

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA**

**VARIAÇÕES ESPACIAIS DE PROPRIEDADES FÍSICAS
E QUÍMICAS DAS NEBULOSAS PLANETÁRIAS
NGC 6302 E NGC 2440**

TESE DE DOUTORADO

Aline Beatriz Rauber

Santa Maria, RS, Brasil

2013

PPGFísica/UFSM, RS

Rauber, Aline Beatriz

Doutor

2013

**VARIAÇÕES ESPACIAIS DE PROPRIEDADES FÍSICAS E
QUÍMICAS DAS NEBULOSAS PLANETÁRIAS NGC 6302 E
NGC 2440**

Aline Beatriz Rauber

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física, Área de Concentração em Astronomia e Astrofísica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Física.**

Orientador: Prof. Marcus Vinicius Fontana Copetti

Santa Maria, RS, Brasil

2013

Rauber, Aline Beatriz

Variações espaciais de propriedades físicas e químicas das nebulosas planetárias NGC 6302 e NGC 2440 / Aline Beatriz Rauber.-2013.

187 p.; 30cm

Orientador: Marcus Vinicius Fontana Copetti

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Programa de Pós-Graduação em Física, RS, 2013

1. Astrofísica do meio interestelar 2. Espectroscopia
3. Nebulosas planetárias 4. Condições físicas 5.
Abundâncias químicas I. Copetti, Marcus Vinicius Fontana
II. Título.

©2013

Todos os direitos autorais reservados a Aline Beatriz Rauber. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

End. Eletr.: alinerauber@gmail.com

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Naturais e Exatas
Programa de Pós-Graduação em Física**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Tese de Doutorado

**VARIAÇÕES ESPACIAIS DE PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS
DAS NEBULOSAS PLANETÁRIAS NGC 6302 E NGC 2440**

elaborada por
Aline Beatriz Rauber

como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor em Física

COMISSÃO EXAMINADORA:

Marcus Vinicius Fontana Copetti, Dr.
(Presidente/orientador)

Roberto Dell’Aglío Dias da Costa, Dr. (USP)

Vinicius de Abreu Oliveira, Dr. (UNIPAMPA)

Alex André Schmidt, Dr. (UFSM)

Rogemar André Riffel, Dr. (UFSM)

Santa Maria, 30 de agosto de 2013.

*Tudo o que temos de decidir é
o que fazer com o tempo
que nos é dado.
(J. R. R. Tolkien)*

Aos meus pais Tarcísio e Hedi.
Aos meus irmãos Sandro (*in memoriam*) e Marcelo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que sempre me incentivaram, em especial:

- ★ ao Prof. Dr. Marcus Vinicius Fontana Copetti por sua orientação ao longo desses 10 anos de minha formação;
- ★ ao meus pais Tarcísio e Hedi por seus ensinamentos e apoio para, acima de tudo, seguir em frente;
- ★ ao meu irmão Marcelo por sua amizade e pela agradável convivência;
- ★ à Prof.^a Dr.^a Ângela Cristina Krabbe por suas contribuições neste trabalho;
- ★ aos ex-colegas David, Hélio, Márcio e Vinicius, e aos atuais Diogo, Igor, Izabel, Moiré e Marlon por sua atenção sempre que precisei e por garantirem um ambiente agradável de trabalho;
- ★ aos demais professores do Laboratório de Análise Numérica e Astrofísica, Maria Inês, Alex e Alice, por sua atenção;
- ★ ao coordenador Prof. Dr. Lucio Strazzabosco Dorneles, aos demais professores e à secretária Saionara Dutra do Programa de Pós-Graduação em Física;
- ★ aos demais familiares e amigos por seu incentivo e por compreenderem as ausências;
- ★ ao CNPq e à CAPES pelo apoio financeiro.

RESUMO

Tese de Doutorado
Programa de Pós-Graduação em Física
Universidade Federal de Santa Maria

VARIAÇÕES ESPACIAIS DE PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS DAS NEBULOSAS PLANETÁRIAS NGC 6302 E NGC 2440

AUTORA: ALINE BEATRIZ RAUBER

ORIENTADOR: MARCUS VINICIUS FONTANA COPETTI

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 30 de agosto de 2013.

Apresentamos uma análise das condições físicas e químicas das nebulosas planetárias NGC 6302 e NGC 2440 através de espectroscopia espacialmente resolvida. Dados espectrofotométricos de fenda longa foram obtidos com o espectrógrafo Goodman acoplado ao telescópio SOAR de 4,1 m em várias declinações diferentes com a fenda na direção Leste-Oeste. A partir deles, mapas e perfis espaciais foram construídos. Densidades eletrônicas foram calculadas a partir dos sensores [S II] e [Ar IV]. Para NGC 6302, uma distribuição de pico foi encontrada, com a área mais densa na região circum-estelar, atingindo $N_e \approx 40000 \text{ cm}^{-3}$ e diminuindo para $N_e \leq 1000 \text{ cm}^{-3}$ nos lóbulos bipolares. Condensações com $N_e \approx 2000 - 3000 \text{ cm}^{-3}$ foram também observadas. Nos mapas de NGC 2440, as densidades chegam a mais de 4500 cm^{-3} nas estruturas centrais. Estruturas com $1000 < N_e < 1500 \text{ cm}^{-3}$ são associadas com os lóbulos bipolares em P.A. $\approx 60^\circ$ e P.A. $\approx 85^\circ$. Os valores médios dos mapas de temperatura eletrônica de NGC 6302 foram 12304 K e 17380 K para $T_e(\text{NII})$ e $T_e(\text{OIII})$, respectivamente. Em NGC 2440, estes mesmos parâmetros foram 11273 K e 13722 K, respectivamente. Pequenas flutuações de temperatura no plano do céu foram obtidas, com $0,00196 \leq t_s^2(\text{NII}) \leq 0,01198$ e $0,00777 \leq t_s^2(\text{OIII}) \leq 0,00181$ para NGC 6302, e $0,00107 \leq t_s^2(\text{NII}) \leq 0,00977$ e $0,00131 \leq t_s^2(\text{OIII}) \leq 0,01728$ para NGC 2440. Abundâncias de N^+ , O^+ , S^+ , O^{2+} , Ne^{2+} , Ar^{3+} relativas ao H^+ foram determinadas a partir de linhas excitadas colisionalmente, e abundâncias relativas de He^+ e He^{2+} a partir de linhas de recombinação. As maiores dispersões em relação às abundâncias iônicas médias (50% a 70%) foram observadas para os mapas N^+/H^+ , O^+/H^+ e S^+/H^+ . Regiões que sugerem uma distribuição inhomogênea de He e N foram observadas nos mapas de He/H e N^+/O^+ das nebulosas. No diagrama $\log \text{H}\alpha/[\text{NII}]$ versus $\log \text{H}\alpha/[\text{SII}]$ nenhuma indicação de excitação por choque em qualquer uma das estruturas destes objetos foi encontrada na escala espacial de nossa análise.

Palavras-chave: Meio interestelar. Nebulosas planetárias. Espectroscopia.

ABSTRACT

Doctoral Dissertation
Programa de Pós-Graduação em Física
Universidade Federal de Santa Maria

SPATIAL VARIATIONS OF PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF THE PLANETARY NEBULAE NGC 6302 AND NGC 2440

AUTHOR: ALINE BEATRIZ RAUBER

ADVISOR: MARCUS VINICIUS FONTANA COPETTI

Date e Local of the Defense: Santa Maria, August, 30th, 2013.

We present an analysis of the physical and chemical conditions of the planetary nebulae NGC 6302 and NGC 2440 through spatially resolved spectroscopy. Long slit spectrophotometric data were obtained with the Goodman spectrograph attached to the 4.1 m SOAR telescope in several different declinations with the slit on the East-West direction. From them, maps and spatial profiles were constructed. Electron densities were calculated from the [S II] and [Ar IV] sensors. For NGC 6302, a peaked distribution was found, with the densest area at the circumstellar region, reaching $N_e \approx 40000 \text{ cm}^{-3}$ and decreasing to $N_e \leq 1000 \text{ cm}^{-3}$ at the bipolar lobes. Knots with $N_e \approx 2000 - 3000 \text{ cm}^{-3}$ were also observed. In the maps of NGC 2440, densities reach more than 4500 cm^{-3} in the central structures. Structures with $1000 < N_e < 1500 \text{ cm}^{-3}$ are associated with the bipolar lobes at P.A. $\approx 60^\circ$ and P.A. $\approx 85^\circ$. The average values of the electron temperature maps in NGC 6302 were 12304 K and 17380 K for $T_e(\text{NII})$ and $T_e(\text{OIII})$, respectively. In NGC 2440, these same values were 11273 K and 13722 K, respectively. Small temperature fluctuations on the plane of the sky were obtained, with $0,00196 \leq t_s^2(\text{NII}) \leq 0,01198$ and $0,00777 \leq t_s^2(\text{OIII}) \leq 0,00181$ for NGC 6302, and $0,00107 \leq t_s^2(\text{NII}) \leq 0,00977$ and $0,00131 \leq t_s^2(\text{OIII}) \leq 0,01728$ for NGC 2440. Abundances of N^+ , O^+ , S^+ , O^{2+} , Ne^{2+} , Ar^{3+} relative to H^+ were determined from collisionally excited lines, and relative abundances of He^+ and He^{2+} from recombination lines. The highest dispersions relative to the mean ionic abundances (50% to 70%) were observed for the N^+/H^+ , O^+/H^+ and S^+/H^+ maps. Regions suggesting an inhomogeneous distribution of He and N were observed in the maps of He/H and N^+/O^+ of the nebulae. In the diagram $\log \text{H}\alpha/[\text{NII}]$ versus $\log \text{H}\alpha/[\text{SII}]$ no indication of shock excitation in any one of the structures of these objects was found in the spatial scale of our analysis.

Keywords: Interstellar medium. Planetary nebulae. Spectroscopy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Caminho evolutivo de uma estrela de $3 M_{\odot}$ no diagrama HR	29
Figura 1.2 – Esquema para o Modelo dos Ventos Interagentes	30
Figura 1.3 – Classificação morfológica das nebulosas planetárias	31
Figura 1.4 – Imagem da nebulosa planetária NGC 6302	36
Figura 1.5 – Imagem da nebulosa planetária NGC 2440	37
Figura 1.6 – Esquema para as estruturas de NGC 2440 retirado de Lopez et al. (1998)	39
Figura 2.1 – Imagem de NGC 6302 indicando as posições de fenda	44
Figura 2.2 – Imagem de NGC 2440 indicando as posições de fenda	45
Figura 2.3 – Espectro de NGC 6302 obtido com a rede de 600 linhas mm^{-1}	46
Figura 2.4 – Espectro de NGC 2440 obtido com a rede de 300 linhas mm^{-1}	47
Figura 3.1 – Diagramas de níveis de energia para [O III] e [S II]	53
Figura 4.1 – NGC 6302 - Mapas de $H\alpha$, $H\beta$, He I $\lambda 5876$, He II $\lambda 4686$, [N II] $\lambda 6584$, [S II] $\lambda 6717$ e [O II] $\lambda 3727$	62
Figura 4.2 – NGC 6302 - Mapas de [O III] $\lambda 5007$, [Ne III] $\lambda 3869$, [Ar IV] $\lambda 4740$ e de $H\alpha/H\beta$	63
Figura 4.3 – NGC 6302 - Mapas de $N_e(\text{SII})$, $N_e(\text{ArIV})$, $T_e(\text{NII})$ e $T_e(\text{OIII})$	68
Figura 4.4 – NGC 6302 - Mapas de He^+/H^+ , $\text{He}^{2+}/\text{H}^+$, $(\text{He}^+ + \text{He}^{2+})/\text{H}^+$, N^+/H^+ , S^+/H^+ , O^+/H^+ , O^{2+}/H^+ , $\text{Ne}^{2+}/\text{H}^+$, $\text{Ar}^{3+}/\text{H}^+$ e N^+/O^+	75
Figura 4.5 – NGC 6302 - Mapa de [N II]/ $H\alpha$, [S II]/ $H\alpha$, [O II]/ $H\beta$ e [O III]/ $H\beta$	77
Figura 4.6 – Diagrama $\log H\alpha/[NII](\lambda 6548 + \lambda 6583)$ vs. $\log H\alpha/[SII](\lambda 6717 + \lambda 6731)$ para os dados de NGC 6302 e de remanescentes de supernova	77
Figura 5.1 – NGC 2440 - Mapas de $H\alpha$, $H\beta$, He I $\lambda 5876$, He II $\lambda 4686$, [N II] $\lambda 6584$ e [S II] $\lambda 6717$	83
Figura 5.2 – NGC 2440 - Mapas de [O II] $\lambda 3727$, [O III] $\lambda 5007$ e [Ne III] $\lambda 3869$, [Ar IV] $\lambda 4740$ e de $H\alpha/H\beta$	84
Figura 5.3 – NGC 2440 - Mapas de $N_e(\text{SII})$, $N_e(\text{ArIV})$, $T_e(\text{NII})$ e $T_e(\text{OIII})$	86
Figura 5.4 – NGC 2440 - Mapas de He^+/H^+ , $\text{He}^{2+}/\text{H}^+$, $(\text{He}^+ + \text{He}^{2+})/\text{H}^+$ e S^+/H^+	91
Figura 5.5 – NGC 2440 - Mapas de N^+/H^+ , O^+/H^+ , N^+/O^+ , O^{2+}/H^+ , $\text{Ne}^{2+}/\text{H}^+$, $\text{Ar}^{3+}/\text{H}^+$	92
Figura 5.6 – NGC 2440 - Mapas de [N II]/ $H\alpha$ e [S II]/ $H\alpha$	94
Figura 5.7 – NGC 2440 - Mapas de [O II]/ $H\beta$ e [O III]/ $H\beta$	95
Figura 5.8 – Diagrama $\log H\alpha/[NII](\lambda 6548 + \lambda 6583)$ vs. $\log H\alpha/[SII](\lambda 6717 + \lambda 6731)$ para os dados de NGC 2440 e de remanescentes de supernova	95
Figura A.1 – Orientação e escala da imagem da Figura 1.4	107
Figura A.2 – Orientação e escala da imagem da Figura 1.5	107
Figura B.1 – NGC 6302 - Perfis espaciais de $F(H\beta)$, $N_e(\text{SII})$, $N_e(\text{ArIV})$, $T_e(\text{NII})$ e $T_e(\text{OIII})$ ao longo de $\Delta\delta = 6''$ S	109
Figura B.2 – Figura B.1, mas para $\Delta\delta = 5''$ S.	110
Figura B.3 – Figura B.1, mas para $\Delta\delta = 4''$ S.	111
Figura B.4 – Figura B.1, mas para $\Delta\delta = 3''$ S.	112
Figura B.5 – Figura B.1, mas para $\Delta\delta = 2''$ S.	113
Figura B.6 – Figura B.1, mas para $\Delta\delta = 1''$ S.	114
Figura B.7 – Figura B.1, mas para $\Delta\delta = 0''$	115
Figura B.8 – Figura B.1, mas para $\Delta\delta = 1''$ N.	116

Figura B.9 – Figura B.1, mas para $\Delta\delta = 2''$ N.	117
Figura B.10 – Figura B.1, mas para $\Delta\delta = 3''$ N.	118
Figura B.11 – Figura B.1, mas para $\Delta\delta = 4''$ N.	119
Figura B.12 – NGC 6302 - Perfis espaciais de He^+/H^+ , $\text{He}^{2+}/\text{H}^+$, N^+/H^+ , S^+/H^+ , O^+/H^+ , O^{2+}/H^+ , $\text{Ne}^{2+}/\text{H}^+$, $\text{Ar}^{3+}/\text{H}^+$ e N^+/O^+ ao longo de $\Delta\delta = 6''$ S	120
Figura B.13 – Figura B.12, mas para $\Delta\delta = 5''$ S.	121
Figura B.14 – Figura B.12, mas para $\Delta\delta = 4''$ S.	122
Figura B.15 – Figura B.12, mas para $\Delta\delta = 3''$ S.	123
Figura B.16 – Figura B.12, mas para $\Delta\delta = 2''$ S.	124
Figura B.17 – Figura B.12, mas para $\Delta\delta = 1''$ S.	125
Figura B.18 – Figura B.12, mas para $\Delta\delta = 0''$	126
Figura B.19 – Figura B.12, mas para $\Delta\delta = 1''$ N.	127
Figura B.20 – Figura B.12, mas para $\Delta\delta = 2''$ N.	128
Figura B.21 – Figura B.12, mas para $\Delta\delta = 3''$ N.	129
Figura B.22 – Figura B.12, mas para $\Delta\delta = 4''$ N.	130
Figura B.23 – NGC 6302 - Perfis espaciais de $[\text{NII}]/\text{H}\alpha$, $[\text{SII}]/\text{H}\alpha$, $[\text{OII}]/\text{H}\beta$ e $[\text{OIII}]/\text{H}\beta$ ao longo de $\Delta\delta = 6''$ S.	131
Figura B.24 – Figura B.23, mas para $\Delta\delta = 5''$ S.	132
Figura B.25 – Figura B.23, mas para $\Delta\delta = 4''$ S.	133
Figura B.26 – Figura B.23, mas para $\Delta\delta = 3''$ S.	134
Figura B.27 – Figura B.23, mas para $\Delta\delta = 2''$ S.	135
Figura B.28 – Figura B.23, mas para $\Delta\delta = 1''$ S.	136
Figura B.29 – Figura B.23, mas para $\Delta\delta = 0''$	137
Figura B.30 – Figura B.23, mas para $\Delta\delta = 1''$ N.	138
Figura B.31 – Figura B.23, mas para $\Delta\delta = 2''$ N.	139
Figura B.32 – Figura B.23, mas para $\Delta\delta = 3''$ N.	140
Figura B.33 – Figura B.23, mas para $\Delta\delta = 4''$ N.	141
Figura C.1 – NGC 2440 - Perfis espaciais de $F(\text{H}\beta)$, $N_e(\text{SII})$, $N_e(\text{ArIV})$, $T_e(\text{NII})$ e $T_e(\text{OIII})$ ao longo de $\Delta\delta = 10''$ S.	143
Figura C.2 – Figura C.1, mas para $\Delta\delta = 8''$ S.	144
Figura C.3 – Figura C.1, mas para $\Delta\delta = 6''$ S.	145
Figura C.4 – Figura C.1, mas para $\Delta\delta = 4''$ S.	146
Figura C.5 – Figura C.1, mas para $\Delta\delta = 2''$ S.	147
Figura C.6 – Figura C.1, mas para $\Delta\delta = 0''$	148
Figura C.7 – Figura C.1, mas para $\Delta\delta = 2''$ N.	149
Figura C.8 – Figura C.1, mas para $\Delta\delta = 4''$ N.	150
Figura C.9 – Figura C.1, mas para $\Delta\delta = 6''$ N.	151
Figura C.10 – Figura C.1, mas para $\Delta\delta = 8''$ N.	152
Figura C.11 – Figura C.1, mas para $\Delta\delta = 10''$ N.	153
Figura C.12 – Figura C.1, mas para $\Delta\delta = 12''$ N.	154
Figura C.13 – Figura C.1, mas para $\Delta\delta = 14''$ N.	155
Figura C.14 – Figura C.1, mas para $\Delta\delta = 16''$ N.	156
Figura C.15 – Figura C.1, mas para $\Delta\delta = 18''$ N.	157
Figura C.16 – NGC 2440 - Perfis espaciais de He^+/H^+ , $\text{He}^{2+}/\text{H}^+$, N^+/H^+ , S^+/H^+ , O^+/H^+ , O^{2+}/H^+ , $\text{Ne}^{2+}/\text{H}^+$, $\text{Ar}^{3+}/\text{H}^+$ e N^+/O^+ ao longo de $\Delta\delta = 10''$ S	158
Figura C.17 – Figura C.16, mas para $\Delta\delta = 8''$ S.	159
Figura C.18 – Figura C.16, mas para $\Delta\delta = 6''$ S.	160
Figura C.19 – Figura C.16, mas para $\Delta\delta = 4''$ S.	161

Figura C.20 – Figura C.16, mas para $\Delta\delta = 2''$ S.	162
Figura C.21 – Figura C.16, mas para $\Delta\delta = 0''$	163
Figura C.22 – Figura C.16, mas para $\Delta\delta = 2''$ N.	164
Figura C.23 – Figura C.16, mas para $\Delta\delta = 4''$ N.	165
Figura C.24 – Figura C.16, mas para $\Delta\delta = 6''$ N.	166
Figura C.25 – Figura C.16, mas para $\Delta\delta = 8''$ N.	167
Figura C.26 – Figura C.16, mas para $\Delta\delta = 10''$ N.	168
Figura C.27 – Figura C.16, mas para $\Delta\delta = 12''$ N.	169
Figura C.28 – Figura C.16, mas para $\Delta\delta = 14''$ N.	170
Figura C.29 – Figura C.16, mas para $\Delta\delta = 16''$ N.	171
Figura C.30 – Figura C.16, mas para $\Delta\delta = 18''$ N.	172
Figura C.31 – NGC 2440 - Perfis espaciais de $[\text{NII}]/\text{H}\alpha$, $[\text{SII}]/\text{H}\alpha$, $[\text{OII}]/\text{H}\beta$ e $[\text{OIII}]/\text{H}\beta$ ao longo de $\Delta\delta = 10''$ S.	173
Figura C.32 – Figura C.31, mas para $\Delta\delta = 8''$ S.	174
Figura C.33 – Figura C.31, mas para $\Delta\delta = 6''$ S.	175
Figura C.34 – Figura C.31, mas para $\Delta\delta = 4''$ S.	176
Figura C.35 – Figura C.31, mas para $\Delta\delta = 2''$ S.	177
Figura C.36 – Figura C.31, mas para $\Delta\delta = 0''$	178
Figura C.37 – Figura C.31, mas para $\Delta\delta = 2''$ N.	179
Figura C.38 – Figura C.31, mas para $\Delta\delta = 4''$ N.	180
Figura C.39 – Figura C.31, mas para $\Delta\delta = 6''$ N.	181
Figura C.40 – Figura C.31, mas para $\Delta\delta = 8''$ N.	182
Figura C.41 – Figura C.31, mas para $\Delta\delta = 10''$ N.	183
Figura C.42 – Figura C.31, mas para $\Delta\delta = 12''$ N.	184
Figura C.43 – Figura C.31, mas para $\Delta\delta = 14''$ N.	185
Figura C.44 – Figura C.31, mas para $\Delta\delta = 16''$ N.	186
Figura C.45 – Figura C.31, mas para $\Delta\delta = 18''$ N.	187

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Dados gerais de NGC 2440 e NGC 6302	39
Tabela 1.2 – Estudos espectroscópicos de NGC 6302 presentes na literatura	41
Tabela 1.3 – Estudos espectroscópicos de NGC 2440 presentes na literatura	41
Tabela 2.1 – Linhas de emissão medidas para obtenção dos mapas	48
Tabela 3.1 – Razões de intensidades de linhas para diagnóstico da densidade eletrônica e potenciais de ionização	52
Tabela 3.2 – Razões de intensidades de linhas para diagnóstico da temperatura eletrônica e potenciais de ionização	53
Tabela 3.3 – Parâmetros de ajuste para as contribuições colisionais relativas, C/R , para emissividades de linhas com nível superior $3d^3D$	58
Tabela 3.4 – Emissividades de $\lambda 4686$ obtidas de Storey e Hummer (1995b)	58
Tabela 4.1 – Intensidades de linhas relativas observadas $F(\lambda)$ e corrigidas por avermelhamento $I(\lambda)$, em uma escala onde $F(H\beta) = 100$, e respectivo valor da função de avermelhamento de $f(\lambda)$	64
Tabela 4.2 – Estatísticas para as densidades eletrônicas de NGC 6302	69
Tabela 4.3 – Estatísticas para as temperaturas eletrônicas de NGC 6302	70
Tabela 4.4 – Magnitude das flutuações de temperatura eletrônica estimadas para NGC 6302	71
Tabela 4.5 – Abundâncias iônicas e totais dos mapas e dos espectros integrados de NGC 6302 e comparação com outros trabalhos	76
Tabela 5.1 – Intensidades de linhas relativas observadas $F(\lambda)$ e corrigidas por avermelhamento $I(\lambda)$, em uma escala onde $F(H\beta) = 100$, e respectivo valor da função de avermelhamento de $f(\lambda)$	80
Tabela 5.2 – Estatísticas para as densidades eletrônicas de NGC 2440	87
Tabela 5.3 – Estatísticas para as temperaturas eletrônicas de NGC 2440	88
Tabela 5.4 – Magnitude das flutuações de temperatura eletrônica estimadas para NGC 2440	89
Tabela 5.5 – Abundâncias iônicas e totais dos mapas e dos espectros integrados de NGC 2440 e comparação com outros trabalhos	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CCD	Dispositivo de carga acoplada (<i>Charge Coupled Device</i>)
CFHT	<i>Canada France Hawaii Telescope</i>
ESO	<i>European Southern Observatory</i>
FWHM	Largura a meia altura (<i>Full Width at Half Maximum</i>)
HST	<i>Hubble Space Telescope</i>
IR	Infravermelho
IRAF	<i>Image Redution and Analysis Facility</i>
ISO	<i>Infrared Space Observatory</i>
IUE	<i>International Ultraviolet Explorer</i>
LNA	Laboratório Nacional de Astrofísica
RMS	Raiz quadrada média (<i>Root Mean Square</i>)
SERC	<i>Science Engineering Research Council</i>
SOAR	<i>Southern Astrophysical Research Telescope</i>
STSDAS	<i>Space Telescope Science Data Analysis System</i>
UKIRT	<i>United Kingdom Infra-Red Telescope</i>
UV	Ultravioleta

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Ascensão reta (coordenada do sistema equatorial)
δ	Declinação (coordenada do sistema equatorial)
$\Delta\delta$	Variação da posição de fenda na direção Norte-Sul, em segundos de arco (")
arcsec	Segundos de arco
L_{\odot}	Luminosidade solar, $L_{\odot} = 3,83 \times 10^{33}$ ergs/s
l, b	Coordenadas Galácticas, em graus ($^{\circ}$)
M_{\odot}	Massa solar, $M_{\odot} = 1,99 \times 10^{33}$ g
N_e	Densidade eletrônica, em cm^{-3}
P.A.	Ângulo de posição, em graus ($^{\circ}$)
pc	Unidade de distância, $1 \text{ pc} = 1 \text{ parsec} = 3,09 \times 10^{18} \text{ cm} = 3,26156 \text{ anos-luz}$
T_e	Temperatura eletrônica, em K
T_{ef}	Temperatura efetiva, em K
t_s	Flutuações de temperatura eletrônica no plano do céu

SUMÁRIO

RESUMO	11
ABSTRACT	13
1 INTRODUÇÃO	27
1.1 Nebulosas planetárias	27
1.1.1 Processos físicos.....	27
1.1.2 Modelo de Formação.....	28
1.1.3 Classificação morfológica.....	30
1.1.4 Classificação química.....	32
1.1.5 O problema da discrepância entre abundâncias químicas.....	32
1.2 A nebulosa planetária NGC 6302	34
1.3 A nebulosa planetária NGC 2440	36
1.4 Nosso trabalho	40
2 OBSERVAÇÕES, REDUÇÃO DOS DADOS E MEDIDAS DAS LINHAS DE EMISSÃO	43
2.1 Observações	43
2.1.1 Configuração instrumental para observações de NGC 6302.....	43
2.1.2 Configuração instrumental para observações de NGC 2440.....	44
2.2 Redução dos Dados	44
2.3 Intensidades das linhas e erros estatísticos	46
3 DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES FÍSICO-QUÍMICAS	51
3.1 Densidade e temperatura eletrônicas	51
3.2 Flutuações de temperatura eletrônica	55
3.3 Abundâncias iônicas	55
3.4 Abundâncias elementais	59
4 MAPEAMENTO ESPECTROSCÓPICO DE NGC 6302	61
4.1 Extinção	61
4.2 Temperatura e densidade eletrônicas	63
4.3 Flutuações de temperatura eletrônica	71
4.4 Abundâncias químicas	72
4.5 Propriedades de excitação	74
5 MAPEAMENTO ESPECTROSCÓPICO DE NGC 2440	79
5.1 Extinção	79
5.2 Temperatura e densidade eletrônicas	85
5.3 Flutuações de temperatura eletrônica	89
5.4 Abundâncias químicas	90
5.5 Propriedades de excitação	94
6 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	97
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99
Apêndice A – Orientação e escala das imagens de NGC 6302 e NGC 2440 obtidas pelo HST	107
Apêndice B – Perfis espaciais para NGC 6302	109
Apêndice C – Perfis espaciais para NGC 2440	143

1 INTRODUÇÃO

1.1 Nebulosas planetárias

As nebulosas planetárias (NPs) são conhecidas desde 1764. Neste ano, Charles Messier observou a nebulosa que atualmente conhecemos por Nebulosa do Haltere (Messier 27). Por assemelharem-se ao disco esverdeado de um planeta, William Herschel utilizou o termo “nebulosas planetárias” para designar objetos como estes em 1784. Com as observações espectroscópicas, que se tornam possíveis nos anos 1850, as NPs passaram a ser extensivamente estudadas. Seus espectros dominados por intensas linhas de emissão as distinguiram dos outros objetos celestes. Hubble (1922) mostrou que estas linhas de emissão são produzidas pela interação da radiação da estrela central com o material nebuloso. Hoje, é a espectroscopia que nos fornece a maior parte da informação quantitativa que temos sobre esses objetos.

1.1.1 Processos físicos

As estrelas centrais das NPs são fontes de contínuo de fótons ultravioletas que ionizam um volume de H formando a chamada esfera de Strömgren. Dentro deste volume o He, segundo elemento mais abundante (aproximadamente 10% em número de átomos), assim como outros elementos como C, N, O, Ne, S, Cl e Ar também encontram-se ionizados em vários estágios dependendo da distribuição da energia do campo de radiação ultravioleta da estrela central. Este processo, em que há a absorção de um fóton e a emissão de um elétron por um átomo, é conhecido como fotoionização. A energia cinética do elétron liberado na fotoionização será igual a diferença entre a energia do fóton e o potencial de ionização do átomo. Os elétrons livres, por sua vez, colidem elasticamente uns com os outros na nebulosa. Dessa maneira, rapidamente adotam localmente uma distribuição maxwelliana de velocidades, caracterizada por uma única temperatura eletrônica, mesmo estando as condições na nebulosa longe do equilíbrio termodinâmico.

Como processo inverso à fotoionização, a recombinação consiste na captura de elétrons livres da nebulosa por íons. O elétron livre pode ser capturado em qualquer nível. Quando capturado em um nível excitado, o elétron irá realizar várias transições a estados de menor energia, emitindo fótons com comprimentos de onda característicos das transições atômicas realizadas. As linhas de emissão do H e do He são linhas de

recombinação. Já os elementos pesados¹ possuem linhas de recombinação muito fracas ou inexistentes.

Um átomo ou íon que possua níveis de excitação próximos ao estado fundamental pode ser excitado pela colisão com elétrons livres. Este processo é conhecido como excitação colisional e é responsável pelas linhas excitadas colisionalmente, conhecidas também como linhas proibidas, por serem originadas de transições que têm baixas probabilidades de ocorrer. Por isso, nas condições de laboratório, a desexcitação é feita colisionalmente. Nas nebulosas, porém, as densidades são muito baixas e a desexcitação é radiativa, com a emissão de um fóton. Exemplos de linhas emitidas nestes processos são linhas características de íons de elementos pesados, como as linhas 4959 Å e 5007 Å do [O III] e a linha 5755 Å do [N II]. Propriedades físicas e químicas podem ser estimadas através da comparação de intensidades de linhas proibidas.

1.1.2 Modelo de Formação

O cenário qualitativo para a origem e evolução de uma NP tal como conhecemos hoje foi sugerido por Shklovsky (1956a, 1956b apud Kwok, 2007). A partir de seu trabalho, NPs passaram a ser interpretadas como parte da trajetória evolutiva de uma estrela. Progenitoras de anãs brancas e descendentes de gigantes vermelhas, NPs representam uma fase curta ($\approx 10^4$ anos) da evolução de estrelas de baixa massa ($0,8 - 2,5 M_{\odot}$) e massa intermediária ($2,5 - 8 M_{\odot}$).

Para compreender o processo de formação de uma NP, é preciso então analisar a evolução destas estrelas. A Figura 1.1, adaptada de Kwok (2007), mostra o caminho evolutivo de uma estrela de $3 M_{\odot}$ no diagrama de Hertzsprung e Russel, também conhecido como diagrama HR. Ele inicia na sequência principal de idade zero (ZAMS, do termo em inglês *zero age main sequence*), passa através do ramo das gigantes vermelhas (RGB, *red giant branch*) e do ramo assintótico das gigantes (AGB, *asymptotic giant branch*) para fase de NP e terminando como uma anã branca.

As instabilidades dinâmicas e as pulsações térmicas que ocorrem na fase AGB levam à ejeção das camadas superficiais da estrela de forma gradual, ao longo de algumas centenas de milhares de anos, através do chamado vento estelar lento ($\approx 10 - 20 \text{ km s}^{-1}$) e à formação da NP. O núcleo remanescente é a estrela central da nebulosa. Na fase pós-AGB, um vento rápido ($\approx 2000 - 4000 \text{ km s}^{-1}$) emerge desta estrela quente e compacta, proveniente da pressão de radiação, “varrendo” o material previamente expelido na fase AGB. Uma frente de choque surge da interação destes ventos.

A Figura 1.2, adaptada de Kwok (1994), mostra esquematicamente o que ocorre.

¹Em Astronomia, todos os elementos químicos de número atômico superior ao do He são designados por elementos pesados, ou metais.

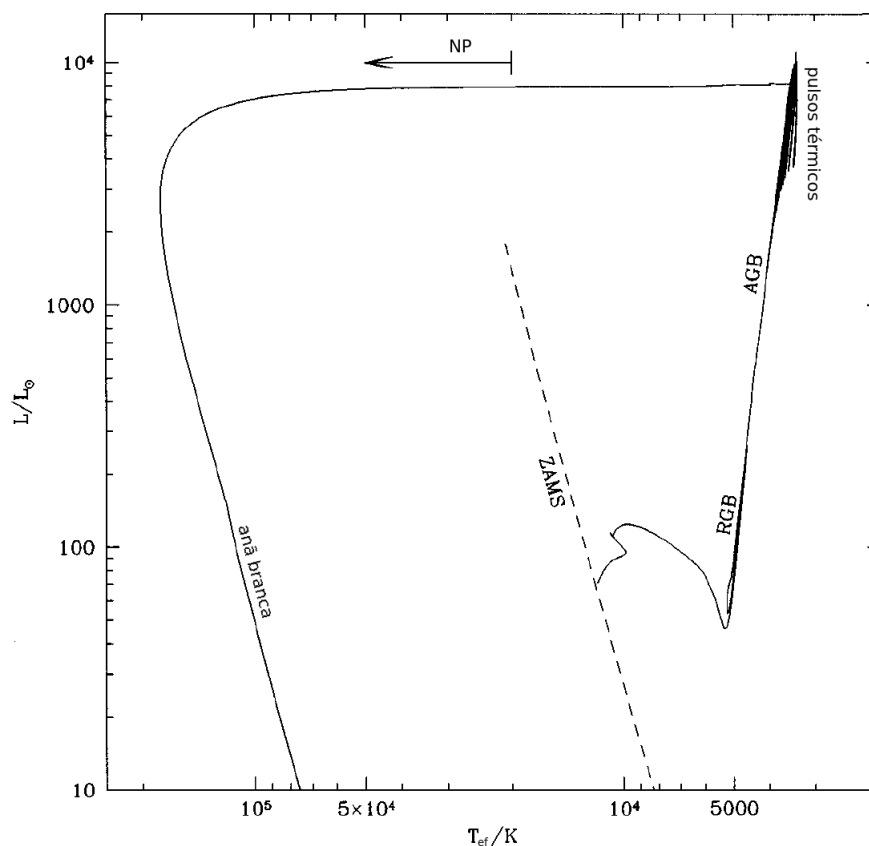


Figura 1.1: Caminho evolutivo de uma estrela de $3M_{\odot}$ no diagrama HR. Figura adaptada de Kwok (2007).

Esta frente de choque é limitada por um envoltório denso, devido ao acúmulo de material “varrido” pelo vento rápido. Surge, então, uma frente de onda de choque reversa e, entre seu limite interno (“choque interno”) e a camada de alta densidade, surge uma “bolha quente” ($10^7 - 10^8$ K). Na região mais externa, encontra-se o “halo”, de baixa densidade e composto de material do vento lento que não sofreu interação com o vento rápido.

O modelo descrito é a hipótese de formação de NP mais aceita, proposta por Kwok, Purton e Fitzgerald (1978) e conhecida como Modelo dos Ventos Interagentes (*Interacting Winds Theory*). Ele descreve satisfatoriamente NPs classificadas como esféricas ou levemente elípticas e muitos dos seus componentes possuem evidências observacionais (Kwok, 2008). Entretanto, NPs se apresentam em morfologias diferenciadas, como veremos a seguir. A fim de explicar as demais morfologias, o modelo hidrodinâmico para os ventos foi generalizado considerando uma distribuição anisotrópica do vento lento (Icke; Balick; Frank, 1992). Mesmo assim, a complexa morfologia de alguns objetos ainda não é explicada. Campos magnéticos junto aos ventos estelares (García-Segura; López; Franco, 2005) ou torques externos de uma companheira binária podem estar relacionados também ao processo de formação. Balick e Frank (2002) revisam estudos observacionais e teóricos sobre a formação de NPs. Como não há uma explicação única que se ajuste

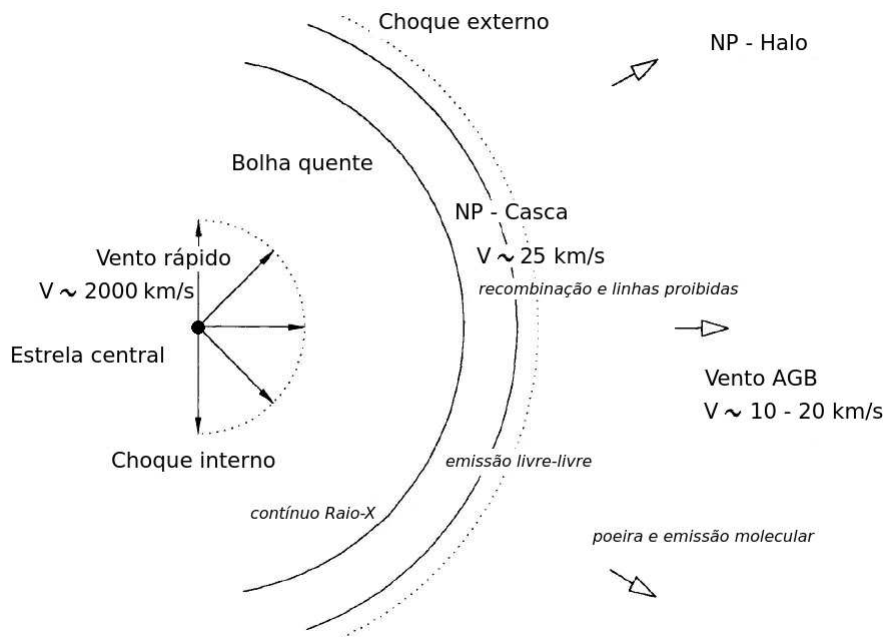


Figura 1.2: Esquema para o Modelo dos Ventos Interagentes. Figura adaptada de Kwok (1994).

a todas as observações, sugerem que os processos de formação agem com diferentes intensidades e em diferentes estágios de evolução.

1.1.3 Classificação morfológica

Classificar morfológicamente estes objetos é importante, pois pode evidenciar padrões recorrentes entre diferentes categorias, e pode revelar processos de formação comuns. Segundo Schwarz, Corradi e Melnick (1992) e Stanghellini, Corradi e Schwarz (1993), as NPs podem ser classificadas em cinco categorias morfológicas, conforme descrito a seguir (Figura 1.3):

- Elípticas (e): com ao menos dois eixos de simetria (eixo maior ou polar e eixo menor ou equatorial);
- Bipolares (b): com os dois eixos de simetria das elípticas e um toro equatorial;
- Com simetria de ponto (p): com estruturas simétricas com relação ao centro;
- Irregulares (i): sem estruturas simétricas;
- Estelares (st): fontes pontuais.

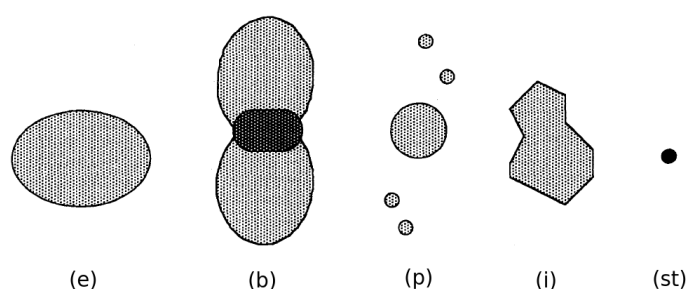


Figura 1.3: Classificação morfológica das NPs segundo esquema de Schwarz, Corradi e Melnick (1992). Figura adaptada de Corradi e Schwarz (1995).

Corradi e Schwarz (1995) adotaram esta classificação morfológica e, em uma amostra de 359 NPs, encontraram que as elípticas representam 64%, as bipolares 14%, as irregulares 18% e as com simetria pontual 4%. Eles correlacionaram esta classificação com a composição química destes objetos e enfatizaram as comparações entre bipolares e elípticas. Para as NPs bipolares, as abundâncias de He são, em média, um fator de 1,6 maiores que a do Sol; as abundâncias de O, 1,8 vezes menor que a do Sol; a razão N/H é maior, em média, por um fator 4 em relação a do Sol; e algumas são superabundantes em Ne em relação ao Sol.

Esta classificação é baseada nas macroestruturas, que delimitam a geometria das NPs. Muitas NPs apresentam ainda estruturas em escala menor. Elas são comumente denominadas estruturas de baixa ionização (LISs, *low ionization structures*), por serem proeminentes em linhas de emissão de baixa ionização (Gonçalves; Corradi; Mampaso, 2001). Suas estruturas morfológicas são variadas, como nódulos, filamentos ou jatos e seus mecanismos de formação são incertos.

A classificação morfológica de Schwarz, Corradi e Melnick (1992) é baseada na distribuição bidimensional de brilho em $H\beta$. Entretanto, a morfologia observada pode não representar a distribuição tridimensional da matéria, isto é, diferentes geometrias tridimensionais podem produzir a mesma geometria bidimensional observada (Monteiro et al., 2000). Além disso, as distribuições de brilho de linhas de íons de diferentes graus de ionização mostram características distintas devido à estrutura de ionização e efeitos de estratificação. Para inferir a estrutura tridimensional de uma NP são necessários dados observacionais que permitam uma análise espacialmente resolvida e forneçam, assim, um número maior de vínculos para modelos de fotoionização tridimensionais. Com esta ideia, Monteiro et al. (2004), Monteiro et al. (2005), Schwarz e Monteiro (2006) e Monteiro e Falseta-Gonçalves (2011) obtiveram a estrutura tridimensional de ionização das NPs NGC 6369, Menzel 1, NGC 6781 e NGC 40.

1.1.4 Classificação química

Entre os diferentes esquemas de classificação química encontrados na literatura (Greig, 1971; Kingsburgh; Barlow, 1994, entre outros), um dos mais eficientes é o proposto por Peimbert (1978). Com base em suas propriedades químicas, espaciais e cinemáticas, as NPs Galácticas foram divididas por em quatro tipos, indo de Tipo I a Tipo IV. Cada um destes grupos corresponde a distintos intervalos de massa da estrela progenitora, cuja evolução afeta diferentemente a composição química do envelope ejetado.

As NPs Tipo I são objetos ricos em He e N, que indicam que suas progenitoras possuíam massas maiores ($2 - 6 M_{\odot}$) quando comparadas a outras nebulosas. Peimbert (1978) as definiu como NPs com $\text{He}/\text{H} \geq 0,14$ ou com $\log(\text{N}/\text{O}) \geq 0$. Mais tarde, Peimbert e Torres-Peimbert (1983) incluíram objetos com $\text{He}/\text{H} \geq 0,125$ ou com $\log(\text{N}/\text{O}) \geq -0,30$. Estes possuem estrutura extremamente filamentar e, em sua grande maioria, são bipolares. Por suas propriedades cinemáticas e sua distribuição na Galáxia, eles são classificados como de População I².

As NPs Tipo II são ricas em N e C. São classificadas como de População Intermediária I por estarem localizadas, em média, 150 pc acima do plano galáctico, o que corresponde a progenitoras de $1,5 M_{\odot}$. De acordo com Peimbert (1978), a maior parte das NPs são provavelmente do Tipo II, tendo $\text{He}/\text{H} < 0,125$ ou com $\log(\text{N}/\text{O}) < -0,30$.

As NPs Tipo III são definidas como objetos com altas velocidades de deslocamento na Galáxia ($|v| > 60 \text{ km s}^{-1}$), que não pertencem ao halo. Já as NPs Tipo IV são os objetos do halo da Galáxia, de menores abundâncias de elementos pesados e de progenitoras menos massivas. Somente poucos objetos pertencem a esta última classe.

Atualizações para esta classificação são sugeridas por diversos trabalhos. Segundo Quireza, Rocha-Pinto e Maciel (2007), as nebulosas Tipo I seriam somente aqueles objetos para os quais ambas as condições $\text{He}/\text{H} \geq 0,125$ e $\log(\text{N}/\text{O}) \geq -0,30$ são satisfeitas. As do Tipo II seriam subdivididas em IIa e IIb, de maneira que objetos para os quais somente uma das condições anteriores é satisfeita seriam considerados do Tipo IIa ($\text{He}/\text{H} \geq 0,125$ e $\log(\text{N}/\text{O}) < -0,30$; $\text{He}/\text{H} < 0,125$ e $\log(\text{N}/\text{O}) \geq -0,60$). Já as do Tipo IIb teriam $\text{He}/\text{H} < 0,125$ e $\log(\text{N}/\text{O}) < -0,60$. Uma quinta classe chamada Tipo V seria composta pelas NPs encontradas no centro Galáctico (Maciel, 1989).

1.1.5 O problema da discrepância entre abundâncias químicas

A composição química de uma NP resulta dos elementos produzidos pela estrela central e aqueles que estavam presentes no gás do qual a estrela se originou. Constituin-

²As estrelas podem ser classificadas basicamente em duas populações: População I é composta por estrelas formadas mais recentemente, inclui o Sol e as estrelas localizadas nos braços espirais das galáxias; População II corresponde às estrelas mais velhas e pobres em metais (Baade, 1944).

tes como O, Ne, Ar e S não são produzidos e nem são muito afetados pela nucleossíntese, refletindo assim o estado do gás do qual a progenitora da NP foi formada. Outros elementos, como He, C e N, têm suas abundâncias fortemente alteradas na estrela progenitora pela nucleossíntese e processos de *mixing* e que, conseqüentemente, enriquecem os envelopes das NPs. Desta forma, estes objetos representam ferramentas importantes para o estudo da evolução de estrelas de baixa massa e massa intermediária, de processos de nucleossíntese e também da evolução química da Galáxia. É necessário que tenhamos certeza que as técnicas tradicionais para determinação de abundâncias químicas sejam confiáveis e nos forneçam valores reais para tais estudos. Entretanto, o problema mais debatido no estudo desses objetos é a discrepância entre os valores de abundância determinados via linhas excitadas colisionalmente e aqueles obtidos via linhas de recombinação.

Peimbert (1967) avaliou o efeito de flutuações de temperatura no interior de regiões H II. As temperaturas obtidas por ele através de linhas proibidas foram maiores que aquelas determinadas do contínuo de Balmer. Ele atribuiu essa diferença, pelo menos em parte, à presença de flutuações de temperatura no interior de regiões H II. Nesse mesmo trabalho, Peimbert propôs um novo formalismo para a caracterização da estrutura térmica em nebulosas ionizadas. Definiu dois parâmetros: a temperatura média (T_0) e a média quadrática da flutuação de temperatura (t^2). Eles são dados, respectivamente, pelas expressões:

$$T_0 = \frac{\int T_e N_i N_e dV}{\int N_i N_e dV} \quad (1.1)$$

e

$$t^2 = \frac{\int (T_e - T_0)^2 N_i N_e dV}{T_0^2 \int N_i N_e dV}, \quad (1.2)$$

onde N_e é a densidade eletrônica, N_i é a densidade do íon utilizado com sensor de temperatura e V é o volume de integração da nebulosa.

Peimbert e Costero (1969) afirmaram que as abundâncias determinadas via linhas excitadas colisionalmente podem ser subestimadas se houver a presença de variações de temperatura no volume da nebulosa e essas não forem consideradas. Isso ocorre porque a intensidade de linhas excitadas colisionalmente é fortemente dependente da temperatura. Por outro lado, linhas de recombinação são essencialmente independentes da estrutura de densidade e temperatura da nebulosa. Sendo assim, essas linhas forneceriam valores mais confiáveis, mas são muito mais fracas e de difícil detecção.

Esteban (2002) afirma que, para regiões H II, o problema da discrepância das abundâncias mostra-se bem relacionado com as flutuações de temperatura. García-Rojas e Esteban (2007) analisaram dados de regiões H II galácticas e extragalácticas e confirmaram a afirmação de Esteban (2002). Eles obtiveram valores de temperatura eletrônica via linhas de recombinação do O II em concordância com os obtidos via linhas excitadas

colisionalmente. As abundâncias derivadas via linhas de recombinação foram aproximadamente duas vezes maiores que aquelas derivadas via linhas proibidas. Esse fator também se manteve constante para praticamente toda a amostra de objetos analisada.

Esse comportamento é diferente do observado em NPs. Nelas a diferença entre as abundâncias é observada em uma ampla faixa de valores. O caso mais extremo conhecido é para a NP Hf 2-2. Liu et al. (2006) encontraram para este objeto abundâncias via linhas de recombinação 70 vezes maiores que aquelas derivadas via linhas proibidas. Para conciliar esta divergência, flutuações de temperatura da ordem de $t^2 \approx 0,14$ seriam necessárias. Krabbe e Copetti (2006) mostram que flutuações da ordem de $t^2 \approx 0,09$ seriam necessárias em NGC 3242 e NGC 7009 para que estimativas consistentes de O^{2+}/H^+ fossem obtidas. Tais situações apontam para o fato de que considerar somente flutuações de temperatura (e/ou densidade) seria insuficiente para explicar as discrepâncias observadas. Outra possível explicação, sugerida por Liu et al. (2000), é a presença de regiões frias, pobres em H, incorporadas ao gás nebuloso. Como são ricas em elementos pesados, estas regiões teriam linhas de recombinação desses elementos mais intensas e estas linhas forneceriam estimativas mais confiáveis para as abundâncias dessas regiões. Entretanto, esse argumento ainda não é aceito universalmente.

Em síntese, busca-se evidências de flutuações de temperatura que significativamente influenciem as abundâncias obtidas através de linhas excitadas colisionalmente e, se detectadas, procedimentos confiáveis que as corrijam. Busca-se também as causas de tais flutuações de temperatura e se investiga se o problema das discrepâncias nas abundâncias tem a mesma origem em regiões H II e em NPs. Estimativas diretas de flutuações de temperatura em pequena escala somente podem ser obtidas mapeando uma nebulosa com resolução espacial apropriada. Entretanto, existem na literatura apenas um pequeno número de nebulosas para as quais estas estimativas foram realizadas e este debate está longe de ser concluído.

1.2 A nebulosa planetária NGC 6302

NGC 6302, também conhecida como Nebulosa da Borboleta, é uma NP galáctica do Tipo I com morfologia altamente bipolar e filamentos que se estendem por mais de 0,6 pc. Ela é composta pelos lóbulos, pelo toro molecular e pelo toro ionizado em seu interior.

Como o objetivo de demonstrar as capacidades da *Wide Field Camera 3*, NGC 6302 foi observada pelo HST em 2009. A imagem³ obtida é apresentada na figura

³Imagem disponível em <http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2009/25/image/f/>, com orientação e escala indicadas na Figura A.1.

1.4. Ela é composta por um mosaico de exposições com os filtros F373N ([O II]), F469N (He II), F502N ([O III]), F656N ($H\alpha$), F658N ([N II]) e F673N ([S II]). Esses diferentes filtros permitem inferir algumas propriedades do gás. Por exemplo, nas regiões brancas a luz é emitida principalmente pelo S. Nelas ocorre o encontro de uma nuvem de gás de alta velocidade com uma de baixa velocidade, produzindo as chamadas ondas de choque. Já nas extremidades avermelhadas da nebulosa, a emissão da luz é principalmente devida ao N e representa as regiões mais frias. Nesta imagem vemos as complexas estruturas de NGC 6302, detalhadas de maneira esquemática no trabalho de citeonline2005MNRAS.359..383M.

