

Universidade de São Paulo
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
Departamento de Astronomia

Patrícia da Silva

Estudo de Núcleos de Galáxias Gêmeas da Via Láctea

São Paulo

2016

Patrícia da Silva

Estudo de Núcleos de Galáxias Gêmeas da Via Láctea

Dissertação apresentada ao Departamento de
Astronomia do Instituto de Astronomia, Geofísica
e Ciências Atmosféricas da Universidade de
São Paulo como requisito parcial para a ob-
tenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Astronomia

Orientador: Prof. Dr. João E. Steiner

Versão corrigida. A versão original encontra-
se disponível na biblioteca do Instituto de As-
tronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
da Universidade de São Paulo.

São Paulo

2016

ao meu Pai e ao Roberto

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, a Deus por me dar a oportunidade e capacidade de estudar e trabalhar com o que eu amo. Meu especial agradecimento vai para o meu pai e para a minha avó Raimunda, que foram dois pilares que me sustentaram com apoio e orações. Agradeço também a Roseli e a minha mãe pelo apoio. Agradeço ao meu orientador, João E. Steiner, por me aceitar como aluna, por me apoiar e me ensinar. Agradeço também ao Dr. Roberto B. Menezes, que me ajudou muito desde a análise dos dados até com as matérias do mestrado e que me apoiou durante todos esses anos. Agradeço a todos os professores que, de uma forma ou de outra, transmitiram seus conhecimentos e me ajudaram a superar algumas dificuldades. Também agradeço aos meus colegas Tiago V. Ricci, Daniel May, Mirian Castejon, Carla Martinez, Maria Luiza Dantas, entre outros, que, em algum momento desses 2 anos de mestrado, me ajudaram. Agradeço a CAPES e Cnpq pelo apoio financeiro. Agradeço ao professor Ronaldo E. de Souza, o professor relator do projeto, pelo apoio, sugestões e críticas. E, por fim, agradeço ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas pela oportunidade e pela estrutura oferecidas.

*“Os que semeiam em prantos ceifam em meio a canções, vão andando e chorando ao
levar a semente. Ao regressar, voltam cantando trazendo seus feixes.”*

Salmos 126:5

*“atoms with consciousness;/ matter with curiosity./Stands at the sea,/ wonders at
wondering: I/ a universe of atoms/ an atom in the Universe.” (33-38)*

Richard P. Feynman

Resumo

Este trabalho consiste no estudo de cubos de dados das regiões centrais de quatro galáxias com mesmo tipo morfológico da Via Láctea: NGC 1566, NGC 6744, NGC 613 e NGC 134. As observações foram feitas no período de 2013 a 2015 com o *Integral Field Unit* do *Gemini Multi-Object Spectrograph* do telescópio Gemini Sul. Foram utilizadas técnicas de análise de dados como Tomografia PCA, síntese espectral e *Penalized Pixel Fitting*. Além disso, para todos objetos, foram calculadas razões de linhas de emissão dos espectros das regiões centrais, imagens da emissão de [SII] $\lambda\lambda$ 6716, 6731 das nuvens de alta e baixa densidades foram feitas e, em dois casos (NGC 1566 e NGC 613), analisaram-se imagens do *Hubble Space Telescope* para melhor entendimento do ambiente circumnuclear. Foram encontrados 6 espectros com emissão compatível com a de AGNs na amostra, sendo que, em duas galáxias, existe a possibilidade de AGNs duplos: NGC 6744 e NGC 613. No geral, todas as galáxias apresentaram populações estelares de idades variadas em suas regiões centrais, porém, predominantemente, com metalicidades altas (0.02 e 0.05). Todas as galáxias apresentaram cinemática estelar compatível com discos de rotação em torno do núcleo e, em duas galáxias (NGC 1566 e NGC 6744), foi observado um decréscimo da dispersão de velocidades estelar em direção ao núcleo, possivelmente devido à presença de estrelas jovens massivas. A emissão do *featureless continuum* do núcleo da galáxia de Seyfert NGC 1566 foi, pela primeira vez, isolada e estudada, sendo que foi encontrado um índice espectral igual 1.7. Uma amostra de quatro galáxias não é estatisticamente conclusiva e será necessário ampliar a amostra para um melhor entendimento global dos núcleos de galáxias de mesmo tipo morfológico da Via Láctea.

Abstract

This work involved the analysis of data cubes of four nuclear regions of galaxies that have the same morphological type of the Milky Way: NGC 1566, NGC 6744, NGC 613 and NGC 134. The observations were taken in the period of 2013 to 2015 with the Integral Field Unit of Gemini Multi-object Spectrograph on the Gemini South telescope. The data were analyzed using techniques like PCA Tomography, spectral synthesis and the Penalized Pixel Fitting process. Besides that, for all the objects, emission-line ratios of the central regions were calculated, images of the emission-lines [SII] $\lambda\lambda$ 6716, 6731 of clouds of high and low densities were made and, in two cases (NGC 1566 and NGC 6744), their Hubble Space Telescope images were analyzed for better understanding of their circumnuclear regions. 6 spectra of the sample had emission compatible with that of AGNs, in two galaxies, there is a possibility of double AGN: NGC 613 and NGC 6744. In general, all the galaxies presented stellar populations with varying ages in their central regions, however mainly with high metallicities (0.02 and 0.05). All the galaxies presented stellar kinematics compatible with rotation disks around the central source and, in two galaxies (NGC 1566 and NGC 6744), there was a stellar dispersion velocity decrease toward the nuclei, possibly due to the presence of massive young stars. The featureless continuum emission of the Seyfert galaxy NGC 1566 was, for the first time, isolated and studied. It was found that its spectral index is equal to 1.7. A sample of four galaxies is not conclusive and it is necessary to enlarge this sample to a better global understanding of the nuclei of galaxies with the same morphological type of the Milky Way.

Lista de Figuras

1.1	Galáxias da amostra	27
3.1	Imagem do cubo colapsado e espectro médio de NGC 1566	42
3.2	Tomograma/autovetor 1 da Tomografia PCA do cubo deconvoluido de NGC 1566	44
3.3	Tomograma/autovetor 2 da Tomografia PCA do cubo deconvoluido de NGC 1566	45
3.4	Regiões emisoras encontradas em NGC 1566	46
3.5	Tomograma/autovetor 3 da Tomografia PCA do cubo deconvoluido de NGC 1566	47
3.6	Tomograma/autovetor 4 da Tomografia PCA do cubo deconvoluido de NGC 1566	48
3.7	Diagrama de <i>Scree</i> da Tomografia PCA do cubo deconvoluido de NGC 1566	49
3.8	Histograma das populações estelares em NGC 1566	50
3.9	Mapas das populações estelares obtidos com a síntese espectral em NGC 1566	51
3.10	Mapas de extinção, χ^2 , S/N e da lei potência com $\alpha=1.5$ obtidos com a síntese espectral de NGC 1566	52
3.11	Mapas de velocidade radial estelar, dispersão de velocidades e coeficientes Gauss-Hermite h_3 e h_4 em NGC 1566	54
3.12	Mapas de incertezas do pPXF de NGC 1566	55
3.13	Perfil radial do mapa de dispersão de NGC 1566	56
3.14	Tomograma/autovetor 1 da Tomografia PCA do cubo de gás de NGC 1566	57
3.15	Tomograma/autovetor 2 da Tomografia PCA do cubo de gás de NGC 1566	58
3.16	Tomograma/autovetor 3 da Tomografia PCA do cubo de gás de NGC 1566	59

3.17 Tomograma/autovetor 4 da Tomografia PCA do cubo de gás de NGC 1566	60
3.18 Diagrama de <i>Scree</i> da Tomografia PCA do cubo de gás de NGC 1566	61
3.19 Espectro da Região 1 de NGC 1566	62
3.20 Decomposição de linhas da Região 1 de NGC 1566	63
3.21 Espectro da Região 2 de NGC 1566	64
3.22 Decomposição da linha [OIII] λ 5007 da Região 2 de NGC 1566	65
3.23 Diagramas de diagnósticos das regiões emissoras encontradas em NGC 1566	66
3.24 Componentes largas das linhas H α e H β da Região 1 de NGC 1566	68
3.25 Subtração do <i>featureless continuum</i> no autovetor E2	70
3.26 Imagens da emissão de [SII] $\lambda\lambda$ 6716, 6731 de nuvens com alta e baixa densidade de NGC 1566	71
3.27 Composição RG da imagem da integral do cubo sintético estelar e a imagem da asa larga de H α de NGC 1566	73
3.28 Tomograma 3 do PCA do cubo deconvoluido com sobreposição de CO de NGC 1566	74
3.29 Evidências da espiral nuclear de NGC 1566	75
4.1 Imagem do cubo colapsado e espectro médio de NGC 6744	80
4.2 Tomograma/autovetor 1 da Tomografia PCA do cubo deconvoluido de NGC 6744	81
4.3 Tomograma/autovetor 2 da Tomografia PCA do cubo deconvoluido de NGC 6744	82
4.4 Tomograma/autovetor 3 da Tomografia PCA do cubo deconvoluido de NGC 6744	83
4.5 Diagrama de <i>Scree</i> da Tomografia PCA do cubo deconvoluido de NGC 6744	84
4.6 Histograma da síntese espectral de NGC 6744	85
4.7 Mapas das populações estelares obtidos com a síntese espectral de NGC 6744	86
4.8 Mapas de extinção, χ^2 e S/N obtidos com a síntese espectral de NGC 6744	87
4.9 Resultados da síntese espectral do centro e da região periférica de NGC 6744	88
4.10 Mapas de velocidade, dispersão de velocidades e coeficientes h ₃ e h ₄ obtidos com pPXF de NGC 6744	90
4.11 Mapas de incertezas dos resultados do pPXF de NGC 6744	91

4.12	Perfil radial da dispersão de velocidades de NGC 6744	92
4.13	Tomograma e autovetor 1 da Tomografia PCA do cubo de gás de NGC 6744	93
4.14	Tomograma e auto-espectro 2 da Tomografia PCA do cubo de gás de NGC 6744	94
4.15	Diagrama de <i>Scree</i> da Tomografia PCA do cubo de gás de NGC 6744 . . .	95
4.16	Imagens das linhas [OIII] λ 5007, [SII] λ 6716, [NII] λ 6584 e H α de NGC 6744	96
4.17	Imagem da linha [OIII] λ 5007 contendo as posições das regiões de emissão de NGC 6744	97
4.18	Composição da imagem do bojo estelar com a imagem de [NII] λ 6584 de NGC6744	98
4.19	Imagens RGB das linhas [NII] λ 6584 e H α	98
4.20	Espectro da Região 1 de NGC6744	99
4.21	Espectro da Região 2 de NGC6744	101
4.22	Espectro da Região 3 de NGC6744	101
4.23	Diagrama de diagnóstico das três regiões emissoras em NGC6744	102
4.24	Imagens da emissão de [SII] λ 6716, 6731 das nuvens de alta e baixa densi- dade de NGC 6744	103
5.1	Espectro médio e imagem colapsada do cubo de NGC 613	110
5.2	Tomograma/autovetor 1 da Tomografia PCA do cubo total deconvoluído de NGC 613	112
5.3	Tomograma/autovetor 2 da Tomografia PCA do cubo total deconvoluído de NGC 613	113
5.4	Tomograma/autovetor 3 da Tomografia PCA do cubo total deconvoluído de NGC 613	114
5.5	Diagrama de <i>Scree</i> da Tomografia PCA do cubo total deconvoluído de NGC 613	115
5.6	Tomograma/autovetor 1 da Tomografia PCA do CCD2 do cubo decon- voluído de NGC 613	116
5.7	Tomograma 1 da Tomografia PCA do CCD2 com as regiões N1 e N2 de NGC 613	117

5.8	Diagrama de <i>Scree</i> da Tomografia PCA do CCD2 do cubo deconvoluído de NGC 613	118
5.9	Histograma da síntese espectral de NGC 613	119
5.10	Populações estelares da síntese espectral de NGC 613	119
5.11	Mapas de A_V , χ^2 , S/N e <i>featureless continuum</i> de NGC 613	120
5.12	Síntese espectral das regiões N1 e N2 de NGC 613	122
5.13	Síntese espectral da região do <i>featureless continuum</i> de NGC 613	123
5.14	Histograma da síntese espectral das regiões circumnucleares de NGC 613	124
5.15	Cinemática estelar de NGC 613	126
5.16	Mapas de incerteza do pPXF de NGC 613	127
5.17	Tomograma/autovetor 1 da Tomografia PCA do cubo de gás total de NGC 613	128
5.18	Tomograma/autovetor 2 da Tomografia PCA do cubo de gás total de NGC 613	129
5.19	Tomograma/autovetor 3 da Tomografia PCA do cubo de gás total de NGC 613	130
5.20	Diagrama de <i>Scree</i> da Tomografia PCA do cubo de gás total de NGC 613	131
5.21	Localização das 7 regiões de NGC 613	132
5.22	Espectro da Região 1 de NGC 613	134
5.23	Espectro da Região 2 de NGC 613	135
5.24	Espectro da Região 3 de NGC 613	135
5.25	Espectro da Região 4 de NGC 613	136
5.26	Espectro da Região 5 de NGC 613	136
5.27	Espectro da Região 6 de NGC 613	137
5.28	Espectro da Região 7 de NGC 613	137
5.29	Espectro da Região N1 de NGC 613	138
5.30	Espectro da Região N2 de NGC 613	138
5.31	Decomposição de linhas da Região 6 de NGC 613	140
5.32	Decomposição de linhas da Região 7 de NGC 613	140
5.33	Decomposição de linhas da Região N1 de NGC 613	141
5.34	Decomposição de linhas da Região N2 de NGC 613	141
5.35	Diagrama de diagnóstico de [NII]/H α de NGC 613	142

5.36	Diagramas de diagnóstico de [SII]/H α e [OI]/H α de NGC 613	143
5.37	Imagens da emissão de [SII] $\lambda\lambda$ 6716, 6731 das nuvens de alta e baixa densidades de NGC 613	145
5.38	Imagens dos filtros F450W, F606W e F814W do HST de NGC 613	146
5.39	Composição RGB dos filtros F450W, F606W e F814W do HST de NGC 613	147
5.40	Imagens de F450W-F814W (similar a B-I) e F606W-F814W (similar a V-I) do HST de NGC 613	147
5.41	Composição RGB da linha [NI] $\lambda\lambda$ 5198, 5200 de NGC 613	149
5.42	Composição RG da imagem da integral do cubo sintético estelar e do tomograma 3 da Tomografia PCA do cubo de gás de NGC 613	151
5.43	<i>Position angle</i> do <i>outflow</i> de NGC 613	156
5.44	<i>Channel map</i> da linha H α de NGC 613	159
6.1	Imagem do cubo colapsado e espectro médio de NGC 134	162
6.2	Autovetor/tomograma 1 da Tomografia PCA do cubo deconvoluído de NGC 134	163
6.3	Autovetor/tomograma 3 da Tomografia PCA do cubo deconvoluído de NGC 134	164
6.4	Diagrama de <i>Scree</i> da Tomografia PCA do cubo deconvoluído de NGC 134	165
6.5	Tomograma/autovetor 1 da Tomografia PCA do CCD 2 do cubo deconvoluído de NGC 134	166
6.6	Tomograma/autovetor 2 da Tomografia PCA do CCD 2 do cubo deconvoluído de NGC 134	167
6.7	Diagrama de <i>Scree</i> da Tomografia PCA do CCD 2 do cubo deconvoluído de NGC 134	168
6.8	Tomograma/autovetor 1 da Tomografia PCA do CCD 3 do cubo deconvoluído de NGC 134	169
6.9	Tomograma/autovetor 2 da Tomografia PCA do CCD 3 do cubo deconvoluído de NGC 134	170
6.10	Tomograma/autovetor 3 da Tomografia PCA do CCD 3 do cubo deconvoluído de NGC 134	170

6.11 Diagrama de <i>Scree</i> da Tomografia PCA do CCD 3 do cubo deconvoluído de NGC 134	171
6.12 Histograma da síntese espectral de NGC 134	172
6.13 Populações estelares da síntese espectral de NGC 134	173
6.14 Mapas de A_V , χ^2 e S/N da síntese espectral de NGC 134	174
6.15 Mapas da cinemática estelar de NGC 134	175
6.16 Mapas de incerteza do pPXF de NGC 134	176
6.17 Tomograma/autovetor da Tomografia PCA do cubo de gás total de NGC 134177	
6.18 Diagrama de <i>Scree</i> da Tomografia PCA do cubo de gás total de NGC 134 .	178
6.19 Tomograma/auto-espectro 1 da Tomografia PCA do CCD3 do cubo de gás de NGC 134	180
6.20 Tomograma/auto-espectro 2 da Tomografia PCA do CCD3 do cubo de gás de NGC 134	180
6.21 Diagrama de <i>Scree</i> da Tomografia PCA do CCD3 do cubo de gás de NGC 134	181
6.22 Espectro da região central do FOV (Região 1) de NGC 134	183
6.23 Diagramas de diagnósticos de NGC 134	184
6.24 Imagens da emissão de [SII] $\lambda\lambda$ 6716, 6731 das nuvens de alta e baixa densidades de NGC 134	185
6.25 Composição RG da imagem da integral do cubo sintético estelar e o tomograma 1 da Tomografia PCA aplicada ao CCD 3 do cubo de gás de NGC 613	186
6.26 Composição RGB da linha $H\alpha$ de NGC 134	187

Lista de Tabelas

2.1	Tabela de idades da síntese espectral	35
3.1	Tabela de autovalores da Tomografia PCA do cubo deconvoluido de NGC 1566	49
3.2	Tabela de autovalores da Tomografia PCA do cubo de gás de NGC 1566 .	61
3.3	Tabela com as luminosidades de $H\alpha$, $[OIII]\lambda 5007$ e $[NII]\lambda 6584$ de NGC 1566	65
3.4	Razões de linhas em NGC 1566	67
3.5	<i>Redshift</i> gravitacional em NGC 1566	68
4.1	Tabela de autovalores da Tomografia PCA do cubo deconvoluido de NGC 6744	84
4.2	Tabela de autovalores da Tomografia PCA do cubo de gás de NGC 6744 .	95
4.3	Distâncias projetadas das Regiões 2 e 3 em relação ao centro de NGC 6744	97
4.4	Luminosidades das linhas $[OIII]\lambda 5007$, $H\alpha$ e $[NII]\lambda 6584$ das 3 regiões de NGC 6744	100
4.5	Tabela com as razões de linhas das 3 regiões de NGC 6744	100
4.6	Densidades das regiões de NGC 6744	102
5.1	Autovalores da Tomografia PCA do cubo total deconvoluido de NGC 613 .	116
5.2	Autovalores da Tomografia PCA do CCD2 do cubo deconvoluido de NGC 613	118
5.3	Tabela de autovalores da Tomografia PCA aplicada ao cubo de gás de NGC 613	131
5.4	Tabela de distâncias das regiões de NGC 613 com relação à Região N1 . .	133
5.5	Luminosidades das linhas $[OIII]\lambda 5007$, $[NII]\lambda 6584$ e $H\alpha$ de todas as regiões de NGC 613	139

5.6	Tabela com os valores do FWHM e V das componentes 1 e 2 das decomposições de linhas de NGC 613	139
5.7	FWHM das linhas das regiões 1, 2, 3, 4 e 5 de NGC 613	140
5.8	Velocidades relativas à Região N1 das demais regiões de NGC 613	142
5.9	Tabela das densidades eletrônicas das regiões de NGC 613	144
5.10	Razões de linhas de NGC 613	158
6.1	Tabela de autovalores da Tomografia PCA do cubo deconvoluído de NGC 134165	
6.2	Tabela de autovalores da Tomografia PCA do CCD 2 do cubo deconvoluído de NGC 134	168
6.3	Tabela de autovalores da Tomografia PCA do CCD 3 do cubo deconvoluído de NGC 134	169
6.4	Tabela de autovalores da Tomografia PCA aplicada ao cubo de gás total de NGC 134	179
6.5	Tabela de autovalores da Tomografia PCA do CCD3 do cubo de gás de NGC 134	181
6.6	Luminosidades das linhas [OIII] λ 5007, [NII] λ 6584 e H α de NGC 134	182
6.7	Tabela das razões de linhas da região central de NGC 134	183

Sumário

1. Introdução	25
2. Metodologia	29
2.1 Observação e aquisição de dados	29
2.2 Redução de dados	30
2.3 Tratamento de dados	31
2.3.1 Correção da refração atmosférica diferencial	31
2.3.2 Combinação dos cubos de dados	32
2.3.3 Filtragem espacial de <i>Butterworth</i>	32
2.3.4 Remoção do <i>fingerprint</i> instrumental	33
2.3.5 Deconvolução Richardson-Lucy	33
2.4 Métodos de análise dos dados	34
2.4.1 Tomografia PCA	34
2.4.2 Síntese espectral	34
2.4.3 Obtenção do cubo de gás	36
2.4.4 Cinemática estelar	36
2.4.5 Imagens da emissão de [SII] $\lambda\lambda$ 6716, 6731 das nuvens de alta e baixa densidade	37
3. NGC 1566	39
3.1 Introdução	39
3.2 Observações e tratamento dos dados	42
3.3 Tomografia PCA do cubo deconvoluído	43
3.4 Resultados da síntese espectral	47

3.5	Cinemática Estelar	53
3.6	Tomografia PCA do cubo de gás	57
3.7	Razões de Linhas	61
3.7.1	Perfis de $H\alpha$ e $H\beta$ do AGN e <i>redshift</i> gravitacional	67
3.7.2	Algumas propriedades da Região HII	69
3.7.3	Densidade eletrônica	69
3.8	<i>Featureless continuum</i>	70
3.9	Imagens da emissão de $[SII]\lambda\lambda 6716, 6731$ de nuvens com alta e baixa densidade	71
3.10	Imagem do HST de NGC 1566	72
3.11	Discussão e conclusão	72
3.11.1	NGC 1566 possui um AGN e uma região HII em seu centro	72
3.11.2	Estrutura espiral no núcleo de NGC 1566	74
3.11.3	Populações estelares e sua cinemática	76
3.11.4	<i>Featureless Continuum</i> com índice espectral 1.7	76
4.	NGC 6744	79
4.1	Introdução	79
4.2	Observações e tratamento de dados	79
4.3	Tomografia PCA do cubo deconvoluido	81
4.4	Resultados da síntese espectral	83
4.4.1	Sínteses espectrais do centro e das regiões periféricas	88
4.5	Cinemática estelar	89
4.6	Tomografia PCA do cubo de gás	92
4.7	RGBs e imagens de linhas de NGC 6744	94
4.8	Razões de Linhas	99
4.9	Imagens da emissão de $[SII]\lambda\lambda 6716, 6731$ das nuvens de alta e baixa densidade de NGC 6744	103
4.10	Discussão e conclusão	104
4.10.1	NGC 6744 possui um AGN central (Região 1)	104
4.10.2	A Região 2	105
4.10.3	Populações estelares e sua cinemática	106
4.10.4	Cinemática do gás e ambiente circumnuclear	106

5.	<i>NGC 613</i>	109
5.1	Introdução	109
5.2	Observações e tratamento de dados	110
5.3	Tomografia PCA do cubo deconvoluido	111
5.3.1	Cubo total	111
5.3.2	CCD 2 (5500Å a 6200Å)	115
5.4	Resultados da síntese espectral	117
5.4.1	Sínteses espectrais nas Regiões N1, N2 e <i>featureless continuum</i>	121
5.4.2	Síntese espectral nas regiões circumnucleares	124
5.5	Cinemática estelar	125
5.6	Tomografia PCA do cubo de gás	127
5.7	Razões de Linhas	132
5.8	Imagens da emissão de [SII] $\lambda\lambda$ 6716, 6731 das nuvens de alta e baixa densidades	144
5.9	Análise com imagens do HST	145
5.10	Composição RGB de [NI] $\lambda\lambda$ 5198, 5200	148
5.11	Discussão e conclusão	150
5.11.1	O AGN (Região N1)	150
5.11.2	A Região N2	151
5.11.3	Regiões HII	153
5.11.4	Cinemática do gás	154
5.11.5	Populações estelares e sua cinemática	156
6.	<i>NGC 134</i>	161
6.1	Introdução	161
6.2	Observações e tratamento de dados	161
6.3	Tomografia PCA do cubo deconvoluido	162
6.3.1	Cubo total	163
6.3.2	CCD 2 (5480Å a 6200Å)	166
6.3.3	CCD 3 (6300Å a 6900Å)	167
6.4	Resultados da síntese espectral	170
6.5	Cinemática estelar	173
6.6	Tomografia PCA do cubo de gás	178

6.6.1	Cubo total	178
6.6.2	CCD3 (6250Å a 6900Å)	179
6.7	Razões de Linhas	182
6.8	Imagens da emissão de [SII] $\lambda\lambda$ 6716, 6731 das nuvens de alta e baixa densidades	184
6.9	Discussão e conclusão	185
6.9.1	AGN central e outras regiões	185
6.9.2	Cinemática do gás	186
6.9.3	Populações estelares e sua cinemática	186
7.	<i>Conclusões</i>	189
	<i>Referências</i>	193

Introdução

O estudo de galáxias é de extrema importância para melhor entendimento da evolução do Universo e, até mesmo, da nossa própria galáxia. A primeira classificação de galáxias foi criada por Edwin Hubble (Hubble, 1926). Ele classificou as galáxias em função de sua aparência e associou seus tipos morfológicos a um processo evolutivo: as galáxias que ele chamou de *early-type* (elípticas e S0s) seriam galáxias recém formadas e as galáxias *late-type* (espirais) seriam o resultado final da sua evolução. O que se sabe hoje, entretanto, é que o processo evolutivo entre os tipos morfológicos, geralmente, se dá com galáxias *early-type* sendo resultantes de *mergers* de outras galáxias, independentemente do tipo. As galáxias *early-type* são, em geral, as mais massivas e as que apresentam, predominantemente, maior quantidade de estrelas velhas, baixa formação estelar, pouco gás e são mais vermelhas. Já as galáxias *late-type*, em geral, apresentam alta formação estelar, grande quantidade de gás, estrelas jovens e são mais azuis.

Quando se observa o núcleo de algumas galáxias nota-se que seu espectro não provém de emissão puramente estelar. Essas galáxias possuem um núcleo ativo (*Active Galactic Nucleus*: AGN), contendo uma região extremamente compacta da onde parte essa emissão, cujas razões de linhas de emissão indicam processos de excitação e ionização do gás não estelares. Os AGNs são divididos em várias categorias, de acordo com as suas propriedades espectrais e fotométricas: QSOs (*Quasi-Stellar Objects*), galáxias de Seyfert, rádio-galáxias e LINERs (*Low Ionization Nuclear Emission-Line Regions*). Todas essas categorias ainda possuem uma segunda divisão: tipo 1 e tipo 2 (Khachikian e Weedman, 1974). Os AGNs tipo 1 possuem linhas permitidas largas, com FWHM entre 1000 e 10000 km/s, e linhas proibidas mais estreitas, com FWHM entre 200 e 900 km/s. Já os AGNs tipo 2 apresentam apenas linhas estreitas em seus espectros, cujas larguras são comparáveis às das linhas

proibidas dos objetos tipo 1.

Estudar núcleos de galáxias de mesmo tipo morfológico tem como objetivo determinar as semelhanças que podem ou não ocorrer entre os objetos da amostra e, com isso, se houver semelhanças, avaliar possíveis processos evolutivos. Se houver apenas diferenças, a conclusão seria então que o tipo morfológico dos objetos da amostra não interfere em sua composição nuclear, o que também é relevante.

Um estudo feito por Ho et al. (1997) revelou que 50% - 70% das galáxias de tipos morfológicos de E a Sb possuem AGNs. Por outro lado, a fração de galáxias com tipos morfológicos de Sc a Sm com AGNs é de cerca de 20%. Cerca de 1/3 das galáxias próximas possuem AGNs do tipo LINERs.

Uma boa amostra que se pode ter para estudar engloba objetos com o mesmo tipo morfológico da nossa galáxia, a Via Láctea, pois se trata do núcleo mais próximo de nós e bem conhecido. A Via Láctea é considerada uma galáxia espiral do tipo SBbc ou SABbc. A incerteza se dá pelo fato de não podermos sair da galáxia para vermos claramente de que tipo morfológico ela é e, também, porque é muito difícil determinar a estrutura da galáxia estando dentro dela.

Ao comparar os núcleos com o da Via Láctea, podemos estabelecer um contexto evolutivo e comparações pertinentes: seria a Via Láctea o estágio final/inicial desses núcleos ou uma exceção? Qual é a diversidade com que ocorrem os fenômenos conhecidos da Via Láctea? Existem muitas diferenças com os demais núcleos de galáxias do mesmo tipo morfológico?

O núcleo da Via Láctea está associado à fonte de rádio Sgr A* e essa abriga um buraco negro, cuja massa, determinada através da órbita de estrelas próximas (Genzel et al., 2010; Gillessen et al., 2009), é de 4 milhões de massas solares.

O centro da Via Láctea abriga um número grande de estrelas brilhantes. Muitas delas velhas, gigantes vermelhas, supergigantes e estrelas que estão no ramo assintótico das gigantes (estrelas AGBs). Esses tipos estelares são comuns em bojos galácticos. No entanto, no centro da Via Láctea, foi também encontrado um número cada vez maior de estrelas brilhantes quentes e jovens (Tamblyn et al., 1996; Genzel et al., 1996; Paumard et al., 2006; Tanner et al., 2006). Modelos de atmosferas estelares revelaram estrelas super-gigantes azuis e Wolf-Rayet (WR) com idades de 2 a 8 Myrs (Najarro et al., 1997; Martins et al., 2007). 96% das estrelas observadas no pc central da Via Láctea são gigantes *late-type*

velhas (> 1 Gyr) e estrelas que estão queimando He no ramo horizontal. Além disso, há uma quantidade pequena de estrelas frias AGBs e estrelas vermelhas supergigantes (Genzel et al., 2010). Foi detectado um disco em rotação em torno de Sgr A* de estrelas massivas jovens, com sentido oposto ao da rotação das estrelas mais velhas e ao da rotação da Via Láctea (Genzel et al., 1996; Tanner et al., 2006; Genzel et al., 2000). A metalicidade estelar predominante no núcleo da Via Láctea é solar e até super-solar (Martins et al., 2007). Modelos de metalicidade inicial indicam que as estrelas jovens e as estrelas que estão se formando possuem como limite mínimo a metalicidade solar (Najarro et al., 2004; Martins et al., 2008).

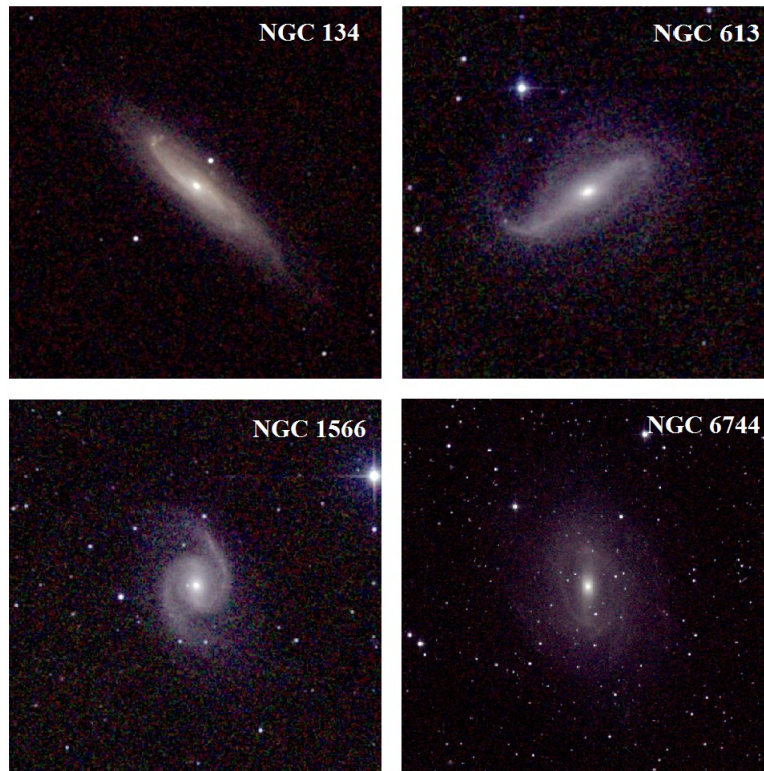


Figura 1.1: Imagens obtidas pelo 2MASS das 4 galáxias estudadas.

Este trabalho teve como objetivo estudar cubos de dados das regiões centrais de quatro galáxias de mesmo tipo morfológico que a Via Láctea: NGC 1566, NGC 6744, NGC 134 e NGC 613 (ver Fig. 1.1). Esses quatro objetos foram observados com o *Integral Field Unit* do *Gemini Multi-Object Spectrograph* do telescópio Gemini Sul e fazem parte do *survey DIVING^{3D}* (*Deep IFS View of Nuclei of Galaxies 3D*). São as 4 galáxias com magnitudes $B < 11$ com o mesmo tipo morfológico da Via Láctea do hemisfério sul presentes no

survey. Procurou-se estudar a composição estelar e gasosa das regiões nucleares, os graus de ionização dos objetos centrais encontrados, os mecanismos de excitação e ionização do gás (AGNs, regiões HII e objetos de transição) e as cinemáticas estelar e do gás, a fim de caracterizar detalhadamente esses núcleos com dados de alta resolução espacial e espectral. Ao final, realizou-se uma breve comparação entre os objetos e o núcleo da Via Láctea.

Metodologia

Neste capítulo são descritas as metodologias de tratamento e análise aplicadas a todos os quatro objetos do trabalho (NGC 613, NGC 134, NGC 1566 e NGC 6744). Primeiramente, apresenta-se uma breve descrição dos dados utilizados e da instrumentação envolvida no processo de aquisição. A seguir, a explicação dos passos da redução de dados realizada com o *software* IRAF. Logo após, é apresentada a descrição do tratamento dos dados, realizada com *scripts* em IDL (*Interactive Data Language*), desde a correção da refração atmosférica diferencial à deconvolução Richardson-Lucy. A seguir, tem-se a descrição dos métodos de análise: Tomografia PCA, síntese espectral com o *software* STARLIGHT, cinemática estelar com o *Penalized Pixel Fitting* (pPXF) e a criação de imagens da emissão de [SII] $\lambda\lambda 6716,6731$ de nuvens de alta e baixa densidade.

Todos os processos incluindo redução, tratamento e análise de dados foram realizados pela autora deste trabalho.

2.1 Observação e aquisição de dados

As regiões centrais das quatro galáxias foram observadas no período entre Outubro de 2013 e Junho de 2015, utilizando o *Integral Field Unit* (IFU) do *Gemini Multi – Object Spectrograph* (GMOS) do telescópio Gemini- Sul no modo *one-slit*. Para cada objeto, foram feitas 3 exposições de 15 minutos com *dithering* espacial (com passos de 0".2). A rede utilizada foi a R831+G5322, no comprimento de onda central de 5850Å. Essa configuração permite que o intervalo espectral observado seja de 4800Å a 6890Å com resolução espectral de 1.3Å.

Os dois telescópios Gemini (Norte e Sul) possuem o instrumento *Multi-Object Spectro-*

graph. Este espectrógrafo é capaz de obter espectros de algumas centenas de objetos no campo de visão do telescópio. A cobertura espectral é de 3600Å a 9400Å. Quando o IFU é utilizado no modo *one-slit*, o campo de visão de ciência é de 5" x 3".5 e é amostrado por um conjunto de 500 *lensets*. A luz é conduzida pelas *lensets* para 500 fibras (cada *lenset* para uma fibra). Em seguida, essas fibras são reorganizadas em um arranjo linear e chegam até a fenda do espectrógrafo. O campo de visão do céu é observado simultaneamente ao campo de ciência e fica localizado a 1' do mesmo. Esse campo possui 5" x 1".75 e é amostrado por 250 fibras.

2.2 Redução de dados

A redução dos dados foi realizada em ambiente IRAF, utilizando o pacote de tarefas do Gemini para objetos observados com GMOS, e consistiu nos seguintes processos:

- Determinação do trim: consiste em localizar e remover regiões das bordas dos arquivos brutos onde não há informação aproveitável.

- Subtração do bias: essencialmente todos os detectores apresentam um número não nulo de contagens em exposições de 0 segundos; essas contagem são chamadas de bias. A fim de remover essa assinatura eletrônica do instrumento, faz-se a subtração de exposições de 0 segundos da exposição de ciência.

- Subtração de céu: remove a emissão da atmosfera terrestre nas imagens obtidas. É feita subtraindo-se a imagem de uma região do céu, na qual não há nenhum objeto celeste, da imagem do objeto em questão. No caso de cubos de dados obtidos com o GMOS, esse procedimento consiste na subtração de um espectro médio, obtido a partir do campo destinado à observação do céu, dos dados de ciência.

- Correção de *bad pixels*: remoção de *pixels* defeituosos presentes na imagem bruta. Esse procedimento é feito utilizando-se um mapa de *bad pixels*, construído a partir de arquivos de calibração apropriados. Com esse mapa, os *pixels* defeituosos são substituídos por uma interpolação dos valores dos *pixels* vizinhos.

- Remoção de raios cósmicos: os raios cósmicos são partículas altamente energéticas que geram um alto número de contagens ao atingirem o CCD. A remoção deles é feita utilizando-se a rotina *L.A.Cosmic* (van Dokkum, 2001).

- Correção de *flat-field*: é comum que haja variações de ganho entre os *pixels* da imagem

obtida. Para corrigir esse problema, a imagem de ciência é dividida pela chamada imagem de *flat-field*. No caso de cubos de dados obtidos com o GMOS, a divisão é feita por “mapas de *flat-field*”. Tais imagens de calibração contêm curvas de resposta (obtidas a partir das imagens de *GCAL-flat*), com o propósito de corrigir variações de ganho *pixel a pixel* ao longo do eixo espectral do cubo, e também mapas de resposta (obtidos a partir das imagens de *twilight*), com o propósito de corrigir variações de ganho fibra a fibra e também padrões de iluminação do instrumento.

- Calibração em comprimento de onda: um espectro obtido da observação não possui valores de comprimento de onda associados. É preciso utilizar uma calibração baseada num espectro com linhas conhecidas, que é obtido apontando o telescópio para uma lâmpada, neste caso, uma lâmpada de CuAr.

- Calibração em fluxo: consiste em associar valores de fluxo a cada comprimento de onda do espectro observado. Isso é feito utilizando-se uma relação entre o número de contagens e o fluxo correspondente, a qual é obtida a partir da observação de uma estrela padrão.

- Montagem do cubo de dados: um cubo de dados consiste em um objeto com três dimensões (x,y,z): o plano xy corresponde às dimensões espaciais e o eixo z representa o eixo espectral do cubo. Essa etapa consiste em associar cada espectro obtido com o *pixel* espacial correspondente para obtenção do cubo de dados.

Para todos os objetos, foram obtidos, no fim do processo de redução, três cubos de dados com *pixels* espaciais com 0".05.

2.3 Tratamento de dados

Após a montagem dos cubos de dados, iniciou-se o tratamento desses cubos, que constituiu nas etapas descritas a seguir, utilizando *scripts* desenvolvidos em linguagem IDL, escritos por Roberto B. Menezes e Tiago V. Ricci. Para maiores detalhes, consultar Menezes (2012), Ricci (2013), Menezes et al. (2014) e Menezes et al. (2015).

2.3.1 Correção da refração atmosférica diferencial

Sabe-se que todo objeto observado com telescópios terrestres sofre o efeito da refração atmosférica. No entanto, o índice de refração depende do comprimento de onda da observação. Como em um cubo de dados é possível ver a imagem de um objeto em diferentes

comprimentos de onda, conclui-se que o efeito da refração atmosférica é diferente para cada um desses comprimentos de onda. Como resultado disso, a posição do objeto muda ao longo do eixo espectral do cubo de dados, dando origem ao efeito da refração atmosférica diferencial.

Para corrigir esse efeito, utilizou-se um programa que aplica sequencialmente “pequenos deslocamentos” em cada uma das imagens dos cubos de dados, de modo que a posição do objeto não se alterasse ao longo do eixo espectral.

2.3.2 Combinação dos cubos de dados

Os cubos foram combinados em forma de medianas, a fim de remover qualquer *bad pixel* remanescente, gerando um único cubo para cada galáxia.

2.3.3 Filtragem espacial de Butterworth

Esse método (Gonzalez e Woods, 2002) consiste em uma filtragem realizada diretamente no domínio de frequências, com intuito de se remover componentes de determinada frequência. Neste caso, esse método foi aplicado para se remover as componentes de alta frequência das imagens.

Para se aplicar essa filtragem, primeiramente, foram calculadas as transformadas de Fourier para cada uma das imagens do cubo de dados, a fim de se passá-las para o domínio de frequências espaciais. Em seguida, cada uma dessas transformadas foi multiplicada pela imagem correspondente ao filtro, no qual os valores eram iguais a 1 na região central e decresciam para zero nas regiões mais afastadas do centro. A razão de o filtro ser construído dessa forma é que as transformadas de Fourier das imagens do cubo de dados foram dispostas de modo a apresentar as componentes de baixa frequência (que devem ser preservadas) na região central e as componentes de alta frequência nas regiões mais afastadas. Por fim, foi aplicada a transformada de Fourier inversa nas imagens após a multiplicação pelo filtro, retornando-as para o domínio espacial. O filtro de *Butterworth* utilizado corresponde ao produto de dois filtros circulares idênticos. A ordem de filtragem utilizada foi $n = 2$.

2.3.4 Remoção do *fingerprint* instrumental

Os cubos de dados obtidos com o IFU do GMOS apresentam estruturas com uma morfologia espacial e uma assinatura espectral específicas, chamadas de *fingerprints* instrumentais. Espacialmente, o *fingerprint* aparece como uma faixa vertical com uma largura característica e, espectralmente, como largas ondulações no espectro.

A fim de remover essas estruturas, aplicou-se a Tomografia PCA (ver seção 2.4.1) ao cubo do qual foram removidas todas as principais linhas de emissão e absorção. Foram selecionados apenas os tomogramas com seus autovetores que apresentavam o *fingerprint* e foram ajustados *splines* ao contínuo desses autovetores para descrever as largas ondulações.

A partir desses *splines* e dos tomogramas foi construído um cubo de dados apenas com o *fingerprint*. Então subtraiu-se esse cubo com o *fingerprint* do cubo de dados original e obteve-se um cubo sem *fingerprint*.

2.3.5 Deconvolução Richardson-Lucy

Sabe-se que imagens de objetos observados com telescópios terrestres sofrem o efeito da turbulência atmosférica. Esse efeito gera o chamado *seeing*, que corresponde a um diâmetro aparente apresentado por uma fonte puntual observada através da atmosfera terrestre. Matematicamente, o que ocorre é uma convolução entre a imagem original do objeto e a PSF (*Point Spread Function*) correspondente à atmosfera terrestre (e também ao instrumento utilizado). A deconvolução corresponde a um processo iterativo que tem como objetivo reverter os efeitos de uma convolução; e, obviamente, pode ser utilizada, nesse caso, para tentar obter a imagem original do objeto. Existem muitos métodos de deconvolução com aplicações em Astronomia. Neste estudo foi utilizado o método de Richardson-Lucy (Richardson, 1972; Lucy, 1974). Para aplicar esse processo, é necessário conhecer a PSF, que apresenta uma variação com o comprimento de onda de acordo com a equação 2.1. Para todos os objetos, tal variação foi estimada a partir dos cubos de dados das estrelas padrão (utilizadas durante a redução dos dados para calibração em fluxo). O tamanho da PSF em um comprimento de onda de referência foi estimado para cada objeto de maneiras diferentes e será informado em seus respectivos capítulos, juntamente com o valor do coeficiente x da lei de variação da PSF.

$$FWHM(\lambda) = FWHM_{ref} \left(\frac{\lambda}{\lambda_{ref}} \right)^x \quad (2.1)$$

2.4 Métodos de análise dos dados

Após o tratamento dos dados, foram aplicados os seguintes métodos básicos (isto é, feitos igualmente para todos os objetos) para análise dos cubos de dados obtidos.

2.4.1 Tomografia PCA

PCA (*Principal Component Analysis*) é uma transformação de sistemas de coordenadas na qual as novas coordenadas são os autovetores da matriz de covariância em ordem de variância explicada. Na Tomografia PCA, que é o PCA aplicado a cubo de dados (Steiner et al., 2009b), as variáveis do sistema são os *pixels* espectrais do cubo de dados e os observáveis, os espaciais (*spaxels*). Com isso, os autovetores da Tomografia PCA são combinações lineares dos *pixels* espectrais e, por apresentarem aspectos similares a espectros, são chamados de auto-espectros. Os tomogramas são imagens correspondentes às projeções dos *spaxels* nos autovetores. A análise da Tomografia PCA revela uma grande variedade de fenômenos presentes no cubo de dados, sendo muitos deles difíceis de serem detectados com métodos tradicionais. Sua interpretação deve ser feita levando-se em conta auto-espectros e tomogramas simultaneamente.

2.4.2 Síntese espectral

O *software* STARLIGHT (Cid Fernandes et al., 2005) realiza uma combinação linear de espectros de populações estelares de uma base para ajustar o contínuo estelar dos espectros do cubo de dados analisado. Tais espectros de base são convoluídos com uma função gaussiana, a fim de reproduzir a dispersão de velocidades estelar do espectro observado. Neste caso, a base utilizada foi a MILES, desenvolvida por Sánchez-Blázquez et al. (2006). Também foi adicionado ao conjunto de espectros da base do STARLIGHT um espectro na forma de lei de potência com índice espectral igual a 1.5, a fim de representar o *featureless continuum* emitido por um possível AGN no cubo de dados analisado.

A partir dos resultados obtidos com a síntese espectral do STARLIGHT, foi possível fazer o mapeamento do fluxo total emitido pelas populações estelares. Nos casos em que um

AGN foi detectado no cubo de dados, foi também feito o mapeamento do fluxo associado ao *featureless continuum* emitido pelo AGN (representado pela lei de potência mencionada). Por fim, foram feitos histogramas contendo as frações do fluxo associadas a cada uma das populações estelares (e ao *featureless continuum*) levadas em conta na síntese espectral, considerando todo o campo de visão do IFU do GMOS. A construção de tais histogramas foi possível porque, a partir da síntese espectral aplicada ao espectro de cada *spaxel* do cubo, obteve-se o fluxo estelar total devido a cada população estelar (e também o fluxo estelar total considerando-se todas as populações estelares) para cada *spaxel*. Consequentemente, foi possível obter então as frações de fluxo devidas a cada uma das populações estelares, considerando-se todo o campo visual.

Os intervalos aproximados de idades considerados na síntese espectral com as idades representativas estão na tabela 2.1 e os valores de metalicidade utilizados são, para baixa metalicidade: 0.0001 e 0.0004, para média metalicidade: 0.004 e 0.008 e para alta metalicidade: 0.02 e 0.05.

Tabela 2.1 - Tabela de idades consideradas na síntese espectral.

Idades representativas	Intervalo de idades considerado na síntese espectral
10^6	1×10^6 a 9×10^6
10^7	1×10^7 a 6×10^7
10^8	1×10^8 a 9×10^8
10^9	1×10^9 a 8×10^9
10^{10}	1×10^{10} a 1.8×10^{10}

Para se avaliar as incertezas da síntese espectral realizou-se o seguinte procedimento: aplicou-se a síntese espectral ao espectro médio do cubo de dados analisado. Após isso, o espectro sintético resultante foi subtraído do espectro médio extraído, obtendo-se um espectro residual. A partir deste, foi estimada uma distribuição gaussiana representativa dos ruídos espectrais. Foram criadas diferentes distribuições gaussianas de ruídos aleatórios com a mesma largura da gaussiana da distribuição de ruídos inicial. Essas distribuições foram adicionadas ao espectro sintético fornecido pelo ajuste inicial e a síntese espectral foi aplicada sequencialmente a cada um dos espectros resultantes. Foram determinadas incertezas da idade média (média ponderada das idades das populações estelares, com base nas frações de fluxo associadas a cada uma delas) e da extinção, a partir dos desvios

padrão dos valores obtidos com as sínteses espectrais dos espectros com as distribuições de ruído, criados anteriormente.

2.4.3 Obtenção do cubo de gás

Utilizando-se os espectros obtidos com a síntese espectral para cada *spaxel* do cubo de dados, foi criado um cubo estelar sintético. Esse cubo foi, então, subtraído do cubo original (após a deconvolução) com objetivo de obter um cubo com, essencialmente, apenas emissão do gás, que é chamado de cubo de gás. Esse cubo é útil para a construção de imagens de linhas de emissão de gás, as quais podem revelar as morfologias das fontes emissoras. A aplicação da Tomografia PCA a esse cubo pode fornecer informações relevantes sobre a cinemática do gás.

A correção da extinção no cubo de gás, devida à poeira no objeto observado, é feita utilizando-se os valores de A_V fornecidos pela síntese espectral para cada objeto e também a lei de extinção de Cardelli et al. (1989).

2.4.4 Cinemática estelar

A fim de se obter mais detalhes sobre a cinemática estelar existente nas regiões centrais dos objetos estudados, aplicou-se o processo *Penalized Pixel Fitting* (Cappellari e Emsellem, 2004) aos espectros do cubo de dados. Esse procedimento, assim como a síntese espectral, também consiste no ajuste do contínuo estelar observado com uma combinação linear de espectros de populações estelares de uma determinada base (neste caso, a mesma utilizada no *software* STARLIGHT: MILES). Porém, esses espectros de base são convoluídos com uma expansão de Gauss-Hermite. Isso permite a obtenção dos seguintes parâmetros: velocidade radial estelar (V_*), dispersão de velocidades estelar (σ_*) e os coeficientes de Gauss-Hermite h_3 (assimetria das linhas com relação a gaussianas) e h_4 (grau de diferença das linhas em relação as gaussianas).

As incertezas dos parâmetros cinemáticos obtidos com a aplicação do pPXF foram estimadas utilizando-se uma simulação de Monte Carlo. Para isso, primeiramente, para cada *spaxel* do cubo de dados, foi subtraído o espectro sintético obtido com o pPXF do espectro original. Em seguida, foi estimada uma distribuição gaussiana representativa dos ruídos espectrais do espectro residual obtido. Após isso, foram criadas diferentes distribuições gaussianas de ruídos aleatórios com a mesma largura da gaussiana da distribuição

de ruídos inicial. Essas distribuições de ruído foram adicionadas ao espectro sintético fornecido pelo ajuste inicial e o pPXF foi aplicado sequencialmente a cada um dos espectros resultantes. Por fim, para cada um dos parâmetros cinemáticos, a incerteza final foi tomada como o desvio padrão dos valores encontrados em todos esses diferentes ajustes sucessivos.

2.4.5 Imagens da emissão de [SII] $\lambda\lambda$ 6716, 6731 das nuvens de alta e baixa densidade

Sabe-se que as linhas [SII] $\lambda\lambda$ 6716, 6731 são originadas por transições a partir de níveis de energia com densidade crítica diferente e, conseqüentemente, são sensíveis à variação da densidade do gás. A densidade crítica da linha [SII] λ 6716 é $N_c = 1400 \text{ cm}^{-3}$, ou seja, ela tem maior probabilidade de aparecer em gás de mais baixa densidade. Por outro lado, o nível que origina a linha [SII] λ 6731 possui a densidade crítica de $N_c = 3600 \text{ cm}^{-3}$, o que faz com que essa linha esteja presente tanto em gases menos densos quanto em gases mais densos, desde que não exceda o valor da densidade crítica. A equação 1 do artigo de Steiner et al. (2009a) mostra o cálculo a ser feito para obter, através da emissão dessas linhas, as imagens das nuvens de alta e baixa densidades.

- Para nuvens de baixa densidade (I_b):

$$I_b = \frac{1}{(R_{ld} - R_{hd})}(I_{\lambda 6716} - R_{hd}I_{\lambda 6731}), \quad (2.2)$$

onde $I_{\lambda 6716}$ é a imagem integrada da linha [SII] λ 6716, $I_{\lambda 6731}$ é a imagem integrada da linha [SII] λ 6731, I_b é o mapa de baixa densidade resultante e R_{hd} e R_{ld} são limites de alta e baixa densidade da razão [SII] λ 6716/[SII] λ 6731, neste caso, $R_{hd} = 0.44$ e $R_{ld} = 1.44$.

Para nuvens de alta densidade (I_a):

$$I_a = \frac{1}{(R_{ld} - R_{hd})}(R_{ld}I_{\lambda 6731} - I_{\lambda 6716}), \quad (2.3)$$

onde I_a é o mapa de alta densidade resultante e os demais parâmetros são os mesmos citados anteriormente.

NGC 1566

3.1 Introdução

NGC 1566 é uma galáxia espiral *grand design* com tipo morfológico SAB(s)bc (semelhante à Via Láctea). É a mais brilhante do grupo Dourado e está inclinada, aproximadamente, *face-on*. Possui uma região nuclear com diâmetro de 0.33 kpc (de Vaucouleurs e de Vaucouleurs, 1968). Sua distância é de, aproximadamente, 10.8 Mpc (valor médio das distâncias determinadas dado pelo *NASA Extragalactic Database - NED*). Essa galáxia tem uma pequena barra em seu centro (de Vaucouleurs, 1973), de 1.7 kpc ($\sim 35''5$) de comprimento (Hackwell e Schweizer, 1983; Comerón et al., 2010), orientada na direção norte-sul, observada no infravermelho próximo e no óptico. Em rádio (8.6 GHz), apresenta uma emissão nuclear compacta e uma “bolha” a $3''$ ao norte do centro (Morganti et al., 1999). Ela também possui um anel de formação estelar externo, localizado a 10 kpc do centro, e dois outros anéis similares, entre 1 e 3 kpc de distância do núcleo (Agüero et al., 2004). Os braços espirais possuem forte formação estelar e linhas de poeira nas suas regiões centrais (Garrison e Walborn, 1974) e são ricos em regiões HII, cuja função de luminosidade, baseada na escala de fluxo relativa a $H\alpha$, é bem descrita por uma lei de potência (Comte e Duquennoy, 1982).

O núcleo de NGC 1566 possui atividade de uma galáxia de Seyfert de tipo 1 (de Vaucouleurs e de Vaucouleurs, 1961; Shobbrook, 1966). Observações do espectro óptico mostram que o perfil de $H\alpha$ proveniente do núcleo pode ser decomposto em uma componente larga e uma componente estreita (com a mesma largura das linhas proibidas), porém a linha de $H\beta$ possui uma assimetria difícil de ser explicada (Osmer et al., 1974). No infravermelho próximo, o núcleo apresenta emissões estreita e larga de $Br\gamma$, além de um indício de

um toro de poeira com temperatura de 1000K (Smajić et al., 2015), que foi determinada através do ajuste do contínuo (na banda K) a partir de uma combinação de espectros *template* de estrelas, uma lei de potência e um corpo negro. No infravermelho intermediário, tanto o contínuo quanto estruturas espectrais em 10 e 18 μm (provenientes da emissão de silicatos) são compatíveis com a emissão térmica de um toro de poeira com morfologia *clumpy* (Thompson et al., 2009). A massa do buraco negro, estimada a partir da relação $M-\sigma$, é $8.3 \times 10^6 M_{\odot}$ (Woo e Urry, 2002).

Modelos de fotoionização da BLR (*Broad Line Region*), assumindo que ela é composta por uma região de alta temperatura ($T_e = 15000\text{K}$) e outra de baixa temperatura ($T_e = 10000\text{K}$), resultaram em uma razão $\text{H}\alpha/\text{H}\beta$ de, aproximadamente, 3.2 (Clavel e Joly, 1984). No entanto, na literatura, encontram-se medições de $4.2 \leq \text{H}\alpha/\text{H}\beta \leq 4.7$ (Osmer et al., 1974; Hawley e Phillips, 1980; Martin, 1974).

O espectro nuclear em raios-X (0.5 - 195 keV) de NGC 1566 é bem reproduzido por modelos que consistem na soma de uma emissão nuclear parcial ou completamente transmitida, sua reflexão no disco de acreção e a emissão reprocessada do toro de poeira, acompanhada por uma forte emissão da linha de ferro $\text{K}\alpha$ (Kawamuro et al., 2013). Ehle et al. (1996) verificaram que a luminosidade do núcleo, na região espectral de 0.1 até 2.4 keV, é de $L_X = 10^{41} \text{erg/s}$, sendo que o espectro nuclear pode ser bem ajustado por uma lei de potência com índice espectral de 2.3. Também foi observado um excesso de absorção na região nuclear da galáxia, o que é compatível com a presença de um toro molecular, de acordo com o modelo unificado.

O núcleo de NGC 1566 é conhecido pela variação de atividade nuclear. Foram notadas variações tanto na magnitude nuclear aparente na banda B – de 13.5 a 14.6 mag (de Vaucouleurs, 1973), quanto no espectro nuclear, no qual foi vista uma diminuição da intensidade de $\text{H}\beta$ com relação a $[\text{OIII}]\lambda 5007$ (Pastoriza e Gerola, 1970), em escalas de anos. Essa variabilidade foi também observada no contínuo não estelar e nos perfis de linha de $\text{H}\alpha$ e $\text{H}\beta$ do espectro nuclear, que variou de galáxia de Seyfert 1.9 para 1.2 em 4 meses (Alloin et al., 1986). A variabilidade do espectro nuclear de NGC 1566 também foi observada dos raios-X ao IR, sendo que a variação no IR possui um atraso de alguns meses a um ano com relação ao óptico e UV (Clavel et al., 2000).

Na região circumnuclear foi observado um *outburst* recorrente, justificando o aumento rápido das linhas de Balmer e da asa larga da linha de $\text{H}\alpha$ (7000 km/s) (Alloin et al.,

1986). Um *outflow* também foi observado nas pontas da barra da galáxia, juntamente com outros movimentos do gás, sendo a barra o único desvio observado da simetria axial (Agüero et al., 2004).

Foram detectadas evidências de um decréscimo da razão $[\text{OIII}]/\text{H}\beta$ e de um aumento da razão $[\text{NII}]/[\text{OII}]$ em direção ao núcleo. Isso pode ser devido a um aumento da abundância de oxigênio, que esfria o gás, acarretando em uma menor temperatura eletrônica e, com isso, em uma diminuição do fluxo de $[\text{OIII}]$ (Hawley e Phillips, 1980).

Beckman et al. (1986) analisaram dados espectrais, no óptico, e fotométricos (filtros V, R e I) e verificaram que o núcleo e os braços espirais de NGC 1566 apresentam cores mais azuladas do que as demais partes da galáxia. É provável que essa cor azulada no núcleo seja devida à atividade nuclear de galáxia de Seyfert. Os valores da razão M/L, obtidos até uma distância de 13.5 kpc do núcleo, podem ser bem explicados levando-se em conta, apenas, populações estelares da Sequência Principal, sem a necessidade de assumir a presença de estrelas gigantes ou matéria escura. Com bases nos valores observados de V-R e V-I, foi possível inferir a presença de estrelas de tipos espectrais O, B e A no núcleo. Um estudo da cinemática estelar em NGC 1566, realizado por Bottema (1992), revelou que a dispersão de velocidades estelar é menor nas bordas da galáxia e cresce em direção ao centro, onde possui um valor constante de 115 km/s.

No infravermelho próximo, dados do *Spectrograph for Integral Field Observations in the Near Infrared* (SINFONI) e do imageador *Naos-Conica* (NaCO), instrumentos do *Very Large Telescope* (VLT), mostram uma emissão de H_2 molecular circular, um pouco deslocada na direção leste-oeste, com raio menor que $1''$ (Mezcua et al., 2015). Mais dados do SINFONI (Smajić et al., 2015) mostram que a região circumnuclear de NGC 1566 é composta por gás molecular e populações estelares velhas (tipos K-M). Tanto o gás molecular quanto as populações estelares estão em rotação em torno do núcleo, embora haja uma perturbação das velocidades do gás molecular em direção ao núcleo. Além disso, há uma espiral de gases moleculares frio e morno que pode indicar abastecimento do AGN. Foi observada uma região de formação estelar na direção sudoeste do núcleo com taxa de formação estelar igual a $2.6 \times 10^{-3} M_{\odot}/ano$.

Em raios-X, foi descoberta uma emissão estendida ao redor do núcleo, certamente associada à atividade nuclear (Elvis et al., 1990). Essa emissão estendida em raios-X é similar à emissão estendida em rádio, com aproximadamente a mesma luminosidade $L_X =$

1.4×10^{40} erg/s, sugerindo uma ligação entre o gás quente e o campo magnético (Ehle et al., 1996).

Dados do ALMA com resolução espacial de 25 pc sugerem que há um rastro espiral de gás molecular em direção ao núcleo, que é bem parecido com a espiral de poeira observada em imagens da extinção do HST, indicando que o buraco negro está influenciando a dinâmica do gás, de modo a reverter torques gravitacionais. Estes torques estão direcionando o gás de encontro ao núcleo, o que pode resultar em um abastecimento do AGN. Há, ainda, um disco nuclear denso de gás molecular, com deficiência de regiões HII e gás atômico. Esse gás molecular apresenta uma rotação bem comportada, sem a presença aparente de *outflows*, *feedback* ou abastecimento do AGN (Combes et al., 2014).

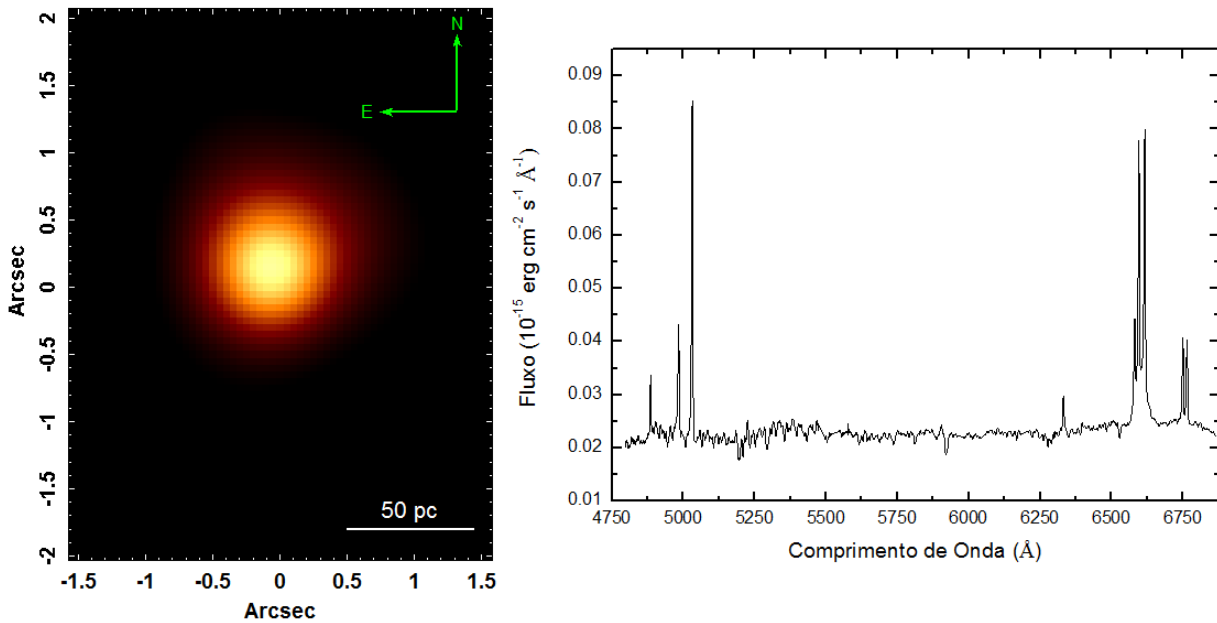


Figura 3.1: Imagem do cubo colapsado e espectro médio de NGC 1566 após o tratamento. Note a orientação NE do objeto e a escala em de 50pc.

3.2 Observações e tratamento dos dados

Os dados de NGC 1566 foram observados em 10 de Outubro de 2013, de acordo com as especificações da seção 2.1 do capítulo 2. O programa de observação é GS-2013B-Q-3 do telescópio Gemini-Sul. O FWHM do *seeing* da noite, medido a partir da asa larga de $H\alpha$ ($\lambda_{ref} \sim 6641\text{\AA}$), foi $0''.78$ (valor do $FWHM_{ref}$ da PSF usado no processo de deconvolução - ver seção 2.3.5 do capítulo 2 e equação 2.1), enquanto que o valor obtido a partir da

imagem de aquisição, em 6300\AA , foi $0''.85$. O valor do coeficiente da lei de variação da PSF (ver equação 2.1), obtido a partir do cubo de dados da estrela padrão, foi $x \sim -0.33$.

A estrela padrão utilizada na calibração em fluxo foi LTT3864. Ela foi observada em 28 de Janeiro de 2014, com o tempo de exposição de 300 segundos e com as mesmas configurações instrumentais das imagens de ciência.

Os dados foram tratados de acordo com os procedimentos descritos na seção 2.2 e 2.3 do capítulo 2.

Após o tratamento dos dados, resultando no cubo deconvoluido de NGC 1566, foi feita uma imagem do cubo colapsado e também foi calculado o seu espectro médio, que são mostrados na Fig. 3.1. O núcleo é claramente visível na imagem do cubo colapsado, enquanto que o espectro médio revela uma componente larga de $H\alpha$ e linhas de emissão proeminentes de $[\text{OIII}]\lambda 5007$, $[\text{NII}]\lambda\lambda 6548, 6583$, $[\text{OI}]\lambda 6300$ e $[\text{SII}]\lambda 6716, 6731$. Nesta figura há também a orientação das observações e a escala de 50 pc, obtida a partir da distância adotada para NGC 1566, 10.8 Mpc.

3.3 Tomografia PCA do cubo deconvoluido

Um dos métodos de análise de dados consiste em separar fenômenos no cubo de dados através da Tomografia PCA (ver seção 2.4.1 do capítulo 2). Os resultados são conjuntos de tomogramas/auto-espectros, que serão apresentados a seguir.

A Fig. 3.2 mostra o primeiro conjunto auto-espectro/tomograma obtido com a Tomografia PCA aplicada ao cubo de dados após a deconvolução. Esse conjunto representa as características associadas à maior parte da variância do cubo de dados. O auto-espectro E1 se assemelha ao espectro médio e o tomograma 1 à imagem do cubo colapsado, revelando, assim, a redundância dos dados. Entretanto, esse auto-espectro apresenta menos estruturas compatíveis com linhas de absorção do que o espectro médio, o que indica que ele está menos relacionado à emissão das populações estelares do que o espectro médio. Observam-se, também, correlações com as linhas de emissão provenientes da região central (parte clara do tomograma 1, que, por sua vez, está correlacionada com o auto-espectro E1). São evidentes as estruturas compatíveis com as componentes largas das linhas $H\alpha$ e $H\beta$, com uma forte emissão de $[\text{OIII}]\lambda 5007$ e com a emissão de $[\text{OI}]\lambda 6300$ (uma linha típica de regiões de ionização parcial). Todas essas características mostram que esse autovetor

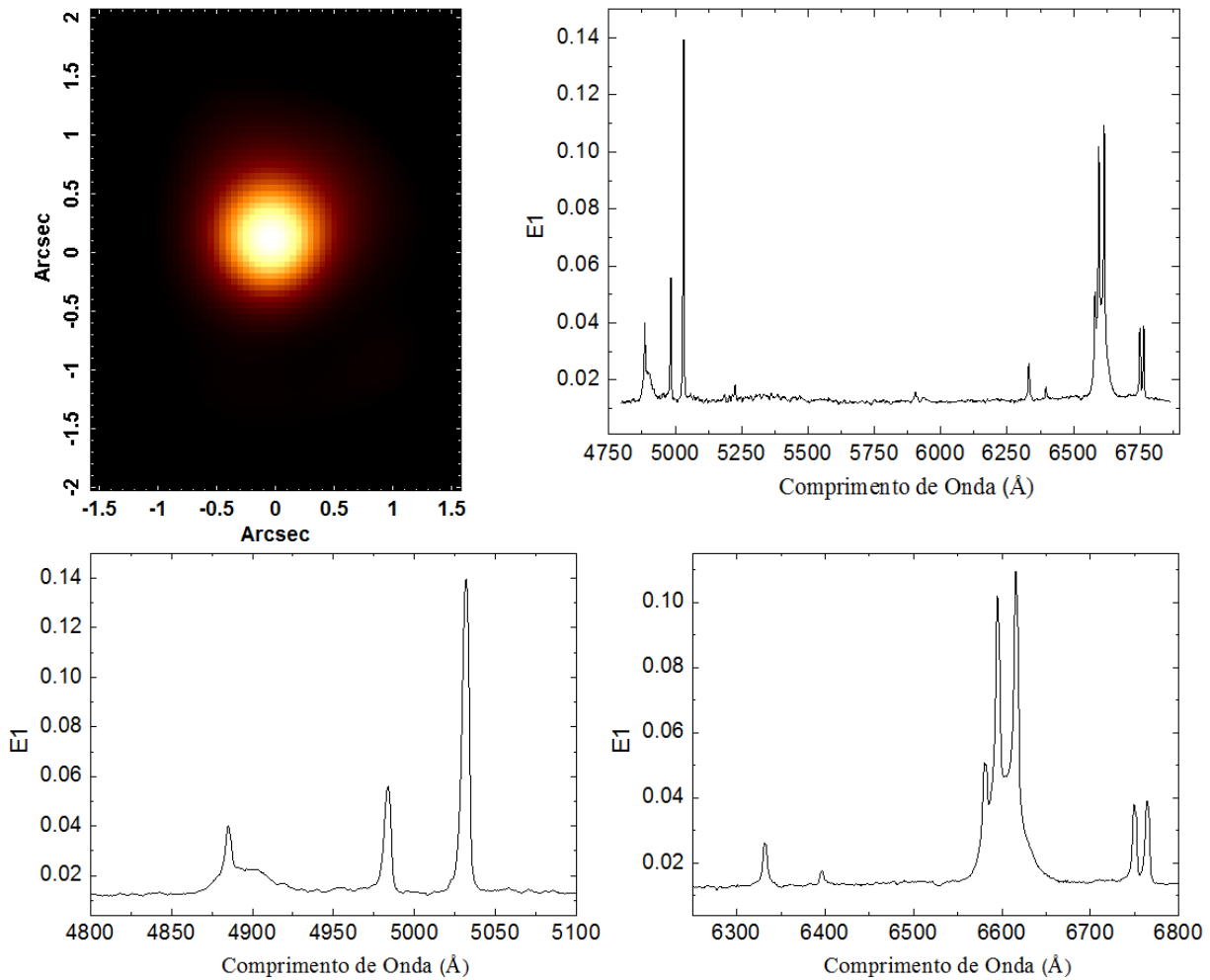


Figura 3.2: Tomograma e auto-espectro 1 da Tomografia PCA aplicada ao cubo deconvoluído de NGC 1566, com *zoom* na parte azul e vermelha do auto-espectro.

está fortemente associado à emissão proveniente do AGN nessa galáxia. A tabela 3.1 mostra as frações de variância explicadas por este auto-espectro e pelos demais.

O auto-espectro E2 (Fig. 3.3) está correlacionado com as principais linhas de emissão dessa região espectral e com as componentes largas das linhas de $H\alpha$ e $H\beta$. Há, também, uma anti-correlação com várias linhas de absorção estelares existentes nesta região espectral e com componentes estreitas de $\text{NaI}\lambda\lambda 5890, 5896$ (provavelmente associadas à absorção interestelar por gás neutro). A partir disso, é possível inferir que as linhas de emissão são provenientes das áreas claras do tomograma. Por outro lado, as absorções estelares possuem maior relevância nas regiões escuras (anti-correlacionadas com o auto-espectro) do tomograma, onde há concentração de gás neutro também. Há duas regiões emissoras, uma no centro do FOV (*field of view*), que será chamada de Região 1, e outra, Região 2,

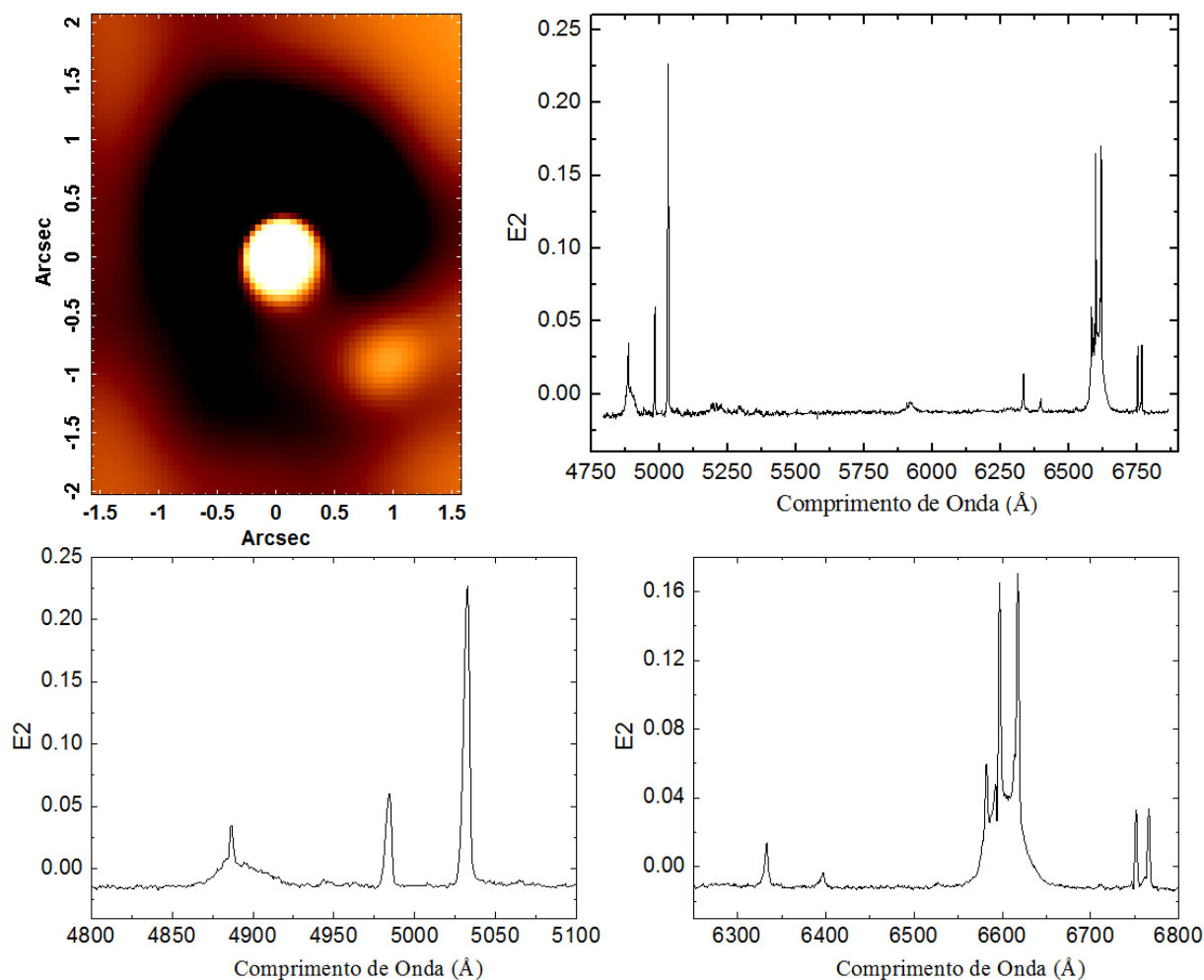


Figura 3.3: Tomograma e auto-espectro 2 da Tomografia PCA aplicada ao cubo deconvolvido, com ampliações das regiões vermelha e azul do auto-espectro.

centrada em ($1''$, $-1''$) - ver Fig. 3.4.

