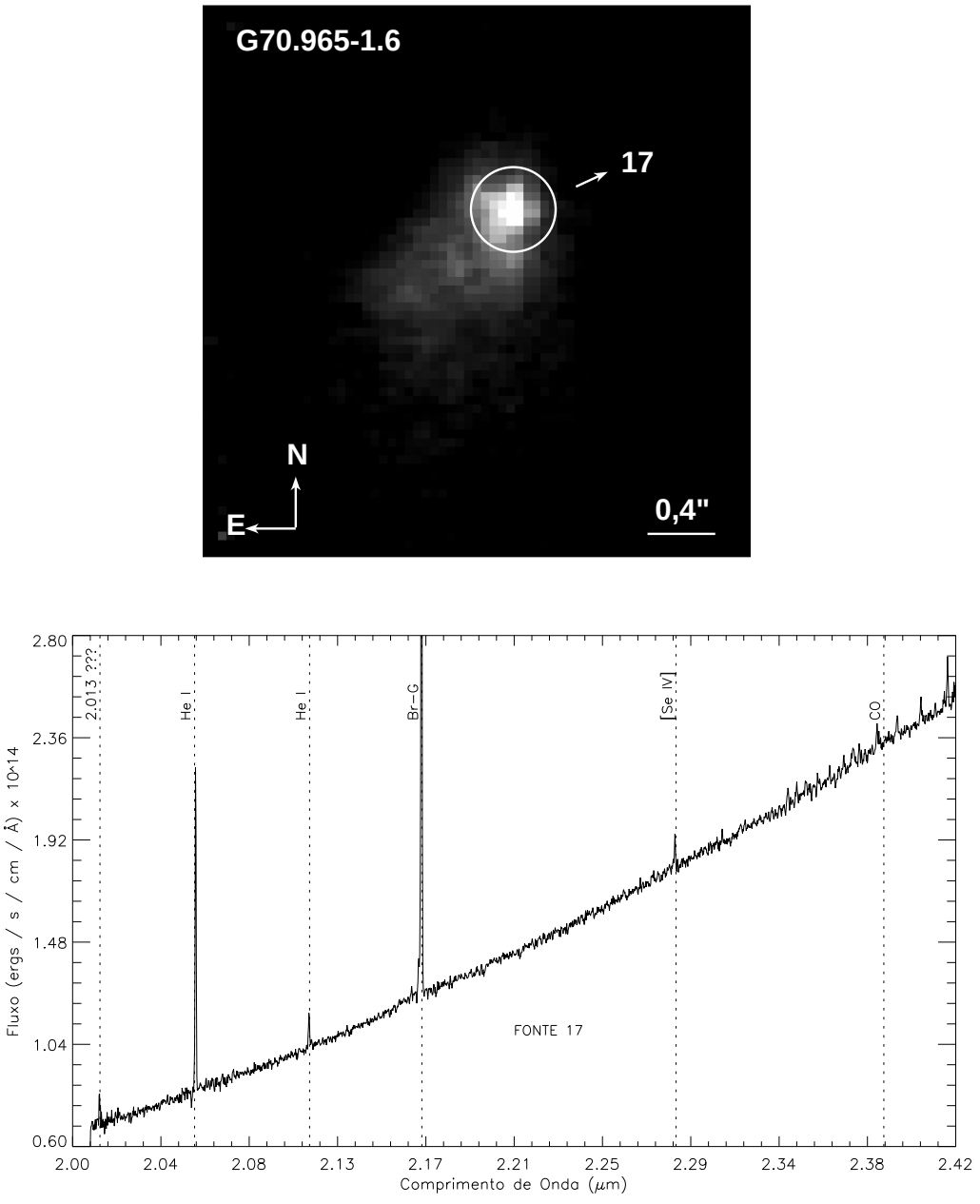
O fluxo integrado medido da linha de Brγ foi de 2,06$\times$ 10^{-13} erg s^{-1} cm^{-2} Å^{-1}, o da linha de He I (2,058 μm) foi de 8,41$\times$ 10^{-14} erg s^{-1} cm^{-2} Å^{-1} e o da linha de He I (2,112 μm) foi de 9,61$\times$ 10^{-15} erg s^{-1} cm^{-2} Å^{-1}. Como as duas linhas de He neutro foram detectadas, para o cálculo da razão de linha foi utilizado o He I (2,112 μm), como discutido no Capítulo 3.

A razão de linha entre He I (2,112 μm) e o Brγ foi de 0,046, valor médio da região conforme Blum e McGregor (2009). Logo, o intervalo de temperatura encontrado para fonte 17 comparando com o modelos do CLOUDY foi de 31.000 K a 50.000 K, o que classifica espectralmente a fonte entre uma estrela O9 e uma estrela O3, respectivamente. Este valor é condizente com os resultados encontrados por Okamoto *et al.* (2003), Blum e McGregor (2009), que estimaram tipo espectral entre O3-O8.

5.10.2 PCA

O primeiro autovalor é mostrado na Figura 106. As linhas detectadas no auto espectros foram as mesmas obtidas pela espectroscopia com o acréscimo da linha de He I (2.1614 μm) . Entretanto, pelo tomograma é visto que a fonte 17 não é a única a produzir estas linhas. É perceptível uma emissão estendida a sudeste, semelhantes ao trabalhos de Blum e McGregor (2009), Okamoto *et al.* (2003), Hofmann, Balega, Preibisch e Weigelt (2004). Indicando a presença de outros objetos no campo de visada, sendo eles condizentes com a posição das fontes OKYM1 e OKYM2 de Okamoto *et al.* (2003). A presença da linha de [Se IV] (2,2867 μm), evidência a presença de uma estrela O quente. Pois seu

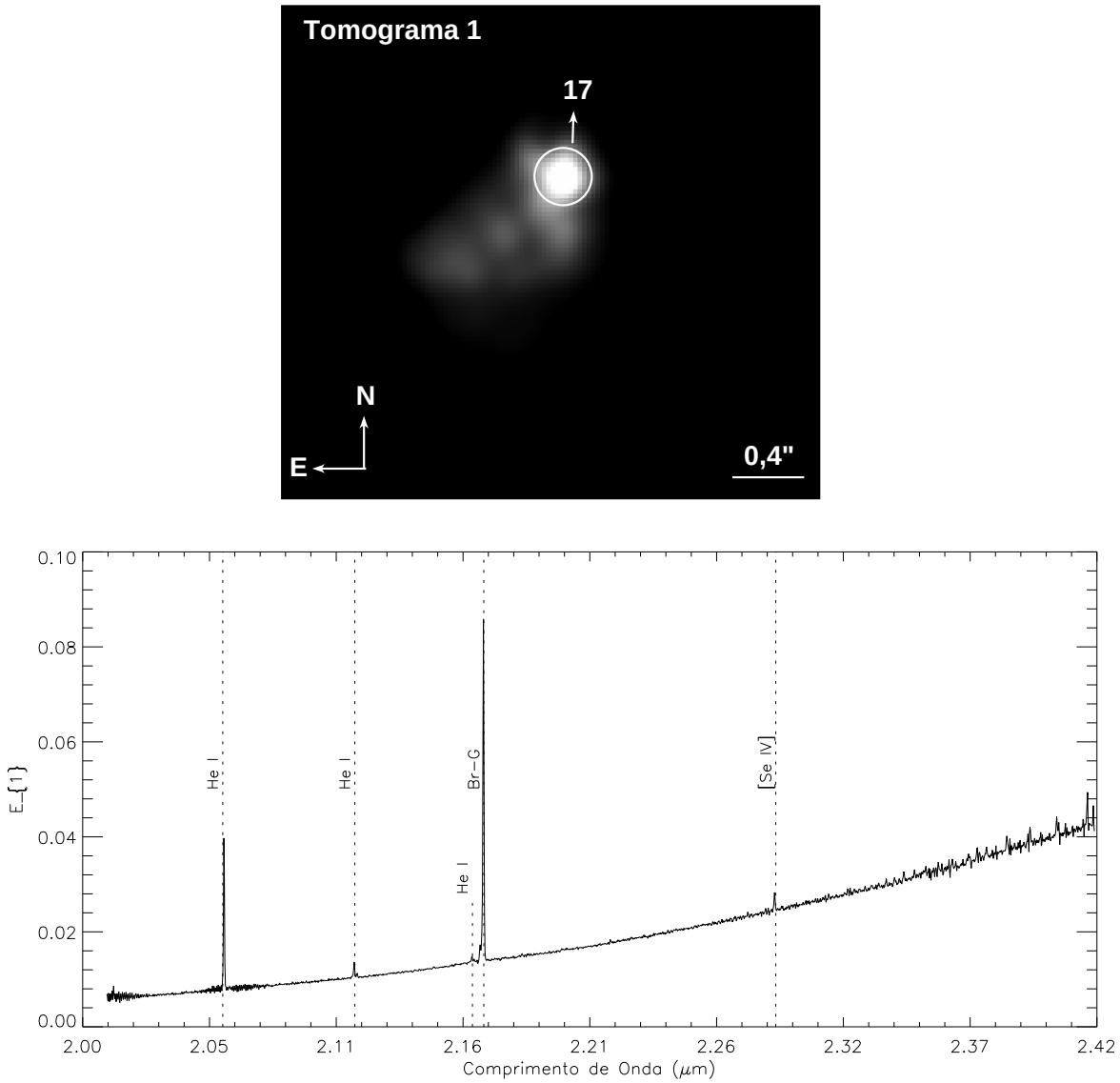
Figura 105 - Imagem região G70.965-1.6 e espectro da fonte 17. A região demarcada pelo círculo representa o local e o tamanho da abertura de extração do espectro. As linhas detectadas são indicadas pelas linhas verticais tracejadas.