Devido à alta extinção na região circumestelar, sua estrela central foi detectada apenas recentemente de maneira inequívoca. Szyszka et al. (2009), a partir das observações obtidas pelo HST, detectaram-a nos filtros F469N e F673N na posição $\alpha = 17^{\text{h}}13^{\text{m}}44^{\text{s}},39$, $\delta = -37^{\circ}06'12'',93$ (J2000). Sua massa foi estimada por esses autores em aproximadamente $0,64 M_{\odot}$. Os modelos por eles obtidos também sugerem uma estrela em rápida evolução, com luminosidade de $L = 2000L_{\odot}$, diminuindo aproximadamente 0,8% por ano. A presença de linhas de emissão com alto potencial de ionização, como [Si VI] $1,96 \mu\text{m}$, [Si VII] $2,48 \mu\text{m}$ e [Si IX] $3,93 \mu\text{m}$ (Ashley; Hyland, 1988; Casassus; Roche; Barlow, 2000; Feibelman, 2001), indica uma estrela central extremamente quente. De fato, NGC 6302 pertence à classe de NPs com mais alta excitação.

Usando o código de fotoionização 3D MOCASSIN, Wright et al. (2011) modelaram o espectro de NGC 6302 observado por diversos autores. O melhor ajuste foi obtido a partir de uma estrela central com temperatura efetiva de 220000 K, o que a torna uma das estrelas mais quentes conhecidas em nossa galáxia. Consideraram também uma distribuição de abundâncias homogênea e três componentes principais para a densidade: um disco circum-estelar denso, um par de lóbulos com densidade constante e um componente de densidade mais alta na região mais interna dos lóbulos. Caroços foram introduzidos para simular inomogeneidades na distribuição de densidade. A maior parte das razões de linhas obtidas da literatura foram reproduzidas. Diferenças significativas foram encontradas entre algumas abundâncias iônicas do modelo e as obtidas por Tsamis et al. (2003).

Szyszka, Zijlstra e Walsh (2011) mediram os movimentos de expansão em NGC 6302 usando imagens do HST no filtro F658N separadas por 9,43 anos. Verificaram que o campo de velocidade emerge radialmente, com origem próxima à posição da estrela central. Os lóbulos, bem como as partes mais internas da nebulosa, expandem-se com uma velocidade que aumenta com a distância radial, que é conhecido como fluxo de Hubble (Peretto et al., 2007; Meaburn et al., 2008; Szyszka; Zijlstra; Walsh, 2011). Meaburn et al. (2005) mostraram que filamentos na extremidade ao Noroeste de NGC 6302 expandem-se com velocidades superiores a 600 km s^{-1} .

O toro molecular, detectado em CO, é orientado na direção Norte-Sul e expande-



Figura 1.4: Imagem da NP NGC 6302 composta por um mosaico de exposições nos filtros [O II], He II, [O III], $H\alpha$, [N II] e [S II]. Foi obtida utilizando a *Wide Field Camera 3* acomplada ao HST. Está disponível em <http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2009/25/image/b/>.

se com uma velocidade de $\approx 8 \text{ km s}^{-1}$ (Peretto et al., 2007). Em seu interior, há um toro ionizado, cuja natureza e evolução ainda não são completamente compreendidas.

1.3 A nebulosa planetária NGC 2440

NGC 2440, assim como NGC 6302, é uma NP bipolar do Tipo I, com altas abundâncias de nitrogênio e hélio. Minkowski (1964) referiu-se à ela como “exemplo de um objeto tão complicado que desafia descrição”. De fato, NGC 2440 é caracterizada por duas estruturas bipolares principais, uma orientada ao longo de P.A. $\approx 85^\circ$ e inclinada de um ângulo de 40° com relação à linha de visada, e outra orientada ao longo de P.A. $\approx 35^\circ$ e inclinada de um ângulo de 90° com relação à linha de visada (Lopez et al., 1998). Ao longo desta última estrutura, mais brilhante, um “jato” simétrico emerge do centro e culmina em dois caroços brilhantes nas bordas opostas destes lóbulos. A estrela central

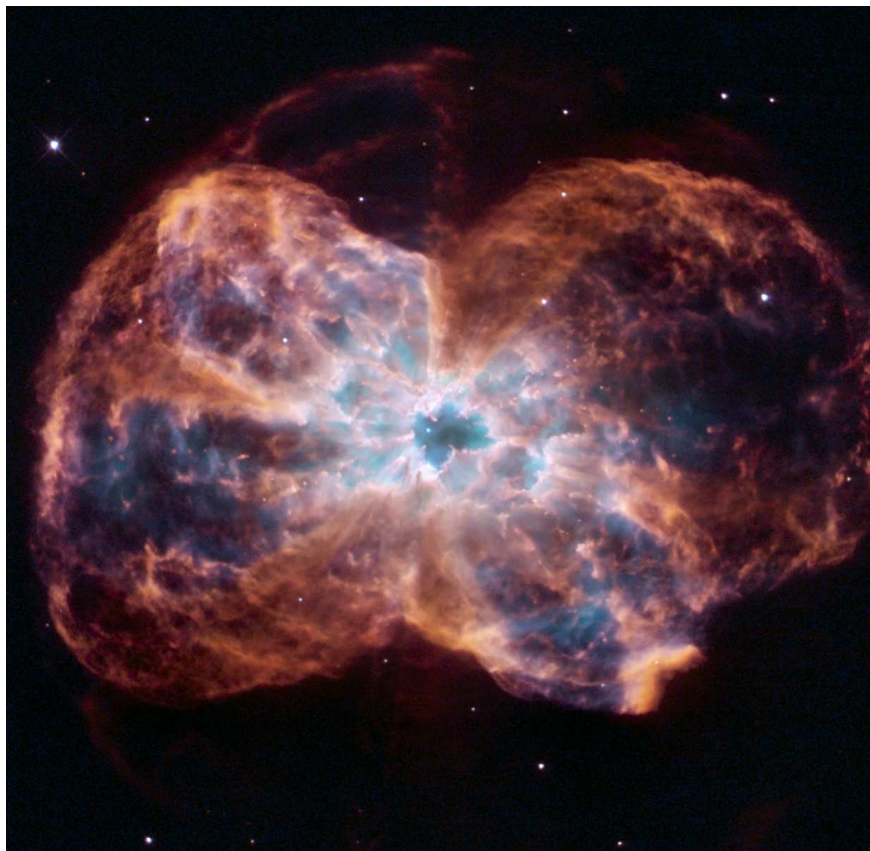


Figura 1.5: Imagem da NP NGC 2440 composta por um mosaico de exposições nos filtros B, He II, [O III], V, $H\alpha$, [N II] e R. Foi obtida utilizando a *Wide Field Camera 2* acoplada ao HST. Está disponível em <http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2007/09/image/a/>.

aparece cercada por uma estrutura toroidal. Estas características podem ser vistas na imagem⁴ de NGC 2440 apresentada na Figura 1.5. Ela foi obtida pelo HST em 2007 utilizando a *Wide Field Planetary Camera 2*, sendo composta por um mosaico de exposições nos filtros F439W (B), F469N (He II), F502N ([O III]), F555W (V), F656N ($H\alpha$), F658N ([N II]) e F675W (R).

A origem destas estruturas morfológicas permanece incerta. Uma hipótese aponta que sejam consequência de múltiplas fases de ejeção de massa combinadas à precessão do eixo simétrico. Fluxos colimados simétricos produzindo regiões excitadas por choque com precessão do eixo de simetria observados em NGC 2440 caracterizam o que é conhecido como “BRETs” (sigla em inglês para *bipolar, rotating, episodic jets*). BRETs foram encontrados em um número de NPs (Lopez, 1997). Estes jatos são geralmente associados à discos de acreção, componentes não estabelecidos em NPs. Modelos de sistemas binários, que eventualmente levam a formação de um disco de acreção, têm sido usados na procura por explicações para a formação dos fluxos colimados (Soker; Livio, 1994).

Lopez et al. (1998) realizaram um estudo cinemático detalhado de NGC 2440. Na

⁴Imagem disponível em <http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2007/09/image/a/>, com orientação e escala indicadas na Figura A.2.

figura 1.6, apresentamos um esquema para estruturas de NGC 2440 retirado desse trabalho. A velocidade de expansão dos lóbulos em P.A. $\approx 85^\circ$ e P.A. $\approx 35^\circ$ foi estimada em aproximadamente 150 km s^{-1} e 135 km s^{-1} , respectivamente, considerando que a velocidade de expansão é sempre na direção radial com relação à estrela central. Os caroços chamados NK e SK são interpretados como vértices dos lóbulos bipolares em P.A. $\approx 35^\circ$. Entretanto, velocidades de recuo de aproximadamente 150 km s^{-1} são associadas a eles. Uma possível explicação para isso seriam as observações em H_2 $2,12 \mu\text{m}$ de Latter et al. (1995) e Kastner et al. (1996). Elas indicam que as condensações são densas, frias e ricas em poeira. Devido a esta poeira, a emissão da estrela central estaria sendo espalhada nestes caroços, que possuem velocidades similares aos lóbulos em P.A. $\approx 35^\circ$. A estrutura toroidal ao centro, cercado a estrela central, expande-se a 22 km s^{-1} se sua orientação é no plano do céu, ou acima de 29 km s^{-1} se inclinada mais de 40° .

Além destas estruturas complexas, imagens nos filtros $3,6 \mu\text{m}$, $4,5 \mu\text{m}$ e $8,0 \mu\text{m}$ obtidas pelo Telescópio Espacial Spitzer e analisadas por Ramos-Larios e Phillips (2009) mostram a presença de um halo circular externo que parece interagir com o meio interestelar. Sugerem que a fonte move-se na direção Nordeste, causando compressão da casca que corresponde a estrutura em forma de aro e a formação de uma estrutura similar a um vórtice no lado oposto.

Wang, Hasegawa e Kwok (2008) mostram que a emissão em CO ($J = 3 - 2$) também estende-se na direção Nordeste e Sudoeste, traçando a estrutura em P.A. $\approx 35^\circ$, sendo particularmente intensa no núcleo e nas condensações NK e SK. Assim, esta estrutura é rica em moléculas pesadas e parece distinta dos demais lóbulos.

A estrela central de NGC 2440 foi detectada por Atherton, Pottasch e Reay (1986) em uma imagem CCD de banda estreita. Posteriormente, Heap (1987) a detectaram em espectros ultravioletas obtidos com o satélite IUE. Mais recentemente, esta estrela foi claramente identificada em observações com a *Wide Field Planetary Camera 2* a bordo do HST⁵. Heap, Lindler e Neill (1992) analisaram estas observações e estimaram temperatura superficial de $200\,000 \text{ K}$, massa de $0,7 M_\odot$ e magnitude visual de $V = 17,5$.

Apresentamos alguns dados adicionais de NGC 6302 e NGC 2440 na Tabela 1.1. Estas NPs serão objetos de estudo deste trabalho, conforme veremos a seguir.

⁵Imagem disponível em <http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/1992/12/image/a/>

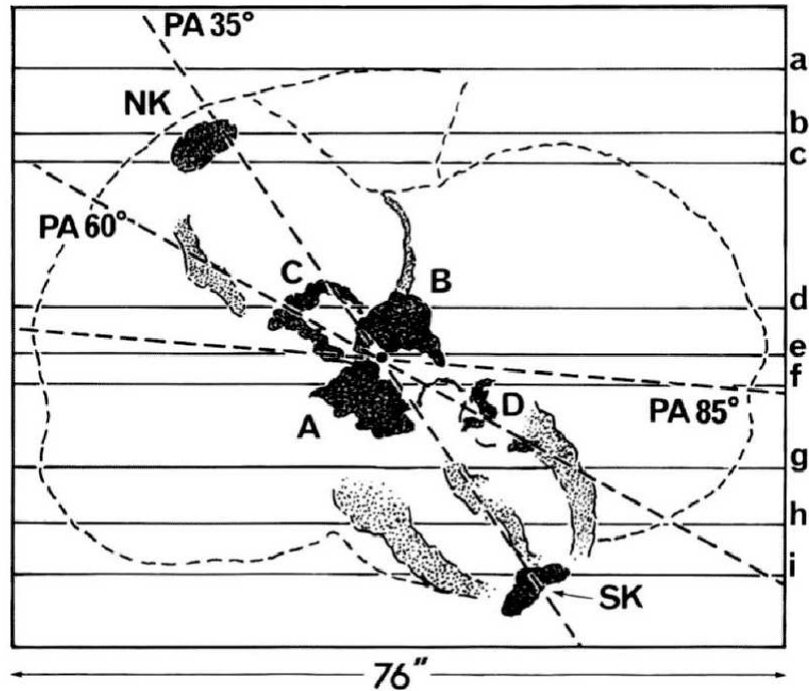


Figura 1.6: Esquema para as estruturas de NGC 2440 retirado de Lopez et al. (1998). Os ângulos de posição dos eixos dos três lóbulos bipolares são indicados, além das condensações A-D.

Tabela 1.1: Dados gerais de NGC 2440 e NGC 6302

Parâmetro	NGC 6302	NGC 2440
Outros nomes	PN G349.5+01.0, Gum 60	PN G234.8+02.4
Descobridor	Pickering e Fleming (1896)	William Herschel (1790)
$\alpha(2000)$	17 ^h 13 ^m 44 ^s ,27	07 ^h 41 ^m 55 ^s ,42
$\delta(2000)$	-37°06'06'',2	-18°12'32'',8
l (°)	349,50982	234,83813
b (°)	1,05715	2,42105
Diâmetro óptico (")	44,5	16,0
Velocidade radial (kms ⁻¹)	-39,0	63,0
Distância (kpc)	0,91 [1]; 1,0 [2]; 1,17 [3]	1,57 [4]; 0,50 [5]; 1,1 [6]
Estrela central	HD 155520	HD 62166
Massa (M_{\odot})	2 [10]; 0,5 [11]	0,64 [9]
Idade (anos)	2200 [7]; 2250 [8]	2400 [9]

Referências: [1] Kemper et al. (2002); [2] Matsuura et al. (2005); [3] Meaburn et al. (2008); [4] Zhang (1995); [5] Baessgen, Diesch e Grewing (1995); [6] Hajian e Terzian (1996); [7] Meaburn et al. (2008); [8] Szyszka, Zijlstra e Walsh (2011); [9] Hyung e Aller (1998); [10] Peretto et al. (2007); [11] Dinh-V-Trung et al. (2008). Dados sem referência explícita foram obtidos do catálogo PLNEBULAE - *Galactic Planetary Nebulae Catalog* (Acker et al., 1992).

1.4 Nosso trabalho

Há um número considerável de estudos sobre as condições físicas e químicas de NGC 2440 e NGC 6302 publicados nas últimas décadas. Alguns dos principais trabalhos baseados em observações espectrofotométricas destes objetos são apresentados nas Tabelas 1.2 e 1.3, sendo a primeira adaptada de Wright et al. (2011). Diferentes porções destas nebulosas foram observadas, usando também diferentes configurações instrumentais. Apesar destes trabalhos fornecerem um panorama geral, eles não fornecem informações detalhadas de diferentes estruturas morfológicas.

Utilizando dados espectrofotométricos de fenda longa posicionada ao centro dos objetos e orientada na direção Leste-Oeste, Krabbe e Copetti (2005) avaliaram as variações de densidade e temperatura eletrônicas para 10 NPs galácticas, entre elas NGC 2440 e NGC 6302. Uma análise espacialmente resolvida mais rica pode ser obtida usando múltiplas posições de fenda longa paralelas. Através delas, mapas bidimensionais podem ser criados que, por exemplo, podem fornecer melhores vínculos aos modelos de fotoionização tridimensionais de nebulosas. Além disso, a análise das abundâncias químicas de NPs com resolução espacial fornecem a composição química de diferentes componentes morfológicos, que podem ser resultado de diferentes episódios de perda de massa, estando ligados a diferentes etapas da evolução estelar, ou então traçar a não-homogeneidade na perda de massa (Corradi et al., 1997). Porém, somente para um pequeno número de NPs a técnica de mapeamento espectroscópico foi empregada: NGC 6369 (Monteiro et al., 2004), NGC 40 (Leal-Ferreira et al., 2011), NGC 5882 (Tsamis et al., 2008), NGC 6153 (Tsamis et al., 2008), NGC 7009 (Tsamis et al., 2008; Phillips; Cuesta; Ramos-Larios, 2010).

No presente trabalho, apresentamos os resultados do mapeamento espectroscópico das NPs NGC 2440 e NGC 6302. A partir de medidas espectrofotométricas de fenda longa obtidas ponto-a-ponto ao longo das superfícies nebulares, mapas bidimensionais e perfis espaciais de razões de linhas de emissão e de propriedades físico-químicas foram produzidos.

No capítulo a seguir, apresentamos as informações observacionais com relação aos dados utilizados e os procedimentos adotados no tratamento e redução dos dados, nos processos de medição das linhas de emissão e nas análises de erros. No Capítulo 3, apresentamos os procedimentos empregados para obtenção das propriedades físicas e químicas. Os resultados dos mapeamentos de NGC 6302 e NGC 2440 são apresentados nos Capítulos 4 e 5, respectivamente. No último capítulo, apresentamos os principais resultados e conclusões, além de perspectivas de trabalhos futuros.

Tabela 1.2: Estudos espectroscópicos de NGC 6302 presentes na literatura

Região	Telescópio	Abertura / fenda	Referência
Óptico-IR	Cerro Tololo 92 cm	17'' × 34''	Danziger, Frogel e Persson (1973)
UV	Mt. Lemmon 1,5 m	48'' (circular)	Rowlands, Houck e Herter (1994)
IR médio	ISO	14'' × 20''	Pottasch e Beintema (1999)
Óptico-IR	Siding Springs 2,3 m	2'' (fenda longa)	Groves et al. (2002)
IR próximo	UKIRT (echelle)	3'' × 3''	Casassus, Roche e Barlow (2000)
IR médio	UKIRT banda N	4'' (circular)	Casassus, Roche e Barlow (2000)
UV	IUE	10,3'' × 23'' (oval)	Tsamis et al. (2003)
Óptico	ESO 1,52 m	210'' × 2''	Tsamis et al. (2003)
Óptico	ESO 1,52 m	250'' × 2''	Krabbe e Copetti (2005)

Tabela 1.3: Estudos espectroscópicos de NGC 2440 presentes na literatura

Região	Telescópio	Abertura / fenda	Referência
Óptico e UV	Shane 3 m e IUE	10'' × 20'' (elíptica)	Shields et al. (1981)
IR próximo	ESO 1,52 m	—	Condal (1982)
Óptico	Kitt Peak 2,1 m	12'' × 4''	Peimbert e Torres-Peimbert (1987)
Óptico	CFHT 3,6 m	130'' × 1''	Richer, McCall e Martin (1991)
UV	IUE	22'' × 9''	Kwitter e Henry (1996)
Óptico	Shane 3 m	4'' × 1,2''	Keenan et al. (1996)
Óptico	Shane 3 m	4'' × 1,2''	Hyung e Aller (1998)
IR e UV	ISO, IUE	10'' × 23'' (elíptica)	Bernard Salas et al. (2002)
Óptico	ESO 1,52 m	210'' × 2''	Tsamis et al. (2003)
Óptico	ESO 1,52 m	250'' × 2''	Krabbe e Copetti (2005)
Óptico	LNA 1,60 m	320'' × 2''	Krabbe e Copetti (2005)

2 OBSERVAÇÕES, REDUÇÃO DOS DADOS E MEDIDAS DAS LINHAS DE EMISSÃO

2.1 Observações

2.1.1 Configuração instrumental para observações de NGC 6302

As observações de NGC 6302 foram realizadas nos dias 29, 30 e 31 de agosto de 2008 com o espectrógrafo Goodman acoplado ao telescópio SOAR de 4,1 m, localizado em Cerro Pachón, Chile. Este espectrógrafo conta com um detector CCD 4096 x 4096 Fairchild. Foram obtidos espectros bidimensionais utilizando uma fenda longa de 3,7' de comprimento e 1,10'' de largura no plano do céu e duas redes diferentes, uma de 300 linhas mm^{-1} e outra de 600 linhas mm^{-1} , resultando em uma escala espacial de aproximadamente $0,15'' \text{pxl}^{-1}$. A rede de 300 linhas mm^{-1} cobriu a faixa de 3520 a 8850 Å, com uma dispersão espectral de $1,3 \text{ Å pxl}^{-1}$ e uma resolução espectral de 8,9 Å (FWHM). Já a rede de 600 linhas mm^{-1} cobriu a faixa de 3490 a 6100 Å, com uma dispersão espectral de $0,65 \text{ Å pxl}^{-1}$ e uma resolução espectral de 4,5 Å (FWHM).

Com a fenda orientada ao longo da direção Leste-Oeste (P.A. = 90°), a nebulosa NGC 6302 foi amostrada em 11 posições com diferentes declinações, sempre com uma separação de 1''. Estas posições foram desde 4'' ao Norte (4'' N) até 6'' ao Sul (6'' S) da estrela 2MASS 17134915-3706075 ($\alpha = 17^{\text{h}} 13^{\text{m}} 49^{\text{s}},13$; $\delta = -37^\circ 06' 08'',3$; J2000), tomada como referência de posição em declinação. Três exposições para cada posição da fenda, cada uma de 250 s para rede de 300 linhas mm^{-1} e 300 s para rede de 600 linhas mm^{-1} , foram obtidas. Na figura 2.1, apresentamos uma imagem na banda R (número 392) observada no ESO, localizada com o software *Aladin*¹. Nela fizemos uma representação esquemática das posições de fenda das quais foram obtidos os dados de NGC 6302. Em vermelho representamos a posição $\Delta\delta = 0''$ e, em azul, as posições adjacentes.

Para correções de imperfeições do CCD foram realizadas exposições de *flat-field* e *bias*. Para calibração em comprimento de onda foram realizadas exposições das lâmpadas Hg-Ar e Cu-Ar. Para calibração em unidades de fluxo foram também obtidos espectros das estrelas padrão LTT 9491 ($\alpha = 23^{\text{h}} 19^{\text{m}} 35^{\text{s}},38$; $\delta = -17^\circ 05' 28'',5$; J2000) e LTT 7379 ($\alpha = 18^{\text{h}} 36^{\text{m}} 25^{\text{s}},94$; $\delta = -44^\circ 18' 36'',93$; J2000).

¹Disponível em: <http://aladin.u-strasbg.fr/>

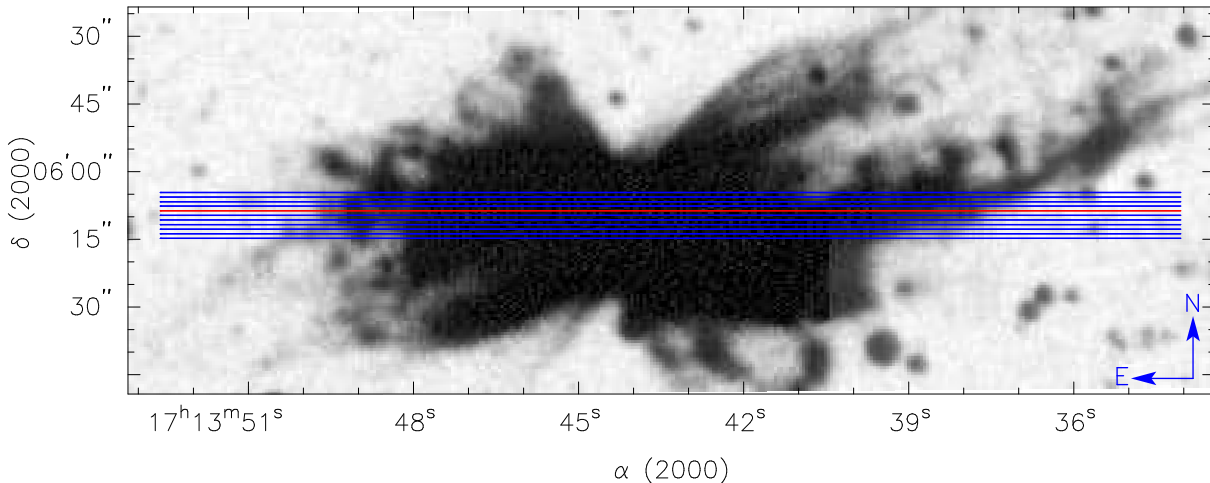


Figura 2.1: Imagem na banda R (número 392) obtida no ESO e localizada com o *software* Aladin. Nela indicamos esquematicamente as posições de fenda observadas. Em vermelho representamos a posição $\Delta\delta = 0''$ e, em azul, as posições adjacentes, indo de $\Delta\delta = 4''$ N até $\Delta\delta = 6''$ S, separadas $1''$ umas das outras.

2.1.2 Configuração instrumental para observações de NGC 2440

As observações de NGC 2440 foram realizadas nos dias 17 e 18 de janeiro e 9 de fevereiro de 2010 utilizando configuração instrumental similar a descrita anteriormente para NGC 6302. Entretanto, nestas foi utilizada uma fenda $1,35''$ de largura e todos os tempos de exposição foram de 300 s, sendo duas exposições para cada posição de fenda. A nebulosa foi amostrada em 15 posições com diferentes declinações, sempre com uma separação de $2''$ e com a fenda orientada na direção Leste-Oeste. A estrela DENIS J074200.2-181236 ($\alpha = 07^{\text{h}} 42^{\text{m}} 00^{\text{s}},24$; $\delta = -18^{\circ} 12' 37'',3$; J2000) foi tomada como referência e, a partir dela, as posições foram desde $18''$ ao Norte ($18''$ N) até $10''$ ao Sul ($10''$ S). Na figura 2.2, apresentamos uma representação esquemática das posições de fenda em uma imagem de NGC 2440 na banda J (número 560) obtida do *Southern Sky Atlas* (SERC-J), localizada com o *software* Aladin. Além destas, foram também realizadas exposições de *flat-field*, *bias*, das lâmpadas Hg-Ar e Cu-Ar e das estrelas padrão LTT 2515 ($\alpha = 06^{\text{h}} 19^{\text{m}} 21^{\text{s}},79$; $\delta = -06^{\circ} 39' 21'',50$; J2000) e LTT 3218 ($\alpha = 08^{\text{h}} 41^{\text{m}} 32^{\text{s}},50$; $\delta = -32^{\circ} 56' 34'',0$; J2000).

2.2 Redução dos Dados

Os espectros foram reduzidos utilizando os procedimentos padrão dos pacotes do *software* de análise e redução de dados astronômicos IRAF. As etapas de remoção dos efeitos instrumentais do detector CCD (realizadas com o auxílio das imagens de *bias*

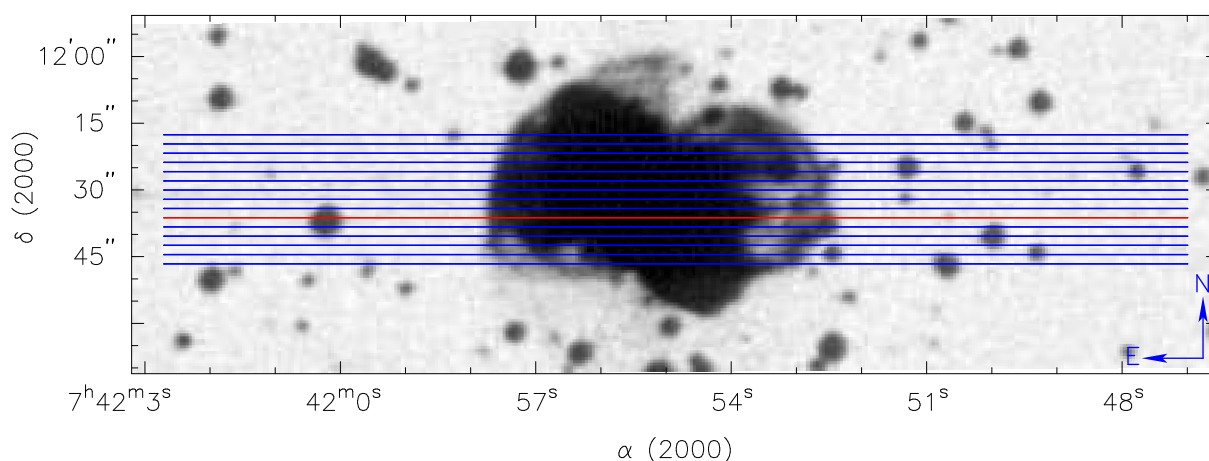


Figura 2.2: Imagem na banda J (número 560) obtida do *Southern Sky Atlas* (SERC-J) e localizada com o *software* Aladin. Nela indicamos esquematicamente as posições de fenda observadas. Em vermelho representamos a posição $\Delta\delta = 0''$ e, em azul, as posições adjacentes, indo de $\Delta\delta = 18''$ N até $\Delta\delta = 10''$ S, separadas $2''$ umas das outras.

e *flat-field*) e de remoção dos raios cósmicos foram realizados pela Prof.^a Dr.^a Ângela Krabbe.

Com o tratamento básico das imagens realizado, procedemos com a extração dos espectros unidimensionais. Antes disso, porém, corrigimos pequenos desalinhamentos na direção Leste-Oeste entre as exposições através de uma triangulação de estrelas para a posterior construção dos mapas e perfis. Então, adotamos o tamanho da abertura como aproximadamente $1,5''$, totalizando 150 aberturas para cada exposição. Utilizamos a rotina *apall* do pacote *noao.twodspec.apextract* para realizar a extração, corrigindo o desalinhamento do espectro ao longo do eixo de dispersão através da função *traço*.

Para calibração em comprimento de onda não foi possível a utilização das lâmpadas de Hg-Ar e Cu-Ar devido à baixa qualidade dos espectros dessas lâmpadas. Assim, utilizamos como referência para calibração as principais linhas de emissão da própria nebulosa. Para tanto, utilizamos as rotinas *identify* e *reidentify* que ajustam uma função de dispersão aos espectros considerados como lâmpadas. Por meio da rotina *dispcor*, aplicamos a função de dispersão aos espectros após indicarmos no cabeçalho da imagem qual seu espectro de comparação.

Com a rotina *standard*, foi gerada uma tabela contendo o comprimento de onda e o fluxo de cada um dos espectros das estrelas padrão. A esta tabela ajustou-se uma função, chamada função de sensibilidade, com a tarefa *sensfunc*. A calibração em unidades de fluxo foi então realizada com a rotina *calibrate*, com a qual aplicamos a correção atmosférica e a função de sensibilidade.

Por fim, as exposições para cada declinação foram combinadas realizando uma média das medidas das aberturas de mesmo número. Obtivemos, assim, 1650 espectros

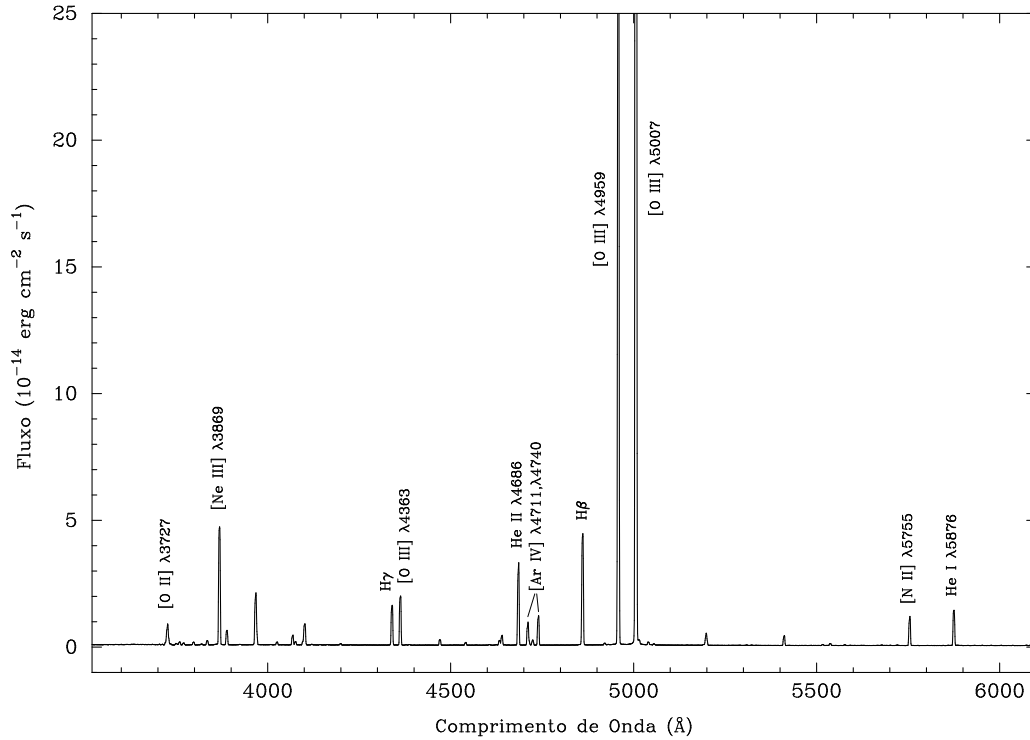


Figura 2.3: Espectro de NGC 6302 obtido com a rede de 600 linhas mm^{-1} . Trata-se do espectro obtido com a fenda orientada sobre a estrela de referência ($\Delta\delta = 0''$) e na abertura localizada aproximadamente na posição correspondente à estrela central.

para NGC 6302 e 2250 espectros para NGC 2440, para cada uma das configurações de rede de dispersão. Nas figuras 2.3 e 2.4, apresentamos espectros de NGC 6302 e NGC 2440 calibrados em comprimento de onda e em unidades de fluxo, obtidos com a fenda orientada sobre a estrela de referência ($\Delta\delta = 0''$), utilizando as redes de 600 linhas mm^{-1} e 300 linhas mm^{-1} , respectivamente. Neles identificamos algumas linhas de emissão. Estes espectros correspondem às aberturas localizadas aproximadamente na posição correspondente à estrela central.

2.3 Intensidades das linhas e erros estatísticos

Consideramos em nossa análise as 20 linhas de emissão listadas na Tabela 2.1. Estas são linhas do H I, He I, He II e linhas excitadas colisionalmente usadas para calcular propriedades físicas e químicas das nebulosas. Suas intensidades foram medidas com a rotina *onedspec.fitprofs*. Apenas as linhas H γ , [O III] λ 4363, [N II] λ 6548, H α , [N II] λ 6583, [S II] λ 6717 e [S II] λ 6731 foram medidas por meio da rotina *splot* utilizando-se o comando “d”, pois não foram resolvidas nos espectros.

O erro na medida das linhas foi estimado através da estatística de Poisson das contagens. Considerando o erro total como a soma quadrática do erro associado à me-

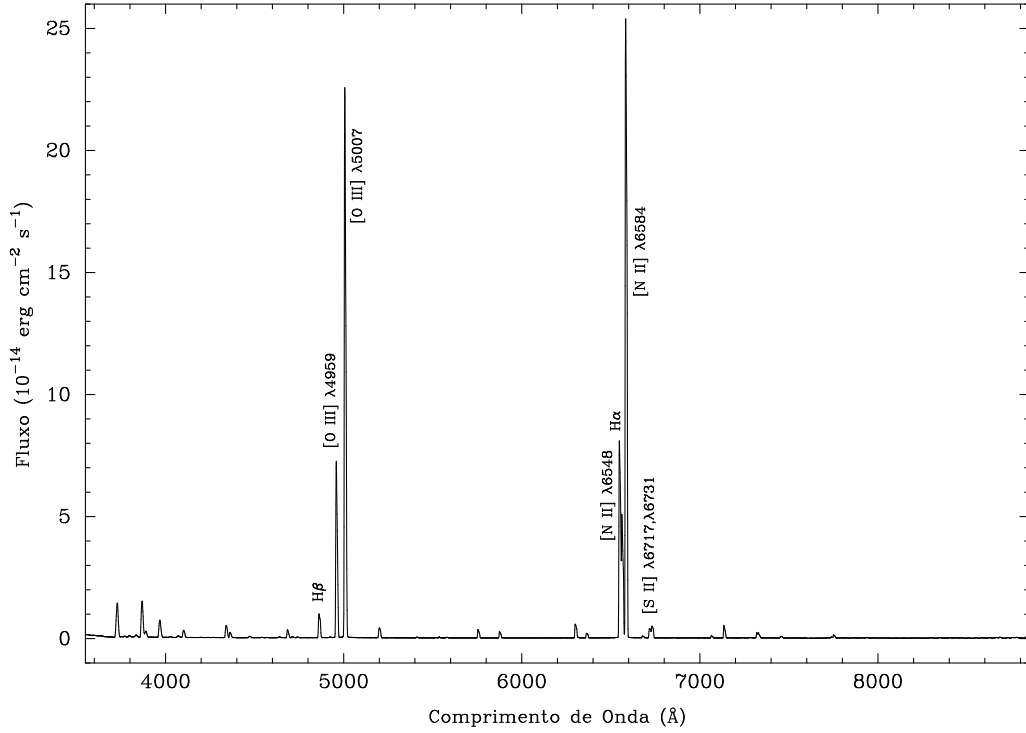


Figura 2.4: Espectro de NGC 2440 obtido com a rede de 300 linhas mm^{-1} . Trata-se do espectro obtido com a fenda orientada sobre a estrela de referência ($\Delta\delta = 0''$) e na abertura localizada aproximadamente na posição correspondente à estrela central.

da intensidade da linha e ao erro associado ao contínuo, Sanmartin (2008) obteve que:

$$\sigma_T = \sqrt{N} \Delta \sigma_C \sqrt{1 + \frac{EW}{N\Delta}}, \quad (2.1)$$

onde N é a largura da linha na base (em píxels), Δ é a escala de dispersão espectral ($\text{\AA}/\text{pxl}$), σ_C é o valor quadrático médio (rms) do fluxo do contínuo próximo à linha e EW (sigla para o termo em inglês *Equivalent Width*) é a largura equivalente da linha.

Para propagarmos esses erros para as razões de intensidades utilizamos a equação proposta por Bevington e Robinson (1992):

$$\delta_x^2 = \delta_u^2 \left(\frac{\partial x}{\partial u} \right)^2 + \delta_v^2 \left(\frac{\partial x}{\partial v} \right)^2 + 2\delta_{uv} \left(\frac{\partial x}{\partial u} \right) \left(\frac{\partial x}{\partial v} \right). \quad (2.2)$$

Esta propaga o erro de uma medida x em função de duas variáveis u e v . δ_u e δ_v são os erros nas medidas u e v , respectivamente, e δ_{uv} é o termo de covariância entre u e v , que é nulo no caso de u e v serem independentes. A partir disso, obtemos que os erros nas intensidades são propagados para razão pela equação:

$$\sigma_r = \frac{I(\lambda_1)}{I(\lambda_2)} \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\lambda_1}}{I(\lambda_1)} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\lambda_2}}{I(\lambda_2)} \right)^2} \quad (2.3)$$

Tabela 2.1: Linhas de emissão medidas para obtenção dos mapas

λ (Å)	Íon	Termos	$J_{\text{inf}} - J_{\text{sup}}$
3726 +	[O II]	$4S^o - 2D^o$	3/2 - 3/2
3729	[O II]	$4S^o - 2D^o$	3/2 - 5/2
3869	[Ne III]	$3P - 1D$	2 - 2
4340	H I	$2P^o - 2D$	1/2-3/2 - 1/2-9/2
4363	[O III]	$1D - 1S$	2 - 0
4471	He I	$3P^o - 3D$	0-2 - 1-3
4686	He II	3 - 4	1/2-5/2 - 1/2-7/2
4711 +	[Ar IV]	$4S^o - 2D^o$	3/2 - 5/2
4713	He I	$3P^o - 3S$	0-2 - 1
4740	[Ar IV]	$4S^o - 2D^o$	3/2 - 3/2
4861	H I	$2P^o - 2D$	1/2-3/2 - 1/2-7/2
4959	[O III]	$3P - 1D$	1 - 2
5007	[O III]	$3P - 1D$	2 - 2
5755	[N II]	$1D - 1S$	2 - 0
5876	He I	$3P^o - 3D$	0-2 - 1-3
6548 +	[N II]	$3P - 1D$	1 - 2
6563 +	H I	$2P^o - 2D$	1/2-3/2 - 1/2-5/2
6583	[N II]	$3P - 1D$	2 - 2
6717 +	[S II]	$4S^o - 2D^o$	3/2 - 5/2
6731	[S II]	$4S^o - 2D^o$	3/2 - 3/2

A intensidade observada é reduzida pelo espalhamento e pela absorção da radiação pela poeira do meio interestelar. Assim, as medidas de intensidades precisam ser corrigidas devido a esse efeito, conhecido como avermelhamento. Este efeito superestima a emissão da região vermelha em relação à azul.

A intensidade corrigida pelo avermelhamento é dada por:

$$\frac{I(\lambda)}{I(H\beta)} = \frac{F(\lambda)}{F(H\beta)} 10^{c(H\beta)[f(\lambda)-f(H\beta)]}, \quad (2.4)$$

onde $I(\lambda)$ é a intensidade corrigida, $F(\lambda)$ é a intensidade observada, $f(\lambda)$ é a dependência da extinção interestelar com o comprimento de onda e $c(H\beta)$ é o coeficiente de extinção interestelar em $H\beta$. O coeficiente de extinção $c(H\beta)$ foi estimado comparando-se os valores observados das razões $H\gamma/H\beta$ (para região azul) e $H\alpha/H\beta$ (para região vermelha) com os teóricos de Hummer e Storey (1987) para $T_e = 10000\text{ K}$ e $N_e = 100\text{ cm}^{-3}$. A função de avermelhamento utilizada foi a de Savage e Mathis (1979).

Para o coeficiente de extinção, o erro foi estimado por:

$$\sigma_{c(H\beta)} = \frac{\log(e) \sigma_r}{f(\lambda) F(\lambda)}, \quad (2.5)$$

onde $F(\lambda)$ é o fluxo da linha em relação à $H\beta$.

Por fim, os erros nas intensidades corrigidas por avermelhamento foram calculados como sendo

$$\sigma_c = \sqrt{[10^{c(H\beta)} f(\lambda) \sigma_r]^2 + [10^{c(H\beta)} f(\lambda) F(\lambda) \ln(10) \sigma_{c(H\beta)}]^2}. \quad (2.6)$$

Estabelecemos ainda um critério, que é próximo ao limite de detecção dos espectros, para eliminar medidas muito imprecisas. Consideramos em nossa análise somente linhas que possuíam pico de intensidade maior que 2,5 vezes o valor quadrado médio do contínuo próximo à linha ($2,5 \sigma_c$). Dentro desses limites para o mapa do fluxo em $H\beta$, somamos os fluxos em todas as aberturas e obtivemos espectros integrados de cada objeto.

Construímos mapas a partir das medidas de fluxo espacialmente resolvidas. Os mapas foram gerados com a rotina *rtxtimage* do IRAF através de um arquivo texto com as medidas. Propriedades físicas e químicas foram determinadas a partir dos mapas e dos espectros integrados. Os métodos pelos quais estes resultados foram obtidos são apresentados no capítulo a seguir.

3 DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES FÍSICO-QUÍMICAS

3.1 Densidade e temperatura eletrônicas

A densidade eletrônica de nebulosas ionizadas pode ser estimada pela comparação das intensidades de duas linhas excitadas colisionalmente. Estas linhas devem ser de um mesmo íon e emitidas nas transições entre níveis com energias de excitação semelhantes. Uma vez que estes íons possuem diferentes probabilidades de transição e diferentes taxas de desexcitação colisional, a população relativa desses níveis será altamente dependente da densidade eletrônica. A dependência das intensidades destas linhas de emissão com a densidade eletrônica é obtida resolvendo-se as equações de equilíbrio estatístico dos níveis (Osterbrock; Ferland, 2006):

$$\sum_{j \neq i} n_j N_e q_{ji} + \sum_{j > i} n_j A_{ji} = \sum_{j \neq i} n_i N_e q_{ij} + \sum_{j < i} n_i A_{ij}, \quad (3.1)$$

onde n_j é a fração de íons que possuem elétrons no nível j , N_e é a densidade eletrônica (em cm^{-3}), q_{ij} é o coeficiente de excitação colisional do nível i para o nível j (em $\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$) e A_{ij} é a probabilidade de transição radiativa de um nível superior i para um nível inferior j (em s^{-1}). Esta é a equação para um nível arbitrário i . O lado esquerdo da igualdade é a taxa de transição para o nível i e o lado direito, a taxa de transição do nível i para outros níveis. O primeiro termo à esquerda é a taxa de transição colisional ao nível i . O segundo termo é a taxa de transição radiativa de níveis superiores ao inferior i . O terceiro termo é a taxa de transição colisional do nível i para outros níveis e o último termo, a taxa de transição radiativa do nível i para os níveis inferiores.

Algumas das razões de intensidades de linhas que podem ser utilizadas para a determinação das densidades eletrônicas são listadas na tabela 3.1, juntamente com o potencial de ionização (P.I.) do íon e do seu antecessor. Todas estas razões são relativas a íons com configuração fundamental do tipo p^3 .

Os valores de densidade eletrônica observados nas NPs mais brilhantes variam de 10^3 cm^{-3} a 10^5 cm^{-3} . Já nas NPs mais fracas, que correspondem aos estágios mais evoluídos, densidades mais baixas são encontradas.

A temperatura eletrônica pode ser determinada por diferentes métodos. Alguns destes são baseados em medidas de linhas de emissão no infravermelho ou até linhas de recombinação ou absorção em rádio frequências. Ao longo de nosso trabalho, as análises serão dedicadas ao método em que se utiliza as linhas excitadas colisionalmente.

Tabela 3.1: Razões de intensidades de linhas para diagnóstico da densidade eletrônica e potenciais de ionização (PI)

Íon X^i	Razão	P.I. (eV)	
		X^{i-1}	X^i
NI	$I(\lambda 5198) / I(\lambda 5200)$	0,0	14,5
S II	$I(\lambda 6717) / I(\lambda 6731)$	10,4	23,3
O II	$I(\lambda 3726) / I(\lambda 3729)$	13,6	35,1
Cl III	$I(\lambda 5517) / I(\lambda 5537)$	23,8	39,9
Ar IV	$I(\lambda 4711) / I(\lambda 4740)$	40,9	59,8

Para uma nebulosa em equilíbrio térmico, a temperatura em um dado ponto é o resultado do equilíbrio entre os processos de aquecimento e resfriamento do gás. O aquecimento é devido ao processo de fotoionização e o resfriamento ocorre através dos processos de recombinação, excitação colisional e da emissão livre-livre (*bremstrahlung*). Os íons que dominam o mecanismo de resfriamento do gás são íons de metais com configuração de estado fundamental p^2 , p^3 ou p^4 , os quais têm cinco níveis mais baixos de energia. Somente estes cinco níveis são geralmente relevantes para o cálculo do espectro observado.

A temperatura eletrônica de uma nebulosa pode ser determinada comparando-se intensidades de linhas de emissão provenientes de um mesmo íon e com energias de excitação consideravelmente diferentes. Essa situação é típica da configuração de estado fundamental p^2 . Nestes, as taxas de excitação para níveis superiores ou inferiores dependem fortemente da temperatura. Linhas originadas dos níveis 2D e 2P dos íons com configuração de estado fundamental p^3 , como [O II] e [S II], também podem ser usados como indicadores de temperatura, uma vez que estes níveis tem potenciais de excitação diferentes. Neste caso, deve-se comparar as somas das intensidades de linhas originadas de transições de um mesmo nível inicial. Na tabela 3.2, apresentamos algumas das razões de linhas que podem ser utilizadas como sensores de densidade, a configuração de estado fundamental (Config.) e o potencial de ionização do íon associado. Na figura 3.1 são apresentados os cinco níveis mais baixos de energia dos íons [O III] e [S II]. Os níveis estão fora de escala visando maior clareza. Apenas as transições relevantes em nosso estudo estão indicadas.

As temperaturas e densidades eletrônicas foram derivadas resolvendo numericamente as equações de equilíbrio para um átomo de n níveis usando a rotina *temden* do pacote *nebular* do STSDAS/IRAF (Shaw; Dufour, 1995). Determinamos T_e através das razões [O III] $[I(\lambda 4959) + I(\lambda 5007)] / I(\lambda 4363)$ e [N II] $[I(\lambda 6548) + I(\lambda 6584)] / I(\lambda 5755)$, e N_e a partir das razões [S II] $I(\lambda 6717) / I(\lambda 6731)$ e [Ar IV] $I(\lambda 4711) / I(\lambda 4740)$. Detectamos

Tabela 3.2: Razões de intensidades de linhas para diagnóstico da temperatura eletrônica e potenciais de ionização (PI)

Íon X^i	Config.	Razão	P.I. (eV)	
			X^{i-1}	X^i
S II	p^3	$[I(\lambda 6717) + I(\lambda 6731)] / [I(\lambda 4068) + I(\lambda 4076)]$	10,4	23,3
O II	p^3	$[I(\lambda 3726 + I(\lambda 3729))] / [I(\lambda 7320) + I(\lambda 7330)]$	13,6	35,1
N II	p^2	$[I(\lambda 6548 + I(\lambda 6583))] / I(\lambda 5755)$	14,5	29,6
S III	p^2	$[I(\lambda 9069 + I(\lambda 9532))] / I(\lambda 6312)$	23,3	34,8
O III	p^2	$[I(\lambda 4959 + I(\lambda 5007))] / I(\lambda 4363)$	35,1	54,9

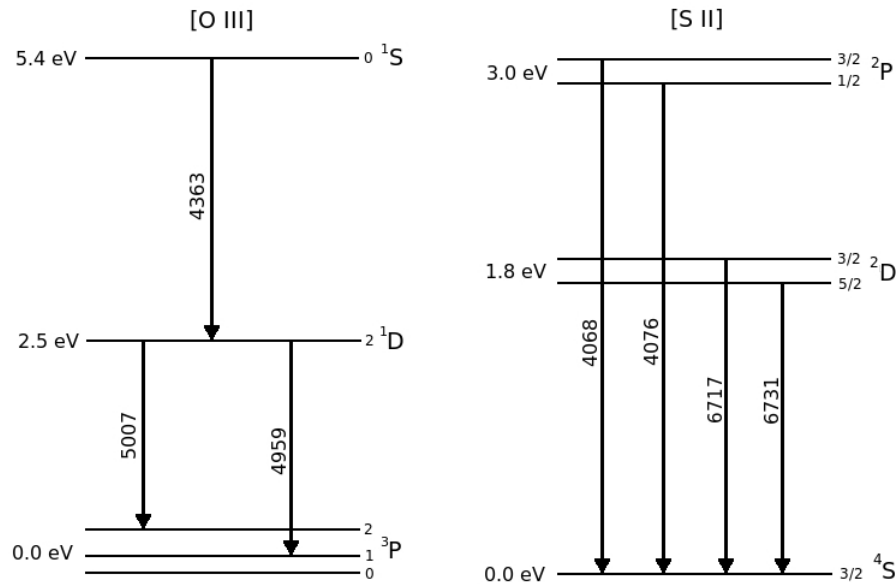


Figura 3.1: Diagramas de níveis de energia para [O III] e [S II].

fracamente as linhas do duplete [Cl III] em algumas aberturas, mas não as usamos como sensor de densidade devido aos grandes erros associados.

O sensor [O III] $[(I(\lambda 4959) + I(\lambda 5007))] / I(\lambda 4363)$ é praticamente independente da densidade assumida. Assim, derivamos as temperaturas eletrônicas via razão de linhas do [O III], $T_e(\text{O III})$, assumindo uma densidade constante de 1000 cm^{-3} . As densidades eletrônicas via razão de linhas do [Ar IV] $I(\lambda 4711) / I(\lambda 4740)$, $N_e(\text{Ar IV})$, foram obtidas assumindo uma temperatura eletrônica constante de 15000 K. Uma vez que as linhas He I $\lambda 4713$ e [Ar IV] $\lambda 4711$ não foram resolvidas, a contribuição da linha He I $\lambda 4713$ no fluxo medido de [Ar IV] $\lambda 4711$ foi estimada como sendo um décimo da intensidade da linha He I $\lambda 4471$ (Benjamin; Skillman; Smits, 1999).

Para a faixa de altas densidades encontradas na região central, a temperatura eletrônica derivada via razão de linhas do [N II], $T_e(\text{N II})$, mostrou uma dependência sig-

nificativa com relação à densidade assumida. Tendo em vista isso, adotamos o seguinte procedimento: calculamos as densidades eletrônicas via razão de linhas do [S II], $N_e(\text{S II})$, assumindo uma temperatura eletrônica inicial de 10000 K; então, os valores de densidade obtidos foram usados para estimar $T_e(\text{N II})$, cada abertura com seu respectivo valor; iteramos estas estimativas até a convergência, que foi observada após a quinta interação, para obter os valores finais de $N_e(\text{S II})$ and $T_e(\text{N II})$.