O auto-espectro E3 (Fig. 3.5) possui correlações com as linhas de menor grau de ionização ($H\beta$, $H\alpha$, $[\text{NII}]\lambda\lambda 6548, 6584$, $[\text{SII}]\lambda\lambda 6716, 6731$) e anti-correlações com as linhas de maior grau de ionização ($[\text{OIII}]\lambda\lambda 4959, 5007$, $[\text{OI}]\lambda 6300$). Portanto, as áreas claras do tomograma, que estão correlacionadas com o auto-espectro E3, são regiões de mais baixa ionização e a área escura central é a região emissora de mais alta ionização. Este conjunto tomograma/auto-espectro está diferenciando as regiões de baixa ionização da região de mais alta ionização.

O auto-espectro E4 (Fig. 3.6) está anti-correlacionado com as componentes largas das linhas $H\alpha$ e $H\beta$. Com exceção das linhas $[\text{OIII}]\lambda\lambda 4959, 5007$, há correlações com as asas azuis e anti-correlações com as asas vermelhas de todas as linhas. Com isso, tem-se que o

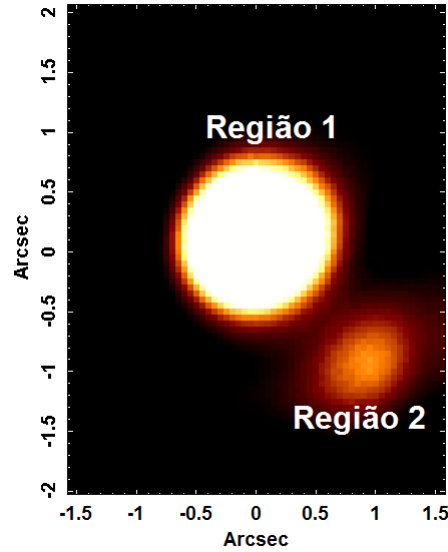


Figura 3.4: Regiões emissoras encontradas em NGC 1566: uma no centro do FOV (Região 1) e outra (Região 2) centrada em (1";-1"). Essa imagem foi feita a partir da região espectral que engloba as linhas de [NII] $\lambda\lambda$ 6548, 6584 e H α do cubo de gás.

conjunto tomograma/auto-espectro 4 representa os seguintes fenômenos: a cinemática das linhas de mais baixa ionização, a localização da BLR e a emissão das linhas de mais alta ionização. No tomograma, pode-se ver duas regiões emissoras, que estão correlacionadas com as asas vermelhas das linhas já citadas, portanto estão em *redshift*. Quanto à área escura, além de indicar a posição da BLR, indica a região anti-correlacionada com as asas azuis das linhas, portanto, em *blueshift*. Na região central, há uma área de correlação e outra de anti-correlação, sugerindo algum fenômeno cinemático do gás (como uma rotação ao redor do núcleo ou um *outflow*). Além disso, a correlação com as linhas [OIII] $\lambda\lambda$ 4959, 5007 mostra que as áreas claras do tomograma representam possíveis regiões de mais alta ionização. Porém, com base no que foi observado no tomograma/auto-espectro 3, pode-se dizer que é provável que a área clara central é a que possui maior grau de ionização.

O diagrama de *Scree* (Fig. 3.7) tem função de mostrar a partir de qual autovetor (ou auto-espectro) o ruído é predominante. Em geral, quando a taxa de decaimento da fração da variância explicada pelos autovetores se torna aproximadamente constante, o ruído se torna dominante, indicando que pouca ou nenhuma informação pode ser extraída dos autovetores/tomogramas. Neste caso, a partir do autovetor E5, a taxa de decaimento da fração de variância atinge um certo valor constante e, a partir do autovetor E14, essa taxa se torna menos acentuada, comprovando ainda mais a dominância do ruído nos dados. De

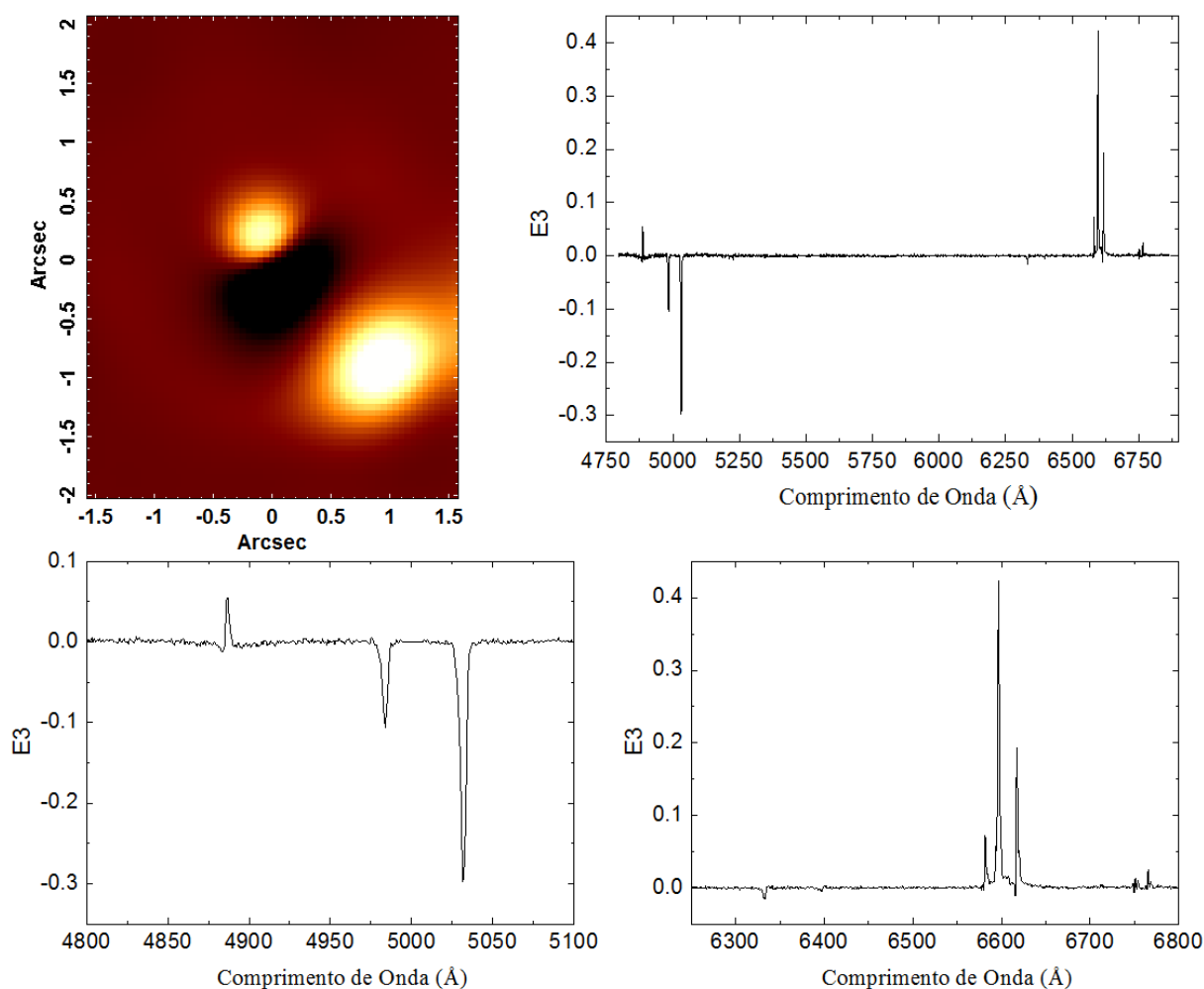


Figura 3.5: Tomograma e auto-espectro 3, com ampliações nas regiões azul e vermelha do auto-espectro.

fato, verificou-se que não é possível interpretar os dados já a partir do autovetor E5 e, por conta disso, apenas os 4 primeiros autovetores foram apresentados aqui.

3.4 Resultados da síntese espectral

Detalhes da síntese espectral, realizada com o *software* STARLIGHT, estão descritos na seção 2.4.2 do Cap. 2. Foi feito um histograma a partir dos resultados da síntese, mostrado na Fig. 3.8. O histograma mostra as frações de fluxo, levando-se em conta todo o campo de visão, devidas às populações estelares que compuseram o ajuste. Pode-se notar que as populações mais relevantes no ajuste são as jovens (10^6 e 10^7 anos) e velhas (10^{10} anos) com alta metalicidade e as de idade intermediária (10^8 anos) com média metalicidade. Além disso, a fração de fluxo atribuída à lei de potência representando o *featureless continuum*

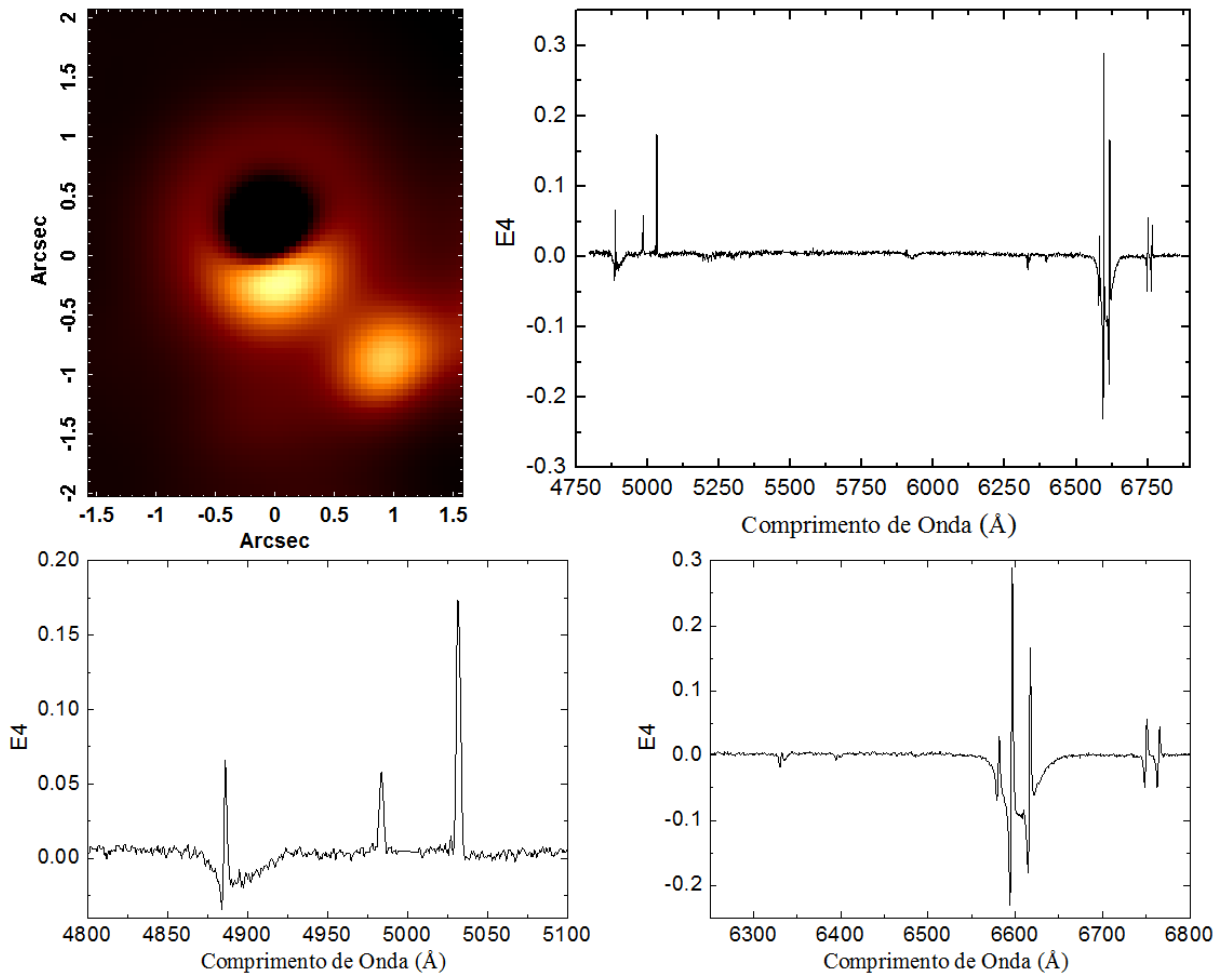


Figura 3.6: Tomograma e auto-espectro 4, com *zoom* nas regiões azul e vermelha do auto-espectro.

do AGN foi de 20%.

O mapa de fluxo representativo da idade de 10^6 anos (Fig. 3.9A) mostra uma população com alta metalicidade bastante concentrada na região central de NGC 1566. Também se nota uma população com baixa metalicidade nas regiões periféricas do campo de visão. A emissão de estrelas jovens de alta metalicidade, neste caso, pode não ser real. Sabe-se que o contínuo dessa população estelar contém poucas absorções, podendo se parecer muito (quando sujeito a uma certa extinção interestelar) com o *featureless continuum* emitido pelo AGN. É possível que o *featureless continuum* desse AGN possua uma lei de potência com um índice diferente de 1.5 (que foi o valor assumido para essa síntese espectral) e o *software* STARLIGHT tenha associado essa emissão com a de estrelas jovens com alta metalicidade.

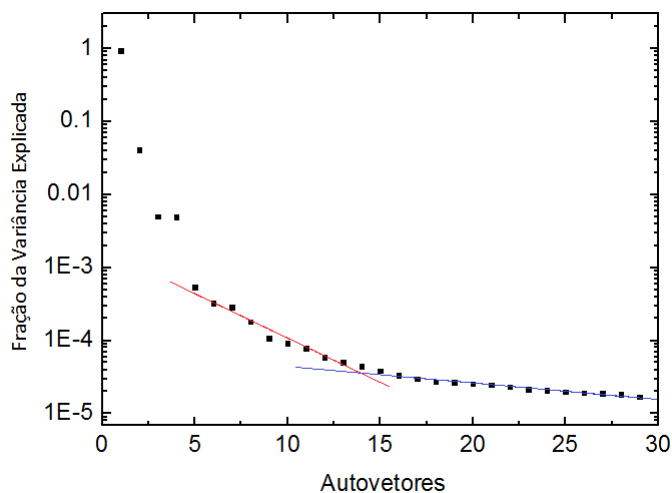


Figura 3.7: Diagrama de *Scree* referente à Tomografia PCA aplicada ao cubo obtido após a deconvolução. Notam-se duas taxas de decaimento da fração de variância, ambas aproximadamente constantes, sendo que a taxa de decaimento representada pela reta vermelha é mais elevada do que aquela representada pela reta azul. O fato do decaimento da fração de variância ser constante é indicativo da predominância do ruído sobre a informação nestes autovetores.

Tabela 3.1 - Tabela de autovalores para os primeiros 15 autovetores da Tomografia PCA aplicada ao cubo obtido após a deconvolução.

Autovetores	Fração da Variância Explicada (%)
E1	94.6688
E2	4.0964
E3	0.5010
E4	0.4925
E5	0.0535
E6	0.0325
E7	0.0288
E8	0.0180
E9	0.0107
E10	0.0091
E11	0.0078
E12	0.0060
E13	0.0050
E14	0.0044
E15	0.0039

O mapa de fluxo representativo da idade de 10^7 anos é mostrado na Fig. 3.9B. Nesta

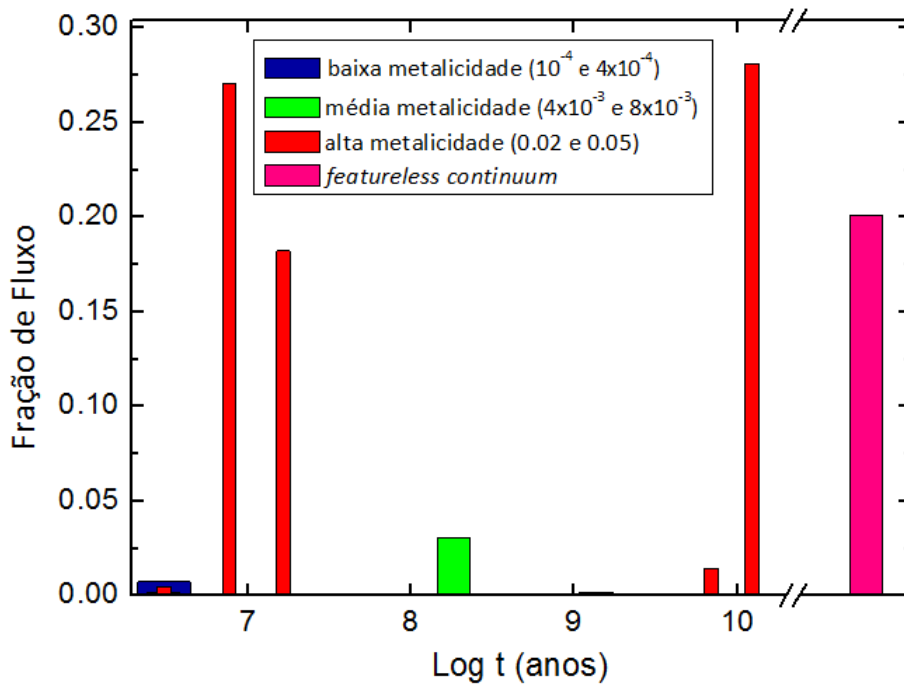


Figura 3.8: Histograma da fração de fluxo das populações estelares detectadas com a síntese espectral. Em vermelho, populações de alta metalicidade, que aparecem com estrelas com idades de 10^6 , 10^7 e 10^{10} anos, com frações de fluxo maiores que 25%. Em verde, populações com metalicidade média, que, neste caso, possuem a idade de 10^8 anos e uma fração de fluxo menor que 5%. Em azul, populações com baixa metalicidade, com 10^6 anos, mas com uma fração de fluxo bem próxima a zero. A fração de fluxo relativa à lei de potência com índice espectral de 1.5, em rosa, é de cerca de 20%.

imagem, vêem-se populações estelares de alta metalicidade na área central do FOV e uma fraca emissão de populações estelares de baixa metalicidade, localizadas nas regiões mais periféricas do FOV.

A Fig. 3.9C mostra o mapa de fluxo representativo da idade de 10^8 anos. Observa-se a presença de populações de média metalicidade em áreas afastadas do núcleo.

O mapa de fluxo representativo da idade de 10^{10} anos é mostrado na Fig. 3.9D: há apenas uma emissão considerável de populações estelares com alta metalicidade em toda a região circumnuclear. A ausência de fluxo dessa população na região central pode ser devida ao fato do *featureless continuum* ter ofuscado as linhas de absorção dessas estrelas na área central, impedindo sua detecção pela síntese espectral.

Além dos mapas de fluxo das populações estelares, o *software* STARLIGHT retorna também mapas com os valores da extinção por poeira (A_V) na galáxia estudada, do χ^2 (mostrando as regiões do FOV nas quais o ajuste é mais preciso), da razão sinal/ruído (S/N) e a imagem da emissão da lei de potência atribuída ao *featureless continuum* (Fig. 3.10).

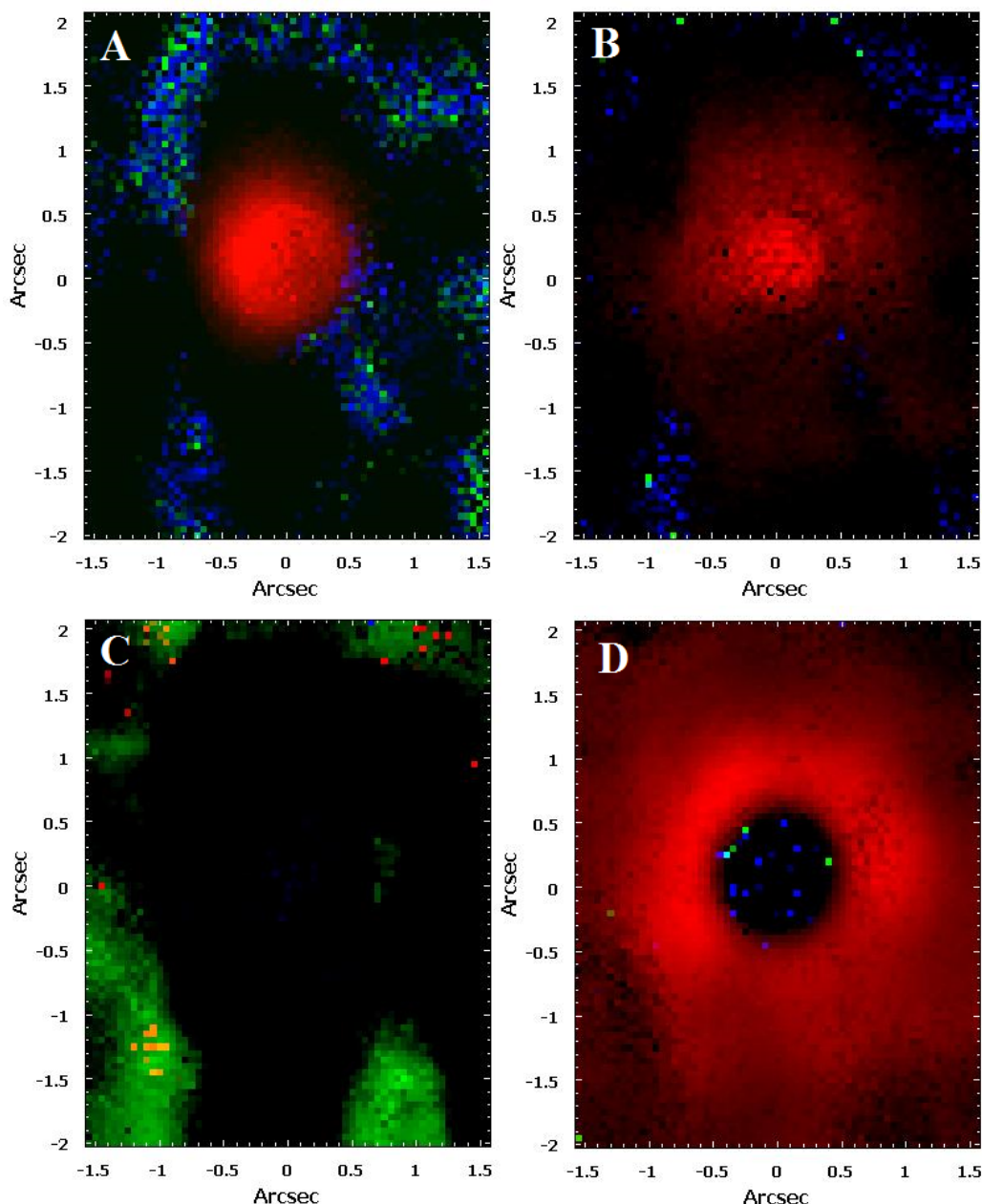


Figura 3.9: Mapas do fluxo associado às populações estelares detectadas com a síntese espectral. Em vermelho, populações de alta metalicidade (0.02 e 0.05), em verde, populações de metalicidade intermediária (4×10^{-3} e 8×10^{-3}) e, em azul, populações com baixa metalicidade (10^{-4} e 4×10^{-4}). A Fig.A representa as populações com idade de 10^6 anos, a Fig.B as populações estelares com 10^7 anos, a Fig.C populações com 10^8 anos e a Fig.D populações estelares com 10^{10} anos.

A Fig. 3.10A mostra os valores de A_V na região central de NGC 1566. Nota-se que a extinção é maior numa área semelhante a um anel com raio $\sim 1''$ (~ 56 pc).

A Fig. 3.10B mostra o mapa de χ^2 dos ajustes obtidos com a síntese espectral. Nota-se que os menores valores foram próximos a 1.2, enquanto que os maiores foram próximos a

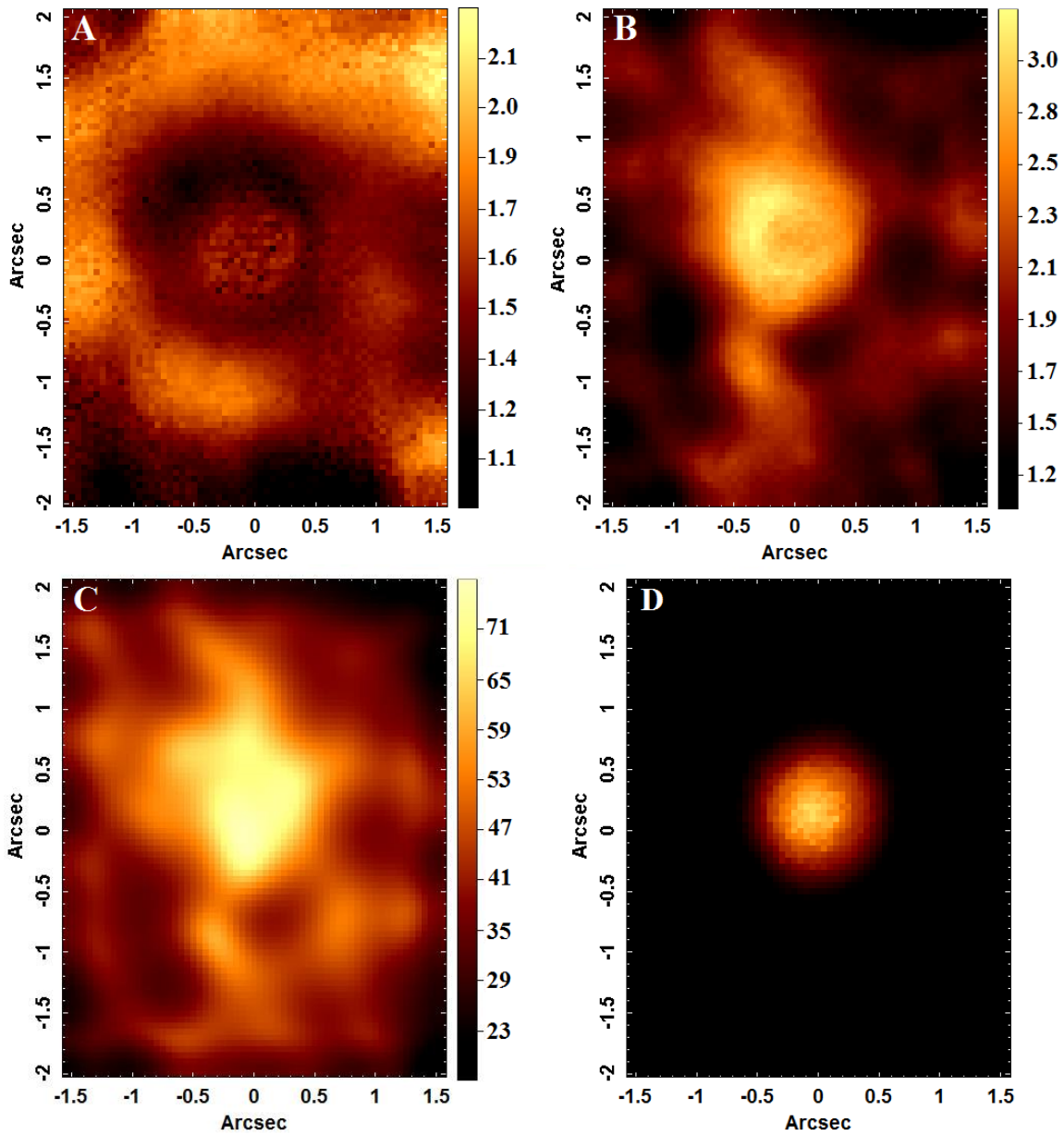


Figura 3.10: Mapas de parâmetros fornecidos pela síntese espectral. A Fig.A mostra o mapa de extinção obtido para NGC 1566. A Fig.B é o mapa de χ^2 dos ajustes do STARLIGHT. A Fig.C é o mapa da razão S/N e a Fig. D é a imagem do fluxo associado à lei de potência com índice espectral igual a 1.5, representando a emissão do *featureless continuum*.

3.0, o que ainda é característico de ajustes com boa qualidade. Os maiores valores de χ^2 foram obtidos próximos ao núcleo da galáxia. Uma possível explicação para isso é que a incerteza dos valores do fluxo nos espectros foi estimada a partir do *rms* desses espectros (em um certo intervalo espectral). Dessa maneira, como os espectros nessa região central, de acordo com a Fig. 3.10C, possuem elevados valores de S/N (e, conseqüentemente, menores valores de incerteza) e o χ^2 é inversamente proporcional ao quadrado da incerteza,

conclui-se que a obtenção de χ^2 mais altos nessa área é, na verdade, um resultado bastante esperado. Um outro fator que também pode ter contribuído para elevar os valores do χ^2 próximo ao núcleo é o *featureless continuum* do AGN. Caso tal emissão possua um índice espectral diferente daquele que foi assumido para o ajuste (1.5), é possível que o *software* STARLIGHT não tenha conseguido reproduzir de maneira precisa os espectros em questão, resultando em maiores valores do χ^2 .

Na Fig. 3.10C tem-se o mapa da razão S/N. Nota-se que essa razão é maior na região central do campo de visão e decai nas bordas, o que está de acordo com o esperado.

Como foi dito na seção 2.4.2, sempre se inclui uma lei de potência com índice espectral igual a 1.5 nos ajustes do STARLIGHT para representar a emissão do AGN. Neste caso, pelo histograma (Fig. 3.8), pode-se notar que essa emissão representa $\sim 20\%$ do fluxo do contínuo no FOV e a fonte dessa emissão se encontra na região central do mesmo, como se pode ver na Fig. 3.10D.

Os valores de A_V do cubo de dados de NGC 1566, fornecidos pelo *software* STARLIGHT, apresentam uma incerteza de 0.07 mag. Por outro lado, a idade média das populações estelares (obtida a partir de uma média ponderada com base nas frações de fluxo correspondentes a tais populações) possui uma incerteza de 0.11 dex. Tais incertezas foram obtidas a partir de uma simulação de Monte Carlo (ver seção 2.4.2 do capítulo 2 para maiores detalhes).

3.5 Cinemática Estelar

A descrição do método de análise *Penalized Pixel Fitting* (pPXF) é dada na seção 2.4.4. Os parâmetros fornecidos por esse método (velocidade radial estelar, dispersão de velocidades estelar e coeficientes de Gauss-Hermite h_3 e h_4) são obtidos para cada espectro (e, conseqüentemente, para cada *spaxel*) do cubo de dados. O resultado disso são mapas desses parâmetros.

O mapa de velocidades (Fig. 3.11A) mostra uma distribuição de velocidades bipolar: na parte superior esquerda tem-se velocidades negativas, com relação à linha de visada, e, na parte inferior direita, tem-se velocidades positivas. Portanto, o mapa mostra um disco estelar em rotação em torno do ponto central, com a parte superior esquerda em *blueshift* e a parte inferior direita em *redshift*.

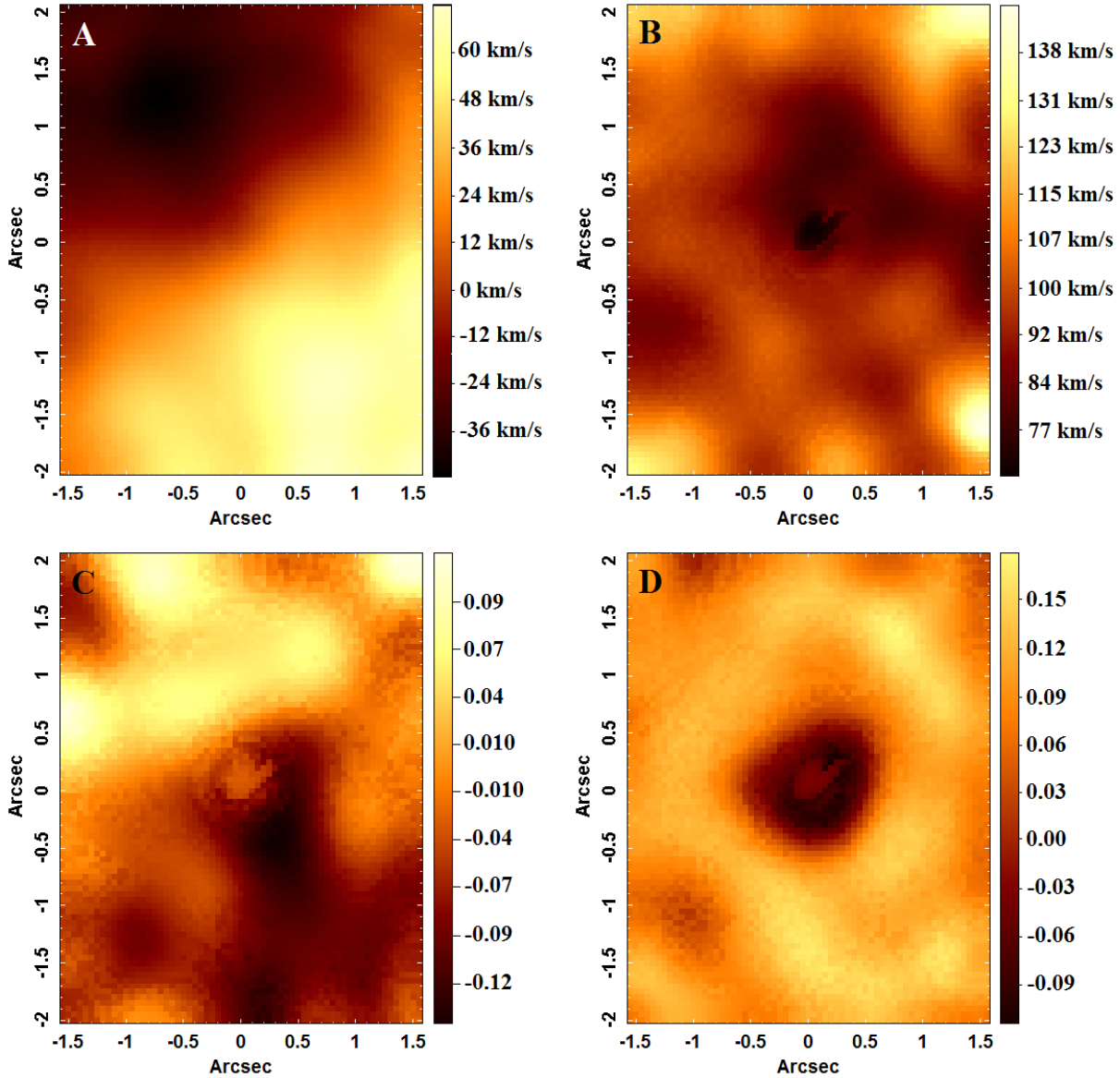


Figura 3.11: Mapas obtidos a partir dos resultados do pPXF. A Fig.A é o mapa da velocidade radial estelar. A Fig.B mostra o mapa da dispersão de velocidades estelar. As Fig.C e D são os mapas dos coeficientes de Gauss-Hermite h_3 e h_4 , respectivamente.

O mapa de dispersão de velocidades estelar (Fig. 3.11B) apresenta um decréscimo abrupto de valores na região central. Acredita-se que tal decréscimo seja uma consequência de imprecisões nos ajustes causadas pelo ofuscamento das linhas de absorção nessa área devido ao *featureless continuum* emitido pelo AGN. Além disso, o mapa apresenta um decréscimo generalizado da dispersão em direção ao centro. Isso pode ser explicado pela presença de um aglomerado de estrelas jovens e massivas, com baixa dispersão de velocidades, no centro. Embora Bottema (1992) tenha observado que NGC 1566 possuía dispersão

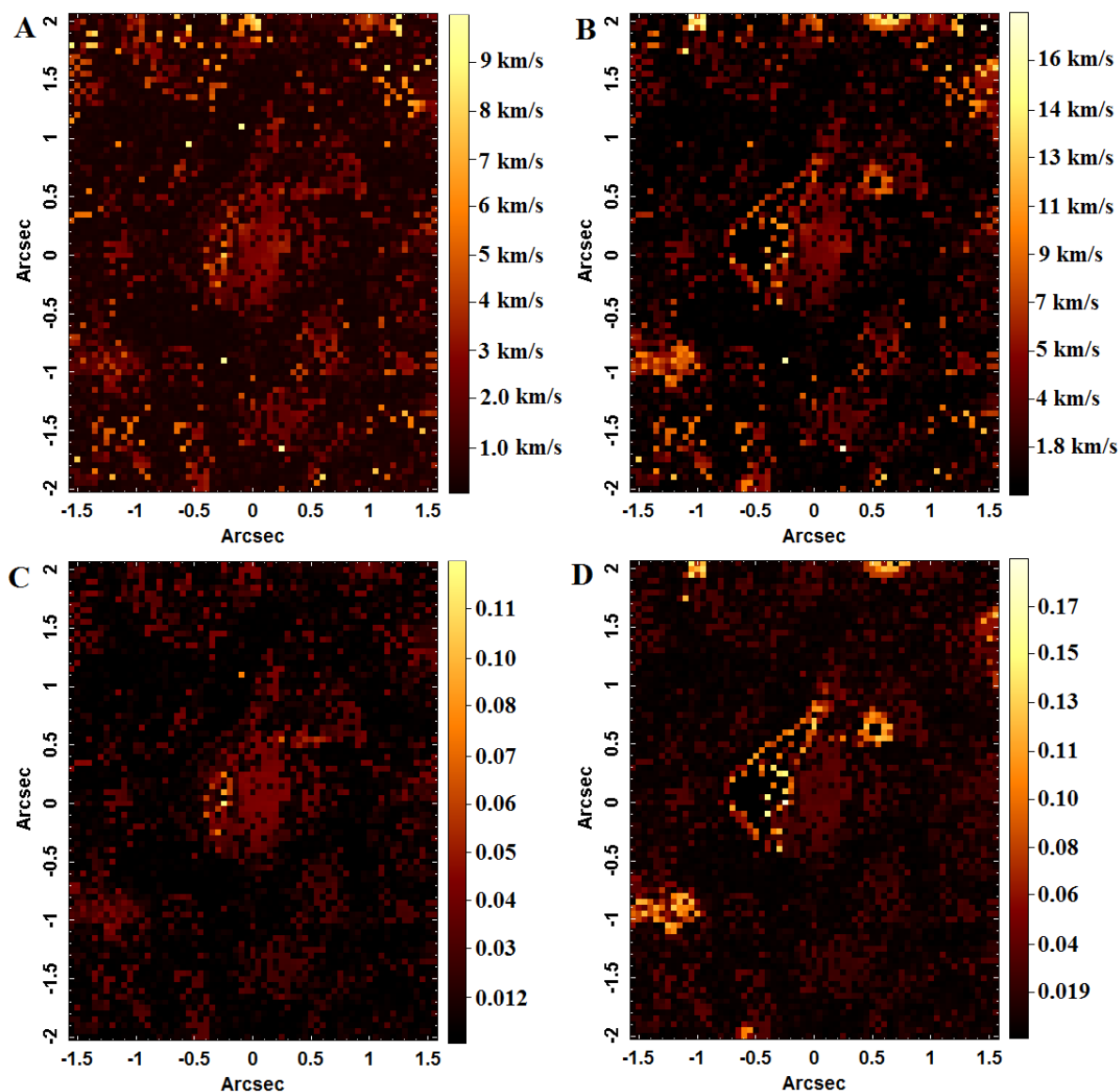


Figura 3.12: Mapas de incertezas dos parâmetros fornecidos pelo pPXF aplicado ao cubo de dados de NGC 1566. A Fig. A é o mapa de incertezas da velocidade radial estelar, a Fig. B é o mapa de incertezas da dispersão de velocidades estelar e as Figs. C e D são os mapas de incertezas de h_3 e h_4 , respectivamente.

de velocidades crescente em direção ao núcleo, essa diferença é explicada pela baixa resolução dos dados que este autor utilizou quando comparada com a resolução utilizada aqui.

O mapa de h_3 (Fig. 3.11C) apresenta uma anti-correlação em relação ao mapa de velocidades. Tal comportamento é típico de um disco estelar em rotação sobreposto a um fundo de estrelas com velocidades próximas a zero. O mapa de h_4 (Fig. 3.11D) apresenta também um decréscimo no centro.

O gráfico da Fig. 3.13 mostra os valores de medianas do perfil radial de dispersão de

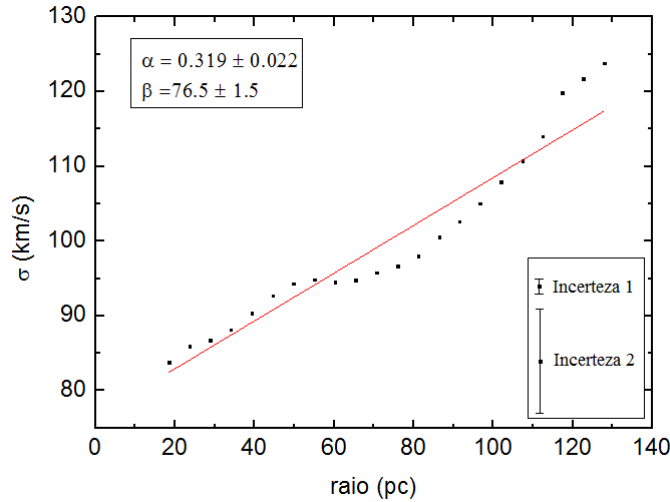


Figura 3.13: Perfil radial da mediana dos valores do mapa da dispersão de velocidades estelar de NGC 1566, obtido com o pPXF, contendo os valores dos coeficientes angular (α) e linear (β) da reta ajustada. Os valores de incerteza dos pontos foram calculados de duas formas: Incerteza 1, que é o valor médio das incertezas calculadas a partir das medianas dos valores, em anéis concêntricos, no mapa de incerteza da dispersão (ver Fig. 3.12B) e Incerteza 2, que é o valor médio das incertezas obtidas através dos desvios padrão dos valores da dispersão em anéis concêntricos.

velocidades obtido através do mapa de dispersão de velocidades (Fig. 3.11B). As incertezas foram obtidas de duas formas: Incerteza 1, que é o valor médio das incertezas calculadas a partir das medianas dos valores, em anéis concêntricos, no mapa de incerteza da dispersão (ver Fig. 3.12B) e Incerteza 2, que é o valor médio das incertezas obtidas através dos desvios padrão dos valores da dispersão em anéis concêntricos. Os pontos dentro do raio no qual há uma forte contaminação devida ao *featureless continuum* (região no mapa de dispersão de velocidades na qual se pode notar que o ajuste foi prejudicado) foram retirados do ajuste. Nota-se que a dispersão de velocidades é, de fato, decrescente em direção ao centro e essa tendência pode ser aproximada por uma reta com coeficientes angular (α) e linear (β) indicados na Fig. 3.13.

Os mapas de incerteza obtidos com o pPXF (de acordo com a seção 2.4.4) são apresentados na Fig. 3.12. Em todos os mapas há valores intermediários e maiores na região central e nas regiões periféricas os valores são distribuídos de maneira homogênea. Os mapas de h_3 e h_4 são pouco confiáveis, já que suas incertezas são da ordem dos valores obtidos.

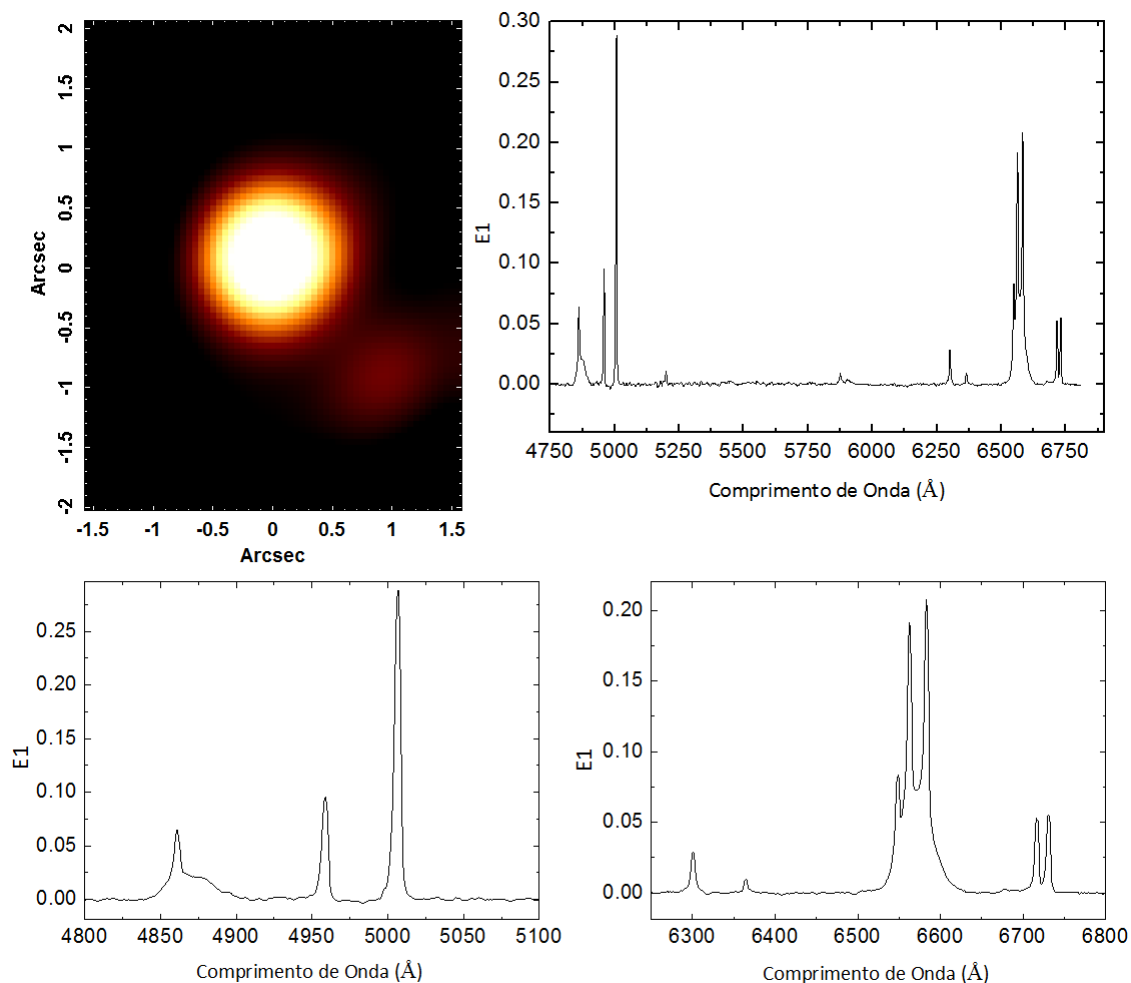


Figura 3.14: Tomograma e auto-espectro 1 do cubo de gás, com *zoom* nas regiões vermelha e azul do auto-espectro.

3.6 Tomografia PCA do cubo de gás

A seção 2.4.3 explica o processo de obtenção do cubo de gás. A este cubo foi aplicada a Tomografia PCA para separar e analisar fenômenos associados ao gás na região central de NGC 1566.

O auto-espectro E1 (Fig. 3.14) mostra correlações com todas as principais linhas de emissão dessa região espectral e com as componentes largas das linhas $H\alpha$ e $H\beta$. No tomograma 1 há duas regiões claras distintas, as Regiões 1 e 2 (como no tomograma 2 do PCA do cubo deconvoluido – ver seção 3.3, Fig. 3.3 e Fig. 3.4). Esse conjunto tomograma/auto-espectro explica a maior parte da fração de variância do cubo de gás – ver tabela 3.2 para este e demais autovetores.

O auto-espectro E2 (Fig. 3.15) possui correlações com as componentes largas das linhas

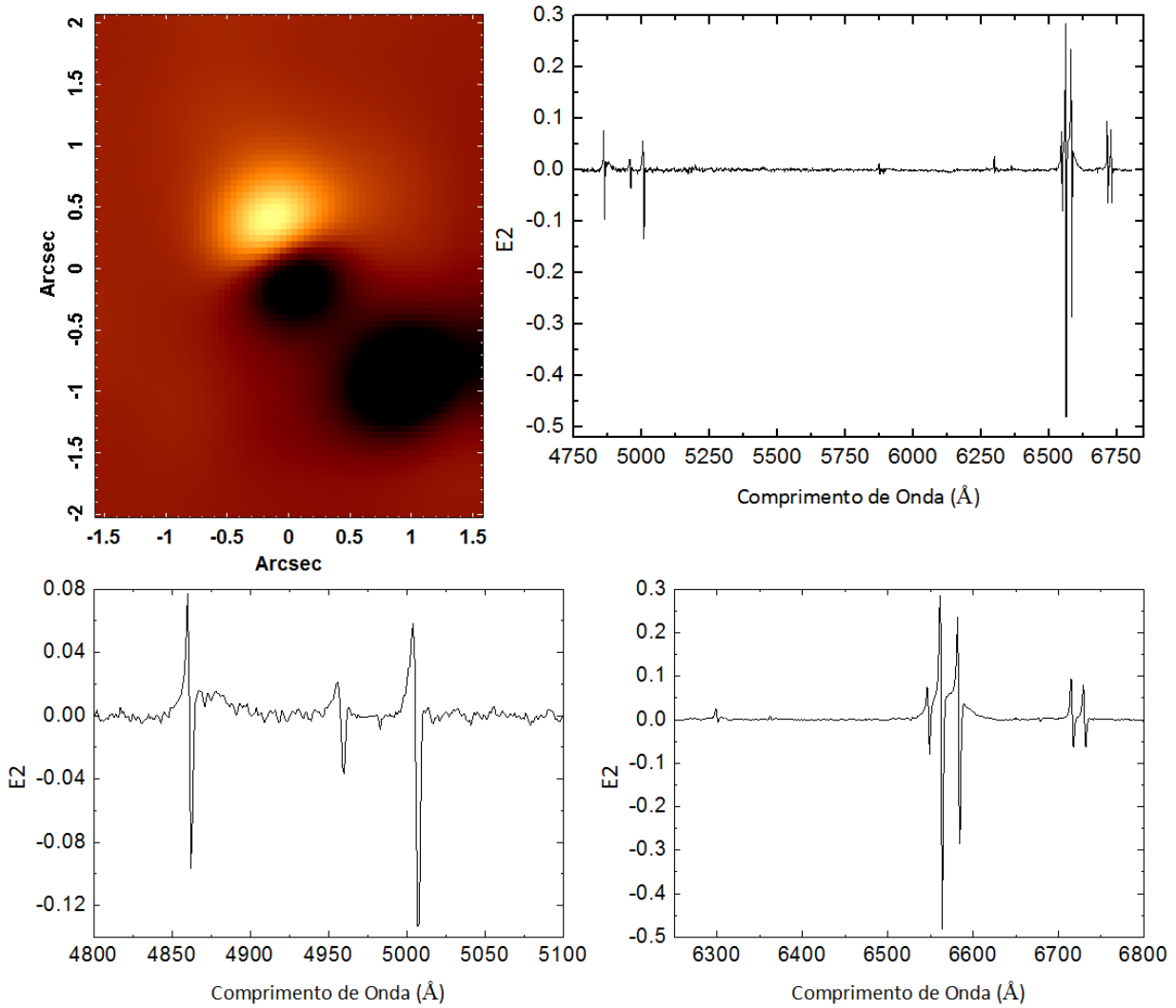


Figura 3.15: Tomograma e auto-espectro 2 do cubo de gás, com ampliações das regiões vermelha e azul do auto-espectro.

de $H\alpha$ e $H\beta$ e com as asas azuis de todas principais linhas de emissão dessa região espectral e anti-correlações com as asas vermelhas dessas linhas. O tomograma 2 mostra que, na área central (evidenciada no tomograma 1), há uma região clara, em *blueshift* (e também provavelmente associada à emissão das componentes largas de $H\alpha$ e $H\beta$), e uma região escura, em *redshift*, podendo indicar um movimento rotacional de gás nessa área ou até mesmo um *outflow*. Analogamente, pode-se notar que a Região 2 está em *redshift*.

O auto-espectro e o tomograma 3 (Fig. 3.16) se assemelham muito com o auto-espectro e o tomograma 3 obtidos com a Tomografia PCA do cubo antes da subtração do contínuo estelar (Fig. 3.5). Neste auto-espectro E3, há correlações com as linhas $[OIII]\lambda\lambda 4959, 5007$ e $[OI]\lambda 6300$ e anti-correlações com as componentes largas e estreitas das linhas de $H\alpha$ e

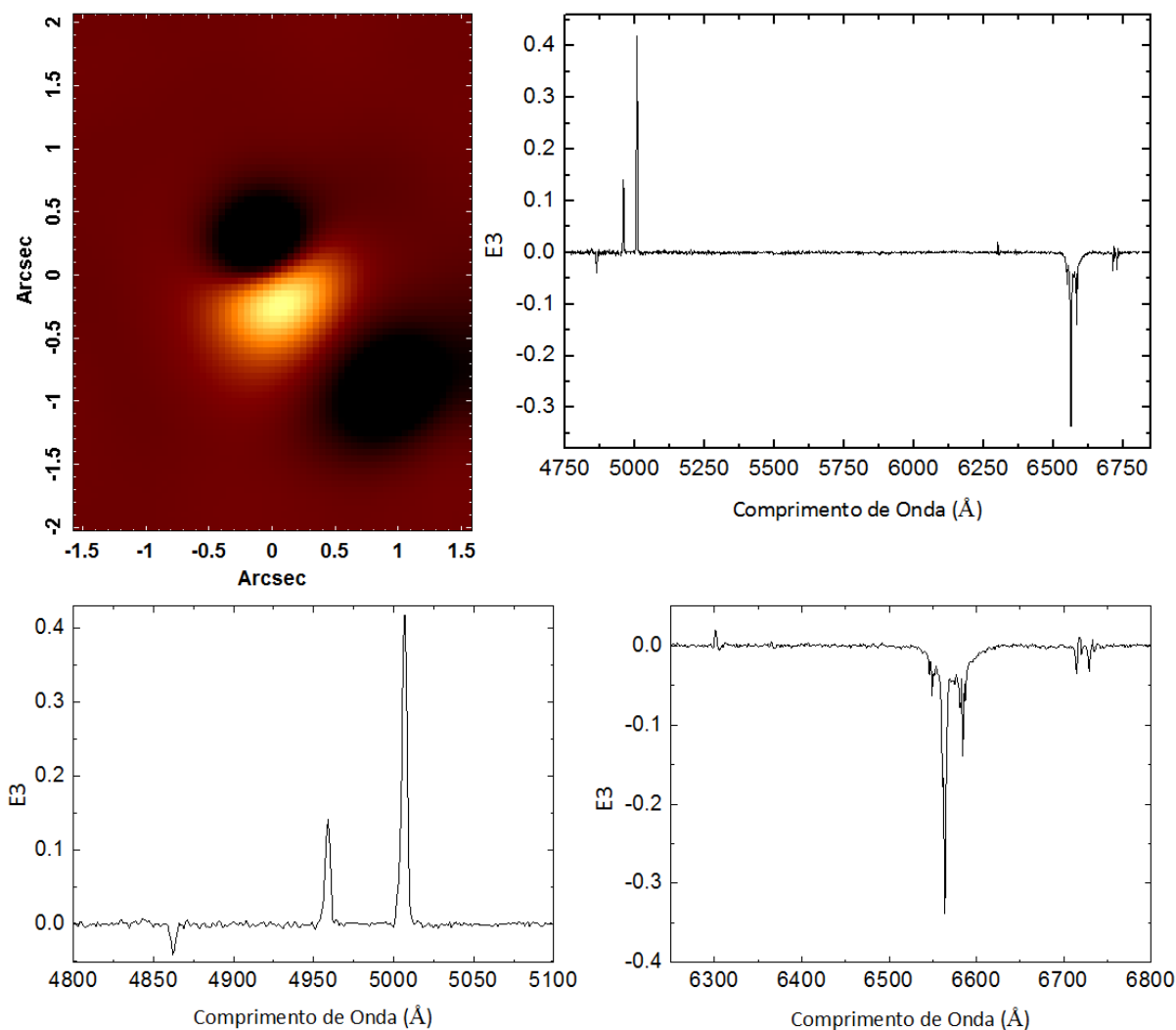


Figura 3.16: Tomograma e auto-espectro 3 do cubo de gás, com ampliações das regiões vermelha e azul do auto-espectro.

$H\beta$ e com as linhas de $[NII]\lambda\lambda 6548, 6584$ e $[SII]\lambda\lambda 6716, 6731$. O tomograma apresenta, na área central, uma região clara e outra escura, sendo que a região clara representa a emissão de mais alta ionização e a região central escura e a Região 2 representam a emissão de mais baixa ionização.

O conjunto tomograma/auto-espectro 4 (Fig. 3.17) mostra, entre outros fenômenos, a posição do AGN, que corresponde à área escura central do tomograma. Tal região, anti-correlacionada com o auto-espectro, é uma boa indicação da posição do AGN, pois o auto-espectro apresenta uma anti-correlação com as componentes largas de $H\alpha$ e $H\beta$. As anti-correlações com as asas vermelhas e as correlações com as asas azuis das principais linhas de emissão revelam que o gás emissor nas áreas claras e escuras está em *blueshift*

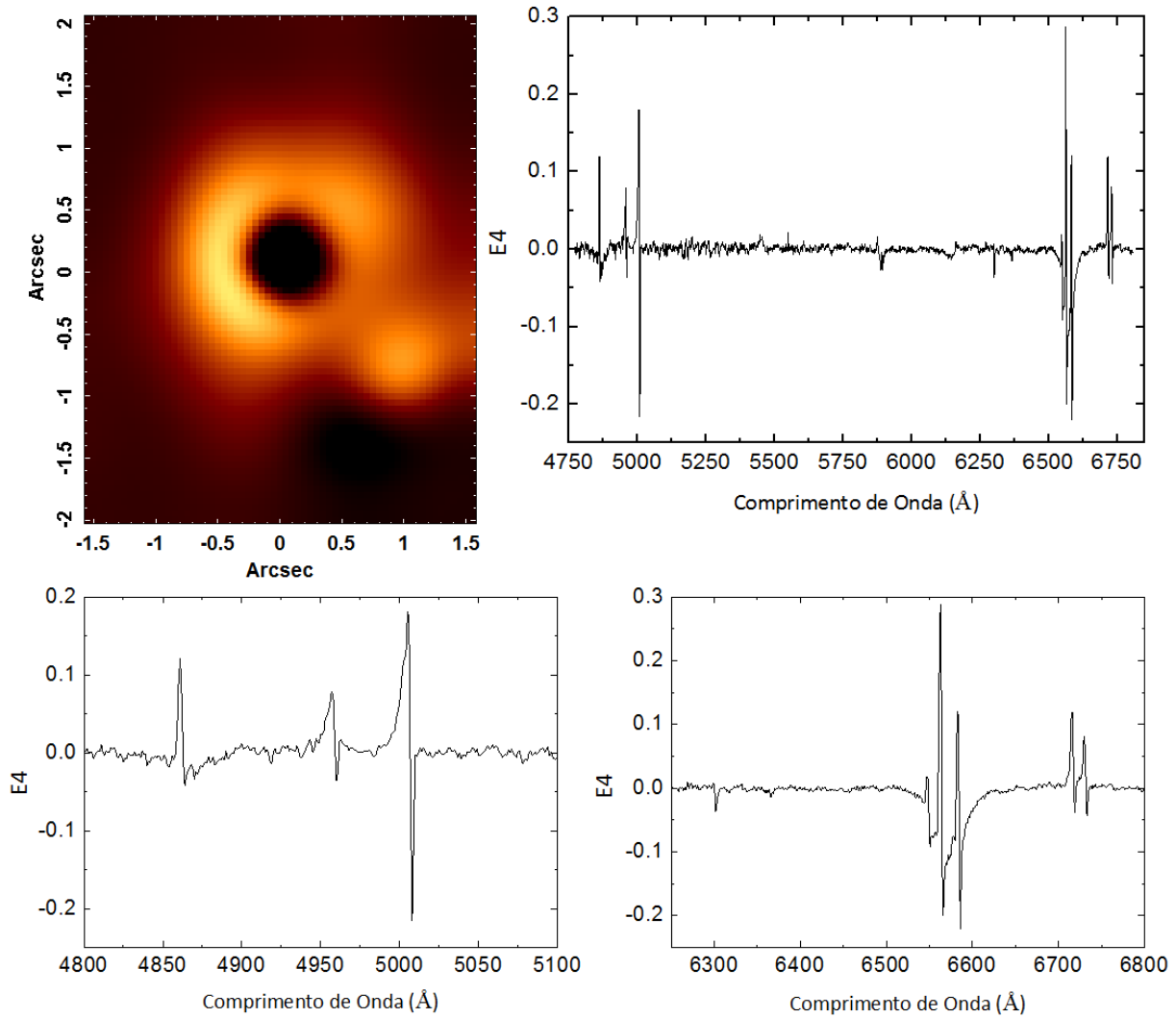


Figura 3.17: Tomograma e auto-espectro 4 do cubo de gás, com *zoom* das regiões vermelha e azul do auto-espectro.

e *redshift*, respectivamente. Tais áreas estão dispostas de uma maneira incompatível com uma rotação do gás ao redor do núcleo, o que pode indicar a presença de um outro fenômeno cinemático do gás, como um *outflow*, por exemplo.

Como se pode ver no diagrama de *Scree* (Fig. 3.18), a taxa de decaimento das frações das variâncias explicadas pelos autovetores atinge um valor constante a partir do autovetor E5. Tal taxa de decaimento se torna significativamente menor a partir do autovetor E15. Isso implica que o ruído é dominante a partir do autovetor E5 e fica ainda mais expressivo a partir do autovetor E15.

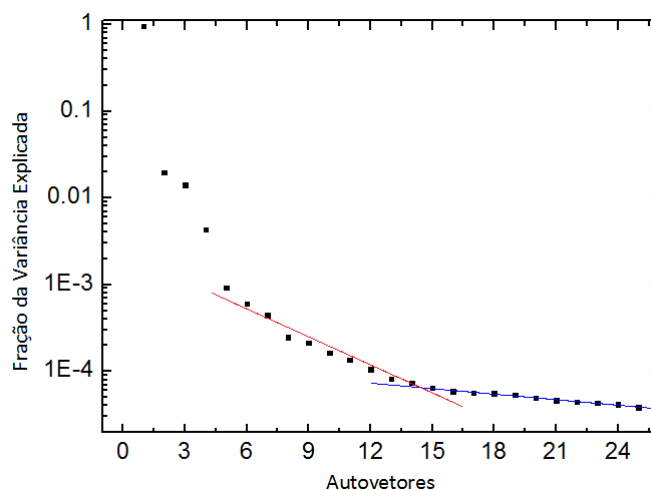


Figura 3.18: Diagrama de *Scree* da Tomografia PCA aplicada ao cubo de gás. As retas vermelha e azul mostram duas tendências de decaimento da fração de variância explicada pelos autovetores. Do autovetor 5 ao 14, a taxa de decaimento é maior do que do 15 em diante.

Tabela 3.2 - Tabela de autovalores da Tomografia PCA aplicada ao cubo de gás de NGC 1566.

Autovetores	Fração da Variância Explicada (%)
E1	95.771
E2	1.970
E3	1.414
E4	0.433
E5	0.093
E6	0.060
E7	0.044
E8	0.024
E9	0.021
E10	0.016
E11	0.013
E12	0.010
E13	0.008
E14	0.007
E15	0.006

3.7 Razões de Linhas

Os resultados da Tomografia PCA (ver seções 3.3 e 3.6) apresentam duas regiões emisoras distintas (ver Fig.3.4): uma delas centrada no núcleo (Região 1) e outra (Região 2)

centrada em ($1''$; $-1''$). Para estudar as propriedades espectroscópicas dessa segunda área emissora, foi extraído um espectro de uma região circular do cubo de gás, centrada em ($1''$; $-1''$), cujo raio ($0''.33$) foi igual à metade do FWHM da PSF. Da mesma forma, foi também extraído o espectro da Região 1 com o mesmo raio (ver Figs.3.19 e 3.21). Para determinar a natureza do objeto emissor é necessário calcular razões de linhas e construir diagramas de diagnóstico (Baldwin et al., 1981).

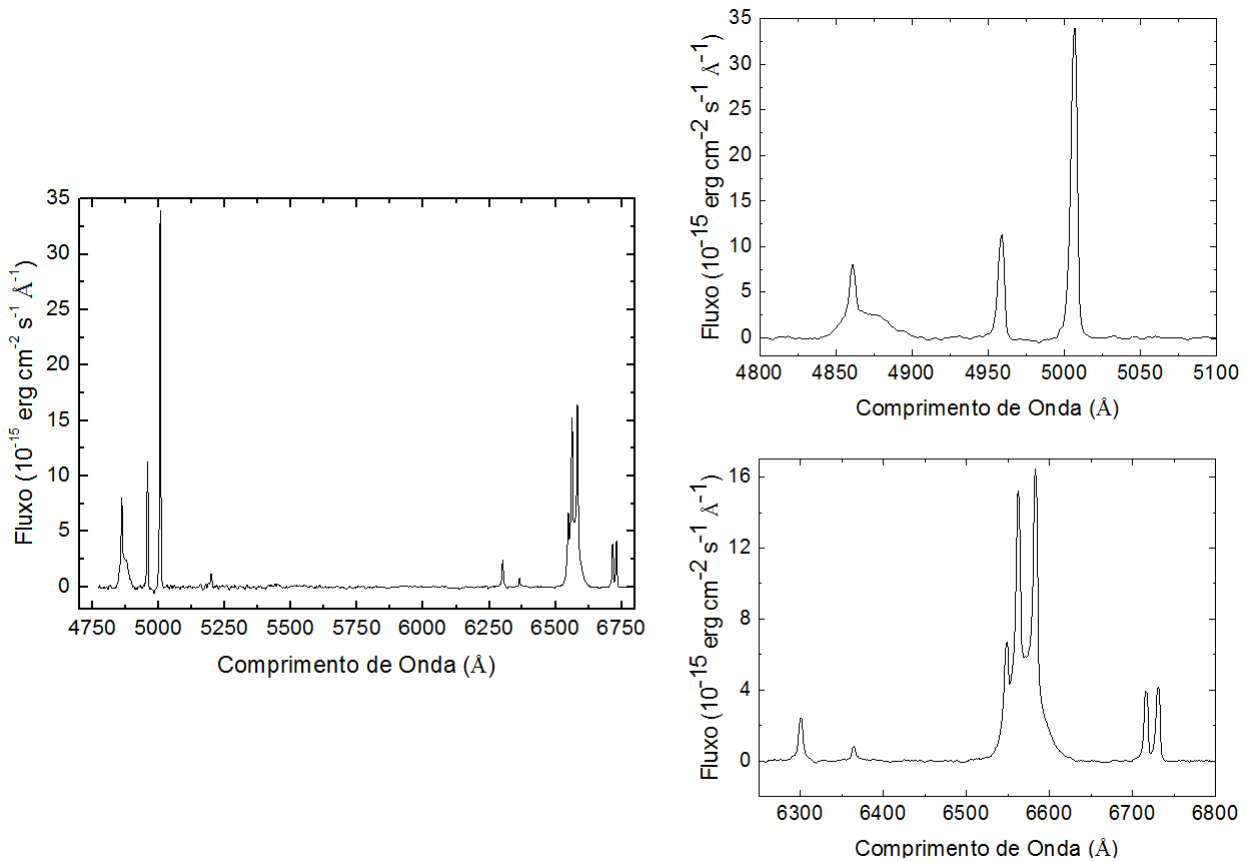


Figura 3.19: Espectro da Região 1 do cubo de gás de NGC 1566. Notam-se as componentes largas das linhas H α e H β .

O espectro da Região 1 possui, claramente, componentes largas nas linhas de H α e H β . A fim de separar as linhas *blendadas* desse espectro, primeiramente, ajustaram-se as linhas de [SII] λ 6716, 6731 como uma soma de dois conjuntos de funções gaussianas (conjunto das gaussianas mais estreitas e conjunto das gaussianas mais largas). Em cada conjunto, foi assumida uma determinada velocidade (V) e largura (σ) para as gaussianas. Dessa forma, cada linha de [SII] foi ajustada por duas gaussianas com diferentes valores de V e σ (componentes 1 e 2 das Figs.3.20A, B e C). O ajuste obtido, mostrado na Fig.3.20A,

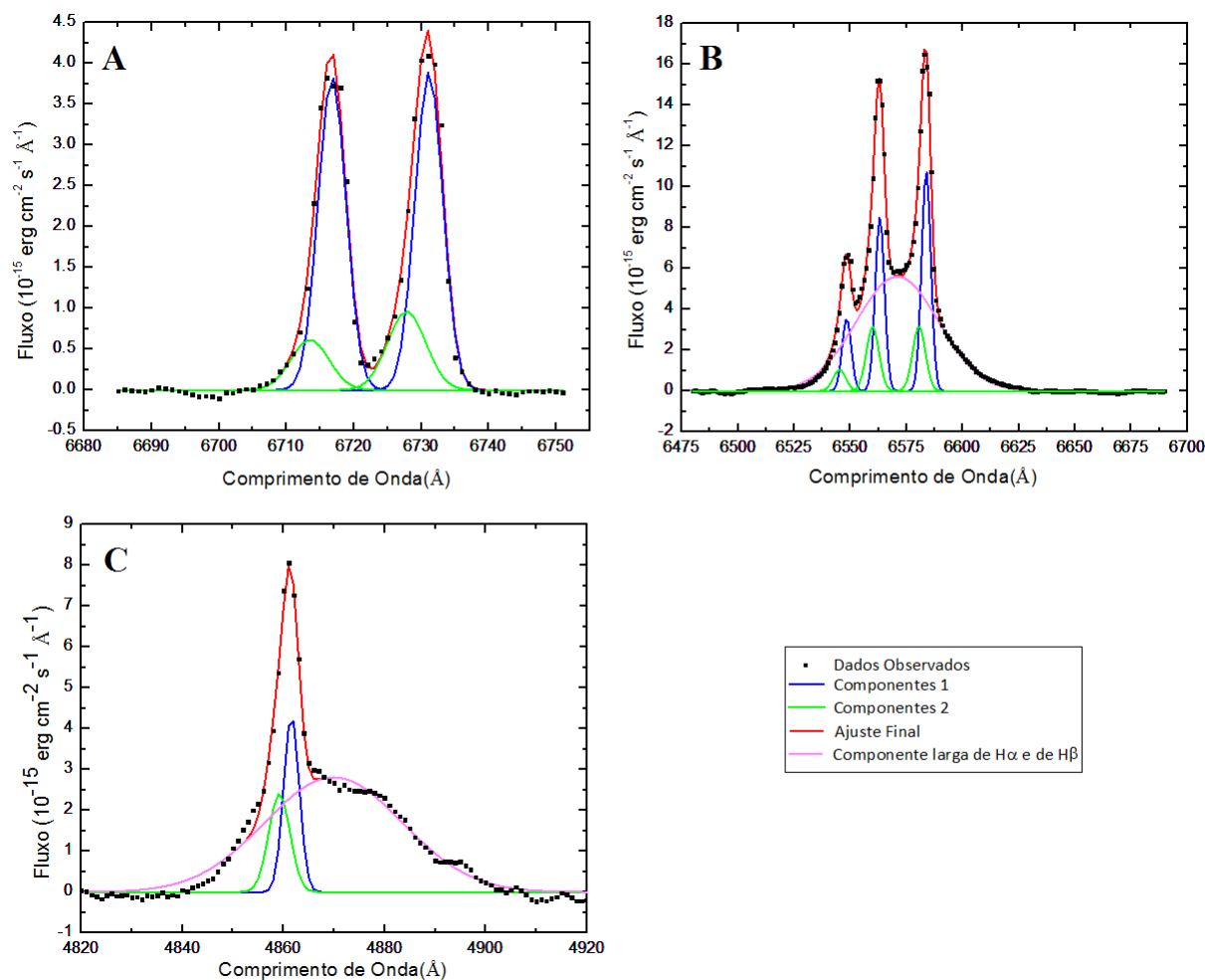


Figura 3.20: Ajuste de gaussianas nas linhas de emissão do espectro correspondente à Região 1. As componentes estreitas das linhas foram ajustadas por 2 gaussianas com diferentes velocidades e larguras e as linhas $H\alpha$ e $H\beta$ possuem uma gaussianas a mais, representando suas componentes largas.

reproduziu com boa precisão as linhas de [SII]. As larguras das gaussianas (FWHM) de cada conjunto, corrigidas devido à resolução instrumental, são de 207 ± 8 km/s e 290 ± 40 km/s. Após isso, foram ajustadas as linhas de [NII] λ 6548,6584 + $H\alpha$ com outra soma de gaussianas (Fig.3.20B). Nesse caso, foram usados dois conjuntos de três gaussianas, cada um com os mesmos valores de V e σ obtidos no ajuste de [SII] (componentes 1 e 2). Ou seja, as linhas de [SII] foram tomadas como base para determinação dos parâmetros principais das gaussianas para as demais linhas. Foi adicionada a esse ajuste uma gaussianas larga para representar a componente larga da linha de $H\alpha$. Pode-se notar que as gaussianas descreveram muito bem as linhas [NII]+ $H\alpha$, sendo que a gaussianas larga de $H\alpha$ possui o maior fluxo nesta região, com luminosidade igual a $(9.4 \pm 0.5) \times 10^5 L_{\odot}$ e uma

largura de 1980 ± 100 km/s. A linha $H\beta$ foi ajustada por uma soma de duas gaussianas estreitas, com os mesmos parâmetros das gaussianas utilizadas no ajuste das linhas de [SII], e uma gaussiana larga, com a mesma largura e velocidade obtidas no ajuste da componente larga de $H\alpha$ (Fig.3.20C). Apesar da linha $H\beta$ possuir um perfil mais irregular em relação às demais, devido ao menor sinal ruído (S/N) dessa região espectral, as principais características dessa linha foram bem reproduzidas. As velocidades (parâmetro V) com relação ao comprimento de onda de repouso de cada linha foram, para componente 1, 14.7 ± 7 km/s, para componente 2, -132 ± 10 km/s e, para a componente larga, 545 ± 40 km/s.