Fonte: Autor.

:

Figura 106 - Tomograma 1 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G70.965-1.6. O campo está todo correlacionada, sendo a região mais clara de maior correlação.



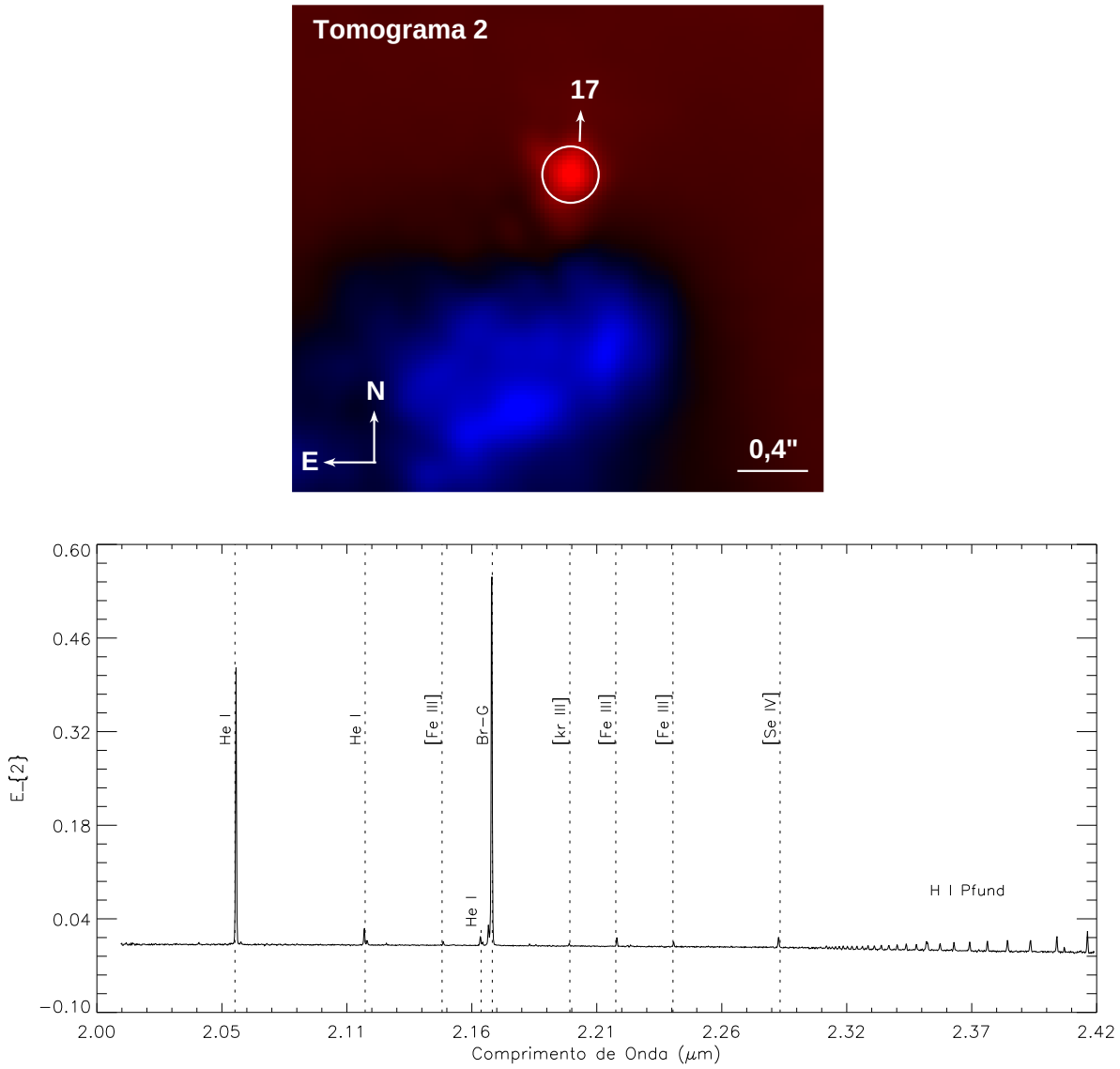
Fonte: Autor.

:

potencial de ionização é de 42.9 eV, valor próximo do potencial de ionização do He II (BLUM; MCGREGOR, 2009), linha visto apenas em estrelas O. Nenhum tipo espectral foi estimado, pois nenhuma linha fotosférica foi detectada. Este autovalor explica 94,4% do cubo de dados.

A Figura 107 mostra as informações de duas regiões nebulares, uma região no local da fonte 17 (anti-correlacionada) e outra a sul do campo (correlacionada). A região correlacionada é relacionada com linhas de He I (2,058 μm), He I (2,112 μm), Brγ, He I (2.1614 μm), [Kr III] (2.1987 μm), [Se IV] (2,2867 μm), as linhas de [Fe III] e o contínuo até em 2 μm. Já a região anti-correlacionada é relacionada com as linhas de [Se IV] (2,2867 μm) e [Fe III] (2.218 μm), as linhas H I da série Pfund e o contínuo maior que 2 μm. Pela

Figura 107 - Tomograma 2 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G70.965-1.6. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas.



Fonte: Autor.

:

presença da linha de [Fe III] indica que ambas as regiões são densas e apresentam fontes quentes em seus interiores. Já as linhas de H I da série Pfund são encontradas em altas densidades (maiores que 10^9 cm^{-3}) e são provavelmente originadas em disco circunstelar (BIK *et al.*, 2008). Este autovalor explica 4,8% do cubo de dados.

O terceiro autovetor explica 0,2% e é mostrado na Figura 108. O auto espectro mostra que o contínuo é dividido em anti-correlacionado e correlacionado, sendo em 2,3 μm a separação. O contínuo anti-correlacionado é relacionado com duas regiões no tomograma, uma ao sul e outra à leste do local da fonte 17. Para facilitar será adotado r1 para a região ao sul e r2 para região à leste. A r2 por apresentar menores valores de intensidades negativas no tomograma, deve ser a responsável pelas linhas de He I (2,058 μm), He

I (2,112 μm), Brγ, anti-correlacionadas. Assim, as asas vermelhas e a pequena asa azul, também é referente a esta região. O comportamento destas linhas são relacionados à cinemática do gás (RICCI; STEINER; GIANSANTE, 2015; RICCI; STEINER; MENEZES, 2014; MENEZES; STEINER; RICCI, 2014) não simétrica pela diferença de intensidade entre as asas.

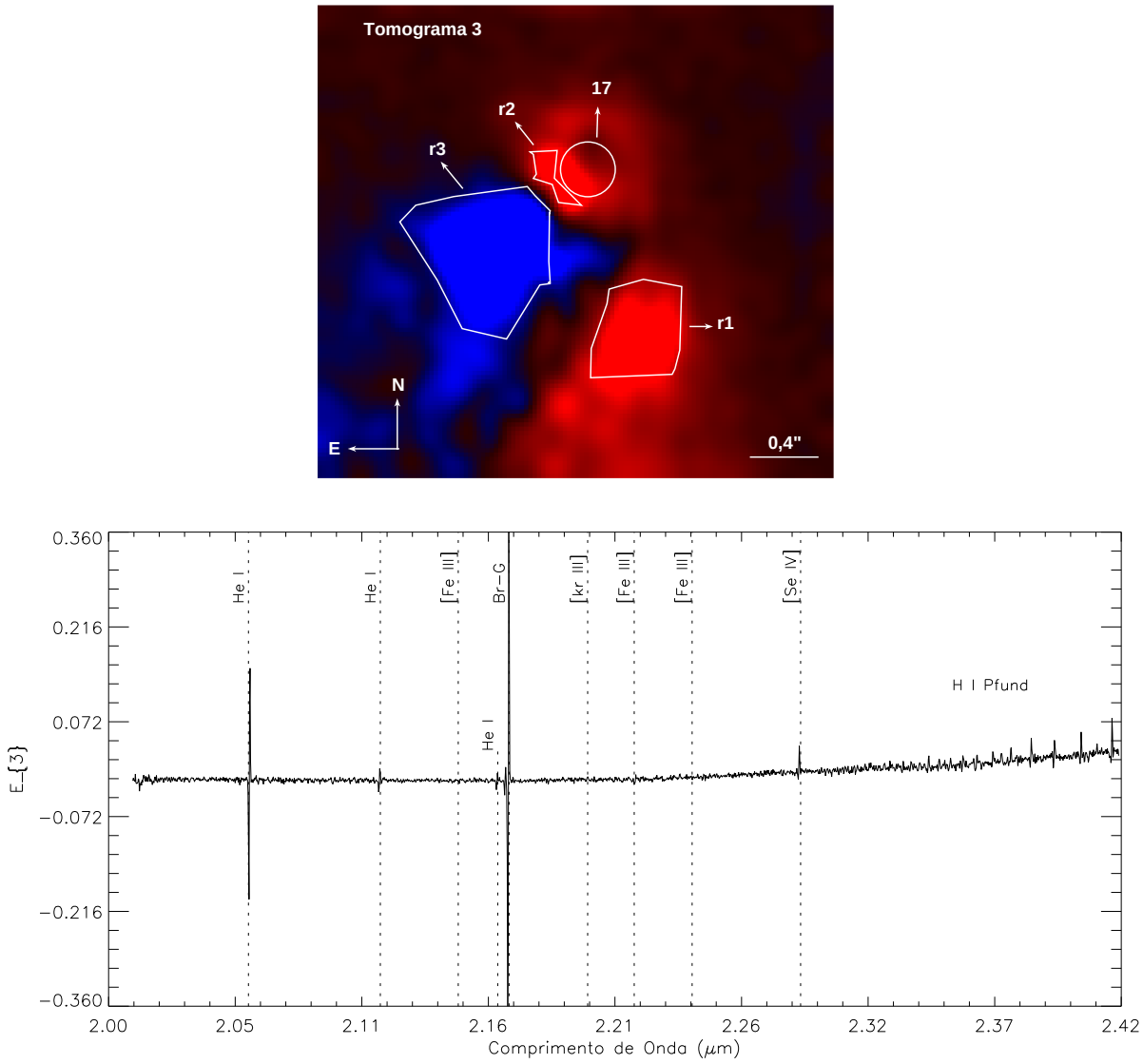
Já o contínuo correlacionado é referente apenas a uma região mais à leste da fonte 17 (nomeada de r3), sendo esta região relacionada as linhas de He I (2,058 μm), He I (2,112 μm), Brγ, [Se IV] (2,2867 μm) e as linhas de H I da série Pfund. Nestas últimas linhas também é verificado uma pequena asa azul e outra vermelha, que como no caso anterior, não possibilita a estimativa da sua orientação, pela fracas correlações. Esta região condiz com os pontos visualizado no tomograma 1, o que pode indicar a presença de uma estrela do tipo O embebida pela detecção da linha de [Se IV] (2,2867 μm) neste local. Este autovalor explica 0,2% do cubo de dados.