Os erros nas intensidades de linhas foram propagados para as razões, e posteriormente para as propriedades estimadas. Para tanto, utilizamos as equações a seguir (obtidas através da equação 2.3):

$$\sigma_{\text{SII}} = \frac{I(\lambda 6717)}{I(\lambda 6731)} \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\lambda 6717}}{I(\lambda 6717)}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\lambda 6731}}{I(\lambda 6731)}\right)^2} \quad (3.2)$$

$$\sigma_{\text{ArIV}} = \frac{I(\lambda 4711)}{I(\lambda 4740)} \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\lambda 4711}}{I(\lambda 4711)}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\lambda 4740}}{I(\lambda 4740)}\right)^2} \quad (3.3)$$

$$\sigma_{\text{OIII}} = \frac{I(\lambda 4959) + I(\lambda 5007)}{I(\lambda 4363)} \sqrt{\left[\frac{(\sigma_{\lambda 4959}^2 + \sigma_{\lambda 5007}^2)^{1/2}}{I(\lambda 4959) + I(\lambda 5007)}\right]^2 + \left(\frac{\sigma_{\lambda 4363}}{I(\lambda 4363)}\right)^2} \quad (3.4)$$

$$\sigma_{\text{NII}} = \frac{I(\lambda 6548) + I(\lambda 6583)}{I(\lambda 5755)} \sqrt{\left[\frac{(\sigma_{\lambda 6548}^2 + \sigma_{\lambda 6583}^2)^{1/2}}{I(\lambda 6548) + I(\lambda 6583)}\right]^2 + \left(\frac{\sigma_{\lambda 5755}}{I(\lambda 5755)}\right)^2} \quad (3.5)$$

Obtivemos estatísticas das condições físicas estimadas ao longo de posições de fenda individuais e para todas as seções nebulares consideradas nos mapas. Os valores médios ponderados pelo fluxo em $\text{H}\beta$ e os desvios padrão foram estimados utilizando, respectivamente, as equações (Oliveira, 2010):

$$\bar{x} = \frac{\sum \omega_i x_i}{\sum \omega_i} \quad (3.6)$$

e

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum \omega_i (x_i - \bar{x})^2}{\sum \omega_i} \frac{N}{N-1}}, \quad (3.7)$$

onde x_i é uma medida, ω_i é seu respectivo peso estatístico e N é o número de total de medidas consideradas. Assim, em nossas estatísticas, x_i são as medidas de densidade e ω_i é o fluxo em $\text{H}\beta$ em cada abertura.

3.2 Flutuações de temperatura eletrônica

Uma estimativa direta de t^2 ao longo da linha de visada não pode ser determinada. Estimativas indiretas têm sido obtidas assumindo que as diferenças entre as abundâncias derivadas via linhas proibidas e linhas de recombinação são devido à presença de tais variações de temperatura. Como vimos na Seção 1.1.5, em NPs, estas estimativas levam a altas flutuações. Como as linhas de recombinação são $10^3 - 10^4$ vezes mais fracas que as linhas proibidas, essas não foram detectadas em nossos espectros e tal análise não pode ser realizada.

Entretanto, uma estimativa discreta de t^2 no plano do céu pode ser realizada através das medidas ponto-a-ponto da temperatura ao longo da nebulosa, como um limite inferior para t^2 , usando a expressão proposta por Liu (1998). Ele definiu um parâmetro de flutuação de temperatura superficial, t_s^2 , dado por

$$t_s^2 = \frac{\sum (T_{e_i} - \bar{T})^2 F_i(\text{H}\beta)}{\bar{T}^2 \sum F_i(\text{H}\beta)}, \quad (3.8)$$

onde T_{e_i} e $F_i(\text{H}\beta)$ são a temperatura eletrônica média ao longo da linha de visada e o fluxo em $\text{H}\beta$ que atravessa a i -ésima abertura, respectivamente, e \bar{T} é a temperatura eletrônica média, sendo o somatório sobre todas as aberturas consideradas.

Como parte das flutuações são devido aos erros, estimamos também os erros médios quadráticos das medidas t_{er}^2 . Com eles, as flutuações observadas t_{obs}^2 , calculadas a partir da equação 3.8, foram corrigidas. A estimativa final de t_s^2 foi então obtida como:

$$t_s^2 = t_s^2(\text{obs}) - t_{\text{er}}^2 \quad (3.9)$$

3.3 Abundâncias iônicas

A partir de medidas de intensidades relativas de linhas de emissão, podemos derivar as abundâncias de íons observáveis em nebulosas (Osterbrock; Ferland, 2006). A intensidade observada I_{lm} de uma linha de recombinação emitida por um íon X^i , onde i é o grau de ionização, é dada pela integral

$$I_{\text{lm}} = \int j_{\text{lm}} dS = \int N(X^i) N_e \epsilon_{\text{lm}}(T_e) dS, \quad (3.10)$$

onde j_{lm} é o coeficiente de emissão e $\epsilon_{\text{lm}}(T_e)$ é a emissividade. Estas são relacionadas por

$$\epsilon_{\text{lm}} = \frac{4\pi j_{\text{lm}}}{N_e N(X^i)} = h(\nu_{\text{m}} - \nu_{\text{l}}) \alpha_{\text{lm}}^{\text{eff}}, \quad (3.11)$$

onde N_e é a densidade de elétrons na nebulosa, $N(X^i)$ é a abundância do íon (em número de íons por unidade de volume), $h(\nu_m - \nu_l)$ é a diferença de energia entre o nível m e l e α_{lm}^{eff} é o coeficiente de recombinação efetivo.

Para linhas excitadas colisionalmente, temos

$$I_{lm} = \frac{1}{4\pi} \int N(X^i) N_e h(\nu_m - \nu_l) q_{lm}(T_e) b dS, \quad (3.12)$$

sendo que b é o fator de desvio do equilíbrio termodinâmico (no equilíbrio termodinâmico $b = 1$), dS é o elemento diferencial de distância ao longo da linha de visada e q_{lm} é a taxa de excitação colisional de elétrons do nível l para o m , sendo

$$q_{lm} \propto \frac{\exp[-h(\nu_m - \nu_l)/kT_e]}{T_e^{1/2}}, \quad (3.13)$$

onde k é a constante de Boltzmann. Assim, vemos que a intensidade de linhas excitadas colisionalmente depende exponencialmente da temperatura. Já para as linhas de recombinação, as emissividades podem ser ajustadas como $\epsilon_{lm} \propto T_e^{-m}$, com $m \approx 1$, para uma faixa de valores de temperatura. Portanto, suas intensidades são essencialmente independentes da temperatura eletrônica.

Agora, considerando $N(X^i)$ e N_e constantes ao longo da linha de visada e integrando a Equação 3.12, obtemos uma expressão dependente de S para I_{lm} . Geralmente, as intensidades de linhas são normalizadas em relação à linha $H\beta$ para eliminar essa dependência em S . A intensidade de uma linha excitada colisionalmente I_{lm} em relação à $H\beta$ será então dada por

$$\frac{I_{lm}}{I(H\beta)} = \frac{N(X^i) h(\nu_m - \nu_l) q_{lm}(T_e) b}{N(H^+) \epsilon_{H\beta}}, \quad (3.14)$$

sendo $\epsilon_{H\beta}$ a emissividade da linha do hidrogênio $H\beta$, correspondente à transição radiativa do nível 4 para o 2. Reescrevendo a equação anterior, obtemos a abundância do íon X^i relativa a do H^+ como

$$\frac{X^i}{H^+} = \frac{I_{lm}}{I(H\beta)} \frac{\epsilon_{H\beta}}{h(\nu_m - \nu_l) q_{lm}(T_e) b}. \quad (3.15)$$

Derivamos as abundâncias iônicas de N^+ , O^+ , O^{2+} , S^+ and Ar^{3+} a partir de linhas excitadas colisionalmente usando a tarefa *ionic* do pacote *nebular* do IRAF. Como estas linhas de emissão têm uma dependência exponencial com a temperatura, valores apropriados devem ser assumidos para calcular a abundância de um determinado íon. Já a dependência destas estimativas com relação à densidade é praticamente insignificante. Assim, adotamos os seguintes procedimentos para derivação das abundâncias iônicas: os mapas de $T_e(\text{NII})$ e $N_e(\text{SII})$ foram assumidos para íons com baixo potencial de ionização (N^+ , O^+ e S^+), e os mapas de $T_e(\text{OIII})$ e $N_e(\text{ArIV})$ para íons com alto potencial

de ionização (O^{2+} , Ne^{2+} e Ar^{3+}). Para pixels nos quais as linhas foram medidas e não havia o respectivo valor de temperatura e/ou densidade, assumimos o seguinte: o valor médio de temperatura ponderado pelo fluxo em $H\beta$; e, para a densidade, o valor encontrado para Q1 (limite dos 25% menores valores de densidade) por tratarem-se de pixels de regiões mais externas.

Para o cálculo das abundâncias de He^+ , utilizamos as emissividades tabeladas por Porter et al. (2005). Porter, Ferland e MacAdam (2007) forneceram uma parametrização para estas emissividades em função da temperatura, dada por

$$\varepsilon_\lambda = \frac{4\pi j_\lambda}{N_e N_{He^+}} = \left[a + b(\ln T_e)^2 + c \ln T_e + \frac{d}{\ln T_e} \right] T_e^{-1} \times 10^{-25}, \quad (3.16)$$

em unidades de $\text{ergs cm}^{-3} \text{s}^{-1}$.

Os parâmetros para o ajuste são tabelados e, para $\lambda 5876$, são

$$a = 2,0620 \times 10^5$$

$$b = 1,7479 \times 10^2$$

$$c = -1,3548 \times 10^4$$

$$d = -7,3492 \times 10^5$$

A emissividade da linha $H\beta$, também necessária para o cálculo das abundâncias relativas de He, foi obtida a partir da parametrização publicada por Aver, Olive e Skillman (2010) (cedida por R. L. Porter através de comunicação privada). Esta é dada por

$$\varepsilon(H\beta) = \left[-2,6584 \times 10^5 - 1420,9(\ln T_e)^2 + 35546 \ln T_e + \frac{6,5669 \times 10^5}{\ln T_e} \right] T_e^{-1} \times 10^{-25}, \quad (3.17)$$

em unidades de $\text{ergs cm}^{-3} \text{s}^{-1}$.

O fluxo total de uma linha do He^+ não é gerado unicamente pelo processo de recombinação, mas também pela desexcitação do He colisionalmente excitado. As contribuições colisionais para a emissividade do He I foram estimadas através da parametrização fornecida por Porter, Ferland e MacAdam (2007), dada pela equação

$$\frac{C}{R} = \left(1 + \frac{3552 t_4^{-0,55}}{N_e} \right)^{-1} \sum_i a_i t_4^{b_i} \exp\left(\frac{c_i}{t_4}\right), \quad (3.18)$$

onde $t_4 = T_e/10000$, e i é um índice que varia de 1 ao número de termos usados no ajuste. Os coeficientes a_i , b_i e c_i para linhas emitidas a partir de nível superior $3d^3D$, caso de $\lambda 5876$, são apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Parâmetros de ajuste para as contribuições colisionais relativas, C/R , para emissividades de linhas com nível superior $3d^3D$ obtidas de Porter, Ferland e MacAdam (2007)

i	a_i	b_i	c_i
1	6,7937	-0,1116	-3,7761
2	0,1808	-0,8306	-4,5122
3	1,3478	-0,4017	-4,5459
4	0,4792	-0,4062	-4,9012
5	0,2950	-0,8224	-4,9013

Desse modo, a abundância final de He^+ relativa a do H^+ é calculada por

$$\frac{\text{He}^+}{\text{H}^+} = \frac{I(\lambda 5876)}{I(\text{H}\beta)} \frac{\varepsilon(\text{H}\beta)}{\varepsilon(\lambda 5876)} \left(1 + \frac{C}{R}\right)^{-1} \quad (3.19)$$

A abundância de He^{2+} foi obtida a partir das intensidades relativas da linha $\lambda 4686$. As emissividades de $\lambda 4686$ foram retiradas dos valores tabelados por Storey e Hummer (1995a, 1995b) e são apresentadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Emissividades de $\lambda 4686$ obtidas de Storey e Hummer (1995b) (em unidades de $10^{-25} \text{ ergs cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$)

T_e (K)	$N_e = 10^2 \text{ cm}^{-3}$	$N_e = 10^3 \text{ cm}^{-3}$	$N_e = 10^4 \text{ cm}^{-3}$
12500	12,03	11,98	11,89
15000	9,932	9,891	9,822
20000	7,292	7,266	7,224
30000	4,661	4,649	4,628

A abundância de relativa de He^{2+} foi então calculada como

$$\frac{\text{He}^{2+}}{\text{H}^+} = \frac{I(\lambda 4686)}{I(\text{H}\beta)} \frac{\varepsilon(\text{H}\beta)}{\varepsilon(\lambda 4686)}, \quad (3.20)$$

com $\varepsilon(\text{H}\beta)$ dada pela Equação 3.17.

Os erros nas abundâncias iônicas foram estimados propagando os erros das razões de linhas e das respectivas temperaturas adotadas.

3.4 Abundâncias elementais

A abundância total de um elemento qualquer $N(X)$ é obtida somando-se as abundâncias dos íons desse elemento em todos os estágios de ionização. Como geralmente não é possível encontrar linhas na faixa espectral que estamos trabalhando de todos os estágios de ionização de um elemento, utilizamos fatores de correção de ionização (ICFs, do termo em inglês *ionization correction factor*). Estes são obtidos através de modelos de fotoionização ou estimados com base nos potenciais de ionização dos íons e são encontrados na literatura. Assim, a abundância total será dada por

$$\frac{X}{H} = \sum_{i>1} \frac{X^i}{H^+} = \text{ICF}_{\text{Íons não observados}} \times \sum_{\text{Íons observados}} \frac{X^i}{H^+}. \quad (3.21)$$

As abundâncias elementais foram calculadas a partir dos ICFs obtidos por Kingsburgh e Barlow (1994), que dependem da abundância do hélio, e são dados a seguir:

Hélio

$$\frac{\text{He}}{H} = \frac{\text{He}^+ + \text{He}^{2+}}{H^+} \quad (3.22)$$

Oxigênio

$$\frac{O}{H} = \text{ICF}(O) \left(\frac{O^+ + O^{2+}}{H^+} \right) \quad (3.23)$$

$$\text{ICF}(O) = \left(\frac{\text{He}^+ + \text{He}^{2+}}{\text{He}^+} \right)^{2/3} \quad (3.24)$$

Nitrogênio

$$\frac{N}{H} = \text{ICF}(N) \frac{N^+}{H^+} \quad (3.25)$$

$$\text{ICF}(N) = \frac{O}{O^+} \quad (3.26)$$

Neônio

$$\frac{\text{Ne}}{H} = \text{ICF}(\text{Ne}) \frac{\text{Ne}^{2+}}{H^+} \quad (3.27)$$

$$\text{ICF}(\text{Ne}) = \frac{O}{O^{2+}} \quad (3.28)$$

Enxofre

$$\frac{S}{H} = \text{ICF}(S) \frac{S^+ + S^{2+}}{H^+} \quad (3.29)$$

$$\frac{S^{2+}}{S^+} = 4,677 + \left(\frac{O^{2+}}{O^+} \right)^{0,433} \quad (3.30)$$

$$\text{ICF}(S) = \left[1 - \left(1 - \frac{O^+}{O} \right)^3 \right]^{-1/3} \quad (3.31)$$

Argônio

$$\frac{Ar}{H} = \text{ICF}(Ar) \frac{Ar^{3+}}{H^+} \quad (3.32)$$

$$\text{ICF}(Ar) = \frac{Ne}{Ne^{2+}} \quad (3.33)$$

A partir dos métodos descritos neste capítulo, mapeamos as propriedades físicas e químicas de NGC 6302 e NGC 2440. Os resultados de cada objetos serão apresentados e discutidos nos dois capítulos a seguir.

4 MAPEAMENTO ESPECTROSCÓPICO DE NGC 6302

Mapas de fluxos de linhas de emissão, de razões de intensidades de linhas e de propriedades físicas e químicas de NGC 6302 foram construídos com uma resolução espacial de aproximadamente $1,45'' \times 1,00''$. Para uma análise detalhada, perfis espaciais foram também construídos. Análises estatísticas foram realizadas e os resultados obtidos foram comparados com os já existentes na literatura.

As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam os mapas dos fluxos de $H\alpha$, $H\beta$, He I $\lambda 5876$, He II $\lambda 4686$, [N II] $\lambda 6584$, [S II] $\lambda 6717$, [O II] $\lambda 3727$, [O III] $\lambda 5007$, [Ne III] $\lambda 3869$ e [Ar IV] $\lambda 4740$ obtidos em escala logarítmica. Em cada um deles, a escala dos eixos horizontal e vertical, em segundos de arco, é relativa à posição da estrela central.

Nos espectros integrados, 144 linhas de emissão foram medidas e identificadas. A lista com cada uma delas e seus respectivos fluxos é apresentada nas colunas (1) e (3), respectivamente, da Tabela 4.1. Todos os fluxos estão em uma escala onde $F(H\beta) = 100$. Na coluna (2) é apresentado o valor da função de avermelhamento $f(\lambda)$.

4.1 Extinção

O coeficiente de avermelhamento $c(H\beta)$ foi estimado pela comparação das razões $H\alpha/H\beta$ e $H\gamma/H\beta$ medidas em cada abertura com os valores teóricos de Storey e Hummer (1995b) para $T_e = 10000$ K e $N_e = 1000$ cm⁻³. A correção por extinção foi feita assumindo o valor de $c(H\beta)$ correspondente à abertura no mapa conforme a equação 2.4.

Como pode ser visto no mapa de $H\alpha/H\beta$, apresentado na Figura 4.2, a quantidade de poeira na nebulosa é aproximadamente constante nos lóbulos, mas uma quantidade muito maior é observada no toro circum-estelar. O maior valor de $c(H\beta)$ foi de 1,693, encontrado em uma abertura localizada aproximadamente $6''$ O da posição da estrela central em $\Delta\delta = 0''$. De fato, a região de mais alta extinção aparece deslocada do centro e valores levemente maiores são encontrados na direção do toro para o lóbulo ao Oeste. Isto é consistente com o fato de que o toro não é visto exatamente de frente (*edge-on*), mas com uma pequena inclinação de aproximadamente 15° (Meaburn et al., 2005; Dinh-V-Trung et al., 2008).

Os valores de $c(H\beta)$ obtidos estão de acordo com os determinados por Tsamis et al. (2003), Groves et al. (2002) e Bohigas (1994) (1,44; 1,2; 1,69, respectivamente), mas são mais baixos que os estimados por Matsuura et al. (2005). Eles atribuem os valores mais altos à maior resolução das imagens do HST. Já a discrepância entre os mapas de extinção por eles obtidos das razões $Br\alpha/H\beta$ e $H\alpha/H\beta$ é atribuída à presença de

grãos de poeira maiores ou à uma camada de poeira entre as estruturas ionizadas, visível somente no infravermelho ou rádio (Milne; Aller, 1975; Ashley; Hyland, 1988; Ashley, 1990).

Para corrigir os efeitos de avermelhamento nos fluxos medidos nos espectros integrados, obtivemos $c(H\beta) = 0,801 \pm 0,002$ e $c(H\alpha) = 1,067 \pm 0,003$, respectivamente, das razões $H\gamma/H\beta$ e $H\alpha/H\beta$. Os fluxos corrigidos são apresentados na coluna (4) da Tabela 4.1. Todos são relativos à $I(H\beta) = 100$.

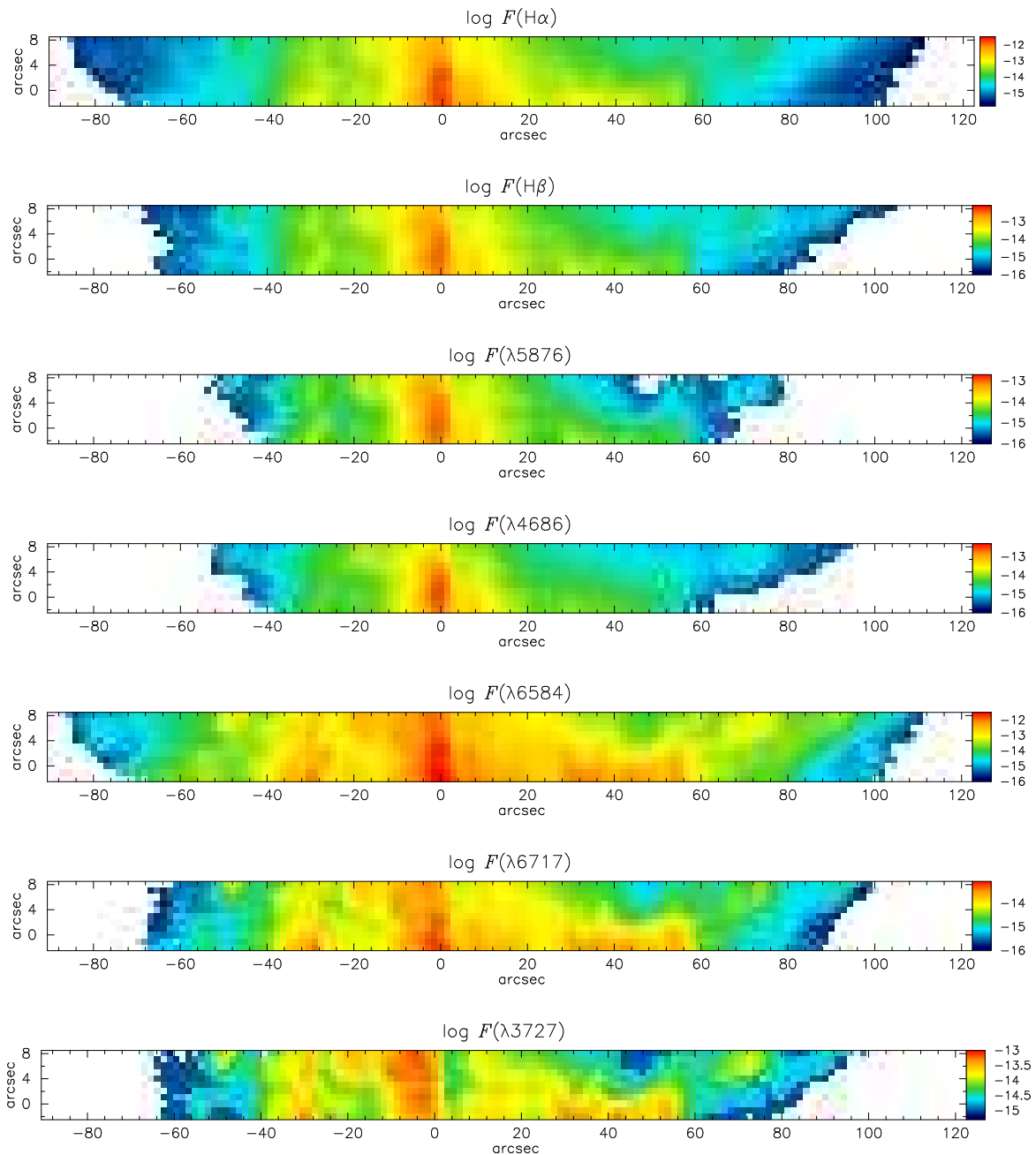


Figura 4.1: Mapas dos fluxos de $H\alpha$, $H\beta$, $He I \lambda 5876$ e $He II \lambda 4686$, $[N II] \lambda 6584$, $[S II] \lambda 6717$, $[O II] \lambda 3727$ em unidades de $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ e em escala logarítmica. Norte é para cima, Leste para esquerda.

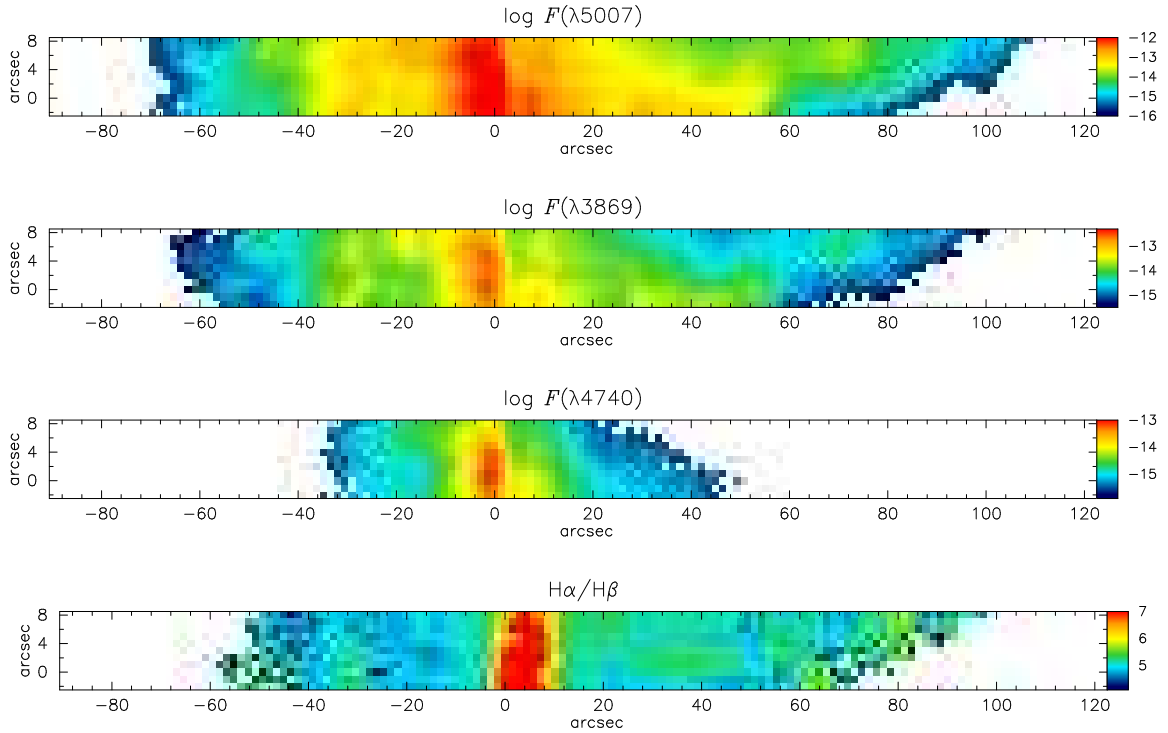


Figura 4.2: NGC 6302 - Mapas dos fluxos de [O III] $\lambda 5007$, [Ne III] $\lambda 3869$, [Ar IV] $\lambda 4740$ em unidades de $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ e em escala logarítmica, e da razão $\text{H}\alpha/\text{H}\beta$. Norte é para cima, Leste para esquerda.

4.2 Temperatura e densidade eletrônicas

Os mapas de $N_e(\text{SII})$, $N_e(\text{ArIV})$, $T_e(\text{NII})$ e $T_e(\text{OIII})$ obtidos para NGC 6302 são apresentados na Figura 4.3. Perfis espaciais ao longo das posições de fenda dos fluxos em $\text{H}\beta$ e das densidades e temperaturas eletrônicas são apresentados nas Figuras B.1 a B.11. Em todos, a estrela central encontra-se em $\Delta\delta = 4''$ S (declinação em relação à estrela de referência) na posição $0''$.

Apresentamos algumas estatísticas com relação aos valores estimados de densidade e temperatura eletrônicas nas Tabelas 4.2 e 4.3. Nelas são apresentados os valores médios e desvios padrão (σ) ponderados pelo fluxo em $\text{H}\beta$, os valores mínimos (Mín) e máximos (Máx), os primeiros quartis (Q_1 , que corresponde ao limite dos 25% valores menores da amostra), os segundos quartis (Q_2 ou mediana) e os terceiros quartis (Q_3 , que corresponde ao limite dos 75% valores menores da amostra) para cada posição de fenda e para todas as seções nebulares dos mapas.

Os perfis de densidade obtidos para NGC 6302 mostram picos na região central da nebulosa, decrescendo para regiões mais externas, mas os mapas e perfis de $N_e(\text{SII})$ e $N_e(\text{ArIV})$ mostram características distintas. De fato, em uma nebulosa com estrutura estratificada em ionização, a razão de linhas do [S II] é um sensor de densidade das zonas de baixa ionização, correspondendo as regiões mais externas da nebulosa, enquanto a razão de linhas do [Ar IV] é um indicador para as partes mais internas, por possuir potencial de ionização mais elevado.

Tabela 4.1: Intensidades de linhas relativas observadas $F(\lambda)$ e corrigidas por avermelhamento $I(\lambda)$, em uma escala onde $F(H\beta) = 100$, e respectivo valor da função de avermelhamento de $f(\lambda)$

Linha (1)	$f(\lambda)$ (2)	$F(\lambda)$ (3)	$I(\lambda)$ (4)
He I λ 3554	0,318	$0,38 \pm 0,01$	$0,69 \pm 0,02$
He I + [Fe VII] λ 3587	0,310	$0,62 \pm 0,03$	$1,09 \pm 0,04$
He I λ 3614	0,303	$0,40 \pm 0,01$	$0,71 \pm 0,02$
He I λ 3634	0,298	$0,66 \pm 0,03$	$1,14 \pm 0,04$
H17 λ 3698	0,282	$0,41 \pm 0,01$	$0,69 \pm 0,02$
H16 + He I λ 3704	0,280	$0,72 \pm 0,03$	$1,20 \pm 0,05$
H15 λ 3712	0,278	$0,76 \pm 0,02$	$1,27 \pm 0,04$
[O II] λ 3727	0,275	$55,5 \pm 0,1$	$92,0 \pm 0,3$
H12 λ 3750	0,269	$1,50 \pm 0,03$	$2,47 \pm 0,05$
[Fe VII] + O III λ 3759	0,267	$2,18 \pm 0,04$	$3,56 \pm 0,06$
H11 λ 3770	0,264	$1,95 \pm 0,02$	$3,17 \pm 0,03$
He I λ 3782	0,262	$0,64 \pm 0,02$	$1,04 \pm 0,04$
H10 λ 3798	0,258	$2,60 \pm 0,01$	$4,17 \pm 0,02$
He II λ 3813	0,255	$0,26 \pm 0,01$	$0,41 \pm 0,02$
He I λ 3820	0,253	$1,02 \pm 0,01$	$1,62 \pm 0,02$
H9 λ 3835	0,249	$4,02 \pm 0,01$	$6,36 \pm 0,02$
[Ne III] λ 3869	0,242	$98,28 \pm 0,05$	$153,4 \pm 0,2$
He I + H8 λ 3889	0,237	$14,71 \pm 0,01$	$22,77 \pm 0,03$
He II λ 3923	0,229	$0,77 \pm 0,03$	$1,17 \pm 0,04$
[Ne III] + H7 λ 3968	0,220	$45,78 \pm 0,02$	$68,66 \pm 0,07$
He I λ 4009	0,211	$0,347 \pm 0,009$	$0,51 \pm 0,01$
He I λ 4026	0,207	$2,92 \pm 0,01$	$4,28 \pm 0,02$
[S II] λ 4069	0,198	$9,06 \pm 0,02$	$13,05 \pm 0,03$
[S II] λ 4076	0,196	$3,04 \pm 0,01$	$4,37 \pm 0,02$
H δ λ 4101	0,191	$19,85 \pm 0,02$	$28,21 \pm 0,04$
He I + [K V] λ 4121	0,187	$0,64 \pm 0,01$	$0,91 \pm 0,02$
He I λ 4144	0,182	$0,730 \pm 0,006$	$1,021 \pm 0,008$
[K V] λ 4163	0,178	$0,47 \pm 0,01$	$0,65 \pm 0,02$
He I + O II λ 4169	0,177	$0,060 \pm 0,002$	$0,084 \pm 0,004$
He I λ 4200	0,170	$1,14 \pm 0,02$	$1,55 \pm 0,03$
N II + Fe V λ 4228	0,165	$0,73 \pm 0,02$	$0,99 \pm 0,02$
C II λ 4267	0,157	$0,45 \pm 0,01$	$0,60 \pm 0,01$
O II λ 4317	0,147	$0,697 \pm 0,006$	$0,914 \pm 0,008$
H γ λ 4340	0,143	$35,97 \pm 0,02$	$46,79 \pm 0,04$
[O III] λ 4363	0,138	$28,34 \pm 0,02$	$36,56 \pm 0,03$
Ne II + N III λ 4379	0,136	$0,49 \pm 0,01$	$0,62 \pm 0,01$
He I λ 4388	0,134	$0,84 \pm 0,01$	$1,08 \pm 0,01$
O II λ 4415	0,127	$0,096 \pm 0,004$	$0,121 \pm 0,006$
He I λ 4438	0,120	$0,091 \pm 0,003$	$0,114 \pm 0,004$

Tabela 4.1: Continuação

Linha (1)	$f(\lambda)$ (2)	$F(\lambda)$ (3)	$I(\lambda)$ (4)
He I $\lambda 4471$	0,110	$5,63 \pm 0,01$	$6,89 \pm 0,02$
He II $\lambda 4541$	0,089	$2,07 \pm 0,01$	$2,43 \pm 0,01$
Mg I] $\lambda 4571$	0,080	$0,47 \pm 0,01$	$0,55 \pm 0,01$
[Fe III] + N II $\lambda 4606$	0,070	$0,902 \pm 0,008$	$1,026 \pm 0,009$
[Ar V] $\lambda 4625$	0,064	$0,320 \pm 0,009$	$0,36 \pm 0,01$
N III $\lambda 4634$	0,062	$2,099 \pm 0,009$	$2,35 \pm 0,01$
N III + O II $\lambda 4641$	0,060	$4,433 \pm 0,009$	$4,95 \pm 0,01$
[Fe III] + C IV $\lambda 4658$	0,055	$0,957 \pm 0,007$	$1,059 \pm 0,008$
He II $\lambda 4686$	0,047	$57,16 \pm 0,02$	$62,36 \pm 0,02$
Fe III or O II $\lambda 4686$	0,043	$0,43 \pm 0,02$	$0,47 \pm 0,02$
[Ar IV] + He I $\lambda 4712$	0,040	$13,28 \pm 0,02$	$14,29 \pm 0,02$
[Ne IV] $\lambda 4725$	0,036	$2,93 \pm 0,01$	$3,13 \pm 0,01$
[Ar IV] $\lambda 4740$	0,032	$15,40 \pm 0,02$	$16,34 \pm 0,02$
H β $\lambda 4861$	0,000	$100,00 \pm 0,04$	$100,00 \pm 0,04$
[Fe III] $\lambda 4881$	-0,005	$0,439 \pm 0,007$	$0,435 \pm 0,007$
[Fe VII] $\lambda 4893$	-0,008	$0,535 \pm 0,004$	$0,527 \pm 0,004$
He I $\lambda 4922$	-0,015	$1,976 \pm 0,005$	$1,920 \pm 0,005$
[O III] $\lambda 4932$	-0,018	$0,636 \pm 0,005$	$0,616 \pm 0,005$
[Fe VII] $\lambda 4943$	-0,021	$0,544 \pm 0,005$	$0,523 \pm 0,005$
[O III] $\lambda 4959$	-0,025	$466,9 \pm 0,3$	$446,1 \pm 0,3$
[Fe VI] $\lambda 4972$	-0,028	$0,149 \pm 0,003$	$0,142 \pm 0,003$
[Fe VII] $\lambda 4989$	-0,032	$0,351 \pm 0,008$	$0,331 \pm 0,008$
[O III] $\lambda 5007$	-0,037	$1433,4 \pm 0,6$	$1339,9 \pm 0,6$
Si II] $\lambda 5040$	-0,045	$1,58 \pm 0,03$	$1,45 \pm 0,02$
He I $\lambda 5048$	-0,047	$0,31 \pm 0,02$	$0,29 \pm 0,02$
Si II] $\lambda 5055$	-0,049	$0,86 \pm 0,02$	$0,79 \pm 0,02$
[Fe VI] $\lambda 5145$	-0,070	$0,66 \pm 0,02$	$0,58 \pm 0,02$
[Fe VII] $\lambda 5159$	-0,073	$0,78 \pm 0,02$	$0,68 \pm 0,02$
[Fe VI] $\lambda 5176$	-0,077	$0,57 \pm 0,01$	$0,50 \pm 0,01$
[N I] $\lambda 5200$	-0,082	$30,33 \pm 0,02$	$26,09 \pm 0,02$
[Fe II] $\lambda 5261$	-0,096	$0,266 \pm 0,006$	$0,223 \pm 0,005$
[Fe III] $\lambda 5270$	-0,098	$0,296 \pm 0,005$	$0,247 \pm 0,004$
[Fe VII] $\lambda 5276$	-0,099	$0,247 \pm 0,007$	$0,206 \pm 0,006$
[O VI] $\lambda 5291$	-0,102	$0,453 \pm 0,003$	$0,375 \pm 0,002$
[Ca V] $\lambda 5309$	-0,106	$0,655 \pm 0,005$	$0,538 \pm 0,004$
[Cl IV] $\lambda 5323$	-0,109	$0,327 \pm 0,003$	$0,267 \pm 0,003$
[Fe VI] $\lambda 5335$	-0,112	$0,470 \pm 0,005$	$0,383 \pm 0,004$
He II $\lambda 5412$	-0,128	$7,32 \pm 0,01$	$5,785 \pm 0,008$
[Fe VI] $\lambda 5424$	-0,131	$0,640 \pm 0,007$	$0,503 \pm 0,005$
[Ca VI] $\lambda 5461$	-0,138	$0,61 \pm 0,01$	$0,47 \pm 0,01$

Tabela 4.1: Continuação

Linha (1)	$f(\lambda)$ (2)	$F(\lambda)$ (3)	$I(\lambda)$ (4)
[Cl III] $\lambda 5517$	-0,149	1,366 \pm 0,007	1,038 \pm 0,005
[Cl III] $\lambda 5537$	-0,153	1,603 \pm 0,009	1,209 \pm 0,007
[O I] + Céu $\lambda 5577$	-0,160	4,43 \pm 0,02	3,30 \pm 0,01
O III $\lambda 5592$	-0,163	0,271 \pm 0,007	0,201 \pm 0,005
K VI $\lambda 5602$	-0,165	0,311 \pm 0,006	0,230 \pm 0,005
[Fe VI] $\lambda 5631$	-0,170	0,444 \pm 0,004	0,325 \pm 0,003
N II] $\lambda 5667$	-0,176	0,325 \pm 0,006	0,235 \pm 0,004
N II + [Fe VI] $\lambda 5679$	-0,178	0,531 \pm 0,004	0,383 \pm 0,002
[Fe VII] $\lambda 5720$	-0,185	1,252 \pm 0,007	0,890 \pm 0,005
[N II] $\lambda 5755$	-0,191	32,74 \pm 0,02	23,05 \pm 0,02
He I $\lambda 5876$	-0,210	32,96 \pm 0,04	22,37 \pm 0,03
He II + Céu $\lambda 5914$	-0,217	0,46 \pm 0,02	0,31 \pm 0,01
He II + Céu $\lambda 5932$	-0,219	0,50 \pm 0,01	0,336 \pm 0,007
He II + Céu $\lambda 5953$	-0,223	0,463 \pm 0,005	0,307 \pm 0,003
He II $\lambda 5977$	-0,226	0,647 \pm 0,004	0,427 \pm 0,003
He II $\lambda 6004$	-0,230	0,514 \pm 0,002	0,336 \pm 0,002
He II $\lambda 6037$	-0,235	0,645 \pm 0,005	0,418 \pm 0,003
He II $\lambda 6074$	-0,241	0,631 \pm 0,004	0,405 \pm 0,002
Fe VII $\lambda 6086$	-0,243	2,202 \pm 0,008	1,408 \pm 0,005
K IV $\lambda 6102$	-0,245	1,510 \pm 0,005	0,961 \pm 0,003
He II $\lambda 6118$	-0,247	0,679 \pm 0,003	0,430 \pm 0,002
He II $\lambda 6171$	-0,255	0,798 \pm 0,005	0,426 \pm 0,003
He II $\lambda 6234$	-0,264	1,79 \pm 0,02	0,934 \pm 0,009
[O I] + Céu $\lambda 6300$	-0,274	56,5 \pm 0,1	28,84 \pm 0,09
[S III] $\lambda 6312$	-0,275	11,24 \pm 0,03	5,71 \pm 0,02
Si II $\lambda 6347$	-0,280	0,71 \pm 0,02	0,35 \pm 0,01
[O I] + Céu $\lambda 6363$	-0,282	19,87 \pm 0,04	9,93 \pm 0,03
[Mn V] $\lambda 6394$	-0,286	0,328 \pm 0,003	0,162 \pm 0,002
He II $\lambda 6406$	-0,288	0,745 \pm 0,005	0,367 \pm 0,003
[Ar V] $\lambda 6435$	-0,292	8,22 \pm 0,02	4,01 \pm 0,01
He II + [N II] $\lambda 6527$	-0,304	0,99 \pm 0,08	0,47 \pm 0,04
[N II] $\lambda 6548$	-0,307	528 \pm 1	248,6 \pm 0,7
H α $\lambda 6563$	-0,309	610 \pm 1	285,9 \pm 0,8
[N II] $\lambda 6583$	-0,311	1636 \pm 3	761 \pm 2
[S II] $\lambda 6717$	-0,328	55,5 \pm 0,2	24,81 \pm 0,09
[S II] $\lambda 6731$	-0,330	81,5 \pm 0,2	36,28 \pm 0,11
[K IV] $\lambda 6795$	-0,337	0,824 \pm 0,008	0,360 \pm 0,004
[Mn II] $\lambda 6850$?	-0,344	1,23 \pm 0,04	0,53 \pm 0,02
He II $\lambda 6891$	-0,349	2,21 \pm 0,05	0,94 \pm 0,02
[Ar V] $\lambda 7005$	-0,362	21,76 \pm 0,05	8,94 \pm 0,03

Tabela 4.1: Continuação

Linha (1)	$f(\lambda)$ (2)	$F(\lambda)$ (3)	$I(\lambda)$ (4)
He I λ 7065	-0,371	22,57 \pm 0,05	9,08 \pm 0,03
[Ar III] λ 7136	-0,381	77,0 \pm 0,1	30,21 \pm 0,09
[Fe II] λ 7155	-0,383	0,51 \pm 0,02	0,199 \pm 0,007
[Ar IV] λ 7171	-0,386	4,81 \pm 0,02	1,866 \pm 0,009
[Ar IV] λ 7263	-0,398	2,73 \pm 0,01	1,026 \pm 0,006
He I λ 7298	-0,403	0,39 \pm 0,04	0,14 \pm 0,02
[O II] λ 7319	-0,405	26,06 \pm 0,05	9,62 \pm 0,03
[O II] λ 7330	-0,407	20,23 \pm 0,08	7,45 \pm 0,04
[Fe II] λ 7453	-0,423	1,70 \pm 0,01	0,603 \pm 0,004
He II + C IV λ 7593	-0,440	5,15 \pm 0,06	1,75 \pm 0,02
C IV] λ 7737 ?	-0,457	1,81 \pm 0,03	0,59 \pm 0,01
[Ar III] λ 7751	-0,459	23,31 \pm 0,07	7,54 \pm 0,03
[Cl IV] λ 8046	-0,493	5,03 \pm 0,02	1,501 \pm 0,007
He II λ 8237	-0,513	4,78 \pm 0,02	1,357 \pm 0,008
H I P15 λ 8545	-0,544	2,728 \pm 0,009	0,717 \pm 0,003
[Cl II] λ 8578	-0,547	2,27 \pm 0,01	0,592 \pm 0,004
[Fe II] λ 8617	-0,551	1,40 \pm 0,05	0,36 \pm 0,01
H I P14 λ 8665	-0,555	3,47 \pm 0,09	0,89 \pm 0,02
N I λ 8680	-0,557	1,84 \pm 0,02	0,468 \pm 0,006
He II λ 8701	-0,559	0,34 \pm 0,02	0,087 \pm 0,004
[C I] λ 8727	-0,561	2,17 \pm 0,01	0,547 \pm 0,004
H I P12 λ 8750	-0,563	4,26 \pm 0,02	1,067 \pm 0,006

Para posições de 4''N até 0'', os picos de densidade para cada sensor são observados em diferentes posições, que aparecem deslocadas do fluxo máximo em H β . Para os perfis de 1'' S até 6'' S, os máximos coincidem, mas são também um pouco deslocados do fluxo máximo em H β . Os valores máximos de densidade foram observados na posição de fenda $\Delta\delta = 4''$ S, sendo $41630_{-4170}^{+5220} \text{cm}^{-3}$ e $31400_{-410}^{+420} \text{cm}^{-3}$ para $N_e(\text{SII})$ e $N_e(\text{ArIV})$, respectivamente. Estas densidades são aproximadamente duas vezes mais baixas que a utilizada pelo modelo de Wright et al. (2011) que forneceu o melhor ajuste aos dados observacionais de NGC 6302.

Nos lóbulos, uma densidade aproximadamente constante e inferior à 1000cm^{-3} é verificada nos perfis de $N_e(\text{SII})$. Inomogeniedades são observadas, correspondendo a caroços com densidades de 2000 a 3000cm^{-3} . Para estes componentes, Wright et al. (2011) também utilizaram densidades mais altas. Nos lóbulos, uma densidade constante de 2000cm^{-3} foi assumida no modelo, e inomogeniedades foram simuladas usando 5 a 50 caroços com densidades 1 a 3 vezes maiores.

Uma região interna, com densidades atingindo 20000cm^{-3} , pode ser observada no mapa de $N_e(\text{ArIV})$, estendendo-se até 20'' da estrela central em direção ao lóbulo

Leste. Esta região foi prevista no modelo de Wright et al. (2011) e chamada de região de *outflow*.

Os mapas e perfis de $T_e(\text{NII})$ e $T_e(\text{OIII})$ mostram diferentes variações ao longo da superfície nebulosa, principalmente devido à dependência das estimativas de $T_e(\text{NII})$ com relação às densidades assumidas. O valor médio ponderado pelo fluxo em $\text{H}\beta$ de $T_e(\text{NII})$ foi de 12304 K (dispersão de 8,49%) e os valores mais altos são observados nos limites externos da nebulosa. As estimativas de $T_e(\text{OIII})$ mostram valores mais altos que as de $T_e(\text{NII})$. Isto é esperado uma vez que O^{2+} está presente em uma zona de ionização mais alta que N^+ . O valor médio ponderado pelo fluxo em $\text{H}\beta$ de $T_e(\text{OIII})$ foi de 17390 K (dispersão de 6,66%).

Em seu modelo de fotoionização, Wright et al. (2011) encontrou uma temperatura eletrônica média sobre toda nebulosa de 12000 K, com uma média de 19400 K para os lóbulos e 3800 K para o disco circum-estelar. As temperaturas eletrônicas médias ponderadas pelos íons N^+ e O^{2+} encontradas pelo modelo foram 4817 K e 10912 K para o disco circum-estelar e para os lóbulos, 8478 K e 10358 K, respectivamente. Estes valores são mais baixos que os encontrados em nossos mapas.

Tsamis et al. (2003) e Krabbe e Copetti (2005) obtiveram valores médios de densidade e temperatura para posições de fenda ao centro da nebulosa, orientadas na direção Leste-Oeste. Tsamis et al. (2003) obtiveram $N_e(\text{SII}) = 12900 \text{ cm}^{-3}$ e $N_e(\text{ArIV}) = 14900 \text{ cm}^{-3}$, enquanto Krabbe e Copetti (2005) obtiveram densidade médias de $N_e(\text{SII}) =$

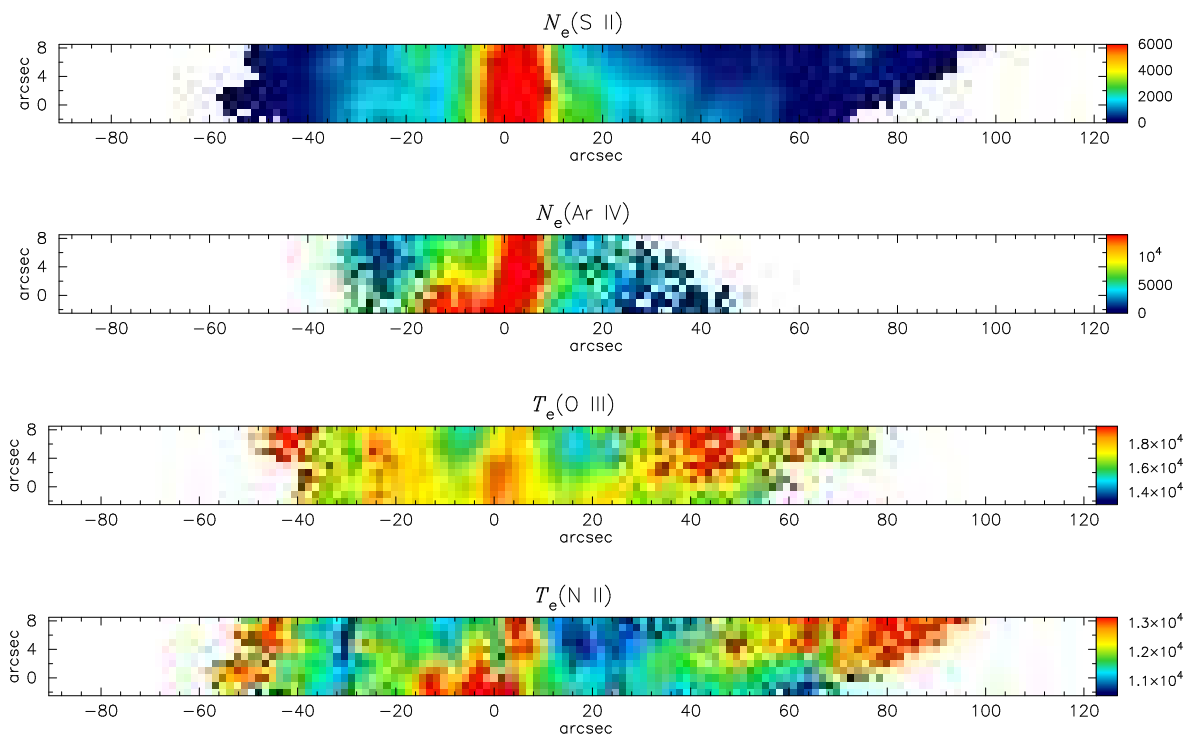


Figura 4.3: Mapas de $N_e(\text{SII})$ e $N_e(\text{ArIV})$ (em unidades de cm^{-3}), e mapas de $T_e(\text{NII})$ e $T_e(\text{OIII})$ (em unidades de K). Norte é para cima, Leste para esquerda.

Tabela 4.2: Estatísticas para as densidades eletrônicas de NGC 6302

$\Delta\delta$	Mín.	Q1	Q2	Q3	Máx.	Média	σ	N
$N_e(\text{SII}) \text{ (cm}^{-3}\text{)}$								
4'' N	101	363	586	1544	9148	3525	2445	103
3'' N	84	377	623	1631	12281	4263	3135	99
2'' N	157	407	723	1765	16250	5251	4246	100
1'' N	99	382	850	1769	21320	6928	6323	99
0''	107	422	910	1868	20188	7405	6495	96
1'' S	190	403	1032	1926	41634	14248	13523	94
2'' S	83	367	1013	2064	40297	16704	15369	97
3'' S	123	386	1103	2314	38812	15540	14450	95
4'' S	150	418	1235	2161	41634	16771	16163	93
5'' S	171	555	1325	2282	17501	8342	6599	87
6'' S	122	661	1308	2494	16533	7122	5736	84
Σ	83	393	963	1978	41634	10508	11534	1047
$N_e(\text{ArIV}) \text{ (cm}^{-3}\text{)}$								
4'' N	126	3503	4963	7437	22151	7768	4544	38
3'' N	555	4171	5891	8659	23543	8327	4243	42
2'' N	590	3403	5071	7222	18859	8174	3893	45
1'' N	502	3248	5291	7659	21659	8787	4395	45
0''	151	2740	4753	7734	21821	10150	5533	49
1'' S	616	2909	6261	9413	25567	13124	7163	50
2'' S	199	4140	7937	10362	28440	15325	8134	46
3'' S	670	3234	6219	11264	30718	16365	9243	48
4'' S	274	3029	5791	11746	31400	16524	9785	51
5'' S	135	2525	5692	13291	30320	15947	9348	46
6'' S	70	3276	5811	13161	30058	14937	9181	50
Σ	70	3056	5441	9750	31400	12983	8272	510

Mín: valor mínimo; Q1: limite dos 25% menores valores; Q2: mediana; Q3: limite dos 75% menores valores; Máx: valor máximo; Média: valor médio ponderado por $F(\text{H}\beta)$; σ : desvio padrão ponderado por $F(\text{H}\beta)$; N : número de aberturas.

6811 cm^{-3} e $N_e(\text{ArIV}) = 10238 \text{ cm}^{-3}$. Krabbe e Copetti (2005) encontraram valores médios de $T_e(\text{NII}) = 13798 \text{ K}$ e $T_e(\text{OIII}) = 18357 \text{ K}$, e valores muito próximos a estes foram também encontrados por Tsamis et al. (2003). Comparando-os com os valores médios das posições centrais nas Tabelas 4.2 e 4.3, vemos que as estimativas estão em boa concordância.