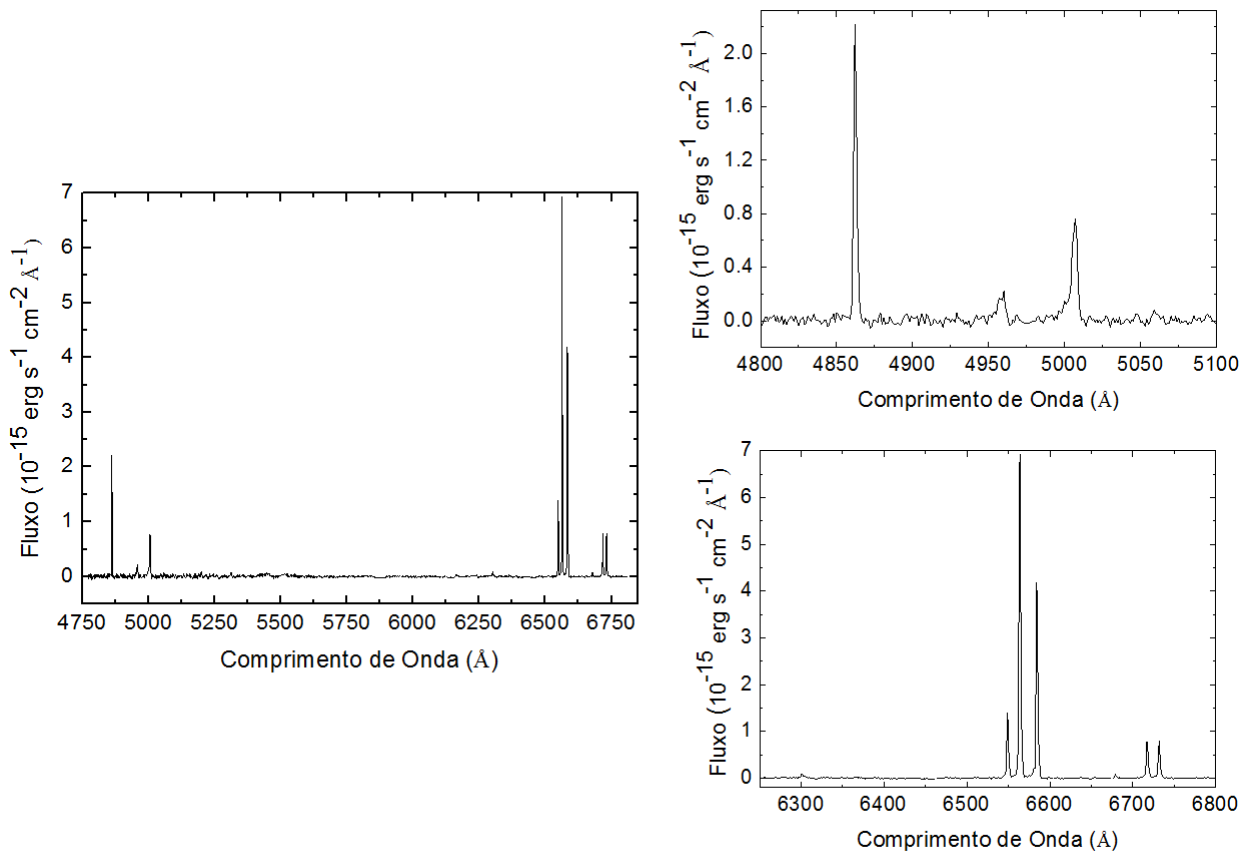


Figura 3.21: Espectro da Região 2 do cubo de gás de NGC 1566.

O espectro da Região 2 (Fig.3.21) não possui linhas *blendadas* que precisem de ajustes para as decompor. Porém, a linha [OIII] λ 5007 apresenta uma provável contaminação devida à emissão proveniente do AGN, que se mostra como uma asa azul na linha, o que faz com que essa linha tenha um perfil parecido com as linhas do espectro da posição

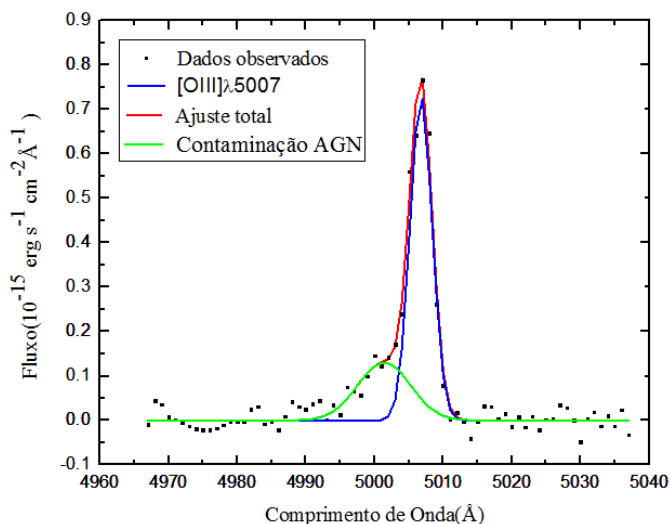


Figura 3.22: Ajuste de gaussianas da linha [OIII] λ 5007 do espectro da Região 2, mostrando, em verde, a contaminação devida ao AGN de NGC 1566.

do AGN. Para determinar o fluxo de [OIII] λ 5007 sem contaminação, foi feito um ajuste com uma soma de duas gaussianas: uma representando a contaminação e outra a emissão de [OIII] λ 5007 proveniente da Região 2 (ver Fig.3.22). O FWHM da linha de [OIII] λ 5007 obtido do ajuste foi 227 ± 14 km/s. Já as demais linhas possuem FWHM aproximadamente iguais à 117 ± 24 km/s. Essa diferença de valores entre as larguras das linhas sugere que a contaminação proveniente do AGN na linha de [OIII] λ 5007 não foi completamente removida. O FWHM da contaminação do AGN obtido do ajuste é igual à 544 ± 150 km/s. A velocidade da componente (parâmetro V do ajuste) que descreve a linha de [OIII] λ 5007 com relação ao comprimento de onda de repouso dessa linha obtida foi -3.71 ± 0.19 km/s e a contaminação foi -326 ± 16 km/s.

A tabela 3.3 mostra as luminosidade das linhas [OIII] λ 5007, H α e [NII] λ 6584, corrigidas de extinção, das regiões 1 e 2.

Tabela 3.3 - Tabela com as luminosidades de H α , [OIII] λ 5007 e [NII] λ 6584, corrigidas de extinção, das regiões 1 e 2 de NGC 1566

Luminosidades (10^{38} erg/s)	Região 1	Região 2
H α	9.2 ± 0.5	2.58 ± 0.13
[OIII] λ 5007	25.3 ± 1.3	0.41 ± 0.05
[NII] λ 6584	10.9 ± 0.5	1.67 ± 0.08

Foram calculadas as seguintes razões de linhas para as duas regiões emissoras: [OIII]

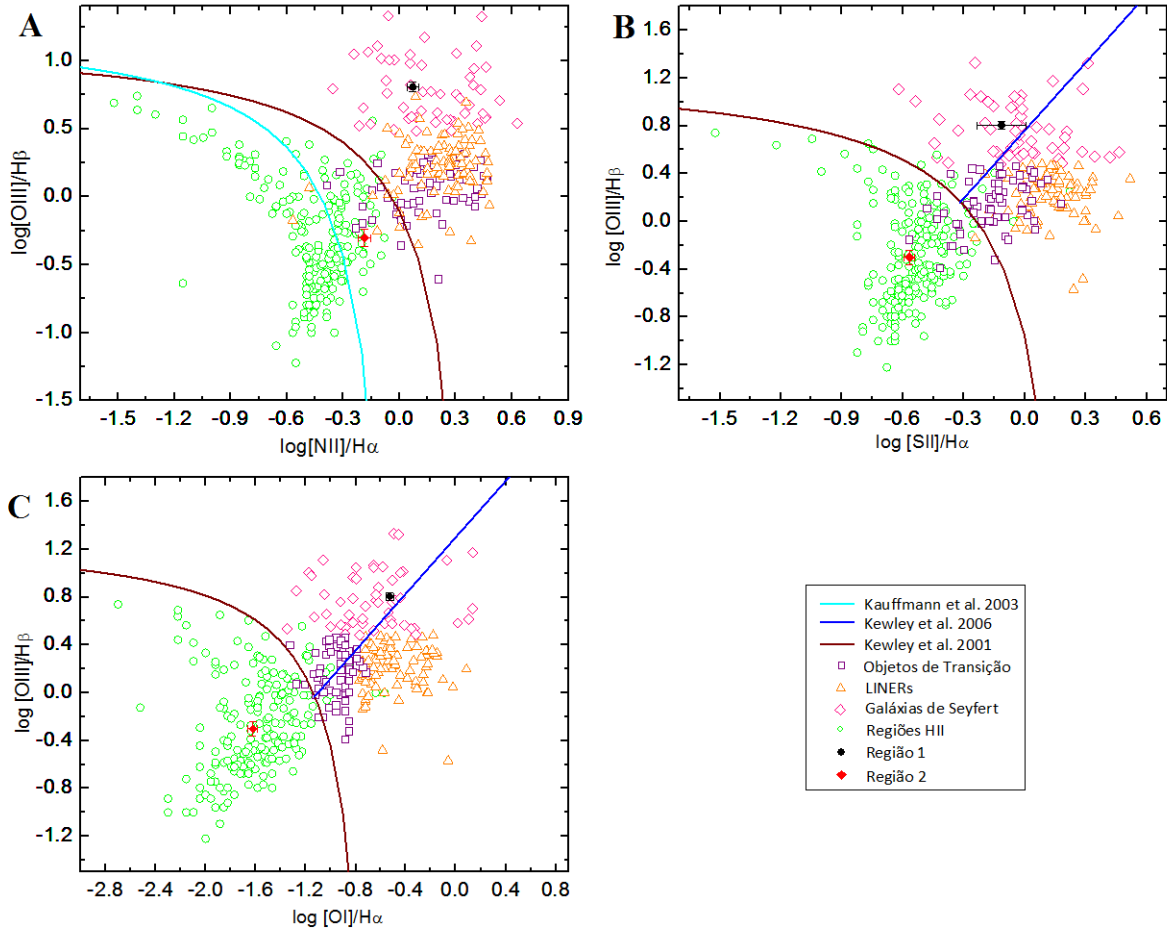


Figura 3.23: Diagramas de diagnóstico das regiões encontradas em NGC 1566, utilizando valores da tabela 3.4. A região emissora central (Região 1) é representada pelo ponto preto e a Região 2, pelo quadrado vermelho. Os demais pontos correspondem aos objetos analisados por Ho et al. (1997): os círculos verdes são regiões HII, os triângulos laranjas são LINERs, os quadrados em roxo são objetos de transição e os losangos rosas representam as galáxias de Seyfert. O ajuste vinho nos diagramas A, B e C mostra o limite máximo de ionização por um *starburst* obtido por Kewley et al. (2001). O ajuste em ciano representa a divisão entre regiões HII e AGNs obtida por Kauffmann et al. (2003) e a linha azul representa a divisão entre galáxias de Seyfert e LINERs criada por Kewley et al. (2006).

$\lambda 5007/H\beta$, $[NII]\lambda 6584/H\alpha$, $[OI]\lambda 6300/H\alpha$ e $([SII]\lambda 6716+\lambda 6731)/H\alpha$ (ver Tabela 3.4). Apenas as componentes estreitas das linhas do espectro do AGN (Região 1) foram levadas em conta e, no caso do espectro da Região 2, a contaminação da linha $[OIII]\lambda 5007$ devida à emissão do AGN foi desconsiderada. Os diagramas de diagnósticos resultantes (Fig.3.23) possuem os pontos representando as duas regiões de NGC 1566 e objetos analisados por Ho et al. (1997).

Nota-se que a Região 1 possui razões de linhas típicas de uma galáxia de Seyfert e a Região 2, levando-se em conta os critérios de Kewley et al. (2001), pode ser classificada

Tabela 3.4 - Razões de linhas das duas regiões encontradas na região central de NGC 1566

Razões de Linhas	Região 1	Região 2
$[\text{OIII}]\lambda 5007/\text{H}\beta$	6.4 ± 0.5	0.50 ± 0.07
$[\text{NII}]\lambda 6584/\text{H}\alpha$	1.18 ± 0.08	0.65 ± 0.05
$([\text{SII}]\lambda 6716+6731)/\text{H}\alpha$	0.77 ± 0.21	0.271 ± 0.017
$[\text{OI}]\lambda 6300/\text{H}\alpha$	0.298 ± 0.021	0.0238 ± 0.0020
$\text{H}\alpha/\text{H}\beta$	2.26 ± 0.20	3.15 ± 0.22
$[\text{SII}]\lambda 6716/[\text{SII}]\lambda 6731$	0.90 ± 0.15	1.06 ± 0.07

como uma região HII ou um objeto de transição. Acredita-se que a Região 2 seja uma região HII contaminada pela emissão do AGN próximo. Embora a contaminação tenha sido maior na linha de $[\text{OIII}]\lambda 5007$ e tenha sido removida, ainda pode haver outras possíveis contaminações mais difíceis de serem indentificadas e, portanto, removidas.

3.7.1 Perfis de $\text{H}\alpha$ e $\text{H}\beta$ do AGN e *redshift* gravitacional

A partir do ajuste gaussiano feito, sabe-se que os perfis de linha de $\text{H}\alpha$ e $\text{H}\beta$ da Região 1 (AGN) são compatíveis, já que foram usados os mesmos parâmetros para ajustar esses perfis. Outra forma de comprovar isso foi subtrair as componentes estreitas das linhas de $\text{H}\beta$ e das linhas de $[\text{NII}]\lambda 6548$, 6584 e $\text{H}\alpha$, obtidas com o ajuste gaussiano, para obter somente as componentes largas de $\text{H}\beta$ e $\text{H}\alpha$, respectivamente. Então, as duas componentes largas foram ajustadas no espaço de velocidades (Fig.3.24), sendo que o fluxo de $\text{H}\alpha$ foi dividido por 2.9 (que é o valor mínimo para a razão $\text{H}\alpha/\text{H}\beta$, que ocorre na ausência de extinção de poeira, assumindo-se o caso B de recombinação, com densidade de 10^2cm^{-3} e temperatura de 10^4 K) para melhor visualização. Ao ver a proporção com que as linhas ficaram, nota-se que a razão entre elas é compatível com 2.9; portanto, há pouca extinção por poeira na BLR. Nota-se que as larguras delas são compatíveis, já que o FWHM da linha de $\text{H}\beta = 1953 \pm 18$ km/s e de $\text{H}\alpha = 1978 \pm 7$ km/s. Assim, a afirmação de que os perfis são diferentes feita por Osmer et al. (1974) não é compatível com o que foi observado aqui e isso é provavelmente devido ao fato dos autores terem trabalhado com dados com resolução e qualidade menores.

Uma análise possível, quando se tem medidas das linhas emitidas pela BLR, envolve o *redshift* gravitacional. A partir do *redshift* dessas linhas, juntamente com a medida da massa do buraco negro, é possível determinar o raio no qual está sendo emitida a linha,

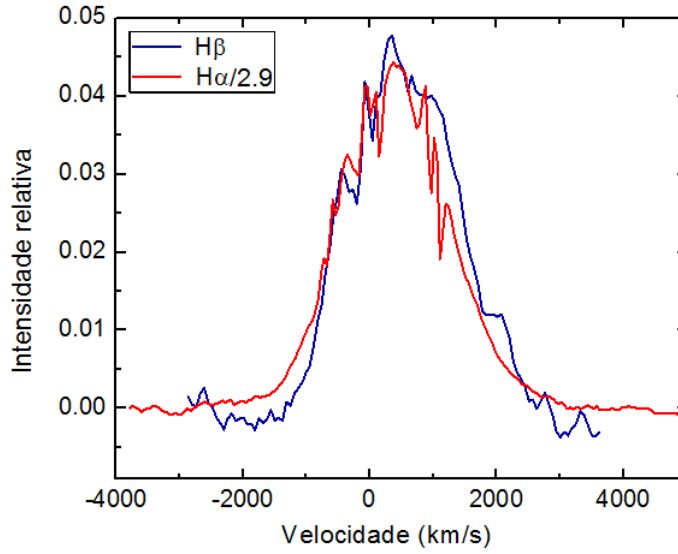


Figura 3.24: Componentes largas das linhas H β (em azul) e H α (em vermelho) no espaço de velocidades. A intensidade da linha de H α foi dividida por 2.9 para que as linhas ficassem na mesma escala.

através da seguinte equação:

$$1 + z = \left(1 - \frac{R_S}{r}\right)^{-1/2}, \quad (3.1)$$

onde z é o *redshift* da linha em questão (nesse caso, o *redshift* gravitacional), r é o raio de emissão e R_S é o raio de Schwarzschild, que é dado por:

$$R_S = \frac{2GM_{BH}}{c^2}, \quad (3.2)$$

no qual G é constante gravitacional, M_{BH} é a massa do buraco negro e c é a velocidade da luz.

Utilizando a massa do buraco negro como sendo $8.3 \times 10^6 M_\odot$ (Woo e Urry, 2002) e os *redshifts* calculados das componentes largas de H α e H β , calcularam-se os raios para a emissão dessas linhas. Os resultados são mostrados na tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Tabela contendo o *redshift* e o valor de r (raio de emissão - ver equação 3.1) para as componentes largas das linhas H α e H β do espectro do AGN (Região 1)

Componentes Largas	<i>Redshift</i>	r/ R_S
H β	0.0018	284
H α	0.0012	403

As incertezas para os valores de r não puderam ser determinadas, pois não se tem o valor da incerteza de M_{BH} , que, neste caso, será dominante no cálculo. A incerteza do *redshift* da componente larga de $H\alpha$ foi 0.00010 e a de $H\beta$ foi 0.00013. Os *redshifts* são compatíveis dentro de 3σ , o que indica que ambas componentes podem estar sendo emitidas dentro do mesmo raio.

A razão de $H\alpha/H\beta$ da BLR, utilizando o fluxo integrado dessas componentes obtido através do ajuste gaussiano, é igual a 2.69 ± 0.13 . Esse valor é compatível com o caso B de recombinação (2.9) dentro de 3σ , o que significa que não há extinção significativa na BLR desse objeto, como foi dito anteriormente.

3.7.2 Algumas propriedades da Região HII

O auto-espectro E4 (Fig. 3.6) revela que a região HII está em *redshift*. A partir da linha $[OIII]\lambda 5007$ do espectro extraído dessa região, foi estimada a velocidade da região HII relativa ao centro (AGN): 10 ± 2 km/s, compatível então com resultado da Tomografia PCA.

A distância projetada obtida da região com relação ao AGN foi de $1''4$. Assumindo que a distância de NGC 1566 é 10.8 Mpc, tem-se que a distância projetada AGN- Região HII é de ~ 73.3 pc. Utilizando a incerteza propagada levando-se em conta, apenas, a incerteza da determinação dos centros das regiões em *pixels*, tem-se que a incerteza da distância é 1.9 pc. Ao levar em conta também a incerteza devido à distância da galáxia (desvio padrão das distâncias obtido no NED), tem-se uma incerteza de 9 pc.

3.7.3 Densidade eletrônica

A densidade média de elétrons de uma fonte pode ser medida se houver emissão de linhas do mesmo íon com níveis de energia de excitação bem próximos, pois, nesse caso, a intensidade relativa dessas linhas irá depender muito da densidade do gás (e das densidades críticas dos níveis de energia envolvidos) e pouco da temperatura do gás. O dubleto de $[SII]\lambda\lambda 6716, 6731$ é um exemplo desse caso. Através do gráfico da Fig.5.8 do capítulo 5 de Osterbrock e Ferland (2006), adotando-se a temperatura $T=10.000K$, com as razões $[SII]\lambda 6716/[SII]\lambda 6731$ da tabela 3.4, pôde-se estimar a densidade eletrônica média das regiões de NGC 1566.

A densidade encontrada para a Região HII de NGC 1566 foi $446_{-119}^{+148} \text{ cm}^{-3}$. A densidade encontrada para a região do AGN foi $848_{-383}^{+731} \text{ cm}^{-3}$.

3.8 *Featureless continuum*

Boa parte da emissão dos AGNs ocorre na forma de um *featureless continuum*, que se comporta matematicamente como uma lei de potência:

$$F_{\nu} = A\nu^{-\alpha}, \quad (3.3)$$

onde o expoente α é chamado de índice espectral.

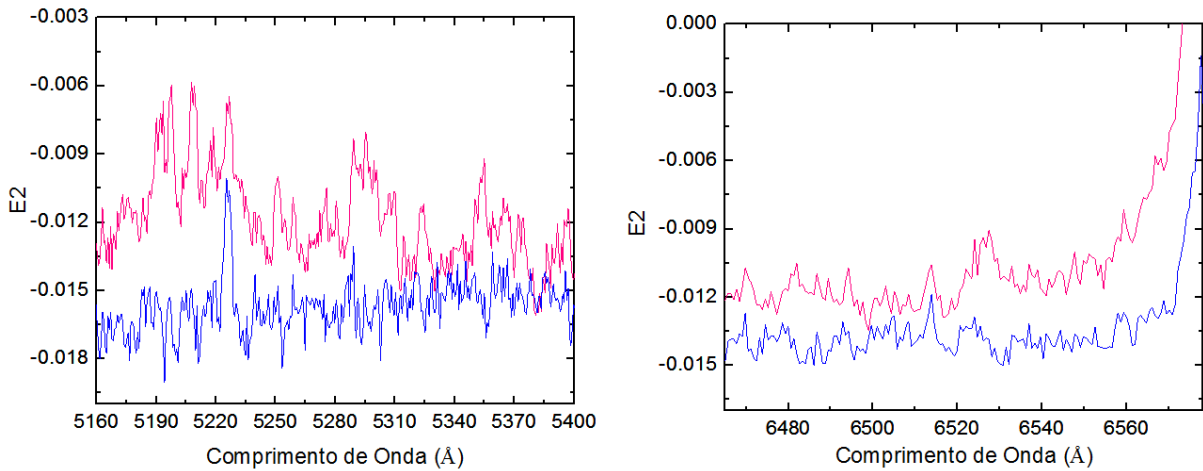


Figura 3.25: Auto-espectro E2 obtido com a Tomografia PCA aplicada ao cubo após a deconvolução, antes (vermelho) e após (azul) a subtração de um cubo de dados contendo uma lei de potência com índice espectral igual a 1.7.

O auto-espectro E2 (Fig. 3.3) revela que as linhas de absorção estelares são menos intensas na região do AGN do que nos arredores. Acredita-se que isso seja devido ao ofuscamento dessas linhas pelo *featureless continuum* emitido pelo AGN. A fim de se encontrar um índice espectral apropriado para descrever tal emissão, construíram-se cubos de dados sintéticos nos quais foram introduzidas leis de potências, com diferentes índices espectrais e constantes multiplicativas, na posição do AGN. Todos demais valores nestes cubos foram zerados. Em seguida, os cubos sintéticos foram convoluídos com PSFs de diferentes tamanhos e subtraídos do cubo de dados original. Por fim, foi aplicada a Tomografia PCA aos cubos de dados resultantes. A Fig. 3.25 mostra o auto-espectro E2 obtido com a Tomografia PCA do cubo antes e depois da subtração que melhor removeu o *featureless*

continuum detectado. O valor obtido para o índice espectral do *featureless continuum* foi de 1.7. Um pouco maior do que o valor geralmente utilizado que é 1.5.

O FWHM da PSF convoluída com o cubo de dados sintético que melhor removeu o ofuscamento das linhas de absorção na região central (FWHM= $0''.75$) é maior do que o FWHM da PSF do cubo de dados tratado de NGC 1566 (FWHM= $0''.66$). Isso sugere que a emissão contínua detectada, com a forma aproximada de uma lei de potência, não é proveniente apenas do AGN. Uma possível explicação para isso é que parte dessa emissão seja devida a estrelas quentes e jovens, cujo espectro (com poucas linhas de absorção), em certas circunstâncias, pode se assemelhar a uma lei de potência.

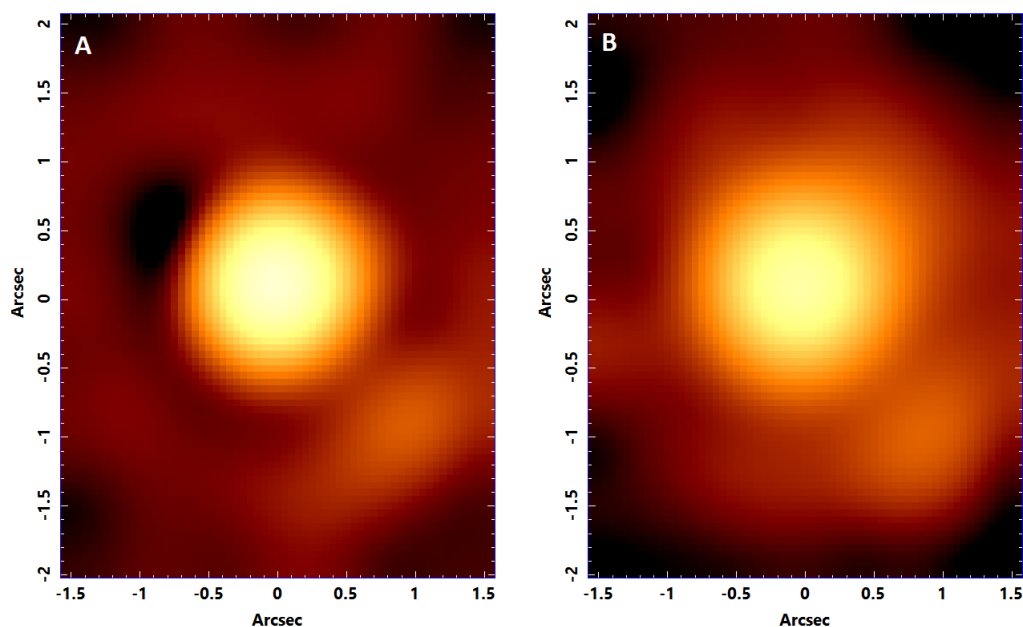


Figura 3.26: Imagens da emissão de $[SII]\lambda\lambda 6716, 6731$ de nuvens com alta (A) e baixa (B) densidade.

3.9 Imagens da emissão de $[SII]\lambda\lambda 6716, 6731$ de nuvens com alta e baixa densidade

Na seção 2.4.5 há a descrição de como foram criadas as imagens da emissão de $[SII]\lambda\lambda 6716, 6731$ das nuvens de alta e baixa densidades.

A Fig.3.26A apresenta a imagem das nuvens de alta densidade obtida. Nela é possível ver as regiões 1 e 2, discutidas anteriormente, e uma estrutura semelhante a um anel, de raio $\sim 1''$, já visto na imagem de A_V obtida com o *software* STARLIGHT.

Esse anel é ainda visto na imagem das nuvens de baixa densidade (Fig.3.26B), porém mais difuso, neste caso. As Regiões 1 e 2 aparecem nesta imagem também, porém, como no anel, de maneira mais difusa, revelando que o gás com baixa densidade dessas regiões está mais espalhado do que o gás com alta densidade, o que é esperado.

3.10 Imagem do HST de NGC 1566

Para melhor visualizar as estruturas nucleares de NGC 1566, foram analisadas imagens dessa galáxia do banco de dados do HST, obtidas com a *Wide-Field Planetary Camera 2* (WFPC2) nos filtros F555W (V) e F814W (I). Foi feita, então, uma imagem de V-I (Fig. 3.29C). As regiões mais claras apresentam espectros mais avermelhados, provavelmente devido à extinção por poeira. É possível notar que a região HII possui um espectro azulado, provavelmente devido à presença de estrelas jovens nessa região.

Combes et al. (2014), Smajić et al. (2015) e Mezcuca et al. (2015) citam que há espirais de gás molecular e poeira na região central. De fato, na Fig. 3.29C, é possível notar que há uma estrutura espiral provavelmente associada à extinção por poeira. Além disso é possível notar que o núcleo possui um espectro azulado, o que é de se esperar, já que este contém uma grande emissão de *featureless continuum*.

3.11 Discussão e conclusão

3.11.1 NGC 1566 possui um AGN e uma região HII em seu centro

NGC 1566 possui um núcleo ativo do tipo galáxia de Seyfert 1 (ver seção 3.1). Esse resultado foi comprovado aqui através da Tomografia PCA (seção 3.3), que mostrou que a região de emissão dominante no cubo é o AGN. O primeiro conjunto auto-espectro/tomograma, tanto da Tomografia PCA aplicada ao cubo de gás (Fig. 3.14) quanto da Tomografia PCA aplicada ao cubo obtido após a deconvolução (Fig. 3.2), e a imagem do cubo colapsado juntamente com o espectro médio (Fig. 3.1) revelaram a posição e também várias características espectrais do AGN (como componentes largas das linhas de $H\alpha$ e $H\beta$, por exemplo). Além disso, a composição RG da imagem da integral do cubo estelar, obtido através da síntese espectral, e a imagem da asa larga de $H\alpha$ confirmam que a posição do AGN é o centro do bojo estelar (ver Fig. 3.27).

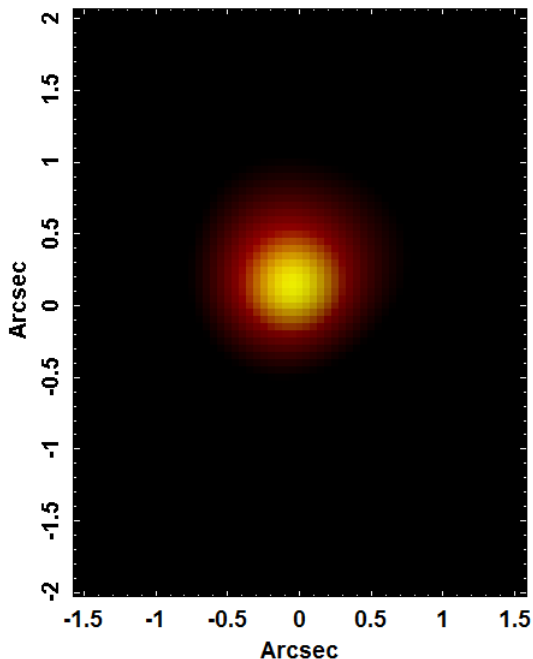


Figura 3.27: Composição RG da imagem da integral do cubo sintético estelar (em vermelho) e da imagem da asa larga de $H\alpha$ (em verde).

Além disso, foi revelada pela Tomografia PCA outra região emissora de linhas relevante no cubo de dados, centrada em ($1'';-1''$), com distância projetada em relação ao AGN de 73.3 pc, assumindo que a distância de NGC 1566 é de 10.8 Mpc. Tal região, como foi visto na seção 3.7, possui um espectro típico de uma região HII contaminado pela emissão do AGN (ver Fig.3.23). Essa região foi observada por Combes et al. (2014). A Fig. 3.28 mostra a sobreposição do tomograma 3 obtido com a Tomografia PCA do cubo de gás com as curvas de intensidade integrada de CO(3-2) (gás molecular), obtidas por Combes et al. (2014). É possível notar que a região HII está bem próxima, ou, até mesmo, alinhada, a uma das concentrações de CO associadas aos braços de uma espiral de gás molecular na região central de NGC 1566.

Smajić et al. (2015) também observaram a região HII, chamada pelos autores de *Star Forming Region*, na mesma posição (ver Fig. 3a, 3j e 8 do paper citado). Eles calcularam a taxa de formação estelar dessa região e obtiveram $2.6 \times 10^{-3} M_{\odot}/\text{ano}$.

A Tomografia PCA também mostrou que a região HII está em *redshift*. A velocidade relativa à Região 1 (AGN), calculada utilizando a linha de [OIII] $\lambda 5007$ do espectro extraído da Região 2, foi $V = 10 \pm 2$ km/s, compatível com o resultado obtido pela Tomografia PCA.

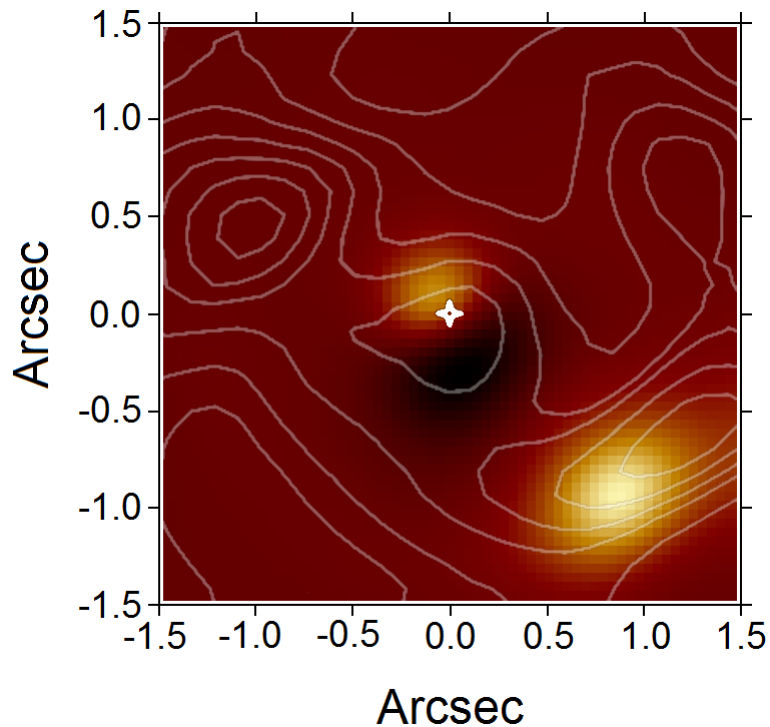


Figura 3.28: Tomograma 3 obtido com a Tomografia PCA do cubo deconvoluído com a sobreposição da intensidade integrada de CO(3-2) obtida com o radiotelescópio ALMA por Combes et al. (2014). A cruz branca representa o ponto central (utilizado como referência para a sobreposição) adotado por Combes et al. (2014).

3.11.2 Estrutura espiral no núcleo de NGC 1566

Há evidências de aparentes estruturas anelares e espirais na região central de NGC 1566. A primeira delas corresponde a um padrão cinemático do gás que apareceu na Tomografia PCA do cubo de gás, através do tomograma e auto-espectro E4 (Fig. 3.17): o auto-espectro apresenta um padrão cinemático (na região clara do tomograma) que é diferente dos mostrados nos auto-espectros/tomogramas anteriores. As áreas claras do tomograma associado ao autovetor E4 possuem um aspecto anelar e estão correlacionadas com as asas azuis das principais linhas de emissão estreitas do espectro, ou seja, tais áreas aparentam estar em *blueshift*. Esse fenômeno cinemático do gás poderia estar associado a um *outflow* do AGN, por exemplo. Essa aparente estrutura anelar, com emissão de linhas estreitas, tem um raio de $\sim 0''.5$ (~ 26 pc).

Evidências de estruturas anelares também aparecem nos mapas de alta e baixa densidade (Fig. 3.26) e no mapa de fluxo representativo das populações estelares com idade de 10^{10} anos (Fig. 3.9D), obtido com a síntese espectral. No caso desse último, percebe-se que

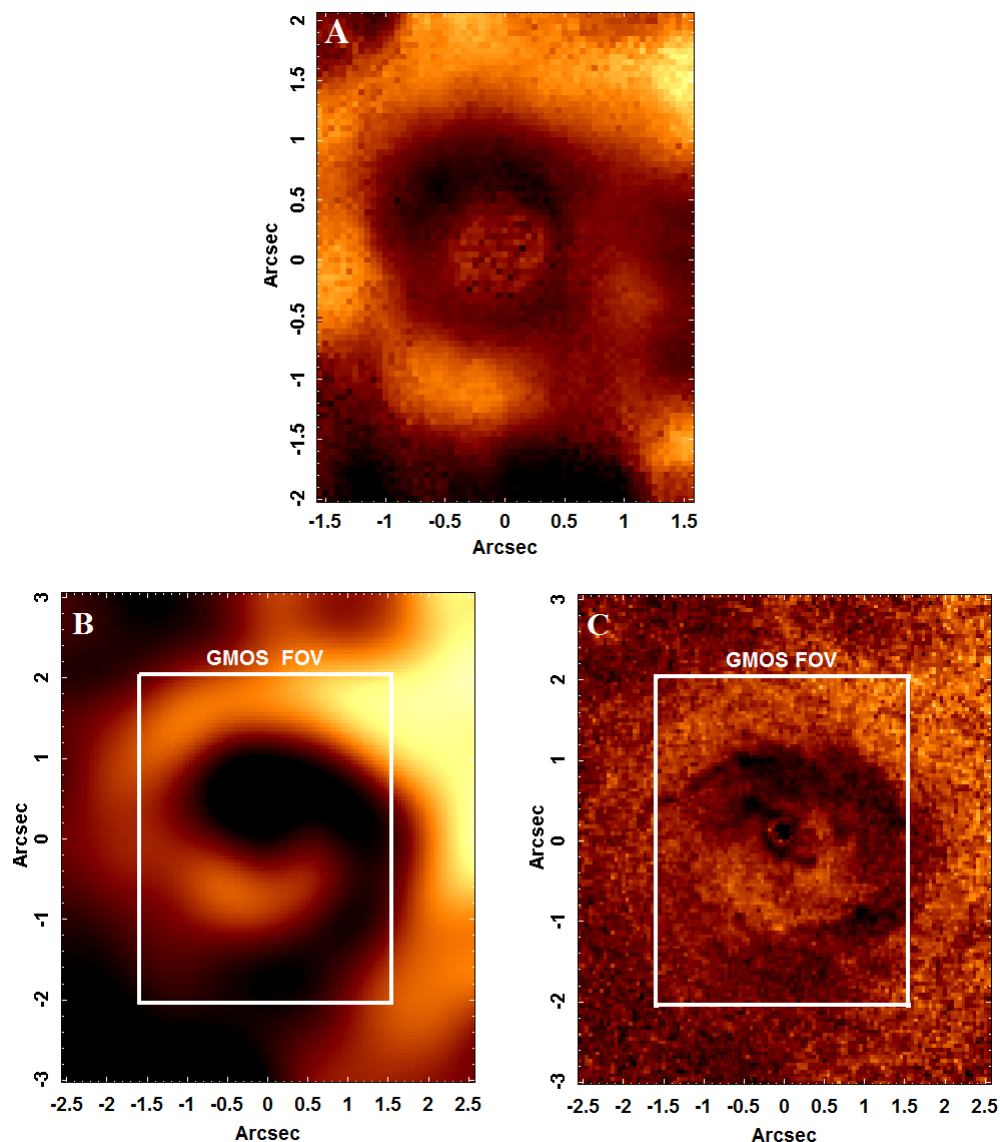


Figura 3.29: Imagens que comprovam a espiral nuclear em NGC 1566. (A) Imagem de A_V , (B) Imagem V-I obtida com o HST, convoluída com a PSF do cubo de dados do GMOS, e (C) Imagem V-I obtida com o HST.

as populações velhas de alta metalicidade estão dispostas ao longo de um aparente anel, com um raio de $\sim 1''$ (~ 56 pc). O mapa de A_V (Fig. 3.10A) fornecido pela síntese espectral revela que a poeira na região central de NGC 1566 também está disposta ao longo do que parece ser uma estrutura anelar, com um tamanho similar.

A semelhança, sobretudo no tamanho, das possíveis estruturas anelares observadas nos mapas de A_V e do fluxo associado a populações estelares velhas é bastante eloquente. Mezcua et al. (2015) também observaram um anel de H_2 molecular com raio de $1''$ e Combes et al. (2014) citaram que há uma espiral de gás molecular em direção ao núcleo e um disco

nuclear denso de gás molecular.

Ao observar a imagem V-I do HST (Fig.3.29C), nota-se que a estrutura que aparece nessa imagem é bem semelhante ao mapa de A_V , como se espera, e que, embora parecesse um anel, na verdade, faz parte de uma espiral que só pôde ser reconhecida fora do campo de visão do GMOS. A correspondência das estruturas anelares que aparecem no GMOS com a parte central da espiral pode ser vista na mesma imagem do HST convoluída com a PSF do cubo de dados aqui analisado (Fig.3.29B). Nela é possível notar, com mais clareza, a espiral e a semelhança dela com a imagem de A_V .

3.11.3 Populações estelares e sua cinemática

Os resultados obtidos com a síntese espectral mostram que há uma possível população jovem (10^6 anos) com alta metalicidade (0.02 e 0.05) concentrada no centro do FOV (Fig. 3.9A). Como foi dito anteriormente, como essas populações jovens apresentam espectros com poucas linhas de absorção, é possível que o *software* STARLIGHT as tenha associado erroneamente ao *featureless continuum* do AGN. Ou seja, esse mapa pode não ser real. Por outro lado, parece haver uma população de idade 10^7 anos concentrada no centro do FOV, com alta metalicidade (Fig. 3.9B). Além disso, há uma quantidade significativa de populações de idade intermediária distribuídas em regiões periféricas (Fig. 3.9C) e uma grande quantidade de populações estelares velhas (10^{10} anos, que só foram detectadas em torno do AGN devido ao ofuscamento do *featureless continuum* na área central (Fig. 3.9D).

Os mapas cinemáticos fornecidos pelo pPXF revelaram a presença de um disco estelar em rotação ao redor do núcleo. Além disso, também se pode notar um decréscimo nos valores da dispersão de velocidades estelar em direção ao centro (σ -drop). Tal decréscimo pode ser devido à presença de uma população estelar jovem e massiva (com baixa dispersão de velocidades) na região nuclear.

3.11.4 Featureless Continuum com índice espectral 1.7

A emissão do *featureless continuum* do AGN nessa galáxia é muito expressiva, tanto, que foi logo notada no auto-espectro E2 da Tomografia PCA do cubo deconvoluído (Fig. 3.3) uma anti-correlação com as linhas de absorção, indicando um ofuscamento das mesmas pelo *featureless continuum*. Então, pôde-se, pela primeira vez, tentar determinar o *featureless*

continuum de um objeto simulando curvas de contínuo e aplicando a Tomografia PCA.

O processo foi feito subtraindo-se cubos sintéticos com diversas leis de potência do cubo original e aplicando-se a Tomografia PCA aos cubos resultantes. Foi possível obter um resultado no qual o *featureless continuum* não pôde mais ser detectado. O índice espectral obtido para esse *featureless continuum* foi de 1.7.

NGC 6744

4.1 Introdução

NGC 6744 é uma galáxia pertencente ao grupo Pavão; seu tipo morfológico é SAB(r)bc e sua distância é de, aproximadamente, 8.5 Mpc (valor médio das distâncias determinadas dado pelo NED). Possui um anel, com diâmetro 3:3 (~ 8.2 kpc), do qual partem dois braços observados em imagens de HI (Ryder et al., 1999). O seu bojo é clássico, bastante similar a uma galáxia elíptica, com um traço leve de poeira em direção ao centro (Fisher e Drory, 2010). A galáxia possui $SFR = 6.8 M_{\odot}/\text{ano}$ (Ryder e Dopita, 1994).

Mapas no infravermelho intermediário ($12\mu\text{m}$) mostram que a galáxia possui duas grandes regiões centrais separadas por, aproximadamente, $6'$ (~ 15 kpc) (Rice et al., 1988).

Há pouca emissão infravermelha na região entre o núcleo e o anel e esta é dominada por populações estelares velhas (Roussel et al., 2001). Além disso, nessa região, há pouca formação estelar, o que pode ser devido a uma ressonância orbital que expulsou o gás reduzindo a formação estelar (Ryder e Dopita, 1993).

Há pouco estudo sobre a região nuclear, que possui razões de linhas típicas de LINER (Vaceli et al., 1997).

4.2 Observações e tratamento de dados

As observações de NGC 6744 foram realizadas na noite de 8 de Maio de 2014, nas configurações instrumentais já apresentadas na seção 2.1 do capítulo 2. O programa de observação do telescópio Gemini-Sul é GS-2014A-Q-5. Foram feitas 3 exposições de 815 segundos com *position angle* igual a 0° . O *seeing*, determinado a partir da imagem de aquisição (em um comprimento de onda $\lambda_{ref} = 6300\text{\AA}$), apresenta $FWHM_{ref} \sim 0''.49$. O

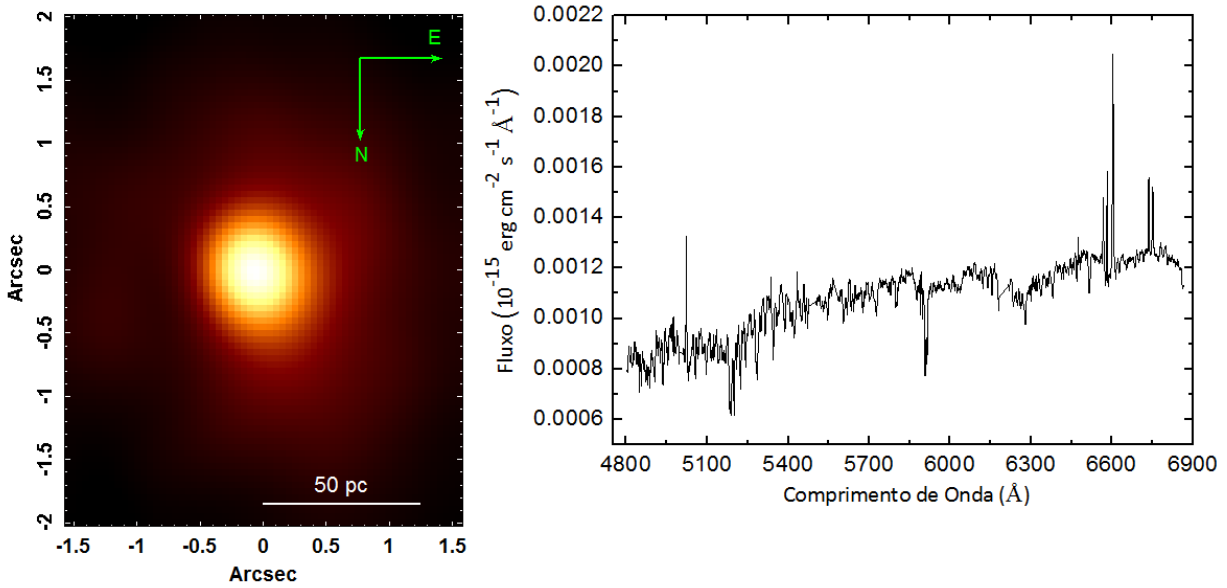


Figura 4.1: Imagem do cubo colapsado e espectro médio de NGC 6744, contendo a escala de 50 pc e a orientação NE.

valor de x (ver equação 2.1) encontrado, utilizando o cubo da estrela padrão, foi $x = -0.33$. Esses valores foram tomados para determinar a lei de variação da PSF no processo de deconvolução (ver seção 2.3.5 do capítulo 2).

A estrela padrão utilizada para calibração em fluxo foi LTT3218. Ela foi observada em 29 de julho de 2014 com tempo de exposição de 300 segundos, com os mesmos parâmetros observacionais das imagens de ciência.

A redução e o tratamento dos dados foram realizados de acordo com os processos descritos nas seções 2.2 e 2.3 do capítulo 2.

Após o tratamento dos dados descrito no capítulo 2, obteve-se o cubo deconvoluído. A partir dele, foi feita uma imagem da soma de todas as imagens do cubo e foi também obtido seu espectro médio, mostrados na Fig. 4.1. Esta figura também mostra a escala em parsec, levando-se em conta a distância de 8.4 Mpc, e a orientação NE, de acordo com o *position angle* da observação. A imagem do cubo colapsado revela uma fonte de emissão central, correspondente ao núcleo da galáxia, e o espectro médio apresenta linhas de [OIII] λ 5007, [NII] $\lambda\lambda$ 6548, 6584, H α e de [SII] $\lambda\lambda$ 6716, 6731. É difícil indentificar as linhas H β e [OI] λ 6300. Além disso, são evidentes as linhas de absorção de NaI $\lambda\lambda$ 5890, 5896.

4.3 Tomografia PCA do cubo deconvolvido

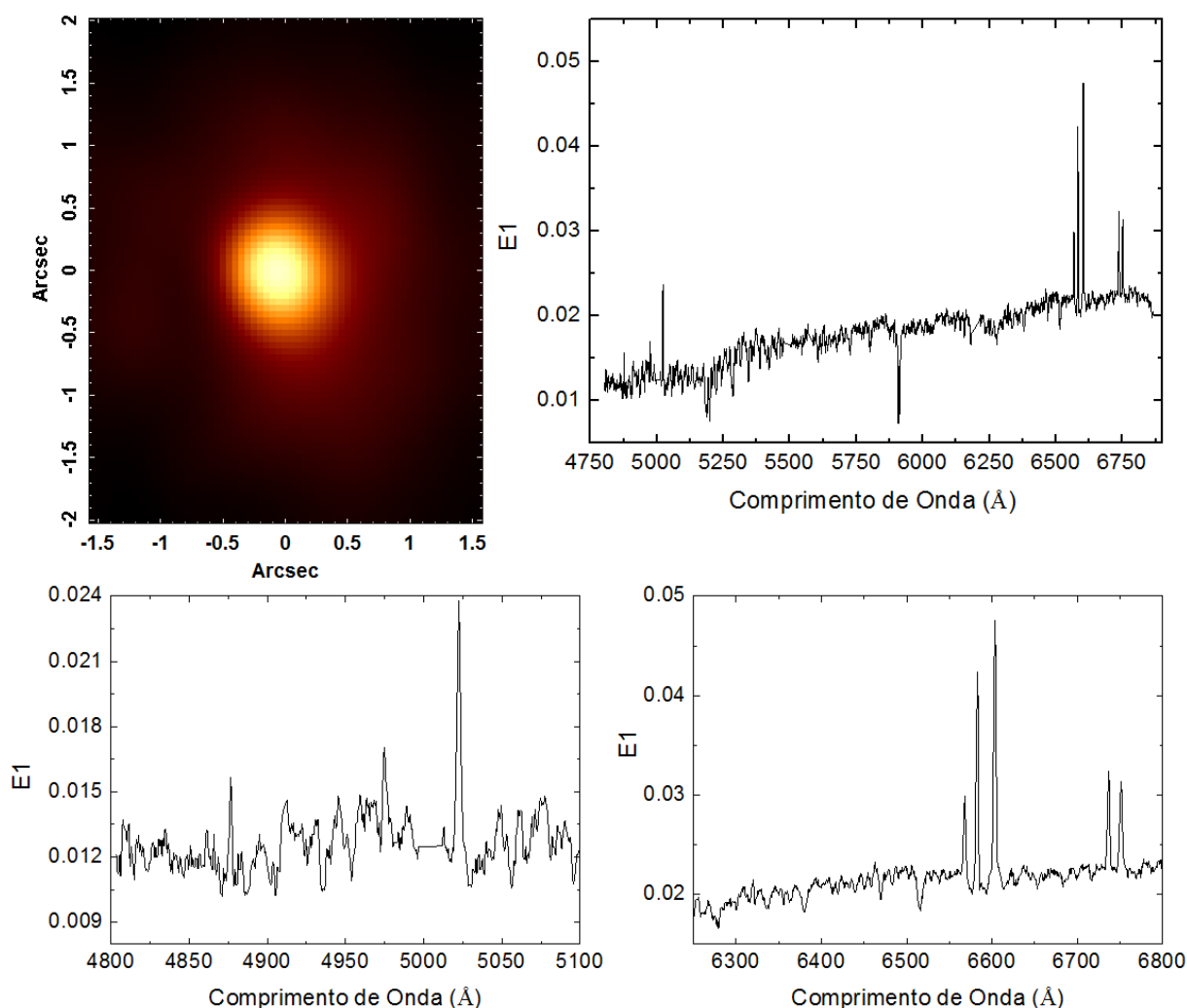


Figura 4.2: Tomograma e auto-espectro 1 da Tomografia PCA do cubo deconvolvido de NGC 6744, com *zoom* nas regiões azul e vermelha do auto-espectro.

Após o tratamento dos dados, foi aplicada a Tomografia PCA ao cubo deconvolvido. A Fig. 4.2 mostra o primeiro conjunto tomograma/auto-espectro, que revela fenômenos que explicam a maior parte da variância do cubo de dados (ver tabela 4.1 para este e demais autovetores). No auto-espectro E1 observam-se estruturas compatíveis com as linhas de emissão $H\beta$, $H\alpha$, $[OIII]\lambda\lambda 4959, 5007$, $[NII]\lambda\lambda 6548, 6584$ e $[SII]\lambda\lambda 6716, 6731$ e com as linhas de absorção de $NaI\lambda\lambda 5890, 5896$. Essas linhas de emissão são provenientes, sobretudo, da região central do tomograma 1 (região clara, que está correlacionada com o auto-espectro). Esse conjunto sugere a existência de um LINER central, que será discutido adiante.

O auto-espectro E2 (Fig. 4.3) possui correlações com as asas azuis e anti-correlações

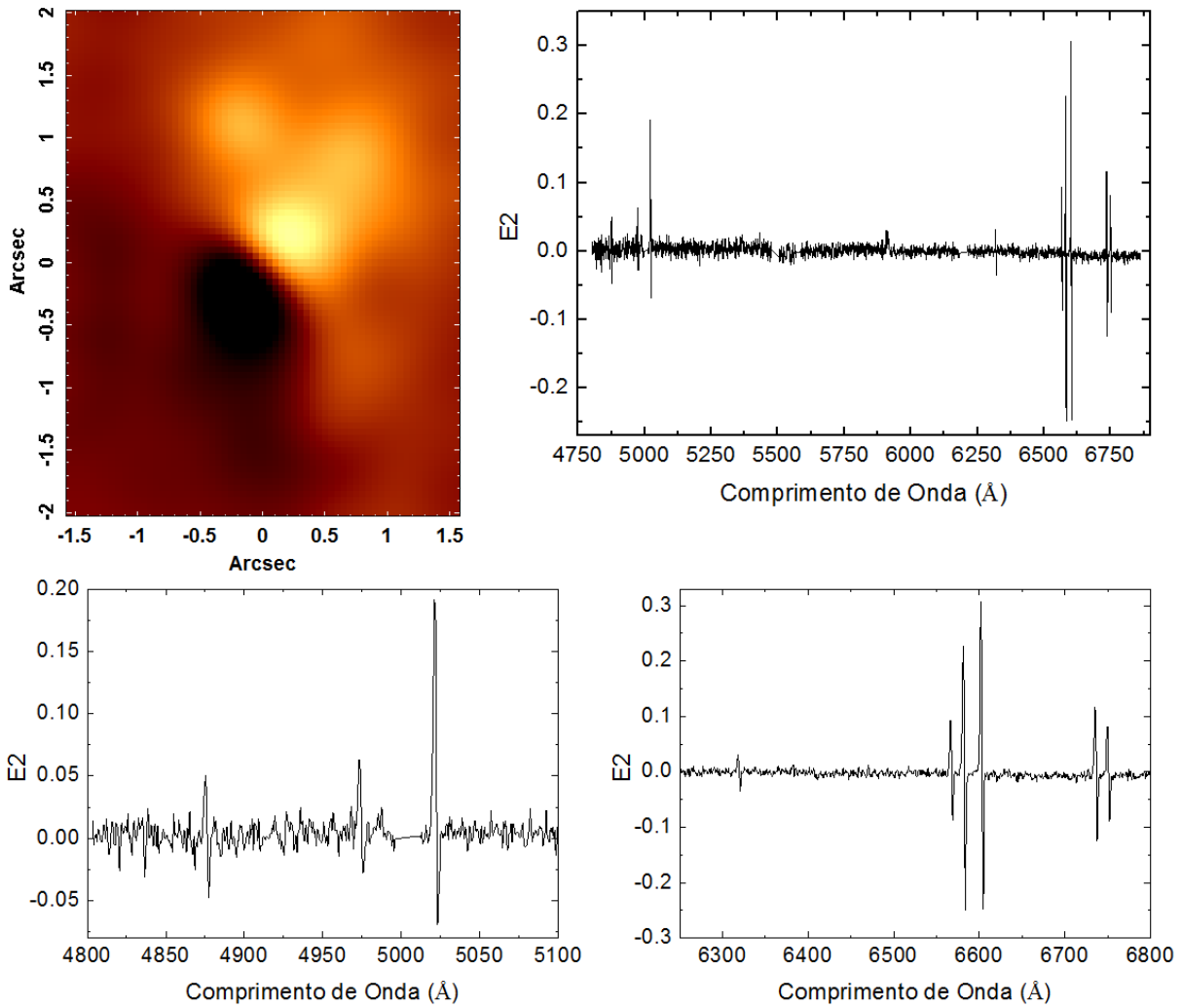


Figura 4.3: Tomograma e auto-espectro 2 da Tomografia PCA do cubo deconvoluído de NGC 6744, com ampliações nas regiões azul e vermelha do auto-espectro.

com as asas vermelhas de todas as principais linhas de emissão dessa faixa espectral. O tomograma 2 possui duas regiões: a região clara, representando as correlações com as asas azuis das linhas de emissão, ou seja, o gás que está em *blueshift*, e a região escura, representando as anti-correlações com as asas vermelhas, ou seja, o gás que está em *redshift*. Este conjunto está evidenciando a cinemática do gás nuclear de NGC 6744, podendo ser uma rotação em torno da região central.

O auto-espectro E3 (Fig. 4.4), ainda que muito ruidoso, apresenta correlações com as linhas de emissão $[\text{NII}]\lambda\lambda 6548, 6584, \text{H}\alpha, [\text{OIII}]\lambda 5007$ e uma anti-correlação com a linha de $\text{H}\beta$. As linhas aparentam ser mais largas do que no auto-espectro E1. O tomograma apresenta duas regiões emissoras distintas, que serão discutidas a seguir.

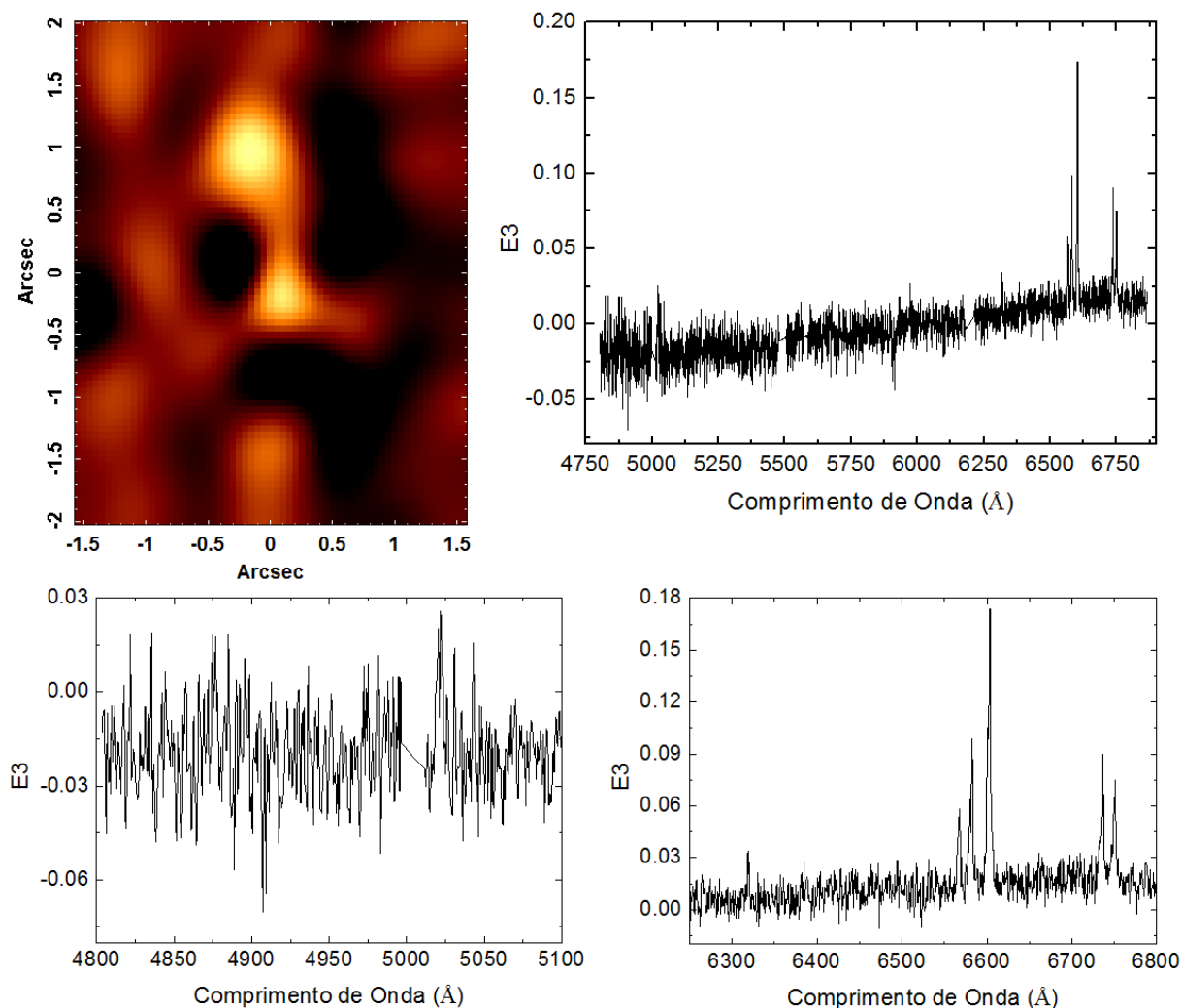


Figura 4.4: Tomograma e auto-espectro 3 da Tomografia PCA do cubo deconvoluído de NGC 6744, com ampliações nas regiões azul e vermelha do auto-espectro.

No diagrama de *Scree* (Fig. 4.5) é possível ver que, a partir do autovetor E5, a taxa de decaimento da fração de variância explicada por cada autovetor é constante. Isso significa que o ruído se torna dominante a partir deste autovetor e não há mais informação relevante a ser interpretada. Porém, como foi visto anteriormente, o autovetor E3 apresenta uma grande quantidade de ruído e o autovetor E4 já não possui informação interpretável, tendo sido descartado da análise aqui apresentada.

4.4 Resultados da síntese espectral

A síntese espectral aplicada com *software* STARLIGHT (ver seção 2.4.2) ao cubo de dados de NGC 6744 revelou apenas a presença de populações com metalicidades média

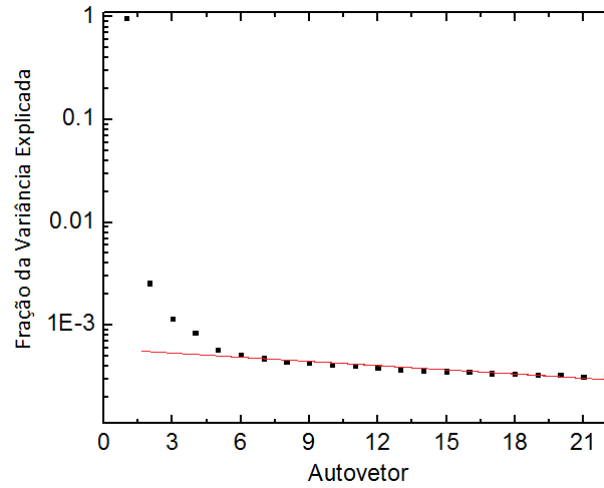


Figura 4.5: Diagrama de *Scree* da Tomografia PCA aplicada ao cubo após a deconvolução.

Tabela 4.1 - Autovalores da Tomografia PCA aplicada ao cubo deconvoluído de NGC 6744 com os 15 primeiros autovetores.

Autovetores	Fração da Variância Explicada (%)
E1	97.6447
E2	0.2560
E3	0.1160
E4	0.0847
E5	0.0578
E6	0.0515
E7	0.0476
E8	0.0443
E9	0.0432
E10	0.0415
E11	0.0401
E12	0.0387
E13	0.0372
E14	0.0364
E15	0.0356

(0.004 e 0.008) e alta (0.02 e 0.05), com idades variadas (10^6 anos com menos de 10% da fração de fluxo, 10^9 anos com quase 30% da fração de fluxo e 10^{10} anos com a maior parte da fração de fluxo: $\sim 15\%$ para metalicidade média e $\sim 50\%$ para alta metalicidade). Além disso, não há emissão significativa de *featureless continuum* nessa galáxia, como mostra o

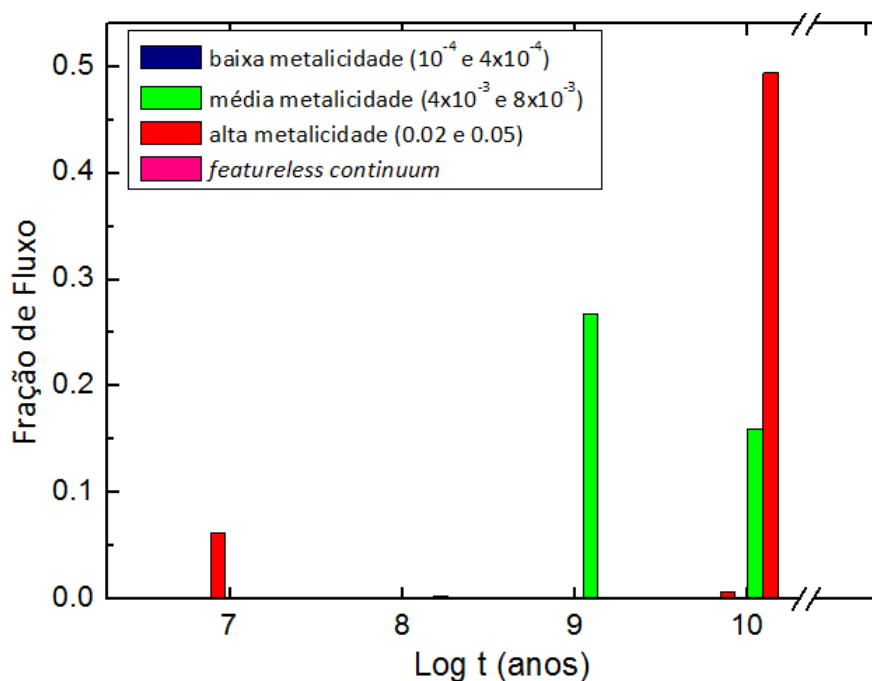


Figura 4.6: Histograma contendo as frações de fluxo das populações estelares e do *featureless continuum* obtidas com a síntese espectral levando-se em conta todo o FOV. Nota-se apenas a presença de populações de média (4×10^{-3} e 8×10^{-3}) e alta metalicidade (0.02 e 0.05), com as idades de 10^6 , 10^9 e 10^{10} anos.

histograma na Fig. 4.6.

Os mapas de fluxo da Fig. 4.7 revelam a distribuição das populações estelares apresentadas no histograma. A Fig. 4.7A mostra as populações estelares com idade de 10^6 anos, que possuem, predominantemente, alta metalicidade (0.02 e 0.05). A distribuição é concentrada no centro do FOV, principalmente. A Fig. 4.7B mostra a população com 10^9 anos, na qual predominam estrelas com metalicidade média (0.004 e 0.008), que estão espalhadas em todo FOV. Na Fig. 4.7C tem-se populações estelares com idade de 10^{10} anos. Pode-se notar uma concentração de populações com essa idade e com alta metalicidade no centro do FOV. Por outro lado, as populações com essa idade e com média metalicidade estão localizadas em áreas mais afastadas do centro.

No mapa de extinção obtido com a síntese espectral (Fig. 4.8A) é possível notar que a poeira está concentrada numa faixa localizada em $-0''.5 \lesssim x \lesssim 0''.5$ e $-1'' \lesssim y \lesssim 0''$ (sendo x e y os eixos da abcissa e da ordenada da imagem, respectivamente).

O mapa do χ^2 mostra que não houve uma região privilegiada do FOV cujos ajustes do STARLIGHT ficaram melhores (Fig. 4.8B). Além disso, no geral, os espectros foram bem ajustados, já que os valores de χ^2 resultantes variaram entre 0.7 e 2.1.

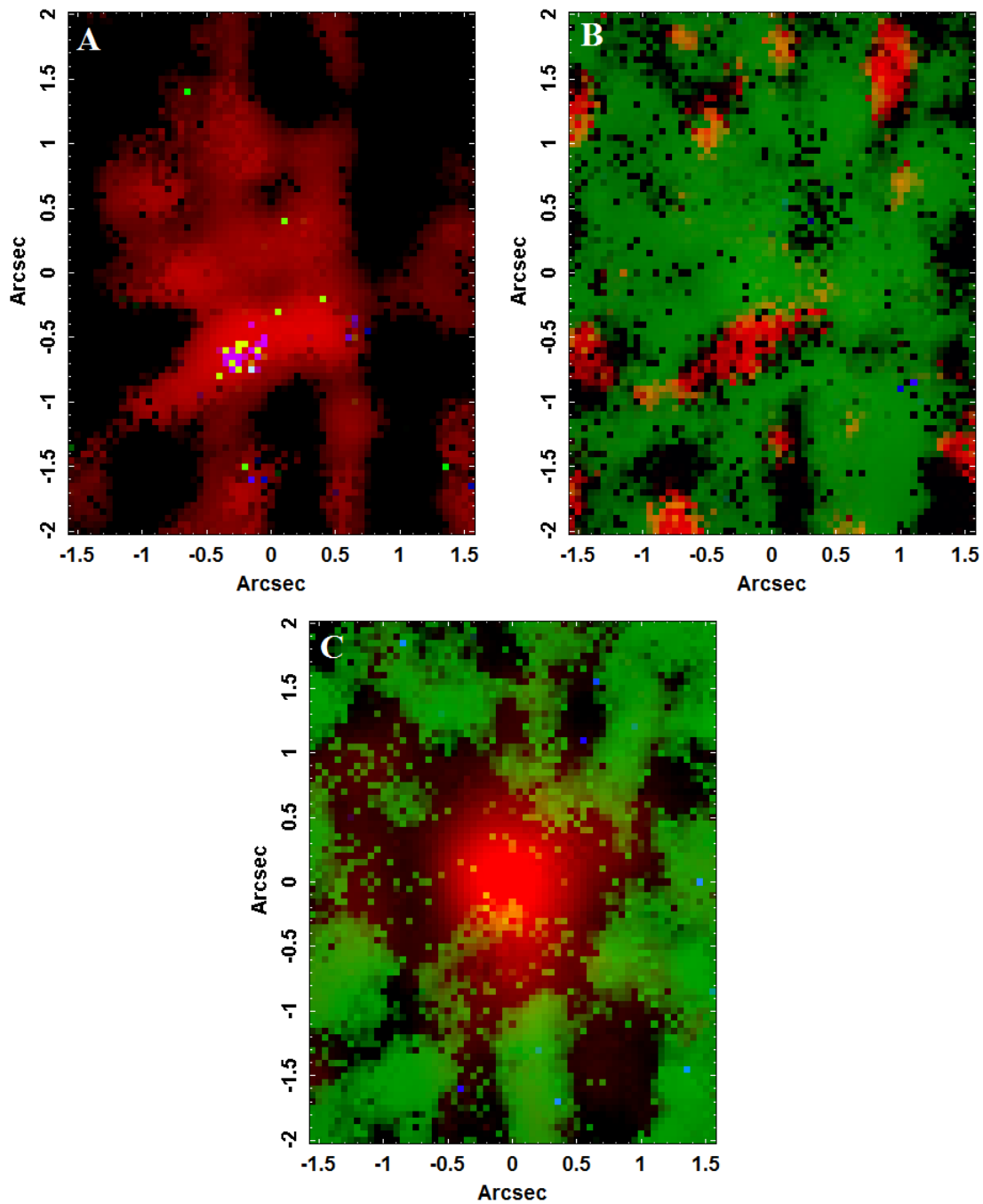


Figura 4.7: Mapas de fluxo das populações estelares obtidas com a síntese espectral do cubo de dados de NGC 6744. A cor vermelha representa metalicidade alta (0.02 e 0.05) e a cor verde metalicidade média (4×10^{-3} e 8×10^{-3}). A Fig. A é o mapa de fluxo das populações com idade de 10^6 anos, a Fig. B, 10^9 anos e a Fig. C, 10^{10} anos.

O mapa da razão S/N mostra que existe uma região, aproximadamente no centro do FOV, que possui maior razão S/N com relação ao resto do campo (Fig. 4.8C), de acordo com o esperado. Essa região é compatível com aquela encontrada na imagem do cubo

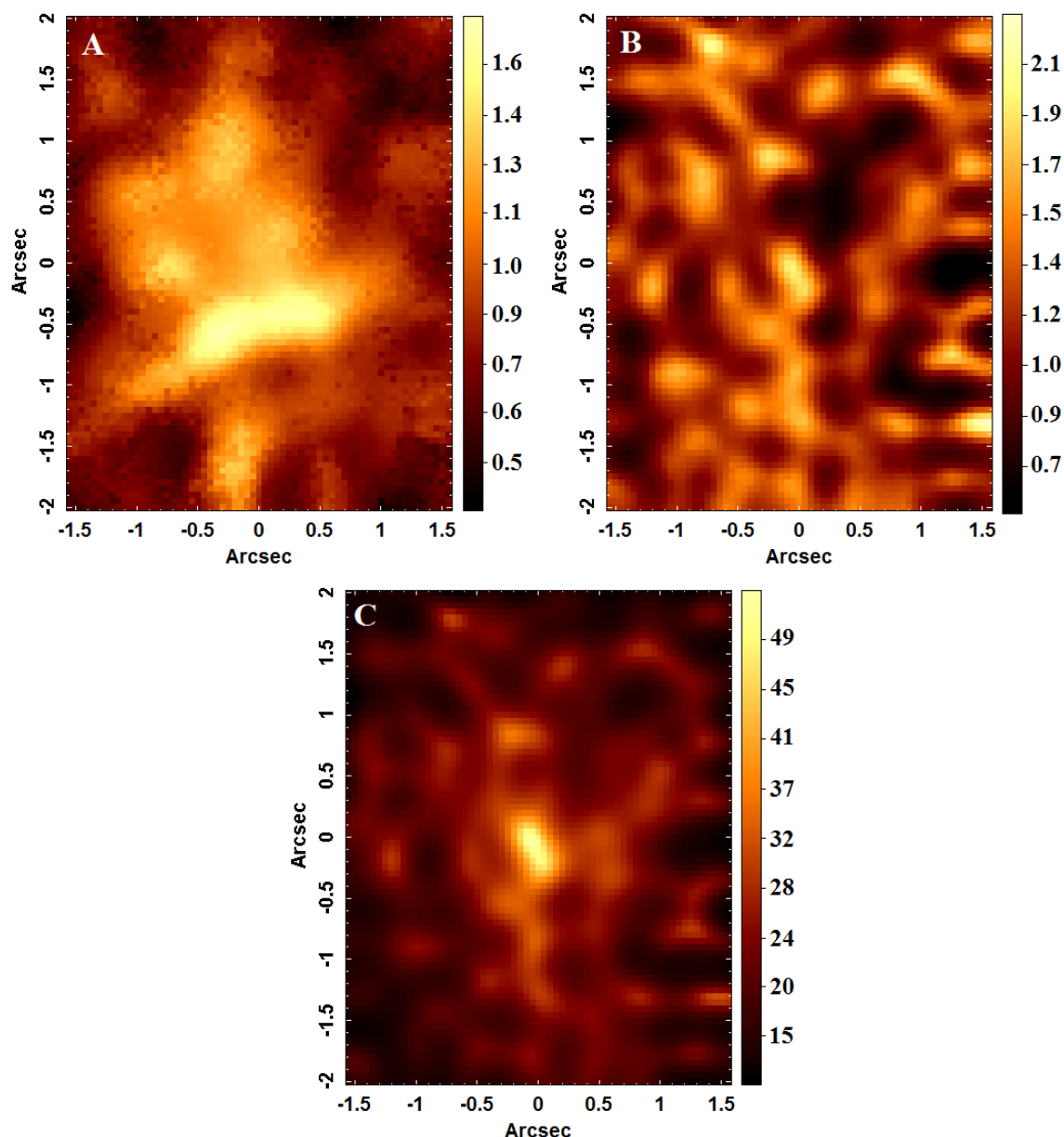


Figura 4.8: Mapas obtidos através dos resultados da síntese espectral. A Fig.A mostra o mapa de extinção (A_V) obtido para NGC 6744. A Fig.B é o mapa de χ^2 dos ajustes. A Fig.C é o mapa da razão S/N.

colapsado e, conseqüentemente, na imagem do tomograma 1 da Tomografia PCA do cubo deconvoluido (Figs. 4.1 e 4.2).