O quarto autovalor, Figura 109, é um complemento das informações do terceiro autovalor. É evidente no auto espectro que as linhas com correlação e anti-correlação são inversas ao que foi visto no auto espectro anterior. Novamente as asas azuis e vermelhas são vistas na posição da r2 (correlação) com o mesmo padrão assimétrico. Para regiões anti-correlacionadas são vistos a fonte 17, o local r1 e r3 e as linhas presentes nelas. O que deve ser ressaltado é a possibilidade de haver uma fonte embebida na r1 no ponto de maior intensidade. Este autovalor explica 0,1% do cubo de dados.

O quinto e sexto autovalores são mostrados na Figura 110 e 111, respectivamente, e juntos explicam 0,03% do cubo de dados. Os dois auto espectros evidenciam as contribuição das regiões r1,r2, r3 para as componentes do Brγ (BLUM; MCGREGOR, 2009) e He I (2,058 μm). Uma nova região entre a r1 e a fonte 17 se destaca, sendo esta chamada de r4. Em autovalor superiores, o ruído é dominante nenhuma informação pode ser obtida.

Comparando as regiões observadas com os trabalhos de Blum e McGregor (2009), Okamoto *et al.* (2003), Hofmann, Balega, Preibisch e Weigelt (2004) temos que a r1 é condizente com o objeto 4 de Hofmann, Balega, Preibisch e Weigelt (2004), a r2 com os objetos 2 e 3 de Hofmann, Balega, Preibisch e Weigelt (2004), a r3 com o ponto a sul da fonte STHO1 de Okamoto *et al.* (2003) e a r4 com o objeto OKYM2 de Okamoto *et al.* (2003).

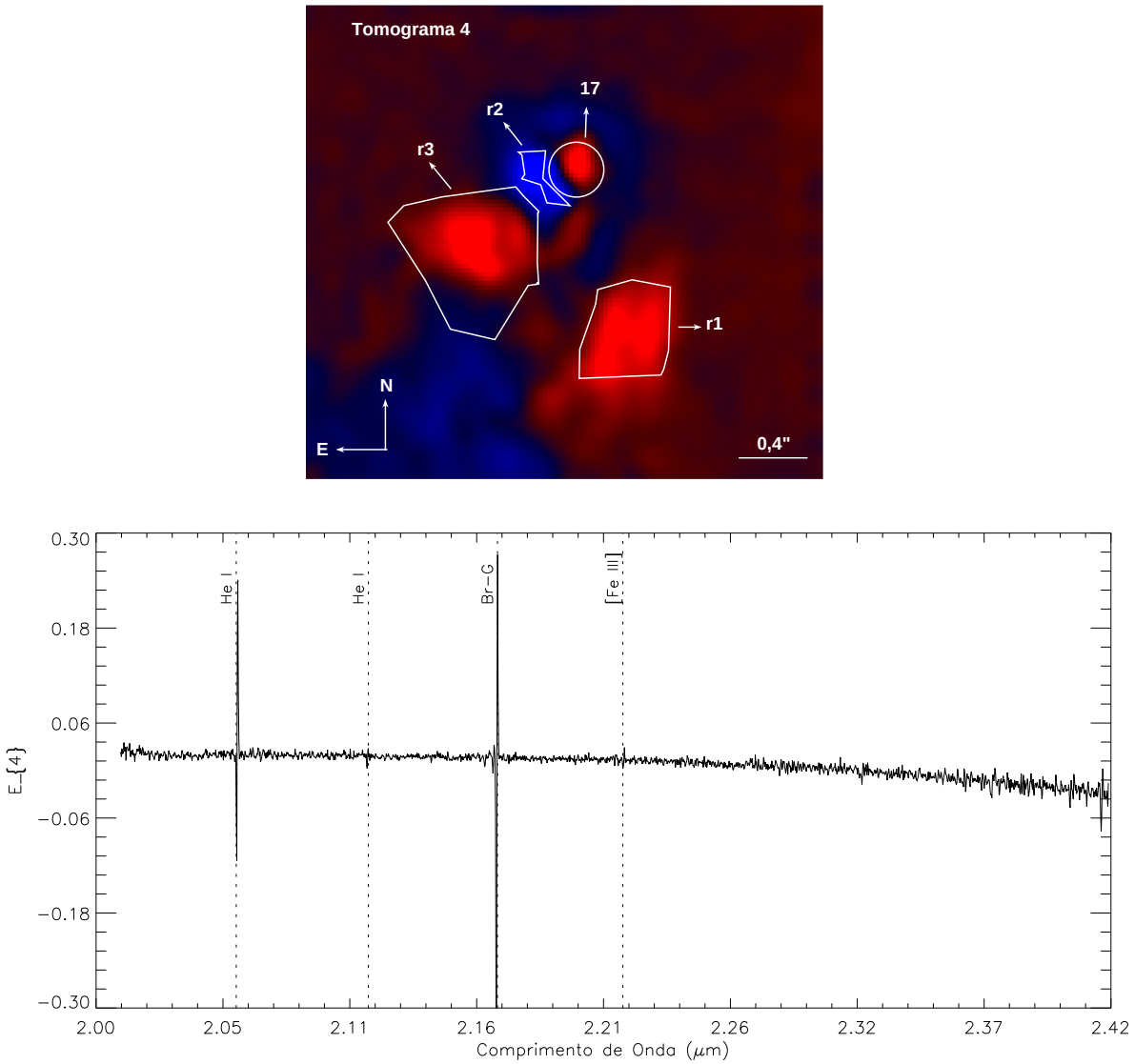
Figura 108 - Tomograma 3 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G70.965-1.6. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas.



Fonte: Autor.

:

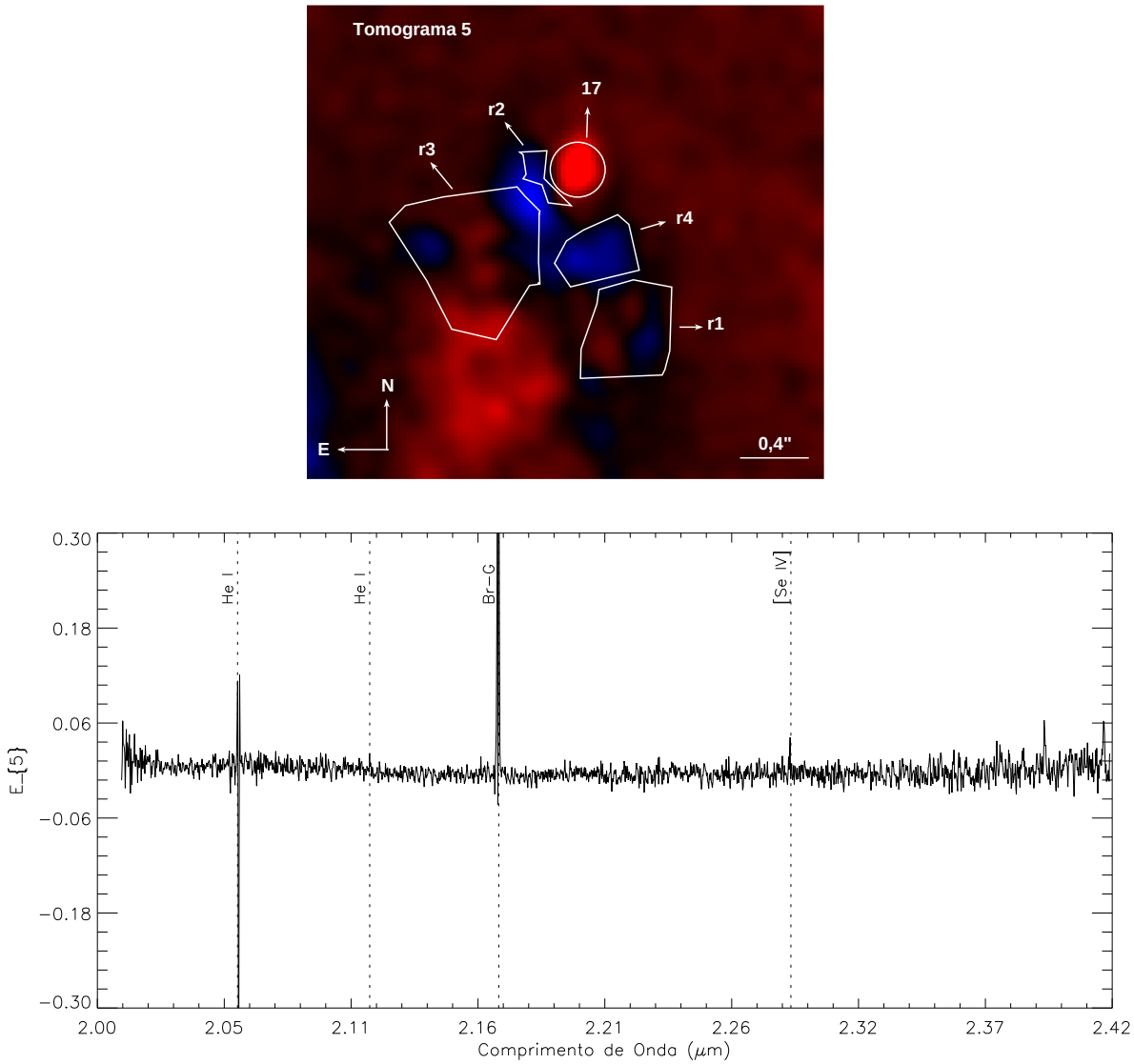
Figura 109 - Tomograma 4 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G70.965-1.6 As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas.