A partir das intensidades de linhas integradas presentes na Tabela 4.1, obtivemos $N_e(\text{SII}) = 2900 \text{ cm}^{-3}$ e $N_e(\text{ArIV}) = 8690 \text{ cm}^{-3}$, assumindo $T_e = 15000 \text{ K}$. Estas densidades, respectivamente, foram assumidas nos cálculos das temperaturas eletrônicas,

Tabela 4.3: Estatísticas para as temperaturas eletrônicas de NGC 6302

$\Delta\delta$	Mín.	Q1	Q2	Q3	Máx.	Média	σ	N
$T_e(\text{NII})$ (K)								
4'' N	10080	11217	11771	12825	14473	11569	674	103
3'' N	10597	11334	11749	12413	14589	11588	1116	99
2'' N	10605	11408	11908	12738	14177	11753	534	100
1'' N	10640	11325	11959	12786	14337	11846	640	99
0''	10684	11524	12039	12709	14564	12108	702	96
1'' S	10639	11390	11799	12351	21024	11872	741	94
2'' S	10849	11504	11799	12259	13466	12072	605	97
3'' S	10935	11339	11818	12183	14043	12517	835	95
4'' S	10553	11403	11682	12115	14248	12209	839	93
5'' S	10460	11283	11602	12099	15151	13179	879	87
6'' S	10356	11214	11618	12332	14378	12871	1171	84
Σ	10080	11340	11776	12499	21024	12304	1045	1047
$T_e(\text{OIII})$ (K)								
4'' N	14617	16248	17392	18588	26782	16510	1521	83
3'' N	14303	15884	17092	18337	23836	16408	1260	85
2'' N	14334	15990	17014	18026	22835	16617	978	77
1'' N	13138	15907	17172	18175	22235	16832	1017	87
0''	14509	16400	17408	18407	21367	17328	1169	79
1'' S	14025	16460	17523	18658	23181	17957	1256	65
2'' S	15413	16924	17677	18299	21431	17910	915	68
3'' S	14888	16862	17382	18199	21991	17873	962	69
4'' S	14915	16798	17003	17466	20467	17714	898	69
5'' S	14786	16644	17016	17646	19107	17673	858	66
6'' S	14672	16585	17069	17510	18613	17453	759	65
Σ	13138	16442	17197	18078	26782	17390	1158	813

Mín: valor mínimo; Q1: limite dos 25% menores valores; Q2: mediana; Q3: limite dos 75% menores valores; Máx: valor máximo; Média: valor médio ponderado por $F(\text{H}\beta)$; σ : desvio padrão ponderado por $F(\text{H}\beta)$; N : número de aberturas.

resultando em $T_e(\text{NII}) = 14140$ K e $T_e(\text{OIII}) = 17734$ K. As densidades integradas são inferiores aos valores médios dos mapas, ficando mais próximos aos valores de Q3 (Tabela 4.2). Essa diferença pode ser explicada pelo fato de termos realizado uma média ponderada pelo fluxo em $\text{H}\beta$ e, portanto, termos fornecido peso maior aos valores mais altos de densidade no centro da nebulosa. $T_e(\text{OIII})$ está em boa concordância com a média do mapa (Tabela 4.3). Entretanto, uma diferença significativa é observada entre os valores de $T_e(\text{NII})$, que se deve a sua forte dependência com relação à densidade assumida.

4.3 Flutuações de temperatura eletrônica

Os resultados para $t_s^2(\text{NII})$ e $t_s^2(\text{OIII})$ para cada posição de fenda e para toda região nebulosa observada, obtidas conforme descrito no capítulo anterior, são apresentados na Tabela 4.4. Baixas flutuações foram obtidas em todas as posições, com $0,00196 \leq t_s^2(\text{NII}) \leq 0,01198$ e $0,00777 \leq t_s^2(\text{OIII}) \leq 0,00181$. Também incluímos as flutuações devido aos erros associados às medidas, obtendo $0,00004 \leq t_{\text{er}}^2 \leq 0,00062$. Krabbe e Copetti (2005) obtiveram $t_s^2(\text{OIII}) = 0,0050$ e $t_s^2(\text{NII}) = 0,0097$ para NGC 6302, valores dentro dos intervalos de nossas estimativas.

Estas flutuações de temperatura estimadas para NGC 6302 são muito baixas para alterar significativamente os resultados das abundâncias determinadas via linhas excitadas colisionalmente, pelo menos no limite de resolução espacial de aproximadamente $1''$ de nossos dados. Entretanto, os valores de t_s^2 fornecem apenas um limite inferior para t^2 , pois os valores de temperatura calculados em cada abertura correspondem a valores médios e ao longo da linha de visada. Possivelmente, níveis mais altos de flutuações ocorram em seu interior. Através de simulações numéricas, Copetti (2006) encontrou que $t_s^2/t^2 \approx 25\%$ para distribuição de $T_e(\text{OIII})$ em nebulosas típicas. Assim, com base neste modelo, podemos estimar que $t^2 \approx 0,01704$ para toda região de NGC 6302 analisada.

Tabela 4.4: Magnitude das flutuações de temperatura eletrônica estimadas para NGC 6302

$\Delta\delta$	$T_e(\text{OIII})$			$T_e(\text{NII})$		
	$t_s^2(\text{obs})$	t_{er}^2	t_s^2	$t_s^2(\text{obs})$	t_{er}^2	t_s^2
4'' N	0,00839	0,00062	0,00777	0,00337	0,00015	0,00322
3'' N	0,00583	0,00033	0,00550	0,00221	0,00013	0,00209
2'' N	0,00342	0,00025	0,00317	0,00204	0,00008	0,00196
1'' N	0,00361	0,00029	0,00332	0,00289	0,00010	0,00279
0''	0,00449	0,00019	0,00430	0,00333	0,00005	0,00328
1'' S	0,00481	0,00012	0,00470	0,00386	0,00007	0,00379
2'' S	0,00257	0,00012	0,00245	0,00249	0,00005	0,00244
3'' S	0,00286	0,00010	0,00275	0,00440	0,00004	0,00436
4'' S	0,00253	0,00007	0,00246	0,00467	0,00005	0,00462
5'' S	0,00232	0,00004	0,00228	0,01142	0,00005	0,01137
6'' S	0,00186	0,00005	0,00181	0,01206	0,00007	0,01198
Σ	0,00443	0,00017	0,00426	0,00721	0,00007	0,00714

4.4 Abundâncias químicas

Derivamos as abundâncias de He^+ , He^{2+} , N^+ , O^+ , O^{+2} , S^+ , Ne^{2+} e Ar^{3+} relativas ao H^+ para NGC 6302 através dos métodos descritos no capítulo anterior. Os mapas gerados são apresentados na Figura 4.4. Seus respectivos perfis são apresentados nas Figuras B.12 a B.22. Na Tabela 4.5, apresentamos os valores mínimos (Mín) e máximos (Máx), e a média e o desvio padrão (σ) ponderados pelo fluxo em $\text{H}\beta$ de cada mapa de abundância iônica. A partir do valor médio, estimamos a abundância relativa total usando os ICFs dados pelas Equações 3.22 a 3.33. Abundâncias obtidas a partir dos espectros integrados também são apresentadas. Para comparação, apresentamos os resultados observacionais obtidos por Aller et al. (1981), Pottasch e Beintema (1999), Tsamis et al. (2003) e Krabbe e Copetti (2006), os resultados do modelo 3D de Wright et al. (2011), o valor médio para NPs obtido de Kingsburgh e Barlow (1994) e as abundâncias solares obtidas de Hyung e Feibelman (2004).

O valor médio ponderado do mapa He^+/H^+ é aproximadamente 80% mais alto que os determinados por Tsamis et al. (2003) e Wright et al. (2011). O mapa He^+/H^+ mostra valores acima desse valor médio em regiões dos lóbulos e abundâncias mais baixas na região circum-estelar. O valor médio ponderado de $\text{He}^{2+}/\text{H}^+$ está em concordância com valores observacionais prévios e com o modelo de Wright et al. (2011), diferindo aproximadamente 20%. O mapa $\text{He}^{2+}/\text{H}^+$ exibe abundâncias mais altas na região circum-estelar. O mapa $(\text{He}^+ + \text{He}^{2+})/\text{H}^+$ na Figura 4.4 é a soma dos mapas He^+/H^+ e $\text{He}^{2+}/\text{H}^+$. Regiões com abundâncias He/H levemente mais altas são observadas. O valor médio de He/H obtido através deste mapa é $16,72 \times 10^{-2}$, com uma dispersão de 23%. Através dos valores médios dos mapas He^+/H^+ e $\text{He}^{2+}/\text{H}^+$, estimamos $\text{He}/\text{H} = 17,77 \times 10^{-2}$, valor que é 15% a 30% mais alto que os obtidos por Tsamis et al. (2003), Krabbe e Copetti (2006) e Wright et al. (2011).

Um valor médio ponderado de $11,15 \times 10^{-5}$ e uma alta dispersão de 71% foi obtida para o mapa de N^+/H^+ . Esta média é mais alta que valores previamente observados e aproximadamente 20% mais baixa que o valor obtido por Wright et al. (2011). Os valores mais baixos do mapa são observados nas regiões centrais da NP, enquanto abundâncias aproximadamente cinco vezes mais altas que a média foram estimadas em regiões do lóbulo ao Oeste. A abundância total N/H obtida difere de outros trabalhos, mas todas as estimativas são significativamente mais altas que a do Sol. Estes valores mostram que NGC 6302 é um caso extremo de enriquecimento de N.

Características similares as observadas para N^+/H^+ são vistas no mapa de S^+/H^+ . O valor médio, com uma dispersão de 47%, é 65% mais alto que o previsto por Wright et al. (2011). Já a abundância total concorda com a utilizada no modelo.

Para o mapa de O^+/H^+ , uma alta dispersão de 72% com relação ao valor médio ponderado foi encontrada. É também para este que é verificada a maior discrepância

com o modelo de Wright et al. (2011), sendo a abundância do modelo aproximadamente 22 vezes mais alta. As abundâncias mais altas de O^+/H^+ aparecem nas extremidades externas da nebulosa. O valor médio de O^{2+}/H^+ está de acordo com os resultados observacionais prévios, assim como o de O^+/H^+ , mas é mais de duas vezes mais alto que o obtido pelo modelo de Wright et al. (2011). Três regiões com altas concentrações de O^{2+}/H^+ podem ser observadas no mapa. Como também verificado por Pottasch e Beintema (1999), Tsamis et al. (2003) e Krabbe e Copetti (2006), a nebulosa parece ter empobrecido em O por um fator maior que dois quando comparado ao valor solar, o que discorda com o modelo de Wright et al. (2011).

Tsamis et al. (2003) e Krabbe e Copetti (2006) obtiveram abundâncias de Ne^{2+}/H^+ próximas a nossa média ponderada para o mapa. Este valor obtido por Wright et al. (2011) é duas vezes mais baixo; já Ne/H é aproximadamente seis vezes mais alto. No mapa Ne^{2+}/H^+ , pequenas concentrações são observadas no centro da nebulosa, enquanto valores mais altos são observados nos lóbulos, principalmente em suas extremidades.

O valor médio ponderado para o mapa Ar^{3+}/H^+ está em boa concordância com o resultado de Tsamis et al. (2003) e difere por um fator de dois do modelo de Wright et al. (2011). As mais altas razões de abundância são observadas no centro, com uma segunda concentração do centro até parte do lóbulo ao Leste. Para Ar/H verificamos a maior discrepância entre nossa estimativa de abundância total e a utilizada no modelo de Wright et al. (2011).

Analisando as abundâncias integradas na Tabela 4.5, verificamos que estão em concordância com os valores médios ponderados dos mapas, exceto para N^+/H^+ , O^+/H^+ e S^+/H^+ . Isto se deve ao valor mais alto de $T_e(NII)$, quando comparado ao valor médio do mapa, obtido através dos espectros integrados e assumido no cálculo destas abundâncias.

A razão de abundâncias iônicas N^+/O^+ , também apresentada na Figura 4.4, é frequentemente tomada como uma estimativa da abundância total N/O (Equações 3.25 e 3.26). A abundância relativa média ponderada pelo fluxo em $H\beta$ para este mapa é 4,66, com uma dispersão de 22%. Assim, uma distribuição aproximadamente homogênea destas abundâncias é verificada ao longo da superfície nebular. Entretanto, nas posições de fenda $\Delta\delta = 6''$ S e $\Delta\delta = 5''$ S, valores 30% a 60% mais altos que a média são observados. Os valores máximos destas regiões coincidem com os máximos de $F(H\beta)$ e T_e e, a partir deles para a direção Leste, é verificada uma queda acentuada da densidade.

Gonçalves et al. (2003) obtiveram abundâncias elementais homogêneas ao longo de NGC 7009. Entretanto, encontraram algumas estruturas mais externas com marginal superabundância de N (cerca de duas vezes mais alta). Atribuíram estas diferenças aos possíveis erros nos ICFs. De fato, Alexander e Balick (1997) mostram que, em análises espacialmente resolvidas, os erros devido aos ICFs podem ser altos principalmente para N, Ne e Ar e podem levar a variações nas abundâncias N/O superestimadas em nebu-

losas bipolares. Buscando investigar isso, Gonçalves et al. (2006) utilizaram modelos de fotoionização tridimensionais, cujos vínculos foram os dados observacionais de Gonçalves et al. (2003). Mostram que a razão $(N^+/N)/(O^+/O)$ não concorda com a suposição de que $N^+/N = O^+/O$, usada pelos ICFs, nas estruturas onde antes havia sido verificada uma superabundância de N. Possivelmente, essa possa ser a causa da leve superabundância aqui também verificada em algumas regiões de NGC 6302.

4.5 Propriedades de excitação

Mapas e perfis de razões de linhas de emissão podem fornecer informações sobre a estrutura e os mecanismos de excitação na nebulosa. Na Figura 4.5, apresentamos os mapas das razões $[NII]/H\alpha$, $[SII]/H\alpha$, $[OII]/H\beta$ e $[OIII]/H\beta$. Todas as razões de linhas são corrigidas por avermelhamento, com exceção de $[NII]/H\alpha$ visando não restringir sua visualização apenas aos pixels onde $c(H\beta)$ foi obtido. Os perfis espaciais correspondentes a estes mapas são apresentados nas Figuras B.23 a B.33.

Nas regiões mais externas da nebulosa, $[NII]/H\alpha$ e $[SII]/H\alpha$ apresentam picos nos mesmos locais. Isto sugere que estes máximos locais não são devido à superabundância de um destes elementos. A mesma correlação é esperada para $[OII]/H\beta$, uma vez que N^+ , S^+ e O^+ são íons originados nas mesmas regiões de ionização na nebulosa (zonas de baixa ionização). Entretanto, devido aos grandes erros associados às medidas dessa razão, isso não pode ser claramente observado nos perfis.

Os perfis da razão $[OIII]/H\beta$ mostram máximos locais na vizinhança da estrela central, ao Leste desta. Uma anti-correlação pode ser observada entre os perfis de $[OIII]/H\beta$ e os demais. Isto indica uma estrutura de ionização estratificada, de acordo com o potencial de ionização, típica de nebulosas que são radiativamente excitadas pela estrela central.

O diagrama $\log H\alpha/[NII](\lambda 6548 + \lambda 6583)$ versus $\log H\alpha/[SII](\lambda 6717 + \lambda 6731)$ (Sabbadin; Minello; Bianchini, 1977) apresentado na Figura 4.6 confirma isso. Nele indicamos as razões para NGC 6302 correspondentes à porção da nebulosa observada. Incluímos também dados de remanescentes de supernova (RSNs) (Pauletti, 2011). Nenhuma indicação de excitação por choque foi encontrada, uma vez que todas as razões de linhas de NGC 6302 estão fora da região dos pontos de remanescentes de supernova (que são, principalmente, excitadas por choque). Assim, nossos dados indicam que esta nebulosa deve ser excitada radiativamente. Resultados de Casassus, Roche e Barlow (2000) e Oliva, Pasquali e Reconditi (1996) também mostram essa evidência, que é contrária à proposta por Lame e Ferland (1991).

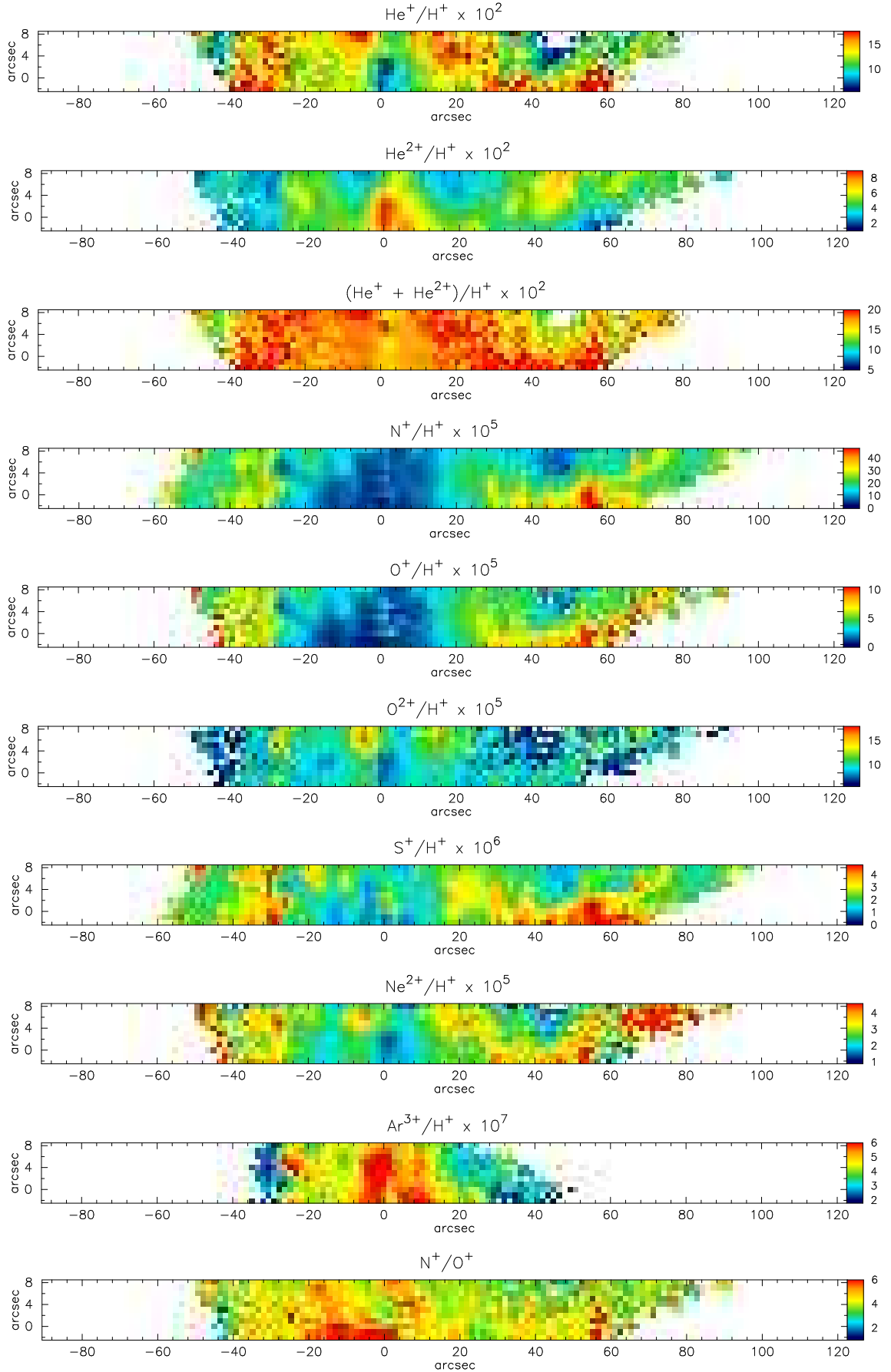


Figura 4.4: NGC 6302 - Mapas das abundâncias iônicas de He^+/H^+ , $\text{He}^{2+}/\text{H}^+$, $(\text{He}^+ + \text{He}^{2+})/\text{H}^+$, N^+/H^+ , S^+/H^+ , O^+/H^+ , O^{2+}/H^+ , $\text{Ne}^{2+}/\text{H}^+$, $\text{Ar}^{3+}/\text{H}^+$ e N^+/O^+ . Norte é para cima, e Leste para a esquerda.

Tabela 4.5: Abundâncias iônicas e totais dos mapas e dos espectros integrados de NGC 6302 e comparação com outros trabalhos

Abundância relativa	Mapa				Integrado	Literatura						
	Mín	Máx	Média	σ		[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[PN]	[Solar]
$10^2 \times \text{He}^+/\text{H}^+$	5,55	21,74	12,11	3,01	11,36	11,50	11,00	6,58	8,64	6,45	—	—
$10^2 \times \text{He}^{2+}/\text{H}^+$	1,65	9,07	5,66	1,85	5,65	6,50	6,10	6,96	6,51	4,77	—	—
$10^2 \times \text{He}/\text{H}$	—	—	17,77	—	17,01	18,0	17,10	13,5	15,15	15,3	11,00	8,6
$10^5 \times \text{N}^+/\text{H}^+$	3,90	61,90	11,15	7,93	6,86	2,60	2,9	4,48	5,86	13,4	—	—
$10^4 \times \text{N}/\text{H}$	—	—	7,14	—	7,06	8,24	2,88	3,34	5,30	3,9	1,40	0,631
$10^5 \times \text{O}^+/\text{H}^+$	0,63	17,70	2,59	1,87	1,40	0,86	1,1	0,84	1,68	30,0	—	—
$10^5 \times \text{O}^{2+}/\text{H}^+$	2,81	18,80	10,26	2,20	9,60	13,00	9,0	9,18	8,80	4,17	—	—
$10^4 \times \text{O}/\text{H}$	—	—	1,66	—	1,44	4,99	2,29	2,50	1,52	5,1	4,93	4,57
$10^5 \times \text{Ne}^{2+}/\text{H}^+$	0,75	8,69	2,56	0,74	2,44	—	7,8	2,65	2,65	1,19	—	—
$10^5 \times \text{Ne}/\text{H}$	—	—	4,14	—	3,66	9,85	21,9	7,60	6,43	24,00	12,5	6,92
$10^6 \times \text{S}^+/\text{H}^+$	0,86	7,59	1,99	0,93	1,03	0,20	1,3	1,04	0,51	1,28	—	—
$10^6 \times \text{S}/\text{H}$	—	—	20,28	—	12,80	6,21	7,94	5,59	3,17	25,00	8,08	21,4
$10^7 \times \text{Ar}^{3+}/\text{H}^+$	1,30	8,70	5,71	1,40	7,63	28,30	8,6	7,75	—	3,39	—	—
$10^6 \times \text{Ar}/\text{H}$	—	—	0,92	—	1,14	8,50	6,02	2,19	—	12,00	2,42	1,51

Referências: [1] Aller et al. (1981); [2] Pottasch e Beintema (1999); [3] Tsamis et al. (2003); [4] Krabbe e Copetti (2005); [5] Wright et al. (2011); [PN] valores médios para NPs (Kingsburgh; Barlow, 1994); [Solar] valores solares (Hyung; Feibelman, 2004).

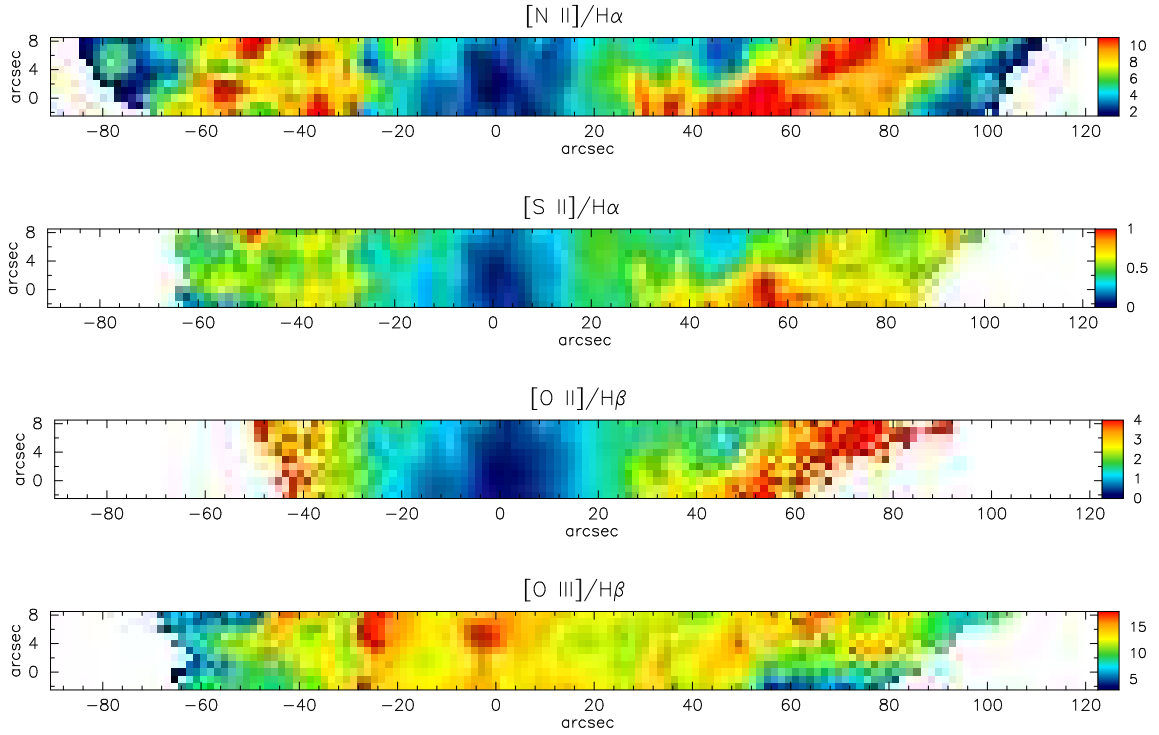


Figura 4.5: NGC 6302 - Mapa da razão $[NII]/H\alpha$, $[SII]/H\alpha$, $[OII]/H\beta$ e $[OIII]/H\beta$. Norte é para cima, e Leste para esquerda.

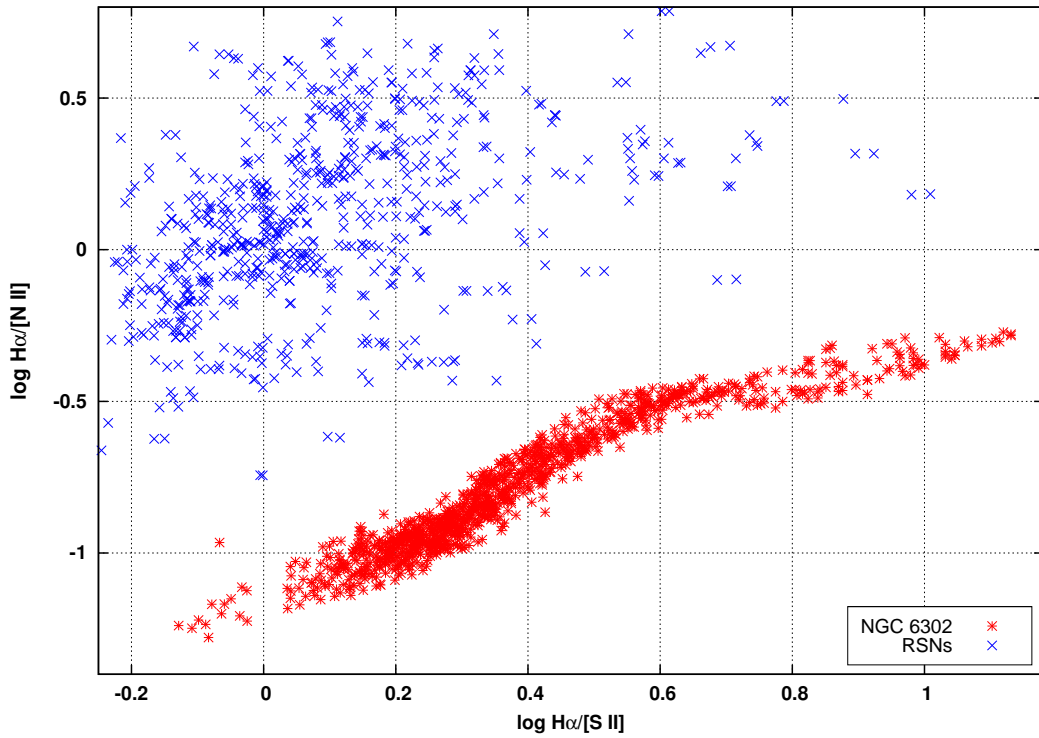


Figura 4.6: Diagrama de diagnóstico $\log H\alpha/[NII](\lambda 6548 + \lambda 6583)$ versus $\log H\alpha/[SII](\lambda 6717 + \lambda 6731)$ (Sabbadin; Minello; Bianchini, 1977) para os dados de NGC 6302 e de remanescentes de supernova (RSNs) (Pauletti, 2011). Todos os pontos de NGC 6302 encontram-se fora da zona excitada principalmente por choque.

5 MAPEAMENTO ESPECTROSCÓPICO DE NGC 2440

Mapas e perfis de fluxos de linhas de emissão, de razões de linhas e de propriedades físicas e químicas de NGC 2440 foram construídos com uma resolução espacial de aproximadamente $1,45'' \times 2''$. Análises estatísticas foram realizadas e os resultados obtidos foram comparados com os já existentes na literatura.

As Figuras 5.1 e 5.2 apresentam os mapas dos fluxos de $H\alpha$, $H\beta$, He I $\lambda 5876$, He II $\lambda 4686$, [N II] $\lambda 6584$, [S II] $\lambda 6717$, [O II] $\lambda 3727$, [O III] $\lambda 5007$, [Ne III] $\lambda 3869$ e [Ar IV] $\lambda 4740$ obtidos em escala logarítmica. Em cada um deles, a escala dos eixos horizontal e vertical, em segundos de arco, é relativa à posição da estrela central.

Nos espectros integrados, 114 linhas de emissão foram medidas e identificadas. A lista com cada uma delas e seus respectivos fluxos é apresentada nas colunas (1) e (3), respectivamente, da Tabela 5.1. Todos os fluxos estão em uma escala onde $F(H\beta) = 100$. Na coluna (2) é apresentado o valor da função de avermelhamento $f(\lambda)$.

5.1 Extinção

O mapa da razão $H\alpha/H\beta$ é apresentado na Figura 5.2. Nele vemos que a extinção em NGC 2440 apresenta variações espaciais, com valores mais altos verificados nas estruturas externas dos lóbulos em P.A. $\approx 85^\circ$. Considerando-se as regiões centrais, menores variações são encontradas. Estas características observadas em nossos mapas são distintas das determinadas por Cuesta e Phillips (2000). Por exemplo, a banda de extinção estendendo-se verticalmente no interior da nebulosa por eles evidenciada não é observada em nossos mapas.

Os valores médios para $c(H\beta)$ de 0,43 e 0,78 determinados, respectivamente, através dos mapas $H\gamma/H\beta$ e $H\alpha/H\beta$ (ambos com dispersão de aproximadamente 30%) estão em concordância com a faixa de valores de $0,2 < c(H\beta) < 0,63$ determinada por outros autores (Shields et al., 1981; Condal, 1982; Hyung; Aller, 1998; Cuesta; Phillips, 2000; Bernard Salas et al., 2002).

Para corrigir os efeitos de avermelhamento nos fluxos medidos nos espectros integrados, obtivemos $c(H\beta) = 0,31$ e $c(H\beta) = 0,66$, respectivamente, das razões $H\gamma/H\beta$ e $H\alpha/H\beta$. Os fluxos corrigidos são apresentados na coluna (4) da Tabela 5.1. Todos são relativos à $I(H\beta) = 100$.

Tabela 5.1: Intensidades de linhas relativas observadas $F(\lambda)$ e corrigidas por avermelhamento $I(\lambda)$, em uma escala onde $F(H\beta) = 100$, e respectivo valor da função de avermelhamento de $f(\lambda)$

Linha (1)	$f(\lambda)$ (2)	$F(\lambda)$ (3)	$I(\lambda)$ (4)
He I $\lambda 3554$	0,318	$0,35 \pm 0,02$	$0,44 \pm 0,03$
He I + [Fe VII] $\lambda 3587$	0,310	$0,31 \pm 0,01$	$0,39 \pm 0,02$
He I $\lambda 3614$	0,303	$0,28 \pm 0,01$	$0,35 \pm 0,02$
He I $\lambda 3634$	0,298	$0,20 \pm 0,01$	$0,25 \pm 0,02$
H17 $\lambda 3698$	0,282	$0,18 \pm 0,01$	$0,22 \pm 0,02$
H16 + He I $\lambda 3704$	0,280	$0,68 \pm 0,03$	$0,83 \pm 0,04$
H15 $\lambda 3712$	0,278	$0,81 \pm 0,02$	$0,99 \pm 0,03$
[O II] $\lambda 3727$	0,275	$122,1 \pm 0,3$	$148,6 \pm 0,4$
H12 $\lambda 3750$	0,269	$2,42 \pm 0,05$	$2,93 \pm 0,06$
[Fe VII] + O III $\lambda 3759$	0,267	$3,06 \pm 0,04$	$3,70 \pm 0,05$
H11 $\lambda 3770$	0,264	$3,05 \pm 0,03$	$3,69 \pm 0,04$
H10 $\lambda 3798$	0,258	$4,35 \pm 0,03$	$5,23 \pm 0,05$
He I $\lambda 3820$	0,253	$1,20 \pm 0,01$	$1,44 \pm 0,02$
H9 $\lambda 3835$	0,249	$6,54 \pm 0,01$	$7,81 \pm 0,02$
[Ne III] $\lambda 3869$	0,242	$95,51 \pm 0,06$	$113,49 \pm 0,07$
He I + H8 $\lambda 3889$	0,237	$15,86 \pm 0,02$	$18,79 \pm 0,04$
He II $\lambda 3923$	0,230	$0,64 \pm 0,03$	$0,76 \pm 0,04$
[Ne III] + H7 $\lambda 3968$	0,220	$44,03 \pm 0,02$	$51,52 \pm 0,03$
He I $\lambda 4009$	0,211	$0,470 \pm 0,009$	$0,55 \pm 0,01$
He I $\lambda 4026$	0,207	$2,39 \pm 0,01$	$2,77 \pm 0,02$
[S II] $\lambda 4069$	0,198	$3,38 \pm 0,03$	$3,90 \pm 0,04$
[S II] $\lambda 4076$	0,196	$0,95 \pm 0,01$	$1,10 \pm 0,02$
H δ $\lambda 4101$	0,191	$25,92 \pm 0,02$	$29,70 \pm 0,04$
He I + [K V] $\lambda 4121$	0,187	$0,44 \pm 0,01$	$0,50 \pm 0,02$
He I $\lambda 4144$	0,182	$0,422 \pm 0,008$	$0,48 \pm 0,01$
[K V] $\lambda 4163$	0,178	$0,094 \pm 0,003$	$0,106 \pm 0,004$
He I + O II $\lambda 4169$	0,177	$0,231 \pm 0,007$	$0,262 \pm 0,008$
He I $\lambda 4200$	0,170	$1,17 \pm 0,02$	$1,33 \pm 0,03$
N II + Fe V $\lambda 4228$	0,165	$0,49 \pm 0,01$	$0,55 \pm 0,02$
C II $\lambda 4267$	0,157	$0,56 \pm 0,01$	$0,63 \pm 0,02$
O II $\lambda 4317$	0,147	$0,60 \pm 0,02$	$0,67 \pm 0,03$
H γ $\lambda 4340$	0,143	$42,59 \pm 0,03$	$47,16 \pm 0,04$
[O III] $\lambda 4363$	0,138	$21,97 \pm 0,02$	$24,25 \pm 0,03$
Ne II + N III $\lambda 4379$	0,135	$0,41 \pm 0,01$	$0,46 \pm 0,01$
He I $\lambda 4388$	0,134	$0,48 \pm 0,01$	$0,52 \pm 0,01$
O II $\lambda 4415$	0,127	$0,59 \pm 0,03$	$0,65 \pm 0,03$
He I $\lambda 4438$	0,120	$0,61 \pm 0,03$	$0,67 \pm 0,03$
He I $\lambda 4471$	0,110	$3,41 \pm 0,01$	$3,69 \pm 0,02$
He II $\lambda 4541$	0,089	$2,19 \pm 0,01$	$2,34 \pm 0,01$
Mg I] $\lambda 4571$	0,080	$0,44 \pm 0,01$	$0,47 \pm 0,01$

Tabela 5.1: Continuação

Linha (1)	$f(\lambda)$ (2)	$F(\lambda)$ (3)	$I(\lambda)$ (4)
[Fe III] + N II λ 4606	0,070	$0,681 \pm 0,006$	$0,716 \pm 0,007$
N III λ 4634	0,062	$1,90 \pm 0,03$	$1,99 \pm 0,04$
N III + O II λ 4641	0,060	$4,28 \pm 0,04$	$4,47 \pm 0,05$
[Fe III] + C IV λ 4658	0,055	$0,96 \pm 0,01$	$1,00 \pm 0,02$
He II λ 4686	0,047	$59,05 \pm 0,02$	$61,07 \pm 0,02$
[Ar IV] + He I λ 4712	0,040	$8,65 \pm 0,02$	$8,90 \pm 0,02$
[Ne IV] λ 4725	0,036	$1,91 \pm 0,01$	$1,96 \pm 0,01$
[Ar IV] λ 4740	0,032	$7,65 \pm 0,02$	$7,83 \pm 0,02$
H β λ 4861	0,000	$100,00 \pm 0,04$	$100,00 \pm 0,04$
[Fe III] λ 4881	-0,005	$0,559 \pm 0,006$	$0,557 \pm 0,007$
He I λ 4922	-0,016	$1,091 \pm 0,008$	$1,079 \pm 0,008$
[O III] λ 4959	-0,025	$489,9 \pm 0,2$	$481,3 \pm 0,2$
[O III] λ 5007	-0,037	$1448,8 \pm 0,5$	$1410,8 \pm 0,5$
Si II] λ 5040	-0,045	$0,67 \pm 0,02$	$0,65 \pm 0,02$
[Fe VI] λ 5145	-0,069	$0,63 \pm 0,02$	$0,60 \pm 0,02$
[Fe VII] λ 5159	-0,073	$0,53 \pm 0,01$	$0,51 \pm 0,01$
[Fe VI] λ 5176	-0,077	$0,44 \pm 0,01$	$0,42 \pm 0,01$
[N I] λ 5200	-0,082	$16,55 \pm 0,02$	$15,60 \pm 0,02$
[Fe III] λ 5270	-0,098	$0,569 \pm 0,007$	$0,530 \pm 0,006$
[Ca V] λ 5309	-0,106	$0,459 \pm 0,006$	$0,425 \pm 0,005$
[Cl IV] λ 5323	-0,109	$0,313 \pm 0,003$	$0,290 \pm 0,003$
[Fe VI] λ 5335	-0,112	$0,323 \pm 0,004$	$0,298 \pm 0,003$
He II λ 5412	-0,128	$5,70 \pm 0,01$	$5,202 \pm 0,009$
[Ca VI] λ 5461	-0,138	$0,167 \pm 0,002$	$0,151 \pm 0,001$
[Cl III] λ 5517	-0,149	$1,046 \pm 0,006$	$0,940 \pm 0,005$
[Cl III] λ 5537	-0,153	$1,042 \pm 0,006$	$0,934 \pm 0,005$
[O I] + Céu λ 5577	-0,160	$5,10 \pm 0,03$	$4,55 \pm 0,02$
O III λ 5592	-0,163	$0,411 \pm 0,009$	$0,366 \pm 0,007$
[Fe VI] λ 5631	-0,170	$0,351 \pm 0,006$	$0,311 \pm 0,005$
N II] λ 5667	-0,176	$0,318 \pm 0,005$	$0,280 \pm 0,004$
N II + [Fe VI] λ 5679	-0,178	$0,349 \pm 0,006$	$0,307 \pm 0,005$
[Fe VII] λ 5720	-0,185	$0,349 \pm 0,006$	$0,306 \pm 0,005$
[N II] λ 5755	-0,191	$18,15 \pm 0,01$	$15,84 \pm 0,01$
He I λ 5876	-0,210	$12,74 \pm 0,02$	$10,96 \pm 0,01$
He II + Céu λ 5914	-0,217	$0,321 \pm 0,005$	$0,275 \pm 0,004$
He II + Céu λ 5932	-0,219	$0,363 \pm 0,006$	$0,310 \pm 0,005$
He II + Céu λ 5953	-0,223	$0,378 \pm 0,005$	$0,322 \pm 0,004$
He II λ 5977	-0,226	$0,590 \pm 0,006$	$0,502 \pm 0,005$
He II λ 6004	-0,230	$0,427 \pm 0,005$	$0,363 \pm 0,004$
He II λ 6037	-0,235	$0,364 \pm 0,006$	$0,307 \pm 0,005$
He II λ 6074	-0,241	$0,335 \pm 0,001$	$0,282 \pm 0,001$

Tabela 5.1: Continuação

Linha (1)	$f(\lambda)$ (2)	$F(\lambda)$ (3)	$I(\lambda)$ (4)
Fe VII λ 6086	-0,243	$0,451 \pm 0,005$	$0,379 \pm 0,004$
K IV λ 6102	-0,245	$0,513 \pm 0,006$	$0,431 \pm 0,005$
He II λ 6118	-0,247	$0,422 \pm 0,003$	$0,354 \pm 0,002$
He II λ 6171	-0,255	$0,712 \pm 0,005$	$0,483 \pm 0,003$
He II λ 6234	-0,264	$1,30 \pm 0,01$	$0,869 \pm 0,008$
[O I] + [S III] + Céu λ 6312	-0,274	$40,2 \pm 0,1$	$26,52 \pm 0,09$
[O I] + Céu λ 6363	-0,282	$12,91 \pm 0,03$	$8,40 \pm 0,02$
He II λ 6406	-0,288	$0,78 \pm 0,01$	$0,503 \pm 0,009$
[Ar V] λ 6435	-0,292	$2,36 \pm 0,02$	$1,51 \pm 0,01$
[N II] λ 6548	-0,307	469 ± 1	$294,1 \pm 0,8$
H α λ 6563	-0,309	460 ± 1	$287,9 \pm 0,8$
[N II] λ 6583	-0,311	1497 ± 3	933 ± 2
He I λ 6678	-0,323	$5,53 \pm 0,01$	$3,383 \pm 0,009$
[S II] λ 6717	-0,328	$22,7 \pm 0,1$	$13,79 \pm 0,09$
[S II] λ 6731	-0,330	$27,1 \pm 0,1$	$16,41 \pm 0,09$
He II λ 6891	-0,349	$1,79 \pm 0,03$	$1,05 \pm 0,02$
[Ar V] λ 7005	-0,362	$6,13 \pm 0,02$	$3,54 \pm 0,01$
He I λ 7065	-0,371	$6,66 \pm 0,02$	$3,79 \pm 0,01$
[Ar III] λ 7136	-0,381	$45,9 \pm 0,1$	$25,74 \pm 0,09$
[Ar IV] λ 7171	-0,385	$2,30 \pm 0,01$	$1,280 \pm 0,008$
[Ar IV] λ 7263	-0,398	$3,68 \pm 0,02$	$2,01 \pm 0,01$
[O II] λ 7319	-0,405	$9,33 \pm 0,04$	$5,04 \pm 0,02$
[O II] λ 7330	-0,407	$6,77 \pm 0,05$	$3,65 \pm 0,01$
[Fe II] λ 7453	-0,423	$3,92 \pm 0,02$	$2,061 \pm 0,009$
C IV] λ 7737 ?	-0,457	$2,39 \pm 0,02$	$1,19 \pm 0,01$
[Ar III] λ 7751	-0,459	$15,72 \pm 0,06$	$7,82 \pm 0,03$
[Cl IV] λ 8046	-0,493	$1,86 \pm 0,02$	$0,880 \pm 0,008$
He II λ 8237	-0,513	$2,95 \pm 0,02$	$1,351 \pm 0,008$
H I P15 λ 8545	-0,544	$3,128 \pm 0,009$	$1,369 \pm 0,003$
[Cl II] λ 8578	-0,547	$1,27 \pm 0,01$	$0,551 \pm 0,005$
H I P14 λ 8665	-0,555	$6,92 \pm 0,03$	$2,98 \pm 0,01$
NI λ 8680	-0,557	$5,58 \pm 0,02$	$2,395 \pm 0,007$
[C I] λ 8727	-0,561	$1,97 \pm 0,01$	$0,841 \pm 0,005$

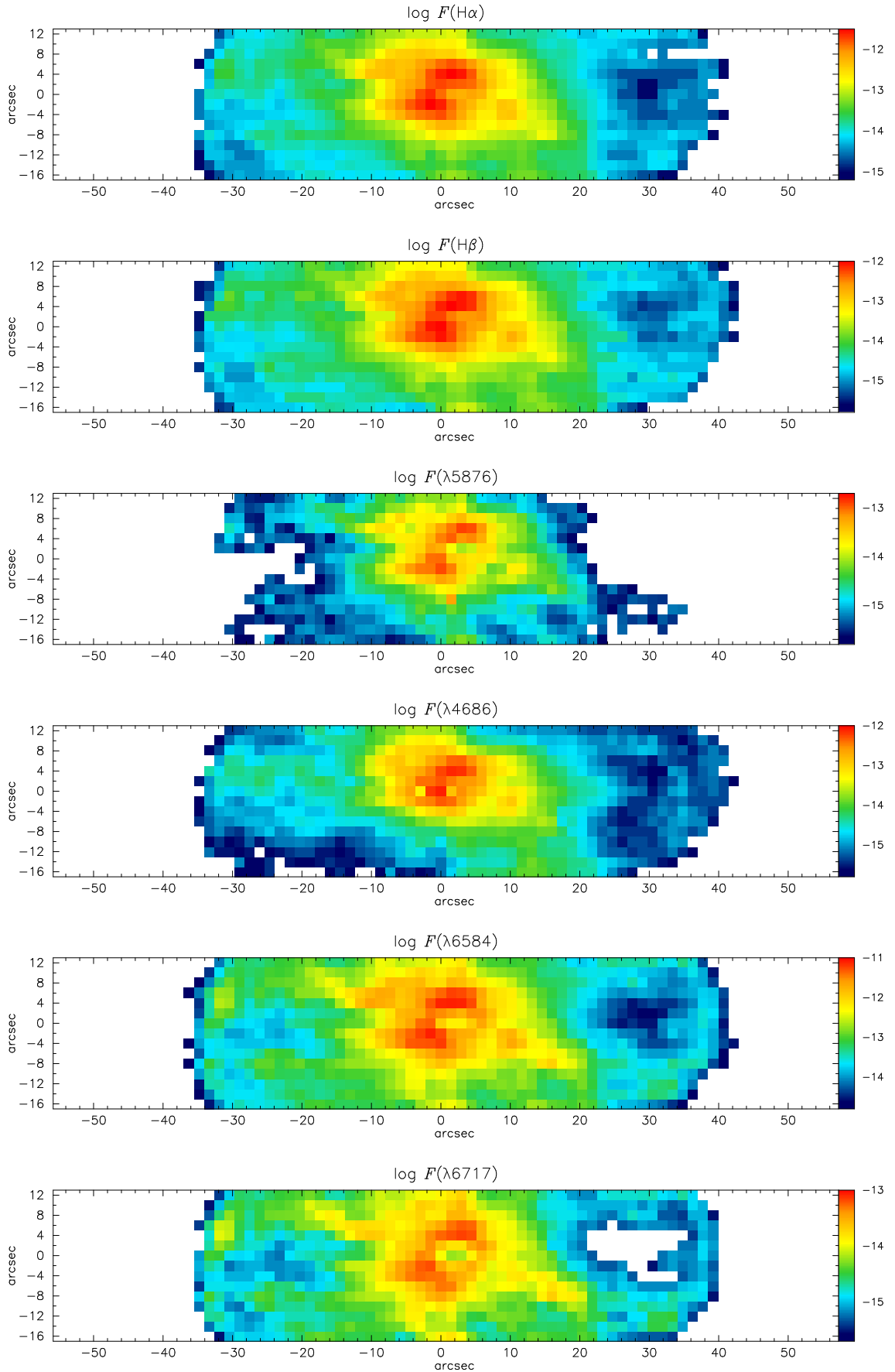


Figura 5.1: NGC 2440 - Mapas dos fluxos de H α , H β , He I $\lambda 5876$, He II $\lambda 4686$, [NII] $\lambda 6584$ e [SII] $\lambda 6717$ em unidades de $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ e em escala logarítmica. Norte é para cima, Leste para esquerda.

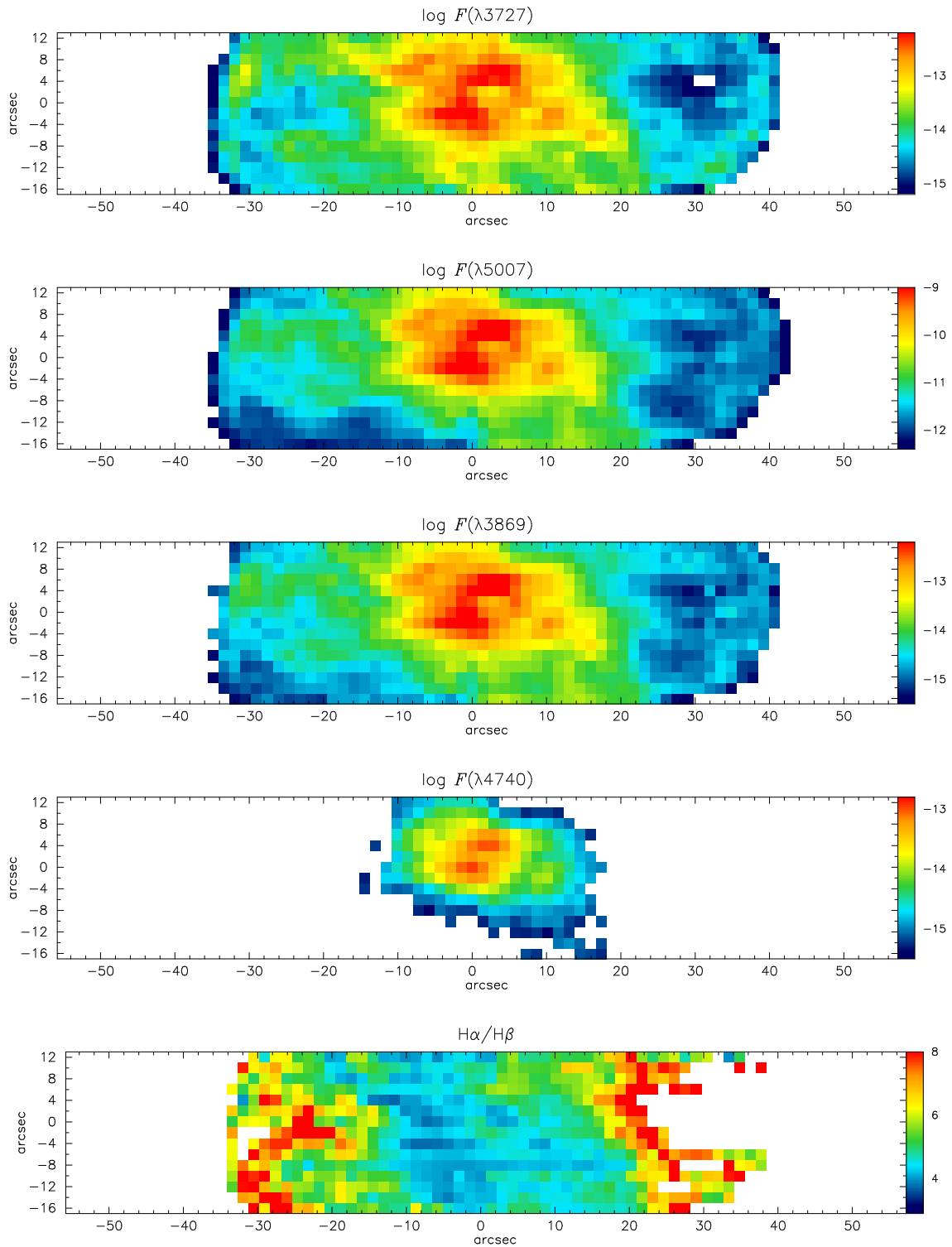


Figura 5.2: NGC 2440 - Mapas dos fluxos de [O II] $\lambda 3727$, [O III] $\lambda 5007$ e [Ne III] $\lambda 3869$ e [Ar IV] $\lambda 4740$ em unidades de $\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ e em escala logarítmica, e da razão $H\alpha/H\beta$. Norte é para cima, Leste para esquerda.

5.2 Temperatura e densidade eletrônicas

Os mapas de $N_e(\text{SII})$, $N_e(\text{ArIV})$, $T_e(\text{NII})$ e $T_e(\text{OIII})$ obtidos para NGC 2440 são apresentados na Figura 5.3. Perfis espaciais ao longo das posições de fenda dos fluxos em $H\beta$ e das densidades e temperaturas eletrônicas são apresentados nas Figuras C.1 a C.15. Em todos, a estrela central encontra-se em $\Delta\delta = 6''$ N (declinação em relação à estrela de referência) na posição $0''$. Analogamente ao realizado na análise dos dados de NGC 6302, apresentamos algumas estatísticas com relação aos valores estimados de densidade e temperatura eletrônicas nas Tabelas 5.2 e 5.3 para NGC 2440.