Os valores de A_V do cubo de dados de NGC 6744, fornecidos pelo *software* STARLIGHT, apresentam uma incerteza de 0.017 mag. Por outro lado, a idade média das populações estelares (obtida a partir de uma média ponderada com base nas frações de fluxo correspondentes a tais populações) possui uma incerteza de 0.03 dex. Tais incertezas foram obtidas a partir de uma simulação de Monte Carlo (ver seção 2.4.2 do capítulo 2 para

maiores detalhes).

4.4.1 Sínteses espectrais do centro e das regiões periféricas

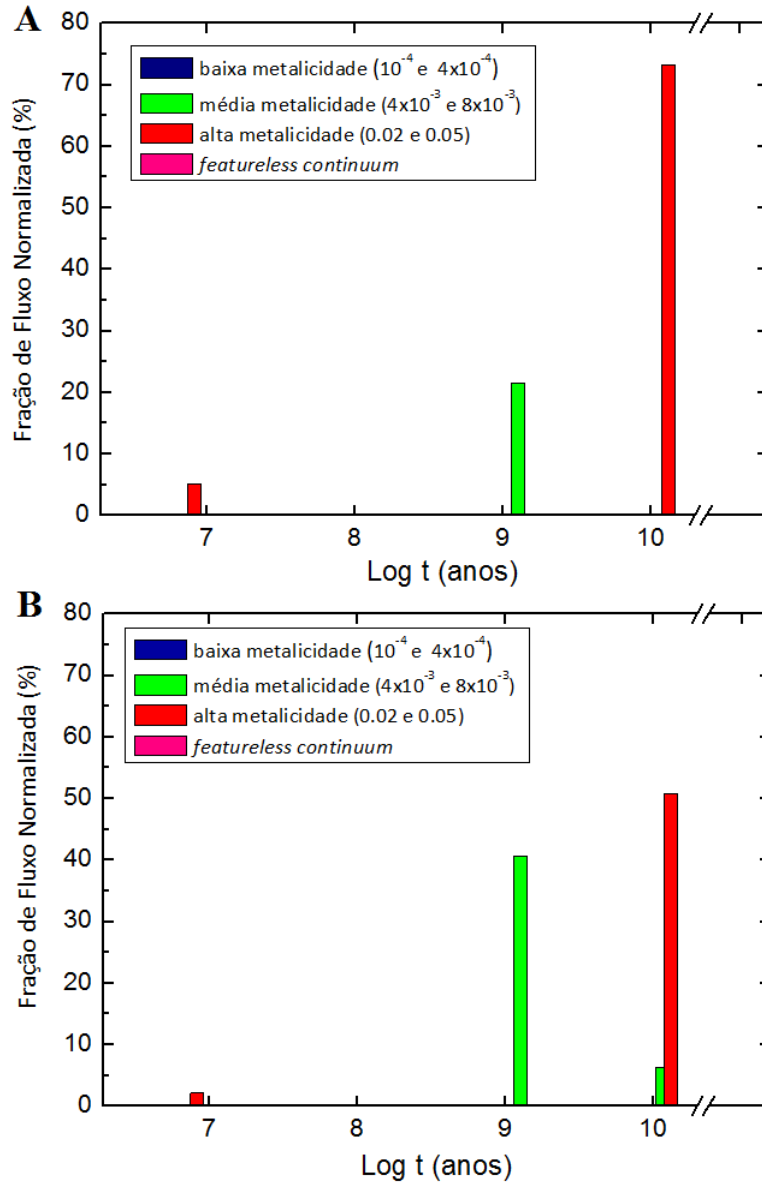


Figura 4.9: Resultados da síntese espectral do centro (A) e da região periférica (B) do cubo de dados de NGC 6744. A cor vermelha representa metalicidade alta (0.02 e 0.05) e a cor verde metalicidade média (4×10^{-3} e 8×10^{-3}).

Os resultados da síntese espectral do cubo total de NGC 6744 apresentaram populações estelares com 10^9 anos, que representam $\sim 30\%$ da fração de fluxo total. Essa população pode ser outra evidência de que houve um *merger* nesta galáxia (há cerca de um bilhão de anos), que resultou nessa população estelar. Uma forma de averiguar essa hipótese é fazer

duas sínteses espectrais: uma na região central e outra em todo o campo sem o espectro da região central e comparar os resultados. Quando há um *merger*, as estrelas tendem a se formar nas regiões periféricas ao centro. Se houve *merger*, então haverá uma maior fração de fluxo devida a estrelas de 1 bilhão de anos nas regiões periféricas do que no centro.

Realizou-se, então, uma síntese espectral do cubo sem o espectro correspondente à região central e uma síntese espectral do espectro extraído da região central (ver Figs.4.9 A e B). As incertezas da idade média das populações dessas sínteses são as mesmas da síntese do cubo total: 0.03 dex.

O histograma da síntese aplicada no espectro da região central (Fig. 4.9A) mostra que a maior fração do fluxo é devida a populações com idade de 10^{10} anos e apenas 20% do fluxo é devido a populações com 10^9 anos. Já a síntese espectral das regiões circumnucleares (Fig. 4.9B) revela que a fração de fluxo é, aproximadamente, o dobro para populações com 10^9 anos e as populações mais velhas estão associadas a uma fração de fluxo bem menor, quase igual à das populações com 10^9 anos. Esse resultado sustenta a hipótese de que houve um *merger* nessa galáxia há 10^9 anos. Tal evento resultou em populações estelares de metalicidade intermediária no núcleo e principalmente nas regiões circumnucleares, como geralmente acontece nesse cenário.

4.5 Cinemática estelar

Para se determinar a cinemática estelar no cubo de dados de NGC 6744, foi aplicado o método pPXF, que está descrito na seção 2.4.4. Esse método retorna os mapas de velocidades e dispersão de velocidades estelar e dos coeficientes h_3 e h_4 .

A Fig. 4.10A mostra o mapa de velocidades obtido com o pPXF. Nela é possível notar que existe uma bipolaridade de velocidades, com um eixo cinemático que não está claramente definido (podendo ou não ser o mesmo do tomograma 2 da Tomografia PCA do cubo após a deconvolução - ver Fig. 4.3). Na parte superior, as velocidades são, predominantemente, negativas e, na parte inferior do mapa, as velocidades são positivas. Isso implica na existência de um disco estelar em rotação no qual as estrelas, na parte superior do mapa, estão em *blueshift* e, na parte inferior, em *redshift*.

No mapa de dispersão (Fig. 4.10B) nota-se que há um decréscimo da dispersão de velocidades em direção ao centro. Ou seja, bem como em NGC 1566, esta galáxia também

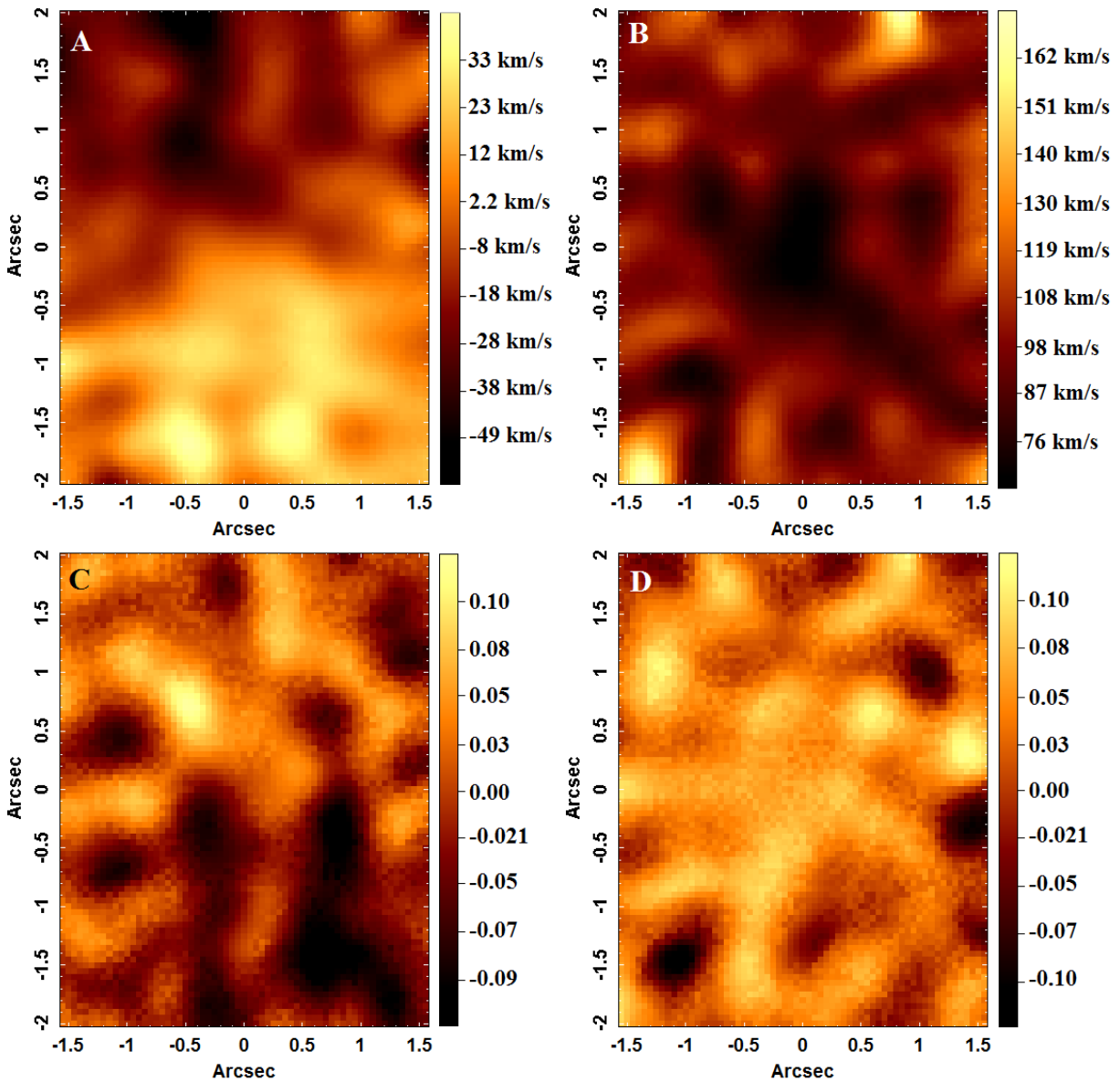


Figura 4.10: Mapas dos parâmetros obtidos com o pPXF. A Fig.A é o mapa da velocidade radial estelar, a Fig.B é o mapa de dispersão de velocidades estelar e as Figs. C e D são os mapas dos coeficientes de Gauss-Hermite h_3 e h_4 , respectivamente.

apresenta um σ -drop. Isso pode ser explicado pela presença de estrelas jovens e massivas na região mais central do FOV.

O mapa de h_3 (Fig. 4.10C) apresenta uma anti-correlação com o mapa de velocidades, ou seja, os valores positivos de h_3 estão onde os valores negativos do mapa de velocidade estão e vice-versa. Isso está de acordo com o esperado para um disco estelar em rotação sobreposto a um fundo de estrelas com velocidades próximas a zero. Já o mapa de h_4 (Fig. 4.10D) não revela nenhuma estrutura aparente.

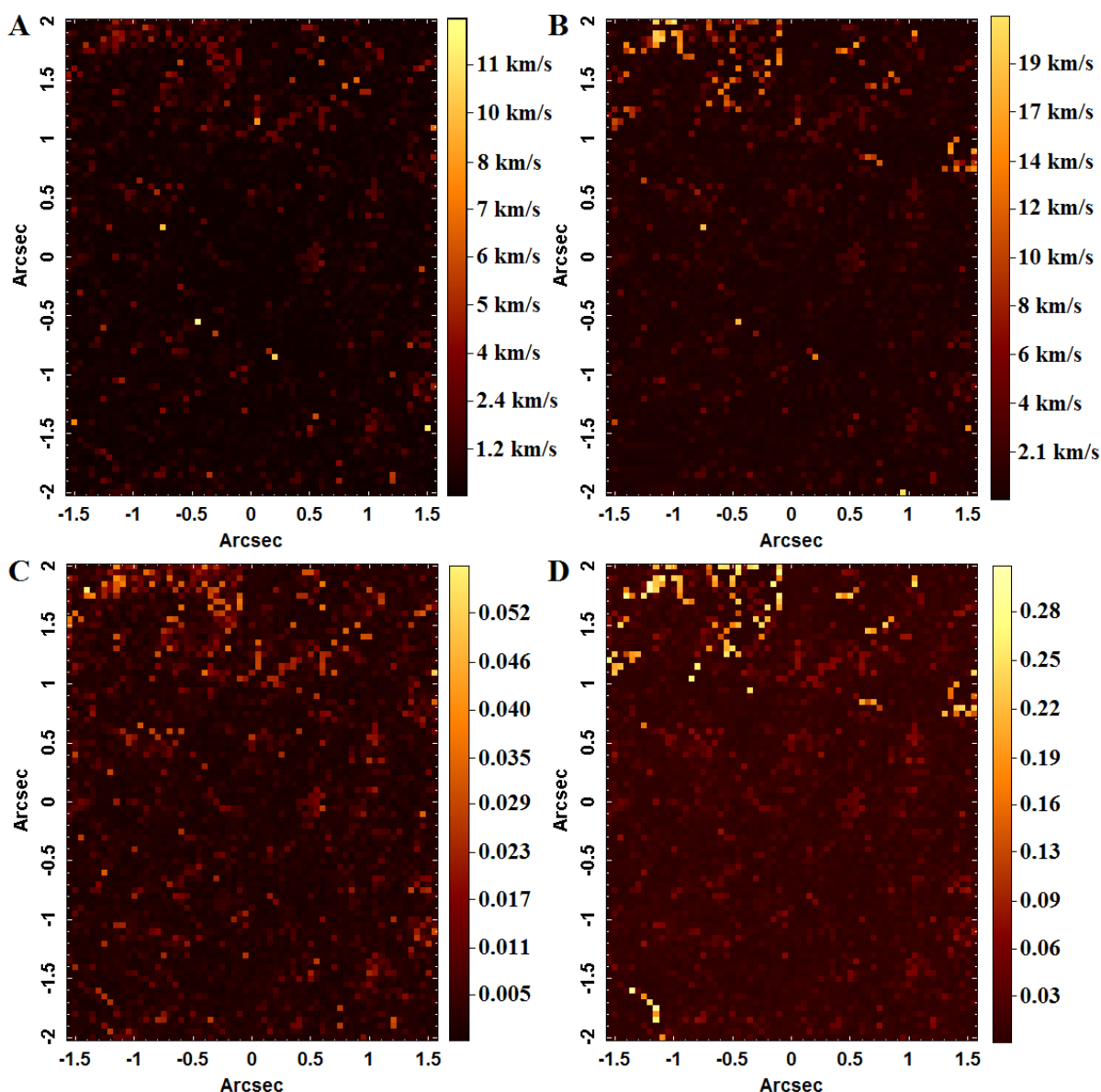


Figura 4.11: Mapas de incertezas da (A) velocidade radial estelar, (B) dispersão de velocidades estelar, (C) coeficiente h_3 e (D) coeficiente h_4 .

Os mapas de incertezas da dispersão de velocidades estelar e dos coeficientes de Gauss-Hermite h_3 e h_4 (Figs. 4.11B, C e D) apresentam valores mais elevados na borda superior do que nas demais áreas. Já o mapa de incertezas da velocidade radial estelar (Fig. 4.11A) apresenta uma distribuição mais uniforme. Pode-se notar que os módulos das incertezas de h_4 são mais elevados do que os módulos dos próprios valores de h_4 , indicando que o mapa desse parâmetro (Fig. 4.11D) não é confiável.

O perfil radial de dispersão de velocidades estelar (Fig. 4.12) foi obtido através do mapa de dispersão de velocidades estelar (Fig. 4.10B). Como no caso de NGC 1566, foram

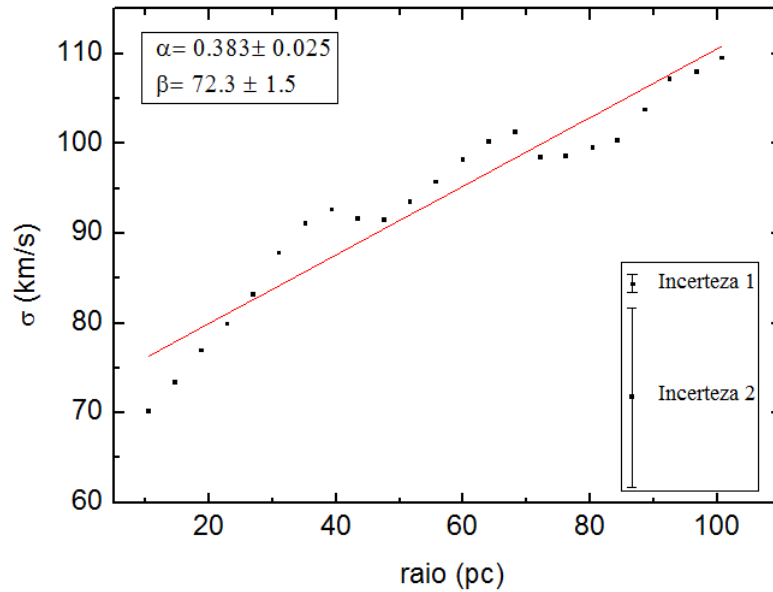


Figura 4.12: Perfil radial da dispersão de velocidades estelar obtido com o processo pPXF. Os pontos podem ser aproximados por uma reta com coeficientes angular α e linear β indicados na figura. A Incerteza 1 representa o valor médio das incertezas calculadas a partir das medianas dos valores, em anéis concêntricos, no mapa de incertezas da dispersão (ver Fig. 4.11B) e a Incerteza 2 representa o valor médio das incertezas obtidas através dos desvios padrão dos valores da dispersão em anéis concêntricos.

calculadas medianas dos valores encontrados no mapa e as incertezas foram calculadas de duas formas diferentes: a Incerteza 1, que é o valor médio das incertezas calculadas a partir das medianas dos valores, em anéis concêntricos, no mapa de incertezas da dispersão (ver Fig. 4.11B) e a Incerteza 2, que é o valor médio das incertezas obtidas através dos desvios padrão dos valores da dispersão em anéis concêntricos. Esse perfil mostra que a dispersão de velocidades decai em direção ao centro com uma taxa aproximadamente constante.

4.6 Tomografia PCA do cubo de gás

A Tomografia PCA foi aplicada ao cubo de gás (ver seção 2.4.3 para maiores detalhes), com o objetivo de ver fenômenos relacionados ao gás na região nuclear de NGC 6744. A tabela 4.2 contém as frações de variância explicadas por cada autovetor.

O auto-espectro E1 (Fig. 4.13) da Tomografia PCA do cubo de gás mostra correlações com as principais linhas de emissão: $H\beta$, $[OIII]\lambda\lambda 4959, 5007$, $[OI]\lambda 6300$, $[NII]\lambda\lambda 6548, 6584$, $H\alpha$ e $[SII]\lambda\lambda 6716, 6731$. As áreas claras do tomograma associado correspondem às regiões de correlação com o auto-espectro e, com isso, da onde parte a emissão dessas linhas. As

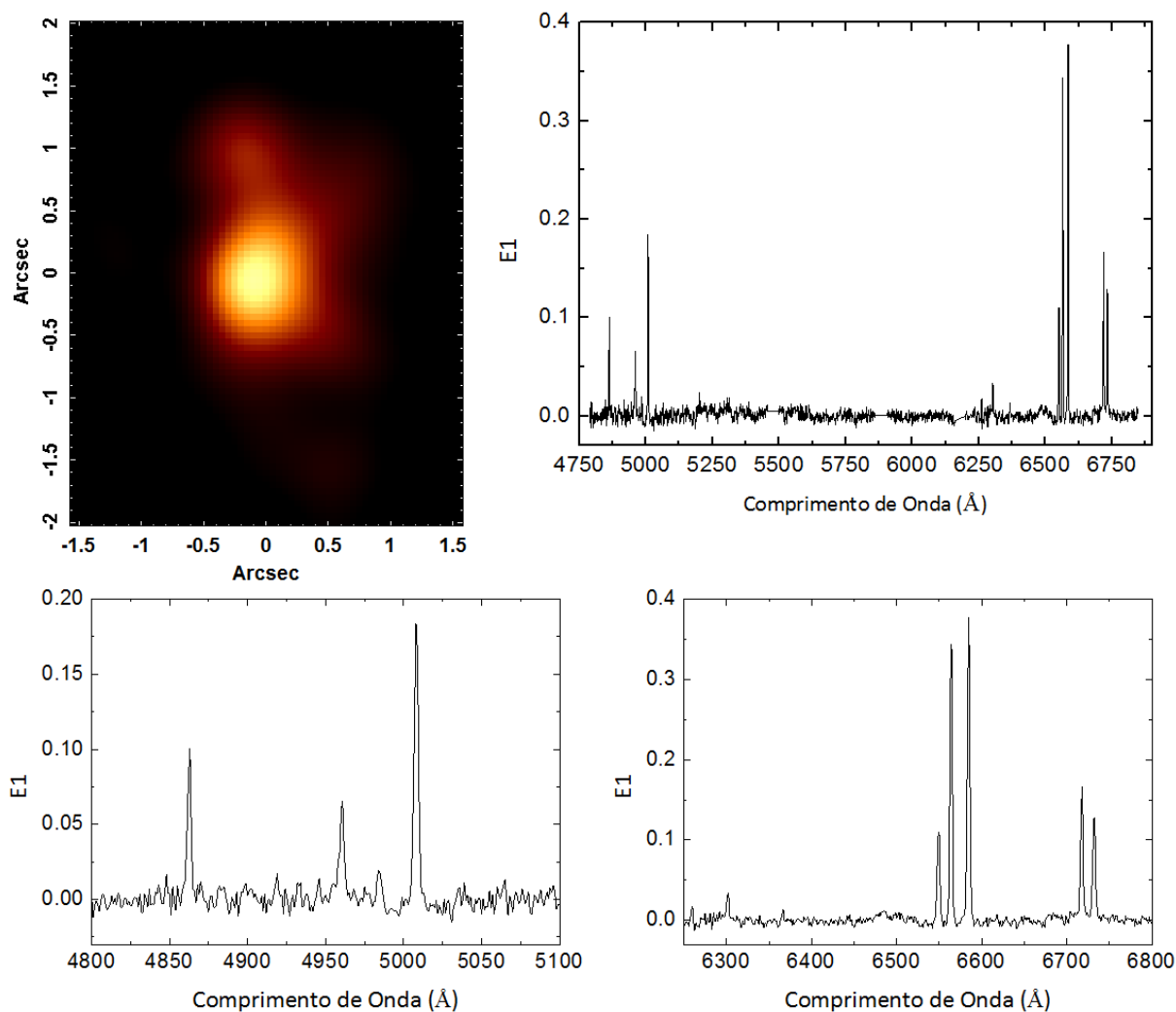


Figura 4.13: Tomograma e auto-espectro 1 da Tomografia PCA do cubo de gás de NGC 6744, com ampliações nas regiões azul e vermelha do auto-espectro.

linhas $H\alpha$ e $H\beta$ não possuem componentes largas e a correlação com a linha $[O I]\lambda 6300$ comprova a existência de um AGN nessa galáxia, pois essa linha é típica de regiões de ionização parcial, que só pode ser gerada por AGNs.

O auto-espectro E2 (Fig. 4.14) é idêntico ao auto-espectro E2 da Tomografia PCA anterior, estando correlacionado com as asas azuis das principais linhas de emissão e anti-correlacionado com as asas vermelhas dessas linhas. Ou seja, este auto-espectro e seu tomograma estão relacionados à cinemática do gás. A região clara do tomograma está correlacionada com o auto-espectro, portanto está em *blueshift*, e a região escura, em *redshift*.

No diagrama de *Scree* da Tomografia PCA aplicada ao cubo de gás (Fig. 4.15) é possível

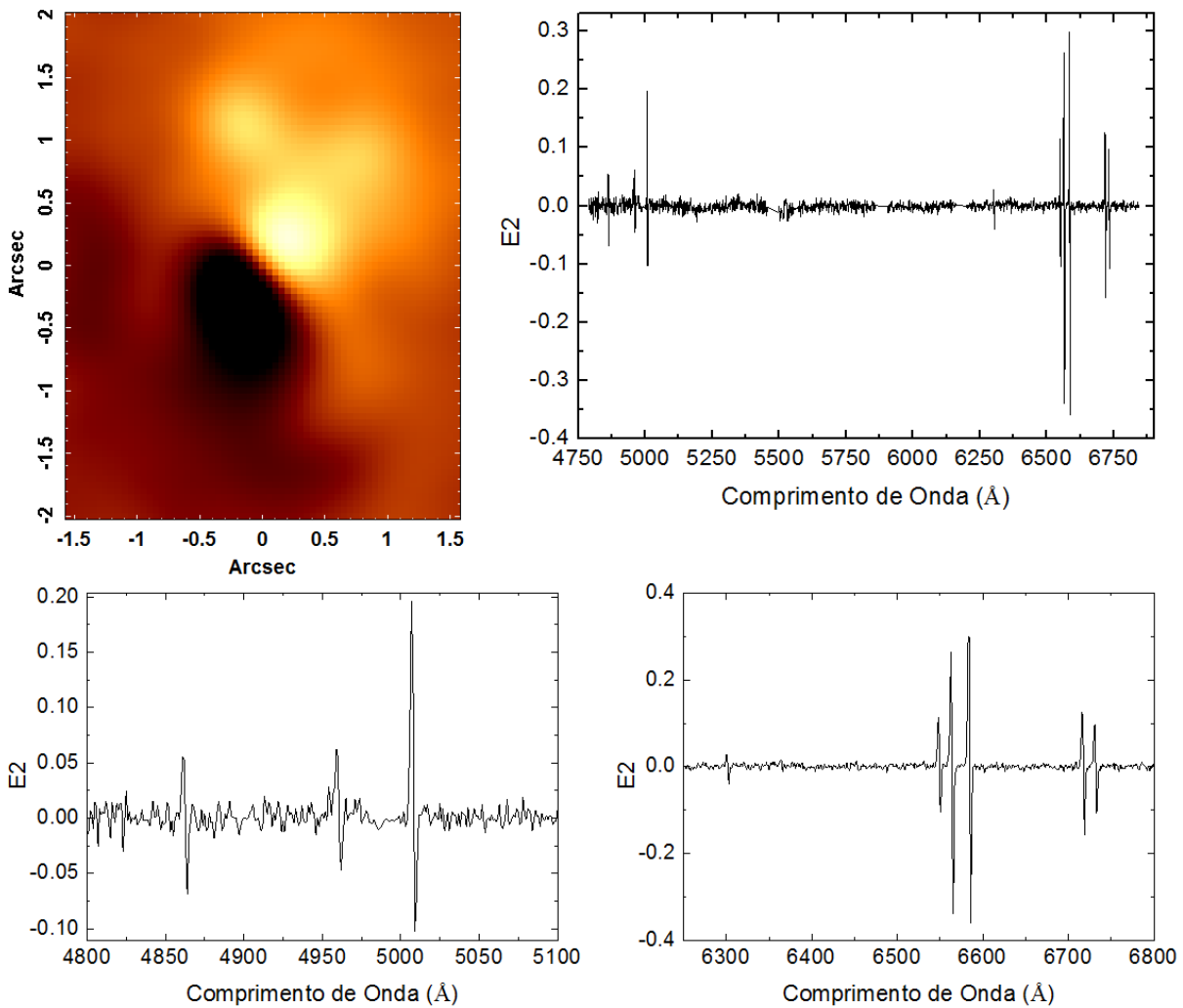


Figura 4.14: Tomograma e autovetor 2 da Tomografia PCA do cubo de gás, com *zoom* nas regiões azul e vermelha do auto-espectro.

notar que, a partir do autovetor E3, a fração de variância cai a uma taxa aproximadamente constante. Isso implica na dominância do ruído nos autovetores. De fato, já no autovetor E3, não há informação que possa ser interpretada claramente e a quantidade de ruído é considerável.

4.7 RGBs e imagens de linhas de NGC 6744

Para entender melhor a distribuição de estruturas emissoras de linhas na região nuclear de NGC 6744, fez-se uma série de imagens de linhas e composições RGBs. Esta última ferramenta foi também utilizada para observar com mais clareza a cinemática do gás.

A Fig. 4.16 mostra imagens de quatro das principais linhas de emissão de NGC 6744.

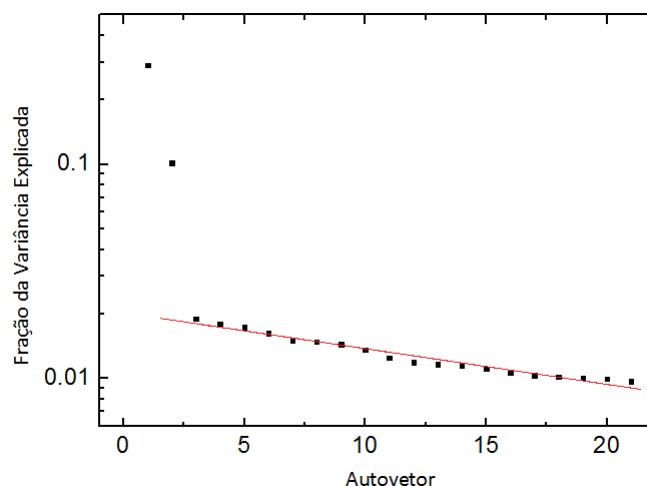


Figura 4.15: Diagrama de *Scree* contendo os 21 primeiros autovetores da Tomografia PCA aplicada ao cubo de gás de NGC 6744.

Tabela 4.2 - Tabela de autovalores da Tomografia PCA do cubo de gás de NGC 6744

Autovetores	Fração da Variância Explicada (%)
1	29.13
2	10.18
3	1.91
4	1.80
5	1.74
6	1.63
7	1.50
8	1.48
9	1.45
10	1.36
11	1.25
12	1.19
13	1.16
14	1.15
15	1.11

A Fig. 4.16A é a imagem da linha de $[OIII]\lambda 5007$, que apresenta uma certa diferença com relação às imagens das outras linhas (Figs. 4.16B, C e D). Ela revela uma emissão da região central (Região 1 - Fig.4.17) com uma forma mais alongada, sugerindo um possível cone de ionização (já que se trata de uma imagem de uma linha de alta ionização). Além

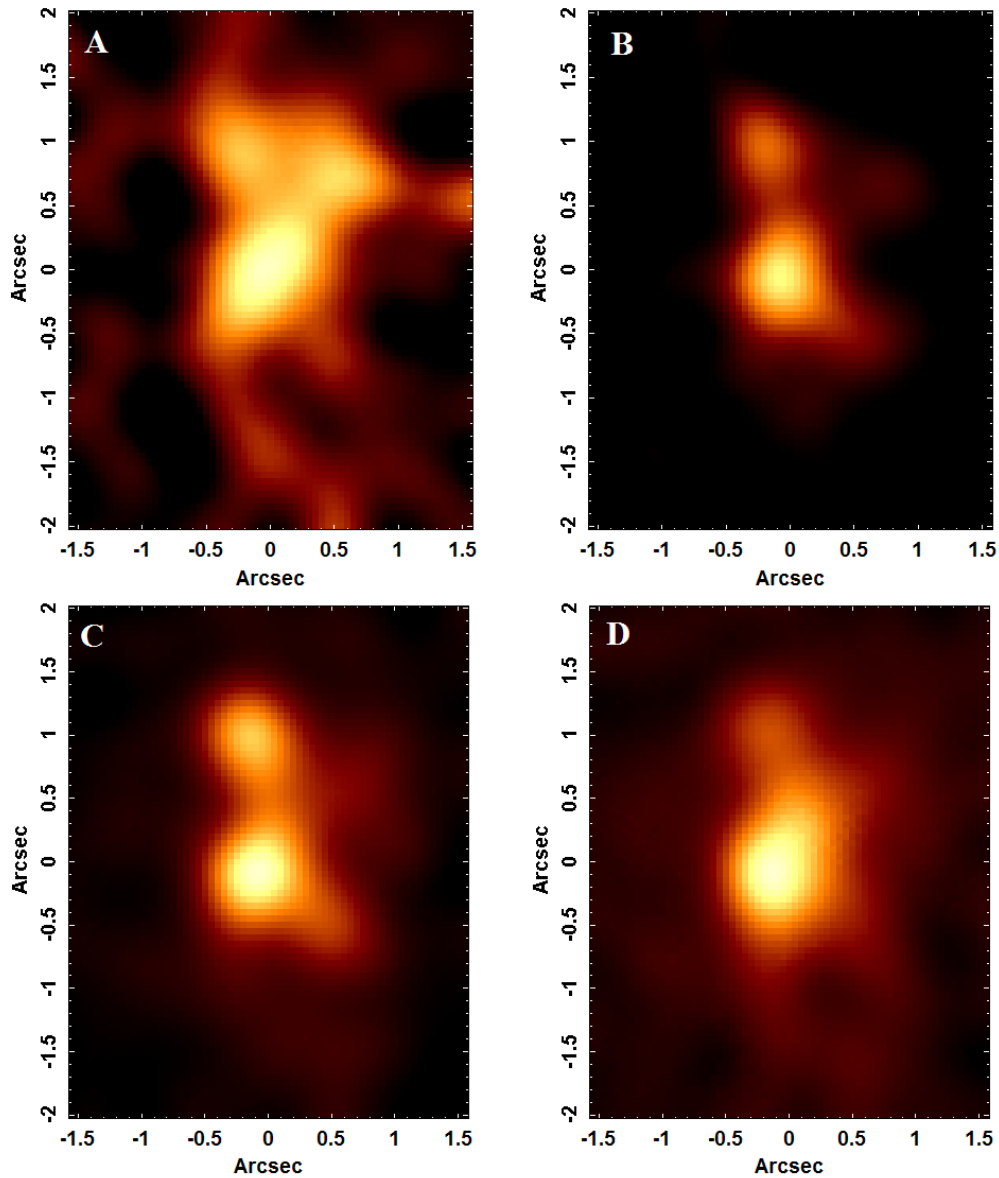


Figura 4.16: Imagens de algumas linhas do cubo de gás de NGC 6744. Fig.A: $[\text{OIII}]\lambda 5007$, Fig.B: $[\text{SII}]\lambda 6716$, Fig.C: $[\text{NII}]\lambda 6584$ e Fig.D: $\text{H}\alpha$.

disso, 2 outras regiões (Regiões 2 e 3, ver Fig.4.17) também são visíveis na imagem de $[\text{OIII}]\lambda 5007$, sendo que uma delas (Região 3) não aparece claramente nas demais imagens (Figs. 4.16B, C e D).

A Fig. 4.16B é a imagem da linha $[\text{SII}]\lambda 6716$ e mostra apenas 2 regiões claramente (como a Fig. 4.16C de $[\text{NII}]\lambda 6584$, com maior intensidade): a Região 1, agora mais compacta, e a Região 2. A Fig. 4.16D é a imagem da linha $\text{H}\alpha$ e mostra a Região 1, consideravelmente intensa, e a Região 2, bem mais difusa.

A tabela 4.3 mostra as posições dos centróides de cada região, sendo que a posição

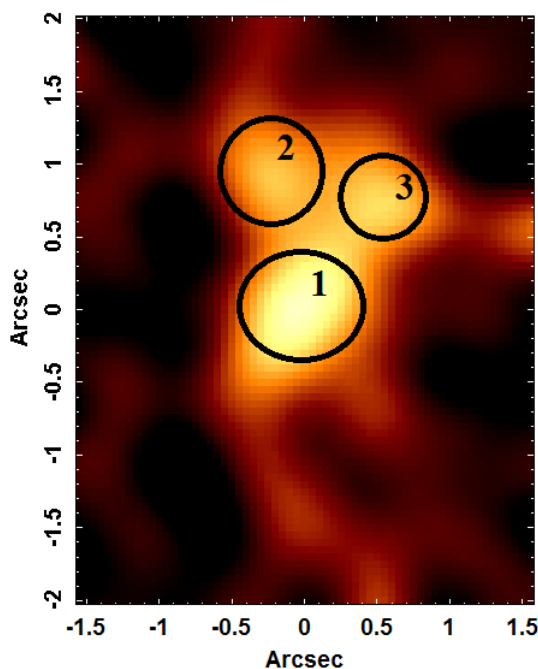


Figura 4.17: Imagem da linha de $[\text{OIII}]\lambda 5007$ do cubo de gás com a indicação das 3 principais regiões emissoras na região nuclear de NGC 6744. A região 1 está centrada em $(0'';0'')$, a região 2 em $\sim(-0''2;1'')$ e a região 3 em $\sim(0''5;0''7)$.

Tabela 4.3 - Tabela com as distâncias projetadas (D) em parsecs das Regiões 2 e 3 em relação à Região 1 (centro da galáxia- ver Figs. 4.17 e 4.18). X_C e Y_C são as coordenadas em segundos de arco e o parâmetro Incerteza* é a incerteza de D considerando a incerteza da distância da galáxia (desvio padrão das distâncias obtido pelo NED), além das incertezas instrumentais (Incerteza).

	X_C (")	Y_C (")	D (pc)	Incerteza (pc)	Incerteza* (pc)
Região 2	-0.2	1	47.6	1.5	9
Região 3	0.5	0.7	45.2	1.5	9

central da Região 1 é $(0'';0'')$. Também se tem as distâncias projetadas (D), em pc, de cada objeto com relação à Região 1. O parâmetro Incerteza só leva em conta as incertezas instrumentais e o Incerteza* leva em conta, além das incertezas instrumentais, a incerteza da distância da galáxia (obtida do desvio padrão das distâncias do NED).

A Fig. 4.18 mostra uma composição RG da imagem de $[\text{NII}]\lambda 6584$ com a imagem do cubo estelar colapsado, que é o cubo sintético obtido com os ajustes do STARLIGHT, representando, assim, o bojo estelar. Nesta imagem nota-se que a Região 1 está localizada no núcleo do bojo estelar.

As imagens da Fig. 4.19 mostram composições RGB baseadas na cinemática do gás. A cor vermelha representa o gás em *redshift*, pois foi feita com as imagens das asas vermelhas

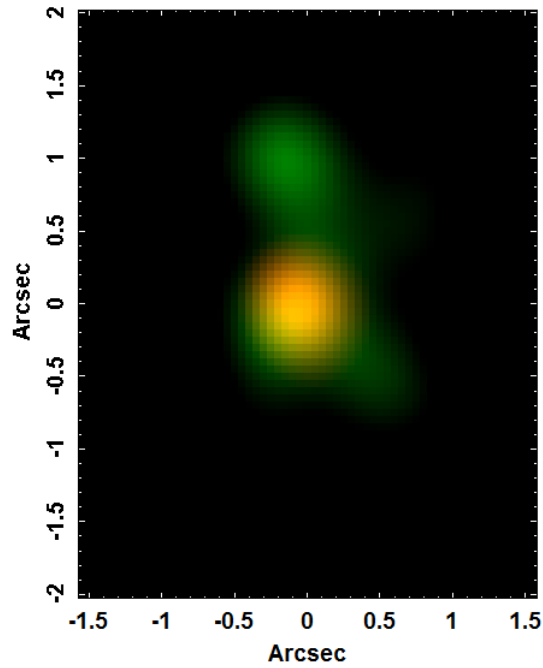


Figura 4.18: Composição RG com a região central do bojo estelar (representada pela imagem colapsada do cubo sintético obtido com os ajustes da síntese espectral) mostrada em vermelho e a imagem da linha de $[\text{NII}]\lambda 6584$ mostrada em verde.

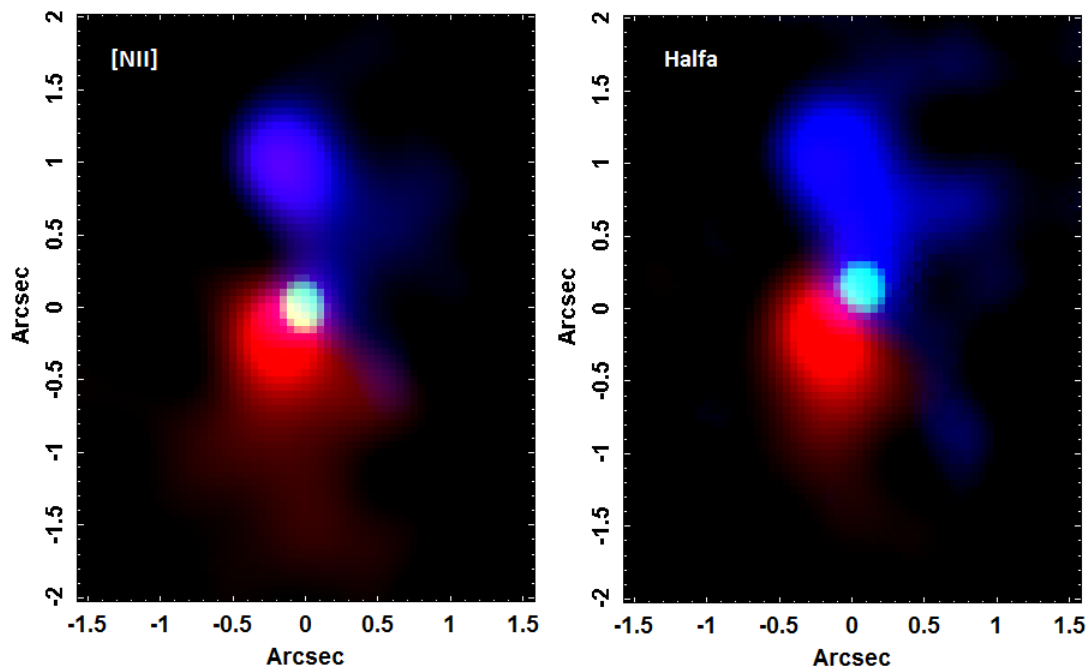


Figura 4.19: Composições RGB das linhas $[\text{NII}]\lambda 6584$ e $\text{H}\alpha$. A cor vermelha é a imagem da asa vermelha da linha, a cor azul a imagem da asa azul e a cor verde é a imagem da região central da linha.

de cada linha, a cor azul representa o gás em *blueshift*, pois foi feita com as imagens das asas azuis de cada linha, e a cor verde representa o gás com baixos valores de velocidade radial, pois foi criada utilizando um intervalo de comprimento de onda central na linha. Essas imagens foram feitas utilizando o cubo de gás de NGC 6744. Nota-se o mesmo padrão cinemático observado nos tomogramas/auto-espectros 2 da Tomografia PCA do cubo deconvoluído (Fig. 4.3) e da Tomografia PCA do cubo de gás (Fig. 4.14).

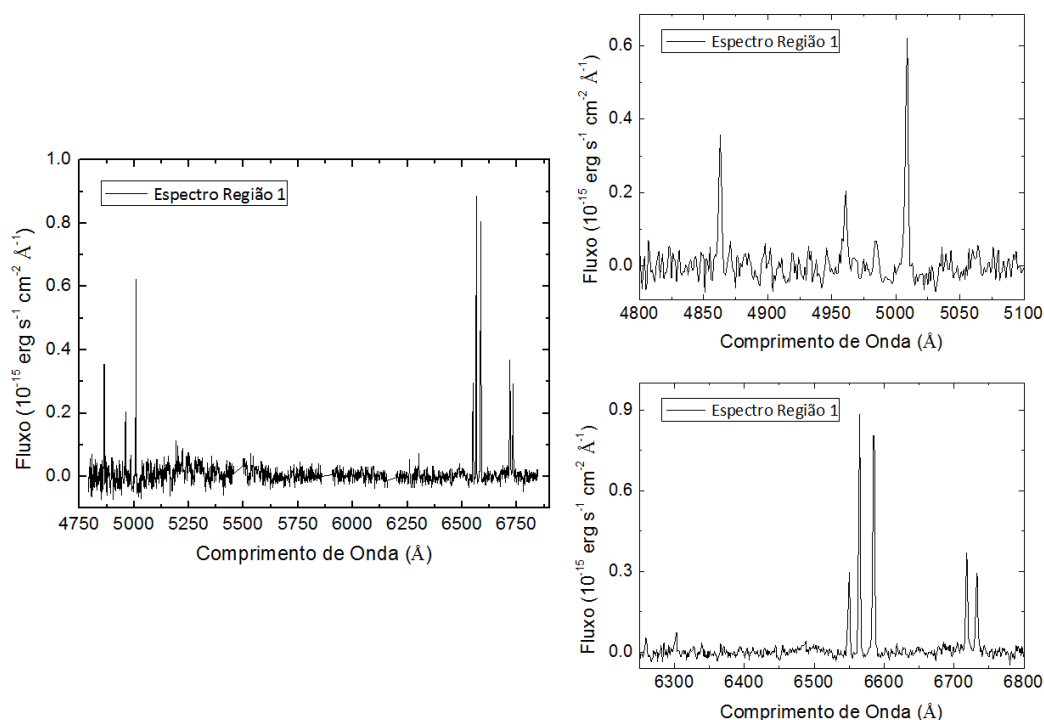


Figura 4.20: Espectro da Região 1 utilizado para cálculo das razões de linhas.

4.8 Razões de Linhas

Na seção anterior foram mostradas 3 regiões emissoras diferentes na região nuclear de NGC 6744. A fim de estudar as características e a natureza dessas regiões, foram calculadas razões de linhas. Foram extraídos espectros de regiões circulares centradas em $(0'';0'')$, $(-0'';2;1'')$ e $(0'';5;0'';7)$ das regiões 1, 2 e 3, respectivamente, com raio igual à metade do valor da PSF: $0'';25$.

Neste caso, como as linhas de $H\alpha$ e $H\beta$ não apresentam componentes largas e nenhuma das linhas estava blendada, não foi necessário aplicar nenhuma decomposição de linhas.

Os valores representativos do FWHM das linhas de emissão de cada região são: Região 1, 145 ± 15 km/s, Região 2, 177 ± 43 km/s e Região 3, 154 ± 30 km/s, ou seja, as linhas são bastante estreitas. As razões de linhas foram calculadas através do fluxo integrado de cada linha dos espectros extraídos do cubo de gás (ver Figs. 4.20, 4.21 e 4.22).

Na tabela 4.5 tem-se os valores calculados, juntamente com suas incertezas, das razões de linhas de cada região e na tabela 4.4 tem-se os valores das luminosidades corrigidas de extinção das linhas $[\text{OIII}]\lambda 5007$, $[\text{NII}]\lambda 6584$ e $\text{H}\alpha$ das 3 regiões.

Tabela 4.4 - Luminosidades corrigidas de extinção das linhas $[\text{OIII}]\lambda 5007$, $\text{H}\alpha$ e $[\text{NII}]\lambda 6584$ das 3 regiões de NGC 6744

Luminosidades (10^{36} erg/s)	Região 1	Região 2	Região 3
$\text{H}\alpha$	20.7 ± 1.0	9.0 ± 0.9	4.9 ± 0.3
$[\text{OIII}]\lambda 5007$	13 ± 3	8.9 ± 0.9	6.6 ± 0.3
$[\text{NII}]\lambda 6584$	24.3 ± 1.2	17.5 ± 0.9	6.2 ± 0.6

Tabela 4.5 - Tabela com as razões de linhas das 3 regiões emissoras centrais de NGC 6744

Razões de Linhas	Região 1	Região 2	Região 3
$[\text{OIII}]\lambda 5007/\text{H}\beta$	1.6 ± 0.4	5.0 ± 1.3	3.0 ± 0.4
$[\text{NII}]\lambda 6584/\text{H}\alpha$	1.17 ± 0.08	1.94 ± 0.21	1.26 ± 0.13
$([\text{SII}]\lambda 6716+6731)/\text{H}\alpha$	1.02 ± 0.08	1.56 ± 0.20	0.95 ± 0.07
$[\text{OI}]\lambda 6300/\text{H}\alpha$	0.103 ± 0.013	0.12 ± 0.03	0.08 ± 0.03
$\text{H}\alpha/\text{H}\beta$	2.57 ± 0.20	5.1 ± 1.3	2.2 ± 0.3
$[\text{SII}]\lambda 6716/[\text{SII}]\lambda 6731$	1.23 ± 0.13	1.19 ± 0.22	1.49 ± 0.19

A partir das razões de linhas (Tabela 4.5) e dos diagramas de diagnósticos (Fig. 4.23) é possível notar que a emissão da Região 1 é compatível com a de um LINER, objeto de transição e até galáxia de Seyfert (dentro de 3σ), a emissão da Região 2 com a de uma galáxia Seyfert e LINER (dentro de 2σ) e a emissão da Região 3 com a de uma galáxia Seyfert, LINER (dentro de 2σ), objeto de transição ou região HII (dentro de 3σ nos diagramas de $[\text{OI}]/\text{H}\alpha$ e $[\text{SII}]/\text{H}\alpha$).

Como foi dito na seção 3.7.3 do capítulo 3, é possível, a partir da razão $[\text{SII}]\lambda 6716/[\text{SII}]\lambda 6731$, estimar a densidade eletrônica de uma nuvem emissora. A partir dos dados fornecidos na tabela 4.5, foram calculadas as densidades eletrônicas de cada região, assumindo a temperatura de 10 000K (Tabela 4.6).

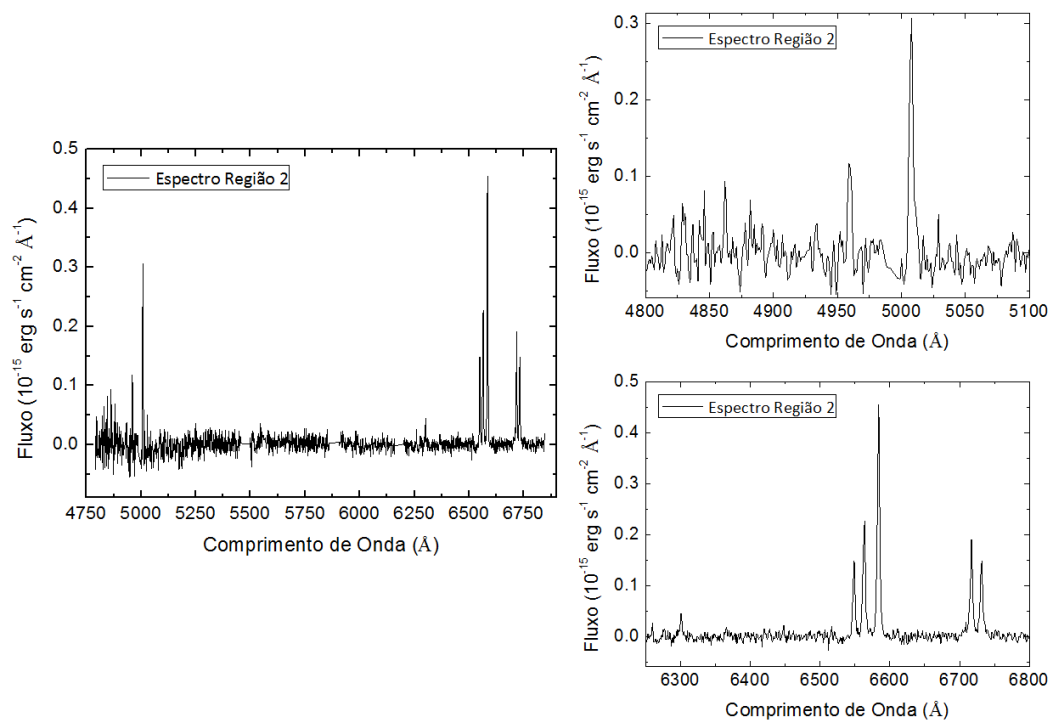


Figura 4.21: Espectro da Região 2 utilizado para cálculo das razões de linhas.

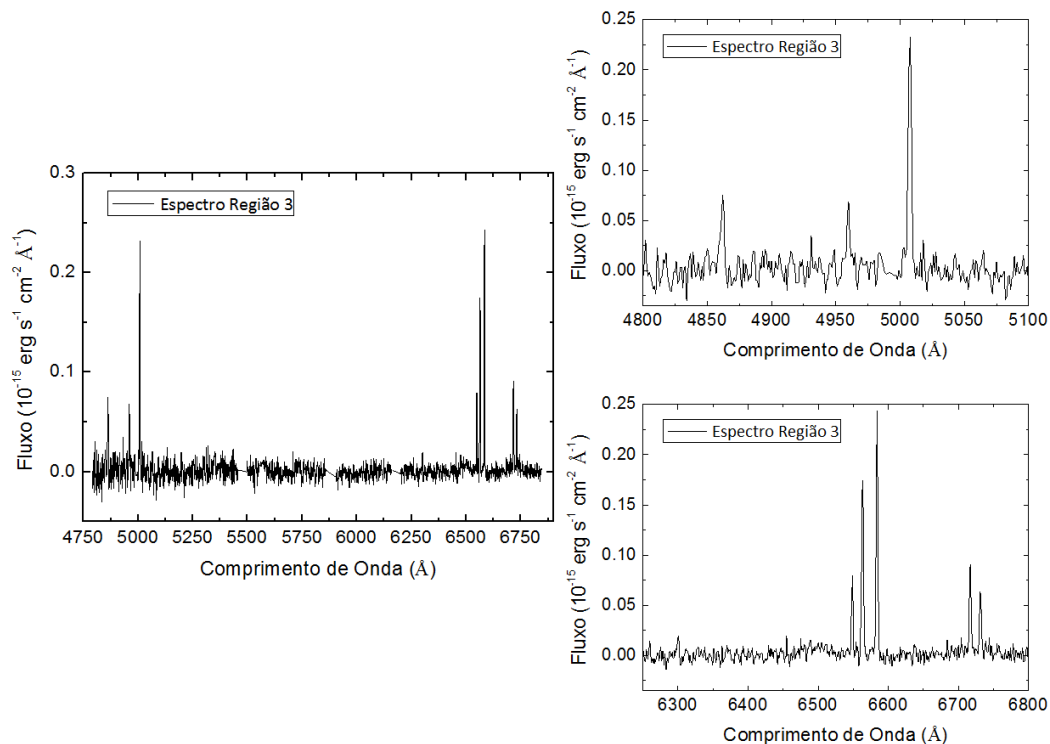


Figura 4.22: Espectro da Região 3 utilizado para cálculo das razões de linhas.

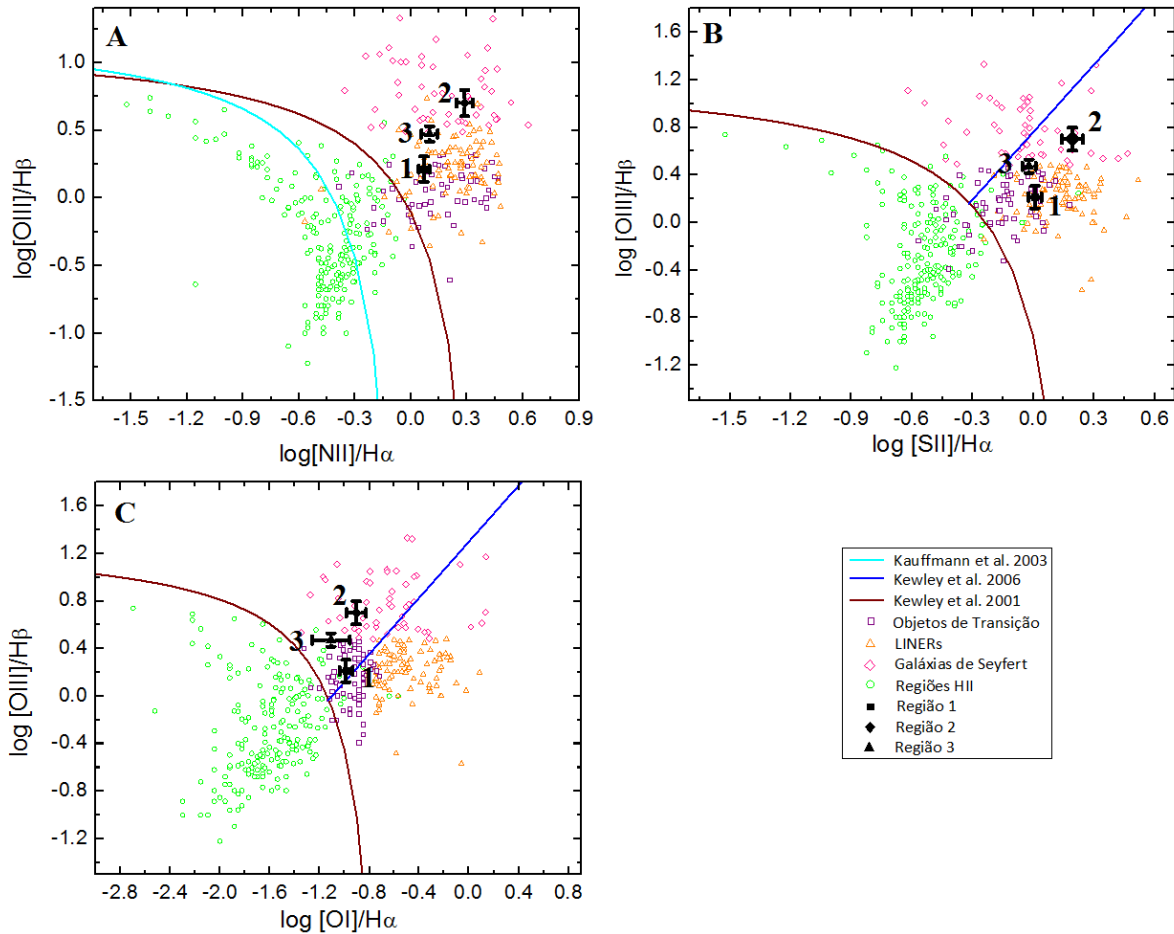


Figura 4.23: Diagramas de diagnóstico das regiões encontradas no cubo de dados de NGC 6744, utilizando valores da tabela 4.5. As três regiões estão apresentadas com números ao lado na cor preta, para melhor visualização. Os demais pontos correspondem aos objetos analisados por Ho et al. (1997): os círculos verdes são regiões HII, os triângulos laranjas são LINERs, os quadrados em roxo são objetos de transição e os losangos rosas representam as galáxias de Seyfert. O ajuste vinho nos diagramas A, B e C mostra o limite máximo de ionização por um *starburst* obtido por Kewley et al. (2001). O ajuste em ciano representa a divisão entre regiões HII e AGNs obtida por Kauffmann et al. (2003) e a linha azul representa a divisão entre galáxias de Seyfert e LINERs criada por Kewley et al. (2006).

Tabela 4.6 - Densidades eletrônicas das regiões 1, 2 e 3 a partir da razão de linhas $[\text{SII}]\lambda 6716/[\text{SII}]\lambda 6731$

	Densidade eletrônica (cm^{-3})
Região 1	194^{+182}_{-131}
Região 2	244^{+399}_{-222}
Região 3	≤ 3

As incertezas são altas, já que, para uma pequena variação da razão $[\text{SII}]\lambda 6716/[\text{SII}]\lambda 6731$, tem-se uma grande variação no valor da densidade. No caso da região 3, como a razão ultrapassou o seu valor máximo possível (porém é ainda compatível) que é 1.44, não é

possível estimar a densidade, apenas seu valor máximo.

A partir dos comprimentos de onda centrais das linhas de $[OIII]\lambda 5007$ dos espectros extraídos foi possível estimar as velocidades das regiões 2 e 3 com relação à Região 1. Através da Tomografia PCA (Figs. 4.3 e 4.14) e da composição RGB das linhas de $[NII]\lambda 6584$ e $H\alpha$ (Fig. 4.20), foi constatado que o gás na parte superior do FOV está em *blueshift*. A velocidade relativa da Região 2 encontrada foi de -55 ± 6 km/s e da Região 3 -58 ± 6 km/s. As duas regiões possuem velocidades relativas compatíveis entre si, sugerindo que ambas possam estar inseridas num movimento rotacional de gás ao redor da Região 1 (como se pode ver nas composições RGB - ver Fig. 4.20).

4.9 Imagens da emissão de $[SII]\lambda\lambda 6716, 6731$ das nuvens de alta e baixa densidade de NGC 6744

As imagens da emissão de $[SII]\lambda\lambda 6716, 6731$ de nuvens de alta e baixa densidades foram criadas a partir do método apresentado na seção 2.4.5.

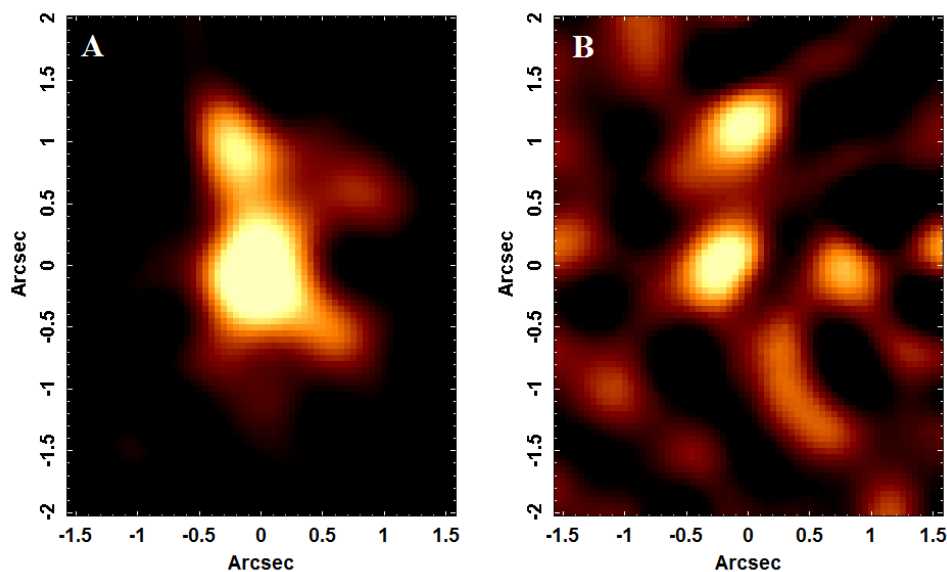


Figura 4.24: Imagens da emissão de $[SII]\lambda\lambda 6716, 6731$ das nuvens de baixa (A) e alta (B) densidade de NGC 6744.

Observando-se a Fig. 4.24A é possível notar a presença de baixa densidade nas Regiões 1 e 2, em áreas bem amplas. Já a Fig. 4.24B mostra que áreas de alta densidade estão também presentes nas Regiões 1 e 2, porém são mais compactas, o que é esperado.

4.10 Discussão e conclusão

4.10.1 NGC 6744 possui um AGN central (Região 1)

As Tomografias PCA do cubo deconvolvido (seção 4.3) e do cubo de gás (seção 4.6) de NGC 6744, além da imagem colapsada juntamente com o espectro médio do cubo de dados após a deconvolução (ver Fig. 4.1), mostram que há uma região emissora no centro do FOV, chamada aqui de Região 1.

De acordo com a razão de linhas do espectro extraído dessa região (ver Fig. 4.20 e seção 4.8), a sua emissão é compatível com LINERs, objetos de transição e até galáxias de Seyfert (dentro de 3σ). Como foi visto na composição RG da região central do bojo estelar e da linha [NII] λ 6584 (Fig. 4.18), a Região 1 coincide com o centro do bojo estelar, portanto, é o centro da galáxia.

Além disso, ao ver a imagem de [OIII] λ 5007 (Fig. 4.16), pode-se notar que há uma emissão que se estende da Região 1 até a Região 3 (ver Fig. 4.17), que está centrada em $\sim (0^{\circ}.5, 0^{\circ}.7)$. Essa última só aparece na imagem de [OIII] λ 5007, provando que é uma área de alta ionização, possivelmente um cone de ionização. Seu espectro extraído (ver Fig. 4.22) apresenta uma emissão compatível com a emissão de galáxias de Seyfert, LINERs, objetos de transição e até mesmo regiões HII (em alguns diagramas de diagnósticos - ver Fig. 4.23). Como a imagem de [OIII] λ 5007 sugere, a Região 3 parece ser o cone de ionização da Região 1.

Se a emissão das regiões 1 e 3 forem compatíveis com a de galáxia de Seyfert, não há nenhum problema em assumir esse cenário, já que os graus de ionização são compatíveis. Isso vale para os outros cenários onde as 2 emissões são compatíveis, como os dois objetos serem LINERs ou objetos de transição. O caso da Região 1 ser um LINER e a Região 3 ter emissão compatível com galáxia de Seyfert também é possível, já que a Região 3 possui baixa densidade. Se a densidade dos fótons que são emitidos pela Região 1 for alta, então o grau de ionização dessa região pode ser maior, devido à sua baixa densidade.

A Região 1 possui extinção por poeira considerável, embora não seja a área mais extinta (Fig. 4.8A). Curiosamente a extinção está concentrada numa área logo abaixo dessa região. As nuvens de alta densidade são mais compactas e mais centradas na Região 1 e as nuvens de baixa densidade possuem uma área maior. Sua densidade eletrônica é de $194_{-131}^{+182} \text{ cm}^{-3}$ e, como as incertezas são altas, tal densidade é ainda compatível com a densidade da Região

2.

4.10.2 A Região 2

Os resultados das Tomografias PCA e imagens das linhas de emissão de NGC 6744 revelaram a existência de outra fonte, além da Região 1. Tal fonte, chamada aqui de Região 2, está centrada em $\sim (-0''.2; 1'')$ - ver Figs. 4.17 e 4.4. Essa área emissora possui um espectro compatível com o de galáxias de Seyfert, LINERs ou objetos de transição, tendo um grau de ionização maior que a Região 1 (ver Fig. 4.23), porém, dentro de 3σ , as duas regiões possuem graus de ionização compatíveis. Sua distância projetada com relação a Região 1 é $\sim 48 \pm 9$ pc.

Existem algumas hipóteses que podem explicar a co-existência das 3 regiões encontradas. A primeira delas é que a Região 2 possa ser um outro AGN, portanto NGC 6744 possuiria um núcleo com dois AGNs. Nesse caso, como a Região 3, a princípio, possui um grau de ionização maior que a Região 1, poderia estar sendo apenas ionizada pela Região 2 (sendo seu cone de ionização) ou poderia estar sendo ionizada por ambos AGNs (e ser o cone de ionização da Região 1, o que explicaria o fato de ter maior grau de ionização que ela). Uma outra possibilidade é que, considerando-se as incertezas nas densidades e nos graus de ionização, as regiões 2 e 3 sejam apenas áreas da NLR do AGN na Região 1.

Se NGC 6744 tiver dois AGNs centrais, isso sugere que esta galáxia passou por um *merger* sem perder sua estrutura espiral (possivelmente com uma galáxia satélite) e que os dois AGNs possam estar num processo de fusão.

Uma outra hipótese seria que as regiões 2 e 3 façam parte de uma emissão antiga da NLR do AGN da Região 1. Há algum tempo atrás o AGN da Região 1 poderia ter atividade de galáxia de Seyfert e, por algum motivo (falta de abastecimento de gás por acreção, por exemplo), seu grau de atividade diminuiu com o tempo até atingir o grau de atividade observado. A emissão desse AGN mais intenso continuou se propagando e ionizando as nuvens da NLR. Nesse cenário, então, as regiões 2 e 3 ainda estão sendo ionizadas por essa emissão mais intensa do AGN antes da diminuição da sua atividade. Isso explicaria o porquê das regiões 2 e 3 apresentarem um grau de ionização aparentemente maior do que a Região 1. Esse cenário é chamado de eco do AGN e foi proposto, primeiramente, por Lintott et al. (2009) e Keel et al. (2012) no objeto SDSS J094103.80+344334.2, conhecido por *Hanny's Voorwerp*.

As Regiões 2 e 3 possuem velocidades compatíveis entre si e a cinemática do gás observada através das composições RGB das linhas $H\alpha$ e $[NII]\lambda 6584$, além das Tomografias PCA (ver Figs. 4.3, 4.14 e 4.20), sugerem que elas possam estar em rotação em torno da Região 1.

4.10.3 Populações estelares e sua cinemática

NGC 6744 parece não possuir populações estelares de baixa metalicidade (10^{-4} e 4×10^{-4}) e a fração de fluxo atribuída a populações estelares jovens é pequena quando comparada com a atribuída a populações estelares velhas e de idade intermediária. Esse fato comprova que o núcleo de NGC 6744 é velho e com pouca formação estelar. As estrelas jovens que se formam, provavelmente, o fazem através do gás com maior metalicidade remanescente de supernovas, o que pode ser constatado pela alta metalicidade das estrelas jovens detectadas. Parece que apenas a localização da população estelar velha (10^{10} anos) é central, enquanto que as demais populações estelares estão espalhadas pelo FOV.

A partir da síntese espectral foi possível concluir que esta galáxia passou por um *merger* há 10^9 anos, que gerou populações estelares com média metalicidade com essa idade. A concentração dessas populações é maior nas regiões circumnucleares do que no núcleo, o que sustenta essa hipótese.

A dispersão de velocidades estelar decai em direção ao centro, chegando a $\sim 76.0 \pm 2.1$ km/s (ver Figs. 4.10B e 4.12). Uma possível explicação para isso pode ser a presença de uma população estelar mais jovem (10^6 a 10^8 anos), massiva e cinematicamente fria na região central. As populações estelares parecem estar em rotação em torno da Região 1 (o núcleo do bojo), como mostra a Fig. 4.10, com velocidades negativas com relação a linha de visada (*blueshift*) na região superior do FOV e velocidades positivas (*redshift*) na região inferior do FOV.

4.10.4 Cinemática do gás e ambiente circumnuclear

Os auto-espectros E2 das Tomografias PCA do cubo após a deconvolução (Fig. 4.3) e do cubo de gás (Fig. 4.14) mostraram a cinemática do gás, essencialmente. Isso também pode ser visto nas imagens RGB das linhas $H\alpha$ e $[NII]\lambda 6584$ (Fig. 4.19). A parte superior do FOV possui gás em *blueshift* e a parte inferior, gás em *redshift*. O ponto central do FOV, que coincide com a Região 1 (AGN central), possui gás com velocidade, aproximadamente,

igual a zero com relação à linha de visada. O gás parece estar em rotação em torno do AGN central, seguindo a mesma orientação da rotação estelar.

A densidade do gás parece ser mais alta nas Regiões 1 e 2 (Fig. 4.24) e a Região 1 possui maior extinção de poeira do que o resto do FOV.

NGC 613

5.1 Introdução

NGC 613 é uma galáxia do tipo SB(rs)bc localizada a ~ 25 Mpc (valor médio das distâncias medidas obtido no NED). Uma de suas características morfológicas mais marcantes é a sua barra, que possui $139''$ (~ 17 kpc) de diâmetro (Kormendy, 1979), com as regiões de formação estelar mais ativas nos seus extremos. Observações constataram que o núcleo possui rotação mais rápida do que a barra (Blackman, 1981). O braço oriental possui traços de poeira que partem da região nuclear e regiões HII nas bordas. No outro braço a distribuição de gás e poeira é mais espalhada (Lynds, 1974). A galáxia possui uma estrutura de forma anelar, com dimensões de $1400 \text{ pc} \times 2300 \text{ pc}$, formada principalmente por estrelas vermelhas com tipo espectral médio de G8 até K1. Por outro lado, a região central da galáxia apresenta estrelas mais azuladas, com tipo espectral médio de A5 até F0. (Dottori, 1989).

Dados do SINFONI de NGC 613 mostram que esta galáxia possui um anel de formação estelar com diâmetro de 603 pc. A imagem de $\text{Br}\gamma$ revela 7 regiões de formação estelar neste anel, com altas taxas de formação estelar, sendo que as mais brilhantes estão na parte sul do anel (Böker et al., 2008). Não há traços de abastecimento do AGN pelo anel, mas este possui uma perturbação devida a um *outflow* do AGN central, que pode ser interpretado como um jato de rádio saindo do AGN (Falcón-Barroso et al., 2014; Hummel et al., 1987; Hummel e Jorsater, 1992; Böker et al., 2008).

O núcleo possui $12''$ (~ 1.5 kpc) e lembra uma pequena espiral com várias regiões HII e poeira. A atividade nuclear é classificada como composta: galáxia de Seyfert tipo 2 e região HII (Veron-Cetty e Veron, 1986). O gás no núcleo não é somente fotoionizado

pelo AGN, mas também ionizado via aquecimento por choque (Böker et al., 2008; Falcón-Barroso et al., 2014). Em torno do AGN há uma grande concentração de gás molecular ($8 \times 10^7 M_{\odot}$), o que é incomum, e sugere que a taxa de formação estelar é recorrente: o último episódio de formação estelar na região central dessa galáxia ocorreu por volta de 10 Myr atrás, sendo que o limite mínimo de tempo para a ocorrência do próximo é de cerca de 0.5 Myrs (Falcón-Barroso et al., 2014). O núcleo possui um espectro dominado por [FeII] e H₂, o que sugere que NGC 613 está numa fase de acumulação de gás na região central e provavelmente entrará na fase de *starburst* no futuro (Falcón-Barroso et al., 2014).