Fonte: Autor.

:

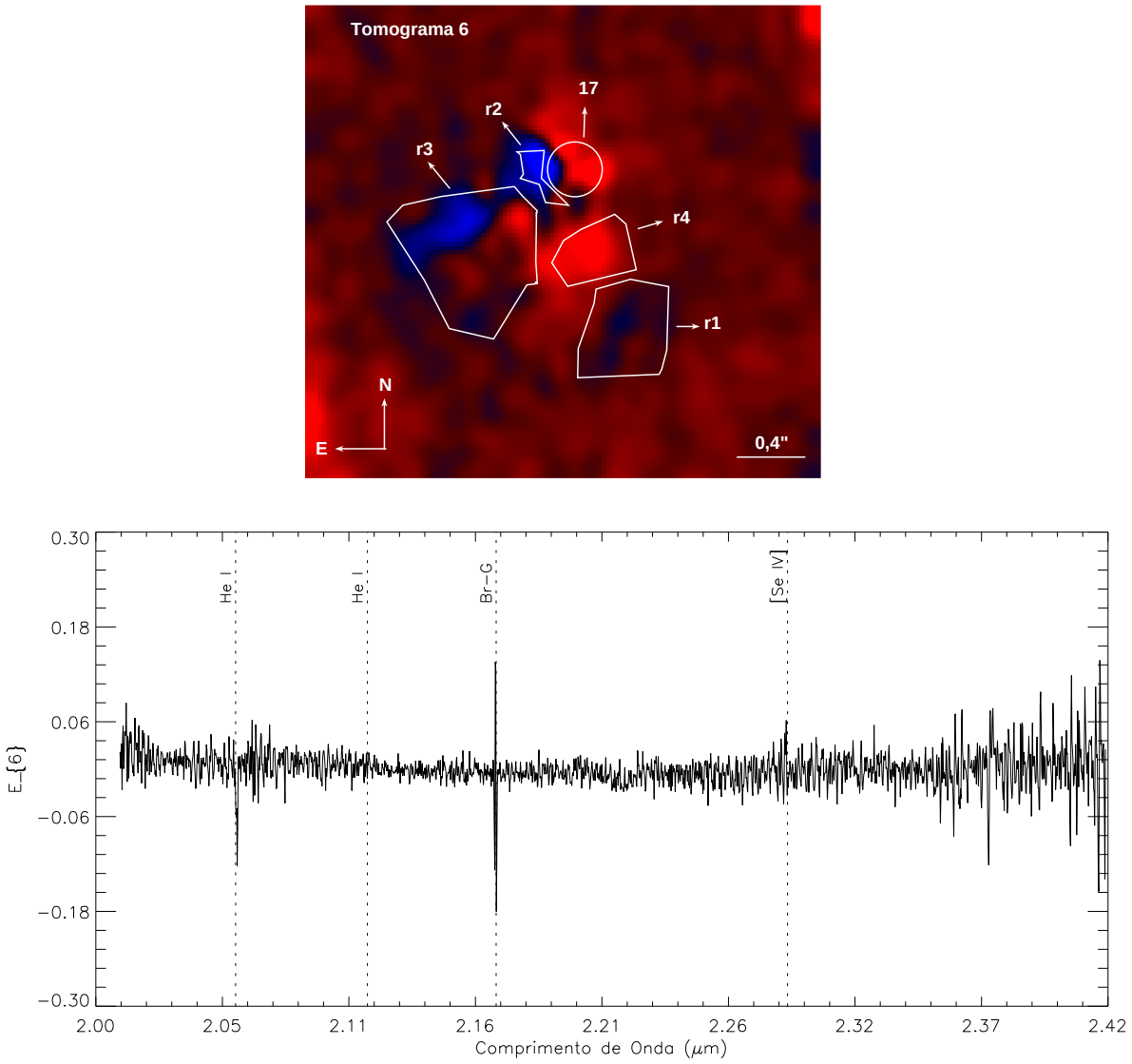
Figura 110 - Tomograma 5 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G70.965-1.6. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas.



Fonte: Autor.

:

Figura 111 - Tomograma 5 (acima) e o seu auto espectro correspondente (abaixo) da região G70.965-1.6. As regiões correlacionadas são as áreas em azul nos tomogramas e as regiões anti-correlacionadas são as áreas em vermelho nos tomogramas.



Fonte: Autor.

:

6 Discussões e Análise dos Resultados

6.1 Discussão sobre o PCA e as regiões UCHII

A tomografia PCA desenvolvida por Steiner, Menezes, Ricci e Oliveira (2009) traz um novo método de análise de cubos de dados por meio de correlações e anti-correlações de informações e este método não depende de parâmetros livres. Ele traz informação tanto espacial como espectral dos objetos observados. Hoje, tal método vem sendo utilizado como uma ferramenta de análise apenas em galáxias e seus estudos afins (RICCI; STEINER; MENEZES, 2014; STEINER; MENEZES; AMORIM, 2013; RICCI; STEINER; MENEZES, 2011). Por ser uma metodologia nova e sem trabalhos na área de formação estelar, não foi possível encontrar na literatura nenhum auxílio nas interpretações para estudos de regiões de formação estelar , o que faz da experiência dos pesquisadores envolvidos nestes estudos, o principal requisito para obtenção dos resultados.

Pelo que foi observado da tomografia PCA, este método permite um estudo mais profundo e detalhado das regiões observadas. De todas regiões em ele que foi utilizado, 10 regiões ou 11 fontes (uma região e uma fonte a mais que a espectroscopia) conseguiram distinguir as linhas fotosféricas, sendo o método de análise semelhante ao encontrado na espectroscopia com pouco ruído e sem contaminação nebular. Isto permitiu a classificação mais refinada do tipo espectral da fonte. Outro benefício do método foi indicar a possível fonte ionizante do campo em um pequeno aglomerado de objetos, evitando a contaminação de outras fontes como ocorre na espectroscopia quando são utilizadas aberturas extensas para extração dos espectros. Além disso, as linhas fotosféricas foram detectadas pela Tomografia PCA ainda no primeiro autovalor, indicando que tais linhas apresentam uma significância maior que 90% para os cubos de dados. Na única região em que não foi possível distinguir as linhas fotosféricas diretamente no primeiro autovalor, região G77.965-0.006B, o PCA conseguiu evidenciar as origens das linhas nos autovalores complementares. Só com estas características, o método da tomografia PCA se mostra capaz de obter informações mais precisas que a espectroscopia tradicional, para classificação espectral quando a emissão nebular impede ou dificulta a detecção direta das linhas fotosféricas. As comparações dos resultados podem ser vistos na Tabela 10.

As demais fontes não puderam ter seus tipo espectrais estimados pelo PCA, pois o PCA não fornece espectros e sim correlações e anti-correlação que não podem ser usados para obter informações sobre as linhas espectrais. Assim, os fluxos desta correlações não pode ser usados.

O método PCA permitir a obtenção de informações adicionais nos autovalores com baixa significância. Primeiramente, ele permite a obtenção de informações sobre a influência da emissão térmica do gás nas fontes. Isto foi constatado quando no autovalor ocorreu, como chamado por Menezes, Steiner e Ricci (2014), um diferencial entre espectros mais avermelhados e espectros mais azulados no cubo de dados, sendo entre 2,24 - 2,26

Tabela 10 - Classificação espectral das fontes observadas e estudadas neste trabalho.