O mapa e os perfis de $N_e(\text{SII})$ revelam uma distribuição de densidade complexa. Na região central são observados os valores mais altos, sendo o valor máximo de $5160_{-784}^{+1061} \text{cm}^{-3}$ verificado na abertura aproximadamente $1,5''$ ao Leste da estrela central na posição $\Delta\delta = 8''$ N. Uma estrutura com densidades de 1000cm^{-3} a 1500cm^{-3} estende-se do centro à região Sudoeste, provavelmente corresponde a estrutura nomeada como D por Lopez et al. (1998) (Figura 1.6). Estruturas com densidades próximas a estas são observadas nas bordas externas ao Leste e Oeste da nebulosa. O valor médio ponderado pelo fluxo em $H\beta$ estimado para $N_e(\text{SII})$ é de 2069cm^{-3} , com uma dispersão de 52,44%.

$N_e(\text{ArIV})$ foi estimada para um número menor de aberturas, uma vez que as linhas $\lambda 4711$ e $\lambda 4740$ são mais intensas apenas nas regiões centrais do objeto. O valor máximo do mapa é de $7472_{-1795}^{+2331} \text{cm}^{-3}$, verificado na posição $\Delta\delta = 8''$ S (Figura C.2). Entretanto, como vemos, grandes erros são associados a esta estimativa. Na região central, os valores de densidade atingem $4638_{-63}^{+64} \text{cm}^{-3}$ na posição $\Delta\delta = 10''$ N. O valor médio ponderado pelo fluxo em $H\beta$ estimado para $N_e(\text{ArIV})$ é de 2790cm^{-3} , com uma dispersão de 37,49%.

Os dois picos de densidade observados no mapa $N_e(\text{ArIV})$ aparecem também no mapa de densidade de Cuesta e Phillips (2000), obtido através do imageamento em filtros [S II] $\lambda 6717$ e $\lambda 6731$, e parecem corresponder aos caroços identificados como A e B por Lopez et al. (1998). Entretanto, densidades inferiores ($\approx 3 \times 10^3 \text{cm}^{-3}$) foram obtidas por Cuesta e Phillips (2000) nestas regiões. Já as condensações chamadas de C e D por Lopez et al. (1998) podem corresponder as outras regiões de alta densidade no mapa $N_e(\text{ArIV})$, para as quais estimamos maiores erros.

Nenhuma correlação clara é verificada entre os máximos fluxos em $H\beta$ e os máximos de densidade. Apenas na posição $\Delta\delta = 10''$ N (Figura C.11) eles coincidem a aproximadamente $1,5''$ ao Oeste da estrela central, onde também é verificado a máxima emissão em $H\beta$ do mapa (que corresponde a $9,85 \times 10^{-13} \text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$).

Uma ampla faixa de valores para as temperaturas eletrônicas é encontrada na literatura, variando de 10000 K (Shields et al., 1981) a 22000 K (Rowlands et al., 1989). Determinadas através de sensores de diferentes estágio de ionização, refletem possivelmente a complexa estrutura de excitação nebular. O valores médios ponderados pelo

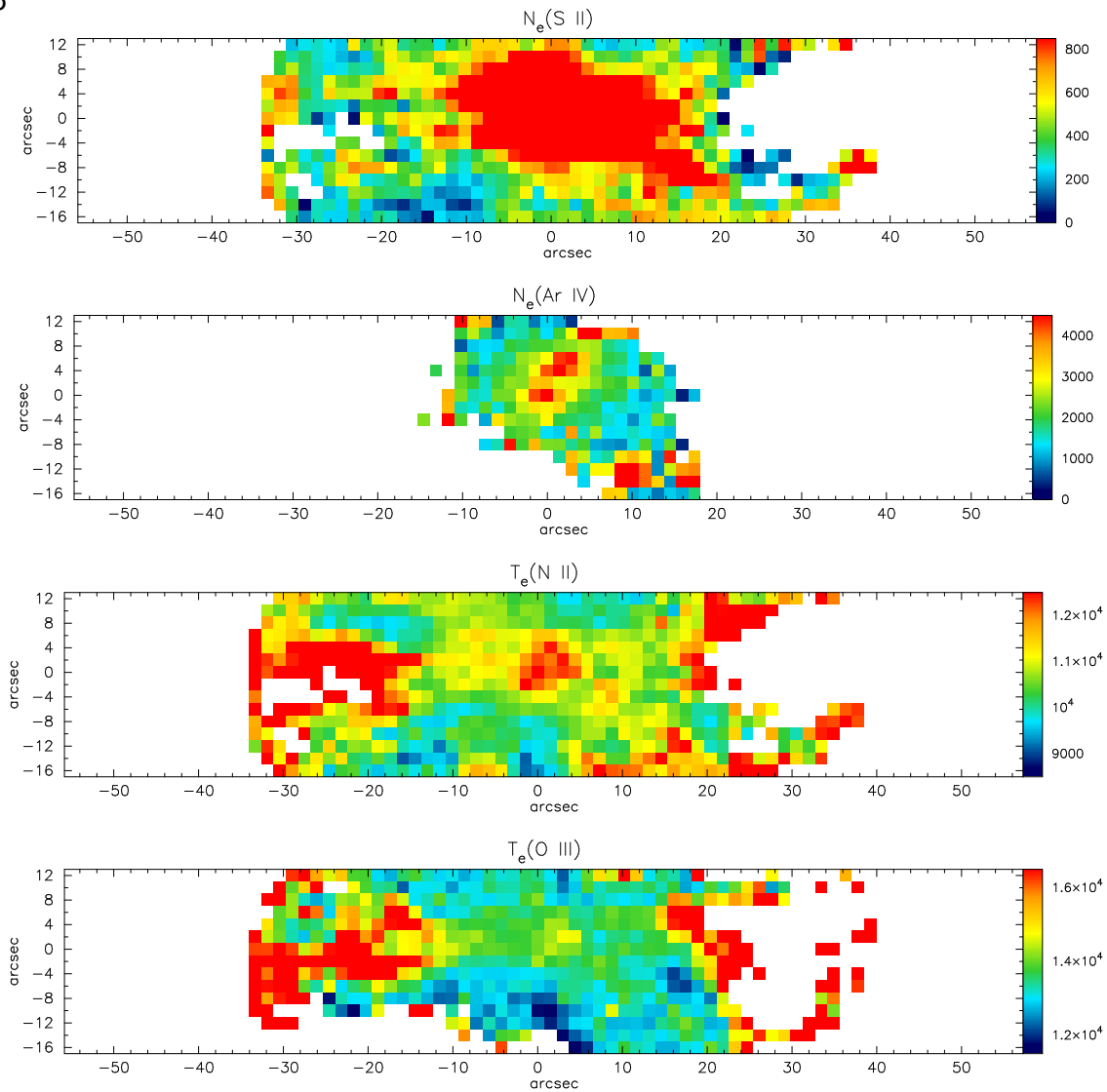


Figura 5.3: Mapas de $N_e(\text{SII})$ e $N_e(\text{ArIV})$ (em unidades de cm^{-3}), e mapas de $T_e(\text{NII})$ e $T_e(\text{OIII})$ (em unidades de K). Norte é para cima, e Leste para a esquerda.

fluxo em $\text{H}\beta$ para os mapas $T_e(\text{NII})$ e $T_e(\text{OIII})$ foram, respectivamente, 11270 K (dispersão 6,47%) e 13720 K (dispersão de 6,06%). Em ambos os mapas, os valores mais altos são observados nas estruturas dos lóbulos em P.A. $\approx 85^\circ$. Os valores médios estimados estão em boa concordância com os determinados por Krabbe e Copetti (2005).

A partir das intensidades de linhas integradas presentes na Tabela 5.1, obtivemos $N_e(\text{SII}) = 1290 \text{cm}^{-3}$ e $N_e(\text{ArIV}) = 3350 \text{cm}^{-3}$, assumindo $T_e = 13000 \text{K}$. Estas densidades, respectivamente, foram assumidas nos cálculos das temperaturas eletrônicas, resultando em $T_e(\text{NII}) = 10875 \text{K}$ e $T_e(\text{OIII}) = 14280 \text{K}$. Estas temperaturas estão em boa concordância com as médias dos mapas (Tabela 4.3). Tsamis et al. (2003) obteve uma estimativa mais alta de $T_e(\text{OIII}) = 16150 \text{K}$ através de dados integrados sobre a superfície da nebulosa. Comparando esses valores de densidade integrada com as médias dos mapas (Tabela 5.2), uma diferença de aproximadamente 60% é encontrada para $N_e(\text{SII})$, que pode ser explicada pelo fato de termos utilizado uma média ponderada pelo fluxo em $\text{H}\beta$.

Tabela 5.2: Estatísticas para as densidades eletrônicas de NGC 2440

$\Delta\delta$	Mín.	Q1	Q2	Q3	Máx.	Média	σ	N
$N_e(\text{SII}) \text{ (cm}^{-3}\text{)}$								
18'' N	50	276	381	598	1063	549	161	45
16'' N	75	356	442	611	1198	795	285	42
14'' N	201	347	534	654	2267	1126	534	40
12'' N	314	531	673	1385	2247	1651	479	40
10'' N	138	587	814	1416	3504	2414	893	37
8'' N	145	409	741	1558	5160	3000	1386	37
6'' N	52	539	689	1577	3284	2143	706	36
4'' N	203	669	1081	1909	3785	2611	946	32
2'' N	273	552	872	1667	2788	1965	651	30
0''	115	366	542	1083	1571	1190	383	43
2'' S	78	407	565	724	1412	721	275	46
4'' S	82	278	455	599	1072	561	203	45
6'' S	157	296	425	560	1068	511	198	41
8'' S	82	240	388	494	722	421	172	45
10'' S	58	251	411	506	734	482	151	41
Σ	50	347	539	795	5160	2069	1085	600
$N_e(\text{ArIV}) \text{ (cm}^{-3}\text{)}$								
18'' N	493	1062	1617	3330	4638	1570	1166	10
16'' N	947	1818	2067	3567	6941	2246	1362	15
14'' N	657	1354	1906	2329	2594	1950	487	15
12'' N	1336	1837	2129	2605	4418	3116	1051	17
10'' N	664	1740	2139	2884	4638	3299	1114	19
8'' N	1452	2036	2372	2754	3487	2781	557	18
6'' N	384	1497	2036	2860	4511	3182	1113	21
4'' N	1275	1580	2016	2662	3554	2504	671	18
2'' N	947	1779	1996	2438	5808	2155	688	19
0''	1171	1318	1562	2181	3786	1853	820	14
2'' S	399	1214	1721	2244	4433	1946	966	17
4'' S	931	1702	3029	3474	4371	2532	1049	11
6'' S	923	2884	3731	4028	6679	3409	1689	11
8'' S	931	3305	5582	7122	7472	4011	2457	8
10'' S	804	1095	1789	3279	3369	1601	945	8
Σ	384	1470	2067	2884	7472	2790	1046	221

Mín: valor mínimo; Q1: limite dos 25% menores valores; Q2: mediana; Q3: limite dos 75% menores valores; Máx: valor máximo; Média: valor médio ponderado por $F(\text{H}\beta)$; σ : desvio padrão ponderado por $F(\text{H}\beta)$; N : número de aberturas.

Tabela 5.3: Estatísticas para as temperaturas eletrônicas de NGC 2440

$\Delta\delta$	Mín.	Q1	Q2	Q3	Máx.	Média	σ	N
$T_e(\text{NII})$ (K)								
18'' N	9601	10298	10762	11276	13163	10514	507	45
16'' N	9539	10238	10562	10873	15936	10506	480	42
14'' N	9589	10071	10605	11027	12905	10499	379	40
12'' N	9756	10684	11067	11512	13184	11115	373	40
10'' N	10109	10907	11188	11880	14237	11503	605	37
8'' N	10474	11214	11906	12744	15100	11732	558	37
6'' N	10224	10952	11598	12664	13703	11718	675	36
4'' N	10366	10857	11405	12450	14971	11598	714	32
2'' N	10121	10530	10839	11245	16022	10826	368	30
0''	9710	10499	10827	12058	14639	10642	449	43
2'' S	9610	10287	10737	11205	14559	10439	539	46
4'' S	9607	10163	10449	11139	13450	10484	626	45
6'' S	9231	10108	10498	11011	12866	10471	666	41
8'' S	9090	10197	10843	11486	13527	10740	951	45
10'' S	9146	10036	11255	11860	13547	10894	1107	41
Σ	9090	10366	10881	11611	16022	11273	729	600
$T_e(\text{OIII})$ (K)								
18'' N	12224	13073	13580	15028	17455	13355	871	36
16'' N	12254	13104	13500	13887	20370	13319	653	42
14'' N	12701	13178	13832	14839	20996	13334	648	43
12'' N	12848	13534	13958	15267	29218	13738	960	35
10'' N	13250	13752	14016	15408	27435	13974	731	37
8'' N	12819	13744	14324	15704	24433	14010	626	42
6'' N	13334	13923	14447	16210	25710	14004	519	43
4'' N	12947	13481	14496	18612	26404	13767	821	41
2'' N	12113	13145	13861	16732	20828	13255	658	43
0''	12089	12980	13539	14221	18405	13182	742	42
2'' S	11363	12752	13005	13765	18698	12968	829	41
4'' S	11587	12781	13190	14641	23086	13173	1769	34
6'' S	11927	12748	13275	15834	23397	13275	1669	31
8'' S	11309	12938	13399	14713	21976	13263	1296	27
10'' S	11048	12719	13139	13747	18254	12461	1183	18
Σ	11048	13143	13772	15208	29218	13722	832	555

Mín: valor mínimo; Q1: limite dos 25% menores valores; Q2: mediana; Q3: limite dos 75% menores valores; Máx: valor máximo; Média: valor médio ponderado por $F(\text{H}\beta)$; σ : desvio padrão ponderado por $F(\text{H}\beta)$; N : número de aberturas.

5.3 Flutuações de temperatura eletrônica

Estimamos as flutuações de temperatura eletrônica em NGC 2440 conforme o procedimento descrito no Capítulo 3, Os resultados para $t_s^2(\text{NII})$ e $t_s^2(\text{OIII})$ para cada posição de fenda e para toda região nebulosa observada são apresentados na Tabela 5.4. Encontramos $0,00107 \leq t_s^2(\text{NII}) \leq 0,00977$ e $0,00131 \leq t_s^2(\text{OIII}) \leq 0,01728$.

Krabbe e Copetti (2005) obtiveram $t_s^2(\text{OIII}) = 0,0011$, um valor levemente inferior as nossas estimativas e, para $T_e(\text{NII})$, um valor entre nossos resultados de $t_s^2(\text{NII}) = 0,0041$. Assim como para NGC 6302, estas baixas flutuações obtidas não alteram significativamente as estimativas de abundância através de linhas proibidas, mas não é descartada a presença de níveis mais altos em seu interior e em menor escala espacial. Com base no modelo de Copetti (2006), podemos estimar que $t_s^2/t^2 \approx 25\%$ para distribuição de $T_e(\text{OIII})$, isto é, $t^2 \approx 0,0144$ em toda região de NGC 2440 avaliada.

Tabela 5.4: Magnitude das flutuações de temperatura eletrônica estimadas para NGC 2440

$\Delta\delta$	$T_e(\text{OIII})$			$T_e(\text{NII})$		
	$t_s^2(\text{obs})$	t_{er}^2	t_s^2	$t_s^2(\text{obs})$	t_{er}^2	t_s^2
18" N	0,00414	0,00027	0,00387	0,00227	0,00018	0,00209
16" N	0,00235	0,00017	0,00218	0,00204	0,00016	0,00188
14" N	0,00231	0,00015	0,00216	0,00127	0,00006	0,00121
12" N	0,00474	0,00002	0,00473	0,00110	0,00003	0,00107
10" N	0,00266	0,00002	0,00264	0,00270	0,00002	0,00268
8" N	0,00195	0,00003	0,00192	0,00221	0,00004	0,00217
6" N	0,00134	0,00003	0,00131	0,00323	0,00003	0,00320
4" N	0,00347	0,00003	0,00344	0,00367	0,00002	0,00365
2" N	0,00241	0,00006	0,00235	0,00112	0,00004	0,00108
0"	0,00309	0,00012	0,00297	0,00174	0,00009	0,00165
2" S	0,00399	0,00019	0,00380	0,00261	0,00024	0,00237
4" S	0,01750	0,00022	0,01728	0,00349	0,00023	0,00326
6" S	0,01529	0,00035	0,01494	0,00395	0,00022	0,00373
8" S	0,00920	0,00034	0,00886	0,00767	0,00034	0,00733
10" S	0,00852	0,00011	0,00841	0,01008	0,00031	0,00977
Σ	0,00367	0,00007	0,00360	0,00417	0,00007	0,00411

5.4 Abundâncias químicas

Derivamos as abundâncias de He^+ , He^{2+} , N^+ , O^+ , O^{+2} , S^+ , Ne^{2+} e Ar^{3+} relativas ao H^+ para NGC 2440 através dos métodos descritos no Capítulo 3. Os mapas gerados são apresentados nas Figuras 5.4 e 5.5. Seus respectivos perfis são apresentados nas Figuras C.16 a C.30. Na Tabela 5.5, apresentamos os valores mínimos (Mín) e máximos (Máx), e a média e o desvio padrão (σ) ponderados pelo fluxo em $\text{H}\beta$ de cada mapa de abundância iônica. A partir do valor médio, estimamos a abundância relativa total usando os ICFs dados pelas Equações 3.22 a 3.33. As abundâncias obtidas através do espectros integrados também são apresentadas, todas em boa concordância com os valores médios dos mapas. Para comparação, apresentamos os resultados observacionais obtidos por Hyung e Aller (1998), Bernard Salas et al. (2002), Tsamis et al. (2003) e Krabbe e Copetti (2006), o valor médio para NPs obtido de Kingsburgh e Barlow (1994) e as abundâncias solares obtidas de Hyung e Feibelman (2004).

Ambos os mapas de He^+/H^+ e $\text{He}^{2+}/\text{H}^+$ possuem uma dispersão de aproximadamente 30% com relação ao valor médio ponderado pelo fluxo em $\text{H}\beta$. Estes, por sua vez, concordam com estimativas já existentes na literatura. Na Figura 5.4, apresentamos o mapa de $(\text{He}^+ + \text{He}^{2+})/\text{H}^+$, obtido da soma dos mapas He^+/H^+ e $\text{He}^{2+}/\text{H}^+$. Regiões com valores de He/H levemente mais altos são observadas.

Os mapas N^+/H^+ , S^+/H^+ e O^+/H^+ mostram características similares. As concentrações mais altas ocorrem em regiões mais externas da nebulosa, principalmente na estrutura inferior do lóbulo ao Leste (P.A. $\approx 85^\circ$). Para estas abundâncias, verificamos altas dispersões com relação ao valor médio dos mapas, sendo de 53%, 66% e 86%, respectivamente, para N^+/H^+ , O^+/H^+ e S^+/H^+ . Comparando os valores médios com os resultados de Krabbe e Copetti (2006), por exemplo, encontramos que diferem por um fator de dois. Esta diferença deve-se, possivelmente, a posição de fenda utilizada e a menor porção do objeto analisada por eles. As abundâncias relativas totais N/H e S/H também mostram estimativas discrepantes.

O mapa N^+/O^+ é apresentado na Figura 5.5 a fim de, assim como realizado para NGC 6302, investigarmos a presença de regiões com superabundância de N em NGC 2440. O valor médio ponderado pelo fluxo em $\text{H}\beta$ é de 3,31, com uma dispersão de 29%. Valores 20% acima desta média são observados nas partes centrais das posições de fenda $\Delta\delta = 6'' \text{ N}$ a $\Delta\delta = 14'' \text{ N}$.

Nenhuma relação clara é verificada entre estes máximos e os demais perfis previamente obtidos. Podemos afirmar que as abundâncias de N e O mostram uma distribuição homogênea e que, possivelmente, erros associados ao ICF assumido tenham levado às abundâncias de N levemente mais altas nas regiões centrais.

Altas abundâncias de O^{2+}/H^+ são observadas nas estruturas ao longo de P.A. $\approx 35^\circ$ e internamente ao lóbulo ao Leste (P.A. $\approx 85^\circ$). O valor médio ponderado pelo fluxo

em $H\beta$ está em boa concordância com valores de outros trabalhos, apenas diferindo de um fator aproximadamente dois do resultado obtido por Tsamis et al. (2003). Analisando o valor de O/H , vemos que está de acordo com valores previamente determinados.

Características similares as de O^{2+}/H^+ são observadas no mapa de Ne^{2+}/H^+ . Seu valor médio está em concordância com os observacionais dos demais autores, mas a abundância total a partir dele obtida difere significativamente.

O mapa Ar^{3+}/H^+ mostra altas concentrações ao centro, provavelmente associadas às estruturas A, B, C e D (Figura 1.6). Resultados de outros trabalhos concordam com o valor médio estimado para o mapa, mas diferem por um fator de dois da abundância total obtida por Hyung e Aller (1998) e por um fator de três da obtida por Bernard Salas et al. (2002).

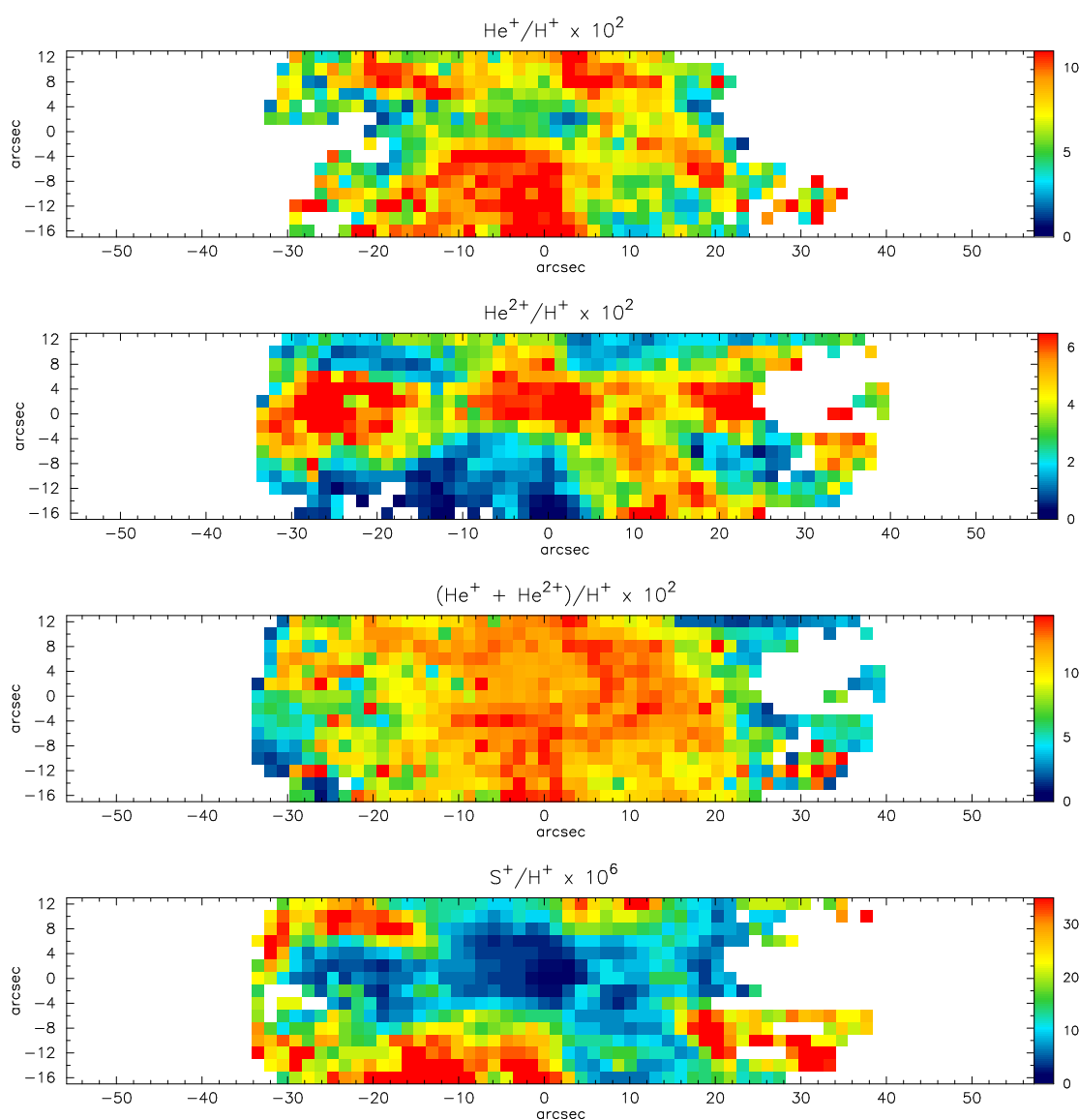


Figura 5.4: NGC 2440 - Mapas de He^+/H^+ , He^{2+}/H^+ , $(He^+ + He^{2+})/H^+$ e S^+/H^+ . Norte é para cima, e Leste para a esquerda.

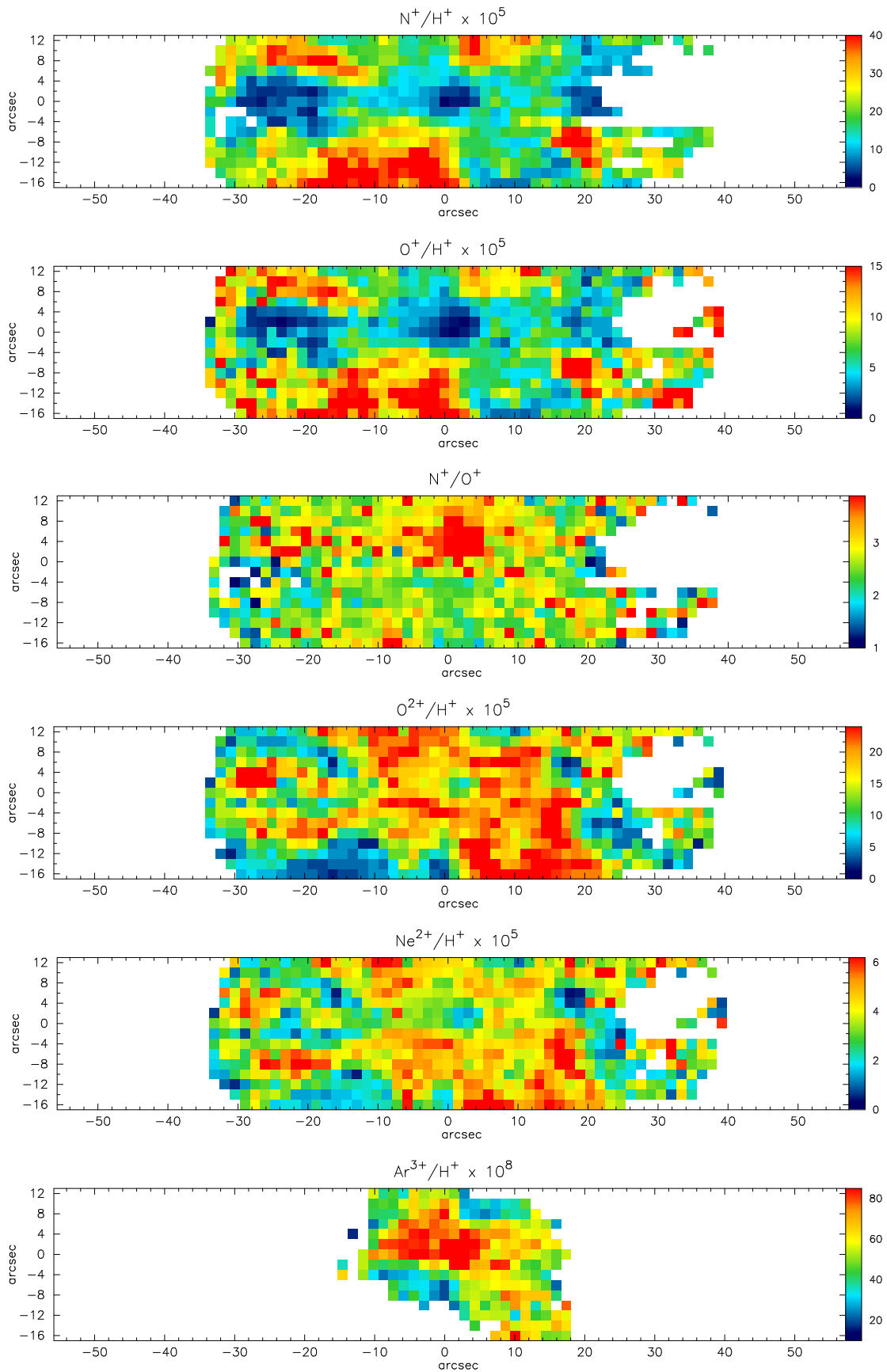


Figura 5.5: NGC 2440 - Mapas de N^+/H^+ , O^+/H^+ , N^+/O^+ , O^{2+}/H^+ , Ne^{2+}/H^+ , Ar^{3+}/H^+ . Norte é para cima, e Leste para a esquerda.

Tabela 5.5: Abundâncias iônicas e totais dos mapas e dos espectros integrados de NGC 2440 e comparação com outros trabalhos

Abundância relativa	Mapas				Integrado	Literatura					
	Mín.	Máx.	Média	σ		[1]	[2]	[3]	[4]	[NP]	[Solar]
$10^2 \times \text{He}^+/\text{H}^+$	1,63	16,11	7,06	2,19	6,92	4,47	5,54	5,75	6,12	–	–
$10^2 \times \text{He}^{2+}/\text{H}^+$	0,43	9,28	5,21	1,73	5,31	7,09	6,39	6,27	6,59	–	–
$10^2 \times \text{He}/\text{H}$	–	–	12,27	–	12,23	12,00	11,9	12,00	12,71	11,00	8,6
$10^5 \times \text{N}^+/\text{H}^+$	2,70	61,10	14,64	7,78	14,94	8,39	1,14	–	7,44	–	–
$10^4 \times \text{N}/\text{H}$	–	–	10,52	–	9,83	9,5	4,37	1,44	6,145	1,40	0,631
$10^5 \times \text{O}^+/\text{H}^+$	0,725	31,96	4,74	3,13	4,85	2,32	3,54	–	3,73	–	–
$10^5 \times \text{O}^{2+}/\text{H}^+$	2,14	35,87	18,83	4,31	16,99	21,9	18,2	9,71	15,2	–	–
$10^4 \times \text{O}/\text{H}$	–	–	3,41	–	3,19	4,4	3,78	2,46	3,08	4,93	4,57
$10^5 \times \text{Ne}^{2+}/\text{H}^+$	0,48	10,15	3,91	1,07	3,29	3,05	4,10	3,36	3,21	–	–
$10^5 \times \text{Ne}/\text{H}$	–	–	7,07	–	6,18	9,0	11,00	11,00	10,26	12,5	6,92
$10^7 \times \text{S}^+/\text{H}^+$	1,00	49,82	7,36	6,37	7,13	2,34	3,24	–	3,61	–	–
$10^6 \times \text{S}/\text{H}$	–	–	7,74	–	7,38	2,0	4,72	–	2,73	8,08	21,4
$10^7 \times \text{Ar}^{3+}/\text{H}^+$	1,71	10,41	6,86	1,89	6,09	6,01	7,09	5,12	–	–	–
$10^6 \times \text{Ar}/\text{H}$	–	–	1,24	–	1,14	2,1	3,17	–	–	2,42	1,51

Referências: [1] Hyung e Aller (1998); [2] Bernard Salas et al. (2002); [3] Tsamis et al. (2003); [4] Krabbe e Copetti (2006); [NP] valores médios para NPs (Kingsburgh; Barlow, 1994); [Solar] valores solares (Hyung; Feibelman, 2004).

5.5 Propriedades de excitação

Nas Figuras 5.6 e 5.6, apresentamos os mapas das razões $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$, $[\text{S II}]/\text{H}\alpha$, $[\text{O II}]/\text{H}\beta$ e $[\text{O III}]/\text{H}\beta$. Todas as razões de linhas são corrigidas por avermelhamento. Os perfis espaciais correspondentes a estes mapas são apresentados nas Figuras C.31 a C.45.

Os mapas de $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$, $[\text{S II}]/\text{H}\alpha$ e $[\text{O II}]/\text{H}\beta$ mostram intensa emissão nas regiões mais externas sendo, portanto, regiões de baixa excitação. Cuesta e Phillips (2000) verificaram, além disso, forte emissão destas transições nos caroços NK e SK (Figura 1.6), que estão fora do campo de observação de nossos dados.

O diagrama $\log \text{H}\alpha/[\text{N II}](\lambda 6548 + \lambda 6583)$ versus $\log \text{H}\alpha/[\text{S II}](\lambda 6717 + \lambda 6731)$ (Sabbadin; Minello; Bianchini, 1977) apresentado na Figura 5.8 não mostra indícios de excitação por choque. Nele indicamos as razões para NGC 2440 correspondentes à porção da nebulosa observada. Incluímos também dados de remanescentes de supernova (RSNs) (Pauletti, 2011), e vemos que os dados destes objetos ocupam uma região distinta dos de NGC 2440 no diagrama. Isto contraria as suspeitas de Cuesta e Phillips (2000).

O mapa de $[\text{O III}]/\text{H}\beta$ (Figura 5.7), diferente dos demais, mostra forte emissão nas regiões internas dos lóbulos em P.A. $\approx 85^\circ$. Forte emissão é também verificada nas estruturas internas dos lóbulos em P.A. $\approx 35^\circ$. Na região central da nebulosa, níveis mais altos de excitação devem ocorrer.

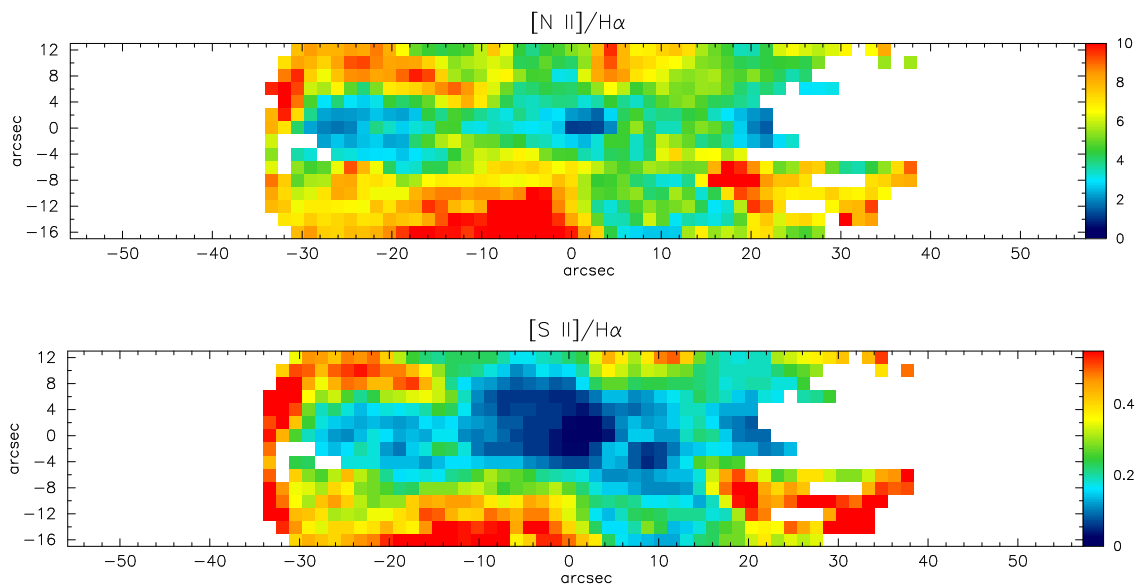


Figura 5.6: NGC 2440 - Mapas de $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$ e $[\text{S II}]/\text{H}\alpha$. Norte é para cima, e Leste para a esquerda.

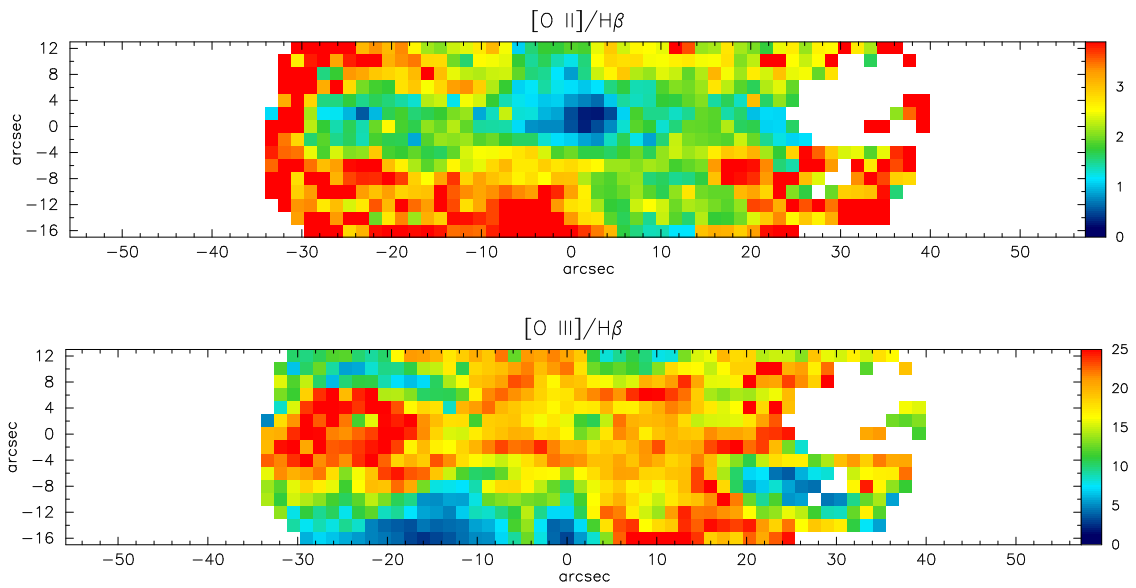


Figura 5.7: NGC 2440 - Mapas de $[O II]/H\beta$ e $[O III]/H\beta$. Norte é para cima, e Leste para a esquerda.

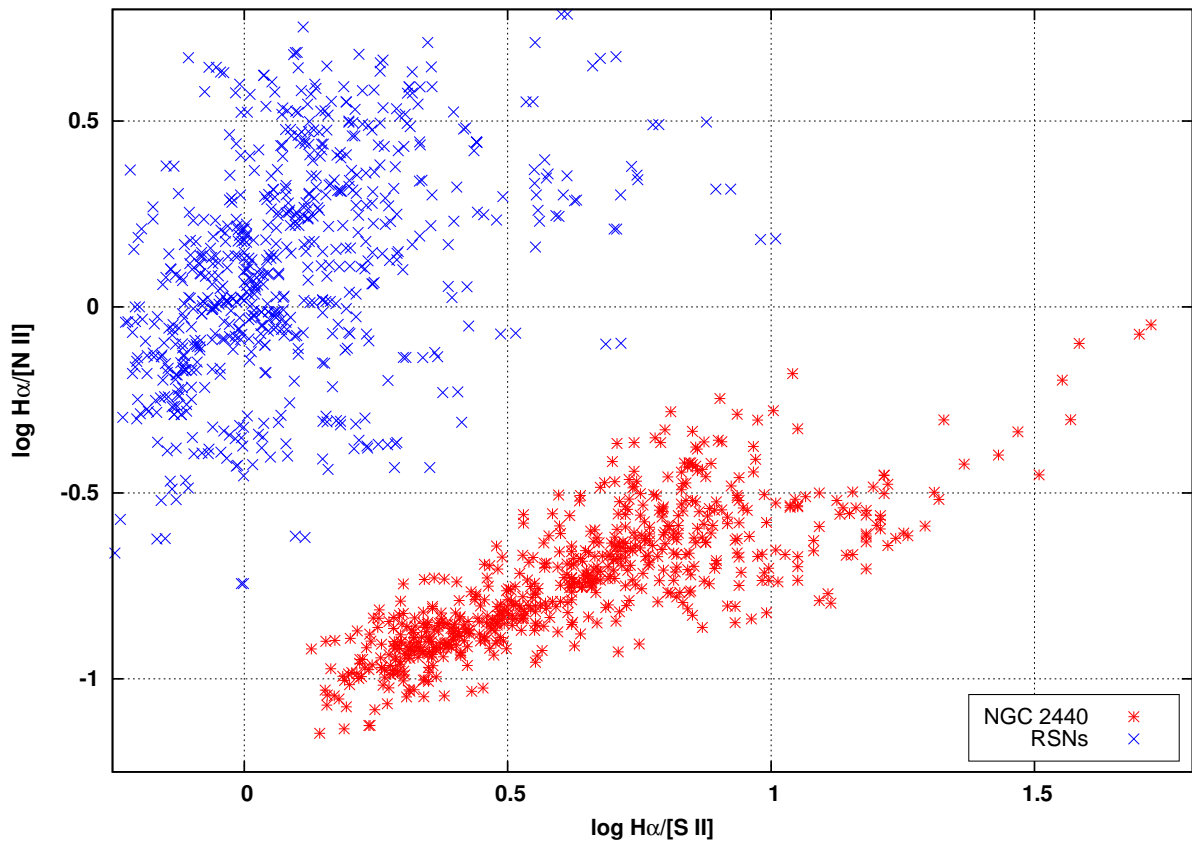


Figura 5.8: Diagrama de diagnóstico $\log H\alpha/[N II](\lambda 6548 + \lambda 6583)$ versus $\log H\alpha/[S II](\lambda 6717 + \lambda 6731)$ (Sabbadin; Minello; Bianchini, 1977) para os dados de NGC 2440 e de remanescentes de supernova (RSNs) (Pauletti, 2011). Todos os pontos de NGC 2440 encontram-se fora da zona excitada principalmente por choque.

6 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Com o objetivo de estudar as propriedades físicas e químicas das NPs NGC 6302 e NGC 2440, foram confeccionados mapas bidimensionais e perfis de medidas de fluxos e razões de linhas de emissão, densidade e temperatura eletrônicas e de abundâncias iônicas. A resolução espacial dos mapas obtidos foi de aproximadamente $1,5'' \times 1,0''$ para NGC 6302, e de $1,5'' \times 2,0''$ para NGC 2440. A partir desses mapas, estatísticas foram realizadas, flutuações de temperatura foram estimadas e abundâncias totais médias foram obtidas. Os principais resultados podem ser sumarizados a seguir:

- Os mapas de $N_e(\text{SII})$ e $N_e(\text{ArIV})$ para NGC 6302 mostram que a nebulosa tem densidade constante inferior à 1000 cm^{-3} nos lóbulos e tem a presença de algumas condensações com densidades de $2000 - 3000 \text{ cm}^{-3}$. Densidades mais altas foram estimadas para a região central, chegando a 41630 cm^{-3} e 31400 cm^{-3} nos mapas $N_e(\text{SII})$ e $N_e(\text{ArIV})$, respectivamente. Estes valores são todos mais baixos por um fator de $2 - 3$ que os usados como parâmetros do modelo de Wright et al. (2011).
- Os mapas de densidade de NGC 2440 mostram características complexas. Nas estruturas centrais denotadas como A e B por Lopez et al. (1998) as densidades atingem mais de 4500 cm^{-3} . Valores altos são verificados em uma estrutura possivelmente correspondente à região D, com $1000 < N_e < 1500 \text{ cm}^{-3}$. Estruturas com densidades próximas a estas são também observadas nas bordas externas ao Leste e Oeste da nebulosa. Os valores médios para os mapas foram de 2069 cm^{-3} e 2790 cm^{-3} para $N_e(\text{SII})$ e $N_e(\text{ArIV})$, respectivamente.
- Os valores médios dos mapas de temperatura foram de 12304 K e 17380 K , respectivamente, para $T_e(\text{NII})$ e $T_e(\text{OIII})$ em NGC 6302. Em NGC 2440, estes mesmos valores foram de 11273 K e 13722 K , respectivamente. As mais altas temperaturas são observadas nas estruturas externas, indicando provável interação destas com o meio interestelar. Em ambos objetos, a dispersão com relação às médias está entre 6% e 8% .
- Nos dois objetos, baixos níveis de flutuação de temperatura foram estimados, sendo $0,00196 \leq t_s^2(\text{NII}) \leq 0,01198$ e $0,00777 \leq t_s^2(\text{OIII}) \leq 0,00181$ NGC 6302, e $0,00107 \leq t_s^2(\text{NII}) \leq 0,00977$ e $0,00131 \leq t_s^2(\text{OIII}) \leq 0,01728$ para NGC 2440. Estes valores não influenciam significativamente as abundâncias determinadas via linhas proibidas.
- As discrepâncias entre nossas estimativas de abundâncias iônicas e totais e o valores observacionais reportados por outros trabalhos pode ser explicadas pelo fato

que consideramos em nossa análise uma porção muito maior das nebulosas. Variações espaciais significativas foram encontradas, resultando em altas dispersões com relação aos valores médios dos mapas, principalmente para $N_e(\text{SII})$, N^+/H^+ , S^+/H^+ e O^+/H^+ . Tais inhomogeneidades nas distribuições de abundâncias iônicas foram também verificadas nos mapas obtidos por Leal-Ferreira et al. (2011) para NGC 40.

- Parte das diferenças nas abundâncias totais obtidas para NGC 6302 e as utilizadas no modelo de Wright et al. (2011) pode ser atribuída aos altos estágios de ionização de alguns elementos que podem ter sido omitidos em nossa análise, tratando-se de uma nebulosa altamente ionizada. Porém, grandes discrepâncias foram também verificadas nas abundâncias iônicas, a maior delas para O^+/H^+ .
- Para os dois objetos, os mapas de He/H sugerem a presença de regiões com abundâncias levemente mais elevadas. Através dos mapas N^+/O^+ obtivemos uma estimativa de N/O e verificamos uma distribuição aproximadamente homogênea de N e O ao longo das nebulosas. Entretanto, regiões com abundâncias 20% acima do valor médio do mapa foram encontradas nas regiões centrais de NGC 2440, enquanto para NGC 6302 esta diferença é de 30% a 60% em algumas regiões.
- Na escala espacial dos mapas, não foram encontradas regiões excitadas por choque nas nebulosas estudadas através da análise do diagrama $\log H\alpha/[\text{NII}]$ versus $\log H\alpha/[\text{SII}]$. Entretanto, a presença destas regiões em menor escala não é descartada. Em NGC 7009, Phillips, Cuesta e Ramos-Larios (2010) verificaram, utilizando dados de alta resolução do HST, que uma pequena fração da emissão em algumas regiões deve ser devido à choque.

Todos esses resultados confirmam a importância do mapeamento espectroscópico no estudo de objetos tão complexos. Como perspectiva para sequência deste trabalho, pretende-se utilizar estes resultados como vínculos para obtenção de modelos da estrutura tridimensional de ionização destas nebulosas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acker, A.; Marcout, J.; Ochsenbein, F.; Stenholm, B.; Tylenda, R.; Schohn, C. **The Strasbourg-ESO Catalogue of Galactic Planetary Nebulae. Parts I, II.** [S.l.: s.n.], 1992.

Alexander, J.; Balick, B. Nebular Abundance Errors. **The Astronomical Journal**, v. 114, p. 713–721, ago. 1997.

Aller, L. H.; Ross, J. E.; Omara, B. J.; Keyes, C. D. A spectroscopic study of the high excitation nebula NGC 6302. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 197, p. 95–106, out. 1981.

Ashley, M. C. B. H-alpha and H-beta imaging of the planetary nebula NGC 6302. **Proceedings of the Astronomical Society of Australia**, v. 8, p. 360–363, 1990.

Ashley, M. C. B.; Hyland, A. R. Detection of highly ionized silicon in the planetary nebulae NGC 6302 and NGC 6537. **Astrophysical Journal**, v. 331, p. 532–538, ago. 1988.

Atherton, P. D.; Pottasch, S. R.; Reay, N. K. Detection of the very hot central star in NGC2440. **Nature**, v. 320, p. 423–425, abr. 1986.

Aver, E.; Olive, K. A.; Skillman, E. D. A new approach to systematic uncertainties and self-consistency in helium abundance determinations. **Journal of Cosmology and Astroparticle Physics**, v. 5, p. 3, maio 2010.

Baade, W. The Resolution of Messier 32, NGC 205, and the Central Region of the Andromeda Nebula. **Astrophysical Journal**, v. 100, p. 137, set. 1944.

Baessgen, M.; Diesch, C.; Grewing, M. A model of the planetary nebula NGC 2440. **Astronomy and Astrophysics**, v. 297, p. 828, maio 1995.

Balick, B.; Frank, A. Shapes and Shaping of Planetary Nebulae. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 40, p. 439–486, 2002.

Benjamin, R. A.; Skillman, E. D.; Smits, D. P. Improving Predictions for Helium Emission Lines. **Astrophysical Journal**, v. 514, p. 307–324, mar. 1999.

Bernard Salas, J.; Pottasch, S. R.; Feibelman, W. A.; Wesselius, P. R. An ISO and IUE study of planetary nebula NGC 2440. **Astronomy and Astrophysics**, v. 387, p. 301–309, maio 2002.

Bevington, P. R.; Robinson, D. K. **Data reduction and error analysis for the physical sciences.** New York: McGraw-Hill Science, 1992.

Bohigas, J. Bidimensional spectral analysis of NGC 6302. **Astronomy and Astrophysics**, v. 288, p. 617–633, ago. 1994.

Casassus, S.; Roche, P. F.; Barlow, M. J. The coronal line regions of planetary nebulae NGC 6302 and 6537: 3-13 μ m grating and echelle spectroscopy. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 314, p. 657–671, jun. 2000.

Condal, A. R. NGC 2440 - Ionization structure, extinction, and near infrared spectrum. **Astronomy and Astrophysics**, v. 112, p. 124–132, ago. 1982.

Copetti, M. V. F. Electron temperature fluctuations in H II regions. The feasibility of t^2 estimates from point-to-point observations. **Astronomy and Astrophysics**, v. 453, p. 943–947, jul. 2006.

Corradi, R. L. M.; Perinotto, M.; Schwarz, H. E.; Claeskens, J.-F. The chemical structure of bipolar planetary nebulae. I. IC 4406. **Astronomy and Astrophysics**, v. 322, p. 975–981, jun. 1997.

Corradi, R. L. M.; Schwarz, H. E. Morphological populations of planetary nebulae: which progenitors? I. Comparative properties of bipolar nebulae. **Astronomy and Astrophysics**, v. 293, p. 871–888, jan. 1995.

Cuesta, L.; Phillips, J. P. The Density, Extinction, Temperature, and Excitation Structures of NGC 2440. **Astrophysical Journal**, v. 543, p. 754–763, nov. 2000.

Danziger, I. J.; Frogel, J. A.; Persson, S. E. Observation of NGC 6302 from 0.35 to 20 Microns. **The Astrophysical Journal Letters**, v. 184, p. L29, ago. 1973.

Dinh-V-Trung; Bujarrabal, V.; Castro-Carrizo, A.; Lim, J.; Kwok, S. Massive Expanding Torus and Fast Outflow in Planetary Nebula NGC 6302. **Astrophysical Journal**, v. 673, p. 934–941, fev. 2008.

Esteban, C. Are Temperature Fluctuations Out There? In: W. J. Henney, J. Franco, & M. Martos (Ed.). **Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series**. [S.l.: s.n.], 2002. (Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series, v. 12), p. 56–61.

Feibelman, W. A. Electron Densities, Radial and Terminal Wind Velocities for the Planetary Nebula NGC 6302 and Its O VI-Type Binary Nucleus. **Astrophysical Journal**, v. 550, p. 785–792, abr. 2001.

García-Rojas, J.; Esteban, C. On the Abundance Discrepancy Problem in H II Regions. **Astrophysical Journal**, v. 670, p. 457–470, nov. 2007.

García-Segura, G.; López, J. A.; Franco, J. Magnetically Driven Winds from Post-Asymptotic Giant Branch Stars: Solutions for High-Speed Winds and Extreme Collimation. **Astrophysical Journal**, v. 618, p. 919–925, jan. 2005.

Gonçalves, D. R.; Corradi, R. L. M.; Mampaso, A. Low-Ionization Structures in Planetary Nebulae: Confronting Models with Observations. **Astrophysical Journal**, v. 547, p. 302–310, jan. 2001.

Gonçalves, D. R.; Corradi, R. L. M.; Mampaso, A.; Perinotto, M. The Physical Parameters, Excitation, and Chemistry of the Rim, Jets, and Knots of the Planetary Nebula NGC 7009. **Astrophysical Journal**, v. 597, p. 975–985, nov. 2003.