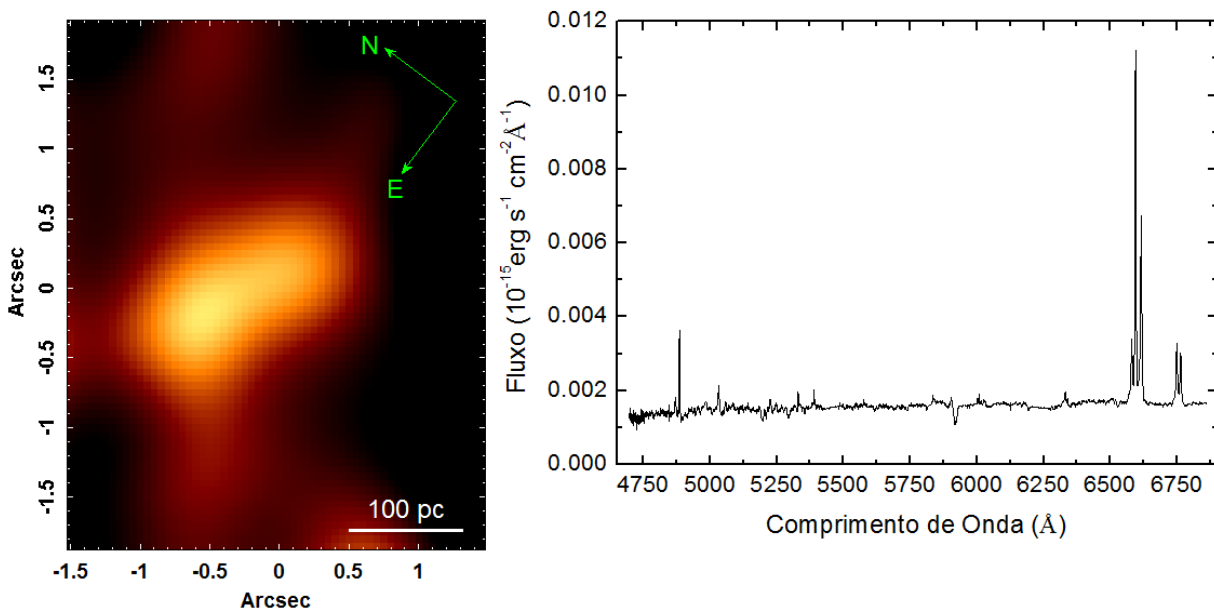


Figura 5.1: Espectro médio e imagem colapsada do cubo após a deconvolução, com a escala de 100 pc e a orientação NE.

Uma rotação estelar ao redor do núcleo foi detectada por Batcheldor et al. (2005). O mapa da dispersão de velocidades estelar obtido por esses autores é mais ruidoso, porém revela um claro contraste entre os valores mais centrais e o das áreas mais externas. A dispersão de velocidades central encontrada por Whitmore et al. (1985) foi 125 km/s.

5.2 Observações e tratamento de dados

As observações de NGC 613 foram realizadas na noite de 4 de Agosto de 2015, nas configurações instrumentais apresentadas na seção 2.1 do capítulo 2. O programa de observação do telescópio Gemini-Sul para este objeto foi GS-2014B-Q-30. Foram feitas

3 exposições de 930 segundos com *position angle* igual a 127° . O *seeing*, calculado a partir da imagem de aquisição (no comprimento de onda de 6300\AA), apresenta FWHM igual a $0''.72$. O valor do $FWHM_{ref}$ utilizado para a PSF no processo de deconvolução (ver seção 2.3.5, equação 2.1) foi estimado a partir da imagem da linha de [OI] $\lambda 6300$ (λ_{ref}) do cubo após a correção do *fingerprint* instrumental, pois essa imagem tem um aspecto puntual no cubo. Seu valor não foi muito diferente daquele obtido com a imagem de aquisição: $0''.71$. O valor do coeficiente x da lei de variação da PSF, obtido através do cubo de dados da estrela padrão foi $x = -0.21$.

A estrela padrão utilizada na calibração em fluxo, a mesma utilizada para NGC 134, foi LTT2415. Ela foi observada em 5 de Junho de 2015, com o tempo de exposição de 300 segundos e com as mesmas condições instrumentais das imagens de ciência.

A Fig. 5.1 mostra a imagem colapsada do cubo após a deconvolução e seu espectro médio. O núcleo possui um aspecto alongado e algumas regiões emissoras espalhadas ao redor também são visíveis. No espectro é possível notar as linhas de emissão de $H\beta$, [OIII] $\lambda 5007$ (bem fraca), [OI] $\lambda 6300$, [NII] $\lambda\lambda 6548, 6584$, $H\alpha$, [SII] $\lambda 6716, 6731$ e as linhas de absorção NaI $\lambda\lambda 5890, 5896$.

5.3 Tomografia PCA do cubo deconvoluido

NGC 613 possui muitos fenômenos em sua região nuclear, como será visto adiante. Por isso, a Tomografia PCA do cubo total não conseguiu separá-los completamente. Para ajudar essa separação de fenômenos, para que se façam entender, foram realizadas também Tomografias PCA nos CCDs 2 (5500\AA a 6200\AA), onde há, principalmente, absorções estelares, e 3 (6250\AA a 6850\AA), onde há emissão predominante de gás ionizado. Porém, os resultados dessa última Tomografia PCA não mostraram nenhuma novidade e, portanto, não serão apresentados aqui.

5.3.1 Cubo total

O auto-espectro E1 (Fig. 5.2) revela anti-correlações com componentes estreitas centrais das linhas de $H\beta$ e $H\alpha$ e correlações mais fracas com as das linhas [NII] $\lambda 6548, 6584$ e [SII] $\lambda 6716, 6731$. Há também correlações com componentes mais largas das linhas de [OIII] $\lambda 5007$, [NI] $\lambda 5200$ (sendo que componentes largas dessa linha dificilmente são detec-

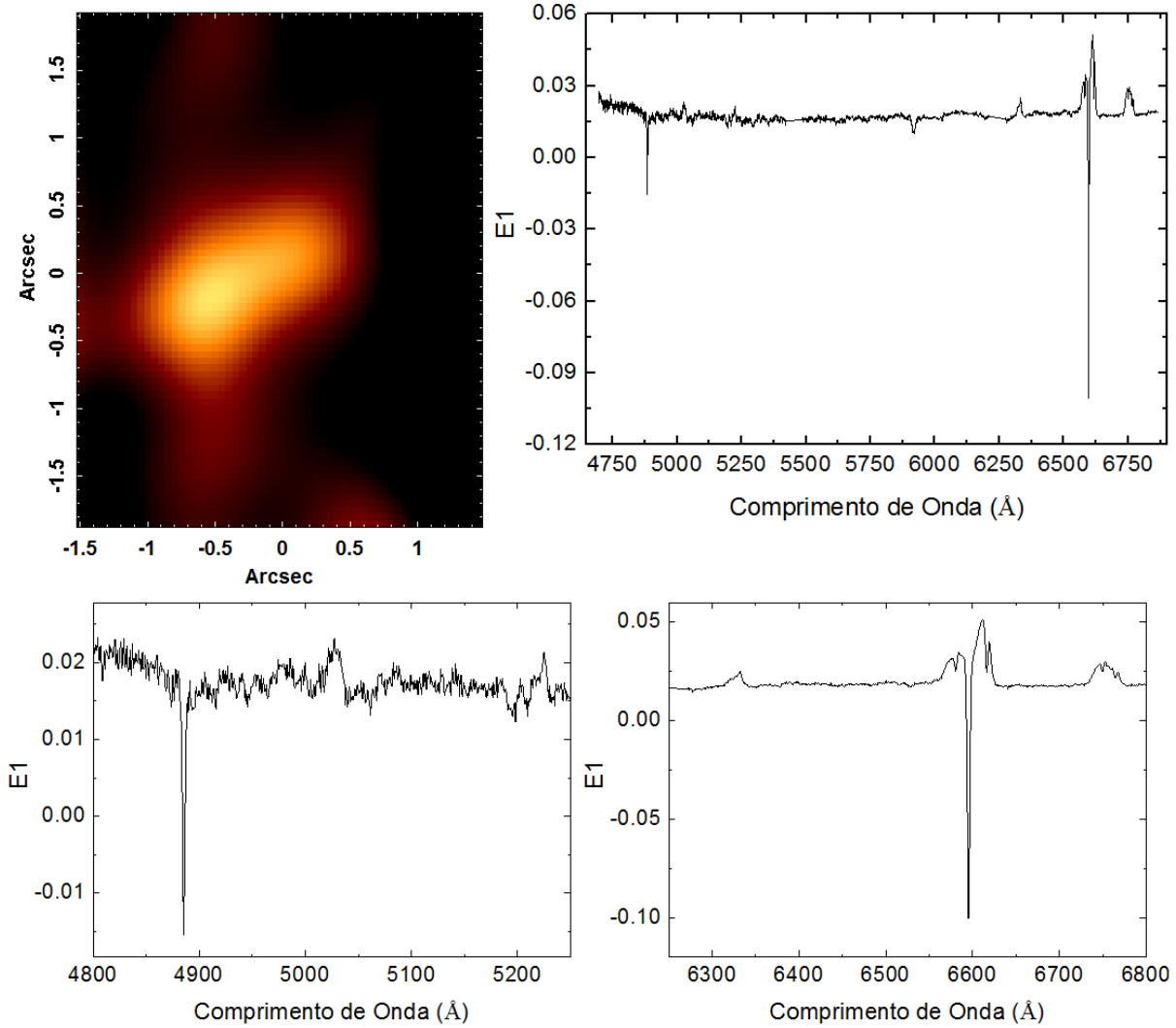


Figura 5.2: Tomograma e auto-espectro 1 da Tomografia PCA aplicada ao cubo deconvolvido total de NGC 613, com *zoom* nas regiões azul e vermelha do auto-espectro.

tadas), $[\text{OI}]\lambda 6300$ e das demais linhas citadas anteriormente. O tomograma mostra uma área central clara alongada, que corresponde à região emissora das componentes largas das linhas mencionadas. Isso indica a existência de um AGN nessa região. As anti-correlações com as componentes estreitas de algumas linhas sugerem a presença de regiões HII nas partes escuras do tomograma.

A tabela 5.1 mostra os valores das frações de variância explicadas por todos os autovetores. Nela há informação de que o primeiro autovetor explica $\sim 72\%$ da variância do cubo de dados, o que geralmente não acontece (o primeiro autovetor normalmente explica mais de 90% da variância do cubo total após a deconvolução, como foi visto nas Tomografias PCA de NGC 1566 e NGC 6744). Isso implica que esse contraste entre a emissão

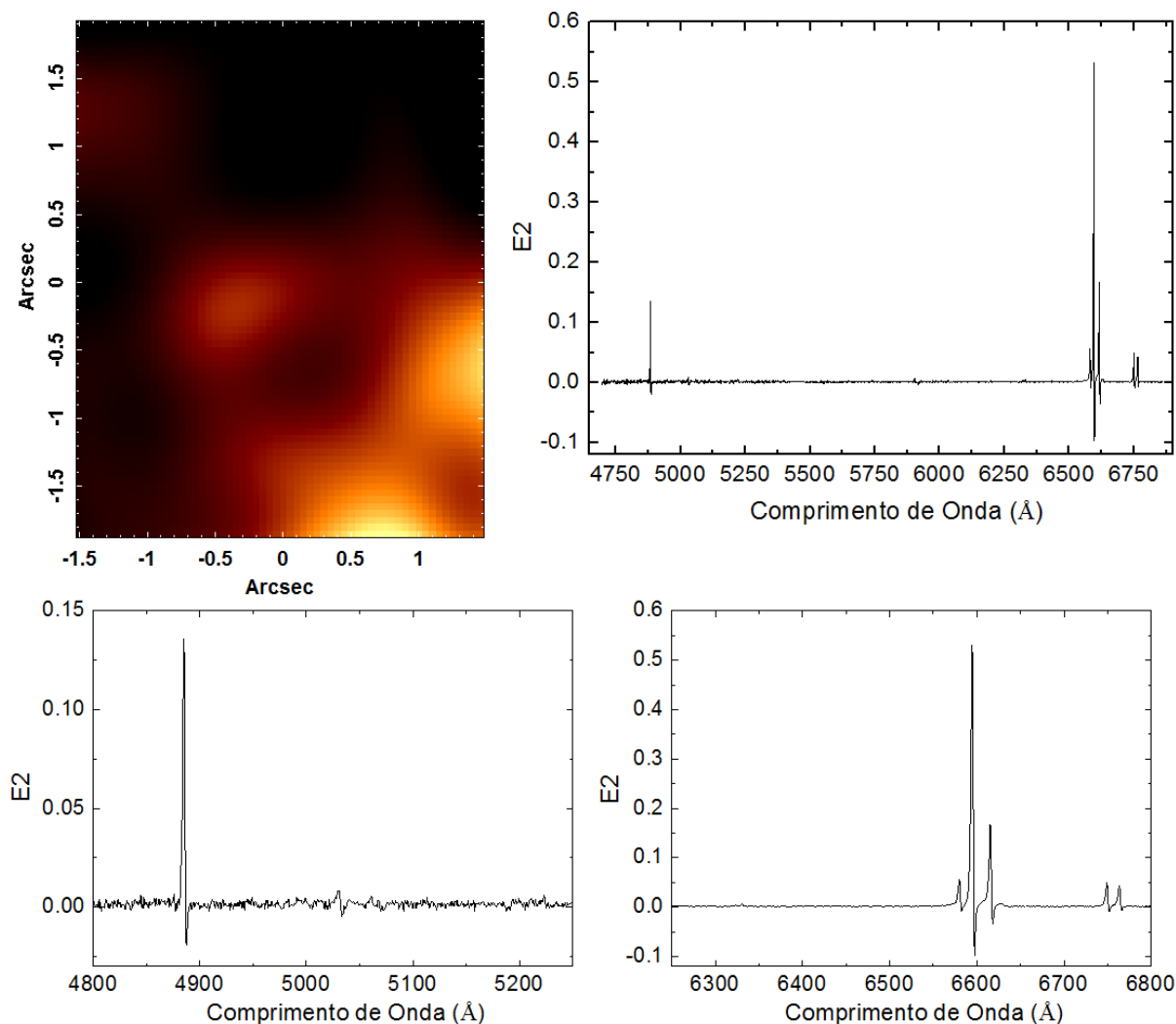


Figura 5.3: Tomograma e auto-espectro 2 da Tomografia PCA aplicada ao cubo deconvolvido total de NGC 613, com *zoom* na parte azul e vermelha do auto-espectro.

proveniente do AGN central e de prováveis regiões HII ao redor representa a maior parte da variância no cubo de dados dessa galáxia, mas também há outros fenômenos relevantes nesse cubo.

No auto-espectro E2 (Fig. 5.3) há correlações com as asas azuis das linhas $H\beta$, $H\alpha$, $[\text{NII}]\lambda\lambda 6548, 6584$, $[\text{SII}]\lambda\lambda 6716, 6731$ e $[\text{OIII}]\lambda 5007$ e anti-correlações com as asas vermelhas das mesmas. Ou seja, as regiões claras do tomograma 2 são aquelas que apresentam gás em *blueshift* e as regiões escuras, em *redshift*. Para interpretar este auto-espectro e tomograma deve-se ter muito cuidado, pois eles podem estar associados a mais de um fenômeno cinemático: poderia haver tanto dois movimentos rotacionais do gás (um no centro e o outro em áreas mais externas) com sentidos contrários, quanto a mistura de

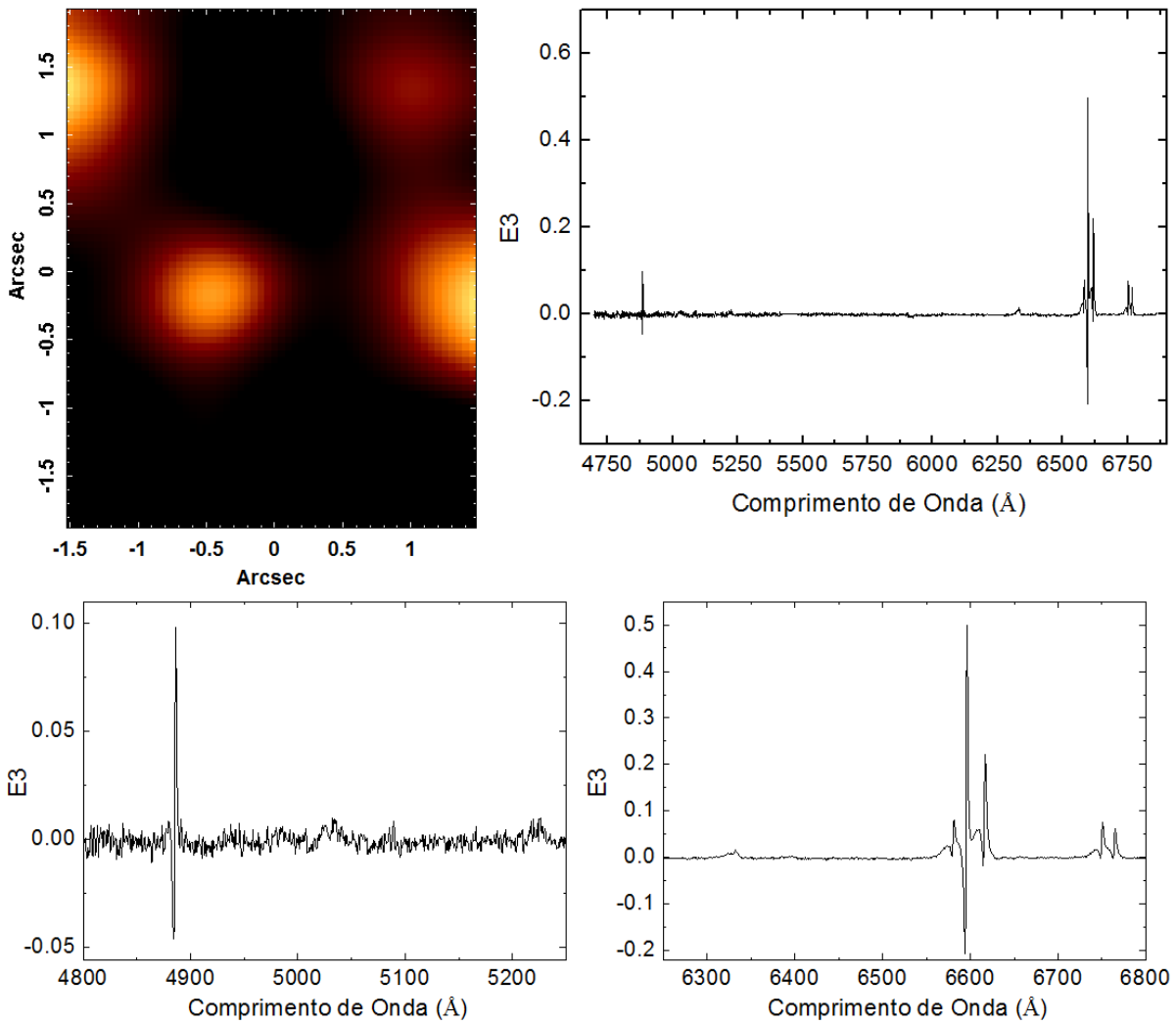


Figura 5.4: Tomograma e auto-espectro 3 da Tomografia PCA aplicada ao cubo deconvolvido total, com *zoom* na parte azul e vermelha do auto-espectro.

uma rotação de gás com um *outflow* proveniente do AGN central.

O auto-espectro E3 (Fig. 5.4) está relacionado, provavelmente, a mais de um fenômeno: a primeira característica vista são correlações com as asas vermelhas das componentes estreitas de todas as linhas de emissão e anti-correlações com as asas azuis das mesmas componentes estreitas, exceto $[\text{OIII}]\lambda 5007$ e $[\text{OI}]\lambda 6300$. Há também correlações com componentes mais largas (deslocadas para o azul em relação às componentes estreitas) dessas linhas. Esse auto-espectro está, ainda, correlacionado com componentes razoavelmente largas das linhas de $[\text{OIII}]\lambda 5007$ e $[\text{OI}]\lambda 6300$. Todas essas características indicam que esse autovetor está estabelecendo uma diferenciação entre a cinemática do gás associado às prováveis regiões HII ao redor do AGN (devido às correlações e anti-correlações com as

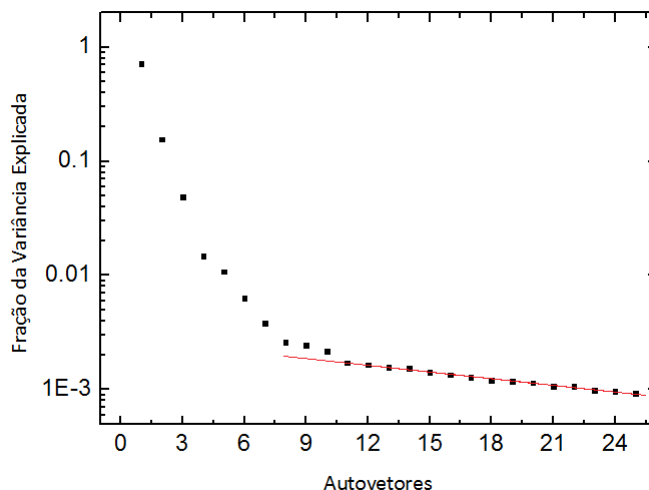


Figura 5.5: Diagrama de *Scree* da Tomografia PCA aplicada ao cubo total deconvolvido de NGC 613.

componentes estreitas) e a cinemática do gás mais próximo ao mesmo (devido às correlações com componentes mais largas das linhas). Nesse caso, as áreas claras do tomograma mais afastadas da provável região do AGN (ver tomograma 1 - Fig. 5.2) representam regiões HII em *redshift* e as áreas escuras, em *blueshift*. A área clara próxima à provável posição do AGN deve está associada às correlações com as componentes largas das linhas de emissão vistas no auto-espectro. É também provável que um *outflow*, proveniente do AGN, esteja presente nessa região, o que explicaria o fato das componentes largas detectadas estarem em *blueshift*. A correlação desse auto-espectro com a componente larga de [OI] λ 6300 é consistente com a presença de um AGN na área clara próxima ao centro do FOV, de acordo com o tomograma 1.

O diagrama de *Scree* (Fig. 5.5) mostra que a taxa de decréscimo de fração de variância explicada se torna aproximadamente constante a partir do autovetor E8. Mas os dados só são interpretáveis até o auto-espectro E3, ainda assim com muita dificuldade pois, como já foi dito antes, existem tantos fenômenos neste cubo de dados que a Tomografia PCA não conseguiu separá-los completamente.

5.3.2 CCD 2 (5500Å a 6200Å)

A Tomografia PCA aplicada ao CCD2 do cubo deconvolvido de NGC 613 revelou somente um autovetor (ver auto-espectro E1 na Fig. 5.6) no qual se pode interpretar algum fenômeno. A tabela 5.2 mostra as frações de variância explicadas pelos 10 primeiros

Tabela 5.1 - Tabela com os primeiros 15 autovalores da Tomografia PCA aplicada ao cubo total deconvolvido de NGC 613

Autovetores	Fração da Variância Explicada (%)
E1	71.67
E2	15.67
E3	4.84
E4	1.48
E5	1.08
E6	0.63
E7	0.38
E8	0.26
E9	0.24
E10	0.22
E11	0.17
E12	0.16
E13	0.16
E14	0.15
E15	0.14

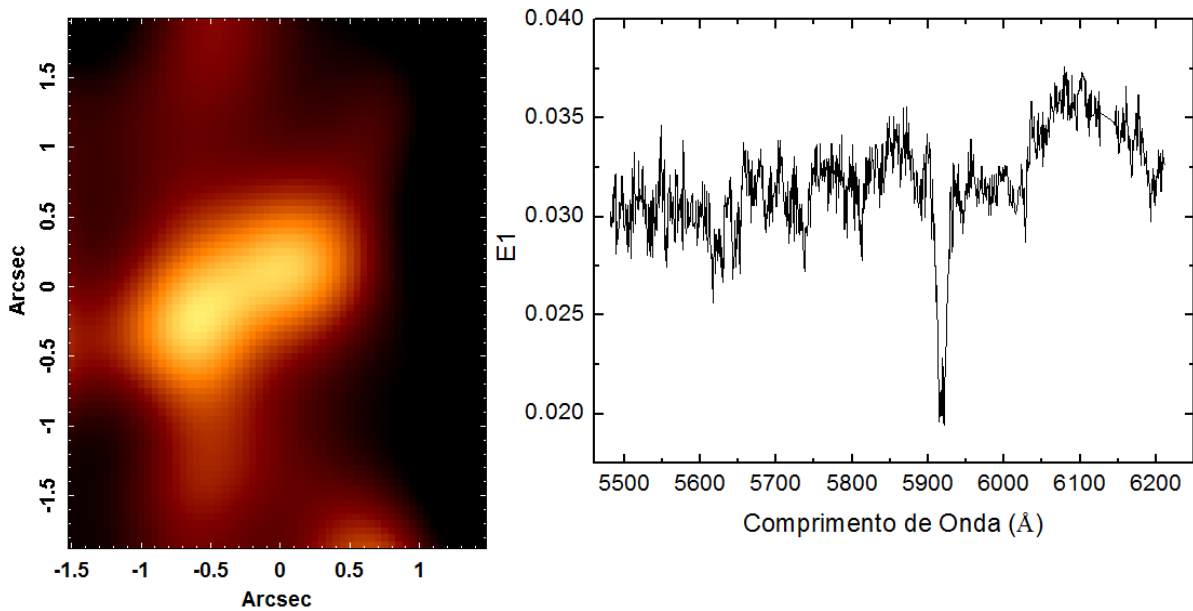


Figura 5.6: Tomograma e auto-espectro 1 da Tomografia PCA aplicada ao CCD2 do cubo deconvolvido de NGC 613.

autovetores.

O auto-espectro E1 está correlacionado com a maioria das absorções estelares e o to-

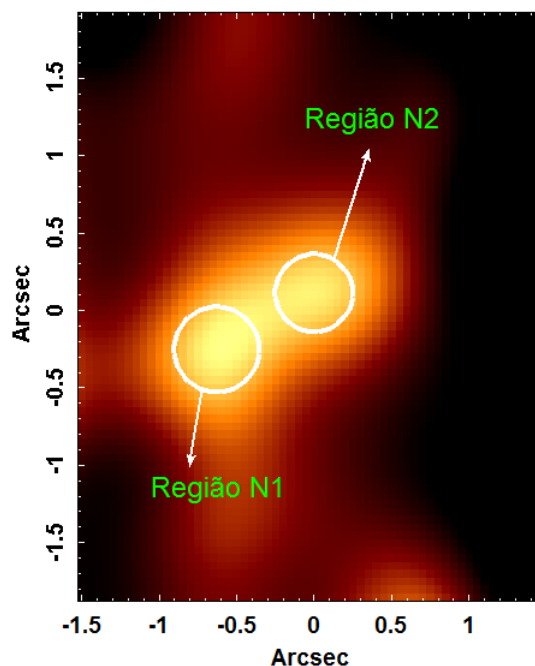


Figura 5.7: Tomograma 1 da Tomografia PCA aplicada ao CCD2 do cubo deconvoluído, com a indicação das duas principais regiões nucleares de NGC 613: Região N1, centrada em $(-0''.6; -0''.2)$, e Região N2, centrada em $(0''; 0''.1)$.

mograma apresenta duas regiões centrais (já vistas no tomograma 1 da Tomografia PCA do cubo total). Com isso, pode-se inferir que existem populações estelares nessas duas regiões, podendo ou não ser dois aglomerados nucleares diferentes. A região centrada em $(-0''.6; -0''.2)$ é a mesma na qual já foi concluído que há um AGN e será chamada de Região N1, de acordo com a Fig. 5.7. A Região N2 é aquela centrada em $(0''; 0''.1)$ e sua natureza será estudada adiante.

O diagrama de *Scree* (Fig. 5.8) mostra claramente que há um decaimento linear da fração de variância explicada logo a partir do autovetor E2, o que sugere que autovetores com ordem maior ou igual a 2 são dominados por ruído. De fato, apenas foi possível interpretar o auto-espectro E1 desse conjunto de resultados da Tomografia PCA.

5.4 Resultados da síntese espectral

A síntese espectral foi realizada de acordo com os procedimentos descritos na seção 2.4.2 do capítulo 2.

Notou-se que, devido ao baixo S/N, a borda direita dos mapas ficou prejudicada. Então

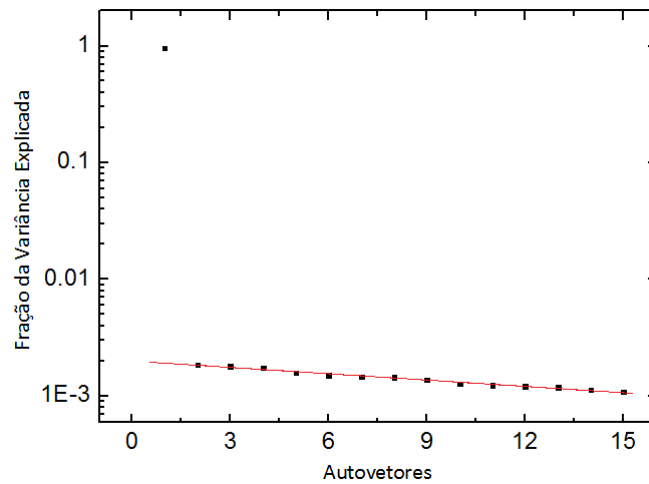


Figura 5.8: Diagrama de *Scree* da Tomografia PCA aplicada ao CCD2 do cubo deconvoluído de NGC 613

Tabela 5.2 - Tabela com os 10 primeiros autovalores obtidos com a Tomografia PCA aplicada ao CCD2 do cubo deconvoluído de NGC 613

Autovetores	Fração da Variância Explicada (%)
E1	95.813
E2	0.185
E3	0.180
E4	0.175
E5	0.157
E6	0.151
E7	0.146
E8	0.143
E9	0.138
E10	0.127

foi feito um truncamento apenas na borda direita com limite para a razão $S/N < 13$.

O histograma, considerando-se todo o FOV e levando-se em conta o truncamento, contendo as frações de fluxo devidas às populações estelares obtidas através da síntese espectral é mostrado na Fig. 5.9.

Nota-se que a maior fração de fluxo é atribuída a populações estelares com alta metalicidade (0.02 e 0.05). Já as idades das populações são bem variadas, sendo que a maior fração de fluxo é das populações jovens (10^7 anos), com $\sim 30\%$, seguida pelas populações com idades de $10^{9.5}$ e 10^{10} anos, que correspondem a $\sim 22.5\%$ e 13% da fração de fluxo, res-

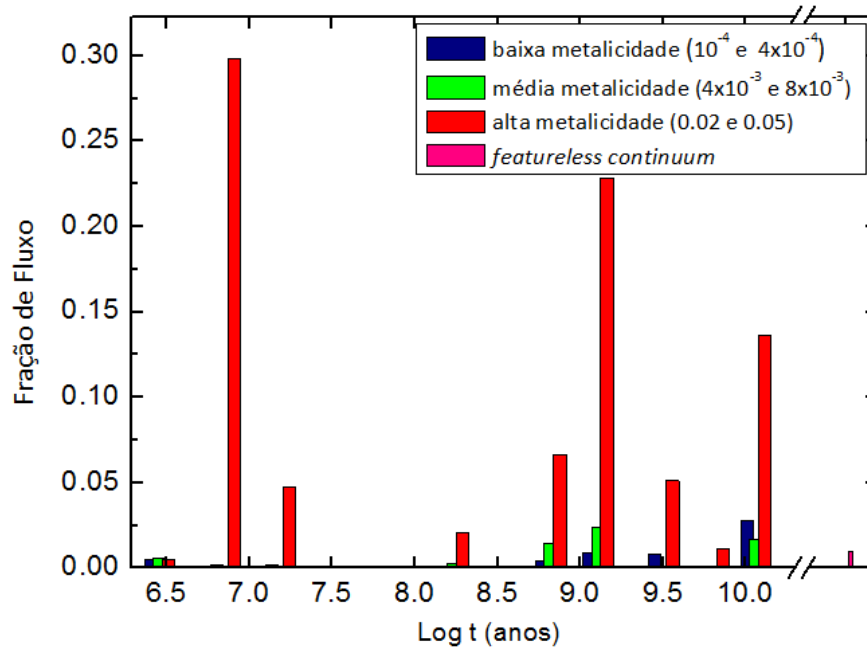


Figura 5.9: Histograma da síntese espectral aplicada ao cubo deconvoluído de NGC 613, apresentando as frações de fluxo e idades das populações estelares encontradas. A cor azul representa populações estelares com baixa metalicidade (4×10^{-4} e 10^{-4}), a cor verde representa populações estelares com média metalicidade (4×10^{-3} e 8×10^{-3}), a cor vermelha representa populações estelares com alta metalicidade (0.02 e 0.05) e a cor rosa o *featureless continuum*.

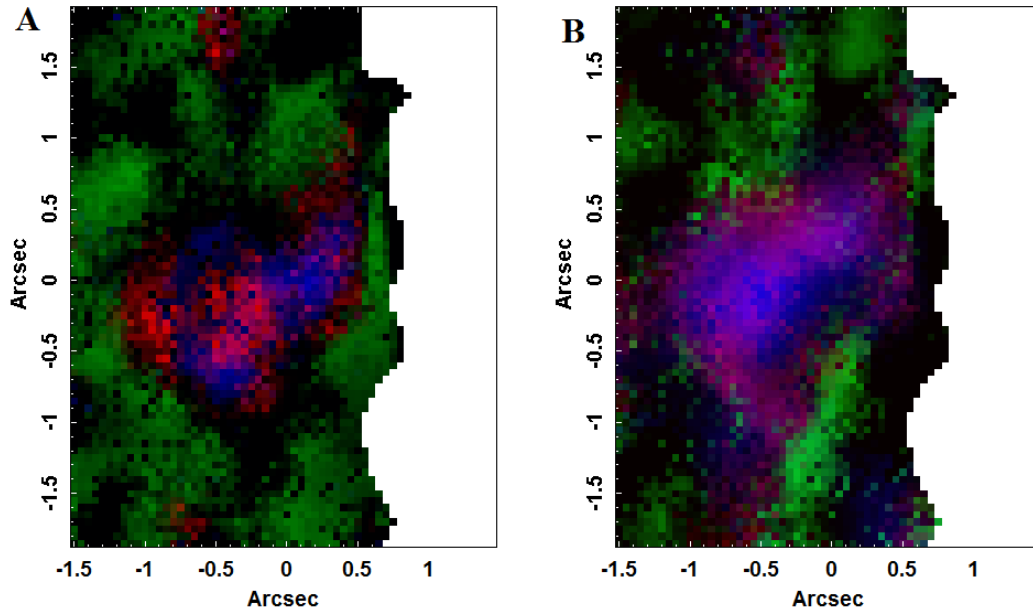


Figura 5.10: Mapas de fluxo das populações estelares obtidas com a síntese espectral. A Fig. A mostra populações estelares com metalicidade de 0.02 e a Fig. B com metalicidade 0.05. A cor vermelha representa populações velhas (com idades entre 6×10^9 e 10^{10} anos), a cor verde populações com idade intermediária (entre 10^8 e 4×10^9 anos) e a cor azul populações estelares jovens (com idades entre 10^6 e 6×10^7 anos). A borda direita foi prejudicada devido ao baixo S/N, portanto foi retirada da análise.

pectivamente. A lei de potência representando o *featureless continuum* possui uma fração de fluxo menor que 2.5%.

Os mapas de fluxo das populações, de acordo com a metalicidade, são apresentados na Fig. 5.10.

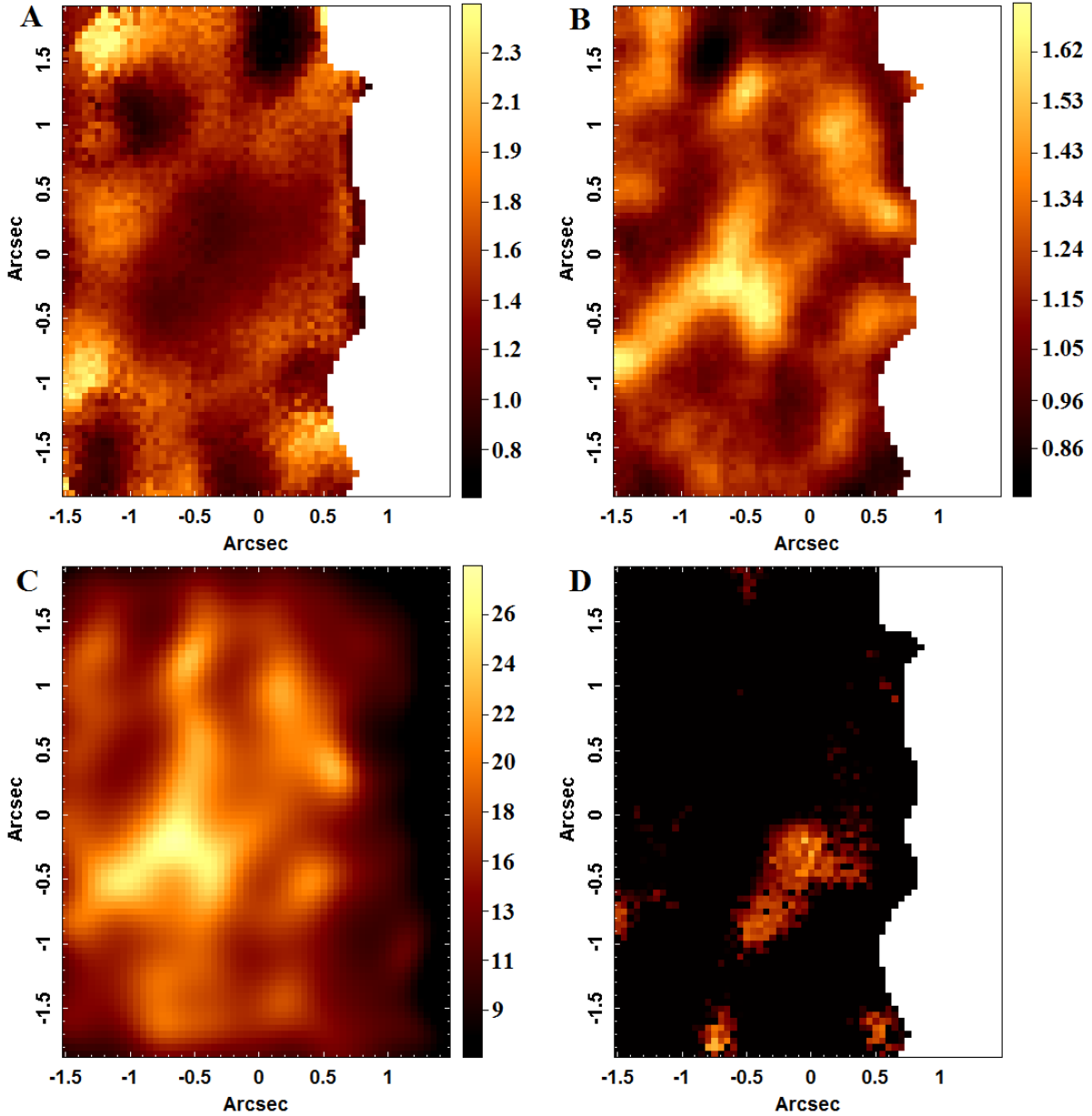


Figura 5.11: Mapas de (A) A_V , (B) χ^2 , (C) S/N e (D) *featureless continuum* obtidos com a síntese espectral. Como se pode notar no mapa de S/N, a região da borda direita foi retirada nos demais mapas, devido ao baixo S/N.

A Fig. 5.10A mostra as populações estelares com metalicidade 0.02. Nela é possível notar que as populações jovens (com idades entre 10^6 e 6×10^7 anos) estão concentradas na

região onde se localizam as fontes N1 e N2 (ver Fig. 5.7), juntamente com as populações velhas (com idades entre 6×10^9 e 10^{10} anos). Na região ao redor estão as populações com idades intermediárias (entre 10^8 e 4×10^9 anos).

A Fig. 5.10B mostra as populações estelares com metalicidade 0.05. Neste caso, como na Fig. 5.10A, as populações jovens e velhas estão concentradas na região central, mais especificamente, onde se localizam os objetos N1 e N2 e as populações com idade intermediária distribuídas aleatoriamente ao redor da região central.

O mapa da extinção (Fig. 5.11A) mostra que a região nuclear (onde estão as fontes N1 e N2) possui menos extinção do que as regiões logo ao redor.

O mapa de χ^2 (Fig. 5.11B) apresenta um pico na Região N1. Nas demais áreas os valores estão distribuídos de maneira mais uniforme, variando entre 0.8 e 1.6. Tudo isso indica ajustes de boa qualidade. Já o mapa do S/N (Fig. 5.11C) mostra que a região de maior S/N coincide, aproximadamente, com a Região N1. Como foi dito anteriormente, a borda direita possui baixo S/N e, com isso, os ajustes da síntese espectral nesta região ficaram prejudicados, tornando necessário o truncamento dos mapas.

O mapa do fluxo da lei de potência com índice espectral igual a 1.5, representando o *featureless continuum* (Fig. 5.11D), mostra que essa emissão não está centrada onde se esperava (que seria onde está o possível AGN: Região N1).

Os valores de A_V do cubo de dados de NGC 613, fornecidos pelo *software* STARLIGHT, apresentam uma incerteza de 0.09 mag. Por outro lado, a idade média das populações estelares (obtida a partir de uma média ponderada com base nas frações de fluxo correspondentes a tais populações) possui uma incerteza de 0.16 dex. Tais incertezas foram obtidas a partir de uma simulação de Monte Carlo (ver seção 2.4.2 do capítulo 2 para maiores detalhes).

5.4.1 Sínteses espectrais nas Regiões N1, N2 e *featureless continuum*

A fim de compreender melhor a natureza e, se há, alguma diferença ou semelhança de populações estelares entre as regiões N1 e N2, foram realizadas sínteses espectrais em cada região, separadamente. Para isso foram extraídos espectros de áreas circulares, com raio de $0''.35$, de cada região: um centrado em $(-0''.6; -0''.2)$, que é o espectro representando a Região N1, e outro centrado em $(0''; 0''.1)$, representando a Região N2.

Como se pode ver nos histogramas resultantes dessas sínteses espectrais (Fig. 5.12),

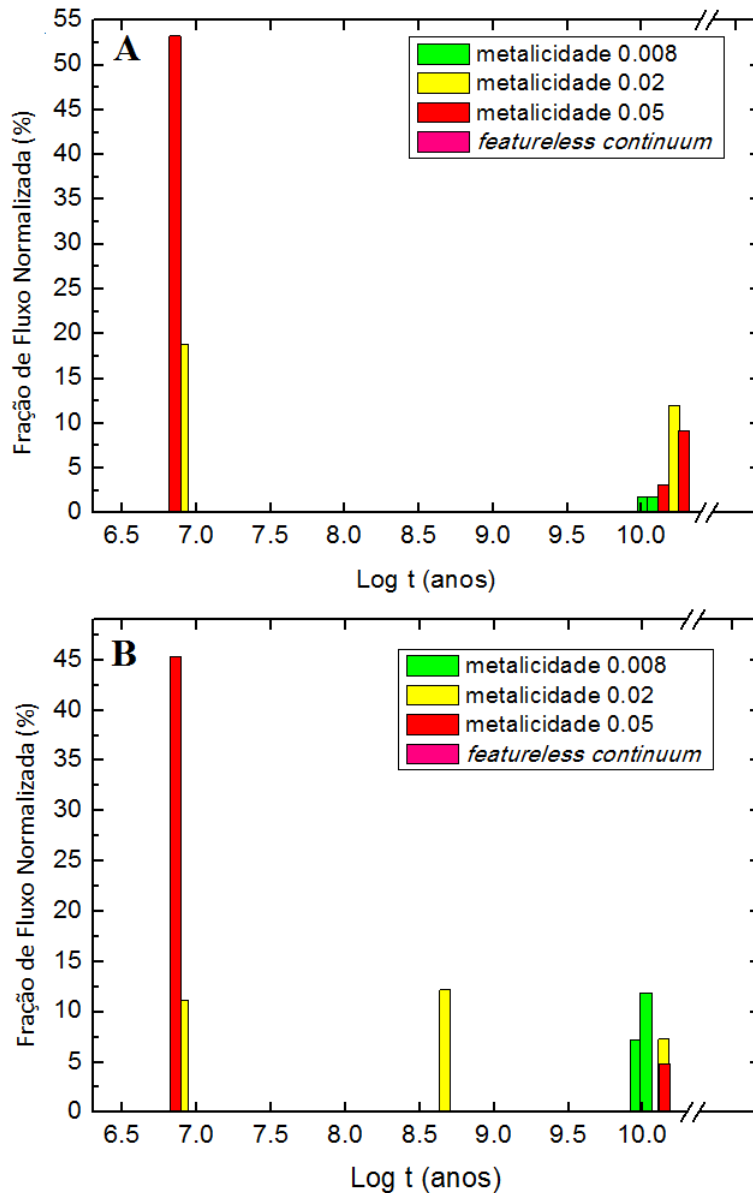


Figura 5.12: Histogramas contendo as frações de fluxo normalizadas (já que só foram realizadas em pequenas áreas do FOV) das regiões N1 (A) e N2 (B). A cor verde representa as populações estelares com metalicidade igual a 0.008 (média), a cor amarela as populações estelares com metalicidade igual a 0.02, a cor vermelha as populações com metalicidade 0.05 e a cor rosa a fração de fluxo atribuída ao *featureless continuum*.

as metalicidades encontradas nessas regiões são apenas três: 0.008 (em verde), 0.02 (em amarelo) e 0.05 (em vermelho), o que é consistente com o resultado da síntese espectral do FOV total, onde foi visto que essas regiões (N1 e N2) possuem populações estelares com essas metalicidades. As populações estelares com metalicidade 0.008 não foram discutidas anteriormente, pois a fração de fluxo atribuída a elas é pequena, como se pode constatar aqui também.

A síntese espectral da Região N1 (Fig. 5.12A) revela que as populações com maiores frações de fluxo são as jovens (10^7 anos) com alta metalicidade (0.02 e 0.05), representando ~ 70 %. O resto é devido a populações estelares velhas (10^{10} anos) com alta metalicidade, principalmente. Como no caso de NGC 1566, a fração de fluxo atribuída às estrelas jovens com alta metalicidade pode não ser real. Ela pode ser o resultado de uma má indentificação do *featureless continuum*, que foi erroneamente interpretado como sendo o contínuo estelar de populações jovens, que possuem poucas e rasas linhas de absorção.

A síntese espectral resultante da Região N2 (Fig. 5.12B) mostra que as populações jovens (10^7 anos) com metalicidades altas (0.02 e 0.05) são as que representam a maior fração de fluxo: ~ 55 %. Há também populações estelares com idade intermediária ($10^{8.5}$ anos) e metalicidade 0.02 com considerável fração de fluxo : ~ 12 %. Além disso, pode-se notar populações velhas (10^{10} anos) com metalicidades variadas (0.008 com ~ 18 %, 0.02 com ~ 7 % e 0.05 com ~ 5 %).

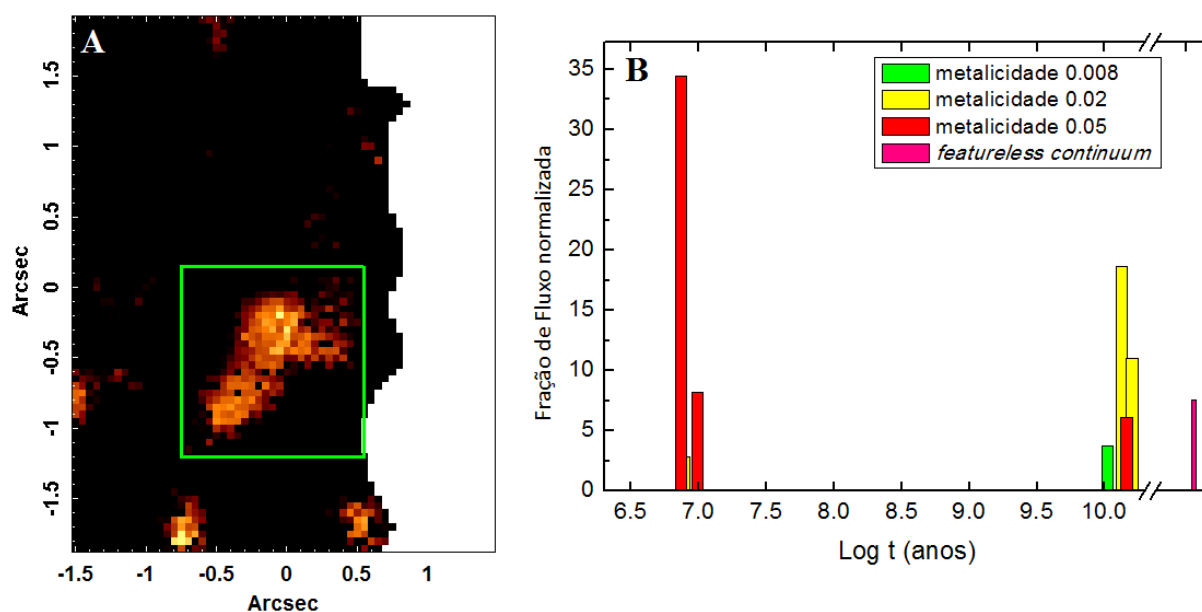


Figura 5.13: (A) Imagem da região do *featureless continuum* na qual foi realizada a síntese espectral, delimitada pelo quadrado em verde. (B) Histograma contendo as frações de fluxo normalizadas fornecidas pela síntese espectral da região mostrada em (A). A cor verde representa as populações estelares com metalicidade igual a 0.008 (média), a cor amarela as populações estelares com metalicidade igual a 0.02, a cor vermelha as populações com metalicidade 0.05 e a cor rosa a fração de fluxo atribuída ao *featureless continuum*.

As diferenças entre as duas áreas são poucas: a maior diferença é a população de idade intermediária com metalicidade 0.02 na Região N2, que não está presente na Região N1.

Além disso, a Região N2 possui a maior fração de fluxo devida à população com média metalicidade velha (10^{10} anos). As regiões N1 e N2 possuem, predominantemente, populações estelares jovens com alta metalicidade, que podem ser, pelo menos parcialmente, o *featureless continuum* mal interpretado, como já foi dito anteriormente.

O mapa do fluxo devido ao *featureless continuum* (Fig. 5.11D) mostra que essa emissão não está presente na região na qual se acredita estar localizado um AGN. Com o objetivo de ver se esse fluxo é real e quanto ele é representativo na sua região, especificamente, foi realizada uma síntese espectral do espectro da área delimitada pelo quadrado verde na Fig. 5.13A. O histograma fornecido por essa síntese espectral (Fig. 5.13B) mostra que a fração de fluxo do *featureless continuum* nessa região é de $\sim 8\%$. Isso revela que essa emissão é real e está, de fato, concentrada nessa região.

As incertezas da idade média das populações estelares dessas sínteses espectrais são as mesmas obtidas para a síntese espectral do cubo total (0.16 dex), já que foi utilizado o espectro médio do cubo para calculá-las.

5.4.2 Síntese espectral nas regiões circumnucleares

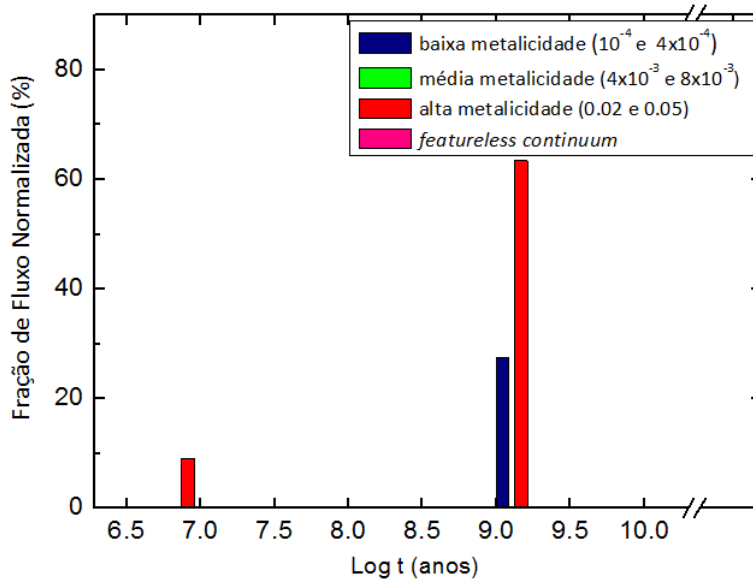


Figura 5.14: Histograma da síntese espectral das regiões circumnucleares de NGC 613. A cor azul representa populações estelares com baixa metalicidade (4×10^{-4} e 10^{-4}) e a cor vermelha representa populações estelares com alta metalicidade (0.02 e 0.05).

Bem como em NGC 6744, NGC 613 apresentou um pico de populações estelares com 1 bilhão de anos na síntese espectral total que representa $\sim 30\%$ da fração de fluxo total.

Essa população não aparece nos resultados das sínteses espectrais das regiões N1 e N2 e sugere que esta galáxia passou por um *merger* há 1 bilhão de anos atrás que gerou estas estrelas. Uma forma de comprovar isso é aplicando a síntese espectral apenas na região circumnuclear (sem os espectros das regiões N1 e N2). Os resultados estão no histograma da Fig. 5.14. De fato, é possível notar que a maior fração de fluxo das regiões circumnucleares é devida a essa população que surgiu durante o possível *merger* dessa galáxia.

5.5 Cinemática estelar

A descrição do método de análise *Penalized Pixel Fitting* (pPXF) é dada na seção 2.4.4. Os parâmetros fornecidos por esse método (velocidade radial estelar, dispersão de velocidades estelar e coeficientes de Gauss-Hermite h_3 e h_4) são obtidos para cada espectro (e, conseqüentemente, para cada *spaxel*) do cubo de dados. O resultado disso são mapas desses parâmetros (Fig. 5.15).

Da mesma forma que na síntese espectral, os mapas foram truncados na borda direta com $S/N < 13$.

O mapa da velocidade radial estelar (Fig. 5.15A) mostra que, na parte superior do FOV, as velocidades estelares são predominantemente positivas e, na parte inferior, negativas. Essa bipolaridade do mapa sugere uma rotação estelar, com estrelas em *redshift* na parte superior do FOV e em *blueshift* na parte inferior, sendo que o eixo de rotação não está muito bem definido. Um padrão estelar consistente com o que foi detectado aqui foi observado por Batcheldor et al. (2005).

O mapa de dispersão de velocidades estelar (Fig. 5.15B) não apresenta padrões claros. Há alguns picos que não coincidem com a região do AGN ou a região central do FOV, que podem ser devidos a imprecisões do método do pPXF. A dispersão de velocidades no centro do FOV é de 131 ± 5 km/s, compatível com a observada por Whitmore et al. (1985). A dispersão na Região N1 é $\sim 126 \pm 4$ km/s e na Região N2 é $\sim 114 \pm 3$ km/s.

O mapa do coeficiente de Gauss-Hermite h_3 (Fig. 5.15C) possui maiores valores nas regiões inferiores do FOV, mas, na região superior, os valores não são tão baixos e uma anti-correlação clara com o mapa de velocidades é difícil de ser identificada. O mapa do coeficiente de Gauss-Hermite h_4 (Fig. 5.15D) não apresenta padrões claramente indentificáveis.

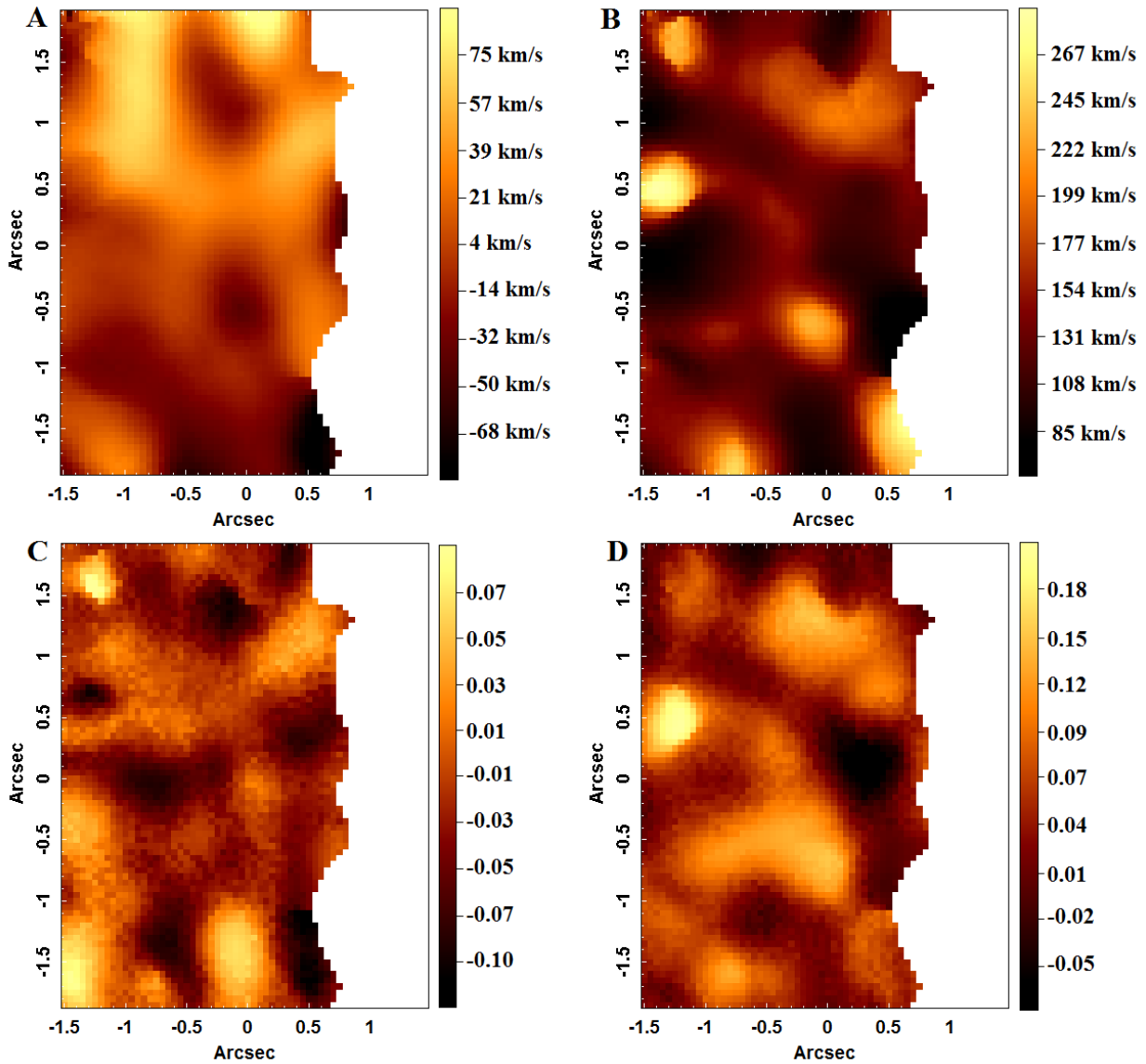


Figura 5.15: Mapas da velocidade radial estelar (A), dispersão de velocidades estelar (B) e coeficientes de Gauss-Hermite h_3 (C) e h_4 (D) obtidos com pPXF. A região da borda direita foi retirada da análise por ter baixo S/N.

Os mapas das incertezas do pPXF para cada parâmetro obtido estão apresentados nas Figs. 5.16A, B, C e D. O mapa da incerteza da velocidade radial estelar (Fig. 5.16A) não apresenta nenhum padrão evidente e os valores são predominantemente ≤ 3 km/s.

A distribuição dos valores da incerteza da dispersão de velocidades estelar (Fig. 5.16B) é praticamente homogênea no FOV. Os valores variam entre 3 e 22 km/s.

As incertezas do coeficiente h_3 de Gauss-Hermite (Fig. 5.16C) variam de ~ 0.04 a ~ 0.004 , sendo que o maior valor de incerteza é da ordem dos valores obtidos no mapa de h_3 , mostrando que esse mapa possui regiões não confiáveis. O mapa de incerteza de h_4

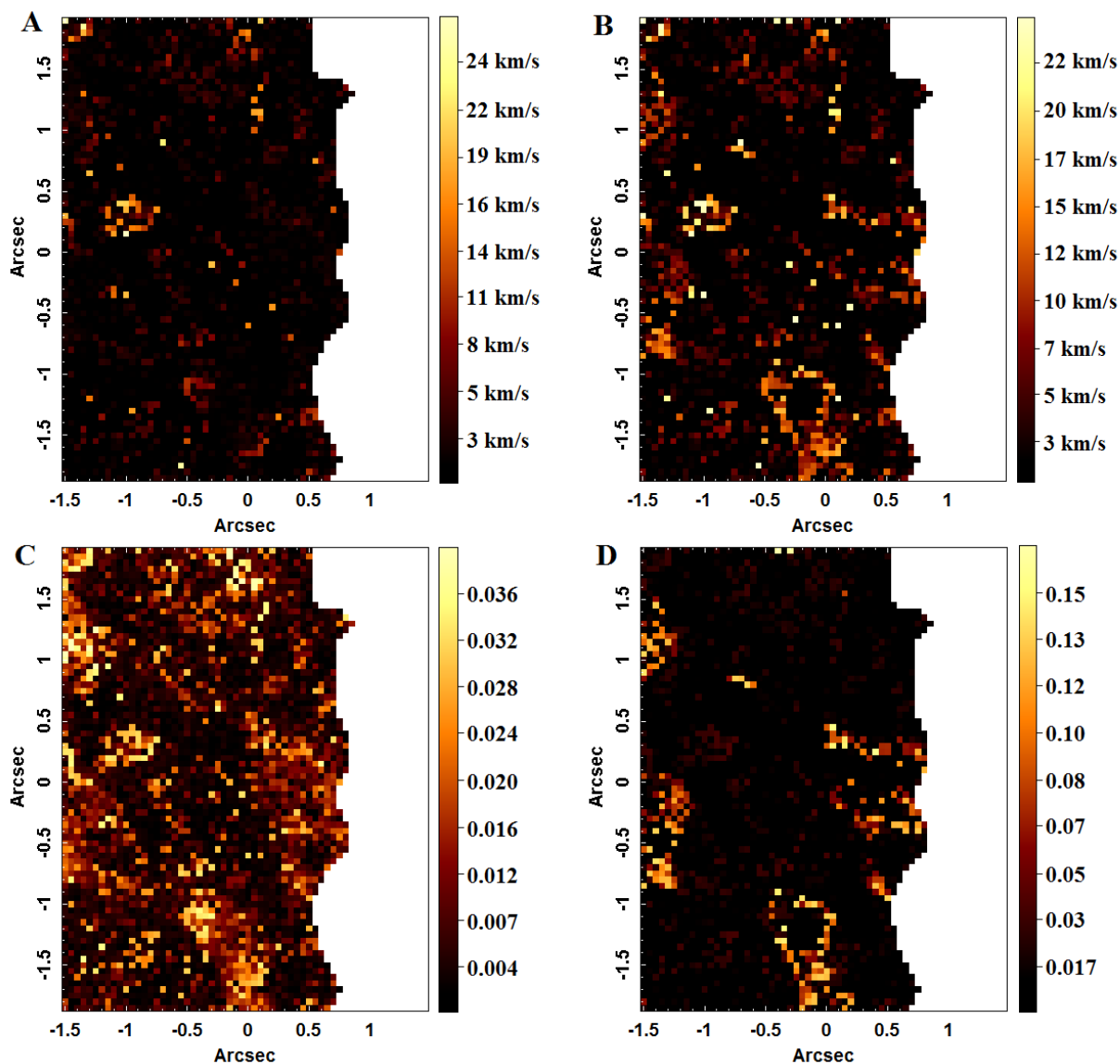


Figura 5.16: Mapas de incertezas da velocidade radial estelar (A), da dispersão de velocidades estelar (B) e dos coeficientes h_3 (C) e h_4 de Gauss-Hermite obtidos com o pPXF.

(Fig. 5.16D) mostra que a maior parte do FOV apresenta incertezas da ordem dos próprios valores obtidos para h_4 , indicando que esse mapa também não é confiável.

5.6 Tomografia PCA do cubo de gás

Para se determinar possíveis fenômenos associados ao gás na região central de NGC 613, foi aplicada a Tomografia PCA ao cubo de gás (ver seção 2.4.3). Da mesma forma que na Tomografia PCA do cubo deconvolvido, foi realizada, também, além da Tomografia PCA do cubo de gás total, uma apenas do CCD 3 (6250Å a 6900Å), onde a informação do

gás é predominante. Entretanto, os resultados obtidos foram idênticos aos da Tomografia PCA do cubo de gás total e, por isso, não serão mostrados aqui.

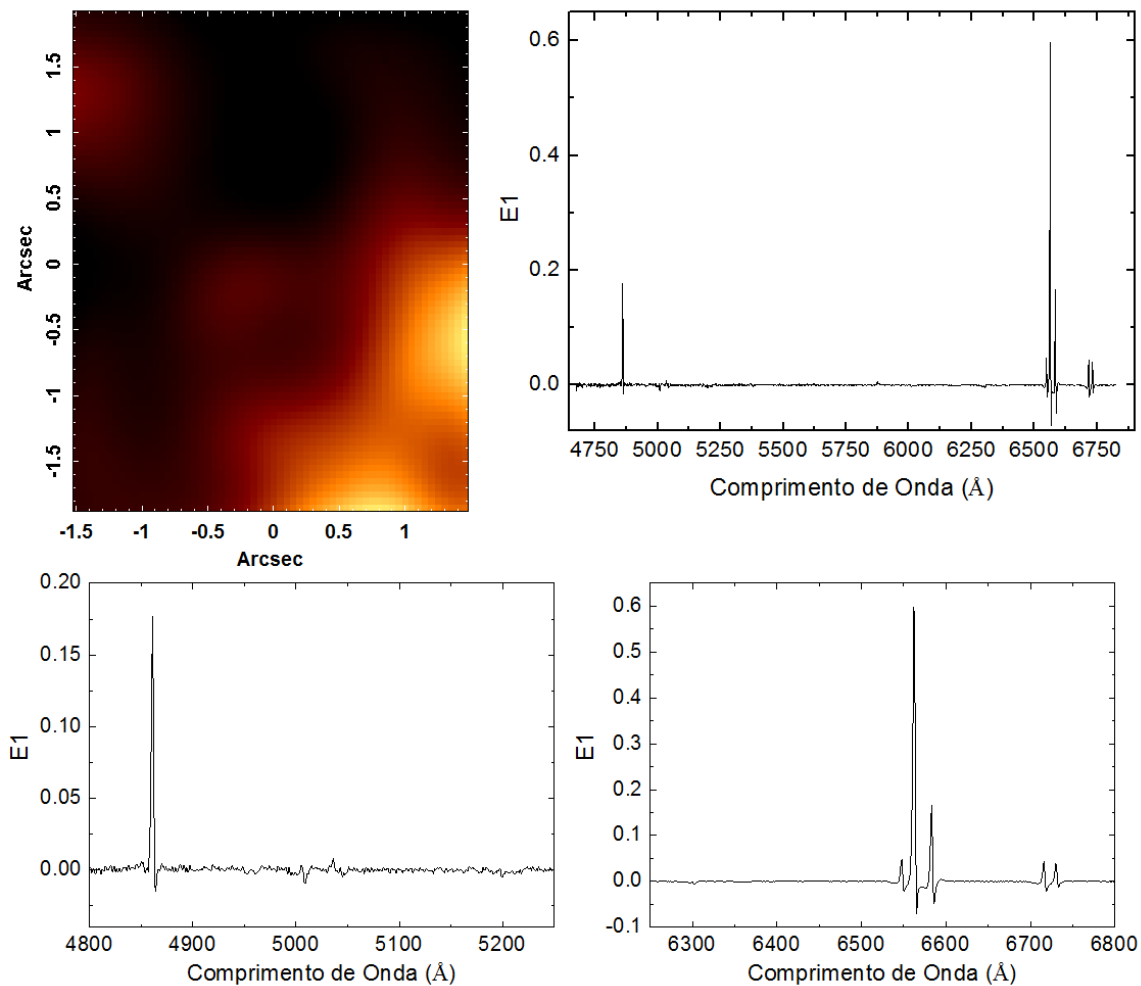


Figura 5.17: Tomograma e auto-espectro 1 da Tomografia PCA aplicada ao cubo de gás total, com ampliações nas regiões azul e vermelha do auto-espectro.

O auto-espectro E1 (Fig. 5.17) e seu tomograma associado são idênticos ao conjunto tomograma/auto-espectro 2 da Tomografia PCA do cubo deconvoluído total (Fig. 5.3). O auto-espectro E1 mostra correlações com as asas azuis das componentes estreitas de todas as principais linhas de emissão do gás e anti-correlações com as asas vermelhas das componentes estreitas das mesmas. As regiões claras do tomograma associado estão em *blueshift* e as regiões escuras em *redshift*. Como foi dito anteriormente, esse tomograma/auto-espectro pode estar representando mais de um fenômeno cinemático, como duas rotações do gás (uma central e outra periférica, com sentidos contrários) ou uma rotação com *outflow*.

O tomograma 2 (Fig. 5.18) é parecido com o tomograma 3 da Tomografia PCA do cubo

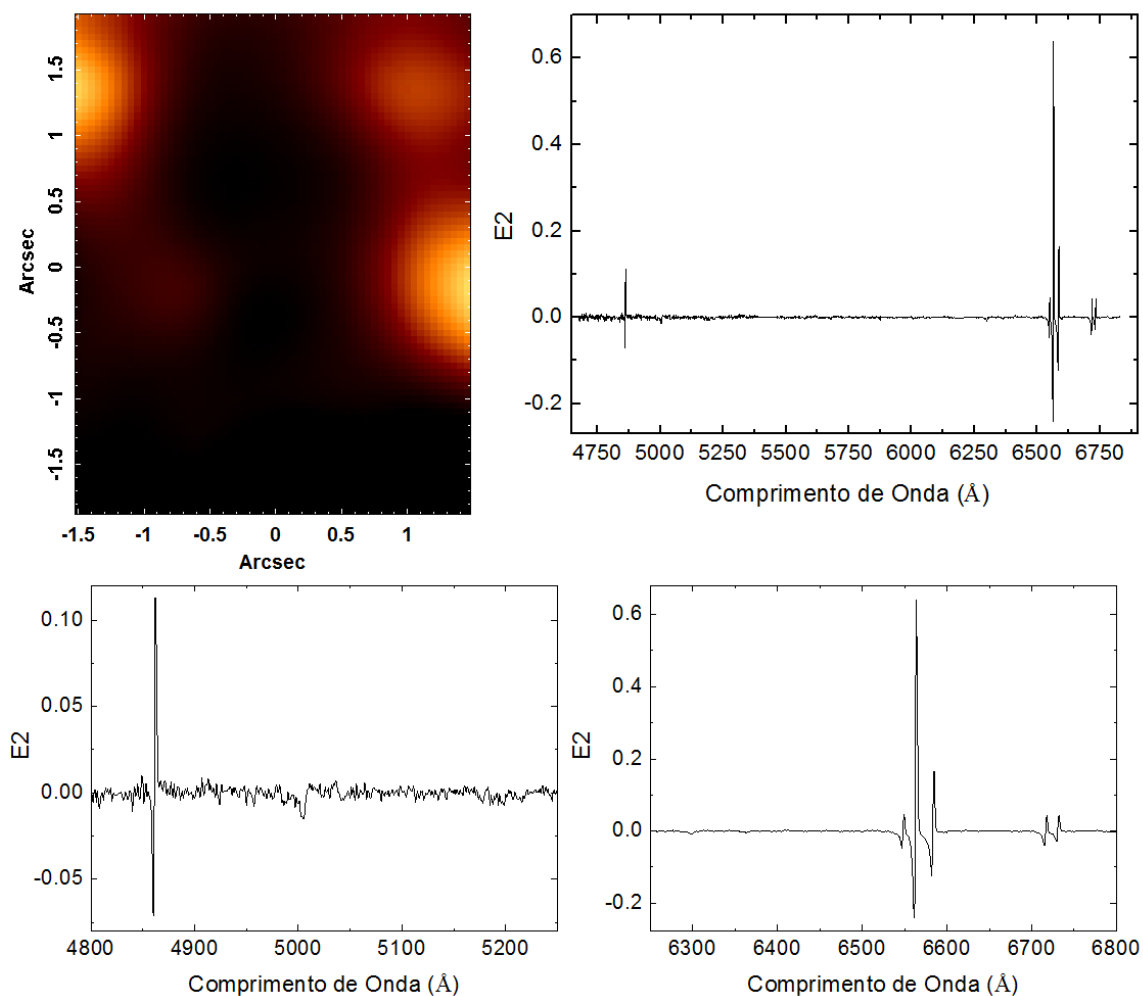


Figura 5.18: Tomograma e auto-espectro 2 da Tomografia PCA aplicada ao cubo de gás total, com ampliações nas regiões azul e vermelha do auto-espectro.

deconvoluído total (Fig. 5.4), exceto pela Região N1 que não está presente neste tomograma aqui. A ausência dessa região também pode ser notada no auto-espectro associado, já que não se vê emissão de $[OI]\lambda 6300$, que, como foi dito anteriormente, é proveniente dessa região que contém o AGN. Exceto por essa diferença, o auto-espectro é idêntico ao citado anteriormente. Esse conjunto tomograma/auto-espectro revela a cinemática das regiões HII, devido ao fato de haver anti-correlações entre as asas vermelhas e azuis das componentes mais estreitas das linhas de emissão. As regiões claras do tomograma estão em *redshift* e as escuras em *blueshift*, sugerindo uma possível rotação das regiões HII.