Fonte	**tipo espectral NIR**	**tipo espectral PCA**
1	O6	O6
2	M Ia	M Ia
3	$\geq$ O9	O7
4	O7	O7
5	O7	O7
6	O3 - O7	-
7	B2 - O9	-
8	B2 - O8	-
9	-	-
10	-	-
11	B2- O7	O5-O4
12	O6 - O3	-
13	O6 - O3	-
14	M Ia	M Ia
15	B0 - O9	B0 - O9
16	B0 - O9	B0 - O9
17	$>$ O9	-
18	B2 - O9	B2- O9
19	B2	-
20	-	-
21	B1	-
22	B2 - O9	B2 e O9
23	B2	-
24	B2 - O8	-
25	-	-

μm o intervalo em que ocorre a transição. Este comportamento é visto em quase todas as regiões, Em segundo lugar, o método permite descobrir fontes embebidas ou ofuscadas nos campos observados, como a fonte 24 na região G5.97-1.17, G45.12+0.1A e G70.965-1.6.

Outra característica que deve ser ressaltado é a possibilidade do PCA de verificar a cinemática do gás de estruturas presentes nos ambientes de formação estelar, tais como disco de acreção e efluxos. Nossos resultados são semelhantes ao que é visto nos estudos de galáxias (RICCI; STEINER; MENEZES, 2014; STEINER; MENEZES; AMORIM, 2013; RICCI; STEINER; MENEZES, 2011). Estas estruturas foram verificadas em pelo menos 3 regiões. É provável que outras regiões também apresentem tais fenômenos, porém a relação sinal/ruído das medidas foi muito baixa para se detectar essas características.

6.2 Taxa de sucesso na detecção de linhas fotosféricas

Durante sua formação, o objeto central fica em seu casulo de gás até ao final da fase UCHII. Espera-se que a acreção esteja no estágio final ou muito reduzido nesta fase, a densidade na região ainda é alta, 10^4 cm^{-3} (CHURCHWELL, 2002). A combinação dos

fatores acima impede a detecção de características fotosféricas que possibilitem a determinação direta de seu tipo espectral através da detecção das linhas fotosféricas, mesmo em comprimentos de onda de ordem de 2 μm, onde a extinção é apenas 10% do óptico (Av = 10 Ak). Velamento é quando a emissão nebular "ofuscar" as linhas fotosféricas, como acontece com o Brγ e linhas de He, por exemplo.

Para este trabalho, a detecção das linhas fotosféricas ocorreu em 11 fontes ou 44% do total da amostra. A taxa de sucesso na detecção das linhas fotosféricas foi melhorada se comparada com a observação em fenda longa, sendo duas vezes melhor. Este fato ocorrendo pelo uso de espectrógrafos IFU juntamente com óptica adaptativa, como NIFS + ALTAIR.

Para outras 10 fontes da amostra, o tipo espectral pode ser obtido através de modelagem com uso de razões de linhas de emissão nebular e programas de fotoionização, como o CLOUDY. Entretanto, nenhuma fonte teve seu tipo estimado com precisão por duas razões: a razão sinal/ruído dos espectros das UCHII só permitiu o estabelecimento de um intervalo espectral para linhas fotosféricas observadas e também, pela ausência dos dados da emissão da poeira em 100 μm. As 5 fontes não tiveram classificação por não apresentarem linhas detectáveis no espectro e apenas 2 fontes foram classificadas como estrelas supergintantes.

Por fim, valores mais precisos para a classificação poderiam ser obtidos com espectros na banda *H*, pelo menos para algumas fontes.

6.3 Comparação com a faixa de rádio

Comparando as classificações espectrais obtidas pelas linhas fotosféricas neste trabalho com as classificações respectivas em rádio (quando possível), foi verificado que a maioria das fontes vistas no NIR apresenta um tipo espectral mais quente ou igual à classificação obtida por meio da medida do fluxo em rádio, como pode ser visto na Tabela 11. A diferença pode ser explicada pela intensa emissão de ventos estelares e por a análise não considerar fótons de Lyman absorvidos pela poeira. O efeito desse processo é a dissipação do gás e poeira, que diminui a densidade e reduz a quantidade de material ionizado. Assim, o número de fótons no contínuo de Lyman é subestimado implicando em uma classificação espectral mais fria.

6.4 Precisão na classificação espectral

Hanson, Conti e Rieke (1996), Hanson *et al.* (2005) discutem que o S/N mínimo para classificar espectralmente uma fonte no NIR seria de aproximadamente 3000. Em média, o S/N das observações neste trabalho foi aproximadamente 80. Este baixo valor pode explicar a não detecção de algumas linhas fotosféricas, como as de N III (2,115μm) ou de He I (2,112 μm), que poderiam refinar as classificações espectrais.

Tabela 11 - Classificação espectral obitda por este trabalho das fontes observadas e classificação em rádio.

Região	**Fonte**	**tipo espectral NIR**	**tipo espectral PCA**	**tipo espectral Rádio**
G5.97-1.17	1	O6	O6	B0[a]
G6.55-0.10	2	M Ia	M Ia	O9[a]
G15.04-0.6	3	$\geq$ O9	O7	B0[a]
G18.146-0.284	4	O7	O7	B0.5[b]
G23.96+0.1	5	O7	O7	O8-O9.5[d]
G23.96+0.1	6	O3 - O7	-	-
G28.288-0.364A	7	B2 - O9	-	O9.5[b]
G28.288-0.364A	8	B2 - O8	-	-
G29.96-0.0	11	B2- O7	O5-O4	O7.5-O5.5[a]
G45.12+0.1A	12	O8 - O3	-	O5-O6[a]
G45.12+0.1A	13	O8 - O3	-	-
G48.609+0.027	14	M Ia	M Ia	B0 - O7.5[b]
G53.605+0.046	15	B0 - O9	B0 - O9	-
G53.605+0.046	16	B0 - O9	B0 - O9	-
G70.965-1.6A	17	$>$ O9	-	-
G77.965-0.006A	18	B2	-	-
G77.965-0.006B	19	O9	B2 - O9	$<$B0.5[c]
G77.965-0.006B	21	B1	-	
G78.438+2.659	22	B2 - O9	B2 e O9	B0.5[a]
G5.97-1.17	23	B2	-	-
G5.97-1.17	24	B2 - O8	-	-

a - Tipo espectral estimado por Wood e Churchwell (1989b); b - Tipo espectral estimado por Kurtz, Churchwell e Wood (1994); c - Tipo espectral estimado por Kurtz, Watson, Hofner e Otte (1999); d - Tipo espectral estimado por Afflerbach, Churchwell e Werner (1997).

Já a observação em bandas complementares trazem uma gama maiores de linhas e intensidades, resultando em uma classificação mais eficiente e precisa do tipo espectral do objeto observado que apresente as linhas fotosféricas observadas, conforme é visto nos catálogos de Hanson, Conti e Rieke (1996), Hanson *et al.* (2005).

6.5 PCA e contaminação nebular

Comparando-se os resultados obtidos com o PCA com os espectros extraídos pela espectroscopia, foi verificado que o PCA obtêm uma representação espectral com menos contaminação nebular. Este fato ocorre pelo próprio modo de processamento do PCA. Como o PCA agrupa as informações associadas a cada tipo de dado correlacionado em conjuntos de variáveis, as informações nebulares e fotosféricas contidas no cubo de dados são incorporados em variáveis distintas. Por outro lado, a espectroscopia extrai as informações contidas no tamanho da abertura circular escolhida. Assim, qualquer abertura acarretará na presença de contaminação nebular, já que não é possível apenas com a extração do espectro remover da fonte tais linhas.

7 Conclusões

Este trabalho trouxe os resultados do estudo de 19 regiões utilizando os métodos PCA e a espectroscopia unidimensional.

A partir do tratamento PCA obtivemos como resultado a classificação espectral por meio de linhas fotosféricas de 11 fontes, 1 a mais que a espectroscopia. Dentre essas fontes, 9 são classificadas como estrelas OB e 2 são classificadas como supergigantes M luminosas.

A espectroscopia junto com o método de fotoionização das linhas nebulares conseguiram classificar mais 10 fontes com o uso da razões de linhas, algo não possível com o PCA.

O PCA se mostrou uma eficiente ferramenta para estudos de ambientes de formação estelar, pois além de contribuir para classificação das fontes este método permite estudar o campo de visada por completo e utilizar todas as informações contida nos cubos de dados, tais como efluxos, discos de acreção, fonte embebidas ou ofuscadas.

As demais conclusões deste trabalho é descrito abaixo:

i) Da amostra de 25 fontes observada, 21 fontes tiveram seus tipos espectrais estimados, sendo 11 fontes por meio direto e 10 objetos por meios indiretos. As demais fontes não puderam ser classificadas.

ii) O uso do espectrógrafos IFU+óptica adaptativa foi mais eficiente para observar as linhas fotosféricas em comparação com a espectroscopia de fenda longa.

iii) A classificações espectrais obtida para as regiões estudadas neste trabalho estão condizentes com a literatura. E algumas regiões foram classificadas com mais quentes que a classificação espectral obtidas partir de observações em rádio contínuo.

iv) Dois objetos apresentaram espectros compatíveis com Supergigantes frias e não podem ser as estrelas ionizantes das regiões UCHII. Desta maneira, das X regiões estudadas nesse trabalho, 2 não apresentam contrapartidas NIR.

v) O método PCA apresentou algum sucesso em detectar linhas fotosféricas, sendo superior à espectroscopia tradicional. Este fato ocorre por o PCA conseguir agrupar informação correlacionadas em todo o campo e separa a contaminação nebular na representações espectrais.

vi) Para resultados mais refinados da classificação espectral são necessárias observações complementares na banda *H*.

Para trabalhos futuros, é necessário a aplicação dos mapas de faixas espectrais para as demais regiões estudas para verificar as consistências destes métodos no estudo da formação de estrelas de alta massa, como também, investigar novas estruturas e dinâmicas presentes nestas regiões. Utilizar o método PCA nas demais UCHII conhecida, para determinar sua eficiência, sua capacidade de desvendar as estruturas e o gás presente nestas regiões.