- Gonçalves, D. R.; Ercolano, B.; Carnero, A.; Mampaso, A.; Corradi, R. L. M. On the nitrogen abundance of fast, low-ionization emission regions: the outer knots of the planetary nebula NGC 7009. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 365, p. 1039–1049, jan. 2006.
- Greig, W. E. The morphological classification of symmetrical nebulae. **Astronomy and Astrophysics**, v. 10, p. 161–174, jan. 1971.
- Groves, B.; Dopita, M. A.; Williams, R. E.; Hua, C.-T. The Internal Extinction Curve of NGC 6302 and its Extraordinary Spectrum. **Publications of the Astronomical Society of Australia**, v. 19, p. 425–442, 2002.
- Hajian, A. R.; Terzian, Y. It's Planetary Nebulae Expansion Distances. III. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 108, p. 419, maio 1996.
- Heap, S. R. Ultraviolet detection of the nucleus of NGC2440. **Nature**, v. 326, p. 571–573, abr. 1987.
- Heap, S. R.; Lindler, D. J.; Neill, J. D. Hubble Observations of NGC 2440. In: Benvenuti, P.; Schreier, E. (Ed.). **European Southern Observatory Conference and Workshop Proceedings**. [S.l.: s.n.], 1992. (European Southern Observatory Conference and Workshop Proceedings, v. 44), p. 333.
- Hubble, E. P. The source of luminosity in galactic nebulae. **Astrophysical Journal**, v. 56, p. 400–438, dez. 1922.
- Hummer, D. G.; Storey, P. J. Recombination-line intensities for hydrogenic ions. I - Case B calculations for H I and He II. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 224, p. 801–820, fev. 1987.
- Hyung, S.; Aller, L. H. The Optical Spectrum of the Planetary Nebula NGC 2440. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 110, p. 466–479, abr. 1998.
- Hyung, S.; Feibelman, W. A. Optical and IUE Spectra of the Planetary Nebula NGC 7026. **Astrophysical Journal**, v. 614, p. 745–756, out. 2004.
- Icke, V.; Balick, B.; Frank, A. The hydrodynamics of aspherical planetary nebulae. II - Numerical modelling of the early evolution. **Astronomy and Astrophysics**, v. 253, p. 224–243, jan. 1992.
- Kastner, J. H.; Weintraub, D. A.; Gatley, I.; Merrill, K. M.; Probst, R. G. H₂ Emission from Planetary Nebulae: Signpost of Bipolar Structure. **Astrophysical Journal**, v. 462, p. 777, maio 1996.
- Keenan, F. P.; Aller, L. H.; Bell, K. L.; Hyung, S.; McKenna, F. C.; Ramsbottom, C. A. Auroral and nebular emission lines of [SII] in the optical spectra of planetary nebulae. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 281, p. 1073–1080, ago. 1996.
- Kemper, F.; Molster, F. J.; Jäger, C.; Waters, L. B. F. M. The mineral composition and spatial distribution of the dust ejecta of NGC 6302. **Astronomy and Astrophysics**, v. 394, p. 679–690, nov. 2002.

Kingsburgh, R. L.; Barlow, M. J. Elemental abundances for a sample of southern galactic planetary nebulae. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 271, p. 257–299, nov. 1994.

Krabbe, A. C.; Copetti, M. V. F. Electron temperature fluctuations in planetary nebulae. **Astronomy and Astrophysics**, v. 443, p. 981–994, dez. 2005.

_____. Chemical abundances in seven galactic planetary nebulae. **Astronomy and Astrophysics**, v. 450, p. 159–166, abr. 2006.

Kwitter, K. B.; Henry, R. B. C. A New Look at Carbon Abundances in Planetary Nebulae. II. BB 1, NGC 650, NGC 1535, NGC 2440, and NGC 7027. **Astrophysical Journal**, v. 473, p. 304, dez. 1996.

Kwok, S. Planetary nebulae: A modern view. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 106, p. 344–355, abr. 1994.

_____. **The Origin and Evolution of Planetary Nebulae**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

_____. Stellar Evolution from AGB to Planetary Nebulae. In: Deng, L.; Chan, K. L. (Ed.). **IAU Symposium**. [S.l.: s.n.], 2008. (IAU Symposium, v. 252), p. 197–203.

Kwok, S.; Purton, C. R.; Fitzgerald, P. M. On the origin of planetary nebulae. **The Astrophysical Journal Letters**, v. 219, p. L125–L127, fev. 1978.

Lame, N. J.; Ferland, G. J. NGC 6302 - Ionized by a very hot star or by a wind? **Astrophysical Journal**, v. 367, p. 208–212, jan. 1991.

Latter, W. B.; Kelly, D. M.; Hora, J. L.; Deutsch, L. K. Investigating the Near-Infrared Properties of Planetary Nebulae. I. Narrowband Images. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 100, p. 159, set. 1995.

Leal-Ferreira, M. L.; Gonçalves, D. R.; Monteiro, H.; Richards, J. W. Physico-chemical spectroscopic mapping of the planetary nebula NGC 40 and the 2D_NEb, a new 2D algorithm to study ionized nebulae. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 411, p. 1395–1408, fev. 2011.

Liu, X.-W. Temperature fluctuations and chemical homogeneity in the planetary nebula NGC 4361. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 295, p. 699–+, abr. 1998.

Liu, X.-W.; Barlow, M. J.; Zhang, Y.; Bastin, R. J.; Storey, P. J. Chemical abundances for Hf 2-2, a planetary nebula with the strongest-known heavy-element recombination lines. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 368, p. 1959–1970, jun. 2006.

Liu, X.-W.; Storey, P. J.; Barlow, M. J.; Danziger, I. J.; Cohen, M.; Bryce, M. NGC 6153: a super-metal-rich planetary nebula? **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 312, p. 585–628, mar. 2000.

Lopez, J. A. Jets and Bubbles in Planetary Nebulae (Invited Review). In: Habing, H. J.; Lamers, H. J. G. L. M. (Ed.). **Planetary Nebulae**. [S.l.: s.n.], 1997. (IAU Symposium, v. 180), p. 197.

Lopez, J. A.; Meaburn, J.; Bryce, M.; Holloway, A. J. The Morphology and Kinematics of the Complex Polypolar Planetary Nebula NGC 2440. **Astrophysical Journal**, v. 493, p. 803, jan. 1998.

Maciel, W. J. Galactic Distribution Radial Velocities and Masses of PN. In: Torres-Peimbert, S. (Ed.). **Planetary Nebulae**. [S.l.: s.n.], 1989. (IAU Symposium, v. 131), p. 73.

Matsuura, M.; Zijlstra, A. A.; Molster, F. J.; Waters, L. B. F. M.; Nomura, H.; Sahai, R.; Hoare, M. G. The dark lane of the planetary nebula NGC 6302. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 359, p. 383–400, maio 2005.

Meaburn, J.; Lloyd, M.; Vaytet, N. M. H.; López, J. A. Hubble-type outflows of the high-excitation poly-polar planetary nebula NGC 6302 - from expansion proper motions. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 385, p. 269–273, mar. 2008.

Meaburn, J.; López, J. A.; Steffen, W.; Graham, M. F.; Holloway, A. J. The Hubble-Type Outflows from the High-Excitation, Polypolar Planetary Nebula NGC 6302. **The Astronomical Journal**, v. 130, p. 2303–2311, nov. 2005.

Milne, D. K.; Aller, L. H. Radio observations at 5 GHz of southern planetary nebulae. **Astronomy and Astrophysics**, v. 38, p. 183–196, jan. 1975.

Minkowski, R. The Sub-System of Planetary Nebulae. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 76, p. 197, ago. 1964.

Monteiro, H.; Falceta-Gonçalves, D. Three-dimensional Photoionization Structure and Distances of Planetary Nebulae. IV. NGC 40. **Astrophysical Journal**, v. 738, p. 174, set. 2011.

Monteiro, H.; Morisset, C.; Gruenwald, R.; Viegas, S. M. Morphology and Kinematics of Planetary Nebulae. II. A Diabolo Model for NGC 3132. **Astrophysical Journal**, v. 537, p. 853–860, jul. 2000.

Monteiro, H.; Schwarz, H. E.; Gruenwald, R.; Heathcote, S. Three-Dimensional Photoionization Structure and Distances of Planetary Nebulae. I. NGC 6369. **Astrophysical Journal**, v. 609, p. 194–202, jul. 2004.

Monteiro, H.; Schwarz, H. E.; Gruenwald, R.; Guenther, K.; Heathcote, S. R. Three-Dimensional Photoionization Structure and Distances of Planetary Nebulae. II. Menzel 1. **Astrophysical Journal**, v. 620, p. 321–329, fev. 2005.

Oliva, E.; Pasquali, A.; Reconditi, M. On [NeV] atomic parameters and physical conditions in NGC 6302. **Astronomy and Astrophysics**, v. 305, p. L21, jan. 1996.

Oliveira, V. **Variações espaciais de temperatura eletrônica e densidade eletrônica de regiões H II nas Nuvens de Magalhães**. 2010. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2010.

Osterbrock, D. E.; Ferland, G. J. **Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei**. Sausalito, California: University Science Books, 2006.

Pauletti, D. **Catálogo de intensidades de linhas de emissão de remanescentes de supernova e aplicações**. 2011. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2011.

Peimbert, M. Temperature Determinations of H II Regions. **Astrophysical Journal**, v. 150, p. 825–+, dez. 1967.

_____. Chemical abundances in planetary nebulae. In: Terzian, Y. (Ed.). **Planetary Nebulae**. [S.l.: s.n.], 1978. (IAU Symposium, v. 76), p. 215–223.

Peimbert, M.; Costero, R. Chemical Abundances in Galactic HII Regions. **Boletín de los Observatorios Tonantzintla y Tacubaya**, v. 5, p. 3–22, maio 1969.

Peimbert, M.; Torres-Peimbert, S. Type I planetary nebulae. In: Flower, D. R. (Ed.). **Planetary Nebulae**. [S.l.: s.n.], 1983. (IAU Symposium, v. 103), p. 233–241.

_____. Chemical composition of type I planetary nebulae - Collisional excitation effects on He I line intensities. **Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica**, v. 14, p. 540–558, maio 1987.

Peretto, N.; Fuller, G.; Zijlstra, A.; Patel, N. The massive expanding molecular torus in the planetary nebula NGC 6302. **Astronomy and Astrophysics**, v. 473, p. 207–217, out. 2007.

Phillips, J. P.; Cuesta, L. C.; Ramos-Larios, G. Mapping and spectroscopy of the planetary nebula NGC 7009 in the visual and infrared. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 409, p. 881–902, dez. 2010.

Pickering, E. C.; Fleming, W. P. Harvard College Observatory, circular no. 12. Stars having peculiar spectra. New variable stars in Crux and Cygnus. **Astrophysical Journal**, v. 4, p. 369–370, dez. 1896.

Porter, R. L.; Bauman, R. P.; Ferland, G. J.; MacAdam, K. B. Theoretical He I Emissivities in the Case B Approximation. **The Astrophysical Journal Letters**, v. 622, p. L73–L75, mar. 2005.

Porter, R. L.; Ferland, G. J.; MacAdam, K. B. He I Emission in the Orion Nebula and Implications for Primordial Helium Abundance. **Astrophysical Journal**, v. 657, p. 327–337, mar. 2007.

Pottasch, S. R.; Beintema, D. A. The ISO spectrum of the planetary nebula NGC 6302. II. Nebular abundances. **Astronomy and Astrophysics**, v. 347, p. 975–982, jul. 1999.

Quireza, C.; Rocha-Pinto, H. J.; Maciel, W. J. Bayesian posterior classification of planetary nebulae according to the Peimbert types. **Astronomy and Astrophysics**, v. 475, p. 217–231, nov. 2007.

Ramos-Larios, G.; Phillips, J. P. The haloes of planetary nebulae in the mid-infrared: evidence for interaction with the interstellar medium. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 400, p. 575–588, dez. 2009.

Richer, M. G.; McCall, M. L.; Martin, P. G. Neutral oxygen in planetary nebulae - Probing radiative transfer and nebular structure. **Astrophysical Journal**, v. 377, p. 210–226, ago. 1991.

Rowlands, N.; Houck, J. R.; Herter, T. The highly ionized regions of NGC 6302 and NGC 6537. **Astrophysical Journal**, v. 427, p. 867–873, jun. 1994.

Rowlands, N.; Houck, J. R.; Herter, T.; Gull, G. E.; Skrutskie, M. F. Electron temperatures in the high-excitation zones of planetary nebulae. **Astrophysical Journal**, v. 341, p. 901–907, jun. 1989.

Sabbadin, F.; Minello, S.; Bianchini, A. Sharpless 176: a large, nearby planetary nebula. **Astronomy and Astrophysics**, v. 60, p. 147–149, ago. 1977.

Sanmartin, D. **Variações espaciais de propriedades físicas do remanescente de supernova RCW 103**. 2008. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2008.

Savage, B. D.; Mathis, J. S. Observed properties of interstellar dust. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 17, p. 73–111, 1979.

Schwarz, H. E.; Corradi, R. L. M.; Melnick, J. A catalogue of narrow band images of planetary nebulae. **Astronomy and Astrophysics Supplement**, v. 96, p. 23–113, nov. 1992.

Schwarz, H. E.; Monteiro, H. Three-Dimensional Photoionization Structure and Distances of Planetary Nebulae. III. NGC 6781. **Astrophysical Journal**, v. 648, p. 430–434, set. 2006.

Shaw, R. A.; Dufour, R. J. Software for the Analysis of Emission Line Nebulae. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 107, p. 896, set. 1995.

Shields, G. A.; Aller, L. H.; Keyes, C. D.; Czyzak, S. J. The optical and ultraviolet spectrum of the planetary nebula NGC 2440. **Astrophysical Journal**, v. 248, p. 569–583, set. 1981.

Shklovsky, I. S. **Astronomicheskii Zhurnal**, v. 33, p. 222–+, 1956.

_____. **Astronomicheskii Zhurnal**, v. 33, p. 315–+, 1956.

Soker, N.; Livio, M. Disks and jets in planetary nebulae. **Astrophysical Journal**, v. 421, p. 219–224, jan. 1994.

Stanghellini, L.; Corradi, R. L. M.; Schwarz, H. E. The correlations between planetary nebula morphology and central star evolution. **Astronomy and Astrophysics**, v. 279, p. 521–528, nov. 1993.

Storey, P. J.; Hummer, D. G. Recombination line intensities for hydrogenic ions-IV. Total recombination coefficients and machine-readable tables for $Z=1$ to 8. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 272, p. 41–48, jan. 1995.

_____. Recombination line intensities for hydrogenic ions (Storey+ 1995). **VizieR Online Data Catalog**, v. 6064, p. 0, jul. 1995.

Szyszkla, C.; Walsh, J. R.; Zijlstra, A. A.; Tsamis, Y. G. Detection of the Central Star of the Planetary Nebula NGC 6302. **The Astrophysical Journal Letters**, v. 707, p. L32–L36, dez. 2009.

Szyszkla, C.; Zijlstra, A. A.; Walsh, J. R. The expansion proper motions of the planetary nebula NGC 6302 from Hubble Space Telescope imaging. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 416, p. 715–726, set. 2011.

Tsamis, Y. G.; Barlow, M. J.; Liu, X.-W.; Danziger, I. J.; Storey, P. J. A deep survey of heavy element lines in planetary nebulae - I. Observations and forbidden-line densities, temperatures and abundances. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 345, p. 186–220, out. 2003.

Tsamis, Y. G.; Walsh, J. R.; Péquignot, D.; Barlow, M. J.; Danziger, I. J.; Liu, X.-W. Integral field spectroscopy of planetary nebulae: mapping the line diagnostics and hydrogen-poor zones with VLT FLAMES. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 386, p. 22–46, maio 2008.

Wang, M.-Y.; Hasegawa, T. I.; Kwok, S. The Detection of a Molecular Bipolar Flow in the Multipolar Planetary Nebula NGC 2440. **Astrophysical Journal**, v. 673, p. 264–270, jan. 2008.

Wright, N. J.; Barlow, M. J.; Ercolano, B.; Rauch, T. A 3D photoionization model of the extreme planetary nebula NGC 6302. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 418, p. 370–389, nov. 2011.

Zhang, C. Y. A statistical distance scale for Galactic planetary nebulae. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 98, p. 659–678, jun. 1995.

Apêndice A – Orientação e escala das imagens de NGC 6302 e NGC 2440 obtidas pelo HST

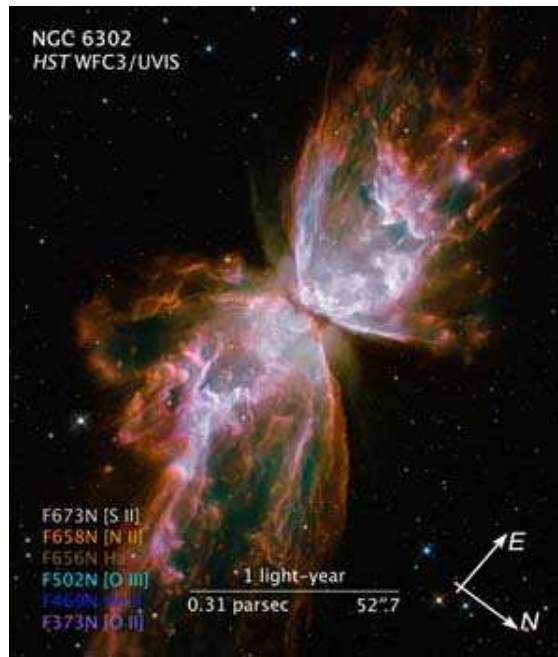


Figura A.1: Orientação e escala da imagem da Figura 1.4. Disponível em <http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2009/25/image/f/>

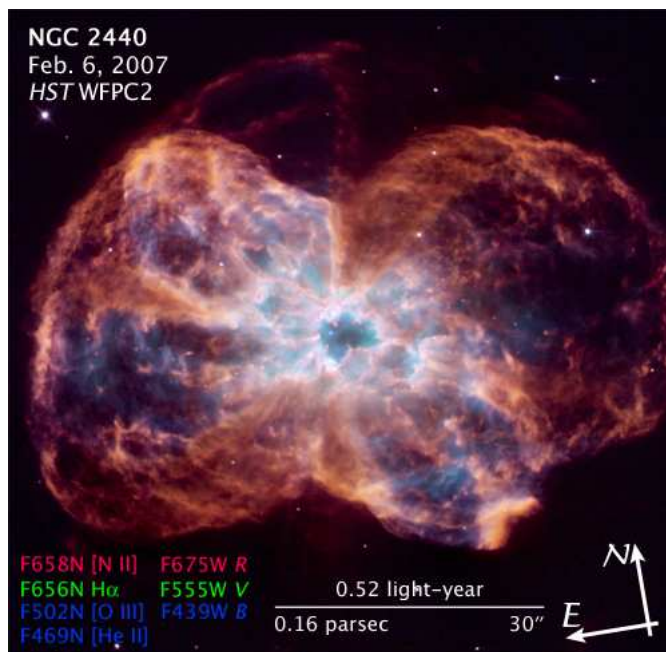


Figura A.2: Orientação e escala da imagem da Figura 1.5. Disponível em <http://archive.stsci.edu/prepds/heritage/ngc2440/>

Apêndice B – Perfis espaciais para NGC 6302

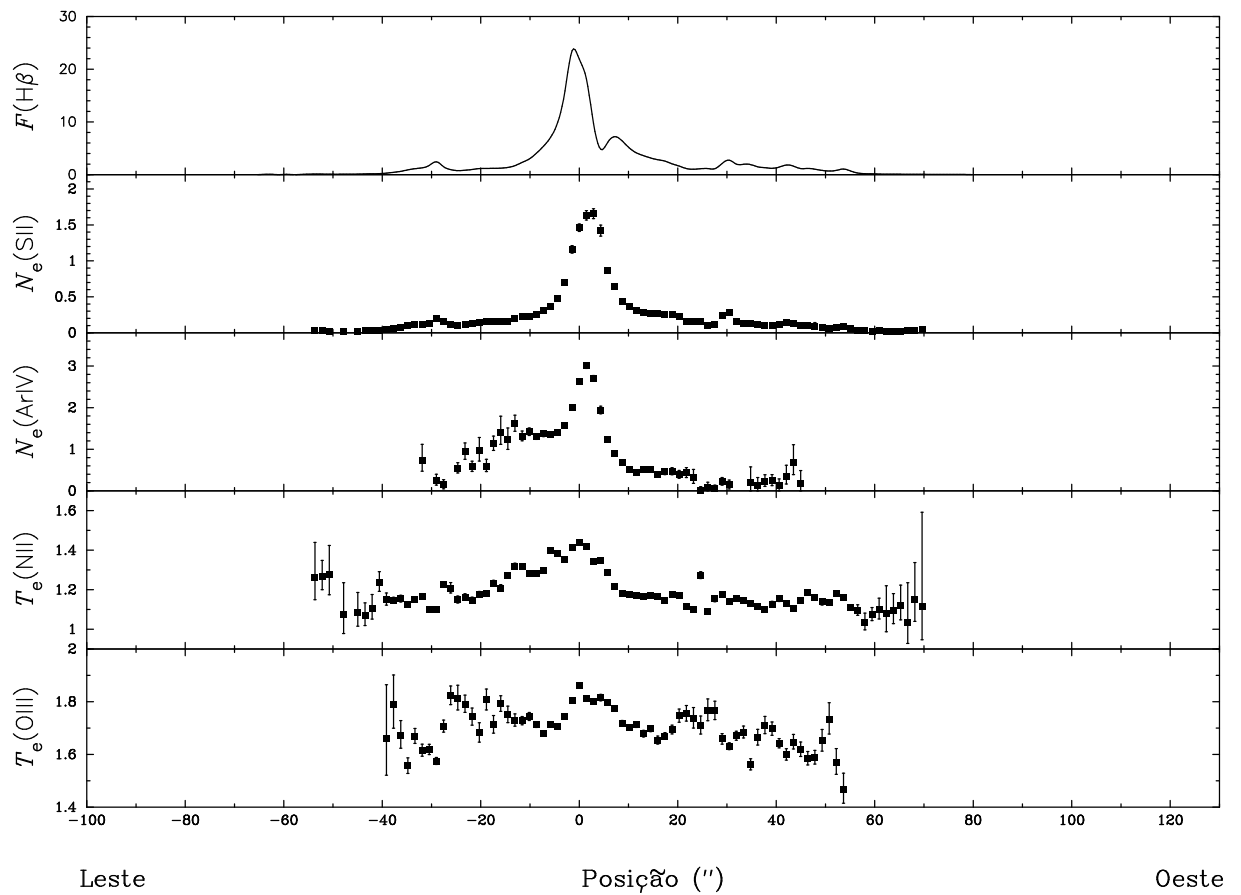
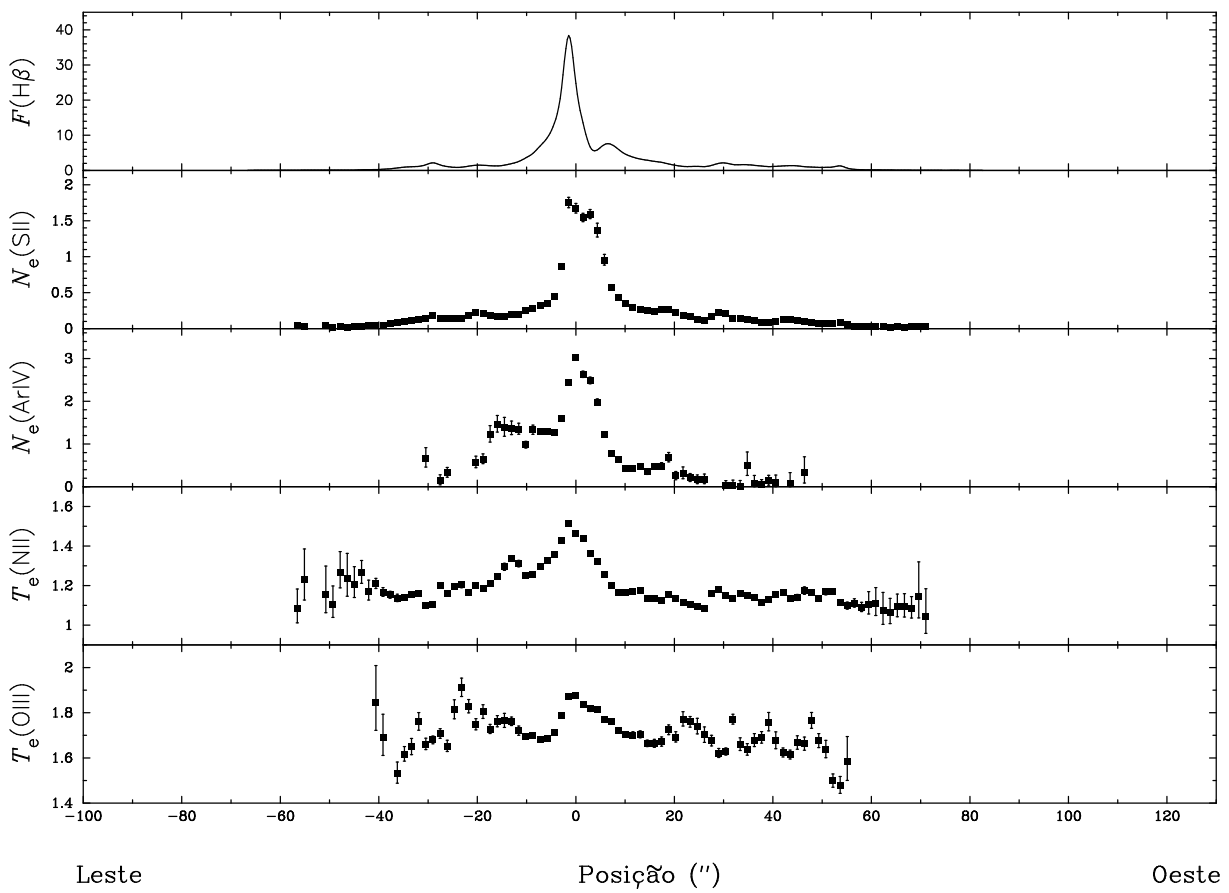


Figura B.1: NGC 6302 - Perfis espaciais de $F(\text{H}\beta)$ (em unidades de $10^{-14} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$), $N_e(\text{SII})$ (em unidades de 10^4 cm^{-3}), $N_e(\text{ArIV})$ (em unidades de 10^4 cm^{-3}), $T_e(\text{NII})$ (em unidades 10^4 K) e $T_e(\text{OIII})$ (em unidades 10^4 K) ao longo de $\Delta\delta = 6'' \text{ S}$. A posição no eixo horizontal é relativa à estrela central (Szyszka et al., 2009).

Figura B.2: Figura B.1, mas para $\Delta\delta = 5''$ S.

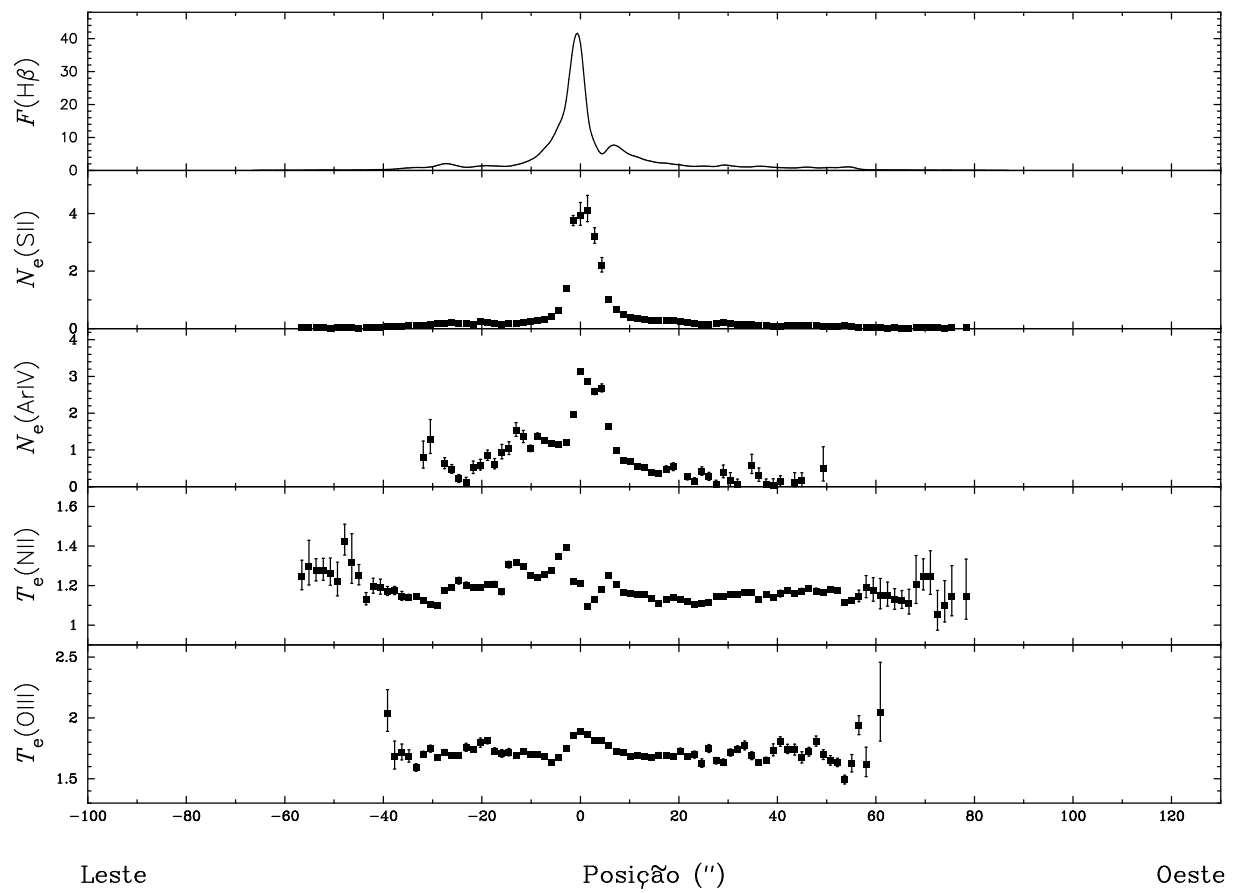
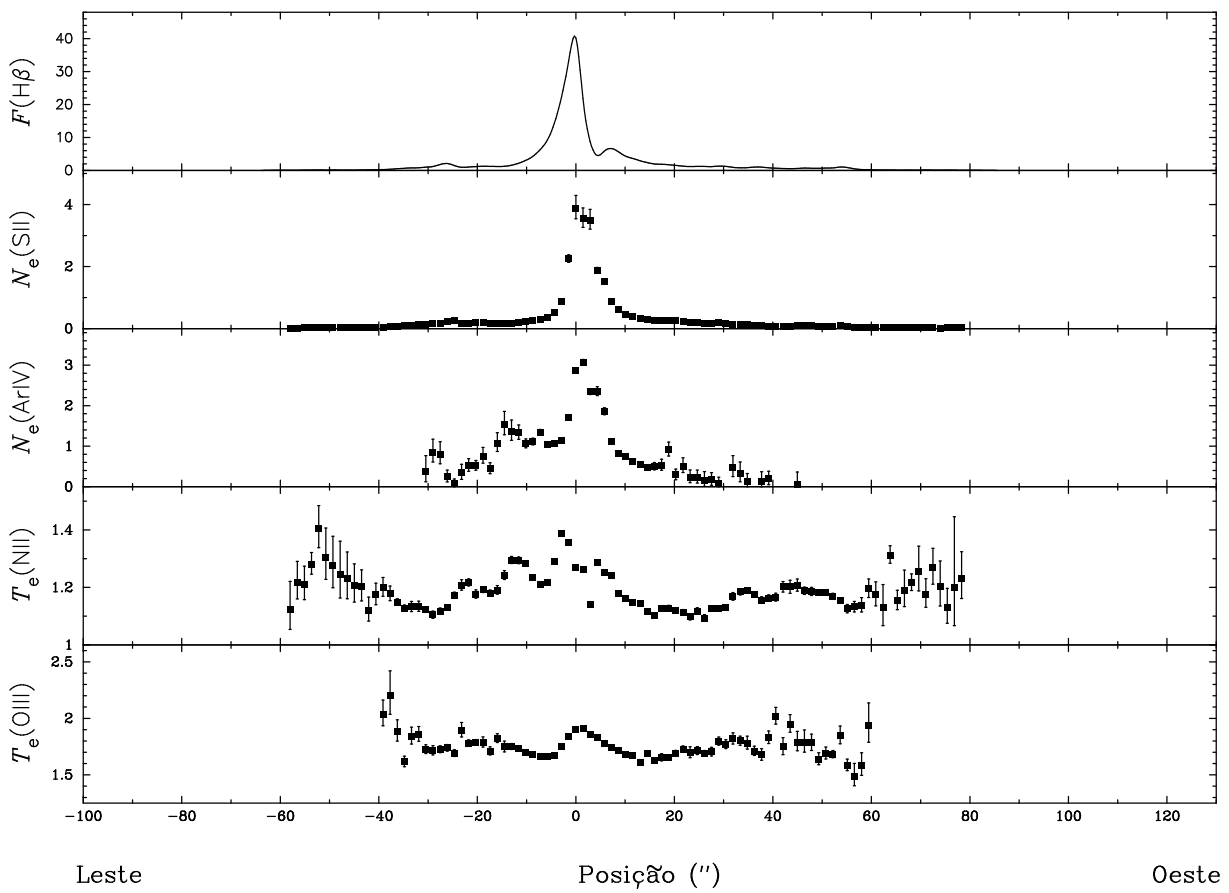
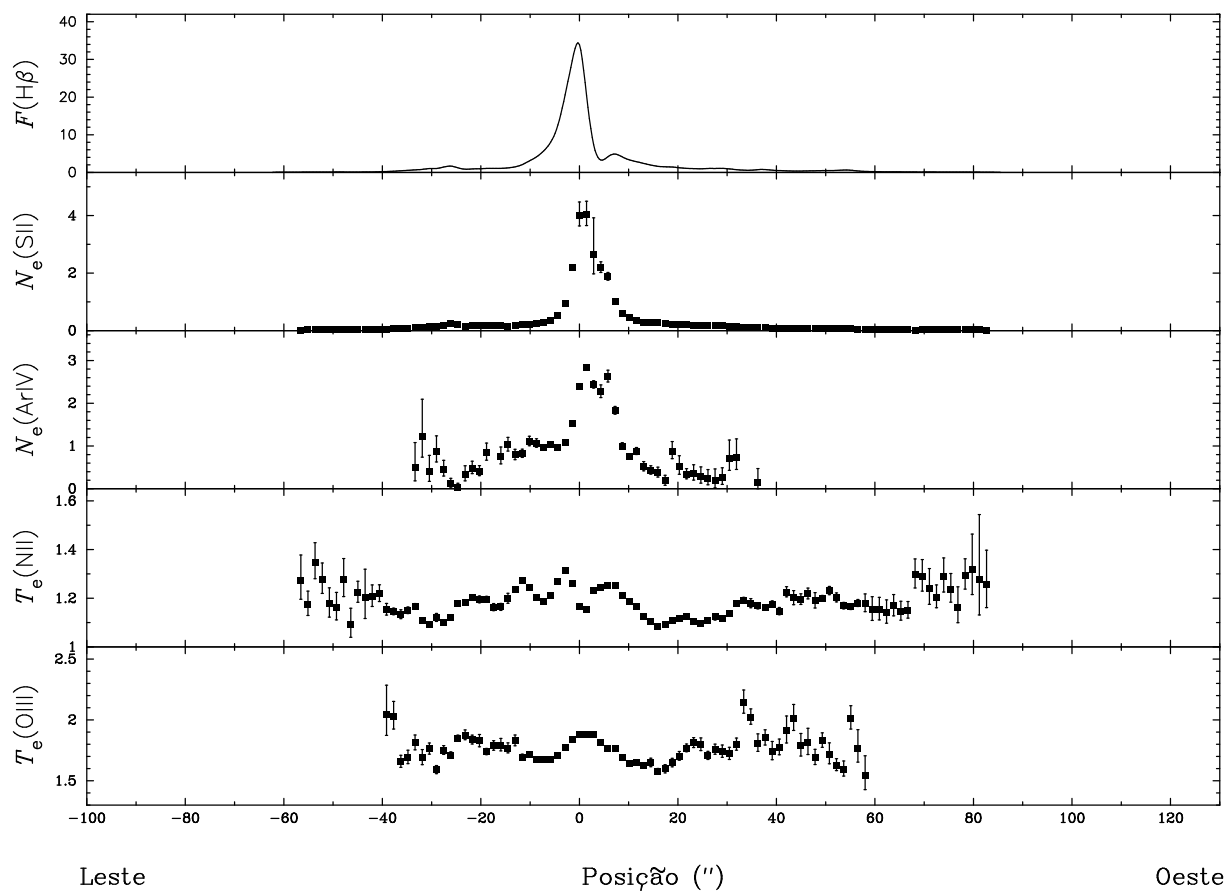
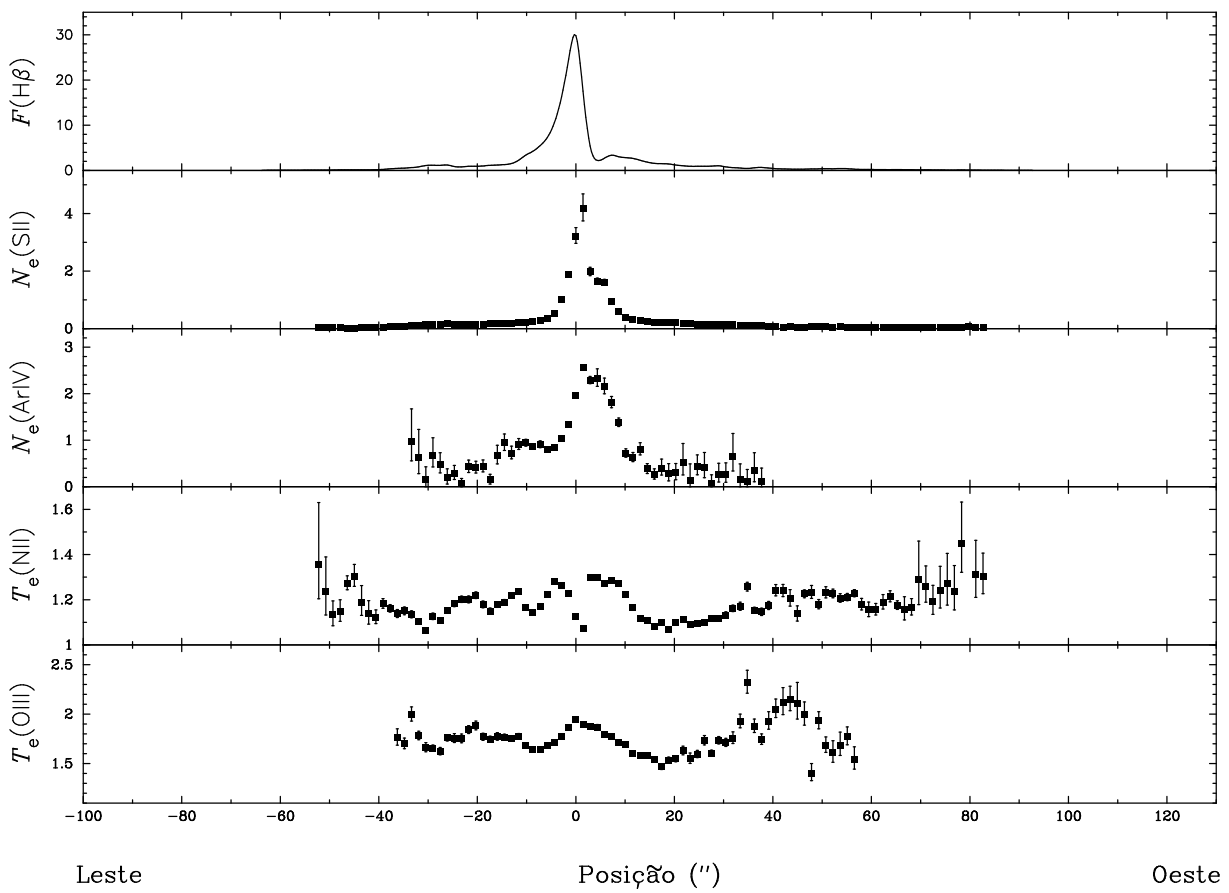
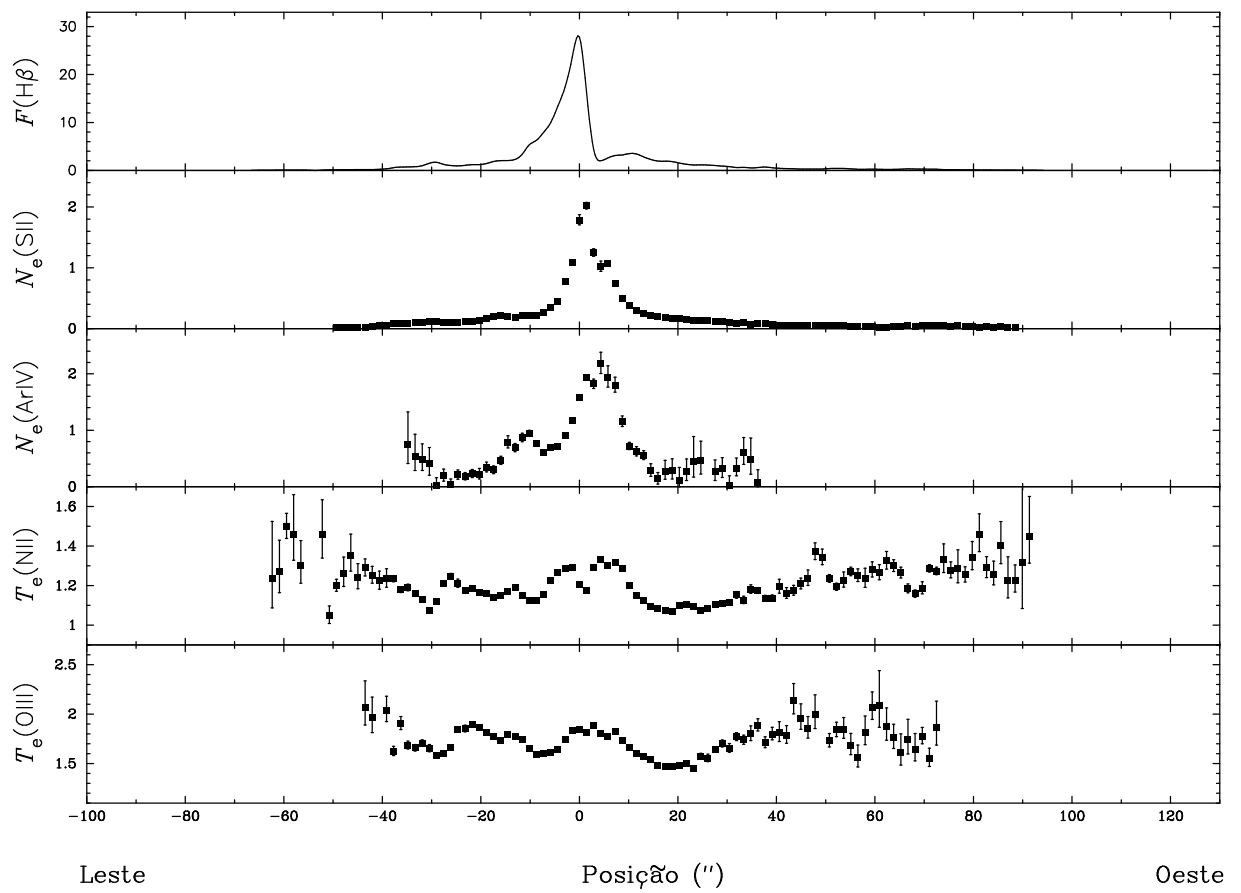


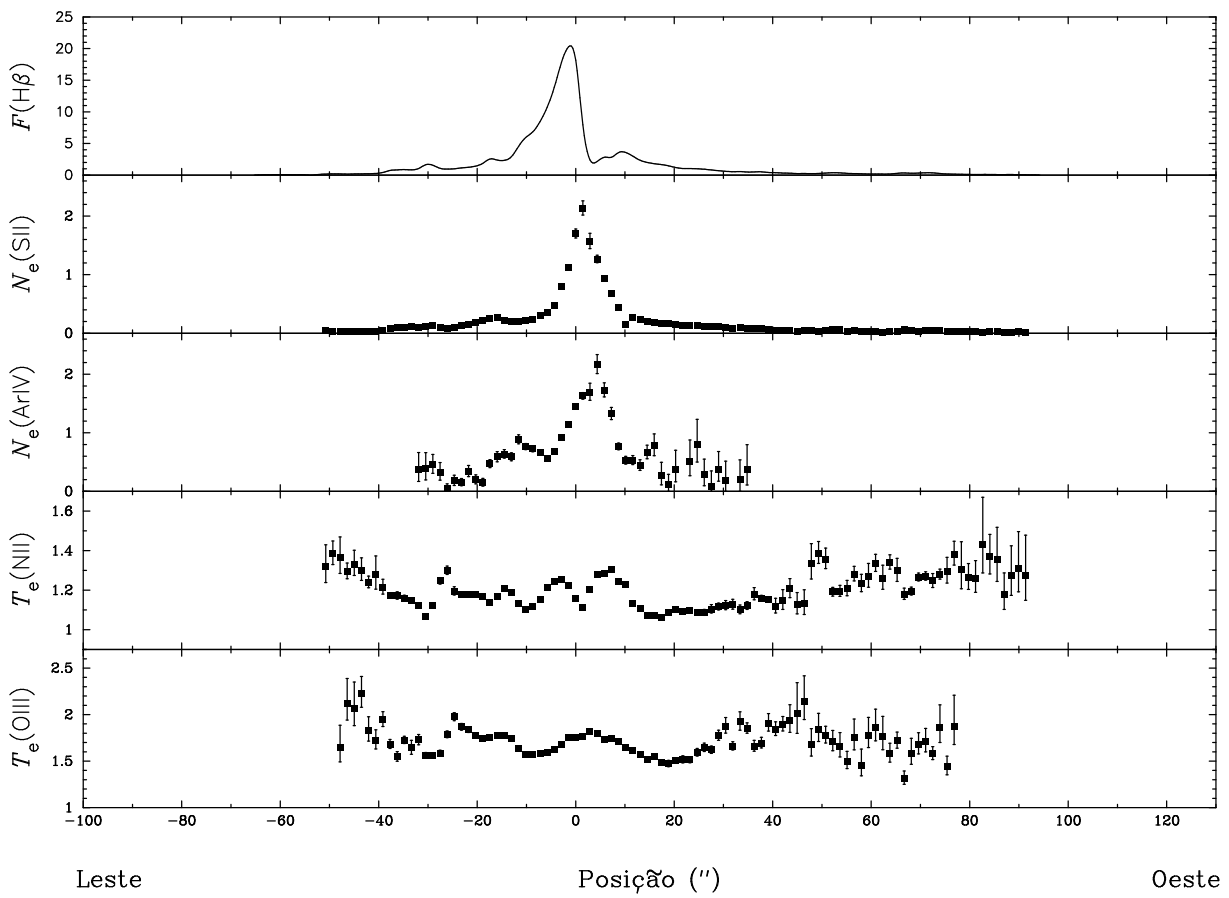
Figura B.3: Figura B.1, mas para $\Delta\delta = 4''$ S.

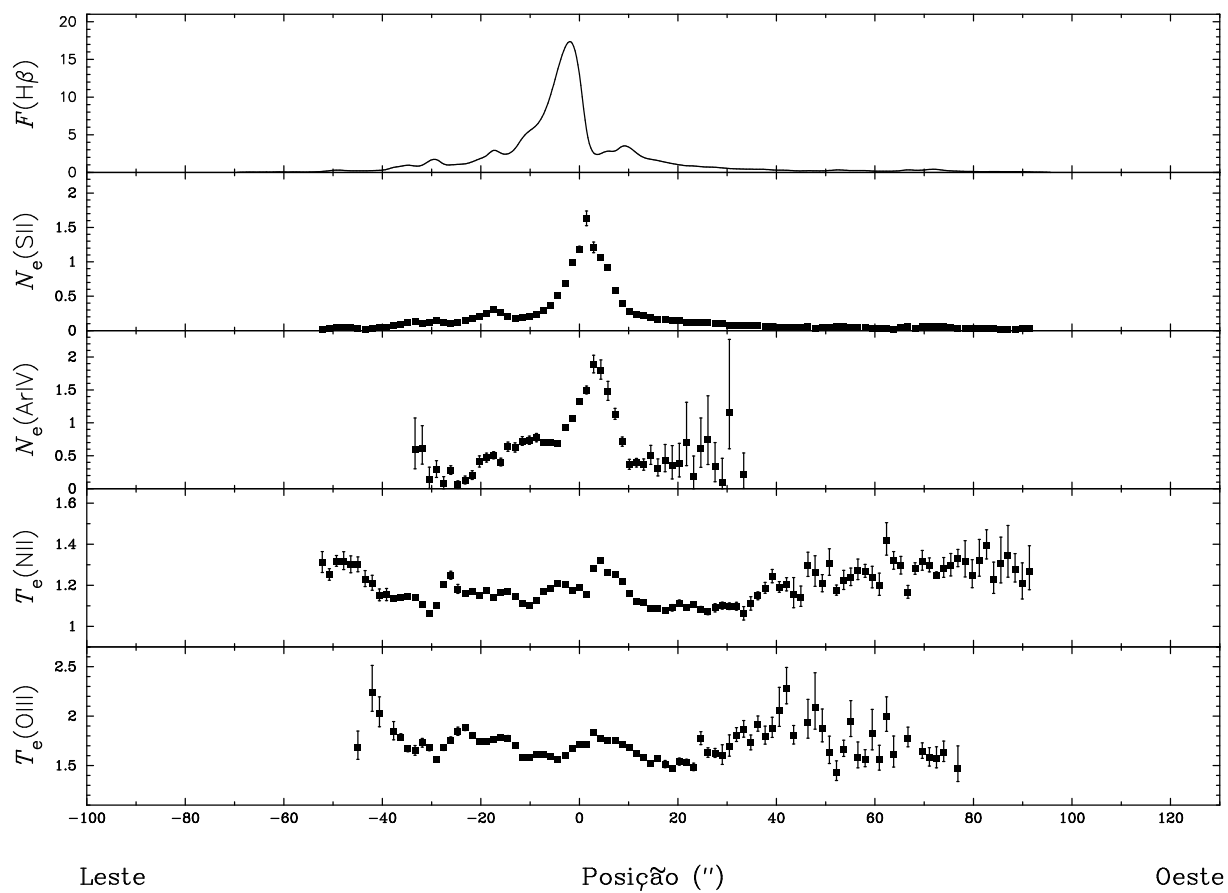
Figura B.4: Figura B.1, mas para $\Delta\delta = 3''$ S.

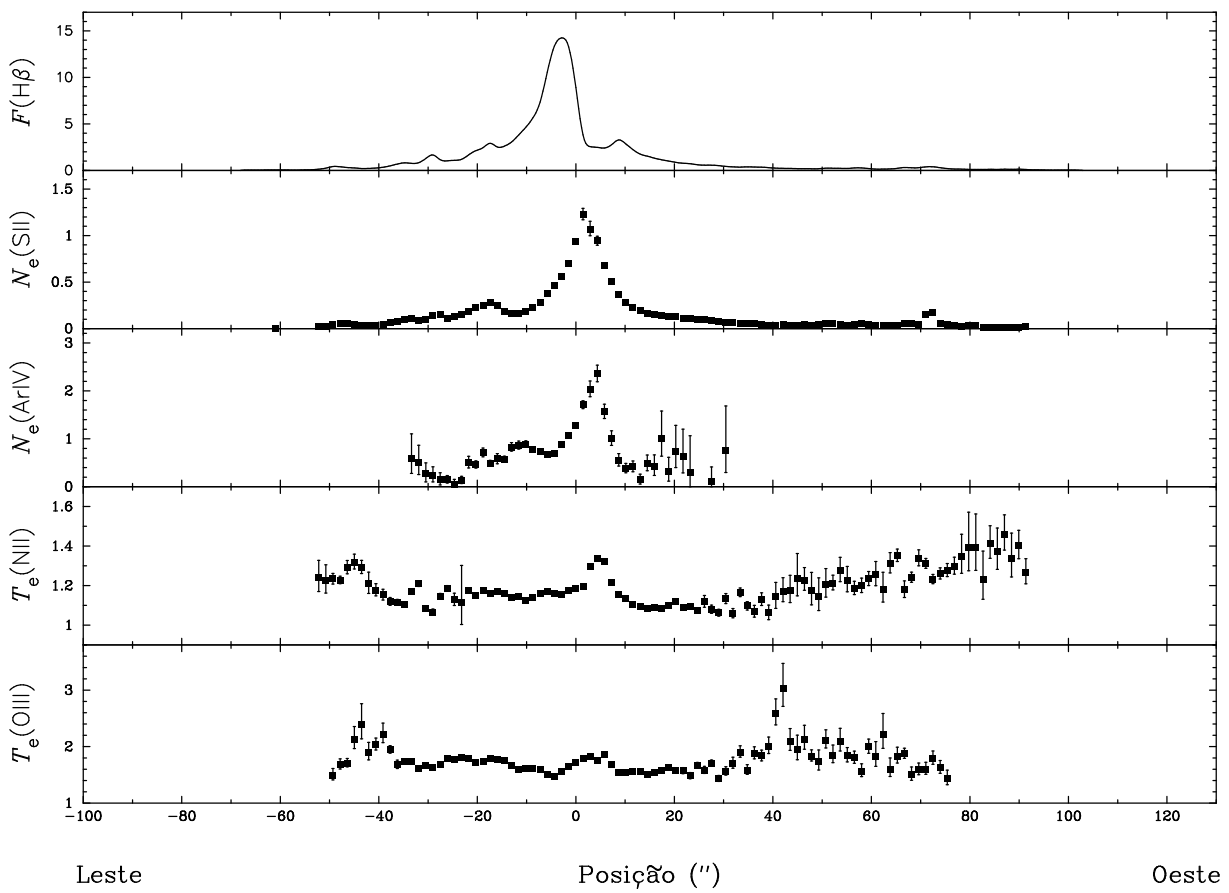
Figura B.5: Figura B.1, mas para $\Delta\delta = 2''$ S.