O conjunto tomograma/auto-espectro 3 (Fig. 5.19) é a única novidade nesta Tomografia PCA. O auto-espectro E3 apresenta correlações com todas as componentes mais largas das principais linhas de emissão (exceto $H\beta$), além do duplete $[NI]\lambda\lambda 5198, 5200$, que possui

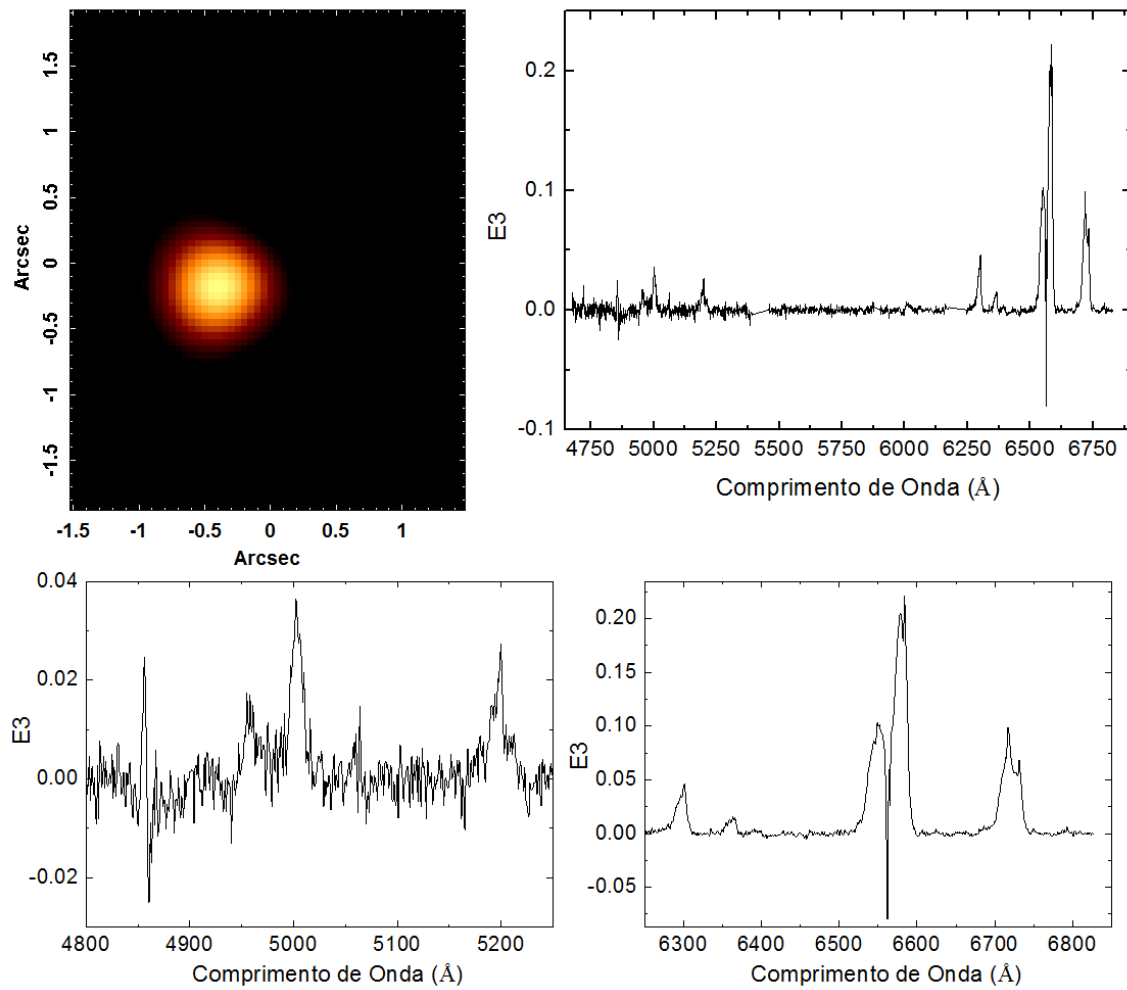


Figura 5.19: Tomograma e auto-espectro 3 da Tomografia PCA aplicada ao cubo de gás total, com ampliações nas regiões azul e vermelha do auto-espectro.

uma intensidade bem incomum. No caso de $H\beta$, há uma correlação com a asa azul um pouco mais larga, que indica que a região clara está correlacionada com o gás em *blueshift*, sendo uma evidência de *outflow* nesta área. Outra evidência de *outflow* se dá na correlação com as asas largas azuis das linhas $[OI]\lambda 6300$, $[NII]\lambda\lambda 6548, 6584$ e $[SII]\lambda\lambda 6716, 6731$, que são mais proeminentes do que as asas vermelhas das mesmas, gerando uma assimetria nas linhas. A anti-correlação com a asa vermelha da linha $H\beta$ é pouco intensa e, provavelmente, tem efeito secundário. Há uma anti-correlação mais significativa com $H\alpha$ estreito, que, juntamente com a correlação com as componentes largas, está diferenciando as regiões do tomograma onde há regiões HII (áreas escuras) e onde há o AGN (área clara).

O diagrama de *Scree* (Fig. 5.20) mostra que, a partir do autovetor E4 até o autovetor E6, a taxa de decréscimo da fração de variância se torna constante e, depois, a partir do

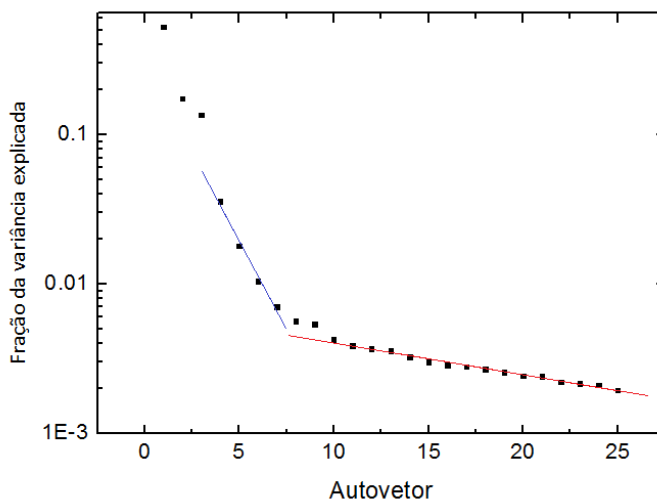


Figura 5.20: Diagrama de *Scree* da Tomografia PCA do cubo de gás total, contendo os 25 primeiros autovetores.

Tabela 5.3 - Tabela de autovalores da Tomografia PCA aplicada ao cubo de gás de NGC 613.

Autovetores	Fração da Variância Explicada (%)
E1	52.75
E2	17.49
E3	13.56
E4	3.58
E5	1.79
E6	1.04
E7	0.70
E8	0.56
E9	0.54
E10	0.43
E11	0.39
E12	0.37
E13	0.36
E14	0.32
E15	0.30

autovetor E10, a taxa de decréscimo se torna menor mas ainda constante. Isso significa que, entre os autovetores E4 e E6, ainda pode haver alguma informação relevante, porém o ruído já se torna significativo e, a partir do autovetor E10, a variância associadas às informações são menores e o ruído é dominante nos dados. Neste caso, analisou-se, apenas,

até o autovetor E3, já que, a partir do autovetor E4, os fenômenos estão muito misturados e não há uma análise conclusiva.

5.7 Razões de Linhas

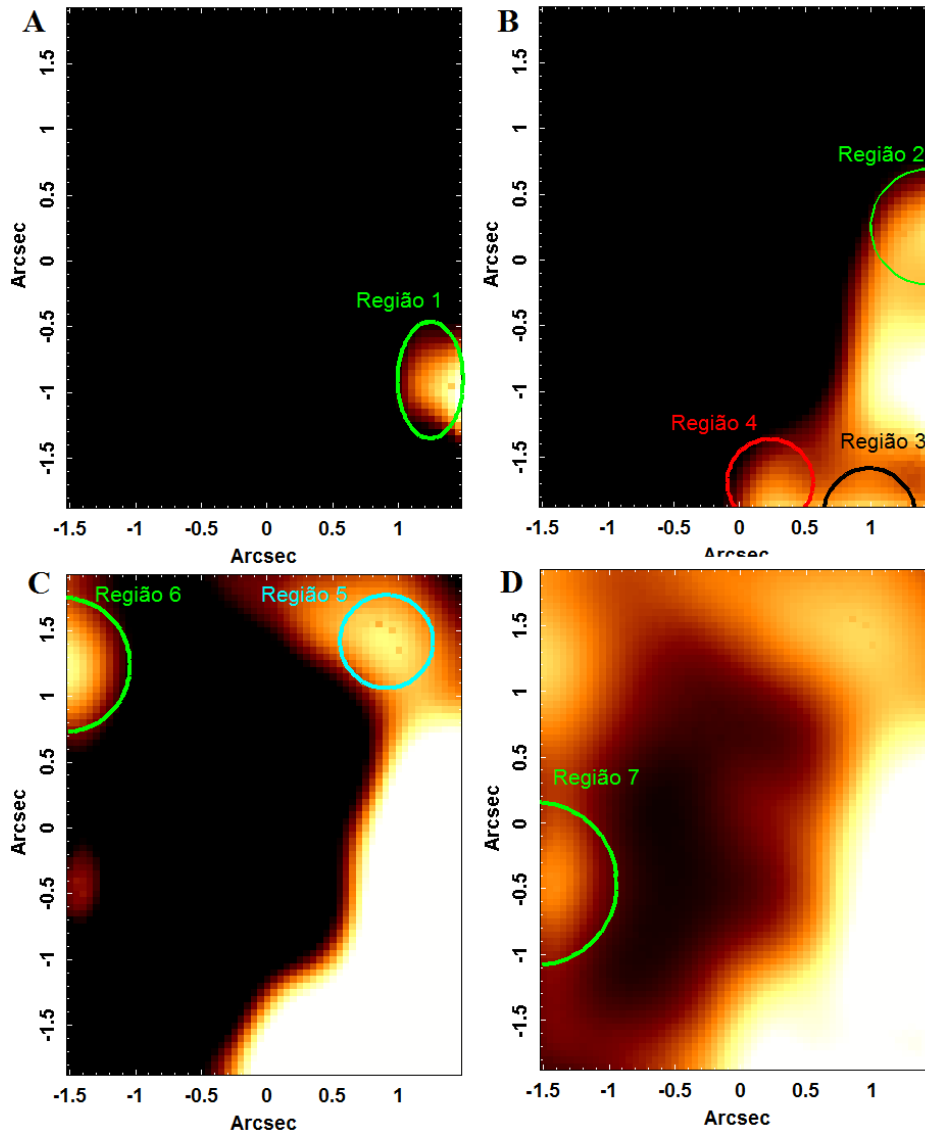


Figura 5.21: Imagem de $H\alpha/[NII]\lambda 6584$ com diferentes ajustes de LUT. A Fig. A mostra a localização da Região 1 em verde ($1''2; -1''1$). A Fig. B mostra a localização das Regiões 2 em verde ($1''3; 0''3$), 3 em preto ($1''; -1''8$) e 4 em vermelho ($0''3; -1''7$). A Fig. C mostra a localização das Regiões 5 em ciano ($0''9; 1''4$) e 6 em verde ($-1''3; 1''2$) e a Fig. D mostra a localização da Região 7 em verde ($-1''4; -0''6$).

Além das regiões N1 e N2 no centro do FOV de NGC 613 (Fig. 5.7), foram encontradas 7 regiões ao redor, das quais foram extraídos espectros para o cálculo das razões de linhas. Essas regiões foram observadas a partir da imagem de $H\alpha/[NII]\lambda 6584$. Tal imagem foi feita

com objetivo de localizar as posições das regiões HII nesse cubo, pois, quanto maior for o valor dessa razão, maior a chance de ser uma região HII. Para fazer essa imagem utilizou-se apenas o intervalo de comprimento de onda equivalente às componentes estreitas de cada linha. O intervalo que melhor permitiu identificar as regiões HII, no caso de $H\alpha$, foi de 6563Å a 6565Å e, no caso de $[NII]\lambda 6584$, foi de 6584Å a 6586Å. A imagem de $H\alpha/[NII]\lambda 6584$, quando se varia a LUT (*look up table*, que é uma escala que relaciona as cores da imagem com o valor de cada *pixel*, ou seja, variou-se o contraste da imagem), apresenta as 7 diferentes regiões, como está indicado nas imagens da Fig. 5.21.

Tabela 5.4 - Tabela de distâncias das regiões de NGC 613 com relação à Região N1 (ver Figs. 5.7 e 5.21). A Incerteza* considera a incerteza devido à distância da galáxia e a Incerteza apenas a incerteza dos *pixels* espaciais, que é a mesma para todos os objetos.

	X_C (")	Y_C (")	D (pc)	Incerteza * (pc)
Região N2	0	0.1	82	18
Região 1	1.2	-1.1	247	50
Região 2	1.3	0.3	241	48
Região 3	1	-1.8	277	56
Região 4	0.3	-1.7	214	43
Região 5	0.9	1.4	269	54
Região 6	-1.3	1.2	192	39
Região 7	-1.4	-0.6	110	23
Incerteza (pc)				9

Devido ao fato de as regiões não estarem inteiramente dentro do FOV, não é possível determinar, com precisão, os seus centros. Os espectros foram extraídos dentro dos limites do FOV, então não é possível dizer se a atividade da nuvem é de fato a que foi encontrada, pois não se pôde estudá-la inteira. A Região N1 está centralizada em (-0"6;-0"2) e as distâncias e coordenadas centrais (dentro dos limites do FOV) em relação às demais regiões estão na tabela 5.4. A Incerteza* foi calculada não só apenas com a incerteza dos *pixels* espaciais (Incerteza), mas também com a incerteza da distância da galáxia (desvio padrão das medidas de distância obtido no NED).

Foram extraídos espectros das regiões de 1 a 7, que estão apresentandos nas Figs. 5.22, 5.23, 5.24, 5.25, 5.26, 5.27 e 5.28. Também foram extraídos espectros das regiões N1 e N2 (ver Fig. 5.7), que estão apresentados nas Figs. 5.29 e 5.30, respectivamente. As luminosidades corrigidas de extinção das linhas $[OIII]\lambda 5007$, $[NII]\lambda 6584$ e $H\alpha$ são mostradas

na tabela 5.5.

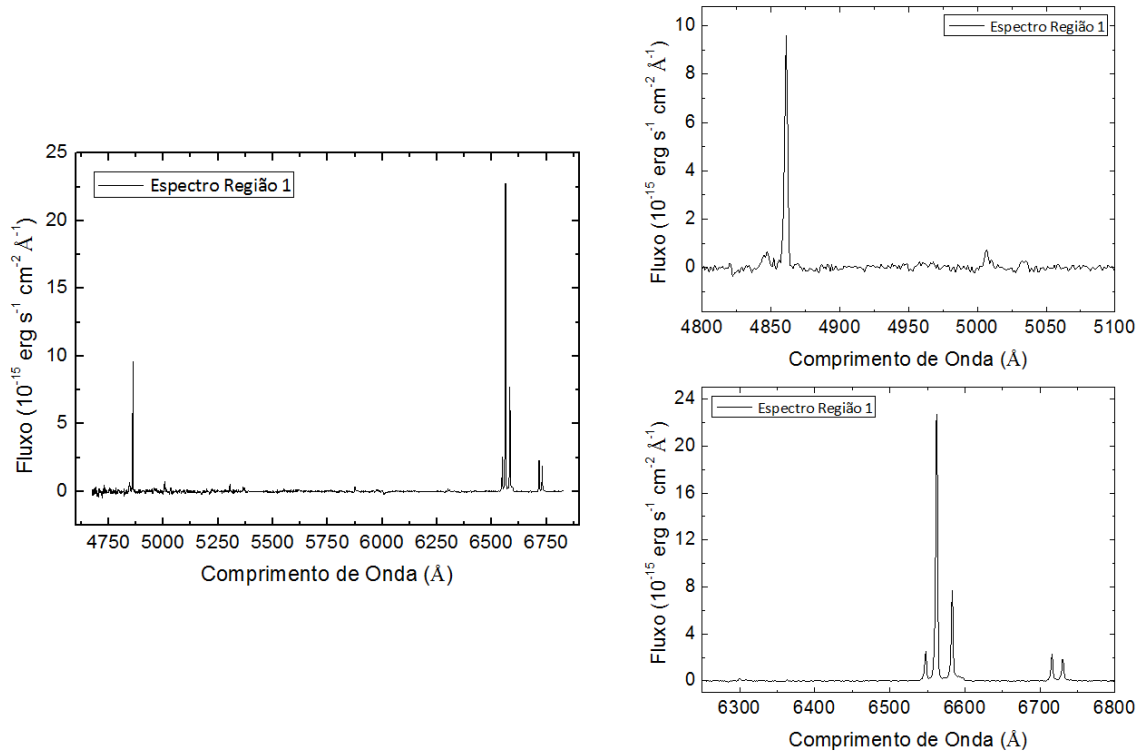


Figura 5.22: Espectro da Região 1 (ver Fig. 5.21A), com ampliações nas regiões azul e vermelha do espectro.

Como se pode notar, os espectros das regiões N1, N2, 6 e 7 apresentaram as linhas de $H\alpha + [N II]\lambda\lambda 6548, 6584$ e também as linhas de $[S II]\lambda\lambda 6716, 6731$ *blendadas*. Não há componentes largas de $H\alpha$ ou $H\beta$. Essa união das linhas se dá pelo fato das mesmas apresentarem valores consideravelmente elevados (da ordem de centenas de km/s) de FWHM, o que ainda não configura um objeto tipo 1.

Para calcular algumas das razões de linhas dessas regiões onde há linhas *blendadas*, foi preciso, primeiramente, separar tais linhas com um ajuste obtido com uma soma de funções gaussianas, da mesma forma que foi realizado em NGC 1566 (ver capítulo 3).

As linhas de $[SII]\lambda\lambda 6716, 6731$ foram ajustadas com uma soma de dois conjuntos de funções gaussianas. Foi assumida uma determinada velocidade (V) e largura (σ) para cada conjunto de gaussianas (componentes 1 e 2). Os valores do FWHM e V de cada componente para cada região, corrigidos devido à resolução instrumental, estão apresentados na tabela 5.6. Os valores dos FWHM das regiões onde não foi necessária a decomposição de linhas estão na tabela 5.7. Nota-se que as linhas dessas regiões são bem estreitas.

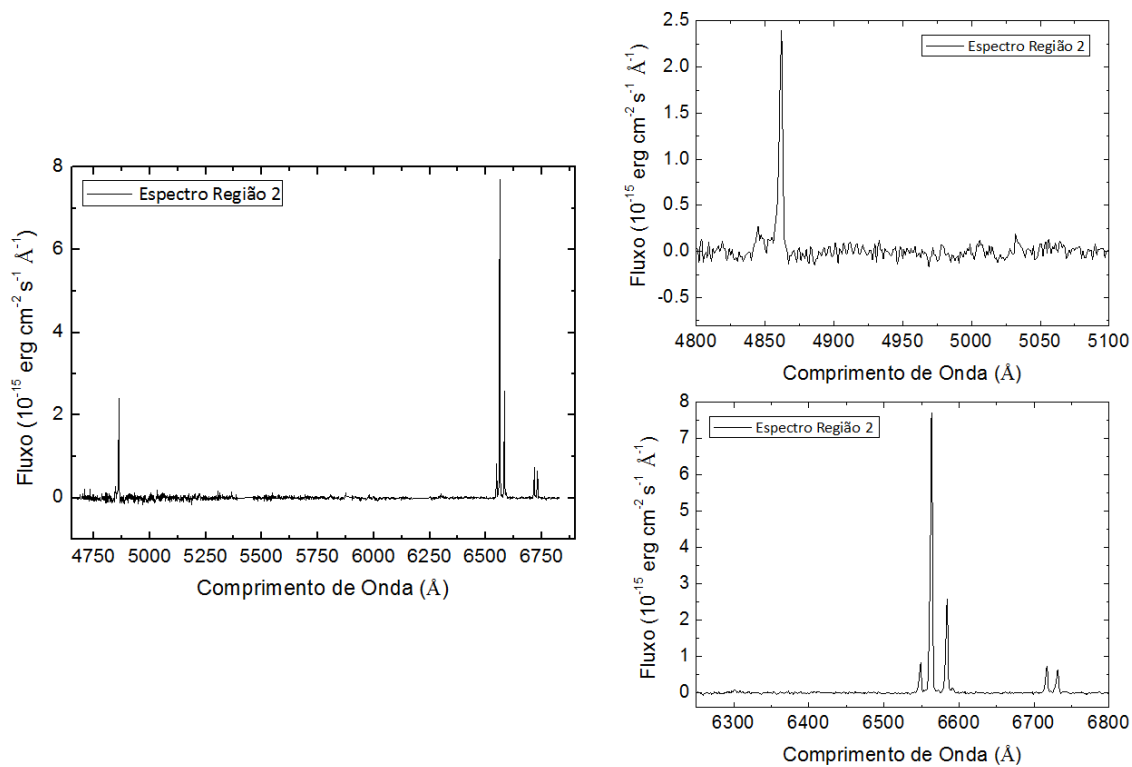


Figura 5.23: Espectro da Região 2 (ver Fig. 5.21B), com ampliações nas regiões azul e vermelha do espectro.

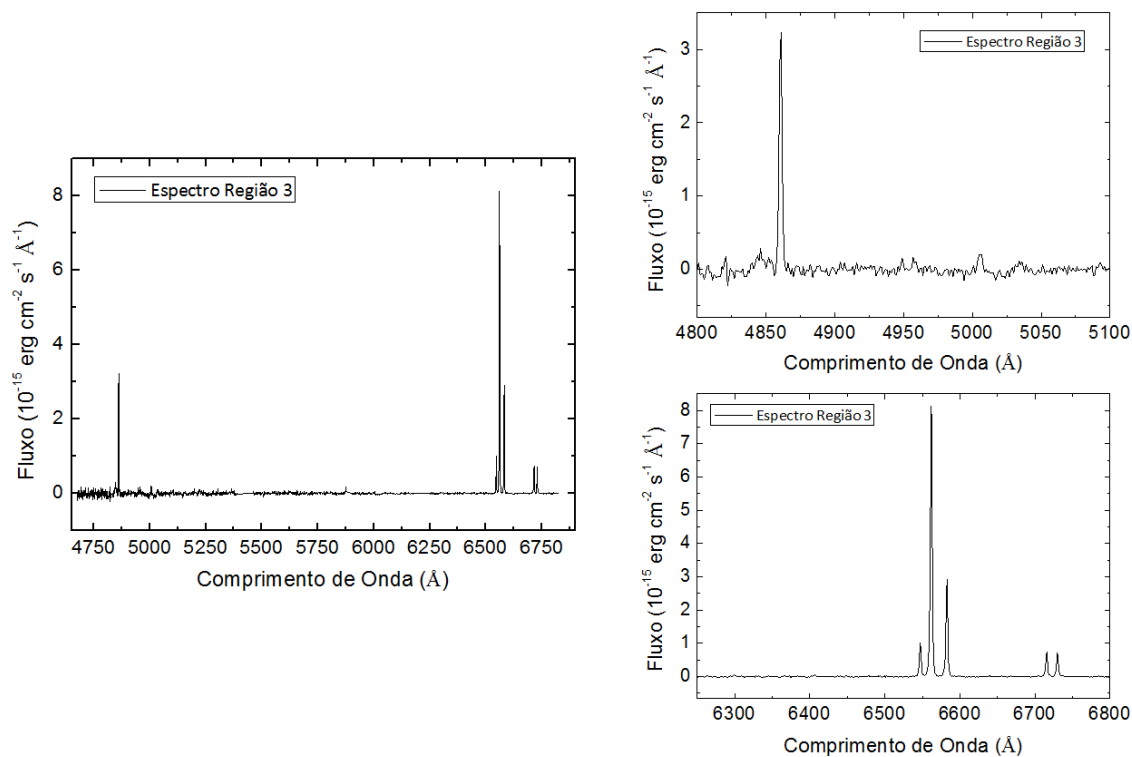


Figura 5.24: Espectro da Região 3 (ver Fig. 5.21B), com ampliações nas regiões azul e vermelha do espectro.

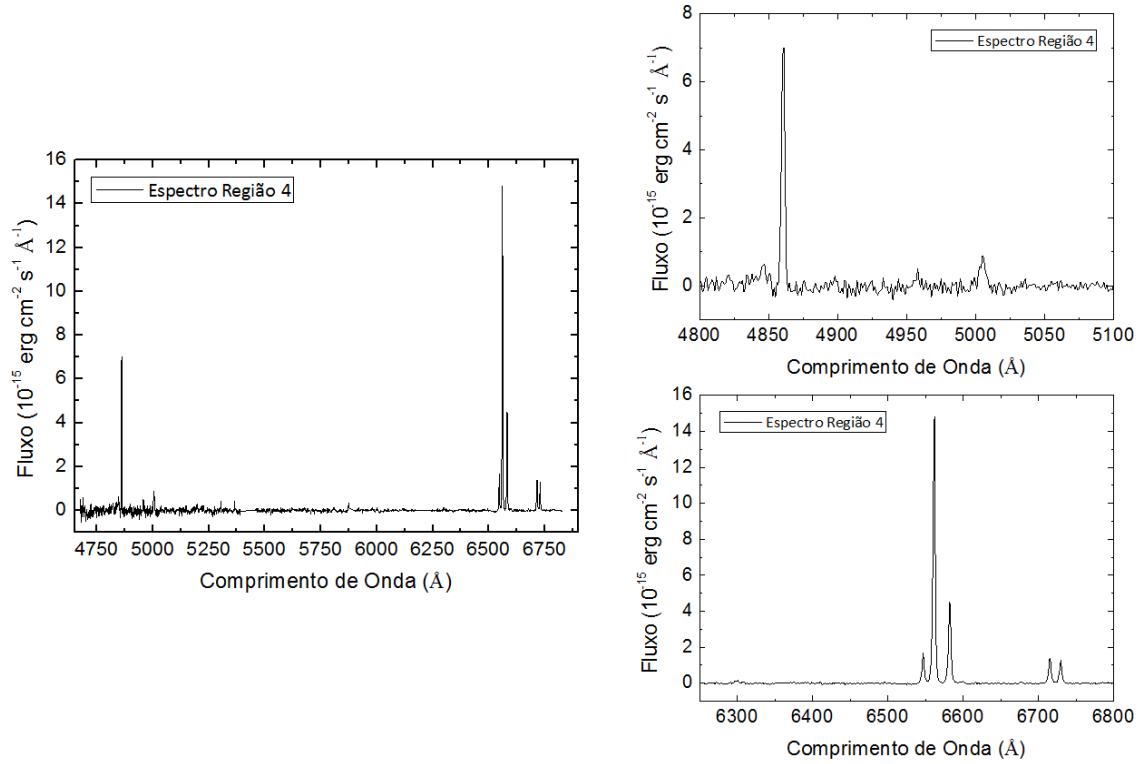


Figura 5.25: Espectro da Região 4 (ver Fig. 5.21B), com ampliações nas regiões azul e vermelha do espectro.

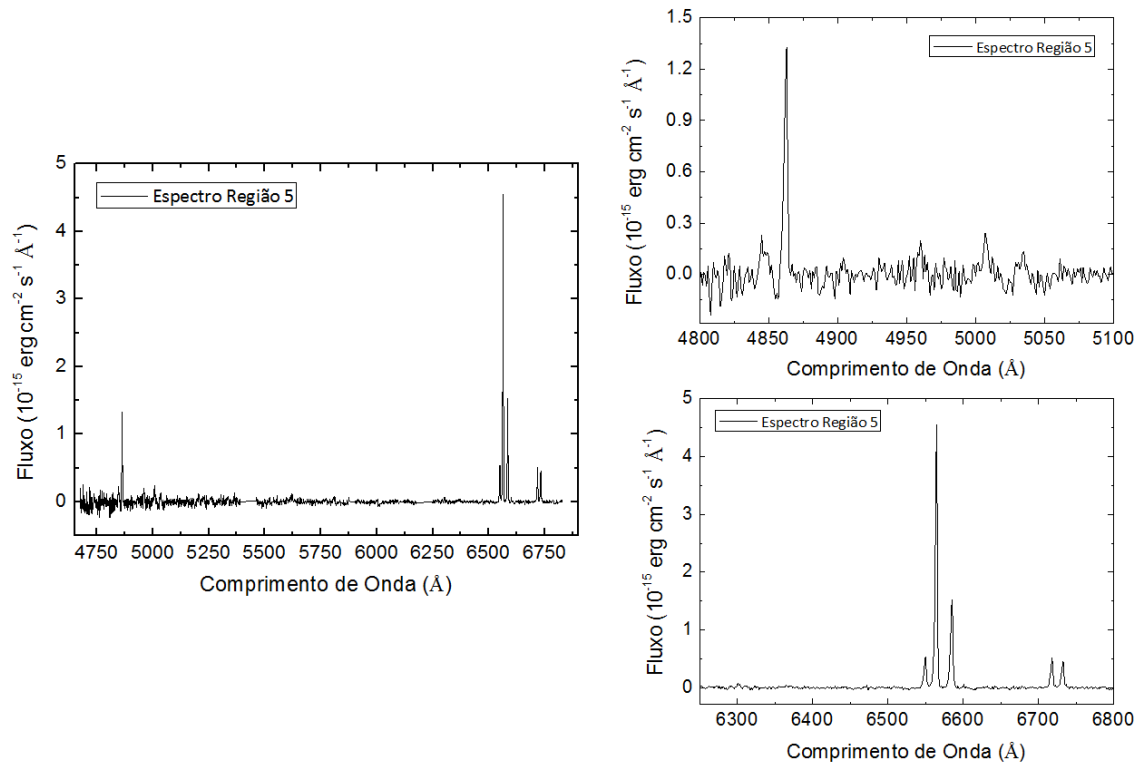


Figura 5.26: Espectro da Região 5 (ver Fig. 5.21C), com ampliações nas regiões azul e vermelha do espectro.

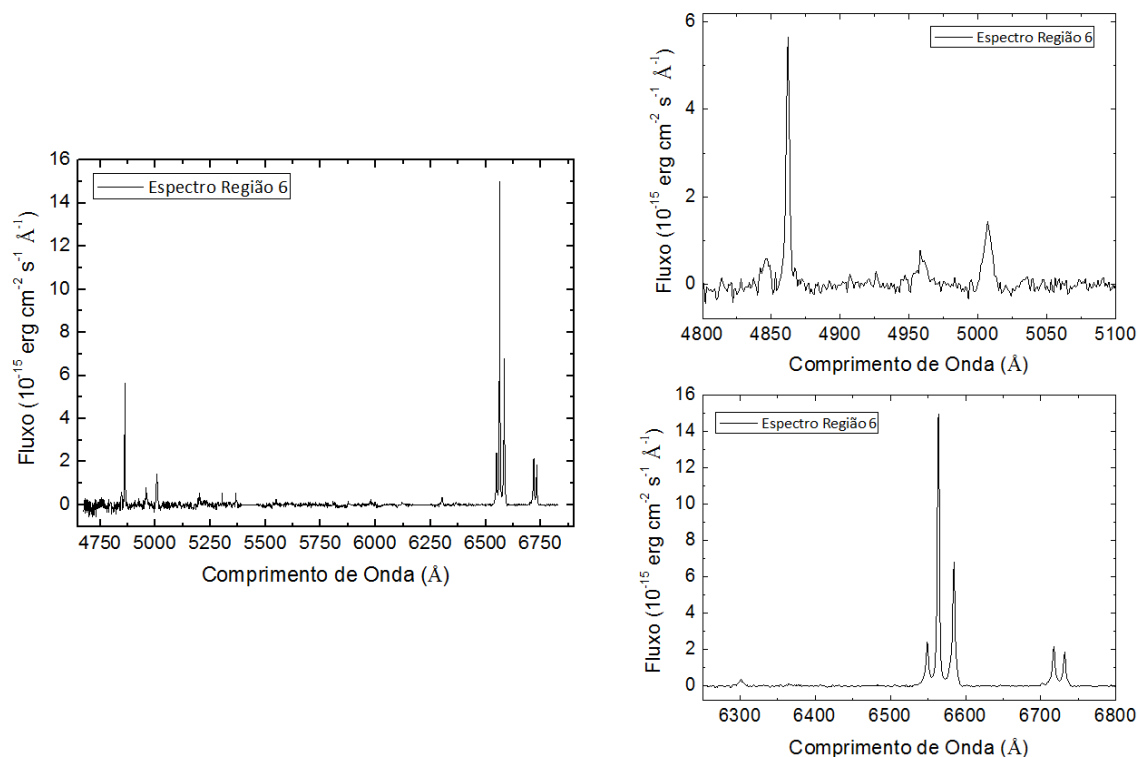


Figura 5.27: Espectro da Região 6 (ver Fig. 5.21C), com ampliações nas regiões azul e vermelha do espectro.

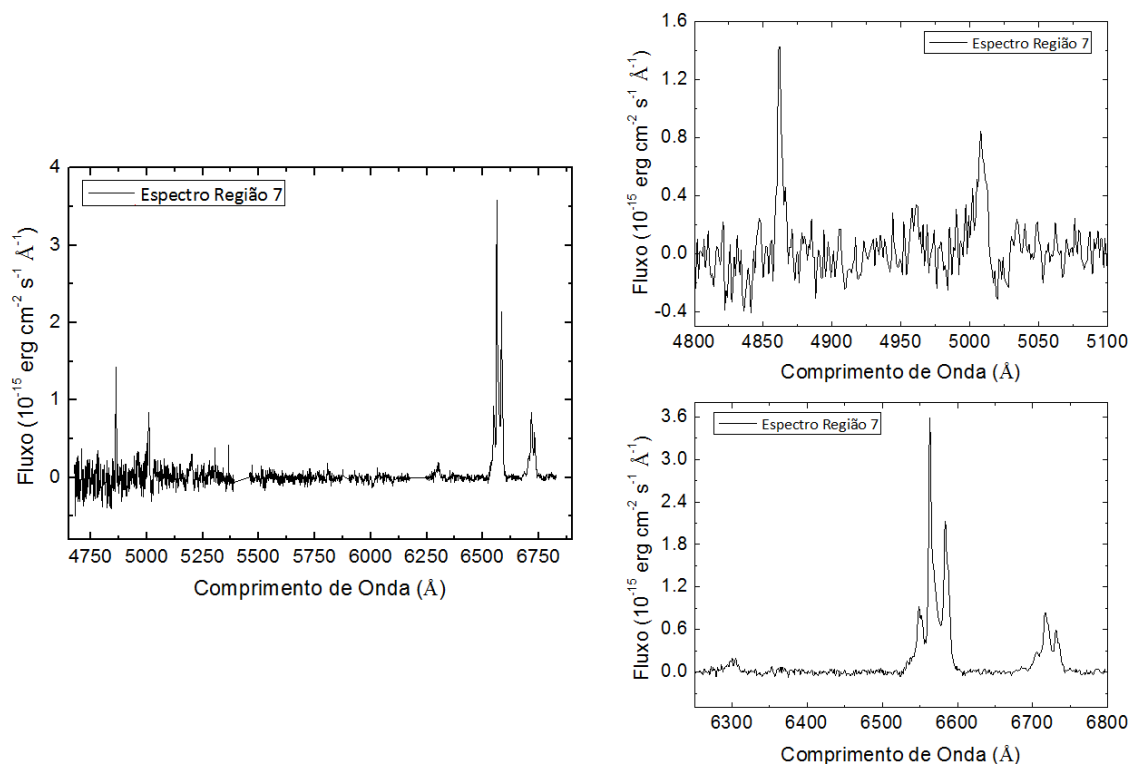


Figura 5.28: Espectro da Região 7 (ver Fig. 5.21D), com ampliações nas regiões azul e vermelha do espectro.

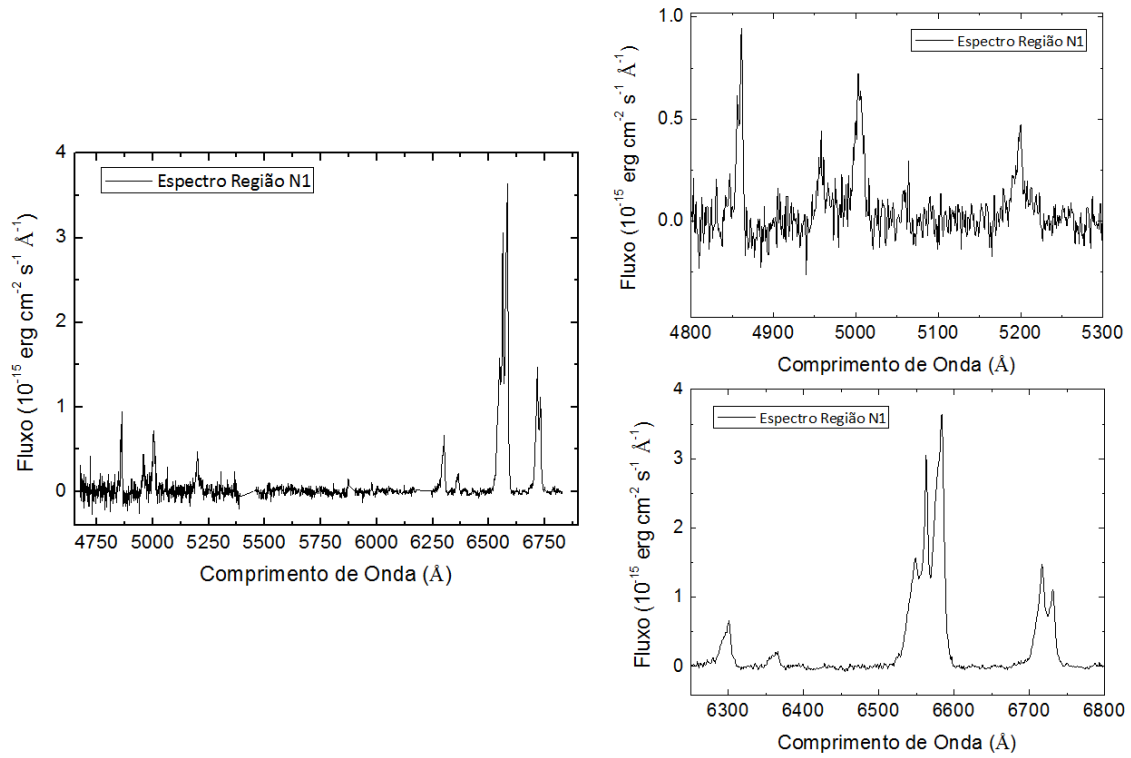


Figura 5.29: Espectro da Região N1 (ver Fig. 5.6), com ampliações nas regiões azul e vermelha do espectro.

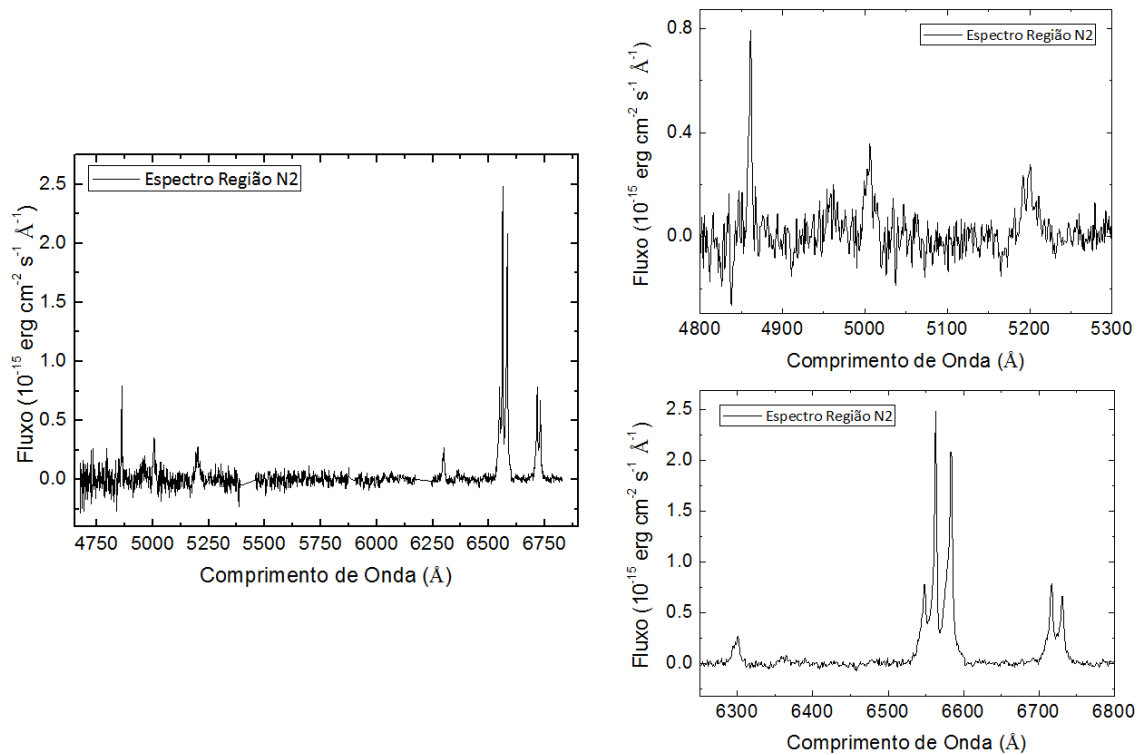


Figura 5.30: Espectro da Região N2 (ver Fig. 5.6), com ampliações nas regiões azul e vermelha do espectro.

Após isso, foram ajustadas as linhas de $[\text{N II}]\lambda\lambda 6548, 6584 + \text{H}\alpha$ com uma soma de dois conjuntos de três gaussianas, com os mesmos valores de velocidade e largura obtidos no ajuste de $[\text{SII}]$. Ou seja, da mesma forma que no caso de NGC 1566, as linhas de $[\text{SII}]$ foram tomadas como uma base para a determinação dos parâmetros das gaussianas das demais linhas. Como o objeto é tipo 2, as linhas $\text{H}\beta$ não foram decompostas e, nos ajustes da linha $\text{H}\alpha$, não foram acrescentadas gaussianas representando sua componente larga.

Tabela 5.5 - Luminosidades corrigidas de extinção das linhas $[\text{OIII}]\lambda 5007$, $[\text{NII}]\lambda 6584$ e $\text{H}\alpha$ de cada região de NGC 613

Regiões	Luminosidades (10^{38} erg/s)		
	$\text{H}\alpha$	$[\text{OIII}]\lambda 5007$	$[\text{NII}]\lambda 6584$
N1	23.0 ± 0.8	6.4 ± 0.5	41.1 ± 0.7
N2	11.6 ± 0.8	2.5 ± 0.3	14.3 ± 0.8
1	61 ± 3	2.0 ± 0.3	21.3 ± 2.4
2	21.6 ± 1.1	0.3 ± 0.3	7.3 ± 0.4
3	19.7 ± 1.0	0.12 ± 0.18	7.3 ± 0.4
4	42.5 ± 2.1	3.0 ± 0.5	15.2 ± 0.8
5	11.8 ± 0.6	0.93 ± 0.17	4.81 ± 0.24
6	46.1 ± 1.1	6.5 ± 0.6	28.4 ± 1.0
7	19.8 ± 1.4	5.3 ± 0.7	17.8 ± 2.1

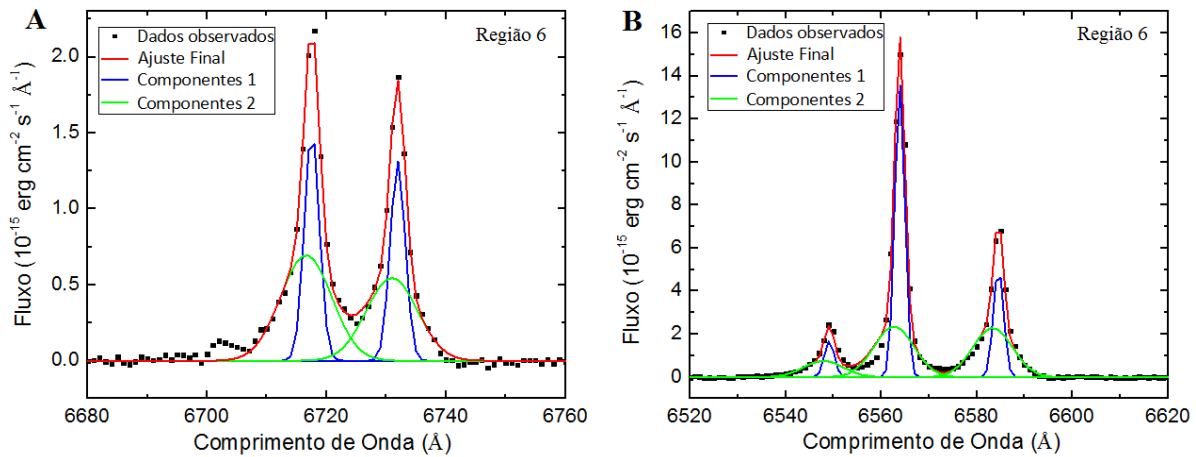
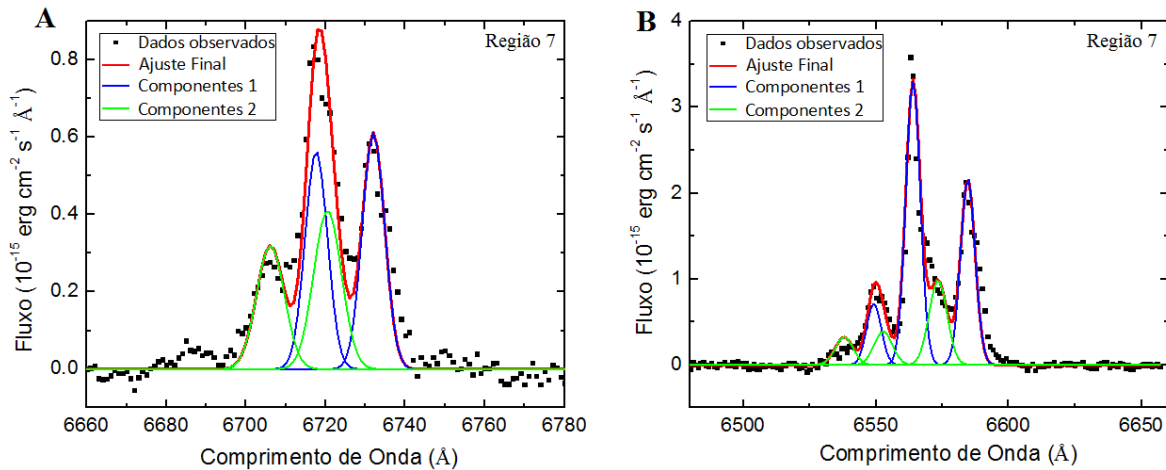
Tabela 5.6 - Tabela com os parâmetros das decomposições de linhas: valores do FWHM e V (velocidade com relação ao comprimento de onda de repouso) das componentes 1 e 2 de cada região de NGC 613

Regiões	FWHM (km/s)		V (km/s)	
	Componente 1	Componente 2	Componente 1	Componente 2
N1	220 ± 32	710 ± 53	33 ± 1.6	-156 ± 8
N2	155 ± 38	640 ± 137	6.4 ± 0.3	-103 ± 5
6	120 ± 21	445 ± 75	49 ± 3	7 ± 0.3
7	290 ± 10	350 ± 43	55 ± 3	-460 ± 23

Com os resultados das razões de linhas (tabela 5.10) e dos diagramas de diagnósticos (Figs. 5.35 e 5.36A e B), pode-se notar que o AGN localizado na Região N1 possui uma emissão compatível com a de LINERs e de alguns objetos de transição (de acordo com a classificação de Ho et al. (1997)), porém, no diagrama de diagnóstico de $[\text{OI}]\lambda 6300/\text{H}\alpha$, a emissão desse objeto é apenas compatível com a de LINER. Já a emissão da Região N2 é compatível com a de LINERs e objetos de transição em todos os diagramas. As emissões

Tabela 5.7 - FWHM das linhas das regiões 1, 2, 3, 4 e 5 de NGC 613

Regiões	FWHM (km/s)
1	133 ± 16
2	147 ± 14
3	132 ± 11
4	158 ± 8
5	160 ± 26

Figura 5.31: Decomposição das linhas [SII] λ 6716, 6731 (A) e o complexo H α e [NII] λ 6548, 6584 (B) da Região 6.Figura 5.32: Decomposição das linhas [SII] λ 6716, 6731 (A) e o complexo H α e [NII] λ 6548, 6584 (B) da Região 7.

das regiões de 1 a 7 são compatíveis com as de regiões HII, como se esperava. A emissão da Região 6 também é compatível com a de objetos de transição, de acordo com o critério definido por Kewley et al. (2006), e a emissão da Região 7 também é compatível com a de LINERs e objetos de transição. Isso é devido à posição que coincide com a do *outflow* da

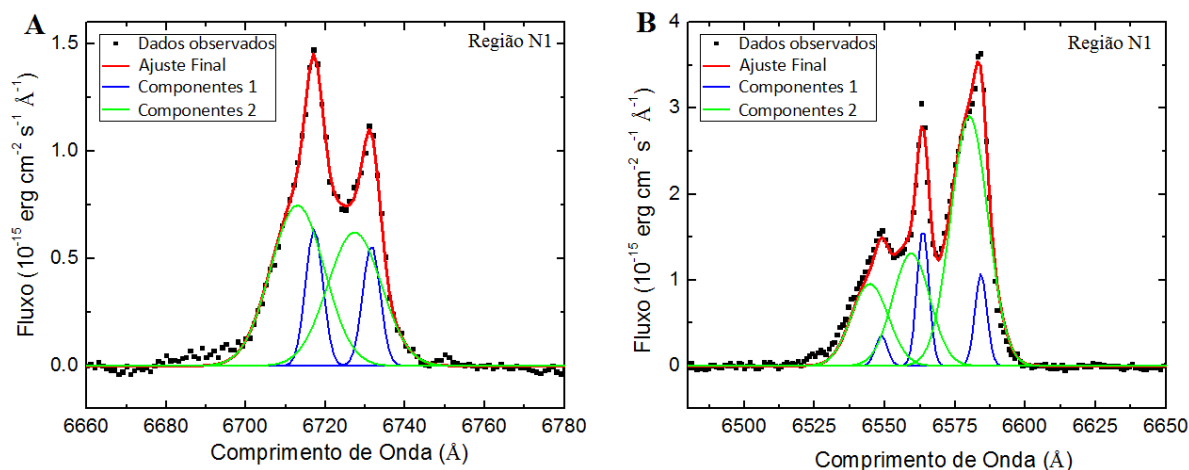


Figura 5.33: Decomposição das linhas [SII] λ 6716, 6731 (A) e o complexo H α e [NII] λ 6548, 6584 (B) da Região N1.

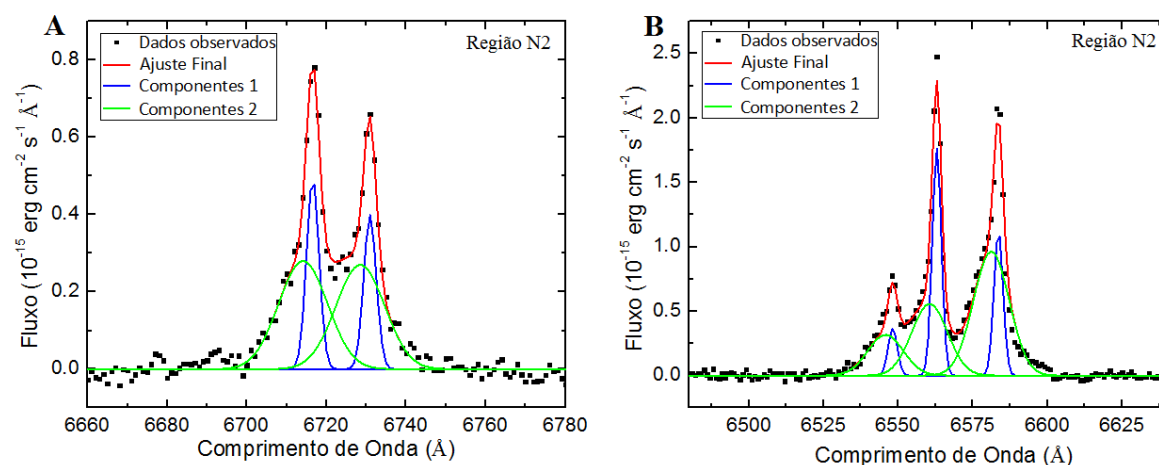


Figura 5.34: Decomposição das linhas [SII] λ 6716, 6731 (A) e o complexo H α e [NII] λ 6548, 6584 (B) da Região N2.

região N1, sugerindo, então, que esta região possa ser um cone de ionização do AGN ou uma região HII fortemente contaminada pela emissão do AGN e seu *outflow*.

Utilizando o valor do comprimento de onda central da gaussiana que descreve a linha H β , foi possível medir as velocidades das regiões em questão com relação à Região N1. Por haver um provável *outflow* na Região N1, as velocidades relativas foram todas positivas.

Os conjuntos tomograma/auto-espectro 2 da Tomografia PCA do cubo de gás total (Fig. 5.18) e tomograma/auto-espectro 3 da Tomografia PCA do cubo deconvoluído (Fig. 5.4) sugerem que as Regiões 5, 6 e 7 estão em *redshift* (portanto com velocidades mais positivas). As velocidades encontradas para essas regiões são coerentes com esses resultados. Da mesma forma, os conjuntos tomograma/auto-espectro 2 da Tomografia

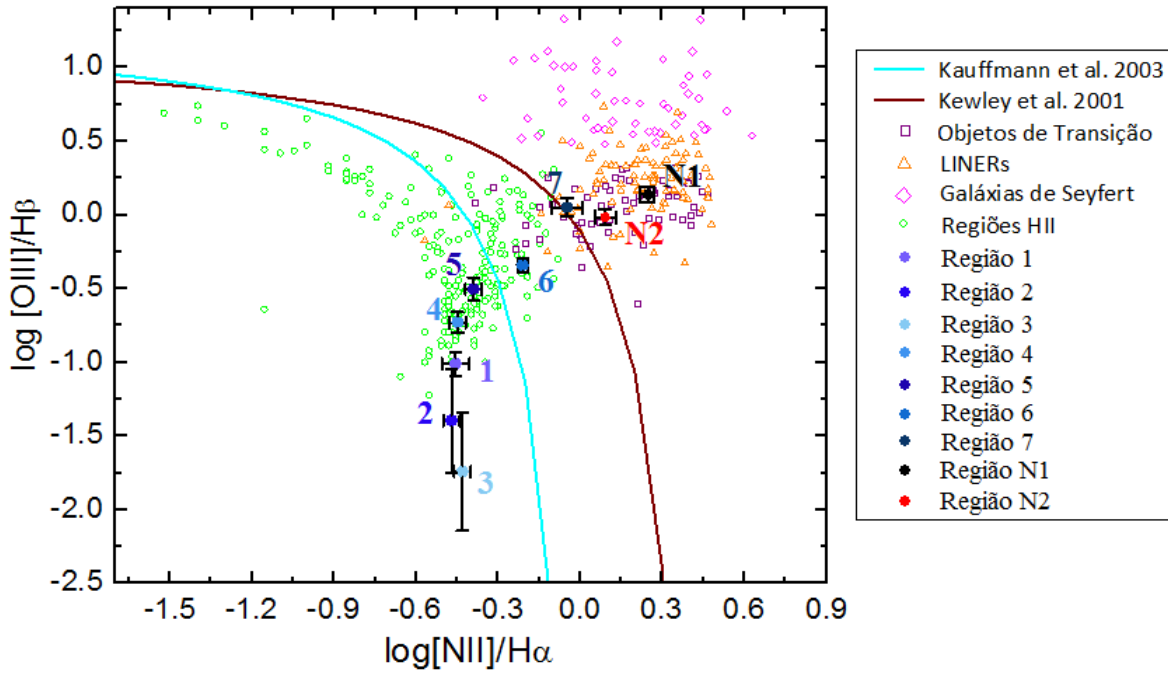


Figura 5.35: Diagrama de diagnóstico de $\log [OIII]\lambda 5007/H\beta$ versus $\log [NII]\lambda 6584/H\alpha$, contendo as razões de linha das 9 regiões observadas em NGC 613 (ver tabela 5.10). Esses pontos foram ajustados juntamente com os dados analisados por Ho et al. (1997): os círculos verdes são regiões HII, os triângulos laranjas são LINERs, os quadrados em roxo são objetos de transição e os losangos rosas representam as galáxias de Seyfert. O ajuste vinho mostra o limite máximo de ionização por um *starburst* obtido por Kewley et al. (2001) e o ajuste em ciano representa a divisão entre regiões HII e AGNs obtida por Kauffmann et al. (2003). A Região N1 está representada pelo ponto preto, a Região N2, pelo ponto em vermelho e as demais regiões (de 1 a 7) pelos pontos azuis.

Tabela 5.8 - Velocidades relativas à Região N1 das demais regiões de NGC 613, calculadas a partir do comprimento de onda central da linha de H β

Regiões	Velocidade relativa à Região N1
N2	71 ± 5
1	78 ± 5
2	110 ± 5
3	54 ± 5
4	48 ± 6
5	168 ± 6
6	137 ± 5
7	129 ± 7

PCA do cubo deconvoluído total (Fig. 5.3) e tomograma/auto-espectro 1 da Tomografia PCA do cubo de gás total (Fig. 5.17) sugerem que as regiões 1, 3 e 4 estão em *blueshift*

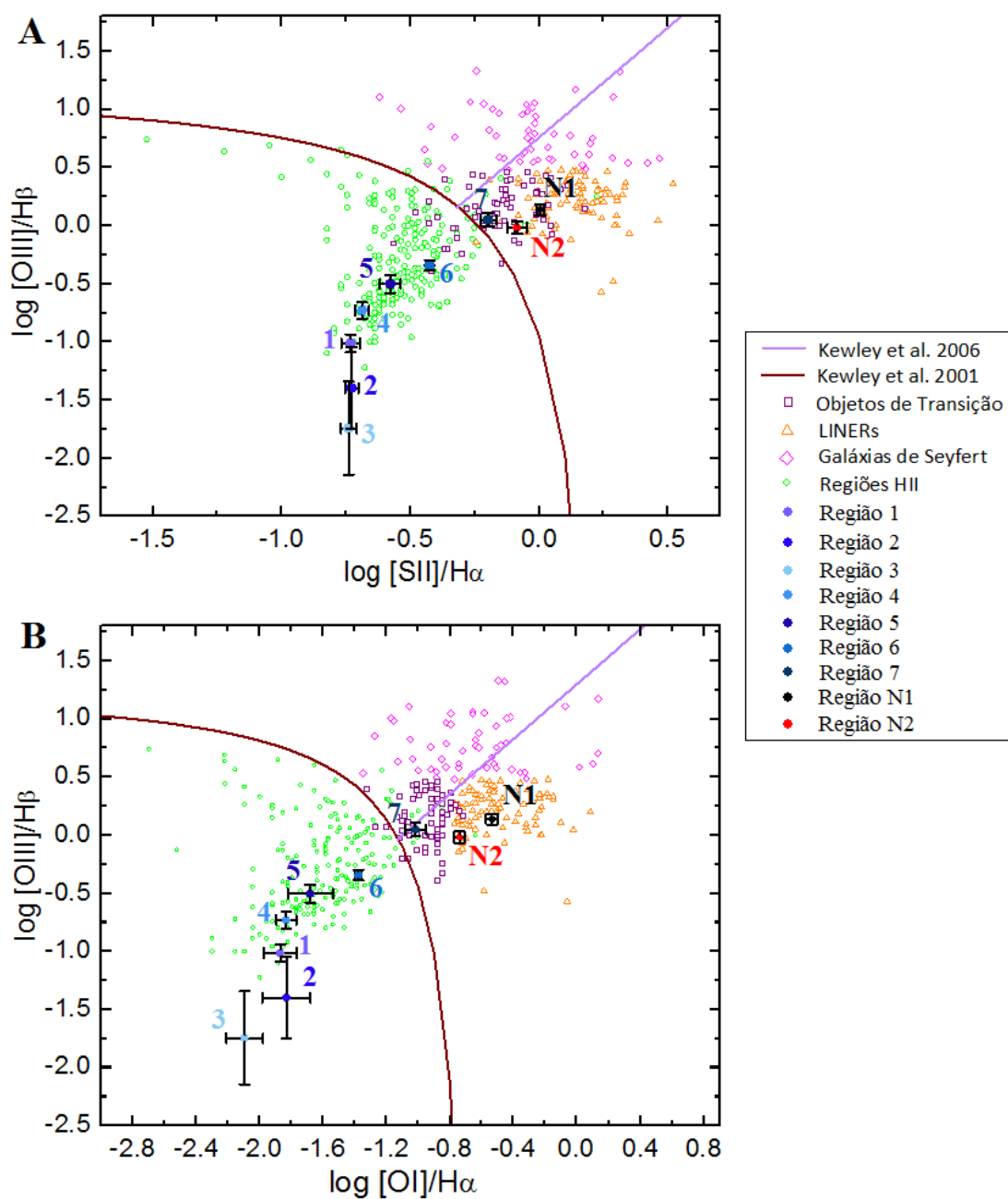


Figura 5.36: Diagramas de diagnósticos de $\log [OIII]\lambda 5007/H\beta$ versus $\log ([SII]\lambda 6716+6731)/H\alpha$ (A) e $\log [OIII]\lambda 5007/H\beta$ versus $\log [OI]\lambda 6300/H\alpha$ (B), contendo as razões de linha das 9 regiões observadas em NGC 613 (ver tabela 5.10). Esses pontos foram ajustados juntamente com os dados analisados por Ho et al. (1997): os círculos verdes são regiões HII, os triângulos laranjas são LINERs, os quadrados em roxo são objetos de transição e os losangos rosas representam as galáxias de Seyfert. O ajuste vinho mostra o limite máximo de ionização por um *starburst* obtido por Kewley et al. (2001) e o ajuste em lilás representa a divisão entre galáxias de Seyfert e LINERs criada por Kewley et al. (2006). A Região N1 está representada pelo ponto preto, a Região N2, pelo ponto em vermelho e as demais regiões (de 1 a 7) pelos pontos azuis.

(portanto, com velocidades menores). Esse resultado também é confirmado no cálculo das velocidades.

Tabela 5.9 - Tabela das densidades eletrônicas (d) das regiões de NGC 613, calculadas como descrito na seção 3.7.3 do capítulo 3

Regiões	Densidade Eletrônica (cm^{-3})
N1	$3 \leq d \leq 1070$
1	376^{+348}_{-217}
2	359^{+146}_{-115}
3	393^{+250}_{-163}
4	287^{+141}_{-117}
5	485^{+511}_{-281}
6	$3 \leq d \leq 9680$
7	$327 \leq d \leq 6620$

Como foi discutido na seção 3.7.3 do capítulo 3, é possível, a partir das razões de linhas $[SII]\lambda 6716/[SII]\lambda 6731$, estimar a densidade eletrônica de uma nuvem emissora. A questão é que, quanto maior a variação dessa razão de linhas (ou seja, sua incerteza), muito maior será a variação das densidades. Em alguns casos calculados nas regiões de NGC 613 (ver tabela 5.9), os valores das incertezas foram tão grandes que foi melhor apresentar os valores mínimo e máximo de densidade. No caso da Região N2, a incerteza da razão é tão grande que não foi possível sequer obter um intervalo de densidades. As densidades eletrônicas das regiões 1, 2, 3, 4 e 5 parecem ser compatíveis entre si.

5.8 *Imagens da emissão de $[SII]\lambda\lambda 6716, 6731$ das nuvens de alta e baixa densidades*

As imagens da emissão de $[SII]\lambda\lambda 6716, 6731$ das nuvens de alta e baixa densidades foram criadas de acordo com o que está descrito na seção 2.4.5 do capítulo 2.

A imagem da emissão de $[SII]\lambda\lambda 6716, 6731$ das nuvens de alta densidade (Fig. 5.37A) mostra que a concentração dessas nuvens se dá, principalmente, em 2 regiões do FOV: uma centrada em $(-0''.4, -0''.2)$ e outra, bem mais difusa, em $(1'', -0''.6)$. A primeira região coincide com a posição do AGN (Região N1) e a segunda com parte da Região 1, que é uma região HII, como foi visto anteriormente.

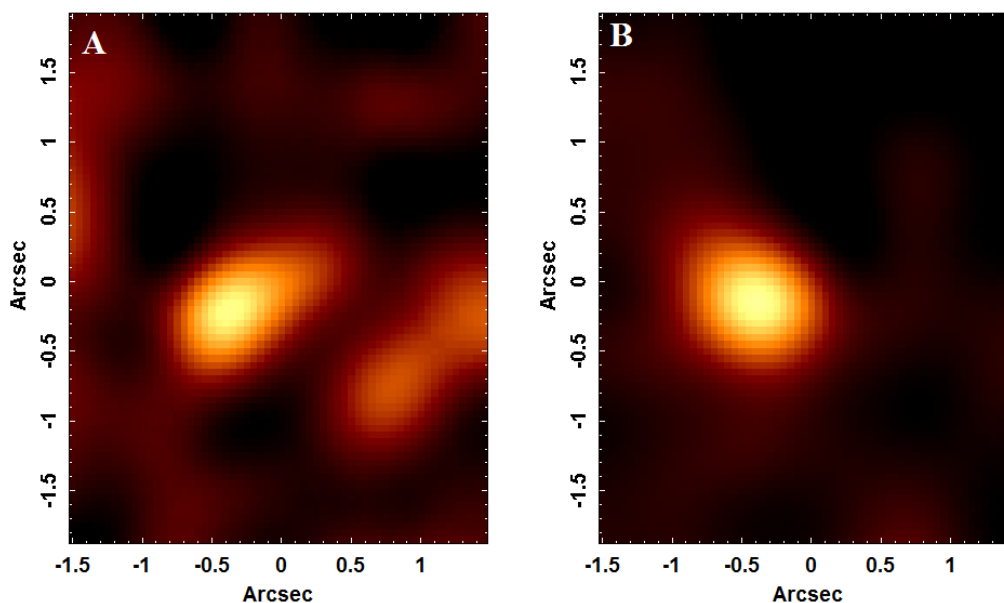


Figura 5.37: Imagens da emissão de $[\text{SII}]\lambda\lambda 6716, 6731$ das nuvens de alta (A) e baixa densidades (B).

A imagem da emissão de $[\text{SII}]\lambda\lambda 6716, 6731$ das nuvens de baixa densidade (Fig. 5.37B) mostra apenas a Região N1, que é onde se encontra o AGN. As áreas de emissão dessa nuvem e da nuvem de alta densidade não diferem muito entre si.

5.9 Análise com imagens do HST

É possível notar, através das imagens das regiões HII (Fig. 5.21), que elas estão espalhadas nos limites do FOV do GMOS. Além disso NGC 613 parece possuir uma estrutura nuclear dupla, como foi discutido anteriormente (Fig. 5.7). Com o objetivo de visualizar essas estruturas em maior escala, foram analisadas imagens do HST, obtidas com o WFPC2 nos filtros F450W, F606W e F814W (ver Figs. 5.38A, B e C, respectivamente). Então foi feita uma composição RGB destes 3 filtros, sendo o filtro F450W em azul, F606W em verde e F814W em vermelho. As regiões mais azuis são aquelas onde, provavelmente, há populações estelares jovens e emissão de *featureless continuum* e as mais vermelhas, onde há mais poeira ou populações estelares mais velhas (ver Fig. 5.39).

Notam-se na Fig. 5.38A, do filtro F450W, as duas regiões centrais N1 e N2, além de algumas regiões HII que foram citadas anteriormente (as regiões 3, 4, 5, 6 e 7). Além disso, é possível notar que a Região N2 é mais brilhante nesse filtro do que a Região N1.

A Fig. 5.38B mostra o filtro F606W, no intervalo espectral intermediário. Neste caso,

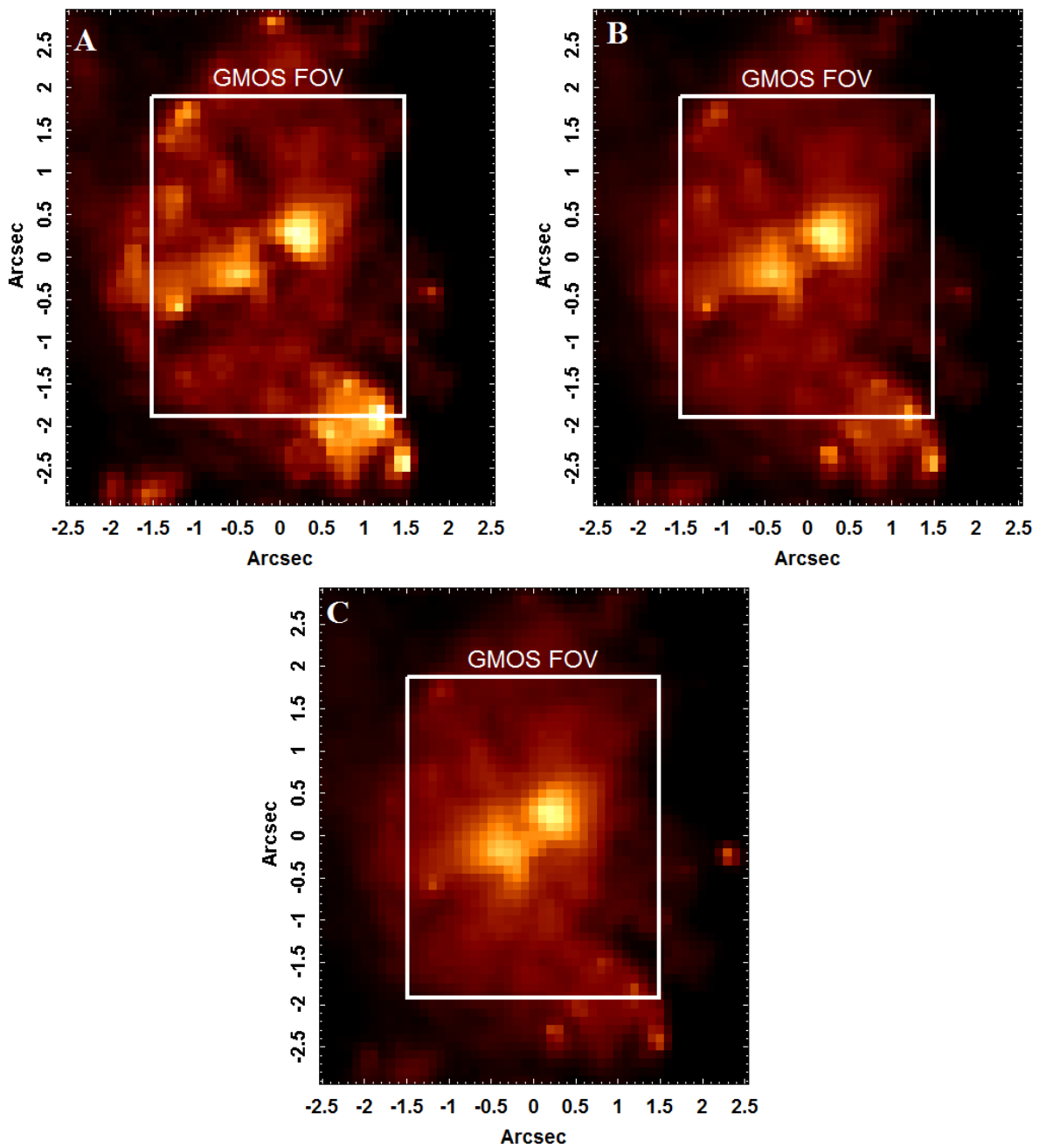


Figura 5.38: Imagens dos filtros F450W (A), F606W (B) e F814W (C) do HST de NGC 613.

as duas regiões centrais são evidentes e a Região N2 novamente é mais brilhante do que a Região N1. As regiões HII estão mais difusas nesta imagem.

Da mesma forma que as imagens dos filtros anteriores, a imagem do filtro F814W (Fig. 5.38C) também mostra as duas regiões centrais, com a Região N2 sendo a mais brilhante, e as regiões HII, que estão ainda bem mais difusas do que no filtro F606W.

Em todos os filtros há a presença de uma faixa escura dividindo as duas regiões N1 e

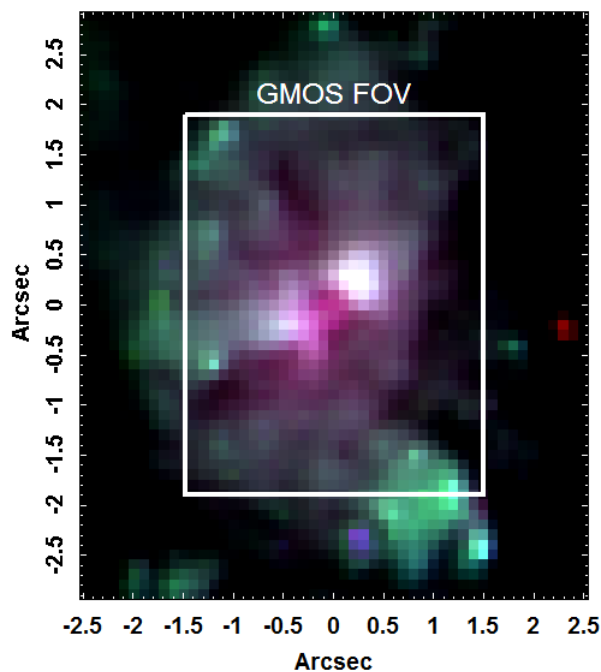


Figura 5.39: Composição RGB dos filtros F450W (em azul), F606W (em verde) e F814W (em vermelho) do HST de NGC 613.

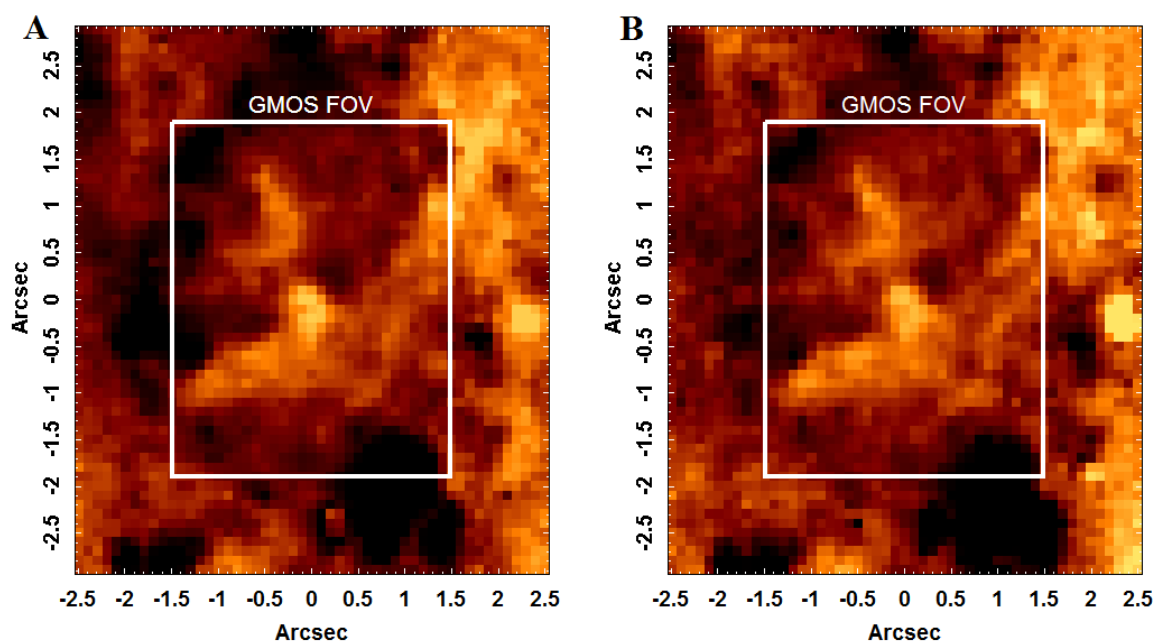


Figura 5.40: Imagens de (A) F450W-F814W (similar a B-I) e (B) F606W-F814W (similar a V-I) do HST de NGC 613.

N2, o que não é perceptível nas imagens do GMOS.