Outro trabalho possível, é aumentar a amostra de regiões a serem observadas

para aumentar a contribuição da detecção das fontes ionizantes, que hoje ainda é baixa, da ordem de 4%.

REFERÊNCIAS

AFFLERBACH, A. *et al.* A multiline, multiresolution VLA study of the ultracompact H II region G29.96-0.02. **ApJ**, v. 437, p. 697–704, dez. 1994. 34

AFFLERBACH, A.; CHURCHWELL, E.; WERNER, M. W. Galactic Abundance Gradients from Infrared Fine-Structure Lines in Compact H II Regions. **ApJ**, v. 478, p. 190–205, mar. 1997. 33, 133, 167

ALVAREZ, C. *et al.* Near-Infrared Subarcsecond Observations of Ultracompact H II Regions. **ApJS**, v. 155, p. 123–148, nov. 2004. 32, 33, 40, 41, 76, 83, 110

BARBOSA, C. L. *et al.* High Spatial Resolution Spectroscopy of W51 IRS 2E and IRS 2W: Two Very Massive Young Stars in Early Formation Stages. **ApJ**, v. 678, p. L55–L58, maio 2008. 23, 24

BAUDRY, A. *et al.* A survey of star-forming regions in the 5 CM lines of OH. **A&A**, v. 325, p. 255–268, set. 1997. 32

BELTRÁN, M. T. *et al.* A Hi-GAL study of the high-mass star-forming region G29.96-0.02. **A&A**, v. 552, p. A123, abr. 2013. 35

BEUTHER, H. *et al.* High-Mass Protostellar Candidates. II. Density Structure from Dust Continuum and CS Emission. **ApJ**, v. 566, p. 945–965, fev. 2002. 38

BEUTHER, H.; WALSH, A. J.; LONGMORE, S. N. Hot High-Mass Accretion Disk Candidates. **ApJS**, v. 184, p. 366–386, out. 2009. 23

BIK, A. *et al.* VLT K-band spectroscopy of massive stars deeply embedded in IRAS sources with UCHII colours. **A&A**, v. 440, p. 121–137, set. 2005. 25, 54, 137

BIK, A.; KAPER, L.; WATERS, L. B. F. M. VLT K-band spectroscopy of massive young stellar objects in (ultra-)compact HII regions. **A&A**, v. 455, p. 561–576, ago. 2006. 24, 54, 137

BIK, A. *et al.* An Infrared View of (Candidate Accretion) Disks around Massive Young Stars. v. 387, p. 78, maio 2008. 23, 24, 86, 137, 139, 158

BIK, A.; THI, W. F. Evidence for an inner molecular disk around massive Young Stellar Objects. **A&A**, v. 427, p. L13–L16, dez. 2004. 86

BLUM, R. D. *et al.* Accretion Signatures from Massive Young Stellar Objects. **ApJ**, v. 617, p. 1167–1176, dez. 2004. 86

BLUM, R. D.; DAMINELI, A. Two Micron Narrowband Imaging of the Sagittarius D H II Region. **ApJ**, v. 512, p. 237–246, fev. 1999. 55, 56, 57

BLUM, R. D.; MCGREGOR, P. J. The Ionizing Stars of the Galactic Ultra-Compact H II Region G45.45+0.06. **AJ**, v. 135, p. 1708–1717, maio 2008. 24, 25, 55, 56, 57, 137, 139, 155

_____. High Angular Resolution Imaging Spectroscopy of the Galactic Ultracompact H II Region K3-50A. **AJ**, v. 138, p. 489–501, ago. 2009. 24, 39, 55, 57, 137, 155, 157, 159

BONNELL, I. A.; BATE, M. R.; ZINNECKER, H. On the formation of massive stars. **MNRAS**, v. 298, p. 93–102, jul. 1998. 21

BRONFMAN, L.; NYMAN, L.-A.; MAY, J. A CS(2-1) survey of IRAS point sources with color characteristics of ultra-compact HII regions. **A&AS**, v. 115, p. 81, jan. 1996. 38

CARPENTER, J. M. *et al.* Embedded star clusters associated with luminous IRAS point sources. **ApJ**, v. 407, p. 657–679, abr. 1993. 66

CASWELL, J. L. *et al.* Neutral hydrogen absorption measurements yielding kinematic distances for 42 continuum sources in the galactic plane. **A&A**, v. 45, p. 239–258, dez. 1975. 42

CHAN, S. J.; HENNING, T.; SCHREYER, K. Catalogue of massive young stellar objects (Chan+, 1996). **VizieR Online Data Catalog**, v. 411, p. 50285, jul. 1995. 40

_____. A catalogue of massive young stellar objects. **A&AS**, v. 115, p. 285, fev. 1996. 31, 34, 36, 37

CHANDLER, C. J.; CARLSTROM, J. E.; SCOVILLE, N. Z. Infrared CO Emission from Young Stars: Accretion Disks and Neutral Winds. **ApJ**, v. 446, p. 793, jun. 1995. 24, 86

CHEN, P. S.; GAO, H.; XIONG, G. Z. IRAS LRS Spectra of the Sharpless H II Regions. **ApJS**, v. 100, p. 389, out. 1995. 30, 32

CHURCHWELL, E. Ultra-Compact HII Regions and Massive Star Formation. **ARA&A**, v. 40, p. 27–62, 2002. 22, 24, 25, 26, 27, 28, 56, 165

CHURCHWELL, E.; WALMSLEY, C. M.; CESARONI, R. A survey of ammonia and water vapor emission from ultracompact HII regions. **A&AS**, v. 83, p. 119–144, abr. 1990. 30, 36

CODELLA, C. *et al.* IRAS-selected Galactic star-forming regions - II. Water maser detections in the extended sample. **MNRAS**, v. 276, p. 57–73, set. 1995. 33

COHEN, R. J.; MASHEDER, M. R. W.; WALKER, R. N. F. Excited OH 4.7-GHz masers associated with IRAS far-infrared sources. **MNRAS**, v. 250, p. 611–616, jun. 1991. 32

COLLEY, D. Radio observations of DR15 at 408, 1407 and 2695 MHz. **MNRAS**, v. 192, p. 377–388, ago. 1980. 24

COLLEY, D.; SCOTT, P. F. Observations of radio sources near K3-50. **MNRAS**, v. 181, p. 703–712, dez. 1977. 39

CROWTHER, P. A.; CONTI, P. S. MSX mid-infrared imaging of massive star birth environments - I. Ultracompact HII regions. **MNRAS**, v. 343, p. 143–163, jul. 2003. 32, 42, 97, 110

CROWTHER, P. A.; FURNESS, J. P. On the central ionizing star of G23.96+0.15 and near-IR spectral classification of O stars. **A&A**, v. 492, p. 111–115, dez. 2008. 33, 115

CYGANOWSKI, C. J. *et al.* A Catalog of Extended Green Objects in the GLIMPSE Survey: A New Sample of Massive Young Stellar Object Outflow Candidates. **AJ**, v. 136, p. 2391–2412, dez. 2008. 34

DE BUIZER, J. M. *et al.* Observations of Massive Star-Forming Regions with Water Masers: Mid-Infrared Imaging. **ApJS**, v. 156, p. 179–215, fev. 2005. 37

_____. Mid-Infrared Detection of a Hot Molecular Core in G29.96-0.02. **ApJ**, v. 564, p. L101–L104, jan. 2002. 35

DEPREE, C. G. *et al.* A bipolar outflow of ionized gas in K3-50A: H76 alpha radio recombination line and continuum observations of K3-50. **ApJ**, v. 428, p. 670–679, jun. 1994. 39

DOHERTY, R. M. *et al.* Spectroscopy of HII Regions at 2-MICRONS - Ultracompact Sources. **MNRAS**, v. 266, p. 497, jan. 1994. 24, 32, 105

DOWNES, D.; RINEHART, R. Microwave Observations of the Cygnus X Region. **ApJ**, v. 144, p. 937, jun. 1966. 40

FAISON, M. *et al.* Infrared Spectroscopy of Ultracompact H II Regions. **ApJ**, v. 500, p. 280–290, jun. 1998. 32, 37, 42, 104

FELLI, M.; CHURCHWELL, E.; MASSI, M. A high-resolution study of M17 at 1.3, 2, 6, and 21 CM. **A&A**, v. 136, p. 53–64, jul. 1984. 24

FELLI, M.; TOFANI, G.; D'ADDARIO, L. R. A survey of fine structure in galactic H II regions. **A&A**, v. 31, p. 431–439, abr. 1974. 24

FERLAND, G. J. *et al.* CLOUDY 90: Numerical Simulation of Plasmas and Their Spectra. **PASP**, v. 110, p. 761–778, jul. 1998. 53, 54, 55, 56

FERLAND, G. J.; SHIELDS, G. A.; NETZER, H. Asymmetries of the emission lines of QSOs, Seyfert galaxies, and novae. **ApJ**, v. 232, p. 382–388, set. 1979. 55

GEBALLE, T. R.; BURTON, M. G.; ISAACMAN, R. Observations of the 2-micron unidentified lines in planetary nebulae. **MNRAS**, v. 253, p. 75–79, nov. 1991. 137

GEBALLE, T. R.; PERSSON, S. E. Emission from CO band heads in young stellar objects. **ApJ**, v. 312, p. 297–302, jan. 1987. 24