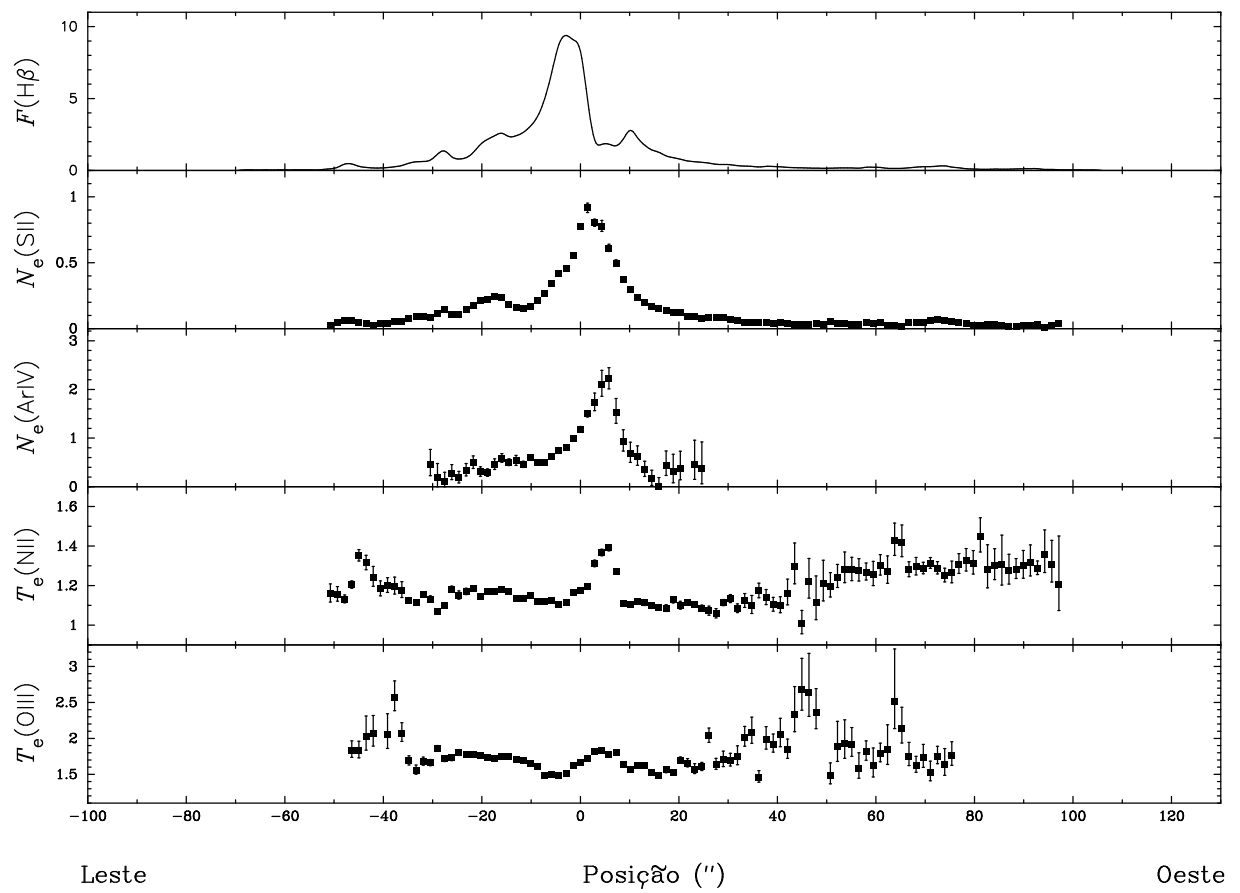
Figura B.6: Figura B.1, mas para $\Delta\delta = 1''$ S.

Figura B.7: Figura B.1, mas para $\Delta\delta = 0''$.

Figura B.8: Figura B.1, mas para $\Delta\delta = 1''$ N.

Figura B.9: Figura B.1, mas para $\Delta\delta = 2''$ N.

Figura B.10: Figura B.1, mas para $\Delta\delta = 3''$ N.

Figura B.11: Figura B.1, mas para $\Delta\delta = 4''$ N.

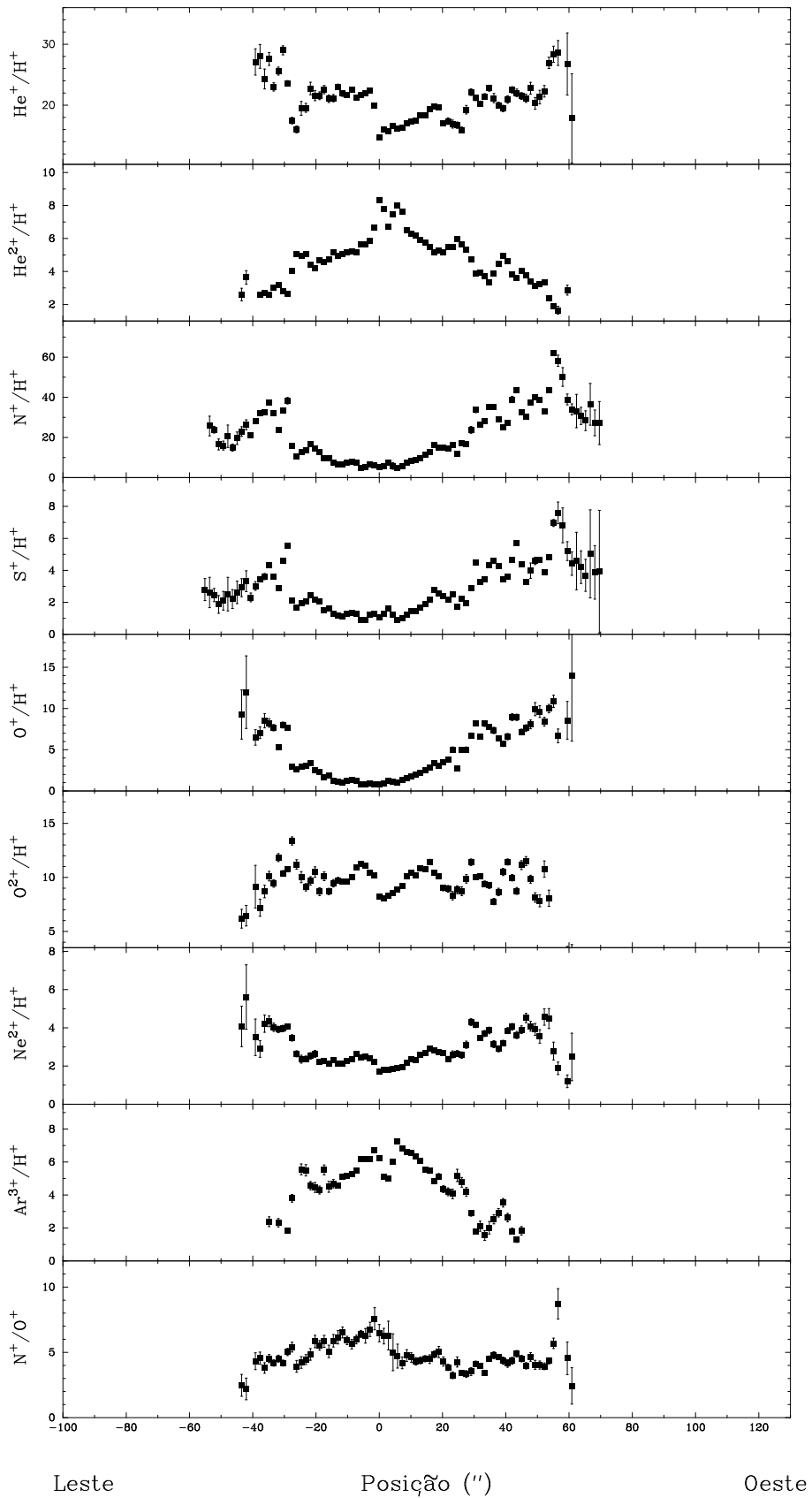


Figura B.12: NGC 6302 - Perfis espaciais de $\text{He}^+/\text{H}^+ \times 10^2$, $\text{He}^{2+}/\text{H}^+ \times 10^2$, $\text{N}^+/\text{H}^+ \times 10^5$, $\text{S}^+/\text{H}^+ \times 10^6$, $\text{O}^+/\text{H}^+ \times 10^5$, $\text{O}^{2+}/\text{H}^+ \times 10^5$, $\text{Ne}^{2+}/\text{H}^+ \times 10^5$, $\text{Ar}^{3+}/\text{H}^+ \times 10^7$ e N^+/O^+ ao longo de $\Delta\delta = 6''$ S. A posição no eixo horizontal é relativa à estrela central (Szyzka et al., 2009).

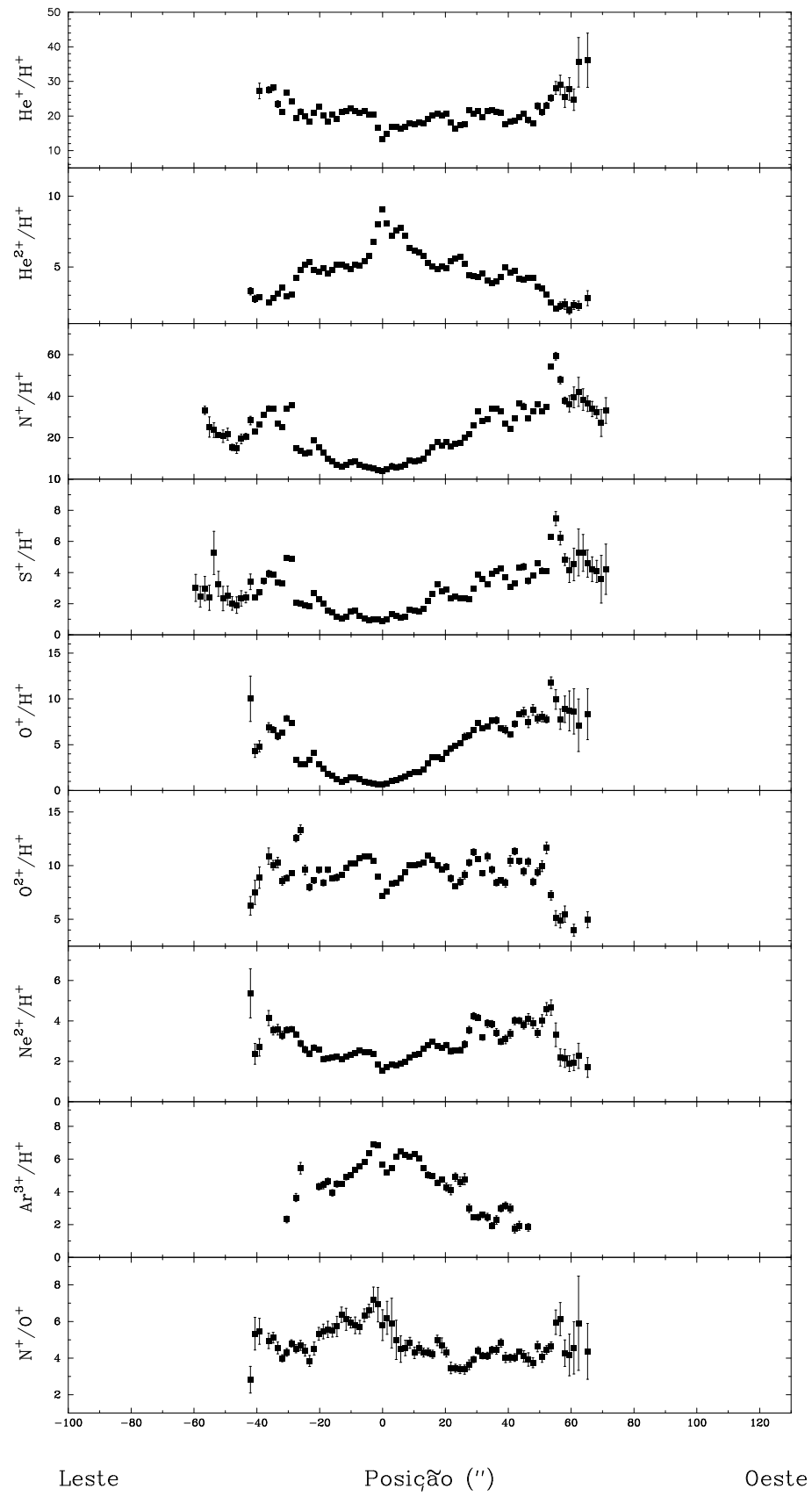


Figura B.13: Figura B.12, mas para $\Delta\delta = 5''$ S.

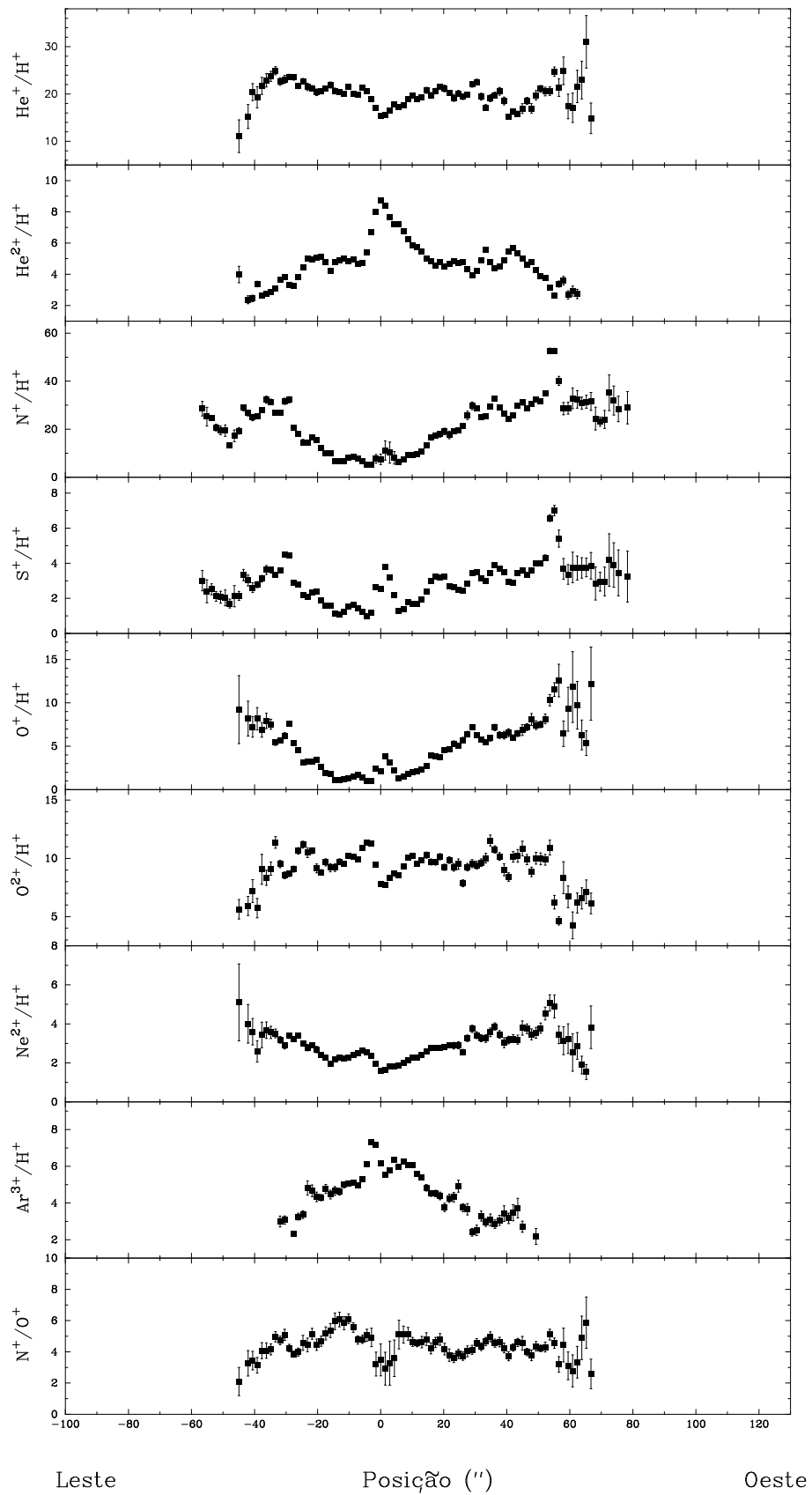


Figura B.14: Figura B.12, mas para $\Delta\delta = 4''$ S.

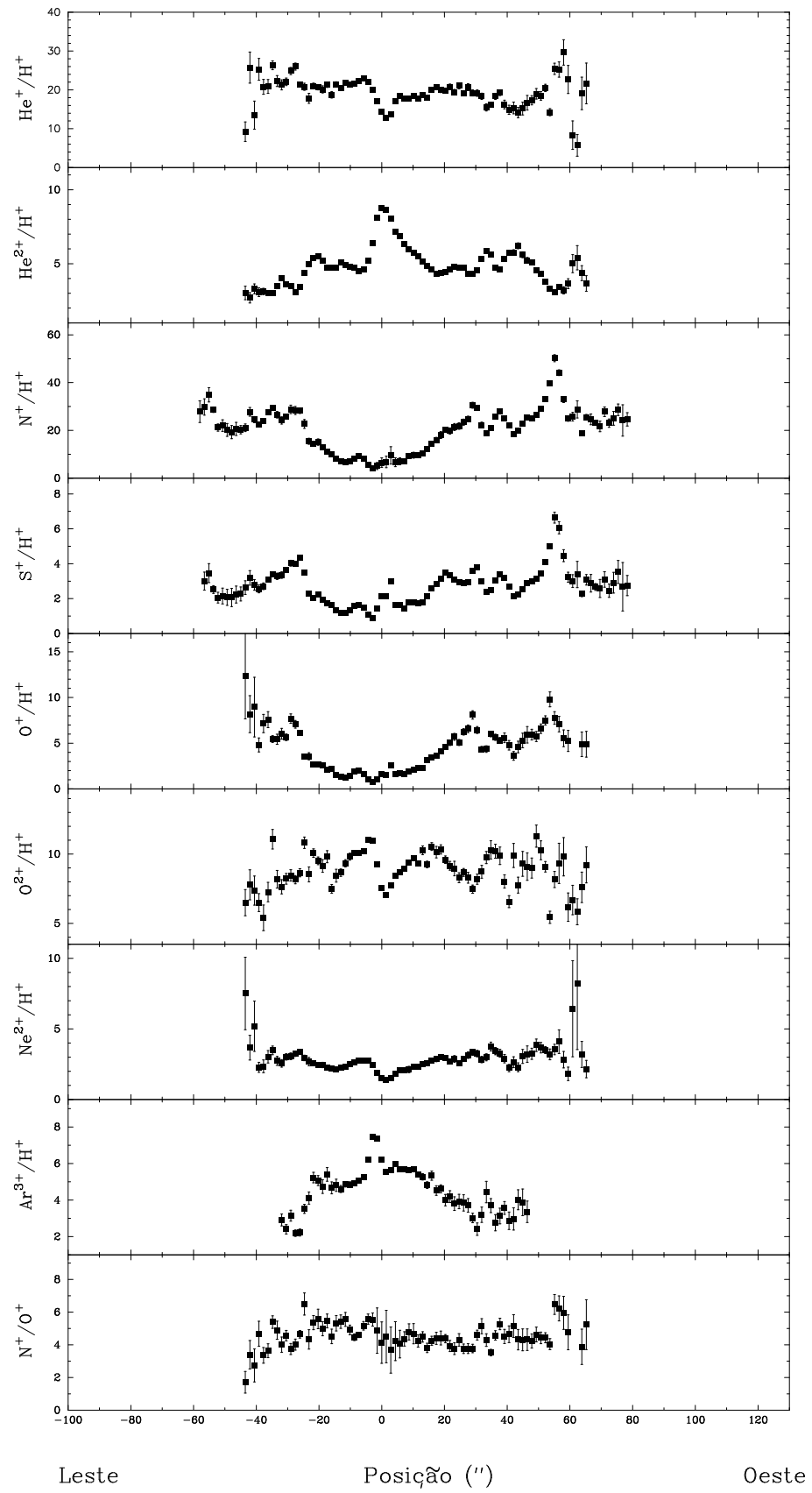


Figura B.15: Figura B.12, mas para $\Delta\delta = 3''$ S.

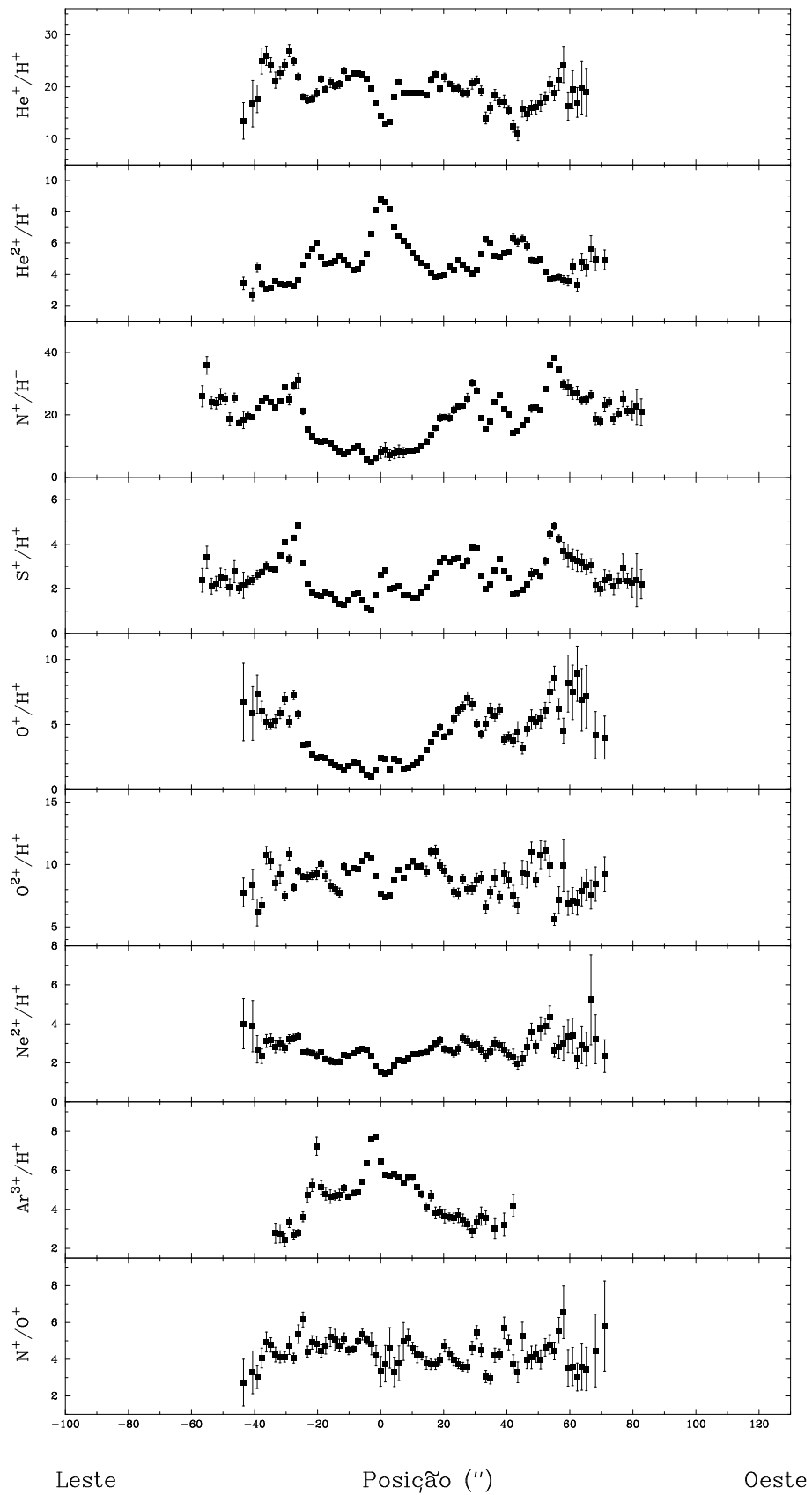


Figura B.16: Figura B.12, mas para $\Delta\delta = 2''$ S.

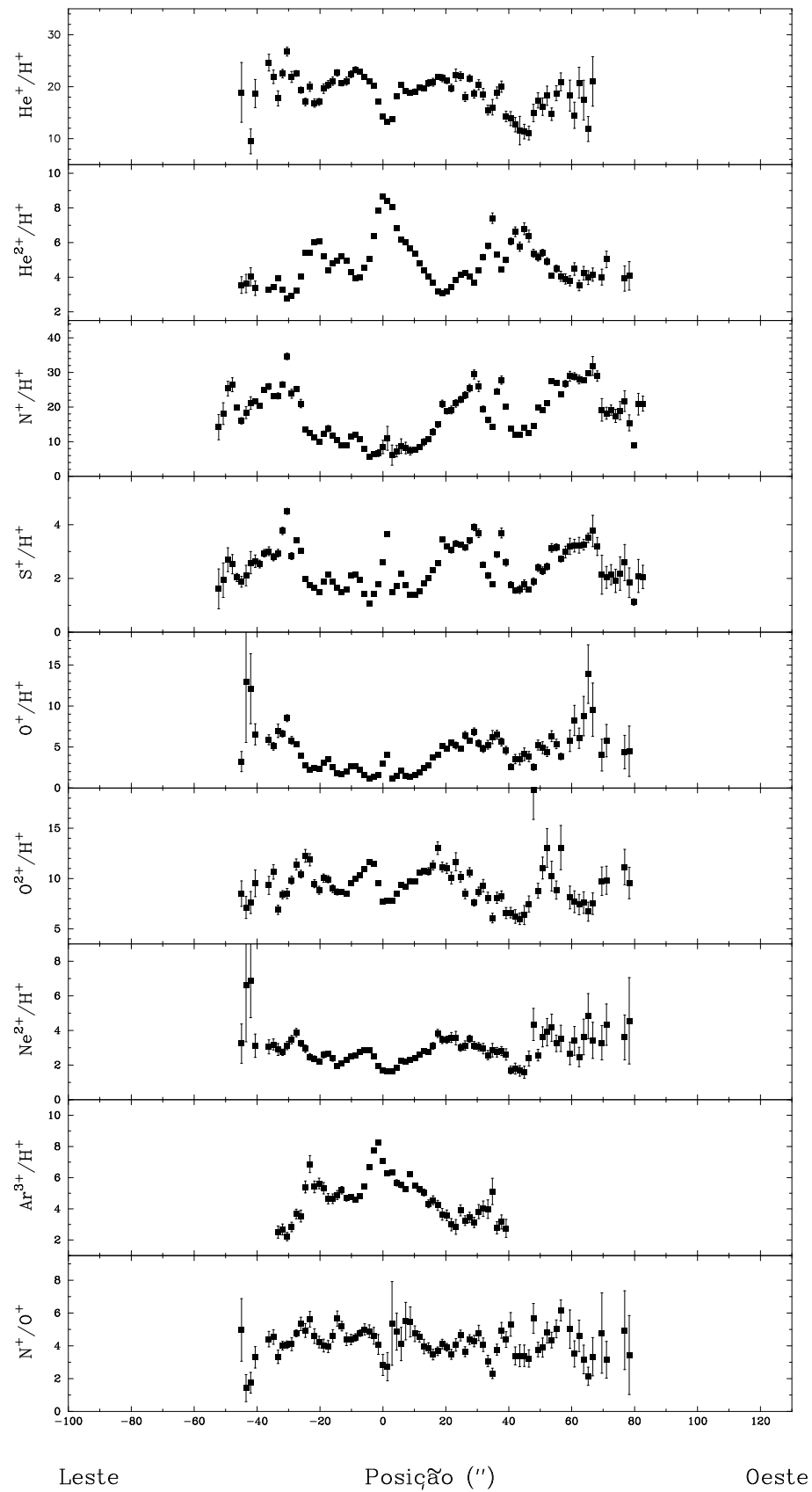


Figura B.17: Figura B.12, mas para $\Delta\delta = 1''$ S.

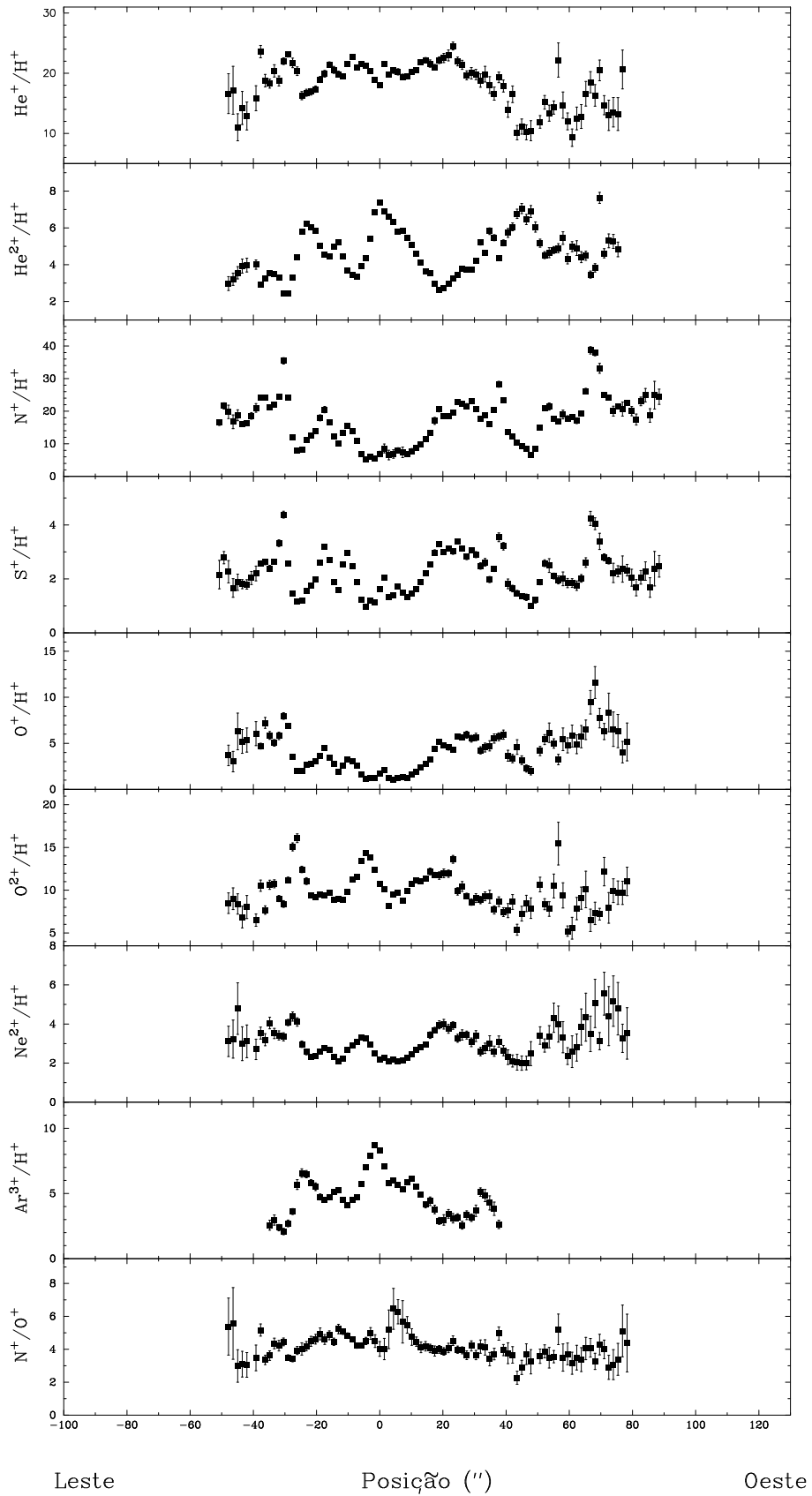


Figura B.18: Figura B.12, mas para $\Delta\delta = 0''$.

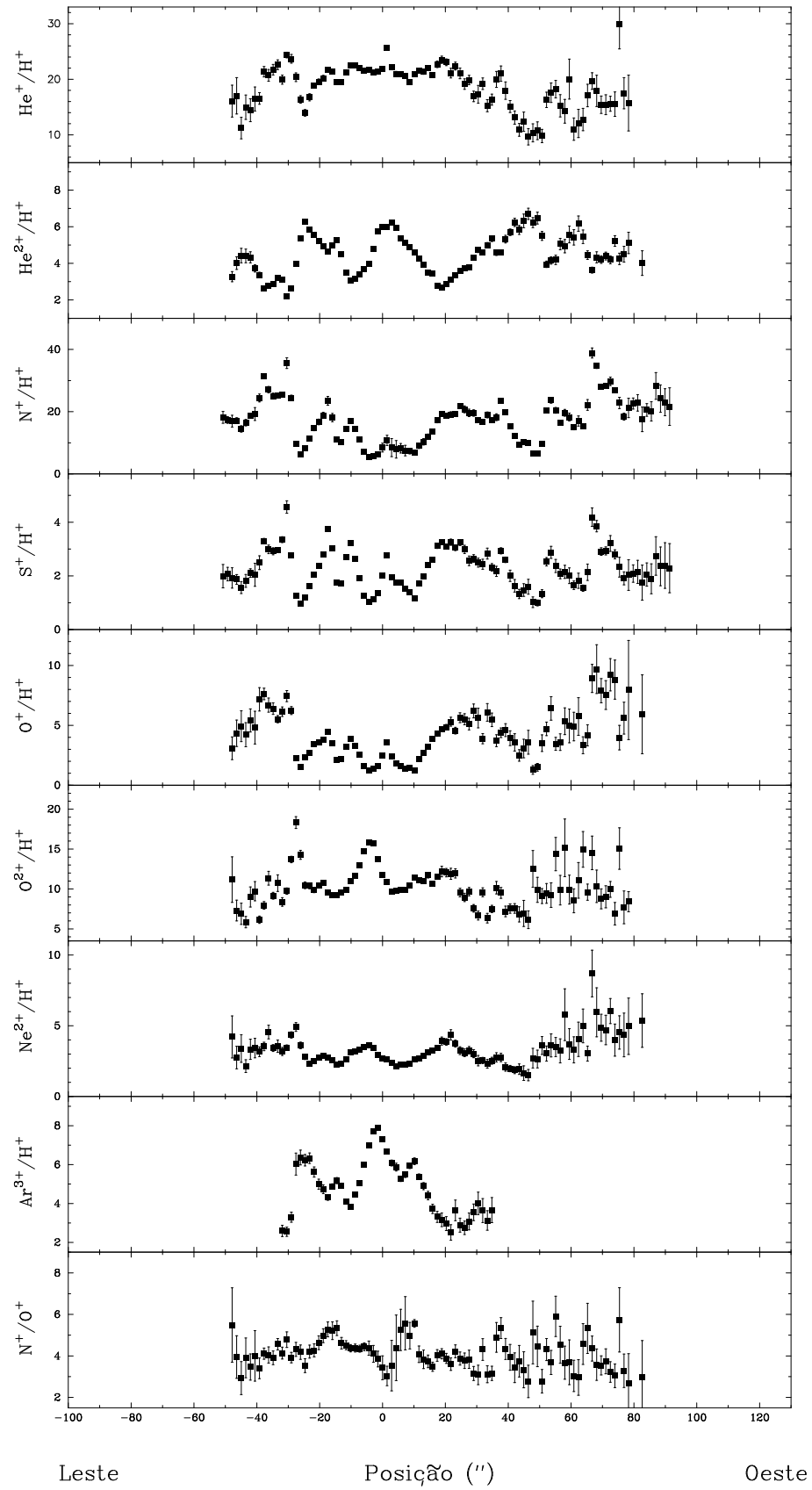


Figura B.19: Figura B.12, mas para $\Delta\delta = 1''$ N.

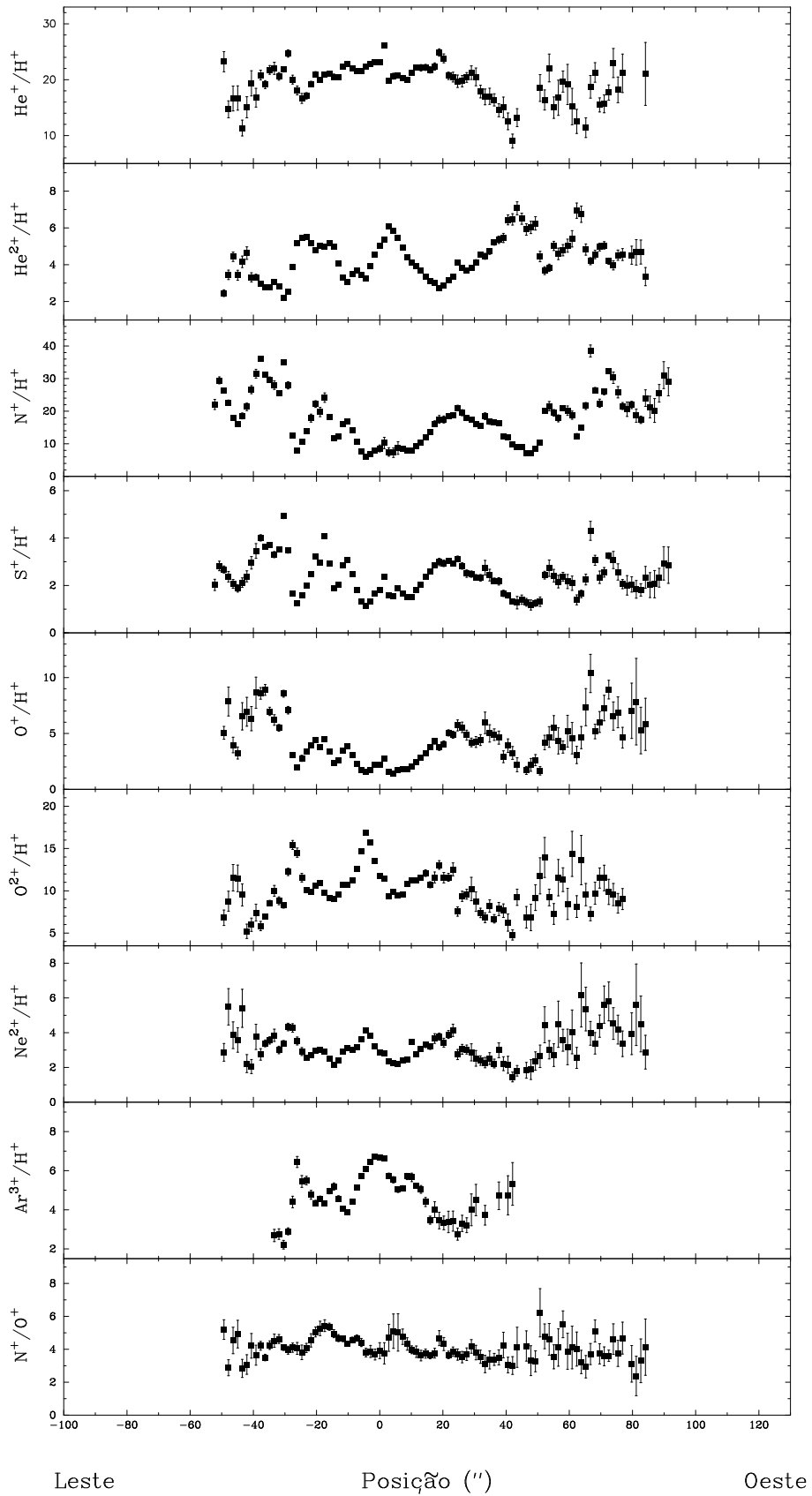


Figura B.20: Figura B.12, mas para $\Delta\delta = 2''$ N.

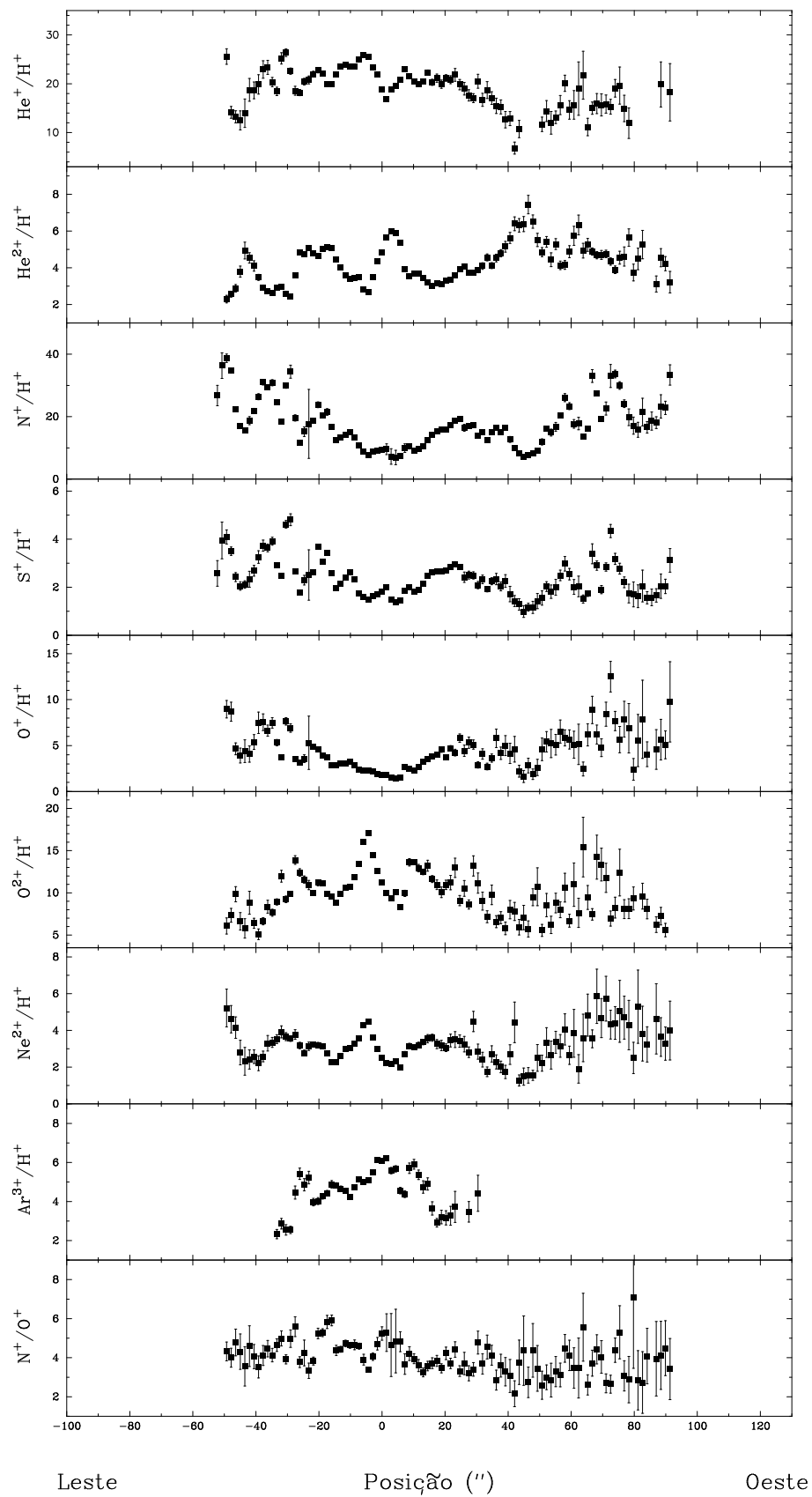


Figura B.21: Figura B.12, mas para $\Delta\delta = 3''$ N.

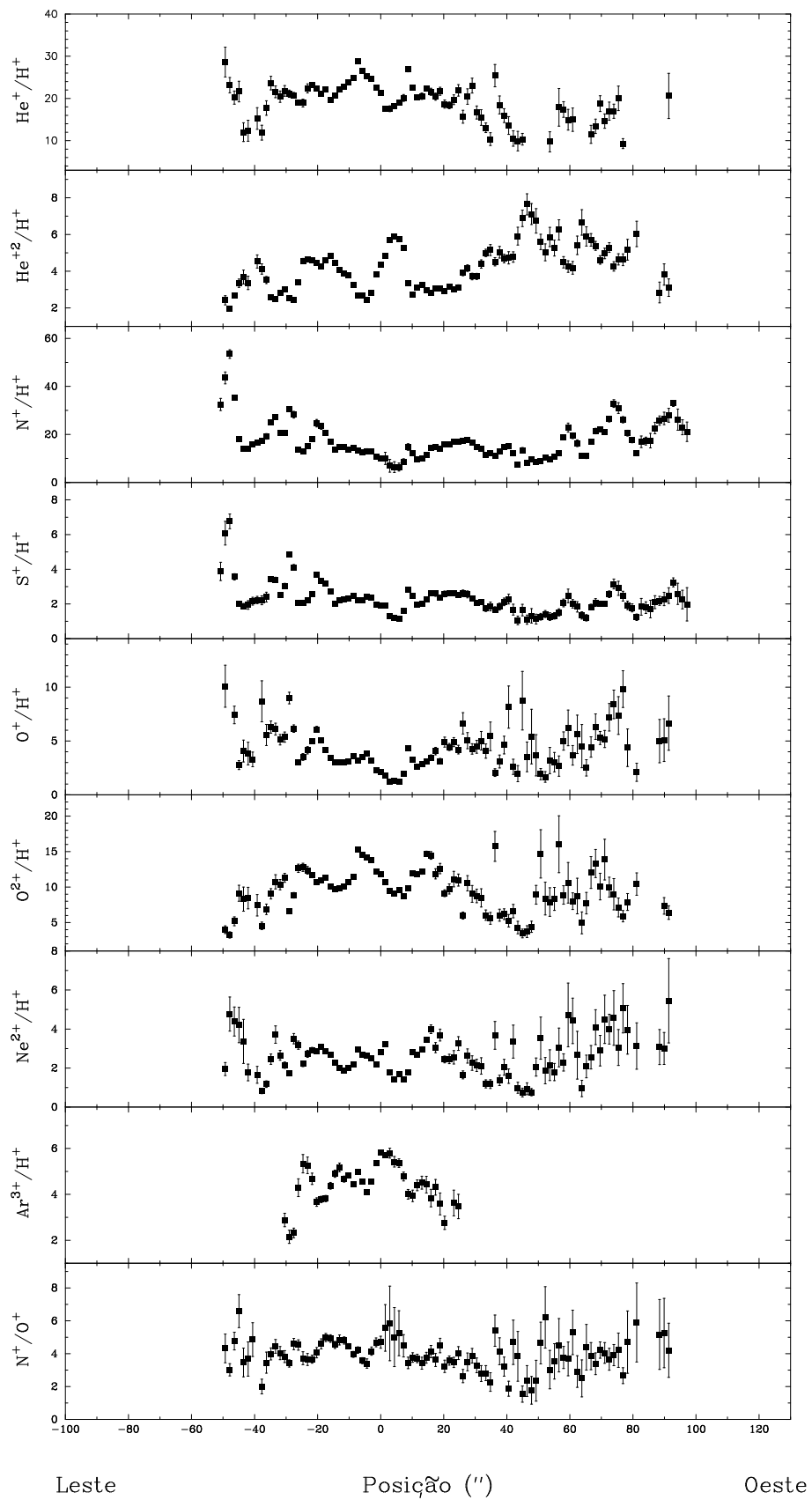


Figura B.22: Figura B.12, mas para $\Delta\delta = 4''$ N.