A composição RGB dos filtros do HST (Fig. 5.39) revela que a Região N2 é de fato mais azul que a Região N1. Além disso, é possível perceber que há uma faixa vermelha entre essas duas regiões, que, provavelmente, representa a presença de poeira nessa área. Nota-se

a região de poeira que foi vista no mapa de A_V obtido pela síntese espectral (Fig. 5.11A) ao redor das regiões N1 e N2, mas o ligeiro aumento de A_V entre elas (que pode estar associado à faixa vermelha vista na composição RGB da Fig. 5.39) é sutil. As regiões HII 3, 4, 6, 7 e 5 (difusa) são perceptíveis em verde (devido à emissão de $H\alpha$, muito significativa em regiões HII, que está contida no filtro F606W). A Região 2 e grande parte da Região 1 não são observadas, devido à lateral direita do FOV (que coincide com a borda direita com baixo S/N) apresentar uma considerável extinção por poeira.

Nas imagens das subtrações F450W-F814W (similar a B-I) e F606W-F814W (similar a V-I) (Fig. 5.40), as áreas claras apresentam um espectro mais avermelhado, provavelmente devido à emissão de estrelas velhas ou à extinção por poeira, e as regiões escuras apresentam o espectro mais azulado, provavelmente devido à emissão de um *featureless continuum* do AGN ou de populações estelares jovens. É evidente o pico em vermelho entre as regiões N1 e N2 e também a alta extinção na região da borda direita (obscurecendo as regiões 1 e 2), o que é consistente com a imagem de S/N (por isso essa região foi excluída da análise dos mapas fornecidos pela síntese espectral e pelo pPXF). Conforme mencionado anteriormente, o aumento da extinção entre as Regiões N1 e N2 revelado pelo mapa de A_V fornecido pela síntese espectral (Fig. 5.11A) é bastante sutil. Mesmo assim, pode-se notar a clara diminuição de A_V nas Regiões N1 e N2, o que é consistente com as imagens das Figs. 5.39 e 5.40. Essa última figura também mostra que a região onde o *featureless continuum* foi detectado (Fig. 5.13) apresenta um espectro mais avermelhado, sustentando a hipótese de que essa emissão seja espalhada pela poeira. Pelo menos parte da Região N1 coincide com o pico da emissão vermelha, o que pode indicar que a emissão dessa área está, no mínimo, parcialmente obscurecida pela poeira. Há picos de emissão mais azulada nas regiões 3, 4, 6 e 7, o que indica que estas áreas (que são regiões HII) possuem grande quantidade de estrelas jovens, o que é de se esperar.

5.10 Composição RGB de $[NI]\lambda\lambda 5198, 5200$

Como já foi dito anteriormente, o duplete $[NI]\lambda\lambda 5198, 5200$ possui uma intensidade muito incomum neste cubo de dados. Esse duplete possui densidades críticas dos níveis de energia bem baixas: $6.1 \times 10^2 \text{cm}^{-3}$ e $2.0 \times 10^3 \text{cm}^{-3}$. A alta intensidade dessa linha e sua largura sugerem que o gás de baixa densidade possui alta velocidade, como uma

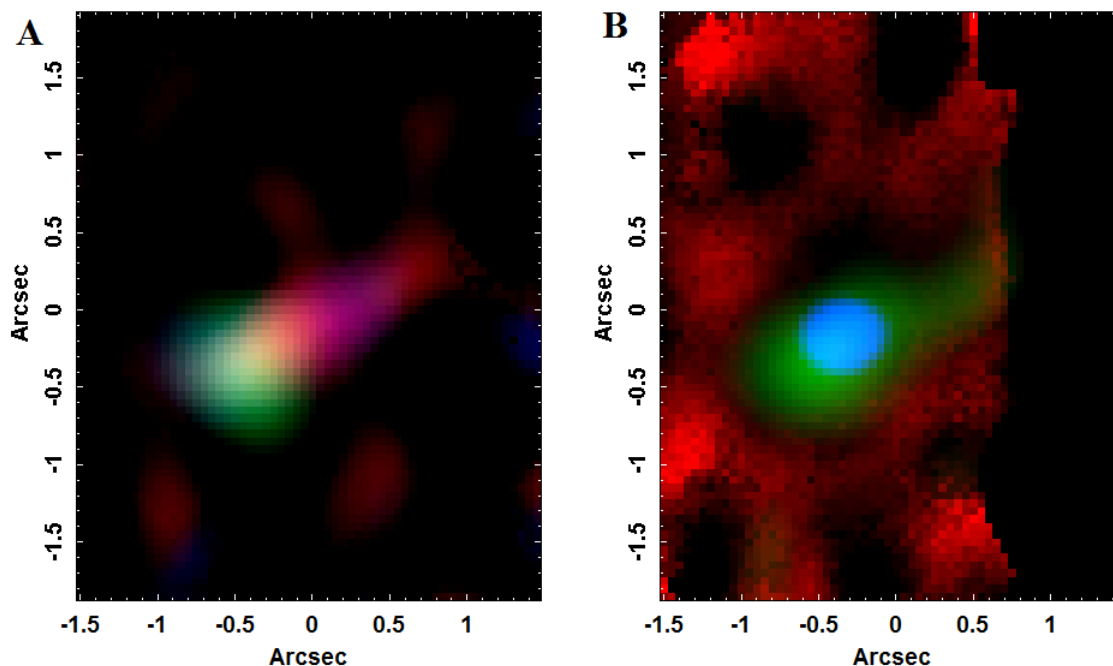


Figura 5.41: Composição RGB do dupletto $[NI]\lambda\lambda 5198, 5200$. (A) Em verde: imagem do intervalo de comprimento de onda central do dupletto. Em azul: imagem da asa azul do dupletto. Em vermelho: imagem da asa vermelha do dupletto. (B) Em vermelho: imagem da extinção obtida na síntese espectral. Em azul: imagem da linha $[OI]\lambda 6300$, evidenciando a posição do AGN na Região N1. Em verde: imagem do dupletto $[NI]\lambda\lambda 5198, 5200$.

onda de choque, que pode ser devida ao recente *merger* dessa galáxia ou a colisão dos bojos. Falcón-Barroso et al. (2014); Böker et al. (2008) citam que o gás no núcleo é também ionizado por aquecimento via choque, o que é compatível com o que se vê aqui. A Fig. 5.41A mostra a configuração que essa emissão possui: ela está localizada no meio do FOV, com velocidades mais baixas na linha de visada mais próximas à Região N1 e velocidades maiores mais próximas à Região N2. Essa emissão coincide com o AGN da Região N1 e está também anti-correlacionada com a emissão de poeira, como se pode ver na composição RGB da Fig. 5.41B. Além disso, sua orientação não é compatível com a orientação do jato em rádio (comparar com a Fig. 5.43), o que sugere que a emissão em rádio não é a causa dessa possível onda de choque; sua orientação é compatível com a posição dos bojos, o que sugere que a onda de choque é proveniente da colisão dos mesmos.

5.11 Discussão e conclusão

5.11.1 O AGN (Região N1)

Existem duas regiões emissoras principais em NGC 613, como mostra a imagem colapsada do cubo deconvoluído (Fig. 5.1). A primeira delas é a Região N1, que está centrada em $(-0^{\circ}.6, -0^{\circ}.2)$ - ver Fig. 5.7. Essa área clara aparece nos tomogramas 1 (Fig. 5.2) e 3 (Fig. 5.4) da Tomografia PCA aplicada ao cubo deconvoluído, 1 da Tomografia PCA aplicada apenas ao CCD 2 do cubo deconvoluído (Fig. 5.6) e 3 da Tomografia PCA aplicada ao cubo de gás (Fig. 5.19). Os auto-espectros desses tomogramas possuem várias características em comum, que revelam o que há na Região N1. Linhas de emissão razoavelmente largas aparecem nesse auto-espectros; além disso, a Região N1 apresenta emissão de $[\text{OI}]\lambda 6300$, que é uma linha típica de AGNs. O espectro extraído dessa região confirma a correlação com essas componentes largas e a presença da emissão de $[\text{OI}]\lambda 6300$ (Fig. 5.29), e suas razões de linhas são compatíveis com a emissão de LINERs e objetos de transição, de acordo com a classificação de Ho et al. (1997) (Figs. 5.35 e 5.36).

A partir da síntese espectral é possível notar a presença de um *featureless continuum* emitido pelo AGN. Tal emissão, entretanto, não está localizada na mesma posição do AGN (Figs. 5.11D e 5.13), o que pode ser uma consequência de extinção por poeira ou mesmo espalhamento do *featureless continuum* por poeira.

A síntese espectral realizada apenas na Região N1 (ver Fig. 5.12A) mostra que existe uma grande fração de fluxo atribuída a populações estelares jovens com alta metalicidade. Isso pode não ser real, visto que essas populações jovens possuem poucas e rasas linhas de absorção, que podem ser facilmente confundidas com a emissão do *featureless continuum*. Acredita-se, então, que o *software* STARLIGHT tenha identificado incorretamente essa emissão nessa região e que pode haver um *featureless continuum* com índice espectral diferente de 1.5, como no caso de NGC 1566, mas, neste caso, não há como separá-lo. Além da grande fração de fluxo de populações jovens, foram também detectadas populações velhas com alta e média metalicidades.

A Região N1 pode ser aquela da qual as estrelas giram em torno, visto que o eixo de rotação estelar parece sugerir isso (Fig. 5.15A). Ela também pode fazer parte do eixo de rotação do gás, como se nota nos tomogramas/auto-espectros 1 e 2 da Tomografia PCA aplicada cubo de gás (Figs. 5.17 e 5.18) e 2 e 3 da Tomografia PCA do cubo deconvoluído

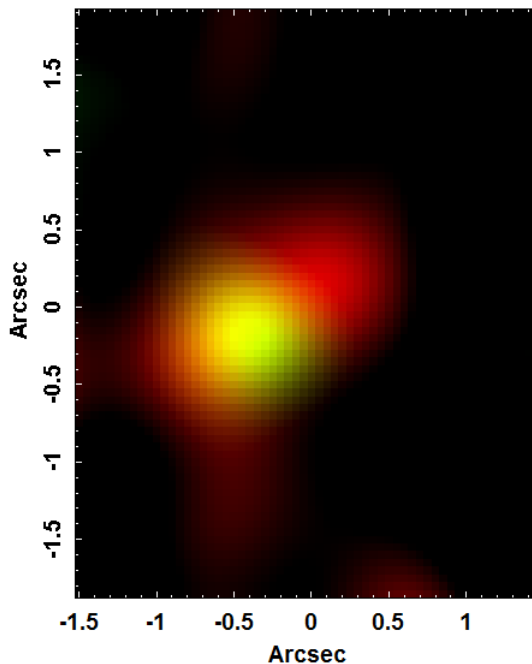


Figura 5.42: Composição RG da imagem da integral do cubo sintético estelar (em vermelho) e do tomograma 3 da Tomografia PCA do cubo de gás, representando a Região N1.

total (Figs.5.3 e 5.4). Além disso, esta região também pode estar associada a um *outflow*, como foi constatado no cálculo (utilizando a linha $H\beta$) das velocidades relativas das demais regiões HII com relação a ela (tabela 5.8).

A concentração das nuvens de alta e baixa densidade se dá também na Região N1. A imagem integrada do cubo sintético estelar obtido com STARLIGHT composta com a imagem da Região N1 (que foi isolada pelo tomograma 3 da Tomografia PCA do cubo de gás -ver Fig. 5.19) mostra que as regiões N1 e N2 compõem uma estrutura similar a um núcleo duplo na região central de NGC 613 (ver Fig. 5.42).

As imagens do HST da região nuclear de NGC 613 (ver seção 5.9) mostraram que a Região N1 é menos azul que a Região N2. Também é possível notar que existe um pico de emissão vermelha entre as duas regiões e parte da Região N1, sugerindo que esta área sofre grande extinção por poeira.

5.11.2 A Região N2

A Região N2 é bastante relevante nos dados de NGC 613. Ela aparece na imagem colapsada do cubo total deconvoluido (Fig. 5.1), mais difusa do que a Região N1 e, sua distância projetada com relação à Região N1 é 82 pc (ver tabela 5.4). Da mesma forma,

aparece no tomograma 1 da Tomografia PCA do cubo deconvoluído total (Fig 5.2). Já no tomograma 1 da Tomografia PCA aplicada ao CCD 2 do cubo deconvoluído, ela aparece com intensidade comparável com a da Região N1, mostrando que ela também possui importância em termos da emissão estelar. Na Tomografia PCA do cubo de gás ela não aparece, o que pode significar que a emissão de gás dessa região não é tão relevante quanto sua emissão estelar.

A síntese espectral revelou que a maior fração do fluxo dessa região está associada a populações estelares jovens de alta metalicidade (representando $\sim 55\%$ da fração de fluxo total normalizada). Por outro lado, também há uma fração de fluxo significativa devida a populações estelares velhas com média metalicidade e a populações de idade intermediária e alta metalicidade, que não estão presentes na Região N1.

A Região N2 é bem evidente nas imagens do HST (ver seção 5.9), possuindo um espectro aparentemente mais azul do que a Região N1. Acredita-se que isso esteja associado à extinção por poeira.

As razões de linhas do espectro extraído da Região N2 mostram que a emissão dessa área é compatível com a de LINERs ou objetos de transição, com grau de ionização bem semelhante ao da Região N1. A hipótese dessa região ser um LINER e, assim, de NGC 613 ter um AGN duplo não pode ser descartada. Nesse caso, essa galáxia deve ter passado por um *merger* e os dois buracos negros centrais resultantes desse *merger* estão agora caindo em direção ao centro da galáxia (devendo se fundir no futuro). De acordo com esse cenário, os dois bojos estão se chocando entre si e essa hipótese é sustentada pela presença de $[\text{NI}]\lambda\lambda 5198, 5200$ com uma intensidade incomum nessas áreas, sugerindo uma onda de choque. Além disso, Falcón-Barroso et al. (2014) e Böker et al. (2008) citam que existe gás no núcleo que está sendo aquecido por choque, o que reforça esse cenário. A hipótese de *merger* está de acordo com os resultados da síntese espectral, que detectou um pico de populações estelares com 1 bilhão de anos mais presente nas regiões circumnucleares (Fig. 5.14) do que nos bojos, que é o que se espera quando ocorre um *merger*. Esse cenário assume que as duas galáxias que passaram por esse processo possuíam bojos bem parecidos, por isso a presença de populações parecidas nas regiões N1 e N2.

Uma segunda hipótese para explicar a morfologia da região nuclear de NGC 613 assume que os dois buracos negros resultantes do *merger* já se fundiram. O processo de coalescência de dois buracos negros, após um *merger*, envolve as seguintes etapas: primeiramente, os

buracos negros caem em direção ao centro da galáxia, por fricção dinâmica, até formar um sistema binário. A separação dos buracos negros continua então a decair até que, em um certo ponto, a emissão de ondas gravitacionais remove o momento angular remanescente, permitindo que os buracos negros se fundam em um só (Begelman et al., 1980; Merritt e Milosavljević, 2005; Merritt, 2006). Essa emissão de ondas gravitacionais é assimétrica e carrega momento. Assim, por conservação do momento, o buraco negro resultante da fusão é deslocado (Sundararajan et al., 2010). Um AGN ejetado do centro de uma galáxia, devido a esse processo, costuma carregar consigo o disco de acreção e a BLR. Assim, na segunda hipótese proposta aqui, a região N1 corresponde a um AGN ejetado, após o processo de fusão de dois buracos negros. Nesse caso, a Região N2 está sendo ionizada pela AGN em N1 e, eventualmente, por populações estelares ao redor, o que é consistente com o fato da emissão dessa área também ser compatível com a de um objeto de transição. Os resultados fornecidos pela síntese espectral dos espectros extraídos das Regiões N1 e N2 parecem favorecer essa segunda hipótese, pois revelaram uma grande semelhança entre as populações estelares em N1 e N2. Se a primeira hipótese proposta (envolvendo dois núcleos de galáxias ainda em processo de fusão) estivesse correta, seria improvável que as populações estelares nas regiões desses dois núcleos fossem tão similares, pois a probabilidade dos núcleos de duas galáxias serem diferentes é grande. Por outro lado, a fusão dos dois núcleos geraria uma “mistura” das populações estelares presentes. Se o AGN ejetado carregasse parte dessas populações estelares “misturadas” consigo, então o resultado seria, de fato, dois núcleos com populações estelares similares: um deles (Região N1) contendo um AGN, além das populações estelares, e o segundo (Região N2) contendo apenas populações estelares e uma emissão mais fraca de gás (ionizado tanto pelas populações estelares quanto pelo AGN em N1). Assim, conclui-se que essa segunda hipótese é a mais provável, embora a primeira não possa ser descartada.

5.11.3 Regiões HII

Foram detectadas 7 possíveis regiões HII em torno do centro de NGC 613 (ver Fig. 5.21). Seus espectros são todos compatíveis com os de regiões HII. Entretanto, o espectro da Região 7 também é compatível com os de objetos de transição, o que pode ser devido a alguma contaminação causada pela emissão do AGN (Região N1), que apresenta uma distância projetada relativamente pequena em relação à Região N1, essa proximidade ainda

pode sugerir que a região 7 seja parte do cone de ionização da Região N1.

A distância projetada entre as regiões 1 e 2 é pequena, sendo as duas compatíveis em graus de ionização (ver Figs 5.35 e 5.36 e tabela 5.10). Além disso, a Região 2 também é compatível com a Região 3 em grau de ionização. Isso pode implicar que as regiões 1, 2 e 3 fazem parte da mesma nuvem.

As regiões 6 e 7 não são compatíveis em graus de ionização, mas, como já foi dito anteriormente, isso pode ser devido ao fato da Região 7 estar contaminada pela emissão do AGN.

As regiões 3, 4, 5, 6 e 7 são perceptíveis nas imagens do HST (sobretudo no filtro F606W - ver Fig. 5.39). As regiões 1 e 2 não aparecem nas imagens do HST, devido à alta extinção nessa área. As regiões 3, 4, 6 e 7 possuem emissão bem azulada (ver Fig. 5.40), o que indica que essas áreas são povoadas por populações estelares jovens, o que é esperado.

As regiões HII encontradas neste trabalho estão dispostas ao longo do mesmo anel onde Falcón-Barroso et al. (2014) e Böker et al. (2008) detectaram várias regiões de formação estelar.

5.11.4 Cinemática do gás

Como foi visto nas Tomografias PCA aplicadas ao cubo deconvoluído (ver seção 5.3) e ao cubo de gás (ver seção 5.6), o núcleo de NGC 613 apresenta diferentes fenômenos cinemáticos do gás, os quais, em alguns casos, não foram totalmente separados pela Tomografia PCA, dificultando a análise.

O primeiro fenômeno cinemático foi detectado através do tomograma/auto-espectro 2 da Tomografia PCA do cubo deconvoluído total (Fig. 5.3) e do tomograma/auto-espectro 1 da Tomografia PCA do cubo de gás (Fig. 5.17). Neste resultado é possível notar que a parte superior do FOV possui gás em *redshift* e a parte inferior, em *blueshift*. Além disso ainda é possível notar que a região central do FOV apresenta um padrão cinemático do gás em outro sentido, com *blueshift* na parte superior e *redshift* na parte inferior. Isso pode indicar a presença de duas rotações de gás em sentidos contrários (uma na região central do FOV e outra na região periférica) ou uma rotação e um *outflow*. Essa provável rotação do gás na região periférica do FOV engloba boa parte das regiões HII detectadas. De fato, os resultados obtidos com as Tomografias PCA dos cubos deconvoluído (ver também Fig. 5.4) e de gás (ver também Fig. 5.18) indicam que as regiões 2, 5 e 6 apresentam gás

em *redshift* e as regiões 1, 3 e 4, em *blueshift*. Isso é consistente com os valores calculados (utilizando-se a linha $H\beta$) para a velocidade radial do gás relativa à região N1 (ver tabela 5.8).

Existe outro fenômeno cinemático que só pode ser observado claramente através do *channel map* da linha de $H\alpha$ do cubo de gás de NGC 613 (Fig. 5.44). Cada imagem possui 2\AA de extensão espectral e suas velocidades foram determinadas a partir do comprimento de onda médio de cada imagem. É válido ressaltar que as bordas azuis e vermelhas dessa linha estavam contaminadas com a emissão de $[\text{NII}]\lambda 6548$ e $[\text{NII}]\lambda 6584$, respectivamente, em algumas regiões do FOV (sobretudo a Região N1), já que estas linhas estão *blendadas* nessas áreas.

O *channel map* da linha de $H\alpha$ revela, claramente, a rotação das regiões HII, com um eixo que passa pela Região N1. Além disso é possível observar, na região à esquerda do FOV (a partir da imagem de 215 km/s), a presença do que parece ser um *outflow* proveniente da Região N1. O espectro da Região N1 (Fig. 5.29) é consistente com esse cenário, já que apresenta asas azuis das linhas de emissão bem mais proeminentes do que as asas vermelhas e isso também sugere que esta parte do *channel map* não é mais a asa vermelha de $H\alpha$, mas a asa azul de $[\text{NII}]\lambda 6584$ (e parte desse mesmo fenômeno pode ser visto nas imagens de mais baixa velocidade provenientes da asa azul de $H\alpha$). O espectro da Região 7 (que coincide com a área do possível *outflow*) também é consistente com esse cenário (ver Fig. 5.28), já que as linhas também possuem asas azuis mais proeminentes do que as asas vermelhas. As demais regiões (exceto a Região N2) não possuem essa assimetria das linhas.

O *position angle* do *outflow*, medido através da imagem do *channel map* da linha de $H\alpha$ com $v = 306\text{ km/s}$, foi de 17° . Por outro lado, na imagem de $v = 215\text{ km/s}$, essa emissão é aproximadamente horizontal, o que implica em um *position angle* de 37° . Assim, conclui-se que o *position angle* desse *outflow* está no intervalo entre 17° e 37° . Tal intervalo é consistente com o *position angle* desse *outflow* determinado por (Böker et al., 2008). Esse *outflow* parece estar associado ao jato em rádio detectado por (Hummel et al., 1987), com *position angle* de 12° (ver Fig. 5.43).

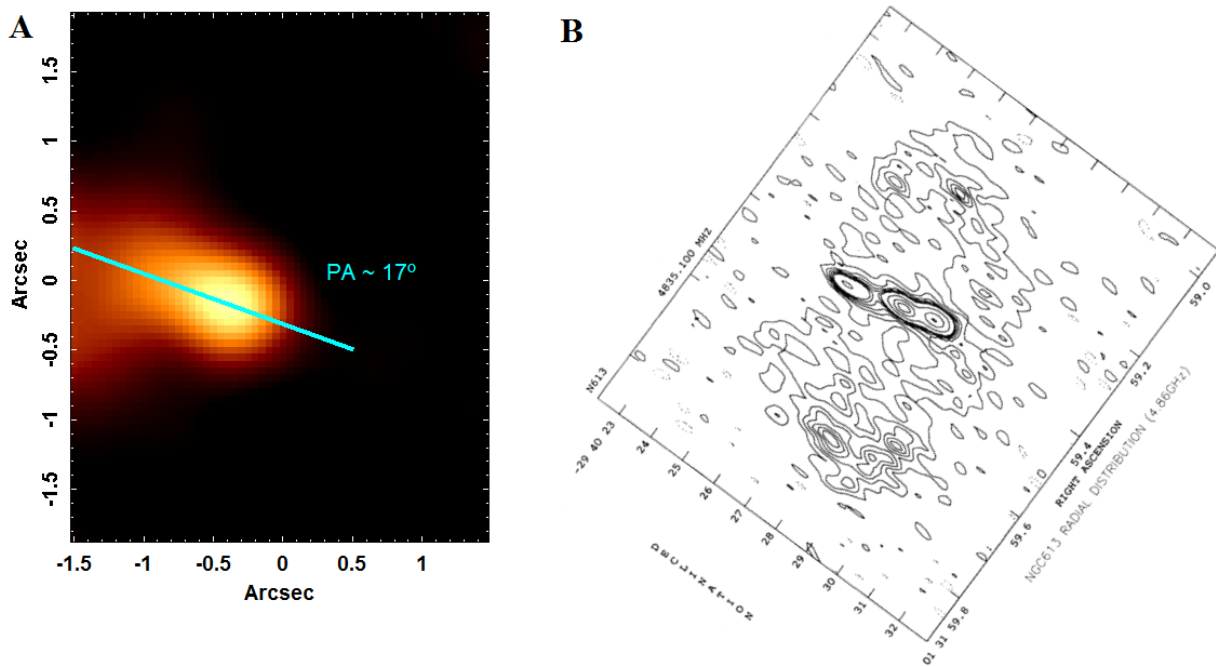


Figura 5.43: (A) Imagem do *channel map* de $v = 306$ km/s, indicando o *position angle* do *outflow* de NGC 613. (B) Figura 1a do artigo de Hummel e Jorsater (1992) do mapa de rádio de 4.86 GHz, indicando o *outflow*, que, segundo os autores, possui um PA de 12° . Essa figura foi rotacionada para que a sua orientação fosse a mesma utilizada nos dados aqui apresentados.

5.11.5 Populações estelares e sua cinemática

As populações estelares detectadas a partir da síntese espectral possuem idades variadas, mas, em grande parte, são de alta metalicidade (somadas, tais populações representam mais de 70% da fração de fluxo total). Isso implica que o ambiente central de NGC 613 é bastante rico em metais, provenientes de outras populações estelares anteriores que terminaram em supernovas espalhando seu material. As populações mais jovens e as mais velhas se encontram na área central do FOV (que abriga as regiões N1 e N2), indicando que lá pode estar ocorrendo supernovas e o gás remanescente delas está gerando novas populações estelares mais ricas. As populações estelares com idade intermediária se encontram ao redor do centro, o que significa que a origem delas pode não ser a mesma que a das populações jovens. A presença dessas populações estelares com idade intermediária sugere a ocorrência de um *merger* envolvendo essa galáxia, que formou estrelas há cerca de 1 bilhão de anos. As estrelas jovens confirmam o cenário de formação estelar recorrente e seu último episódio é compatível com os resultados de Falcón-Barroso et al. (2014).

A análise com os dados obtidos do pPXF mostra que existe uma possível rotação

estelar, com um eixo que passa entre a Região N1 e N2 (ver Fig. 5.15A). As estrelas estão em *redshift* na parte superior do FOV e em *blueshift* na parte inferior, compatível com o cenário observado por Batcheldor et al. (2005). A dispersão de velocidades central obtida aqui também é compatível com a obtida por Whitmore et al. (1985). As dispersões de velocidades estelares das regiões N1 e N2 são compatíveis entre si.

Tabela 5.10 - Razões de linhas das 9 regiões observadas em NGC 613.

Regiões	N1	N2	1	2	3	4	5	6	7
$[\text{OIII}]\lambda 5007/\text{H}\beta$	1.38 ± 0.17	0.96 ± 0.12	0.097 ± 0.019	0.04 ± 0.05	0.02 ± 0.03	0.19 ± 0.03	0.31 ± 0.06	0.46 ± 0.05	1.12 ± 0.17
$[\text{NII}]\lambda 6584/\text{H}\alpha$	1.79 ± 0.07	1.24 ± 0.11	0.35 ± 0.04	0.0339 ± 0.024	0.37 ± 0.03	0.36 ± 0.03	0.41 ± 0.03	0.62 ± 0.03	0.89 ± 0.12
$[\text{OI}]\lambda 6300/\text{H}\alpha$	0.29 ± 0.03	0.182 ± 0.016	0.013 ± 0.004	0.015 ± 0.006	0.008 ± 0.003	0.0147 ± 0.0023	0.021 ± 0.008	0.0419 ± 0.0020	0.096 ± 0.016
$([\text{SII}]\lambda 6716 + 6731)/\text{H}\alpha$	1.01 ± 0.04	0.82 ± 0.08	0.185 ± 0.016	0.187 ± 0.011	0.182 ± 0.013	0.205 ± 0.013	0.26 ± 0.03	0.376 ± 0.011	0.64 ± 0.05
$\text{H}\alpha/\text{H}\beta$	5.0 ± 0.5	4.5 ± 0.4	3.0 ± 0.4	3.5 ± 0.4	3.0 ± 0.3	2.6 ± 0.3	4.0 ± 0.3	3.25 ± 0.24	4.2 ± 0.5
$[\text{SII}]\lambda 6716/[\text{SII}]\lambda 6731$	1.2 ± 0.3	1.1 ± 0.8	1.10 ± 0.16	1.11 ± 0.08	1.09 ± 0.11	1.16 ± 0.09	1.04 ± 0.18	1.2 ± 0.7	0.9 ± 0.3

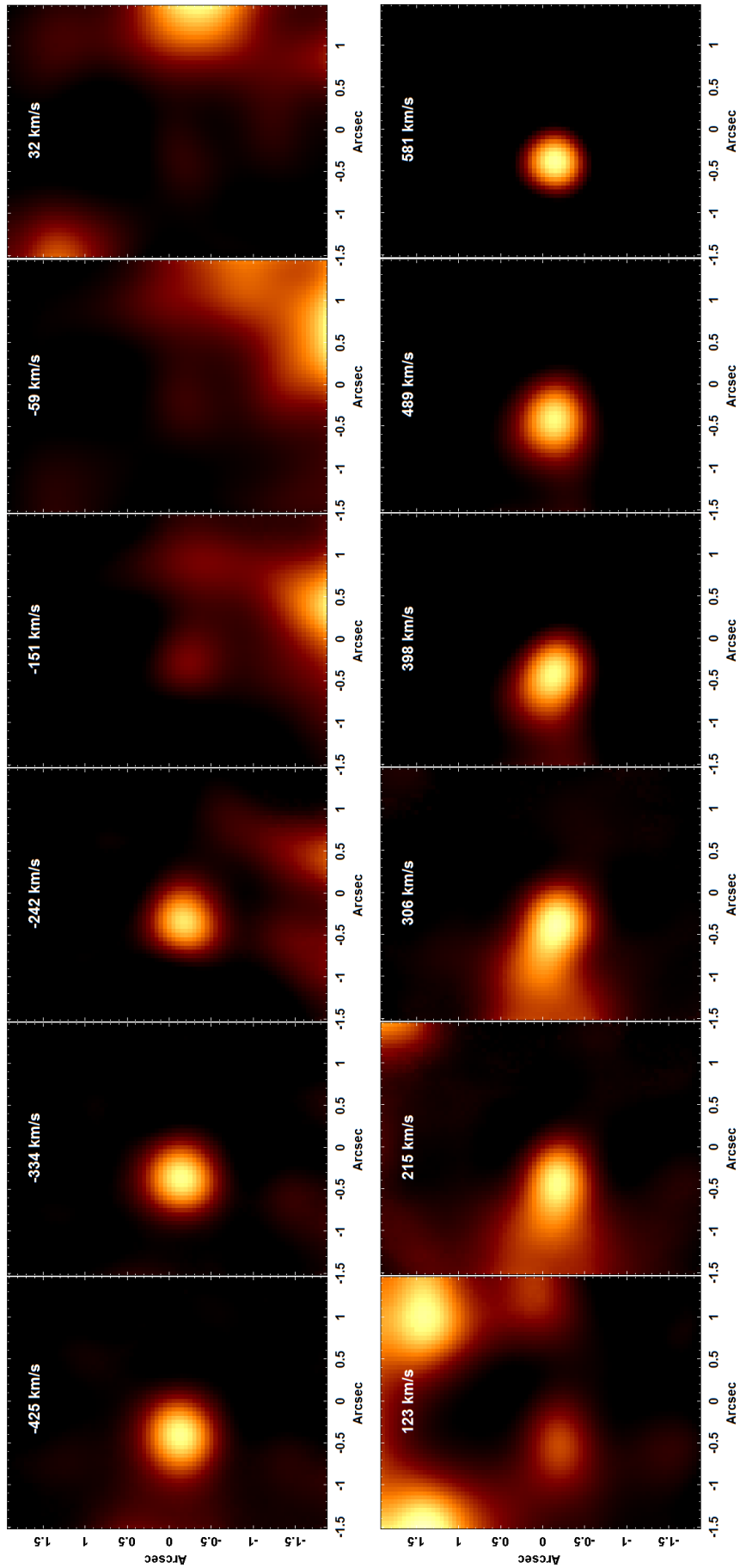


Figura 5.44: Channel map da linha H α de NGC 613

NGC 134

6.1 Introdução

NGC 134 é uma galáxia do tipo SAB(s)bc e está a ~ 19 Mpc de distância (valor médio das distâncias medidas obtido no NED); há pouco estudo sobre ela.

Possui regiões HII concentradas nos braços espirais, enquanto que o núcleo apresenta uma emissão estelar alongada (Martin, 1976), além de ter uma emissão tipo galáxia de Seyfert ($H\alpha < 1.2 \times [NII]$), observada por Veron-Cetty e Veron (1986).

O perfil do espectro em $200 \mu\text{m}$ é perfeitamente simétrico sobre o eixo menor da galáxia, ou seja, a poeira fria está concentrada em quantidades iguais (que, somadas, equivalem a 90% da massa de poeira da galáxia) nos dois extremos desse eixo (Elmegreen e Block, 1999).

A emissão em rádio (39 cm) se estende por quase toda a extensão da galáxia no óptico, predominantemente no plano da galáxia (Harnett e Reynolds, 1991).

6.2 Observações e tratamento de dados

As observações de NGC 134 foram realizadas na noite de 6 de Julho de 2015, com as configurações instrumentais apresentadas na seção 2.1 do capítulo 2. O programa da observação desse objeto é o mesmo de NGC 613: GS-2014B-Q-30. Foram feitas 3 exposições de 930 segundos com *position angle* igual a 224° . O *seeing*, calculado a partir da imagem de aquisição (em um comprimento de onda $\lambda_{ref} = 6300\text{\AA}$), apresenta $FWHM_{ref} = 0''.64$. Esses valores foram utilizados na estimativa da PSF no processo de deconvolução (ver seção 2.3.5, equação 2.1).

A estrela padrão utilizada na calibração em fluxo, a mesma utilizada para NGC 613,

foi LTT2415. Ela foi observada em 5 de Junho de 2015, com o tempo de exposição de 300 segundos e com as mesmas condições instrumentais das imagens de ciência.

A redução e o tratamento dos dados foram realizados de acordo com os processos descritos nas seções 2.2 e 2.3 do capítulo 2.

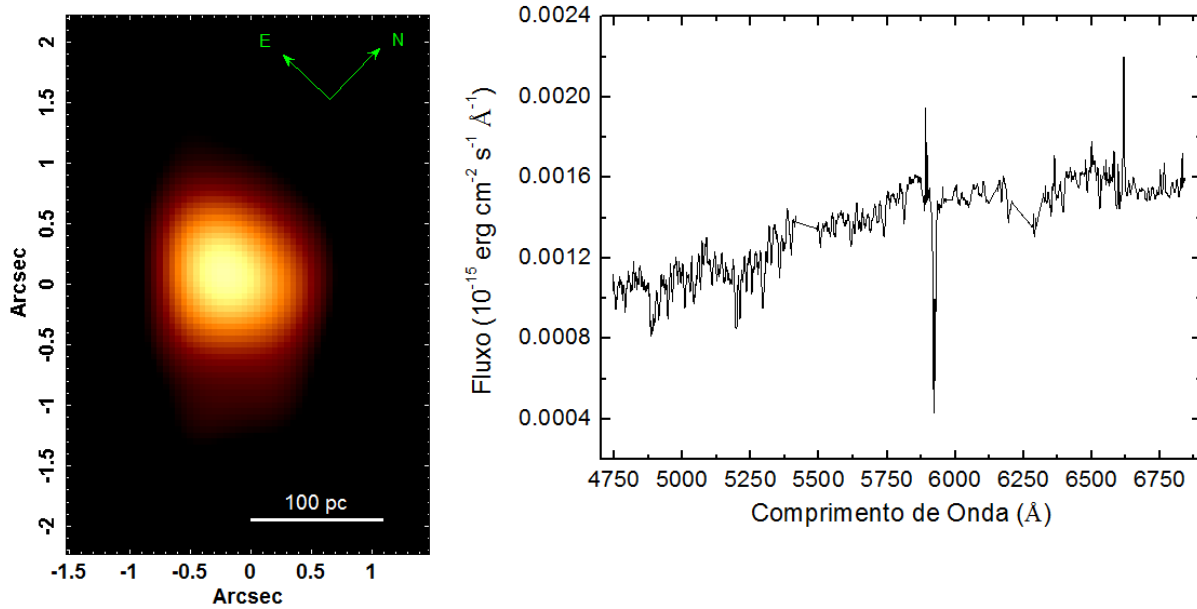


Figura 6.1: Imagem do cubo colapsado e espectro médio de NGC 134, contendo a escala de 100 pc e a orientação NE.

Após o tratamento de dados (ver seção 2.3 do capítulo 2), obteve-se o cubo deconvoluído. A partir dele foi criada uma imagem com a soma de todas as imagens do cubo e foi também obtido o espectro médio, ambos mostrados na (Fig. 6.1). Na imagem do cubo colapsado também é dada a escala de 100 pc, obtida a partir da distância da galáxia, e a orientação NE, de acordo com o *position angle* da observação. Nela é possível reconhecer uma emissão no centro do FOV. O espectro médio mostra que há poucas linhas de emissão e muitas linhas de absorção, o que pode evidenciar a presença de populações estelares velhas. As linhas mais expressivas são o duplete NaI $\lambda\lambda 5890, 5896$, [OI] $\lambda 6300$, [NII] $\lambda 6584$ e [SII] $\lambda\lambda 6716, 6731$.

6.3 Tomografia PCA do cubo deconvoluído

A Tomografia PCA (seção 2.4.1 do capítulo 2) foi aplicada ao cubo após a deconvolução. A tabela 6.1 mostra a fração de variância explicada pelos primeiros 15 autovetores. Os re-

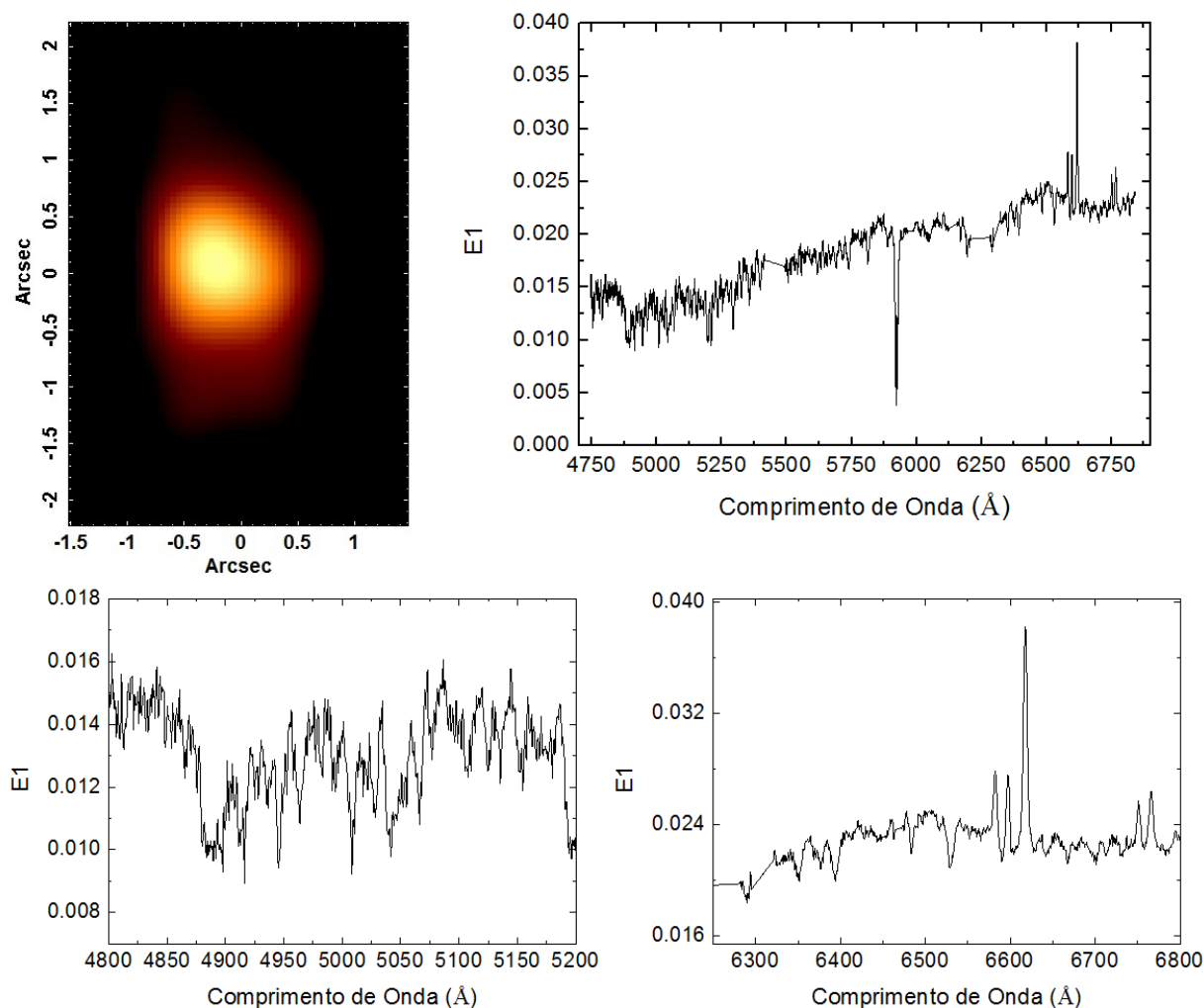


Figura 6.2: Tomograma e auto-espectro 1 da Tomografia PCA aplicada ao cubo deconvolvido, com ampliações nas regiões azul e vermelha do auto-espectro.

sultados se mostraram muito ruidosos, sendo apenas possível interpretar os auto-espectros E1 e E3. Então, foi necessário aplicar a Tomografia PCA aos CCDs 2 (5480Å a 6200Å) e 3 (6300Å a 6900Å), para permitir uma melhor separação dos fenômenos estelar e gasoso, respectivamente.

6.3.1 Cubo total

A Fig. 6.2 mostra o primeiro auto-espectro e seu tomograma associado. Não é possível observar correlações com linhas de emissão na região azul do auto-espectro, pois o ruído é bastante dominante ali. A correlação com o duplete de absorção de $\text{NaI}\lambda\lambda 5890, 5896$ é bem evidente, como no espectro médio, e a maior diferença desse auto-espectro em relação ao espectro médio é a intensidade das linhas $[\text{NII}]\lambda\lambda 6548, 6584$, $\text{H}\alpha$ e $[\text{SII}]\lambda\lambda 6716, 6731$. O

tomograma apresenta a mesma região central observada na imagem do cubo colapsado, o que implica que essa região, que está correlacionada com o auto-espectro, é emissora dessas linhas. O grau de ionização dessa região será discutido adiante.

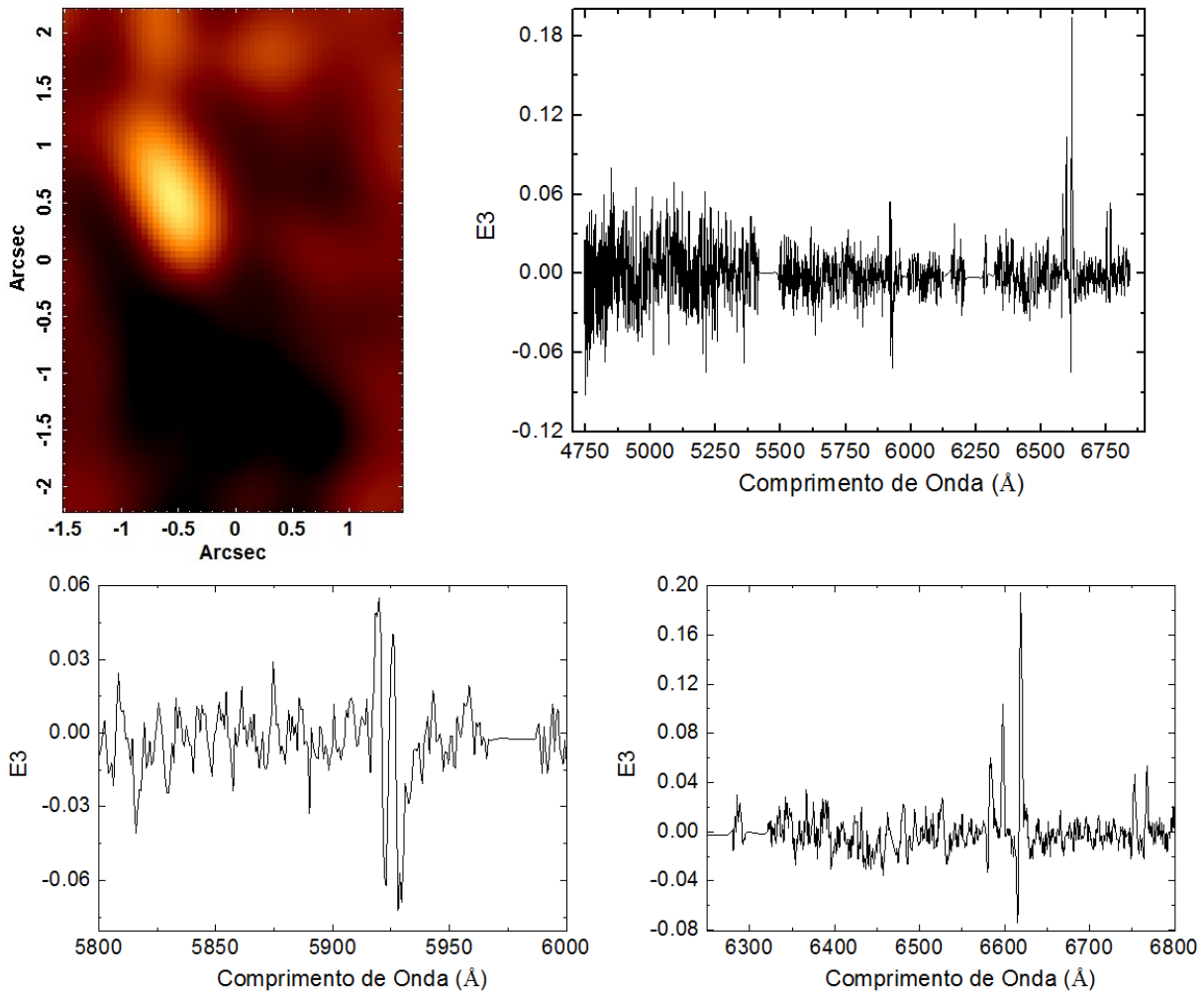


Figura 6.3: Tomograma e auto-espectro 3 da Tomografia PCA aplicada ao cubo deconvolvido, com ampliações na região vermelha e na região da absorção de $\text{NaI}\lambda\lambda 5890, 5896$ do auto-espectro.

O auto-espectro E3 (Fig. 6.3) possui muito ruído na região azul, então, para melhor visualização, foi feita, neste caso, uma ampliação na região da linha $\text{NaI}\lambda\lambda 5890, 5896$, que apresenta informação relevante para interpretação. Esse auto-espectro possui correlações com as asas vermelhas e anti-correlações com as asas azuis das linhas de emissão de $[\text{NII}]\lambda\lambda 6548, 6584$, $\text{H}\alpha$ e $[\text{SII}]\lambda\lambda 6716, 6731$. Por outro lado, também podem ser observadas correlações com as asas azuis e anti-correlações com as asas vermelhas de algumas linhas de absorção, como o duplete de $\text{NaI}\lambda\lambda 5890, 5896$. O tomograma, por sua vez, mostra uma região alongada, na parte superior, correlacionada com o auto-espectro e uma região es-

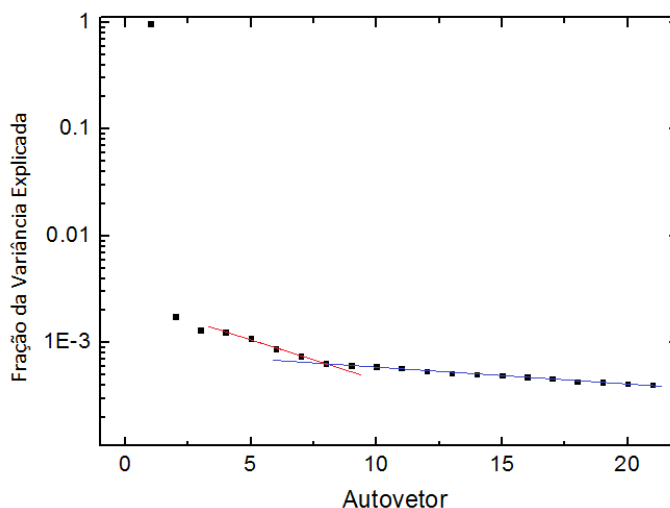


Figura 6.4: Diagrama de Scree da Tomografia PCA aplicada ao cubo deconvolvido. As retas vermelha e azul representam diferentes taxas de decaimento da fração de variância.

Tabela 6.1 - Tabela com os 15 primeiros autovalores da Tomografia PCA aplicada ao cubo deconvolvido.

Autovetor	Fração da Variância Explicada (%)
E1	97.5651
E2	0.1753
E3	0.1321
E4	0.1258
E5	0.1092
E6	0.0873
E7	0.0751
E8	0.0642
E9	0.0611
E10	0.0601
E11	0.0577
E12	0.0540
E13	0.0518
E14	0.0505
E15	0.0496

cura na parte inferior, onde há a anti-correlação. Esse conjunto auto-espectro/tomograma pode estar mostrando a cinemática do gás, juntamente com a cinemática estelar e de gás neutro (devido ao padrão observado no duplete de NaI). A área clara do tomograma está representando a região em *redshift* e a área escura em *blueshift*. Pode se tratar tanto de

um *outflow*, se houver AGN, como de uma rotação estelar e dos gases ionizado e neutro em torno da região central.

O diagrama de *Scree* (Fig. 6.4) mostra que o autovetor E1 explica a maior parte da variância, e, por sua vez, a redundância dos dados. A partir do autovetor E2, a taxa de decaimento da fração da variância explicada diminui consideravelmente e atinge um valor aproximadamente constante. Essa taxa de decaimento diminui ainda mais e atinge um novo valor aproximadamente constante a partir do autovetor E8. Isso sugere que o ruído passa a ser significativo nos autovetores com ordem maior ou igual a 2 (embora ainda haja a possibilidade de extrair alguma informação relevante) e passa a ser dominante em autovetores com ordem maior ou igual a 8. Porém, como foi dito anteriormente, não há informação que possa ser interpretada no autovetor E2, pouca informação no E3 e, a partir do autovetor E4, não há informação interpretável.

6.3.2 CCD 2 (5480Å a 6200Å)

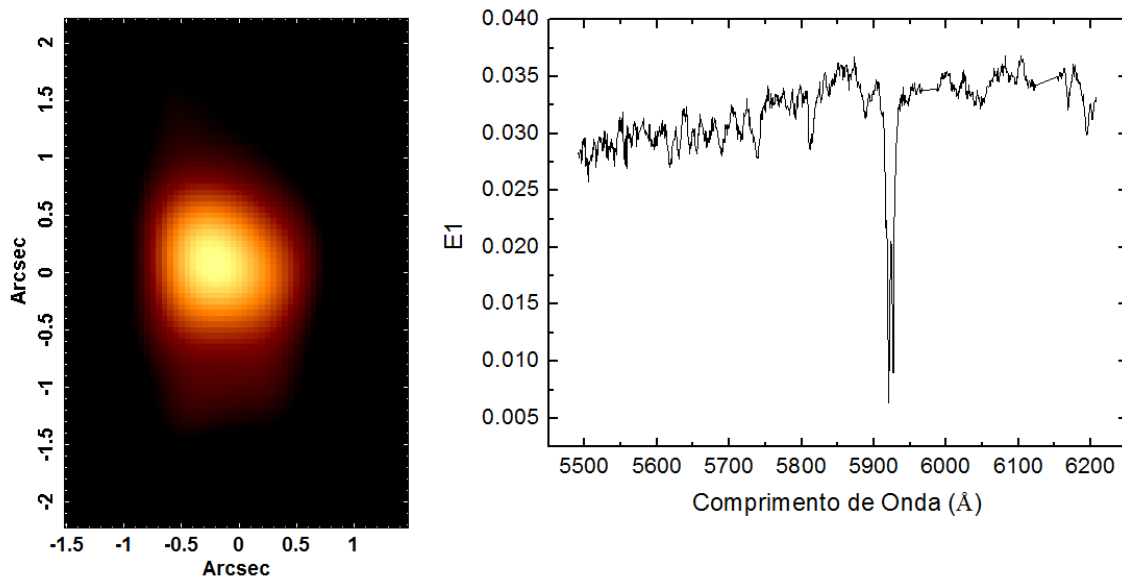


Figura 6.5: Tomograma e auto-espectro 1 da Tomografia PCA aplicada ao CCD 2 do cubo deconvoluido.

O auto-espectro E1 (Fig. 6.5) da Tomografia PCA aplicada ao CCD 2 apresenta correlação com várias linhas de absorção e, principalmente, com $\text{NaI}\lambda\lambda 5890, 5896$. O tomograma associado possui uma região em destaque no centro do FOV, o que implica que nesta região estão concentradas as populações estelares. A fração de variância explicada por esse auto-espectro e os demais está na tabela 6.2.

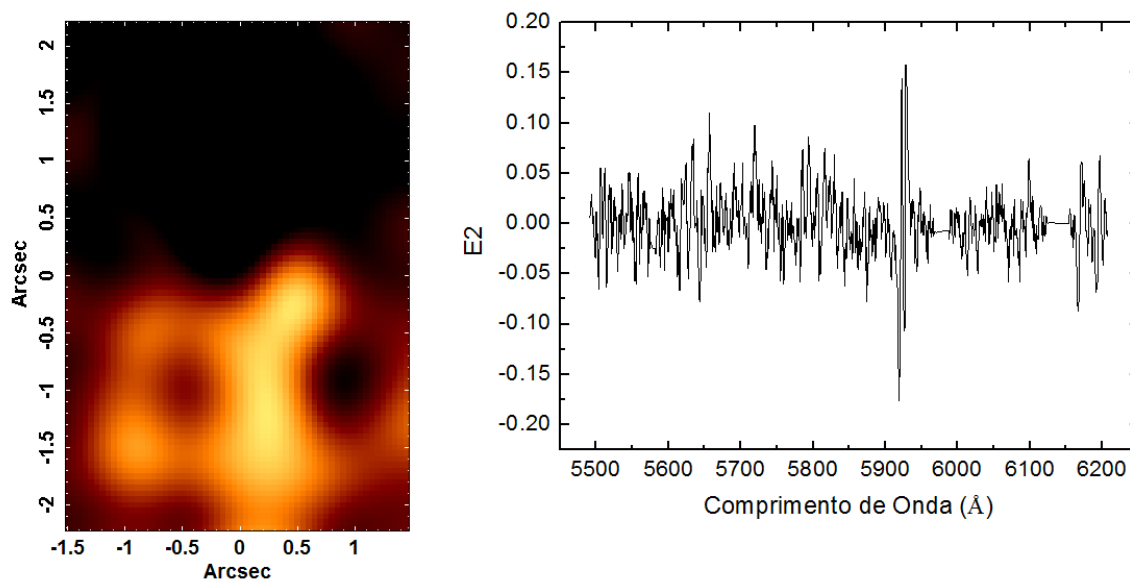


Figura 6.6: Tomograma e auto-espectro 2 da Tomografia PCA aplicada ao CCD 2 do cubo deconvolvido.

A Fig. 6.6 apresenta o conjunto tomograma/auto-espectro 2. No auto-espectro é possível ver que há anti-correlações com as asas azuis de algumas linhas de absorção, como $\text{NaI}\lambda\lambda 5890, 5896$, e correlações com as asas vermelhas das mesmas. No tomograma é possível ver uma bipolaridade, sendo a região inferior correlacionada com o auto-espectro e, portanto, em *blueshift* e a região superior, em *redshift*. Isso é compatível com o que foi observado no conjunto tomograma/auto-espectro 3 da Tomografia PCA do cubo total deconvolvido (Fig. 6.3).

A partir do autovetor E3 não há mais dados com informações interpretáveis. O diagrama de *Scree* (Fig. 6.7) mostra que, a partir do autovetor E3, a taxa de decaimento da fração de variância explicada se torna aproximadamente constante, o que implica que o ruído se torna dominante nos dados.

6.3.3 CCD 3 (6300Å a 6900Å)

Como nas Tomografias PCA anteriores, o tomograma 1 da Tomografia PCA aplicada ao CCD 3 do cubo deconvolvido (Fig. 6.8) apresenta uma região central emissora. O auto-espectro associado apresenta correlação com as linhas $[\text{NII}]\lambda\lambda 6548, 6584, \text{H}\alpha$ e $[\text{SII}]\lambda\lambda 6716, 6731$. É necessário calcular as razões de linhas dessa região para saber de que tipo de objeto se trata. Além disso há muitas absorções também nessa região, podendo evidenciar a presença de populações estelares velhas, o que será discutido com a síntese espectral, a

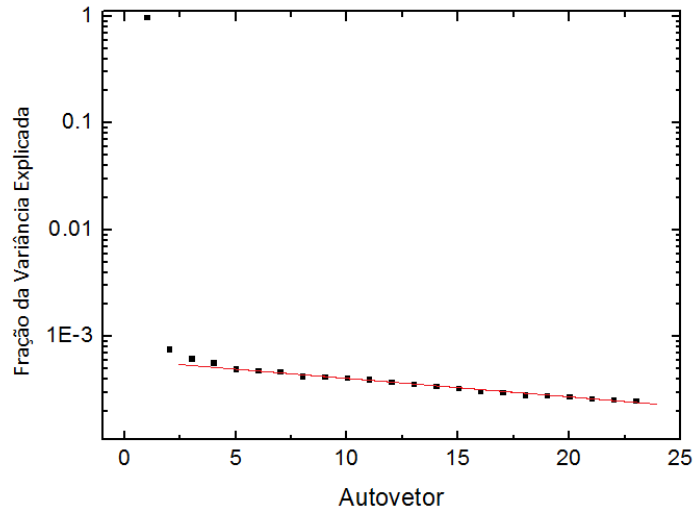


Figura 6.7: Diagrama de *Scree* da Tomografia PCA aplicada ao CCD 2 do cubo deconvoluido.

Tabela 6.2 - Tabela de autovalores da Tomografia PCA aplicada ao CCD 2 do cubo deconvoluido de NGC 134.

Autovetores	Fração de Variância Explicada (%)
E1	98.491
E2	0.077
E3	0.063
E4	0.057
E5	0.050
E6	0.048
E7	0.047
E8	0.043
E9	0.042
E10	0.041

seguir.

O auto-espectro E2 apresentado na Fig. 6.9 está correlacionado com as mesmas linhas observadas no auto-espectro E1, embora as razões entre elas pareçam diferentes. Foi extraído um espectro da região correspondente à área clara do tomograma associado para o cálculo de razões de linhas, mas não se pôde calcular, devido à considerável quantidade de ruído, que interferiu na determinação do fluxo integrado da linha $H\beta$.

O tomograma 3 (Fig. 6.10) mostra outra região emissora. Neste caso a proporção das

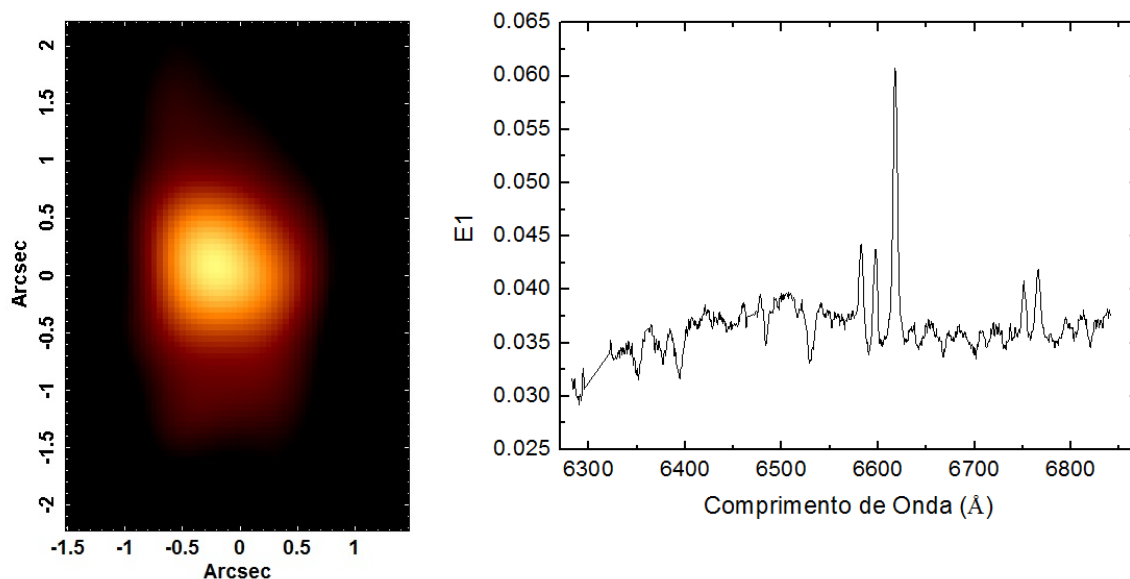


Figura 6.8: Tomograma e auto-espectro 1 da Tomografia PCA aplicada ao CCD 3 do cubo deconvolvido.

linhas do auto-espectro E3 se assemelha mais com a do auto-espectro E1. Mas também, como na região do tomograma anterior, é impossível calcular as razões de linhas, devido à significativa presença de ruído, neste caso, comprometendo as linhas $H\beta$ e $[OIII]\lambda 5007$.

Tabela 6.3 - Tabela de autovalores da Tomografia PCA aplicada ao CCD 3 do cubo deconvolvido de NGC 134.

Autovetores	Fração da Variância (%) Explicada
E1	99.16515
E2	0.12468
E3	0.06914
E4	0.05254
E5	0.03864
E6	0.03199
E7	0.02914
E8	0.02238
E9	0.02035
E10	0.01818

O diagrama de *Scree* (Fig. 6.11) mostra que, a partir do auto-espectro E7, a taxa de decaimento da fração de variância explicada é constante, o que indica que o ruído é dominante nesses dados. Entretanto, não há informação interpretável a partir do autovetor

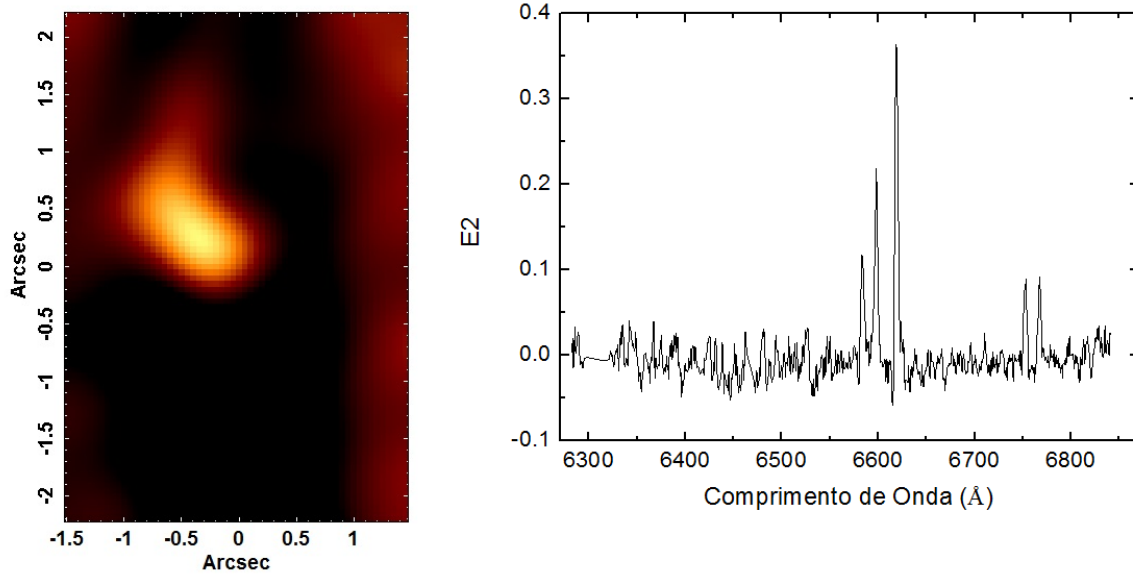


Figura 6.9: Tomograma e auto-espectro 2 da Tomografia PCA aplicada ao CCD 3 do cubo deconvoluido.

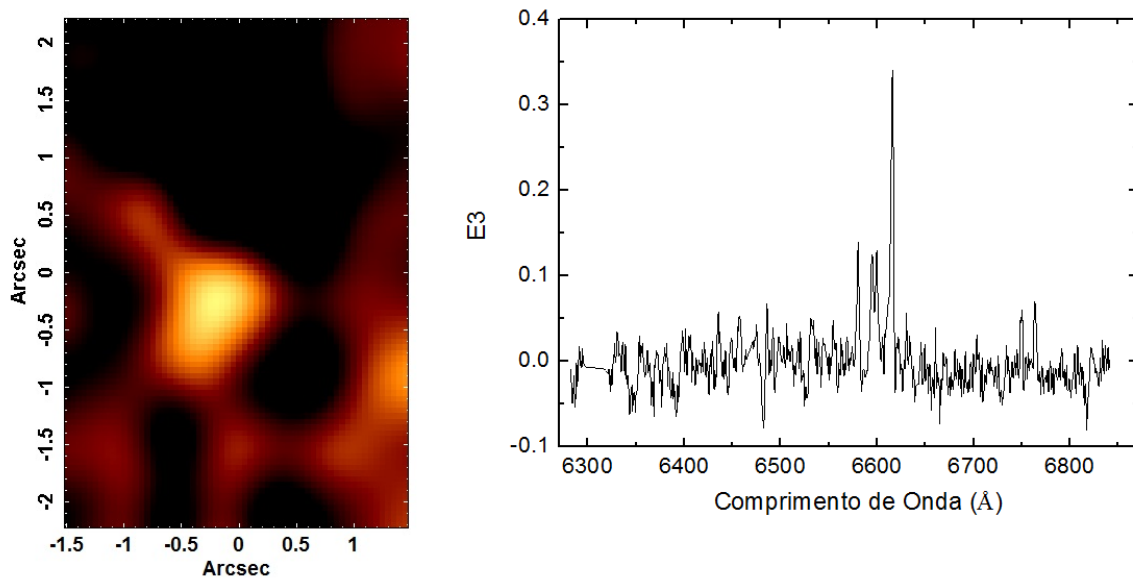


Figura 6.10: Tomograma e auto-espectro 3 da Tomografia PCA aplicada ao CCD 3 do cubo deconvoluido.

E4.

6.4 Resultados da síntese espectral

Detalhes sobre a síntese espectral realizada com o *software* STARLIGHT estão apresentados na seção 2.4.2 do capítulo 2. Os resultados dos mapas e histograma foram truncados, devido à baixa razão S/N ($S/N < 10$) presente em algumas regiões, o que torna os resul-

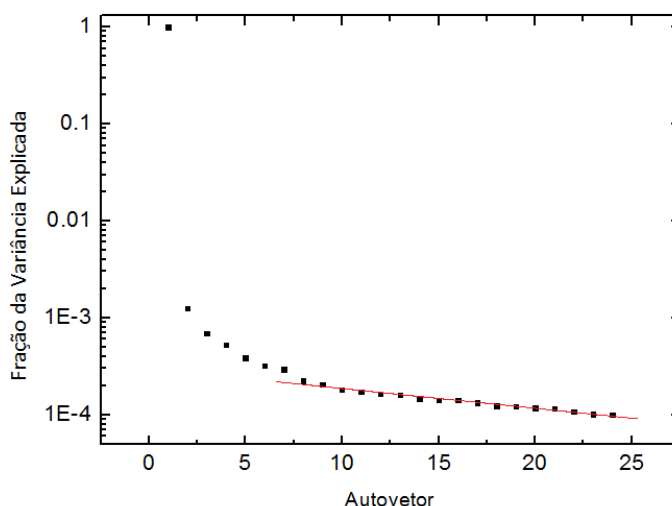


Figura 6.11: Diagrama de *Scree* da Tomografia PCA aplicada ao CCD 3 do cubo deconvoluido.

tados ali obtidos imprecisos. O truncamento foi feito a partir do mapa de S/N fornecido pela síntese espectral e seu resultado, neste caso, se revela como áreas brancas nas bordas direitas do FOV.

O histograma contendo as frações de fluxo das principais populações estelares encontradas na síntese é mostrado na Fig. 6.12.

Nota-se que as populações predominantes em NGC 134 são aquelas com idades acima de $10^{8.5}$ anos, com metalicidades média (0.004 e 0.008) e alta (0.02 e 0.05), sendo que a maior fração de fluxo é atribuída à população velha (10^{10} anos) com alta metalicidade, representando quase 60%. A seguir, tem-se a população com idade $10^{9.5}$ anos e com alta metalicidade, representando $\sim 20\%$ da fração de fluxo, e as populações com média metalicidade e idades próximas a 10^9 anos, que, juntas, representam $\sim 15\%$ da fração de fluxo.

A Fig. 6.13 mostra os mapas de fluxo das populações estelares encontradas com a síntese espectral. A Fig. 6.13A mostra as populações estelares com idade de 10^6 anos. Como foi visto no histograma, essa população jovem representa uma baixíssima fração de fluxo, possui alta metalicidade e está concentrada na região central do FOV. A Fig. 6.13B apresenta as populações estelares com 10^8 anos. Com essa idade, predominam as populações de metalicidade intermediária, que estão concentradas no centro e em algumas regiões ao redor. A Fig. 6.13C apresenta as populações estelares com 10^9 anos. Neste caso, há uma mistura de populações estelares de alta e média metalicidade em todo o campo visual. Na Fig. 6.13D

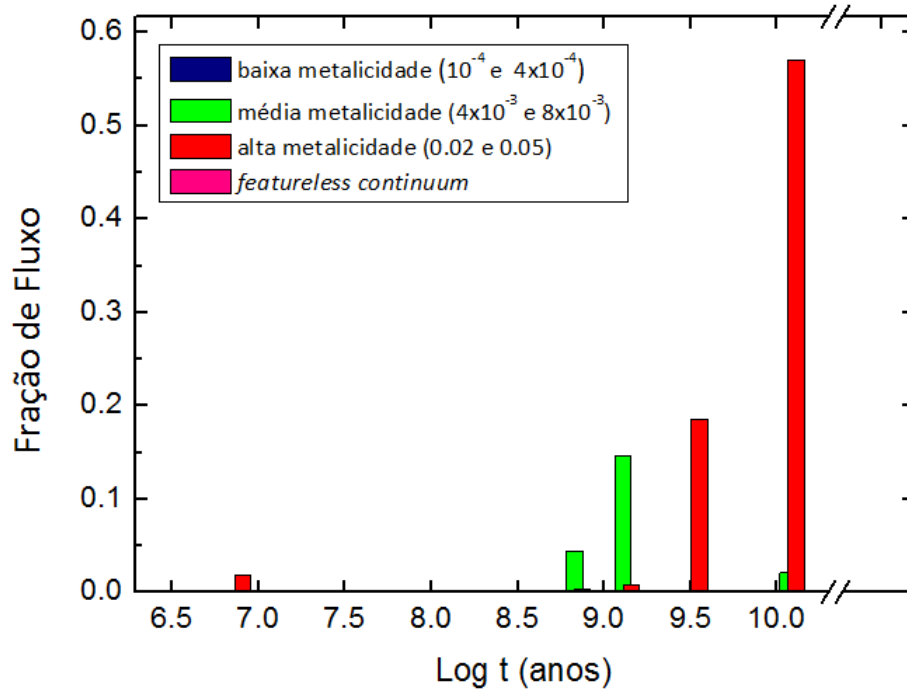


Figura 6.12: Histograma da síntese espectral aplicada ao cubo deconvoluído de NGC 134, apresentando as frações de fluxo e idades das populações estelares encontradas. A cor azul representa populações estelares com baixa metalicidade (10^{-4} e 4×10^{-4}), a cor verde representa populações estelares com média metalicidade (4×10^{-3} e 8×10^{-3}), a cor vermelha representa populações estelares com alta metalicidade (0.02 e 0.05) e a cor rosa o *featureless continuum*.

tem-se as populações estelares com 10^{10} anos. Elas possuem, predominantemente, alta metalicidade e estão concentradas na região central do FOV e em algumas áreas ao redor.

A Fig. 6.14A mostra o mapa de A_V obtido através da síntese espectral. Os maiores valores de extinção estão no centro e, ao redor, tem-se uma distribuição quase homogênea. O mapa de χ^2 (Fig. 6.14B) não apresenta nenhuma tendência, ou seja, os valores estão bem distribuídos e estão entre 1.2 e 2.2. O mapa de S/N (Fig. 6.14C) apresenta baixos valores ($S/N < 10$) na borda direita do FOV. Como foi dito anteriormente, os resultados dessa região foram retirados da análise por serem considerados imprecisos. As demais áreas apresentam valores de S/N entre 10 e 50.