GEMINI OBSERVATORY. . **NIFS**, p. Disponível em: <http://www.gemini.edu/sciops/instruments/nifs/?q=sciops/instruments/nifs>. Acessado em 26 fev. 2014, 2015. 44

GONTCHAROV, G. A. Pulkovo Compilation of Radial Velocities for 35 495 Hipparcos stars in a common system. **Astronomy Letters**, v. 32, p. 759–771, nov. 2006. 49

GULLIXSON, C. *et al.* The stellar component of the galaxy as seen by the AFGL infrared sky survey. **ApJS**, v. 53, p. 413–457, out. 1983. 40

HANSON, M. M.; CONTI, P. S.; RIEKE, M. J. A Spectral Atlas of Hot, Luminous Stars at 2 Microns. **ApJS**, v. 107, p. 281, nov. 1996. 53, 100, 105, 115, 133, 146, 152, 166, 168

HANSON, M. M. *et al.* A Medium Resolution Near-Infrared Spectral Atlas of O and Early-B Stars. **ApJS**, v. 161, p. 154–170, nov. 2005. 53, 54, 100, 133, 152, 166, 168

HANSON, M. M.; LUHMAN, K. L.; RIEKE, G. H. A Near-Infrared Survey of Radio-selected Ultracompact H II Regions. **ApJS**, v. 138, p. 35–61, jan. 2002. 25, 33, 41, 51, 83, 115, 133, 137

HARRIS, S. High-resolution radio observations of the sources near K3-50. **MNRAS**, v. 170, p. 139–153, jan. 1975. 39

HARRIS, S.; CLEGG, P. E. An infrared luminosity function for star-forming molecular clouds. **MNRAS**, v. 203, p. 955–962, jun. 1983. 40

HARVEY-SMITH, L.; COHEN, R. J. A MERLIN survey of 4.7-GHz excited OH masers in star-forming regions. **MNRAS**, v. 356, p. 637–646, jan. 2005. 39

HOFMANN, K.-H. *et al.* Peering into the heart of a high-mass star forming region: Bispectrum speckle interferometry of the ultracompact H II region K3-50 A. **A&A**, v. 417, p. 981–985, abr. 2004. 155, 159

HØG, E. *et al.* The Tycho-2 catalogue of the 2.5 million brightest stars. **A&A**, v. 355, p. L27–L30, mar. 2000. 49

HOWARD, E. M.; KOERNER, D. W.; PIPHER, J. L. The Rotating Gas Toroid Surrounding the K3-50A Ionized Bipolar Outflow. **ApJ**, v. 477, p. 738–753, mar. 1997. 39

HOWARD, E. M. *et al.* A Near-Infrared Study of the K3-50 Region of High-Mass Star Formation. **ApJ**, v. 460, p. 744, abr. 1996. 39

HUNTER, T. R.; PHILLIPS, T. G.; MENTEN, K. M. Active Star Formation toward the Ultracompact H II Regions G45.12+0.13 and G45.07+0.13. **ApJ**, v. 478, p. 283–294, mar. 1997. 36

ISRAEL, F. P. Aperture synthesis observations of galactic H II regions. III - Small H II regions in the anticenter region. **A&A**, v. 52, p. 175–190, out. 1976. 24

KARNIK, A. D.; GHOSH, S. K. Infrared Emission from Interstellar Dust Cloud with Two Embedded Sources: IRAS 19181+1349. **Journal of Astrophysics and Astronomy**, v. 20, p. 23, mar. 1999. 37

KARNIK, A. D. *et al.* Infrared spectral energy distribution of four star forming regions. **Bulletin of the Astronomical Society of India**, v. 27, p. 167, 1999. 37

KENNICUTT JR., R. C. *et al.* An Empirical Test and Calibration of H II Region Diagnostics. **ApJ**, v. 537, p. 589–612, jul. 2000. 57

KIM, K.-T.; KOO, B.-C. Radio Continuum and Recombination Line Study of Ultracompact H II Regions with Extended Envelopes. **ApJ**, v. 549, p. 979–996, mar. 2001. 30, 33, 35, 63, 133

KLAASSEN, P. D.; TESTI, L.; BEUTHER, H. Looking for outflow and infall signatures in high-mass star-forming regions. **A&A**, v. 538, p. A140, fev. 2012. 42

KLEINMANN, S. G.; HALL, D. N. B. Spectra of late-type standard stars in the region 2.0-2.5 microns. **ApJS**, v. 62, p. 501–517, nov. 1986. 100, 146

KOHOUTEK, L. Hamburg Schmidt-camera survey of faint planetary nebulae. **Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia**, v. 16, p. 221, 1965. 39

KRUMHOLZ, M. R. *et al.* The Formation of Massive Star Systems by Accretion. **Science**, v. 323, p. 754–, fev. 2009. 21, 23

KURTZ, S. *et al.* Hot Molecular Cores and the Earliest Phases of High-Mass Star Formation. **Protostars and Planets IV**, p. 299–326, maio 2000. 23

KURTZ, S.; CHURCHWELL, E.; WOOD, D. O. S. Ultracompact H II regions. 2: New high-resolution radio images. **ApJS**, v. 91, p. 659–712, abr. 1994. 24, 28, 32, 34, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 97, 121, 167

KURTZ, S.; HOFNER, P. Water Masers Toward Ultracompact H II Regions. **AJ**, v. 130, p. 711–720, ago. 2005. 33, 38, 41, 42

KURTZ, S. E. *et al.* Ultracompact H II Regions with Extended Radio-Continuum Emission. **ApJ**, v. 514, p. 232–248, mar. 1999. 37, 41, 76, 79, 167

LANZ, T.; HUBENY, I. A Grid of Non-LTE Line-blanketed Model Atmospheres of O-Type Stars. **ApJS**, v. 146, p. 417–441, jun. 2003. 56

_____. A Grid of NLTE Line-blanketed Model Atmospheres of Early B-Type Stars. **ApJS**, v. 169, p. 83–104, mar. 2007. 56

LE DUIGOU, J. M.; KNODLSEDER, J. Characteristics of new star cluster candidates in the Cygnus area. **A&A**, v. 392, p. 869–884, set. 2002. 40, 41, 76, 79

LÓPEZ-SEPULCRE, A. *et al.* Molecular outflows towards O-type young stellar objects. **A&A**, v. 499, p. 811–825, jun. 2009. 38

LUMSDEN, S. L.; HOARE, M. G. Molecular and ionized gas motions in the compact H II region G 29.96-0.02. **MNRAS**, v. 305, p. 701–706, maio 1999. 35

LUMSDEN, S. L.; PUXLEY, P. J. Near-infrared spectroscopy of the ultracompact HII region G45.12+0.13. **MNRAS**, v. 281, p. 493–508, jul. 1996. 24, 36, 37, 137, 139

LUMSDEN, S. L. *et al.* Helium and hydrogen line ratios and the stellar content of compact HII regions. **MNRAS**, v. 340, p. 799–812, abr. 2003. 36

MARTÍN-HERNÁNDEZ, N. L. *et al.* A VLT spectroscopic study of the ultracompact H II region G29.96-0.02. **A&A**, v. 405, p. 175–188, jul. 2003. 35, 133

MARTINS, F.; SCHAERER, D.; HILLIER, D. J. A new calibration of stellar parameters of Galactic O stars. **A&A**, v. 436, p. 1049–1065, jun. 2005. 34, 35, 36, 37, 38, 55, 66, 121, 132

MASSEY, P. The Slope of the Upper End of the IMF and the Upper Mass Limit: An Observer's Perspective. v. 440, p. 29, jun. 2011. 20

MCDERMID, R. NIFS Data Reduction. 2011. 45

MENEZES, R. B.; STEINER, J. E.; RICCI, T. V. A treatment procedure for Gemini North/NIFS data cubes: application to NGC 4151. **MNRAS**, v. 438, p. 2597–2620, mar. 2014. 60, 61, 70, 79, 97, 133, 139, 159, 164

MOLINARI, S. *et al.* A search for precursors of ultracompact HII regions in a sample of luminous IRAS sources. I. Association with ammonia cores. **A&A**, v. 308, p. 573–587, abr. 1996. 38

MORISSET, C. *et al.* A photoionization model of the compact H II region G29.96-0.02. **A&A**, v. 386, p. 558–570, maio 2002. 35

NAJITA, J. *et al.* Kinematic Diagnostics of Disks around Young Stars: CO Overtone Emission from WL 16 and 1548C27. **ApJ**, v. 462, p. 919, maio 1996. 86

NASA/IPAC INFRARED SCIENCE ARCHIVE. . **IRIS**, p. Disponível em: < http://irsa.ipac.caltech.edu/data/IRIS/>. Acessado em 30 set. 2015, 2015. 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42

NERIA, C.; GóMEZ, Y.; RODRíGUEZ, L. F. Compact radio sources in the vicinity of the ultracompact HII region G78.4+2.6. **RMXAA**, v. 46, p. 253–262, out. 2010. 42, 94, 97

ODENWALD, S. F. An IRAS survey of young stellar objects towards the Cygnus X region. **AJ**, v. 97, p. 801–808, mar. 1989. 41

ODENWALD, S. F.; SCHWARTZ, P. R. An IRAS survey of star-forming regions toward Cygnus. **ApJ**, v. 405, p. 706–719, mar. 1993. 40, 41, 76, 79

OJA, T. UBV photometry of stars whose positions are accurately known. VI. **A&AS**, v. 89, p. 415–419, ago. 1991. 49

OKAMOTO, Y. K. *et al.* K3-50A: An Ultracompact H II Region Ionized by a Massive Stellar Cluster. **ApJ**, v. 584, p. 368–384, fev. 2003. 39, 40, 155, 159

OKUMURA, S.-i. *et al.* Near-Infrared Spectroscopy of the Compact H II Region W51 IRS 2. **AJ**, v. 121, p. 2089–2094, abr. 2001. 137

PALAGI, F. *et al.* Classification and Statistical Properties of Galactic H2O Masers. **A&AS**, v. 101, p. 153, out. 1993. 32, 38

PALLA, F. *et al.* Water masers associated with dense molecular clouds and ultracompact H II regions. **A&A**, v. 246, p. 249–263, jun. 1991. 41

PRATAP, P.; MEGEATH, S. T.; BERGIN, E. A. High-Angular Resolution Millimeter-Wave and Near-Infrared Imaging of the Ultracompact H II Region G29.96-0.02. **ApJ**, v. 517, p. 799–818, jun. 1999. 34

PRICE, S. D.; MARCOTTE, L. P.; MURDOCK, T. L. Infrared mapping of the galactic plane. II - Medium-resolution maps of the Cygnus X region. **AJ**, v. 87, p. 131–140, jan. 1982. 40

RATHBORNE, J. M.; JACKSON, J. M.; SIMON, R. Infrared Dark Clouds: Precursors to Star Clusters. **ApJ**, v. 641, p. 389–405, abr. 2006. 34

REMIE, H.; LAMERS, H. J. G. L. M. Effective temperatures, and radii of luminous O and B stars - A test for the accuracy of the model atmospheres. **A&A**, v. 105, p. 85–97, jan. 1982. 86

RICCI, T. V.; STEINER, J. E.; GIANSANTE, L. A hot bubble at the centre of M81. **ArXiv e-prints**, fev. 2015. 133, 139, 159

RICCI, T. V.; STEINER, J. E.; MENEZES, R. B. NGC 7097: The Active Galactic Nucleus and its Mirror, Revealed by Principal Component Analysis Tomography. **ApJ**, v. 734, p. L10, jun. 2011. 164, 165

_____. Integral field unit spectroscopy of 10 early-type galactic nuclei - I. Principal component analysis Tomography and nuclear activity. **MNRAS**, v. 440, p. 2419–2441, maio 2014. 133, 139, 159, 164, 165

RUBIN, R. H. Models of H II regions - Heavy element opacity, variation of temperature. **ApJS**, v. 57, p. 349–387, fev. 1985. 133

RUSSEIL, D. *et al.* Giving physical significance to the Hi-GAL data: determining the distance of cold dusty cores in the Milky Way. **A&A**, v. 526, p. A151, fev. 2011. 34

SALPETER, E. E. The Luminosity Function and Stellar Evolution. **ApJ**, v. 121, p. 161, jan. 1955. 20, 21

SCHNEIDER, N. *et al.* A new view of the Cygnus X region. KOSMA ^{13}CO 2 to 1, 3 to 2, and ^{12}CO 3 to 2 imaging. **A&A**, v. 458, p. 855–871, nov. 2006. 42

Schulz, N. S. . **From Dust To Stars: Studies of the Formation and Early Evolution of Stars**. Primeira versão. [S.l.]: Springer, 2005. 22

SCHUTTE, A. J. *et al.* Detection of Thirty-Five New 5/1-6/0A+- Methanol Masers Towards IRAS Sources. **MNRAS**, v. 261, p. 783, abr. 1993. 41

SCOVILLE, N. Z. *et al.* Detection of CO band emission in the Becklin-Neugebauer object. **ApJ**, v. 232, p. L121–L124, set. 1979. 24

SHEPHERD, D. S.; CHURCHWELL, E. Bipolar Molecular Outflows in Massive Star Formation Regions. **ApJ**, v. 472, p. 225, nov. 1996. 32, 33

SIMPSON, J. P. *et al.* Far-infrared lines from H II regions: Abundance variations in the galaxy. **ApJ**, v. 444, p. 721–738, maio 1995. 33, 133

SIMPSON, J. P.; RUBIN, R. H. IRAS low-resolution spectral observations of H II regions. **ApJ**, v. 354, p. 165–183, maio 1990. 30, 34, 121

SRIDHARAN, T. K. *et al.* High-Mass Protostellar Candidates. I. The Sample and Initial Results. **ApJ**, v. 566, p. 931–944, fev. 2002. 38

SRIDHARAN, T. K.; WILLIAMS, S. J.; FULLER, G. A. The Direct Detection of a (Proto)Binary/Disk System in IRAS 20126+4104. **ApJ**, v. 631, p. L73–L76, set. 2005.

22

STECKLUM, B. *et al.* The ultracompact H II region G5.97-1.17 - an evaporating circumstellar disk in M8. **AJ**, v. 115, p. 767, fev. 1998. 29, 30, 66, 69, 72

STEINER, J. E.; MENEZES, R. B.; AMORIM, D. Identification of a high-velocity compact nebular filament 2.2 arcsec south of the Galactic Centre. **MNRAS**, v. 431, p. 2789–2795, maio 2013. 164, 165

STEINER, J. E. *et al.* PCA Tomography: how to extract information from data cubes. **MNRAS**, v. 395, p. 64–75, maio 2009. 62, 164

Sthaler, S. W. and Palla, F. . **The Formation of Stars**. Primeira versão. Weinheim: Wiley-VCH, 2004. 30, 31

TAKAHASHI, H. *et al.* [NE II] 12.8 Micron Images of Four Galactic Ultracompact H II Regions: Ionized Neon Abundance as a Tracer of the Ionizing Stars. **ApJ**, v. 541, p. 779–790, out. 2000. 36

TEJ, A. *et al.* A multiwavelength study of the ultracompact HII region associated with IRAS 20178+4046. **A&A**, v. 468, p. 1001–1008, jun. 2007. 42, 94

THOMPSON, M. A. *et al.* A SCUBA imaging survey of ultracompact HII regions. The environments of massive star formation. **A&A**, v. 453, p. 1003–1026, jul. 2006. 33, 115

VACCA, W. D.; CUSHING, M. C.; RAYNER, J. T. A Method of Correcting Near-Infrared Spectra for Telluric Absorption. **PASP**, v. 115, p. 389–409, mar. 2003. 48

VAN DER WALT, D. J.; GAYLARD, M. J.; MACLEOD, G. C. New detections of 5_1_-6_0_Aˆ+ˆ-methanol masers towards IRAS sources. **A&AS**, v. 110, p. 81, abr. 1995. 33, 38

VIG, S. *et al.* Infrared and Radio Study of Star-forming Regions Associated with IRAS 19111+1048 and IRAS 19110+1045. **ApJ**, v. 637, p. 400–414, jan. 2006. 36, 139

VOLK, K.; COHEN, M. New LRS spectra for 356 bright IRAS sources. **AJ**, v. 98, p. 931–975, set. 1989. 32

VOLK, K. *et al.* New low-resolution spectrometer spectra for IRAS sources. **ApJS**, v. 77, p. 607–645, dez. 1991. 40

WALSH, A. J. *et al.* Studies of ultracompact HII regions - II. High-resolution radio continuum and methanol maser survey. **MNRAS**, v. 301, p. 640–698, dez. 1998. 32

_____. Studies of ultracompact HII regions - I. Methanol maser survey of IRAS-selected sources. **MNRAS**, v. 291, p. 261–278, out. 1997. 32, 33

_____. Observations of warm dust near methanol masers. **A&A**, v. 410, p. 597–610, nov. 2003. 35

WATARAI, H. *et al.* Observations of the [Ne II] 12.8 Micron Emission from Two UltracompactH II Regions, G29.96-0.02 and W51d. **ApJ**, v. 507, p. 263–269, nov. 1998. 35, 133

WATSON, A. M. *et al.* Direct Observations of the Ionizing Star in the Ultracompact H II Region G29.96-0.02: A Strong Constraint on the Stellar Birth Line for Massive Stars. **ApJ**, v. 487, p. 818–833, out. 1997. 35

WATSON, A. M.; HANSON, M. M. Near-Infrared Spectroscopy of G29.96-0.02: The First Spectral Classification of the Ionizing Star of an Ultracompact H II Region. **ApJ**, v. 490, p. L165–L169, dez. 1997. 25, 35, 133

WOOD, D. O. S.; CHURCHWELL, E. Massive stars embedded in molecular clouds - Their population and distribution in the galaxy. **ApJ**, v. 340, p. 265–272, maio 1989. 21

_____. The morphologies and physical properties of ultracompact H II regions. **ApJS**, v. 69, p. 831–895, abr. 1989. 24, 25, 27, 28, 29, 30, 32, 33, 34, 35, 36, 42, 64, 66, 104, 133, 139, 167

WYNN-WILLIAMS, C. G. Radio Emission from the Vicinity of the Galactic Nebula NGC 6857. **Astrophys. Lett.**, v. 3, p. 195, 1969. 39

YANG, K. S.; WEST, L. A. Cygnus X region at 610.5 Mc/sec. **AJ**, v. 69, p. 246–250, abr. 1964. 40

ZHANG, Q. *et al.* Search for CO Outflows toward a Sample of 69 High-Mass Protostellar Candidates. II. Outflow Properties. **ApJ**, v. 625, p. 864–882, jun. 2005. 38

ZINNECKER, H.; YORKE, H. W. Toward Understanding Massive Star Formation. **ARA&A**, v. 45, p. 481–563, set. 2007. 22, 66