Os valores de A_V do cubo de dados de NGC 134, fornecidos pelo *software* STARLIGHT, apresentam uma incerteza de 0.024 mag. Por outro lado, a idade média das populações estelares (obtida a partir de uma média ponderada com base nas frações de fluxo correspondentes a tais populações) possui uma incerteza de 0.04 dex. Tais incertezas foram obtidas a partir de uma simulação de Monte Carlo (ver seção 2.4.2 do capítulo 2 para

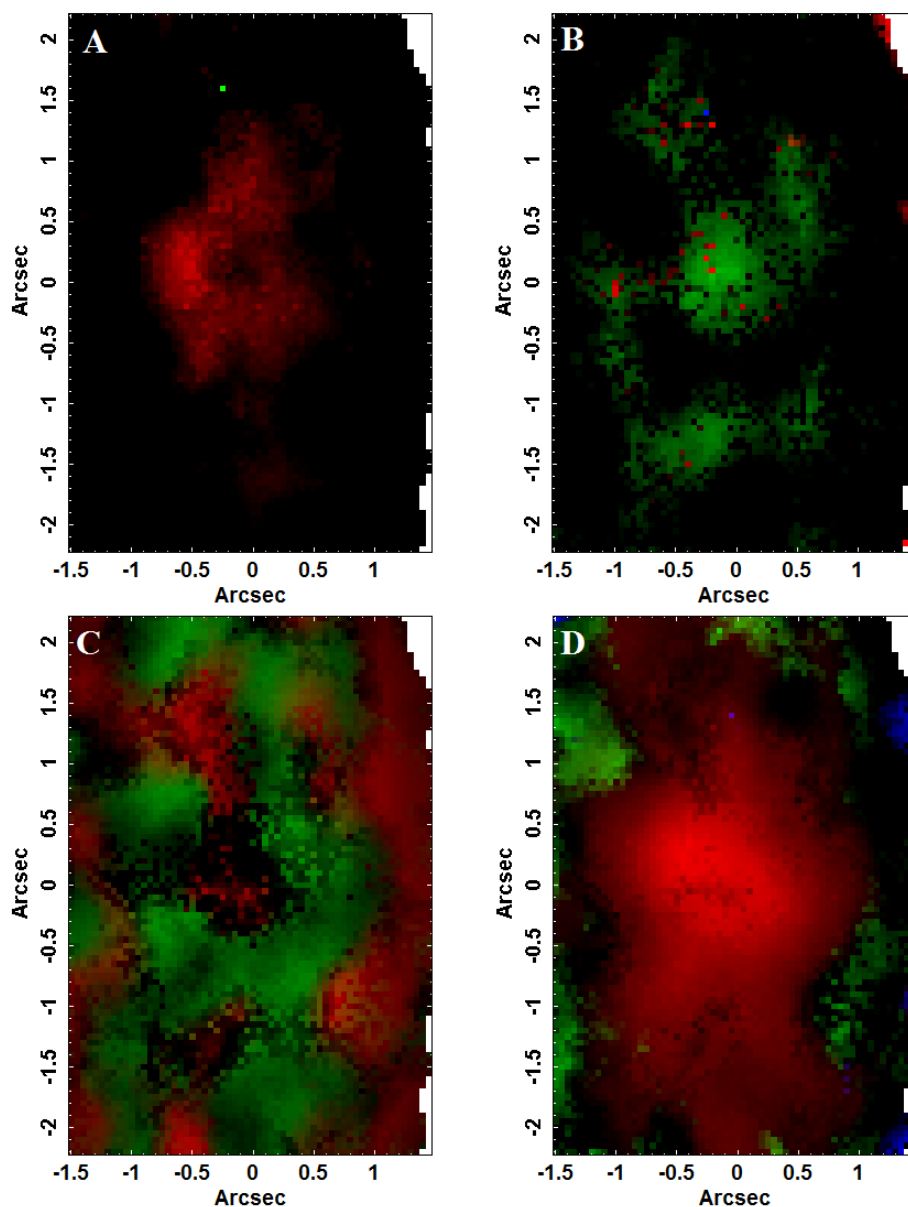


Figura 6.13: Mapas de fluxo das populações estelares obtidas com a síntese espectral. A cor vermelha são populações estelares com alta metalicidade (0.02 e 0.05), a cor verde com metalicidade intermediária (4×10^{-3} e 8×10^{-3}), a cor azul com baixa metalicidade (4×10^{-4} e 10^{-4}) e a cor branca representa as regiões que foram retiradas da análise devido ao baixo S/N: $S/N < 10$. A Fig. A apresenta o mapa das populações com 10^6 anos, a Fig. B com 10^8 anos, a Fig. C com 10^9 anos e a Fig. D com 10^{10} anos.

maiores detalhes).

6.5 Cinemática estelar

A descrição do método de análise *Penalized Pixel Fitting* (pPXF) é dada na seção 2.4.4. Os parâmetros fornecidos por esse método (velocidade radial estelar, dispersão de

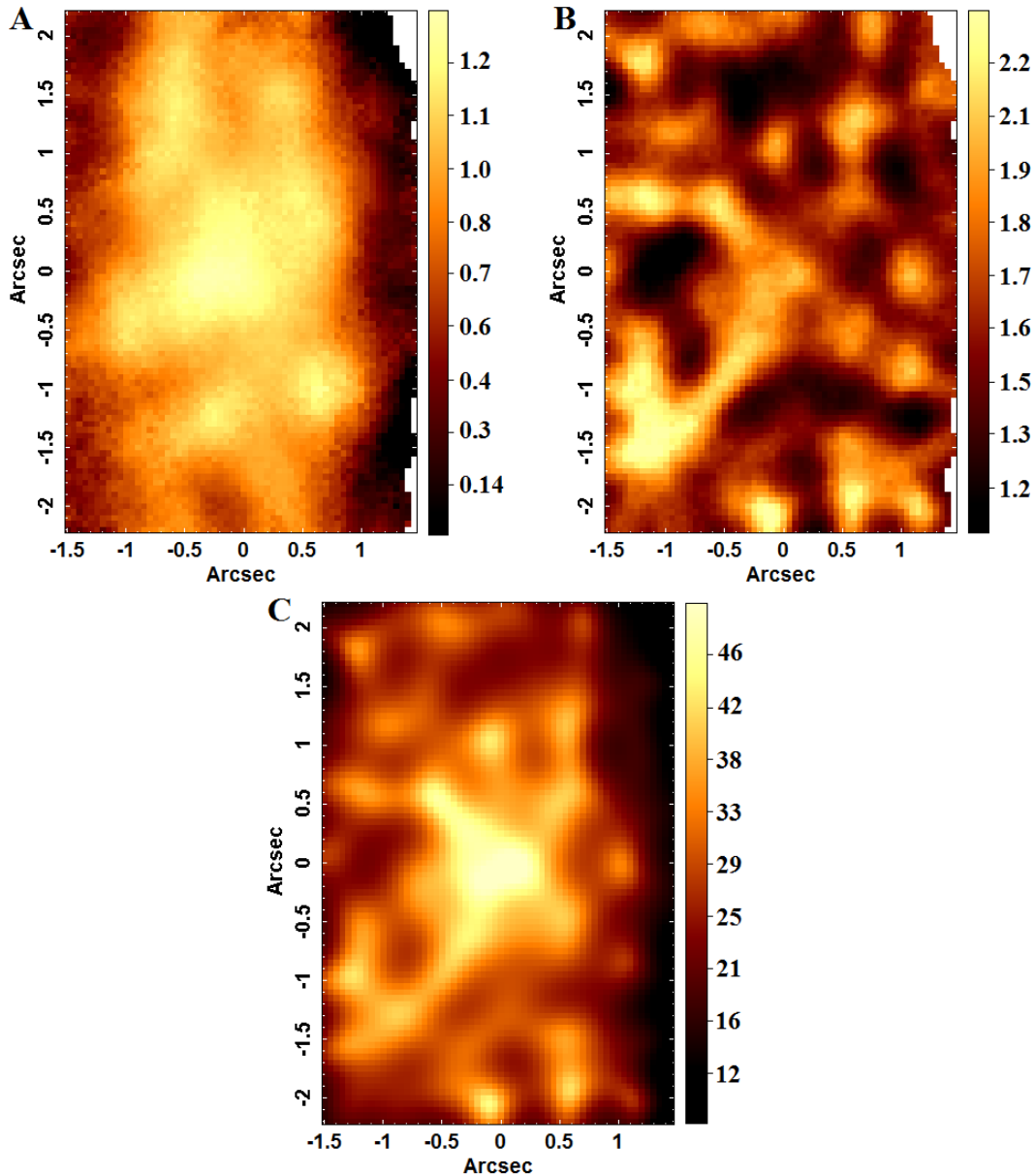


Figura 6.14: Mapas de A_V (A), χ^2 (B) e S/N (C) fornecidos pela síntese espectral. Algumas regiões foram retiradas da imagem (em branco) pois possuem baixo S/N ($S/N < 10$).

velocidades estelar e coeficientes de Gauss-Hermite h_3 e h_4) são obtidos para cada espectro (e, conseqüentemente, para cada *spaxel*) do cubo de dados. O resultado disso são mapas desses parâmetros.

Da mesma forma que na síntese espectral, os mapas foram truncados. Ou seja, regiões com $S/N < 10$ foram retiradas dos mapas, a fim de evitar imprecisões nos resultados.

O mapa da velocidade radial estelar (Fig. 6.15A) mostra uma bipolaridade nos valores. Na região superior do mapa, encontram-se as velocidades positivas em relação à linha de

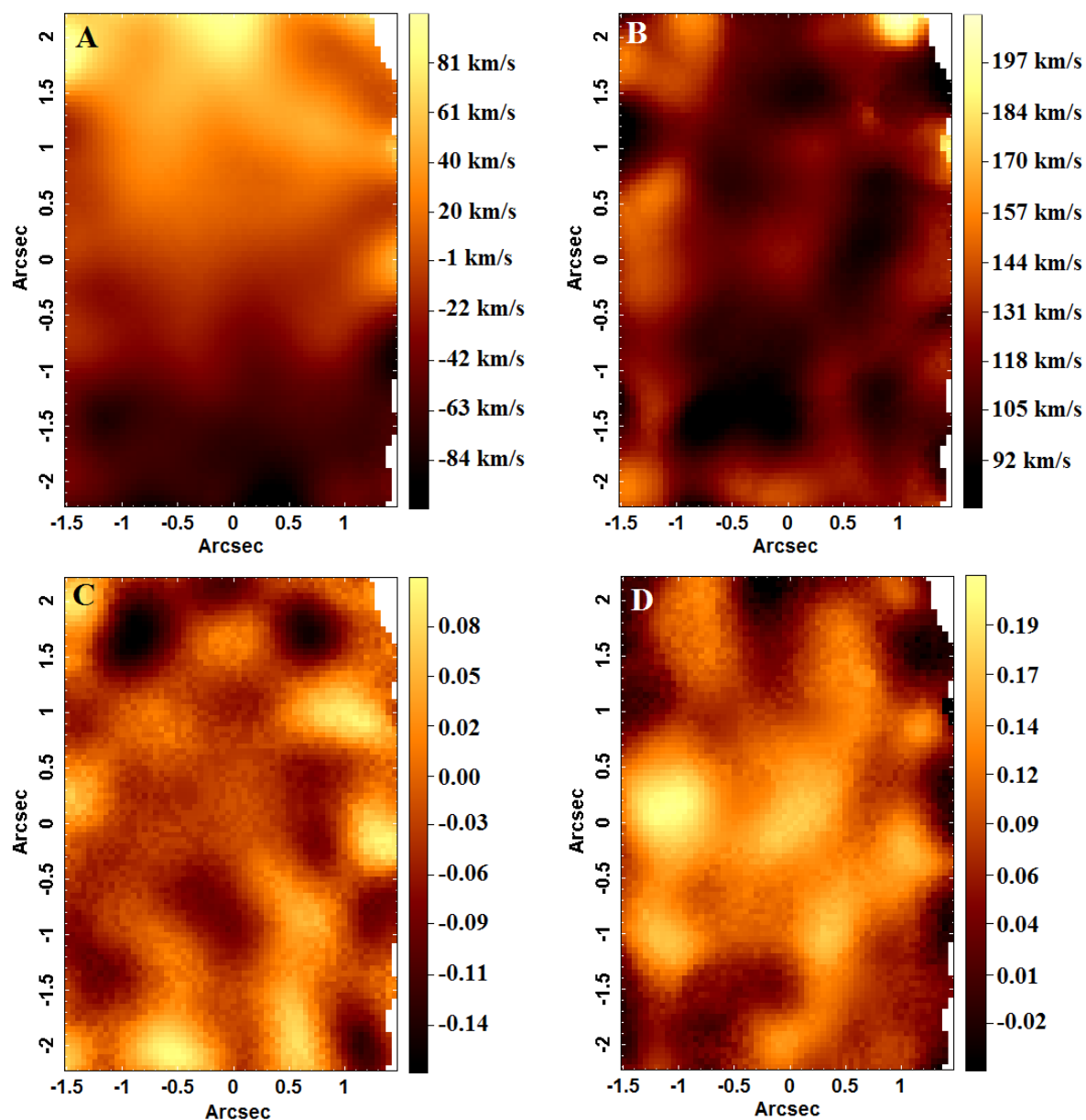


Figura 6.15: Mapas da velocidade radial estelar (A), dispersão de velocidades estelar (B) e coeficientes de Gauss-Hermite h_3 (C) e h_4 (D) obtidos com pPXF. Algumas regiões foram retiradas da imagem (em branco) pois possuem baixo S/N ($S/N < 10$).

visada (ou seja, esta região está em *redshift*) e, na região inferior do mapa, velocidades negativas em relação à linha de visada (*blueshift*). O mesmo padrão foi visto nos tomogramas 3 (Fig. 6.3) e 2 (Fig. 6.6) das Tomografias PCA aplicadas ao cubo total e ao CCD2, respectivamente. Foi visto que tanto o gás quanto as estrelas podem estar girando em torno do centro do FOV, com o mesmo sentido (*blueshift* na região inferior e *redshift* na superior).

O mapa de dispersão de velocidades (Fig. 6.15B) não possui nenhum padrão. A dispersão é alta na região que possui baixo S/N, portanto esse valor não é confiável. A dispersão no centro é $\sim 130 \pm 6$ km/s.

O mapa do coeficiente de Gauss-Hermite h_3 (Fig. 6.15C) mostra uma leve anti-correlação com o mapa de velocidades. Isso pode sugerir que há estrelas em rotação em torno do centro do FOV sobrepostas a um fundo de estrelas com velocidade nula em relação à linha de visada. O mapa de h_4 (Fig. 6.15D) não apresenta estruturas que possam ser claramente detectadas.

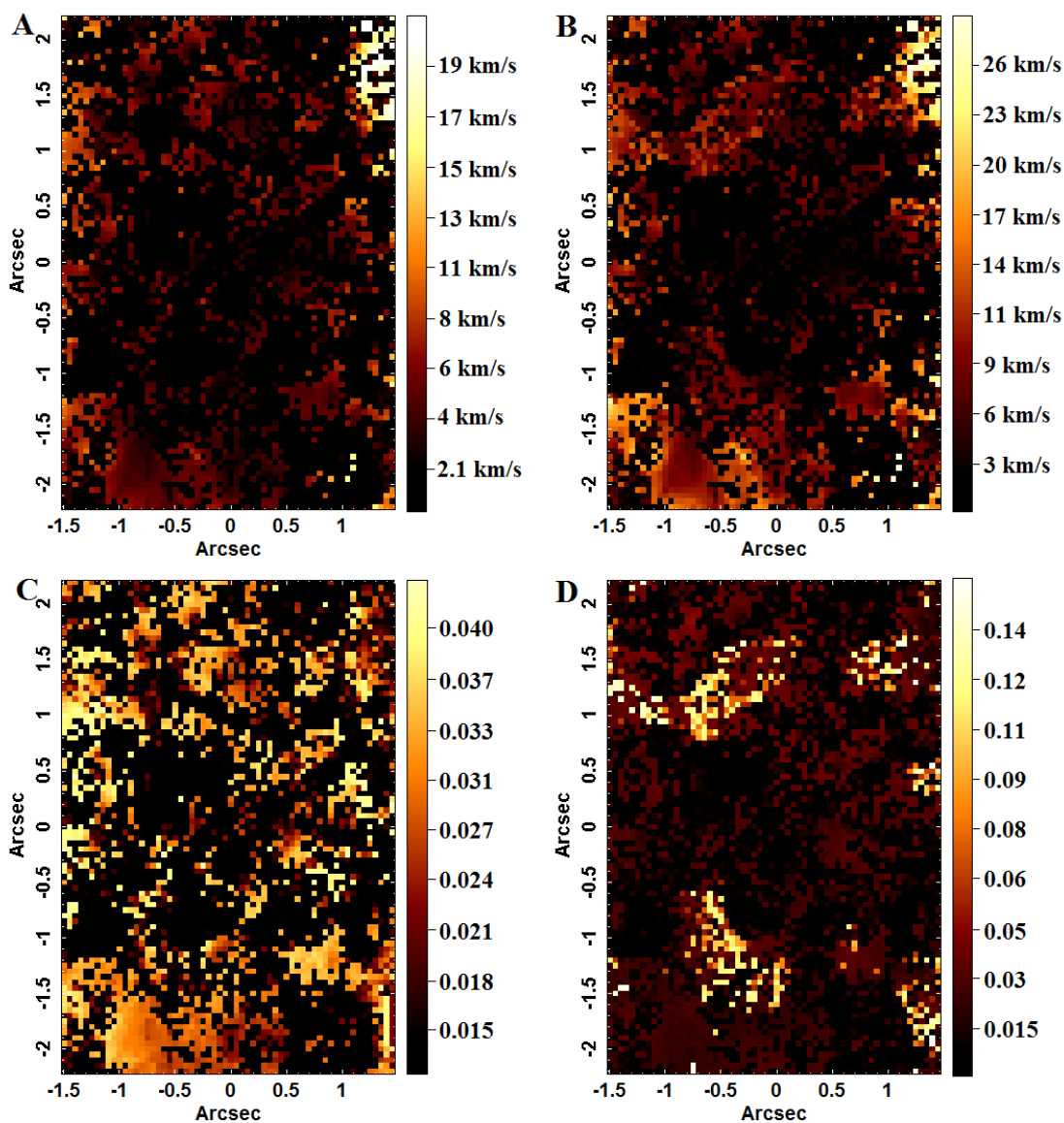


Figura 6.16: Mapas de incertezas da velocidade radial estelar (A), da dispersão de velocidades estelar (B) e dos coeficientes h_3 (C) e h_4 de Gauss-Hermite obtidos com o pPXF.

O mapa de incerteza da velocidade (Fig. 6.16A) mostra que as maiores incertezas estão na região de baixo S/N, o que era esperado. Nas demais regiões há uma distribuição quase homogênea com valores menores de incerteza. O mapa da incerteza da dispersão de velocidades (Fig. 6.16B) apresenta 2 regiões onde as incertezas são maiores: a região onde há baixo S/N e a região inferior esquerda. As incertezas são menores na região central. Já o mapa de incerteza do coeficiente de Gauss-Hermite h_3 (Fig. 6.16C) revela valores com pouca variação em todo o campo, sendo que os menores estão na região central. O mapa de incerteza de h_4 (Fig. 6.16D), por sua vez, mostra valores mais elevados em regiões específicas do FOV. As demais áreas apresentam valores menores e com pouca variação.

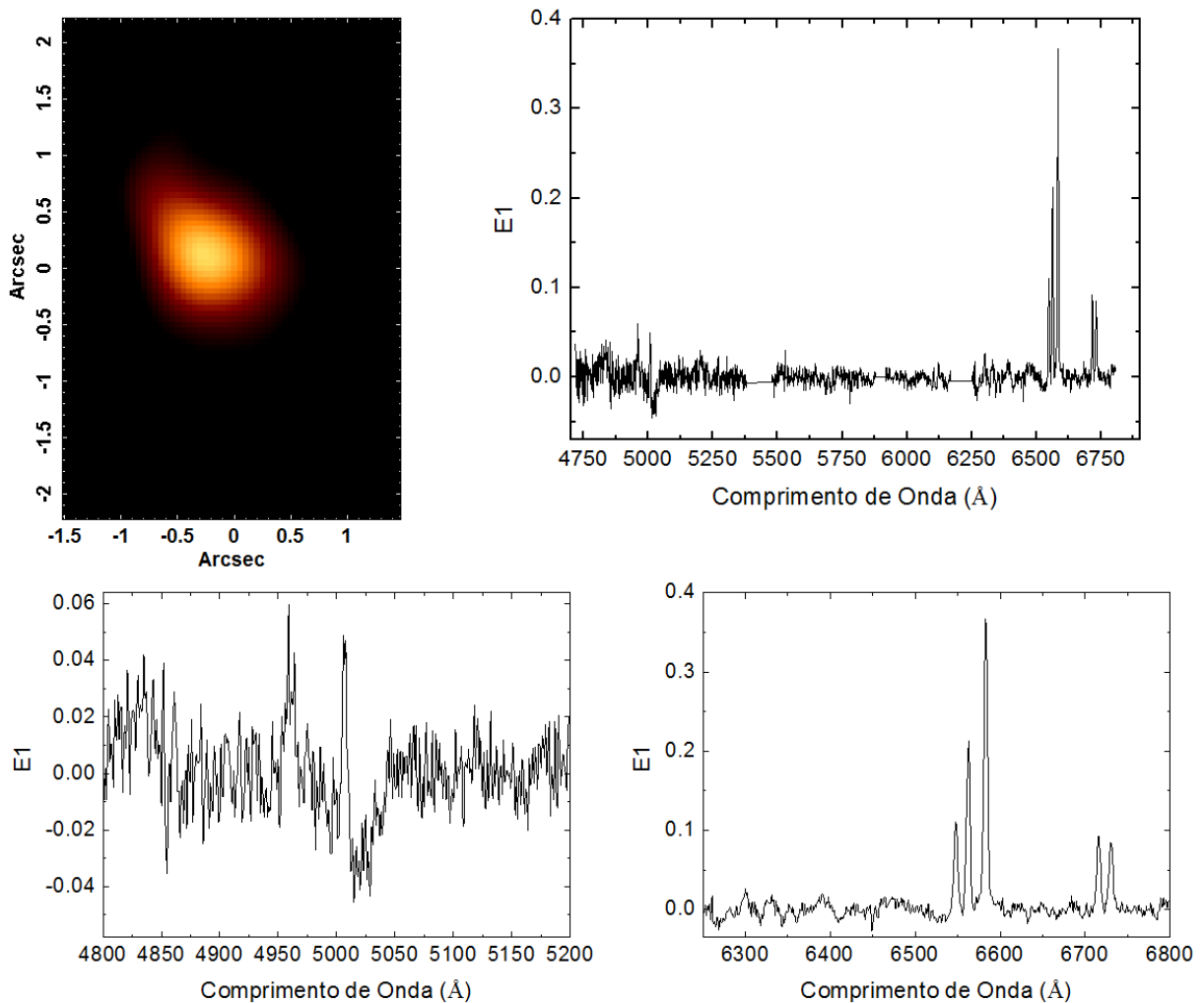


Figura 6.17: Tomograma e auto-espectro 1 da Tomografia PCA aplicada ao cubo de gás, com ampliações nas regiões azul e vermelha do auto-espectro.

6.6 Tomografia PCA do cubo de gás

Para se determinar possíveis fenômenos associados ao gás na região central de NGC 134, foi aplicada a Tomografia PCA ao cubo de gás (ver seção 2.4.3). Da mesma forma que na Tomografia PCA do cubo deconvoluído, a Tomografia PCA do cubo de gás total não separou bem os fenômenos e foi preciso aplicar também a Tomografia PCA ao CCD 3 (6250Å a 6900Å), onde a informação do gás é predominante. Como se espera que esse cubo só contenha informação do gás, não foi necessário aplicar a Tomografia PCA ao CCD 2, já que esta parte do espectro não possui muita informação sobre o gás.

6.6.1 Cubo total

A Tomografia PCA aplicada ao cubo de gás total possui apenas um conjunto tomograma e auto-espectro que pode ser interpretável, que é o primeiro (Fig. 6.17). Nele é possível observar a região central, presente nos tomogramas 1 de todas as Tomografias PCA aqui aplicadas e na imagem do cubo colapsado, mostrando que essa área é dominante nos dados. Pode-se notar também que a região azul do auto-espectro é bastante ruidosa e a região vermelha apresenta as mesmas linhas observadas no auto-espectro E2 da Tomografia PCA do CCD 3 do cubo deconvoluído (Fig. 6.9).

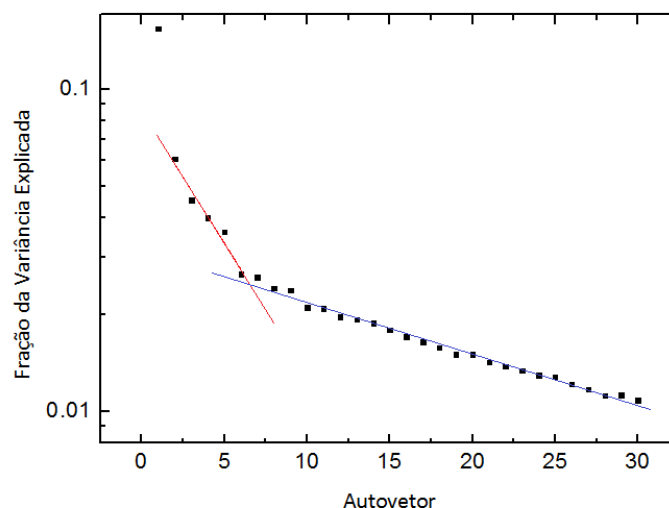


Figura 6.18: Diagrama de *Scree* com os 30 primeiros autovetores da Tomografia PCA aplicada ao cubo de gás de NGC 134.

Nota-se que, no diagrama de *Scree* (Fig. 6.18), o autovetor E1 não explica uma fração de variância muito significativa. De fato, ao observar a tabela 6.4, percebe-se que este

Tabela 6.4 - Tabela com os primeiros 15 autovalores da Tomografia PCA aplicada ao cubo de gás total de NGC 134

Autovetor	Fração da Variância Explicada (%)
E1	15.41
E2	6.07
E3	4.52
E4	3.99
E5	3.60
E6	2.66
E7	2.60
E8	2.41
E9	2.37
E10	2.10
E11	2.08
E12	1.96
E13	1.93
E14	1.88
E15	1.79

autovetor representa apenas 15% da variância. Isto porque, sem o contínuo estelar, o cubo de gás possui ainda mais ruído em relação à informação. Em outras palavras, a informação interpretável, quando se considera o cubo inteiro de gás, representa apenas 15% da variância. É possível notar que a taxa de decaimento da fração de variância é constante em duas partes: do autovetor E2 ao E6, mostrando que ainda há alguma informação nestes autovetores, embora não seja possível interpretar (pois o ruído é bastante significativo); e a partir do autovetor E7, onde a taxa de decaimento é menor, mostrando que o ruído é dominante a partir deste autovetor.

6.6.2 CCD3 (6250Å a 6900Å)

O tomograma 1 (Fig. 6.19) mostra novamente a região central, que, como foi dito anteriormente, é aquela com emissão dominante no cubo de dados. O auto-espectro mostra as linhas de emissão [NII] λ 6548, 6584 e H α na mesma proporção dos auto-espectros E2 da Tomografia PCA do CCD 3 do cubo deconvoluído (Fig. 6.9) e E1 da Tomografia PCA do cubo de gás (Fig. 6.17). Há também correlações com as linhas [OI] λ 6300 e [SII] λ 6716,

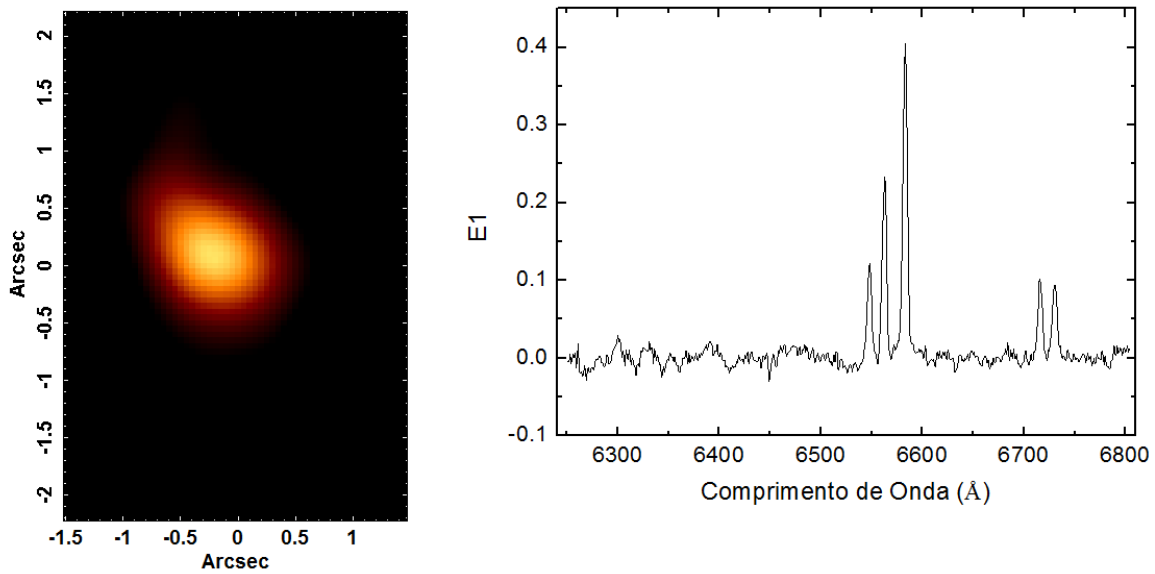


Figura 6.19: Tomograma e auto-espectro 1 da Tomografia PCA aplicada ao CCD3 do cubo de gás.

6731. A fração de variância explicada por este e pelos demais auto-espectros se encontra na tabela 6.5.

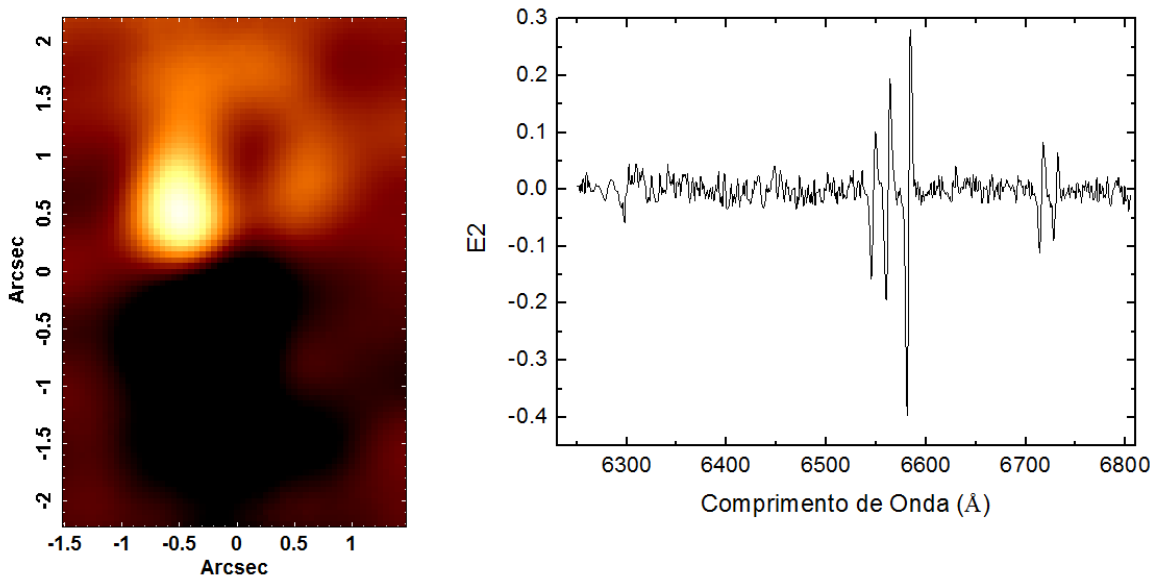


Figura 6.20: Tomograma e auto-espectro 2 da Tomografia PCA aplicada ao CCD3 do cubo de gás.

O auto-espectro E2 (Fig. 6.20) está correlacionado com as asas vermelhas das principais linhas de emissão dessa região espectral e anti-correlacionado com as asas azuis das mesmas. A região clara do tomograma, que está correlacionada com o auto-espectro,

portanto, representa o gás que está em *redshift* e a região inferior do tomograma, o gás em *blueshift*. Esse conjunto tomograma/auto-espectro é muito semelhante ao conjunto tomograma/auto-espectro 3 da Tomografia PCA do cubo deconvoluído (Fig. 6.3). Portanto, esse conjunto tomograma/auto-espectro revela a cinemática do gás, que pode ser tanto um *outflow*, caso haja um AGN na região central, como uma rotação com o mesmo sentido da rotação estelar, como foi dito anteriormente.

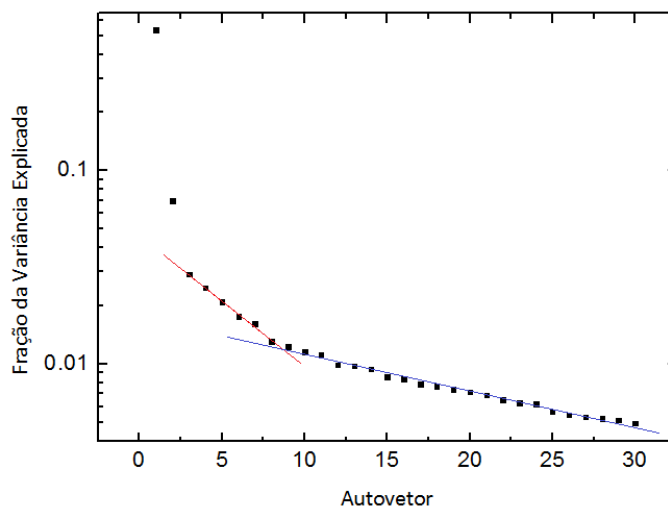


Figura 6.21: Diagrama de *Scree* da Tomografia PCA aplicada ao CCD3 do cubo de gás de NGC 134.

Tabela 6.5 - Tabela com os 10 primeiros autovalores da Tomografia PCA aplicada ao CCD3 do cubo de gás de NGC 134

Autovetor	Fração da Variância Explicada (%)
E1	53.28
E2	6.99
E3	2.90
E4	2.47
E5	2.09
E6	1.76
E7	1.61
E8	1.31
E9	1.22
E10	1.15

O diagrama de *Scree* da Fig. 6.21 mostra, claramente, o fato de haver apenas 2

tomogramas/auto-espectros interpretáveis nessa aplicação da Tomografia PCA. A partir do autovetor E3 não há mais informação interpretável e a taxa de decaimento da fração de variância se torna constante. Após o autovetor E8 a taxa de decaimento é ainda menor, mostrando que, a partir deste autovetor, há essencialmente apenas ruído.

6.7 Razões de Linhas

Como foi dito anteriormente existem 3 regiões emissoras em NGC 134 (Região 1: Figs. 6.1, 6.2, 6.5, 6.8, 6.17 e 6.19, Região 2: Figs. 6.9 e 6.20 e Região 3: Fig.6.10). Entretanto, apenas na Região 1, localizada aproximadamente no centro do FOV, foi possível calcular a razão de linhas, já que a parte azul do espectro é bastante ruidosa nos espectros das demais regiões. Mesmo assim, a incerteza do fluxo integrado de $H\beta$ foi alta na Região 1. O espectro dela foi extraído de uma área circular centrada em ($0'';0''$) e com raio igual à metade da PSF: $0''.32$. A tabela 6.6 contém as luminosidades de $H\alpha$, $[OIII]\lambda 5007$ e $[NII]\lambda 6584$ corrigidas de extinção. O FWHM representativo das linhas da Região 1 é 225 ± 33 km/s.

Tabela 6.6 - Luminosidades corrigidas de extinção das linhas $[OIII]\lambda 5007$, $[NII]\lambda 6584$ e $H\alpha$ de NGC 134

	Luminosidades (10^{38} erg/s)
$H\alpha$	1.32 ± 0.08
$[OIII]\lambda 5007$	0.74 ± 0.07
$[NII]\lambda 6584$	2.48 ± 0.21

Como se pode ver no espectro da região central de NGC 134 (Fig. 6.22), há muito ruído na parte azul. Portanto, é justificável que as incertezas das razões $[OIII]/H\beta$ e $H\alpha/H\beta$ sejam grandes.

Ao observar as razões de linhas da região central de NGC 134 (tabela 6.7) e os diagramas de diagnóstico (Fig. 6.23), nota-se que a emissão dessa área é compatível com a de galáxias de Seyfert (neste caso tipo 2, pois não há componentes largas de $H\alpha$ nem $H\beta$), LINERs ou de objetos de transição. A razão $H\alpha/H\beta$, embora possua uma grande incerteza, parece sugerir que esta região apresenta uma considerável extinção por poeira, que não foi totalmente removida com a correção feita utilizando-se os valores de A_V fornecidos pela síntese espectral.

Como foi discutido na seção 3.7.3 do capítulo 3, é possível determinar uma densidade

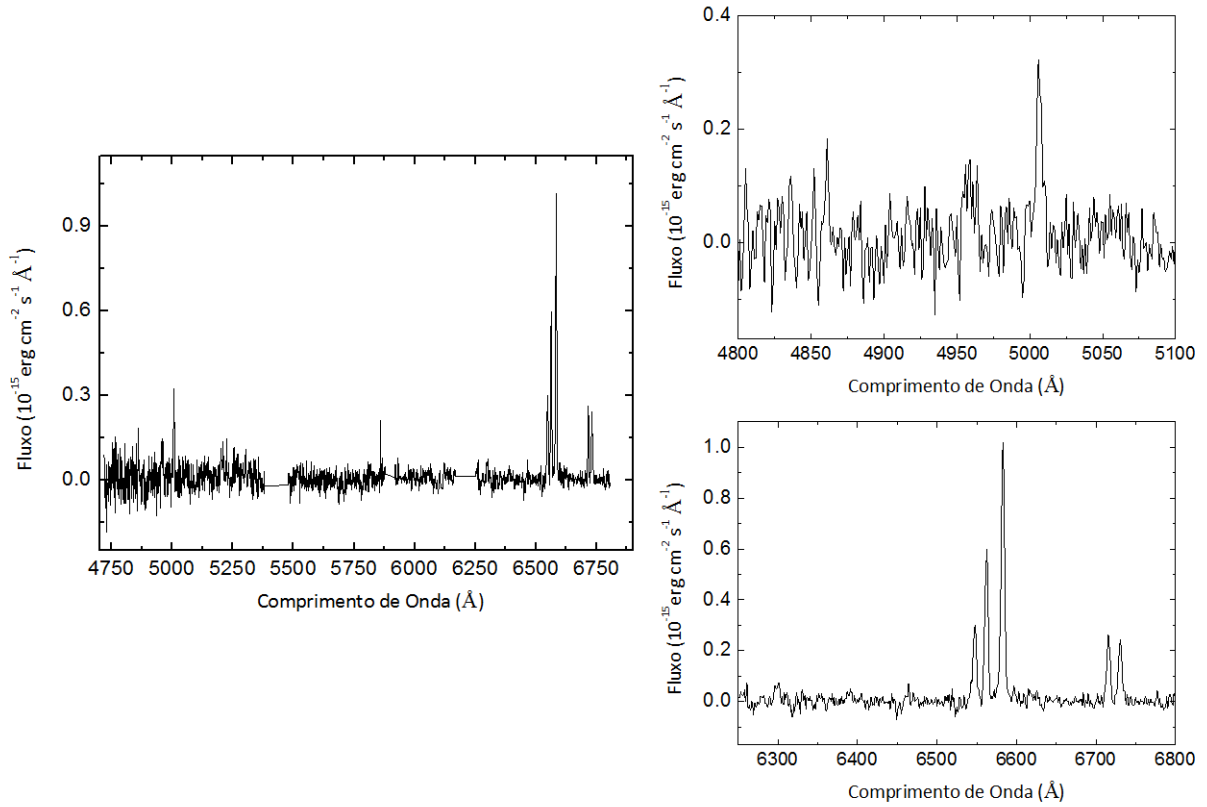


Figura 6.22: Espectro da região central do FOV (Região 1) de NGC 134.

Tabela 6.7 - Tabela das razões de linhas da região central de NGC 134

Razão de Linhas	Região Central NGC 134
[OIII] λ 5007/H β	5.2 ± 1.4
[NII] λ 6584/H α	1.88 ± 0.20
[OI] λ 6300/H α	0.16 ± 0.04
([SII] λ 6716+6731)/H α	0.90 ± 0.07
H α /H β	9.3 ± 2.5
[SII] λ 6716/[SII] λ 6731	0.98 ± 0.08

eletrônica média a partir da razão [SII] λ 6716/[SII] λ 6731. A densidade encontrada aqui foi:

$$618^{+231}_{-172} \text{ cm}^{-3}.$$

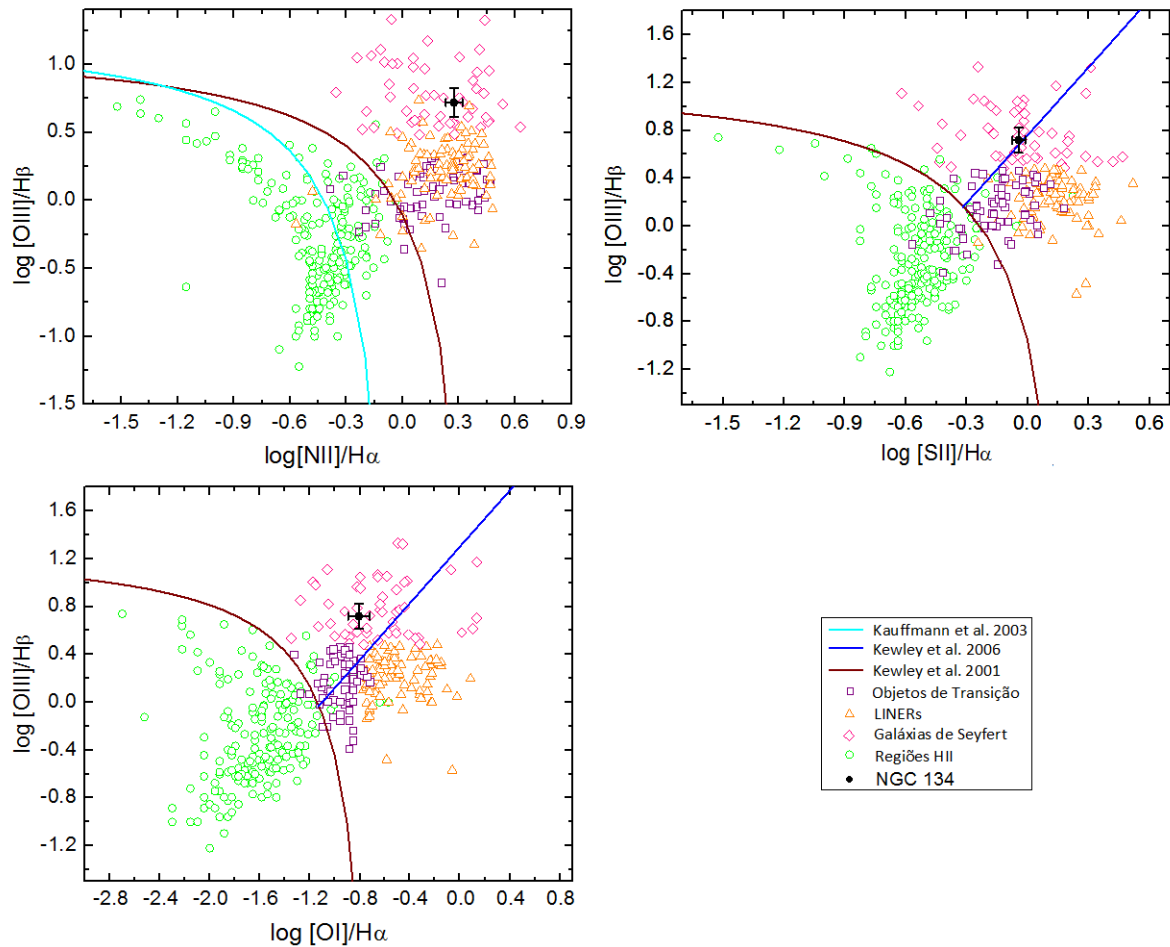


Figura 6.23: Diagramas de diagnóstico da região central de NGC 134, com os valores da tabela 6.7. A região emissora central é representada pelo ponto preto. Os demais pontos correspondem aos objetos analisados por Ho et al. (1997): os círculos verdes são regiões HII, os triângulos laranjas são LINERs, os quadrados em roxo são objetos de transição e os losangos rosas representam as galáxias de Seyfert. O ajuste vinho nos diagramas A, B e C mostra o limite máximo de ionização por um *starburst* obtido por Kewley et al. (2001). O ajuste em ciano representa a divisão entre regiões HII e AGNs obtida por Kauffmann et al. (2003) e a linha azul representa a divisão entre galáxias de Seyfert e LINERs criada por Kewley et al. (2006).

6.8 Imagens da emissão de $[SII]\lambda\lambda 6716, 6731$ das nuvens de alta e baixa densidades

As imagens da emissão de $[SII]\lambda\lambda 6716, 6731$ das nuvens de alta e baixa densidade foram criadas a partir do processo descrito na seção 2.4.5 do capítulo 2.

A imagem de $[SII]\lambda\lambda 6716, 6731$ das nuvens de alta densidade (Fig. 6.24A) revela que essas nuvens estão concentradas na região central. Por outro lado, as nuvens de baixa densidade (Fig. 6.24B) estão espalhadas numa faixa que parte de $\sim (-1''; 0''5)$ a $(0''5; -0''5)$.

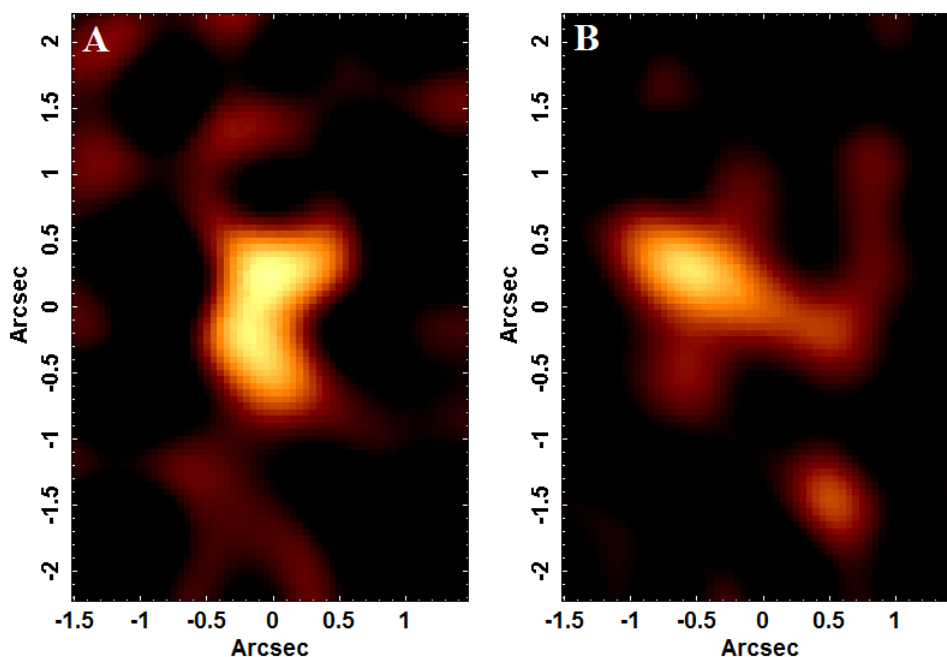


Figura 6.24: Imagens da emissão de $[SII]\lambda\lambda 6716, 6731$ das nuvens de alta (A) e baixa (B) densidades de NGC 134.

6.9 Discussão e conclusão

6.9.1 AGN central e outras regiões

Existe uma região no centro do FOV de emissão dominante no cubo de dados de NGC 134. Essa região é o centro do bojo estelar, como pode-se notar na Fig. 6.25. Essa região aparece sempre nos autovetores E1 de todas as Tomografias PCA aplicadas aqui (Figs. 6.2, 6.5, 6.8, 6.17 e 6.19), revelando a sua importância nos dados, já que os autovetores E1 são os que explicam a maior parte da variância dos dados. Ela possui razões de linhas compatíveis com a emissão de galáxia de Seyfert, LINER ou objeto de transição. A incerteza é alta devido à grande quantidade de ruído na região azul do espectro, onde se localiza a linha de $H\beta$, que é fundamental para avaliar o seu grau de ionização.

A emissão do objeto central é compatível com a de galáxia de Seyfert, o que é consistente com a afirmação de Veron-Cetty e Veron (1986). Dessa forma, é provável que haja um AGN de tipo 2 nesse objeto, com um forte obscurecimento da BLR por poeira. A elevada razão $H\alpha/H\beta$, apesar de bastante incerta, é compatível com esse cenário. O mapa de extinção (Fig.6.14A) revela que o pico de A_V está na região central.

A Tomografia PCA ainda revelou outras 2 regiões, cujas razões de linhas foram im-

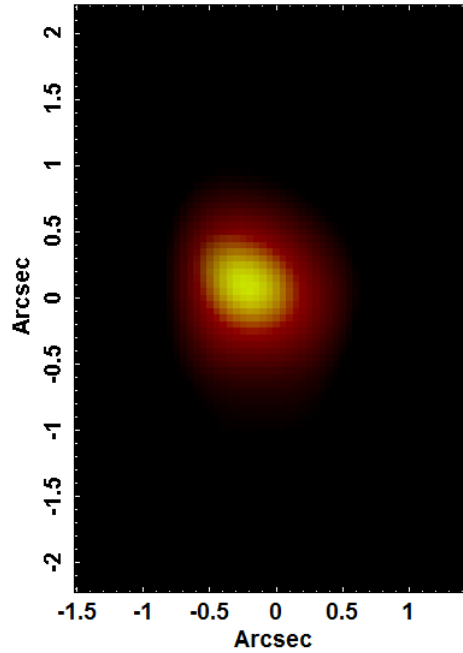


Figura 6.25: Composição RG da imagem da integral do cubo sintético estelar (em vermelho) e o tomograma 1 (em verde) da Tomografia PCA aplicada ao CCD3 do cubo de gás.

possíveis de serem determinadas, devido ao elevado ruído na região azul do espectro.

6.9.2 Cinemática do gás

A partir da Tomografia PCA (Figs.6.20 e 6.3) é possível avaliar a cinemática do gás, com as regiões inferiores do FOV em *blueshift* e as regiões superiores em *redshift*. Isso também é comprovado fazendo-se uma composição RGB da linha $H\alpha$ (Fig. 6.26). É possível notar que a emissão de $H\alpha$ possui uma cinemática em torno da região central, como todo o gás, podendo ser tanto um *outflow*, quanto um movimento rotacional, com o mesmo sentido da rotação estelar.

6.9.3 Populações estelares e sua cinemática

A partir dos resultados do pPXF e da Tomografia PCA (Figs. 6.15A, 6.3, 6.6), é possível notar que as estrelas apresentam uma rotação em torno da região central, com eixo não claramente definido, mas que aparenta ser horizontal. As velocidades positivas (*redshift*) estão na região superior do mapa de velocidades e as negativas (*blueshift*) na região inferior.

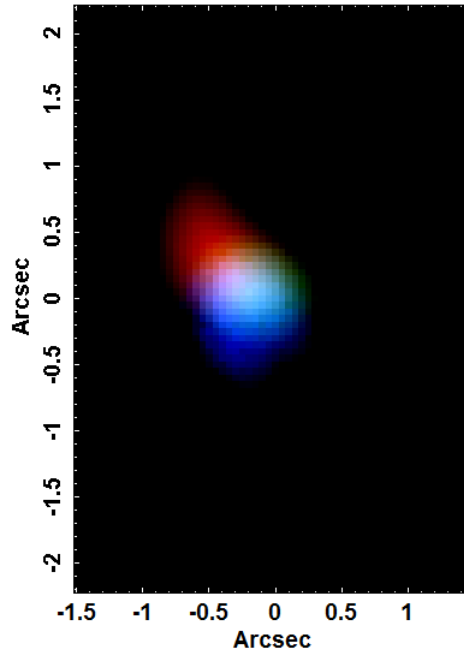


Figura 6.26: Composição RGB da linha $H\alpha$ de NGC 134. A cor vermelha representa o gás em *redshift*, a cor verde o gás com baixa velocidade radial e a a cor azul o gás em *blueshift*.

A dispersão de velocidades não apresenta tendências, seus valores estão distribuídos aleatoriamente ao longo do FOV. No centro seu valor é $\sim 130 \pm 6$ km/s.

A síntese espectral (Figs. 6.12 e 6.13) revelou a presença de populações velhas (9×10^{10} e 10^{10} anos) com média (0.004 e 0.008) e alta (0.02 e 0.05) metalicidades representando a maior parte da fração de fluxo. Com uma menor fração, tem-se populações jovens com alta metalicidade. Ou seja, o núcleo de NGC 134 é predominantemente velho.

Conclusões

Neste trabalho foram realizadas análises de cubos de dados das regiões centrais de quatro galáxias com tipos morfológicos semelhantes ao da Via Láctea. Foram encontrados núcleos ativos em todos os objetos e 2 possíveis núcleos ativos duplos. NGC 1566 e NGC 134 possuem núcleo com emissão compatível com a de galáxias de Seyfert. NGC 6744 possui uma região com espectro compatível com o de LINERs, mas também possui uma segunda região com espectro compatível com o de galáxias Seyfert. Já NGC 613 possui duas regiões no seu centro, ambas com emissão compatível com a de LINERs.

Todos objetos estudados apresentaram possíveis estruturas além da região nuclear central. No caso de NGC 134, devido ao alto ruído nos espectros, não se pôde estudar com detalhes todas as regiões encontradas. NGC 1566 apresentou uma região HII próxima ao centro. NGC 6744 apresentou, além do outro possível AGN, a região 3, que é de alta ionização e parece ser um cone de ionização da fonte central (Região 1). NGC 613 apresentou, além do seu segundo núcleo, 7 possíveis regiões HII ao redor.

Observar esses núcleos galácticos com cubo de dados, com a resolução aqui apresentada, permitiu um estudo mais preciso desses objetos (em quase todos os casos, inédito), já que, com outros instrumentos (de menor resolução), não é possível separar as emissões de regiões próximas, o que pode gerar classificações imprecisas dessas emissões e outras conclusões errôneas.

Apenas em 2 galáxias foi possível observar a emissão do *featureless continuum* do AGN em questão: em NGC 613, onde essa emissão não coincide com a posição do AGN, o que pode ser devido a espalhamento por poeira, e em NGC 1566, onde foi detectado um *featureless continuum* (com uma área de emissão um pouco maior do que a da PSF) com índice espectral igual a 1.7, o qual não é muito diferente do valor comumente usado, que é

igual a 1.5. O estudo do *featureless continuum* de NGC 1566, emissão essa separada com a ajuda da Tomografia PCA, é inédito.

A cinemática do gás, no geral, apresentou prováveis discos em rotação em torno das fontes centrais. No caso de NGC 1566, além do gás em rotação em torno do AGN central, há também uma espiral de gás, vista claramente nas imagens do HST, e um possível anel de emissão de linhas estreitas. A região HII encontrada em NGC 1566 faz parte da estrutura espiral e está em *redshift* em relação ao AGN. Quanto a NGC 613, há muitos fenômenos cinemáticos do gás: rotação das regiões HII em torno da região central do FOV, uma possível rotação em sentido contrário numa área mais próxima à Região N1 e um *outflow* partindo da Região N1 em direção à borda esquerda do FOV, cujo *position angle* encontrado está entre 17° e 37° . Para todas as regiões cujos espectros foram compatíveis com a emissão de regiões HII, foram determinadas suas taxas de formação estelar. A taxa de formação estelar da região HII encontrada em 1566 foi compatível com a literatura.

As populações estelares encontradas nestes objetos variaram em idade, mas pouco em metalicidade. A maior parte das populações estelares detectadas apresentaram alta metalicidade, mas, em menor número, também foram detectadas populações com média metalicidade. As duas galáxias que apresentaram possíveis AGNs duplos (NGC 613 e NGC 6744), apresentaram, na síntese espectral, picos de populações estelares com idades de 10^9 anos. Isso sustenta a hipótese de que estas galáxias passaram por um processo de *merger* há 1 bilhão de anos que gerou essas populações estelares, que estão concentradas nas regiões circumnucleares, como se espera para este cenário.

O estudo da cinemática estelar, em todas galáxias, revelou discos em rotação em torno dos objetos centrais. Muitos deles com eixos não bem definidos, mas todos passando pelos objetos centrais. Duas galáxias apresentaram *sigma - drop*: NGC 6744 e NGC 1566, provavelmente devido à presença de populações jovens e massivas na região central, que são cinematicamente frias, gerando, assim, a queda da dispersão de velocidades nas regiões mais centrais. Exceto em NGC 613, cujo mapa de h_3 é muito impreciso, os mapas de h_3 apresentam uma anti-correlação com o mapa de velocidades estelar, o que indica uma rotação de estrelas sobreposta a um fundo de estrelas em repouso em relação à linha de visada.

Ao comparar os dados aqui obtidos com os da Via Láctea, pode-se notar que todas essas galáxias possuem certas estruturas circumnucleares, além de um AGN central (ou

um buraco negro central, no caso da Via Láctea). Na Via Láctea há uma região HII (*Sgr A West*) no pc central. Nas galáxias NGC 613 e NGC 1566, também foram detectadas regiões HII circumnucleares, sendo que, em NGC 613, tem-se um anel composto por 7 regiões HII em torno da região central. Não se pode afirmar nada sobre NGC 134, mas, em NGC 6744, não foram detectadas regiões HII. Como na Via Láctea, encontraram-se aqui populações estelares jovens de metalicidade alta em todos os objetos (exceto em NGC 134, onde o fluxo atribuído a essas populações é baixo) e discos de rotação estelar em torno do buraco negro central.

Não há como tirar conclusões estatísticas com apenas 4 objetos, além do que se sabe da Via Láctea. O próximo passo deste estudo é ampliar a amostra com mais 6 núcleos de galáxias com o mesmo tipo morfológico da Via Láctea do hemisfério sul, presentes no *survey Diving 3D*, aumentando o limite para as magnitudes da amostra: $B < 11.7$.

Embora seja difícil estabelecer um contexto evolutivo com apenas comparações entre 5 galáxias, ao considerar apenas esses resultados, pode-se ver que a Via Láctea parece ser o cenário futuro para os AGNs observados nesta amostra. Nesse caso, as galáxias que possuem emissão Seyfert seriam os primórdios desses núcleos e LINERs a etapa intermediária, para concluir em um buraco negro sem atividade de acreção. Nesse período evolutivo, podem ocorrer possíveis mergers, o que torna a evolução desses núcleos mais demorada (ou seja, o AGN permanece ativo por mais tempo).

Há um artigo sendo elaborado sobre NGC 1566. Em seguida, pretende-se escrever sobre NGC 6744 e NGC 613.

Referências Bibliográficas

- Agüero E. L., Díaz R. J., Bajaja E., NGC 1566: Spectroscopy of a symmetric system with Seyfert nucleus, *A&A*, 2004, vol. 414, p. 453
- Alloin D., Pelat D., Phillips M. M., Fosbury R. A. E., Freeman K., Recurrent outbursts in the broad-line region of NGC 1566, *ApJ*, 1986, vol. 308, p. 23
- Baldwin J. A., Phillips M. M., Terlevich R., Classification parameters for the emission-line spectra of extragalactic objects, *PASP*, 1981, vol. 93, p. 5
- Batcheldor D., Axon D., Merritt D., Hughes M. A., Marconi A., Binney J., Capetti A., Merrifield M., Scarlata C., Sparks W., Integral Field Spectroscopy of 23 Spiral Bulges, *ApJS*, 2005, vol. 160, p. 76
- Beckman J. E., Bransgrove S. G., Phillips J. P., H II region spectroscopy and two dimensional stellar photometry of the barred Seyfert NGC 1566, *A&A*, 1986, vol. 157, p. 49
- Begelman M. C., Blandford R. D., Rees M. J., Massive black hole binaries in active galactic nuclei, *Nature*, 1980, vol. 287, p. 307
- Blackman C. P., Velocity fields in the southern barred spirals NGC 613, 1097, 1313 and 1365, *MNRAS*, 1981, vol. 195, p. 451
- Böker T., Falcón-Barroso J., Schinnerer E., Knapen J. H., Ryder S., A SINFONI View of Galaxy Centers: Morphology and Kinematics of Five Nuclear Star Formation-Rings, *AJ*, 2008, vol. 135, p. 479

- Bottema R., The stellar velocity dispersion of the spiral galaxies NGC 1566 and NGC 2815, *A&A*, 1992, vol. 257, p. 69
- Cappellari M., Emsellem E., Parametric Recovery of Line-of-Sight Velocity Distributions from Absorption-Line Spectra of Galaxies via Penalized Likelihood, *PASP*, 2004, vol. 116, p. 138
- Cardelli J. A., Clayton G. C., Mathis J. S., The relationship between infrared, optical, and ultraviolet extinction, *ApJ*, 1989, vol. 345, p. 245
- Cid Fernandes R., Mateus A., Sodré L., Stasińska G., Gomes J. M., Semi-empirical analysis of Sloan Digital Sky Survey galaxies - I. Spectral synthesis method, *MNRAS*, 2005, vol. 358, p. 363
- Clavel J., Joly M., The 1200-3200 Å spectra of Seyfert I galaxies - MK 304, NGC 7603, MCG 8-11-11, ESO 12-G 21, and NGC 1566, *A&A*, 1984, vol. 131, p. 87
- Clavel J., Schulz B., Altieri B., Barr P., Claes P., Heras A., Leech K., Metcalfe L., Salama A., 2.5-11 micron spectroscopy and imaging of AGNs. Implication for unification schemes, *A&A*, 2000, vol. 357, p. 839
- Combes F., García-Burillo S., Casasola V., Hunt L. K., Krips M., Baker A. J., Boone F., Eckart A., Marquez I., Neri R., Schinnerer E., Tacconi L. J., ALMA reveals the feeding of the Seyfert 1 nucleus in NGC 1566, *A&A*, 2014, vol. 565, p. A97
- Comerón S., Knapen J. H., Beckman J. E., Laurikainen E., Salo H., Martínez-Valpuesta I., Buta R. J., AINUR: Atlas of Images of Nuclear Rings, *MNRAS*, 2010, vol. 402, p. 2462
- Comte G., Duquennoy A., The galaxy NGC 1566 - Distribution and kinematics of the ionized gas, *A&A*, 1982, vol. 114, p. 7
- de Vaucouleurs G., Southern Galaxies.VI. Luminosity Distribution in the Seyfert Galaxy NGC 1566, *ApJ*, 1973, vol. 181, p. 31
- de Vaucouleurs G., de Vaucouleurs A., Classification and radial velocities of bright southern galaxies., *MmRAS*, 1961, vol. 68, p. 69

- de Vaucouleurs G., de Vaucouleurs A., Proceedings of the Conference on Seyfert Galaxies and Related Objects: 12. Photographic, Photometric, and Spectroscopic Observations of Seyfert Galaxies, *AJ*, 1968, vol. 73, p. 858
- Dottori H. A., NGC 613: Nuclear Region Narrow Band Imagery. In *Active Galactic Nuclei*, vol. 134 of IAU Symposium, 1989, p. 474
- Ehle M., Beck R., Haynes R. F., Vogler A., Pietsch W., Elmouttie M., Ryder S., Magnetic fields and hot gas in the spiral galaxy NGC 1566 as derived from ATCA radio polarization and ROSAT X-ray observations., *A&A*, 1996, vol. 306, p. 73
- Elmegreen B. G., Block D. L., Bogus dust screens from well-mixed exponential discs in galaxies, *MNRAS*, 1999, vol. 303, p. 133
- Elvis M., Fasnacht C., Wilson A. S., Briel U., Extended X-ray emission in nearby Seyfert galaxies, *ApJ*, 1990, vol. 361, p. 459
- Falcón-Barroso J., Ramos Almeida C., Böker T., Schinnerer E., Knapen J. H., Lançon A., Ryder S., The circumnuclear environment of NGC 613: a nuclear starburst caught in the act?, *MNRAS*, 2014, vol. 438, p. 329
- Fisher D. B., Drory N., Bulges of Nearby Galaxies with Spitzer: Scaling Relations in Pseudobulges and Classical Bulges, *ApJ*, 2010, vol. 716, p. 942
- Garrison R. F., Walborn N. R., Morphological Properties of Some Bright Southern Galaxies, *JRASC*, 1974, vol. 68, p. 117
- Genzel R., Eisenhauer F., Gillessen S., The Galactic Center massive black hole and nuclear star cluster, *Reviews of Modern Physics*, 2010, vol. 82, p. 3121
- Genzel R., Pichon C., Eckart A., Gerhard O. E., Ott T., Stellar dynamics in the Galactic Centre: proper motions and anisotropy, *MNRAS*, 2000, vol. 317, p. 348
- Genzel R., Thatte N., Krabbe A., Kroker H., Tacconi-Garman L. E., The Dark Mass Concentration in the Central Parsec of the Milky Way, *ApJ*, 1996, vol. 472, p. 153
- Gillessen S., Eisenhauer F., Trippe S., Alexander T., Genzel R., Martins F., Ott T., Monitoring Stellar Orbits Around the Massive Black Hole in the Galactic Center, *ApJ*, 2009, vol. 692, p. 1075

- Gonzalez R. C., Woods R. E., Digital image processing, 2002
- Hackwell J. A., Schweizer F., Infrared mapping and UBVRi photometry of the spiral galaxy NGC 1566, *ApJ*, 1983, vol. 265, p. 643
- Harnett J. I., Reynolds J. E., Observations of edge-on galaxies at 843 MHz, *A&AS*, 1991, vol. 88, p. 73
- Hawley S. A., Phillips M. M., Spectrophotometry of H II regions and the nucleus of NGC 1566, *ApJ*, 1980, vol. 235, p. 783
- Ho L. C., Filippenko A. V., Sargent W. L. W., A Search for “Dwarf” Seyfert Nuclei. III. Spectroscopic Parameters and Properties of the Host Galaxies, *ApJS*, 1997, vol. 112, p. 315
- Hubble E. P., Extragalactic nebulae., *ApJ*, 1926, vol. 64
- Hummel E., Jorsater S., The central region of NGC 613 revisited, *A&A*, 1992, vol. 261, p. 85
- Hummel E., Jorsater S., Lindblad P. O., Sandqvist A., The central region of NGC 613. Evidence for an accelerated collimated outflow, *A&A*, 1987, vol. 172, p. 51
- Kauffmann G., Heckman T. M., Tremonti C., Brinchmann J., Charlot S., White S. D. M., Ridgway S. E., Brinkmann J., Fukugita M., Hall P. B., Ivezić Ž., Richards G. T., Schneider D. P., The host galaxies of active galactic nuclei, *MNRAS*, 2003, vol. 346, p. 1055
- Kawamuro T., Ueda Y., Tazaki F., Terashima Y., Broadband X-Ray Spectra of Two Low-luminosity Active Galactic Nuclei NGC 1566 and NGC 4941 Observed with Suzaku, *ApJ*, 2013, vol. 770, p. 157
- Keel W. C., Lintott C. J., Schawinski K., Bennert V. N., Thomas D., Manning A., Chojnowski S. D., van Arkel H., Lynn S., The History and Environment of a Faded Quasar: Hubble Space Telescope Observations of Hanny’s Voorwerp and IC 2497, *AJ*, 2012, vol. 144, p. 66
- Kewley L. J., Dopita M. A., Sutherland R. S., Heisler C. A., Trevena J., Theoretical Modeling of Starburst Galaxies, *ApJ*, 2001, vol. 556, p. 121

- Kewley L. J., Groves B., Kauffmann G., Heckman T., The host galaxies and classification of active galactic nuclei, *MNRAS*, 2006, vol. 372, p. 961
- Khachikian E. Y., Weedman D. W., An atlas of Seyfert galaxies, *ApJ*, 1974, vol. 192, p. 581
- Kormendy J., A morphological survey of bar, lens, and ring components in galaxies Secular evolution in galaxy structure, *ApJ*, 1979, vol. 227, p. 714
- Lintott C. J., Schawinski K., Keel W., et al. Galaxy Zoo: ‘Hanny’s Voorwerp’, a quasar light echo?, *MNRAS*, 2009, vol. 399, p. 129
- Lucy L. B., An iterative technique for the rectification of observed distributions, *AJ*, 1974, vol. 79, p. 745
- Lynds B. T., An atlas of dust and H II regions in galaxies, *ApJS*, 1974, vol. 28, p. 391
- Martin W. L., Spectrophotometry of six Seyfert nuclei, *MNRAS*, 1974, vol. 168, p. 109
- Martin W. L., Radial velocities of southern galaxies., *MNRAS*, 1976, vol. 175, p. 633
- Martins F., Genzel R., Hillier D. J., Eisenhauer F., Paumard T., Gillessen S., Ott T., Trippe S., Stellar and wind properties of massive stars in the central parsec of the Galaxy, *A&A*, 2007, vol. 468, p. 233
- Martins F., Hillier D. J., Paumard T., Eisenhauer F., Ott T., Genzel R., The most massive stars in the Arches cluster, *A&A*, 2008, vol. 478, p. 219
- Menezes R., Espectroscopia 3D de núcleos ativos de galáxias: tratamento e análise de dados no óptico e no infravermelho próximo., São Paulo: Universidade de São Paulo, IAG, 2012, Tese de Doutorado, 614 p.
- Menezes R. B., da Silva P., Ricci T. V., Steiner J. E., May D., Borges B. W., A treatment procedure for VLT/SINFONI data cubes: application to NGC 5643, *MNRAS*, 2015, vol. 450, p. 369
- Menezes R. B., Steiner J. E., Ricci T. V., A treatment procedure for Gemini North/NIFS data cubes: application to NGC 4151, *MNRAS*, 2014, vol. 438, p. 2597

- Merritt D., Mass Deficits, Stalling Radii, and the Merger Histories of Elliptical Galaxies, *ApJ*, 2006, vol. 648, p. 976
- Merritt D., Milosavljević M., Massive Black Hole Binary Evolution, *Living Reviews in Relativity*, 2005, vol. 8
- Mezcua M., Prieto M. A., Fernández-Ontiveros J. A., Tristram K., Neumayer N., Kotilainen J. K., The warm molecular gas and dust of Seyfert galaxies: two different phases of accretion?, *MNRAS*, 2015, vol. 452, p. 4128
- Morganti R., Tsvetanov Z. I., Gallimore J., Allen M. G., Radio continuum morphology of southern Seyfert galaxies, *A&AS*, 1999, vol. 137, p. 457
- Najarro F., Figer D. F., Hillier D. J., Kudritzki R. P., Metallicity in the Galactic Center: The Arches Cluster, *ApJ*, 2004, vol. 611, p. L105
- Najarro F., Krabbe A., Genzel R., Lutz D., Kudritzki R. P., Hillier D. J., Quantitative spectroscopy of the HeI cluster in the Galactic center., *A&A*, 1997, vol. 325, p. 700
- Osmer P. S., Smith M. G., Weedman D. W., The southern Seyfert galaxies NGC 1566 and NGC 3783., *ApJ*, 1974, vol. 189, p. 187
- Osterbrock D. E., Ferland G. J., *Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei*. 2nd ed. Sausalito, California: University Science Books, 2006
- Pastoriza M., Gerola H., Spectral Variation in the Seyfert Galaxy NGC 1566, *Astrophys. Lett.*, 1970, vol. 6, p. 155
- Paumard T., Genzel R., Martins F., Nayakshin S., Beloborodov A. M., Levin Y., Trippe S., Eisenhauer F., Ott T., Gillessen S., Abuter R., Cuadra J., Alexander T., Sternberg A., The Two Young Star Disks in the Central Parsec of the Galaxy: Properties, Dynamics, and Formation, *ApJ*, 2006, vol. 643, p. 1011
- Ricci T. V., Análise da emissão nuclear e circumnuclear de gás de uma amostra de 10 galáxias elípticas e lenticulares., São Paulo: Universidade de São Paulo, IAG, 2013, Tese de Doutorado, 307 p.

- Rice W., Lonsdale C. J., Soifer B. T., Neugebauer G., Kopan E. L., Lloyd L. A., de Jong T., Habing H. J., A catalog of IRAS observations of large optical galaxies, *ApJS*, 1988, vol. 68, p. 91
- Richardson W. H., Bayesian-Based Iterative Method of Image Restoration, *Journal of the Optical Society of America (1917-1983)*, 1972, vol. 62, p. 55
- Roussel H., Sauvage M., Vigroux L., Bosma A., Bonoli C., Gallais P., Hawarden T., Madden S., Mazzei P., The impact of bars on the mid-infrared dust emission of spiral galaxies: global and circumnuclear properties, *A&A*, 2001, vol. 372, p. 406
- Ryder S. D., Dopita M. A., An H-alpha atlas of nearby southern spiral galaxies, *ApJS*, 1993, vol. 88, p. 415
- Ryder S. D., Dopita M. A., The relationship between past and present star formation in galactic disks from CCD surface photometry, *ApJ*, 1994, vol. 430, p. 142
- Ryder S. D., Walsh W., Malin D., HI study of the NGC 6744 system, *PASA*, 1999, vol. 16, p. 84
- Sánchez-Blázquez P., Peletier R. F., Jiménez-Vicente J., Cardiel N., Cenarro A. J., Falcón-Barroso J., Gorgas J., Selam S., Vazdekis A., Medium-resolution Isaac Newton Telescope library of empirical spectra, *MNRAS*, 2006, vol. 371, p. 703
- Shobbrook R. R., Southern groups and clusters of galaxies. I, Spectra and radial velocities of nineteen southern galaxies, *MNRAS*, 1966, vol. 131, p. 293
- Smajić S., Moser L., Eckart A., Busch G., Combes F., García-Burillo S., Valencia-S. M., Horrobin M., The nuclear gas disk of NGC 1566 dissected by SINFONI and ALMA, *A&A*, 2015, vol. 583, p. A104
- Steiner J. E., Menezes R. B., Ricci T. V., Oliveira A. S., Mapping low- and high-density clouds in astrophysical nebulae by imaging forbidden line emission, *MNRAS*, 2009a, vol. 396, p. 788
- Steiner J. E., Menezes R. B., Ricci T. V., Oliveira A. S., PCA Tomography: how to extract information from data cubes, *MNRAS*, 2009b, vol. 395, p. 64

- Sundararajan P. A., Khanna G., Hughes S. A., Binary black hole merger gravitational waves and recoil in the large mass ratio limit, *Phys. Rev. D*, 2010, vol. 81, p. 104009
- Tamblyn P., Rieke G. H., Hanson M. M., Close L. M., McCarthy Jr. D. W., Rieke M. J., The Peculiar Population of Hot Stars at the Galactic Center, *ApJ*, 1996, vol. 456, p. 206
- Tanner A., Figer D. F., Najarro F., Kudritzki R. P., Gilmore D., Morris M., Becklin E. E., McLean I. S., Gilbert A. M., Graham J. R., Larkin J. E., Levenson N. A., Teplitz H. I., High Spectral Resolution Observations of the Massive Stars in the Galactic Center, *ApJ*, 2006, vol. 641, p. 891
- Thompson G. D., Levenson N. A., Uddin S. A., Sirocky M. M., Dust Emission from Unobscured Active Galactic Nuclei, *ApJ*, 2009, vol. 697, p. 182
- Vaceli M. S., Viegas S. M., Gruenwald R., de Souza R. E., Spectroscopy of Seyfert 2 Galaxies, Liners, and H(II) Galaxies., *AJ*, 1997, vol. 114, p. 1345
- van Dokkum P. G., Cosmic-Ray Rejection by Laplacian Edge Detection, *PASP*, 2001, vol. 113, p. 1420
- Veron-Cetty M.-P., Veron P., Study of a complete sample of galaxies. II - Spectroscopy of the nuclei, *A&AS*, 1986, vol. 66, p. 335
- Whitmore B. C., McElroy D. B., Tonry J. L., A catalog of stellar velocity dispersions. I - Compilation and standard galaxies, *ApJS*, 1985, vol. 59, p. 1
- Woo J.-H., Urry C. M., Active Galactic Nucleus Black Hole Masses and Bolometric Luminosities, *ApJ*, 2002, vol. 579, p. 530