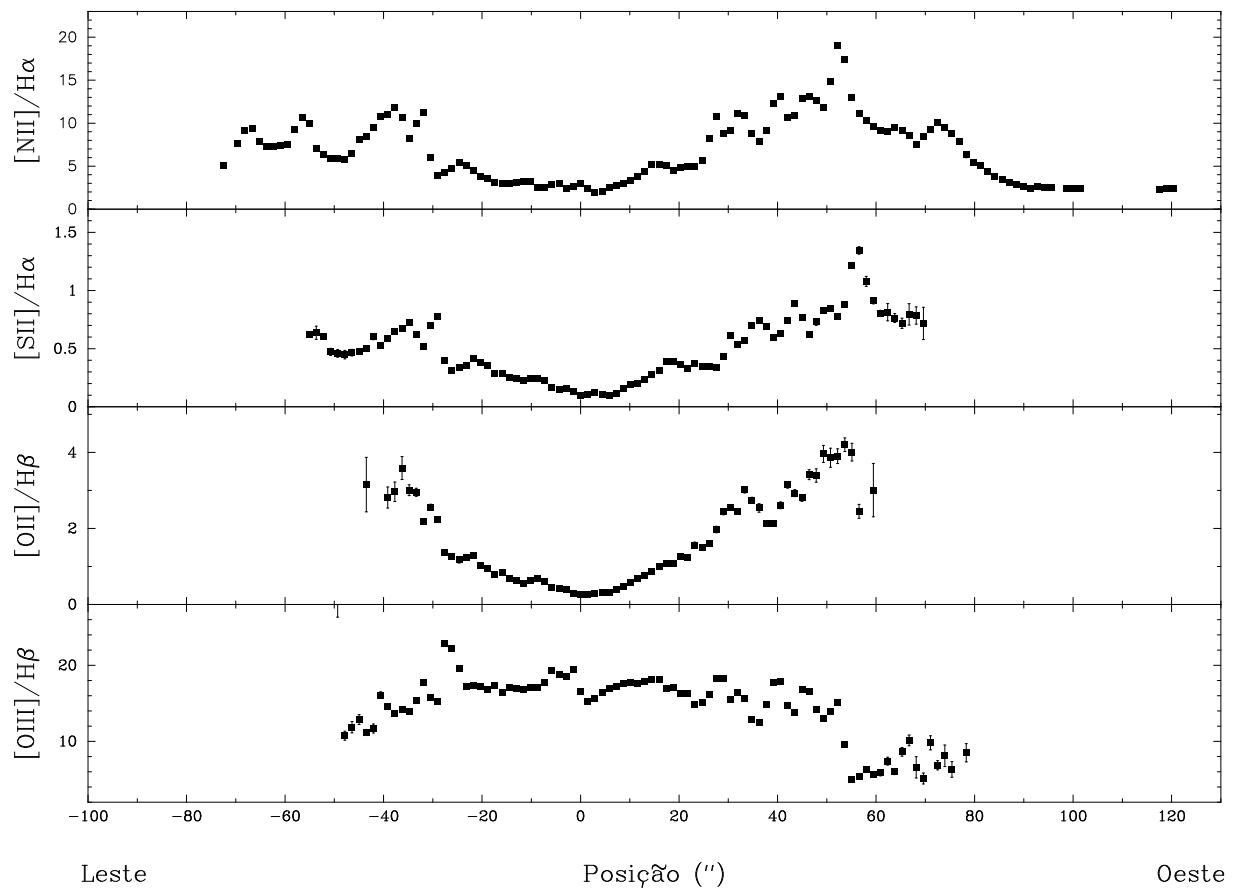
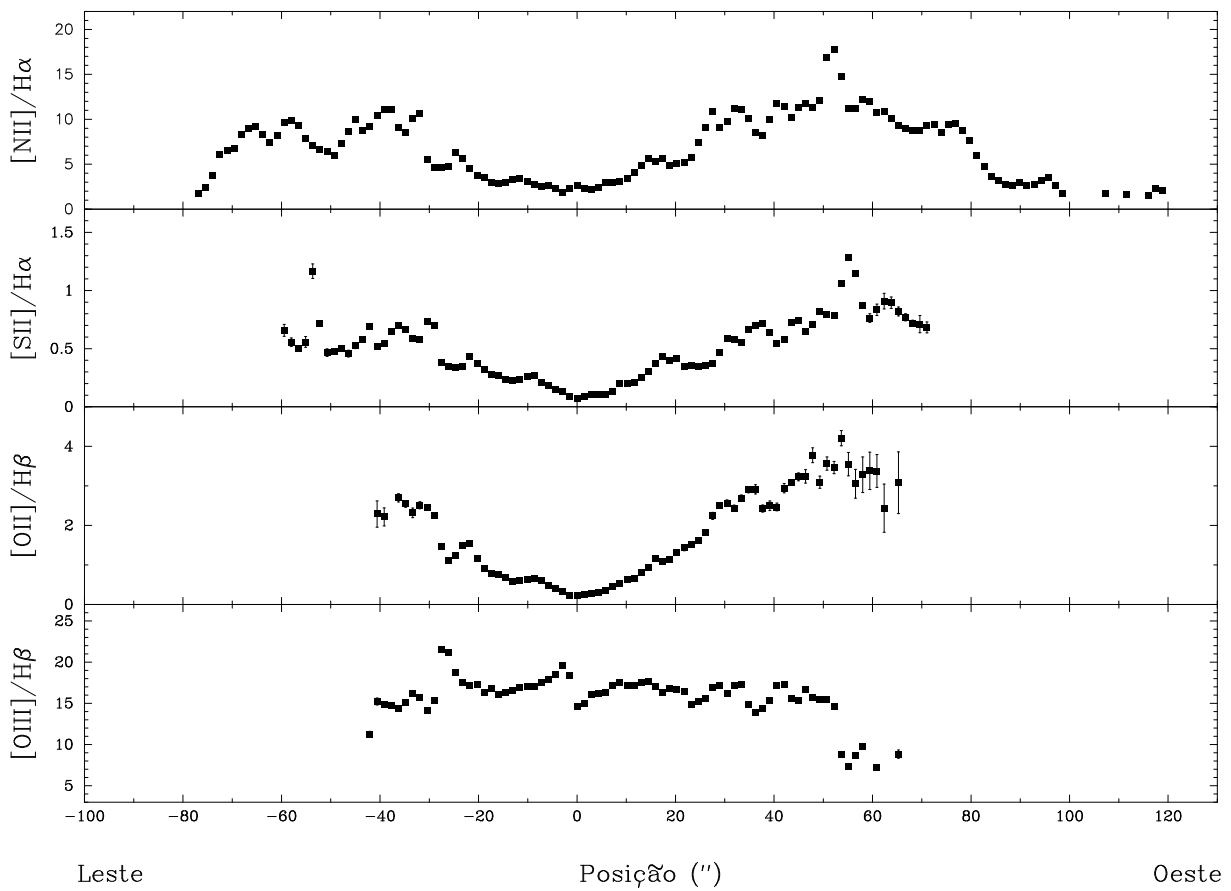
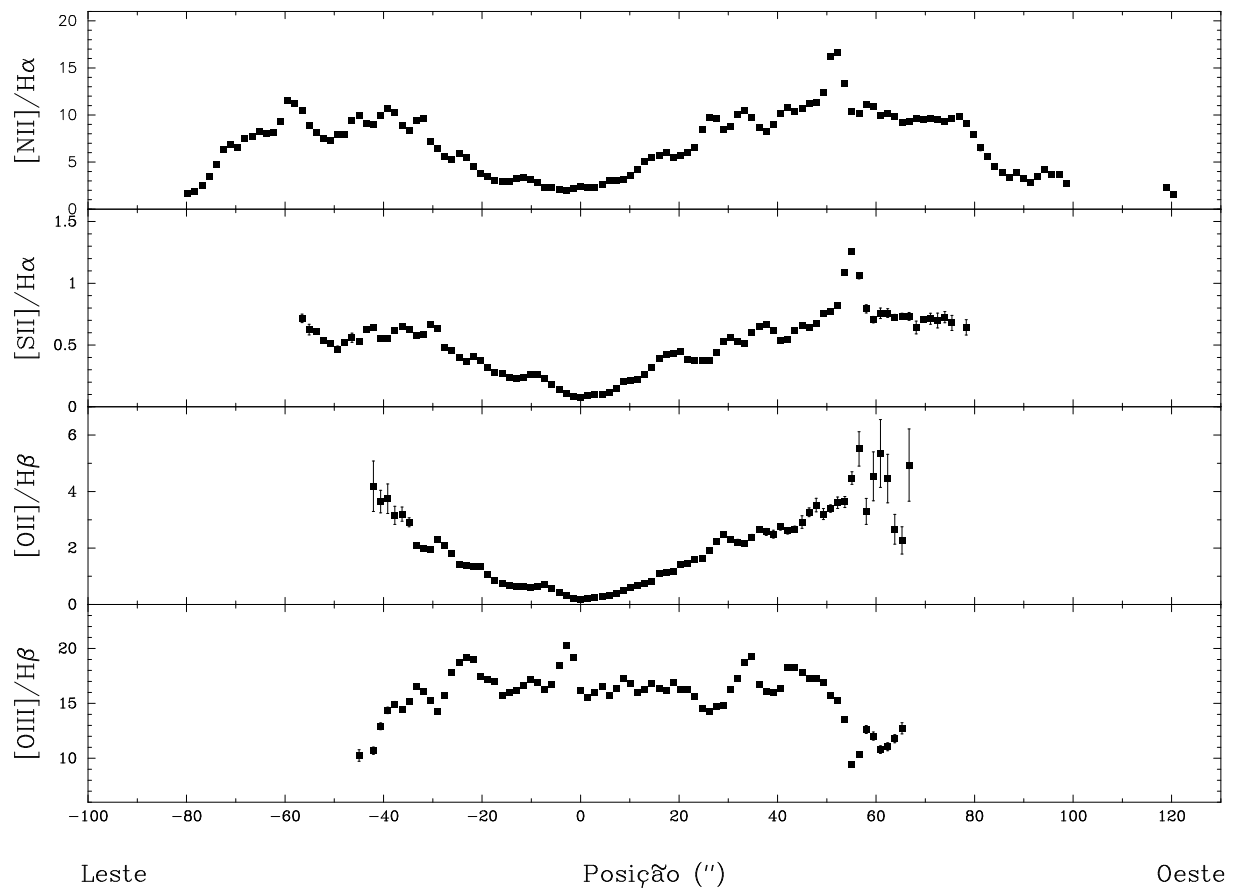
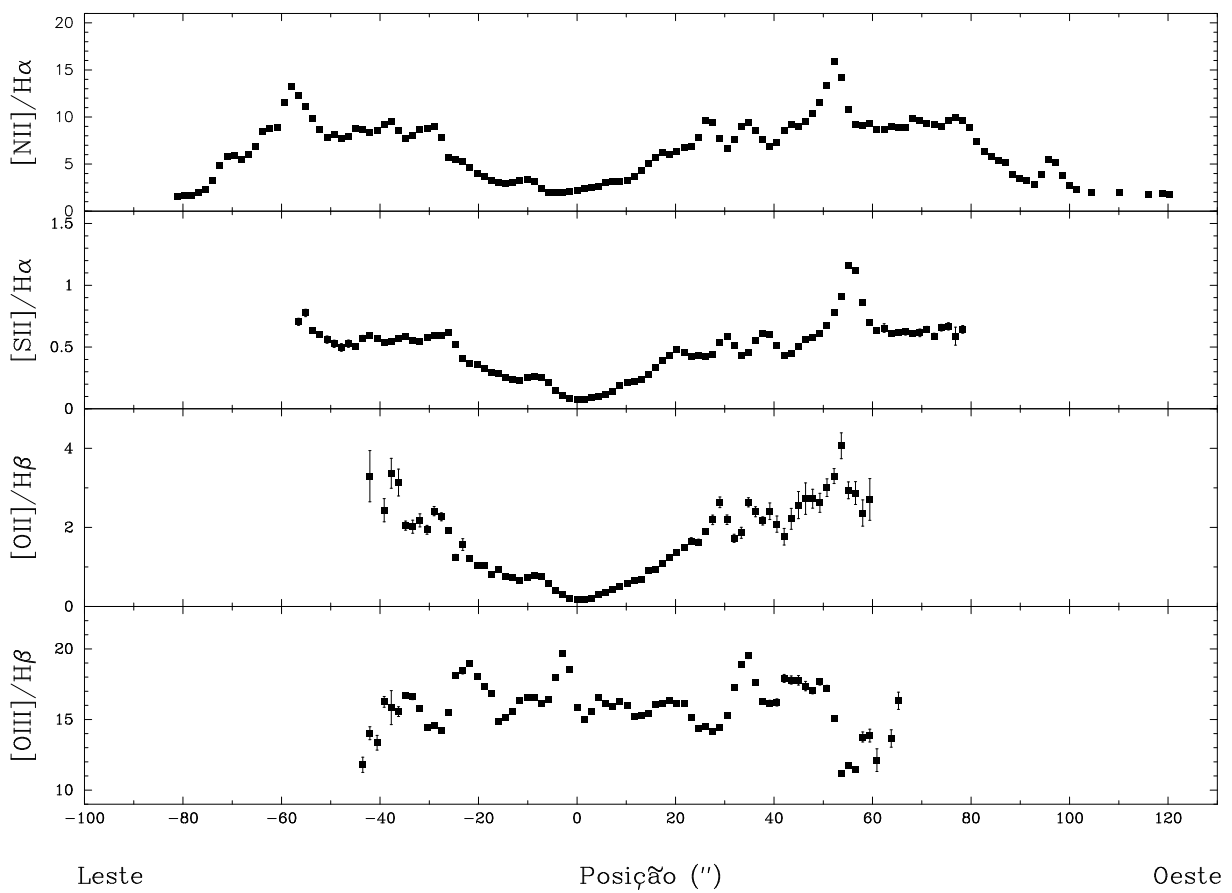
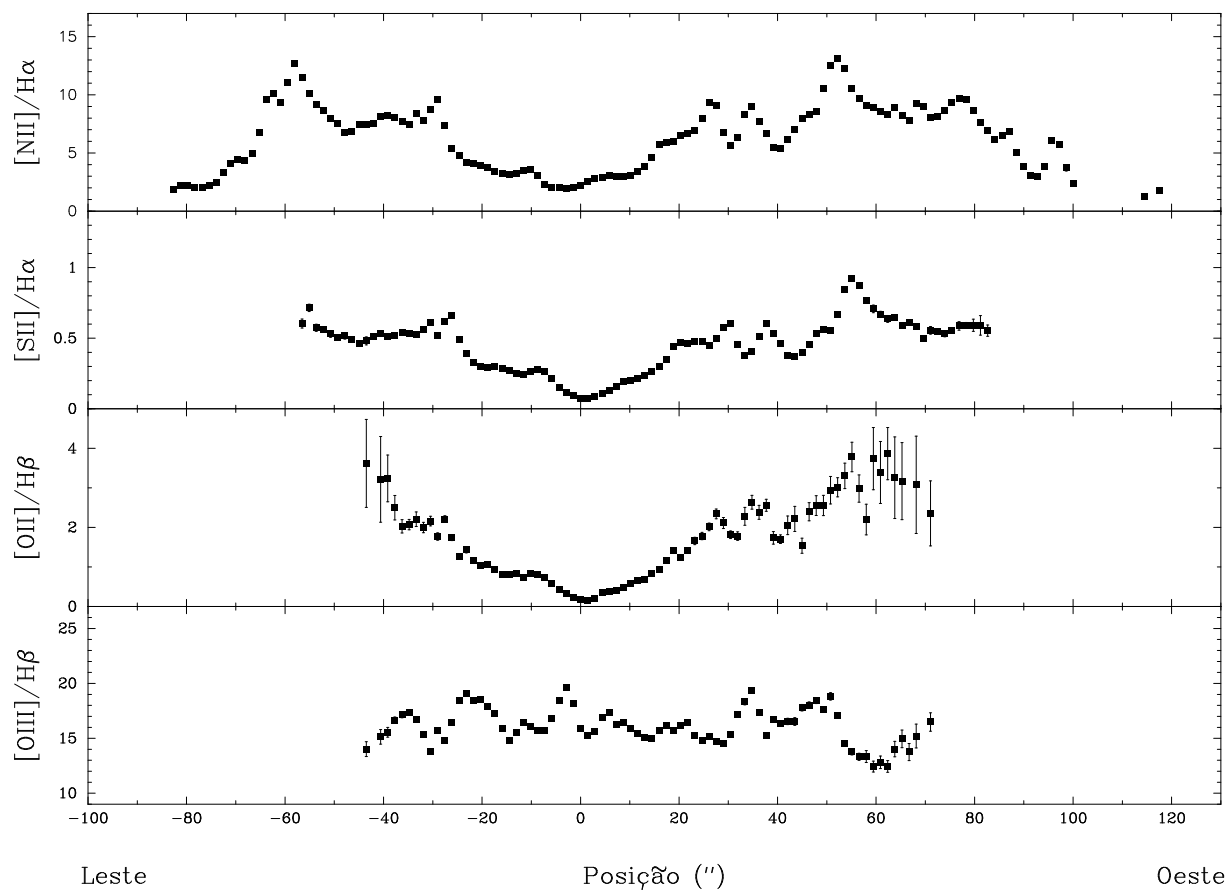


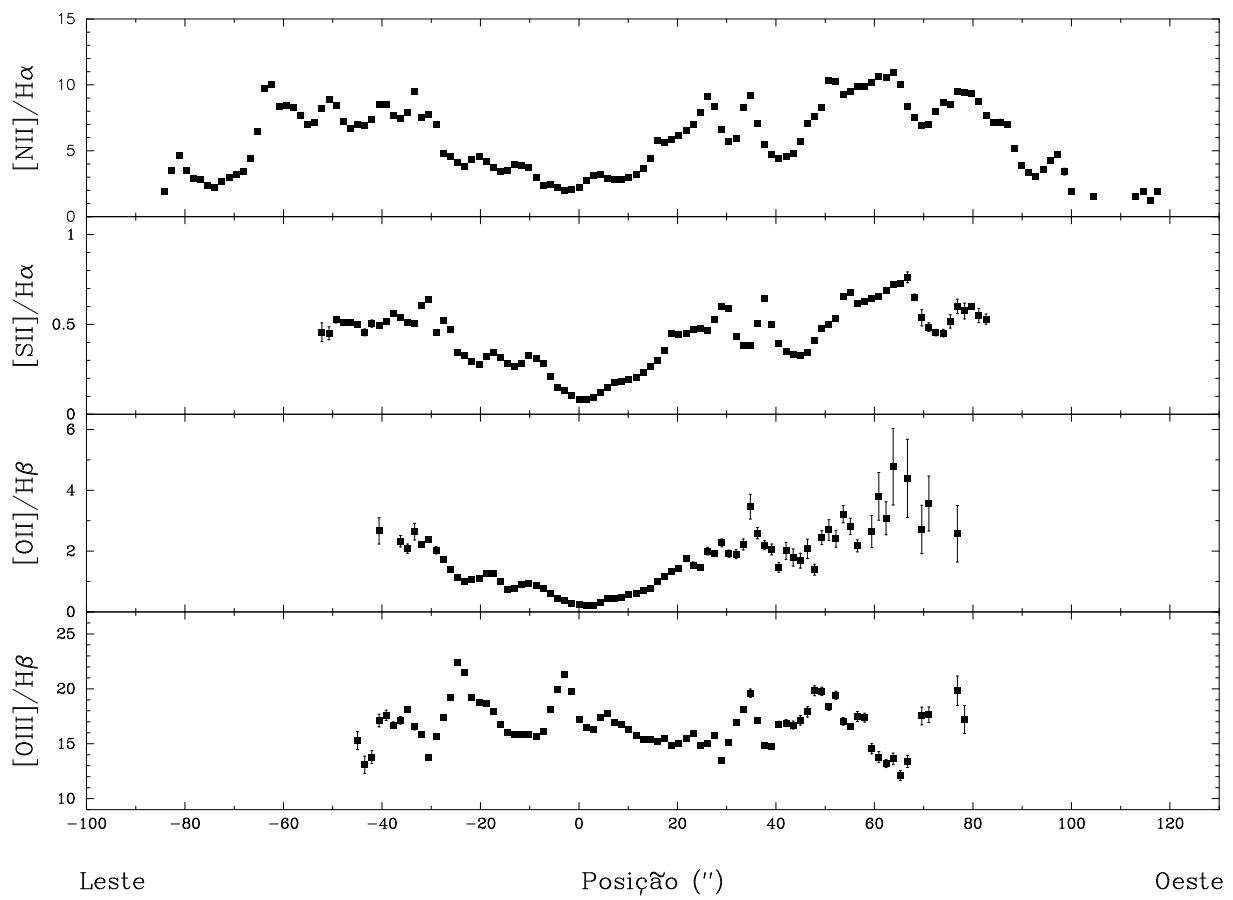
Figura B.23: NGC 6302 - Perfis espaciais de $[NII]/H\alpha$, $[SII]/H\alpha$, $[OII]/H\beta$ e $[OIII]/H\beta$ ao longo de $\Delta\delta = 6''$ S. A posição no eixo horizontal é relativa à estrela central (Szyzka et al., 2009).

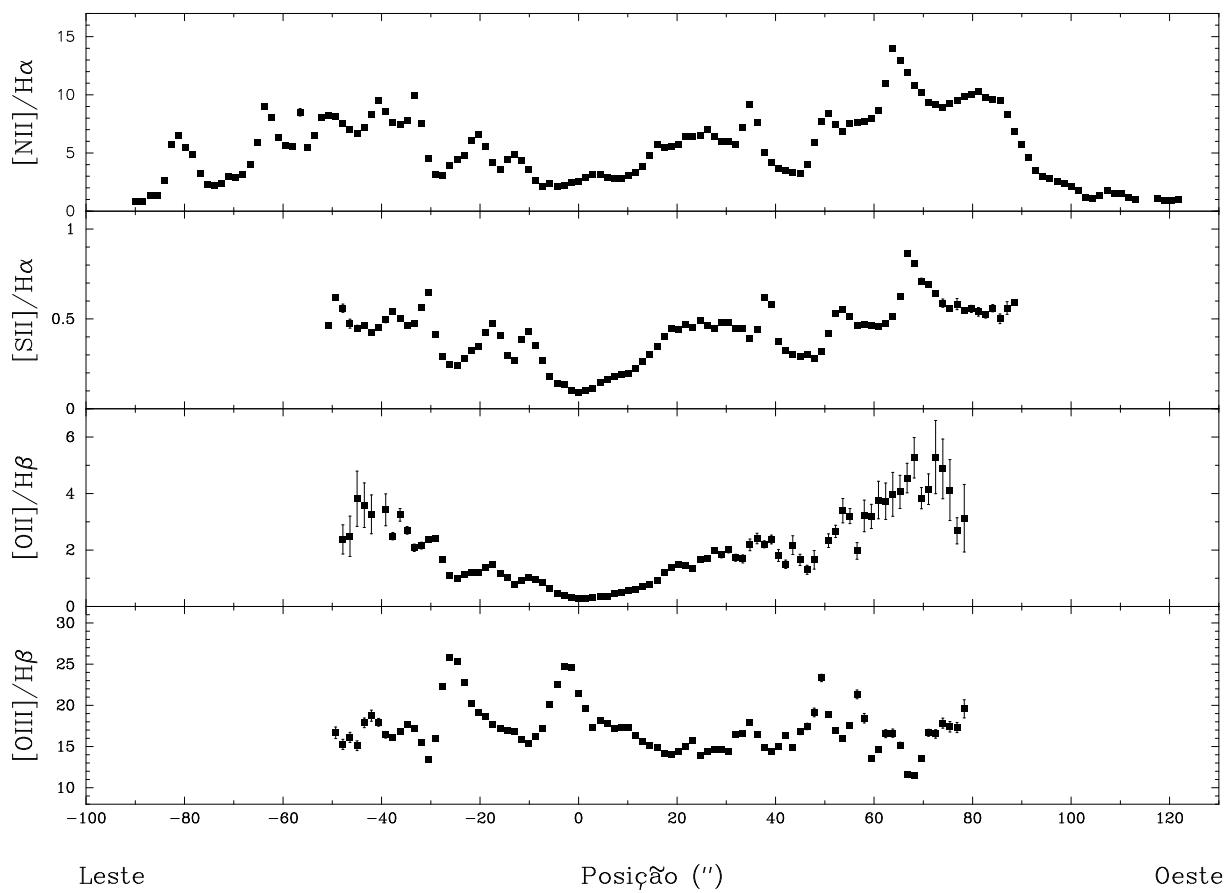
Figura B.24: Figura B.23, mas para $\Delta\delta = 5''$ S.

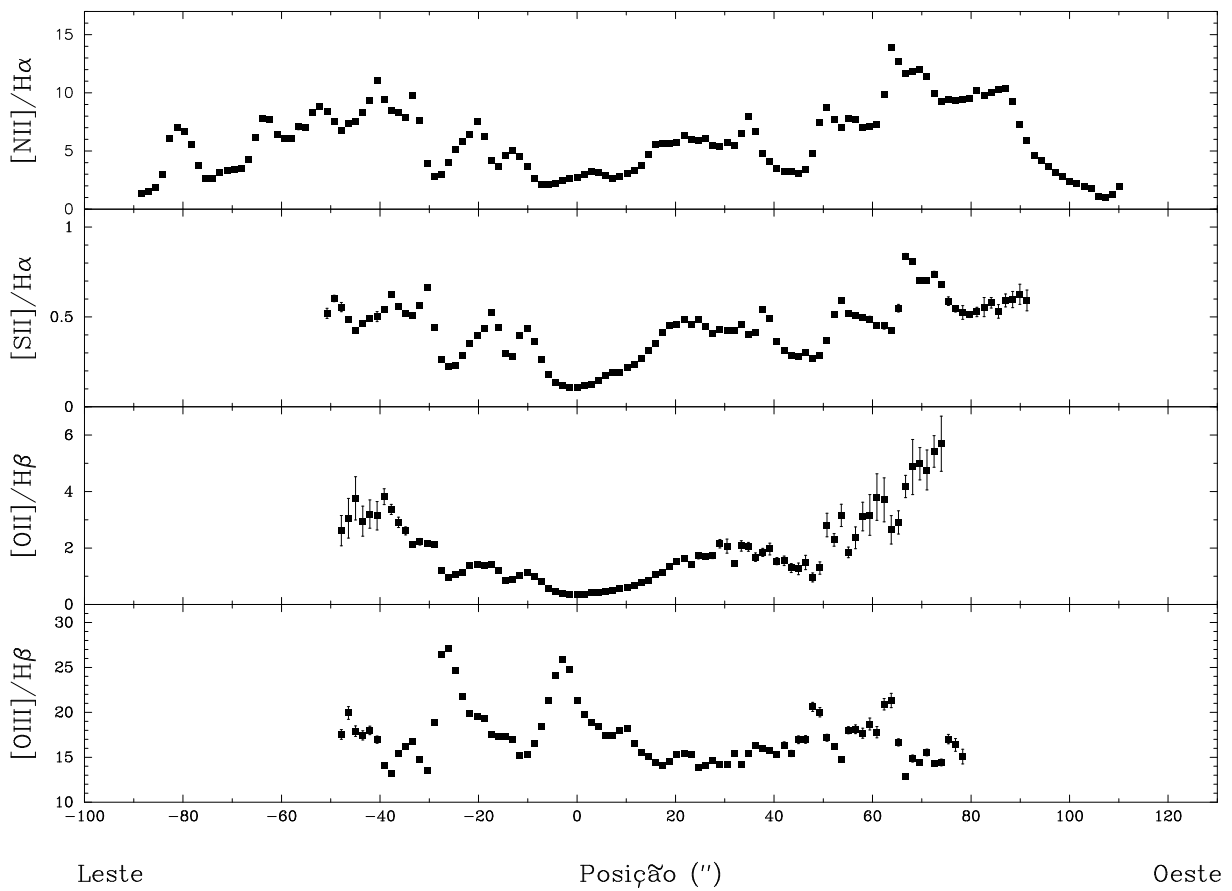
Figura B.25: Figura B.23, mas para $\Delta\delta = 4''$ S.

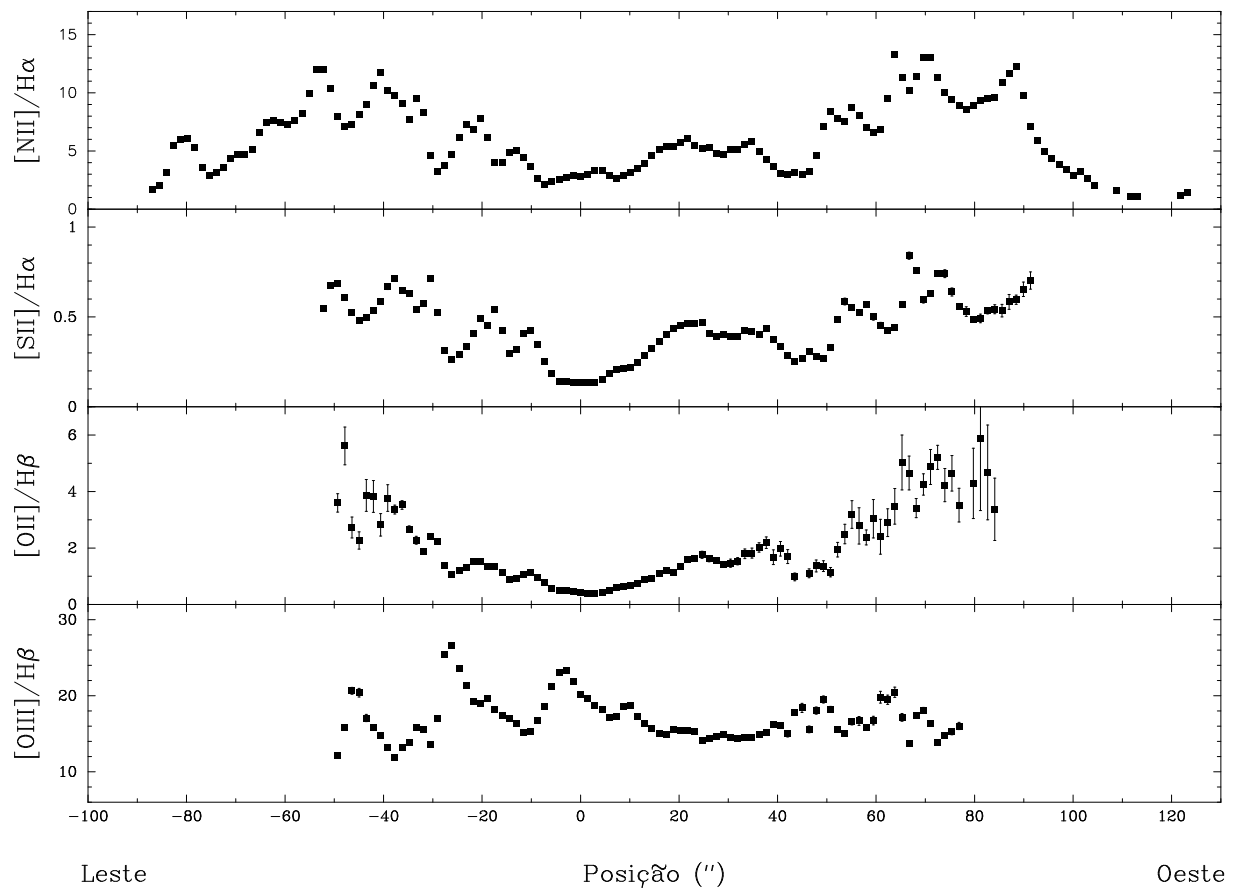
Figura B.26: Figura B.23, mas para $\Delta\delta = 3''$ S.

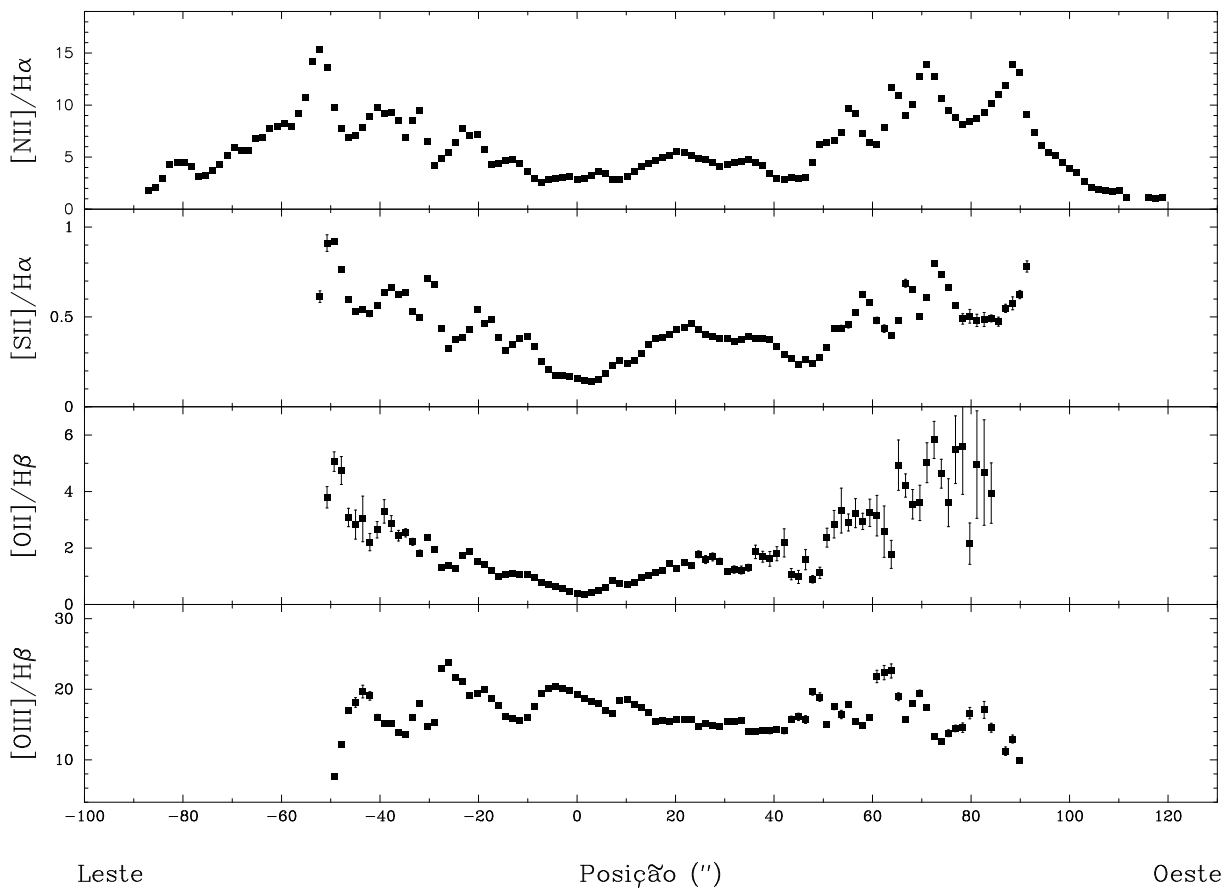
Figura B.27: Figura B.23, mas para $\Delta\delta = 2''$ S.

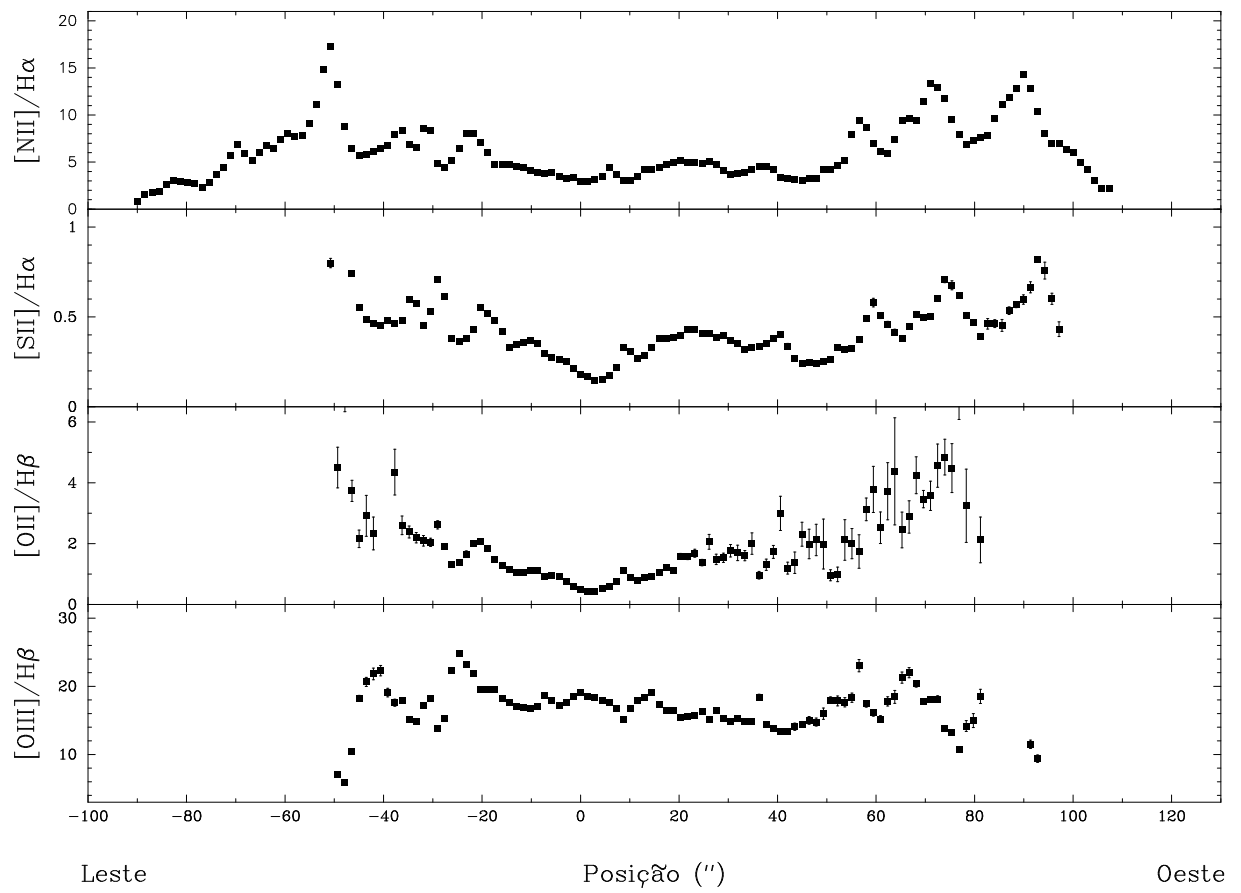
Figura B.28: Figura B.23, mas para $\Delta\delta = 1''$ S.

Figura B.29: Figura B.23, mas para $\Delta\delta = 0''$.

Figura B.30: Figura B.23, mas para $\Delta\delta = 1''$ N.

Figura B.31: Figura B.23, mas para $\Delta\delta = 2''$ N.

Figura B.32: Figura B.23, mas para $\Delta\delta = 3''$ N.

Figura B.33: Figura B.23, mas para $\Delta\delta = 4''$ N.

Apêndice C – Perfis espaciais para NGC 2440

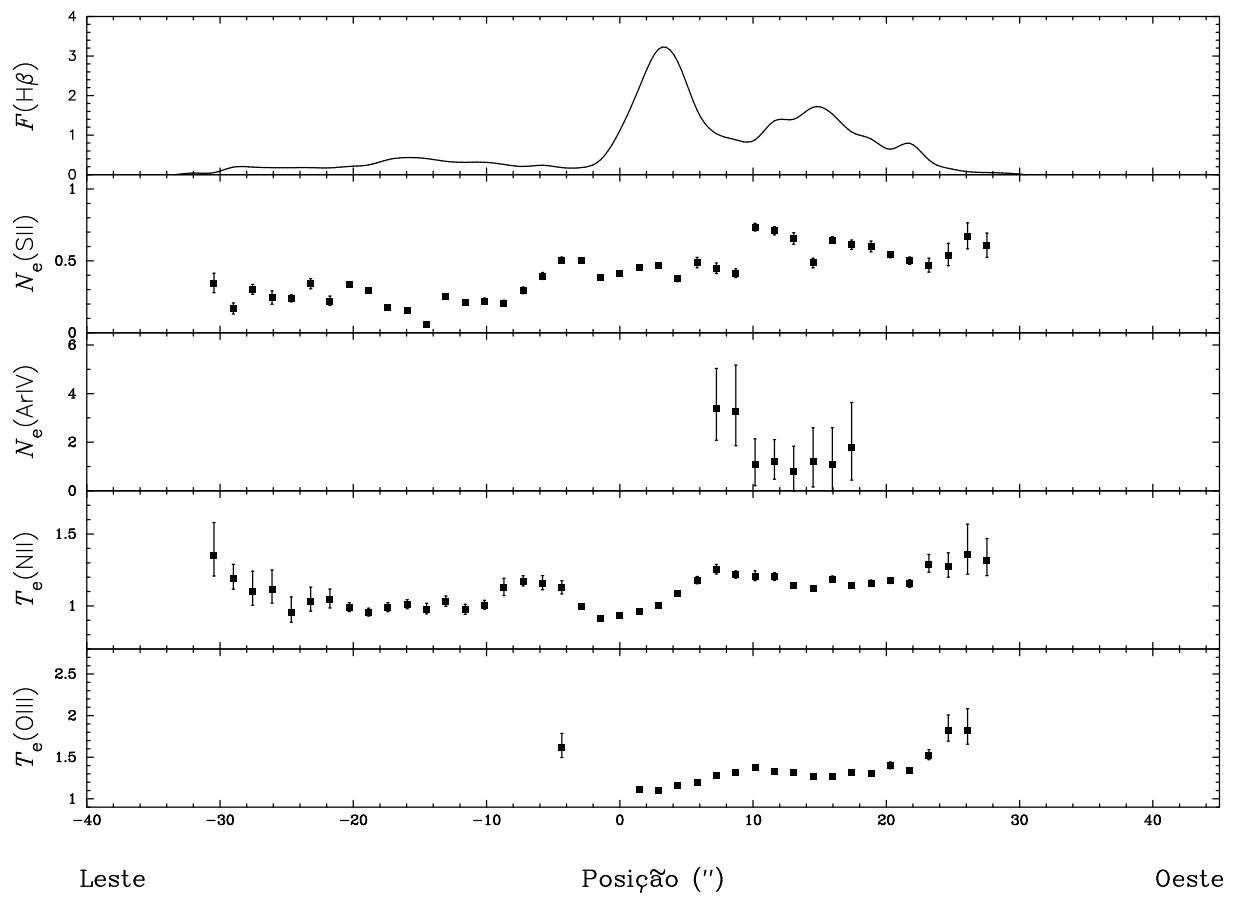
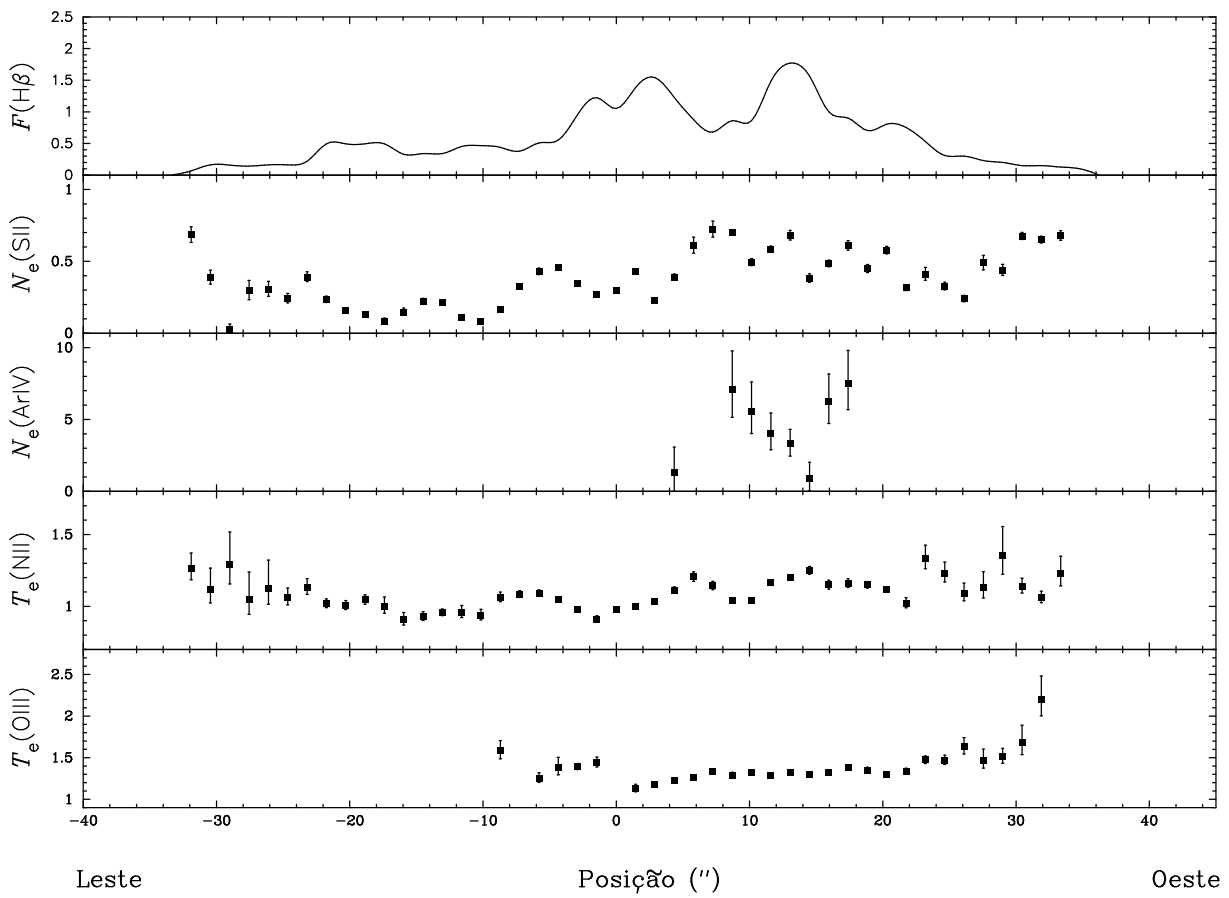


Figura C.1: NGC 2440 - Perfis espaciais de $F(\text{H}\beta)$ (em unidades de $10^{-14} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$), $N_e(\text{SII})$ (em unidades de 10^3 cm^{-3}), $N_e(\text{ArIV})$ (em unidades de 10^3 cm^{-3}), $T_e(\text{NII})$ (em unidades 10^4 K) e $T_e(\text{OIII})$ (em unidades de 10^4 K) ao longo de $\Delta\delta = 10'' \text{ S}$. A posição no eixo horizontal é relativa à estrela central.

Figura C.2: Figura C.1, mas para $\Delta\delta = 8''$ S.

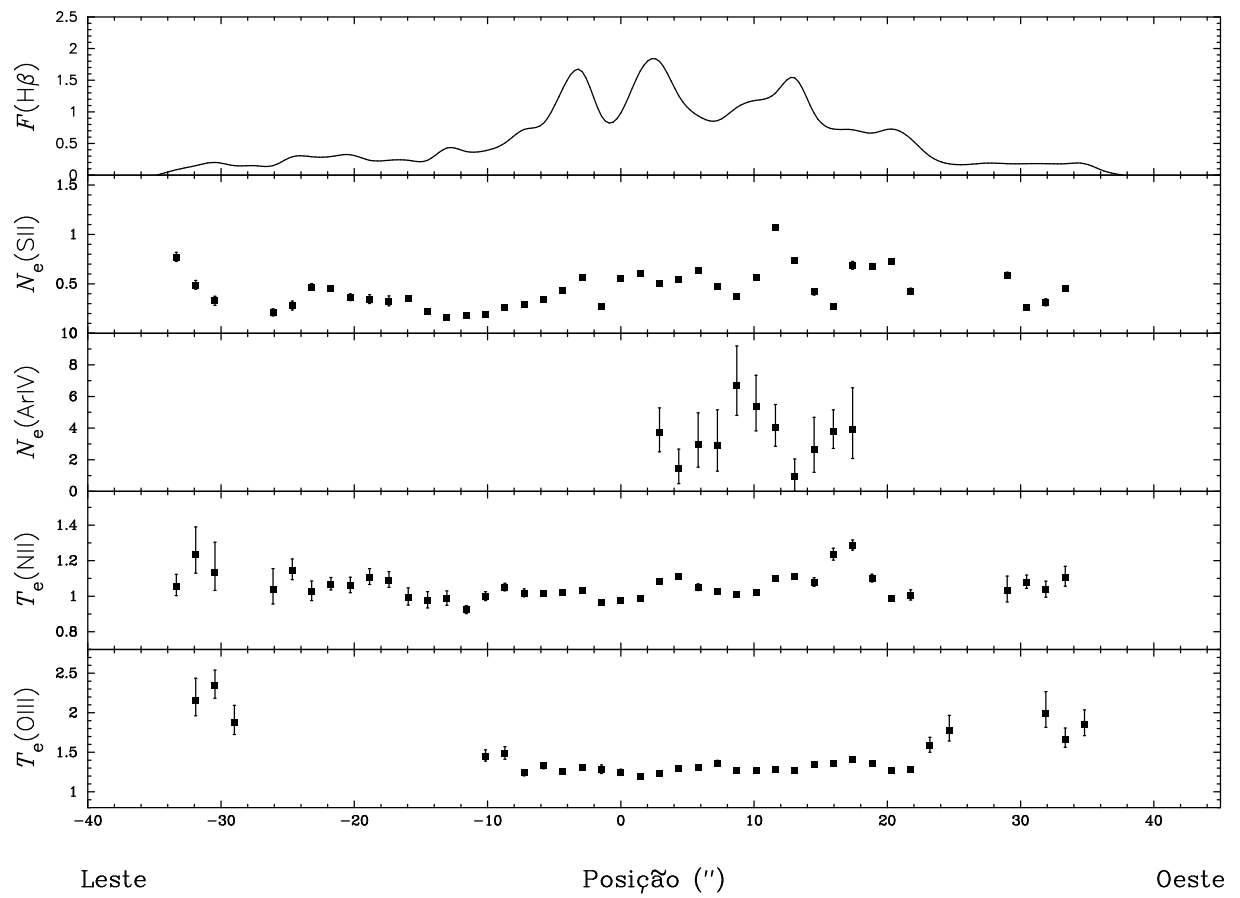


Figura C.3: Figura C.1, mas para $\Delta\delta = 6''$ S.

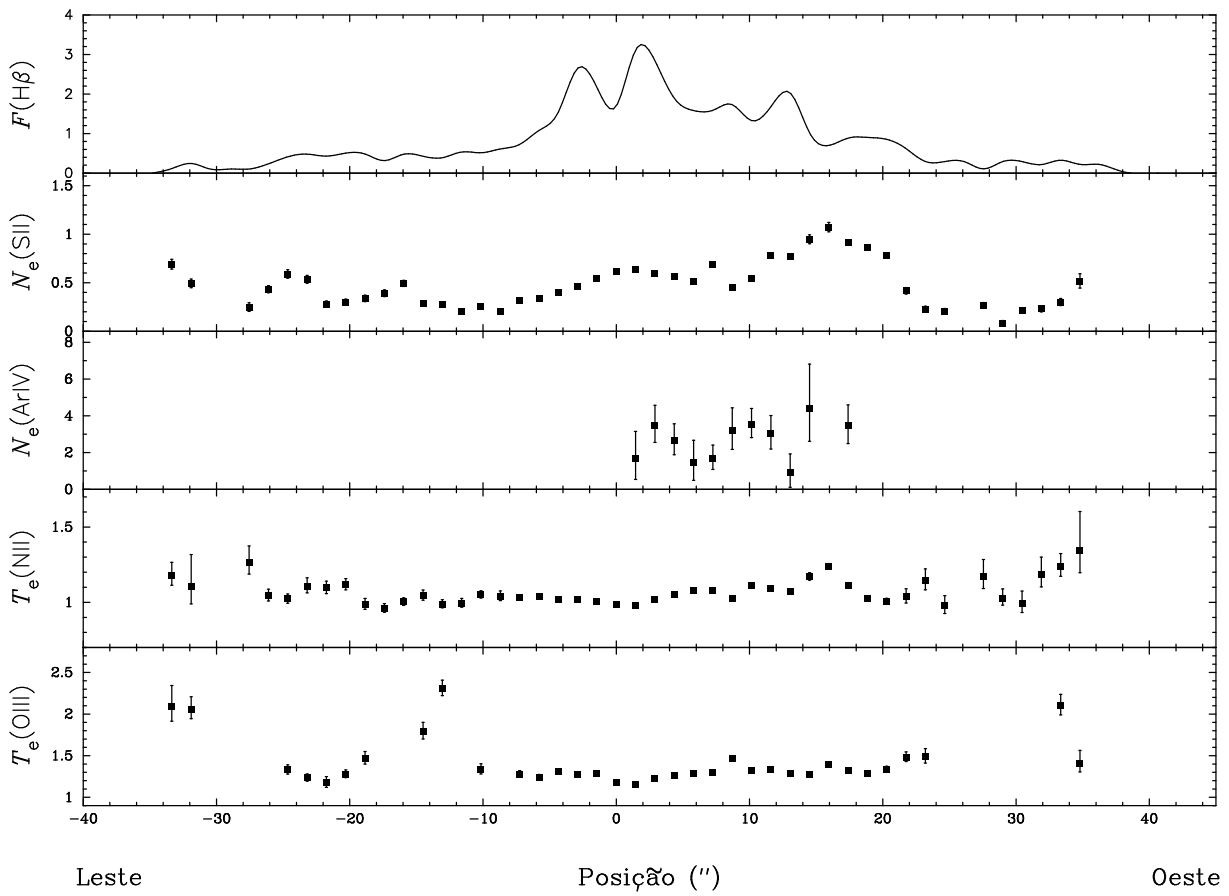


Figura C.4: Figura C.1, mas para $\Delta\delta = 4''$ S.

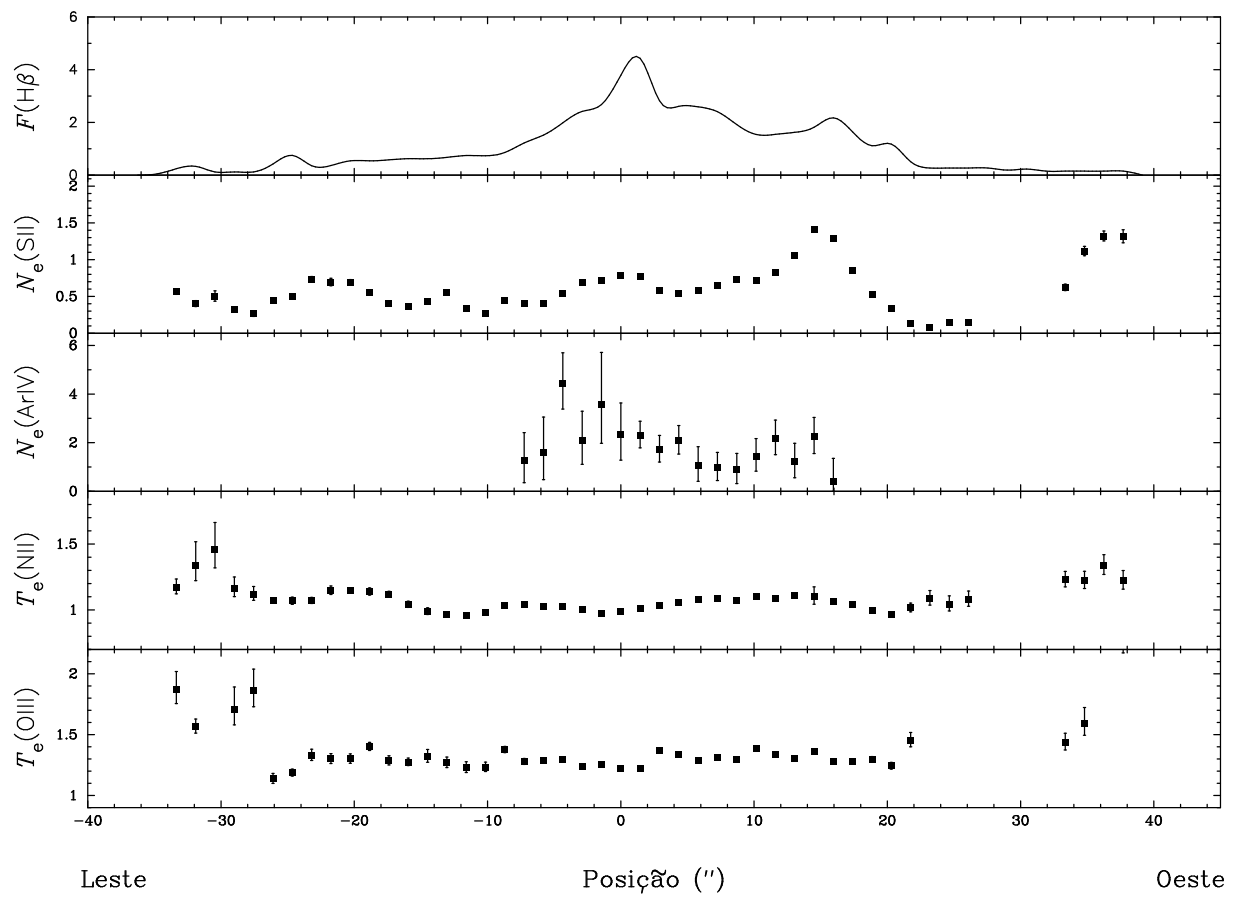


Figura C.5: Figura C.1, mas para $\Delta\delta = 2''$ S.

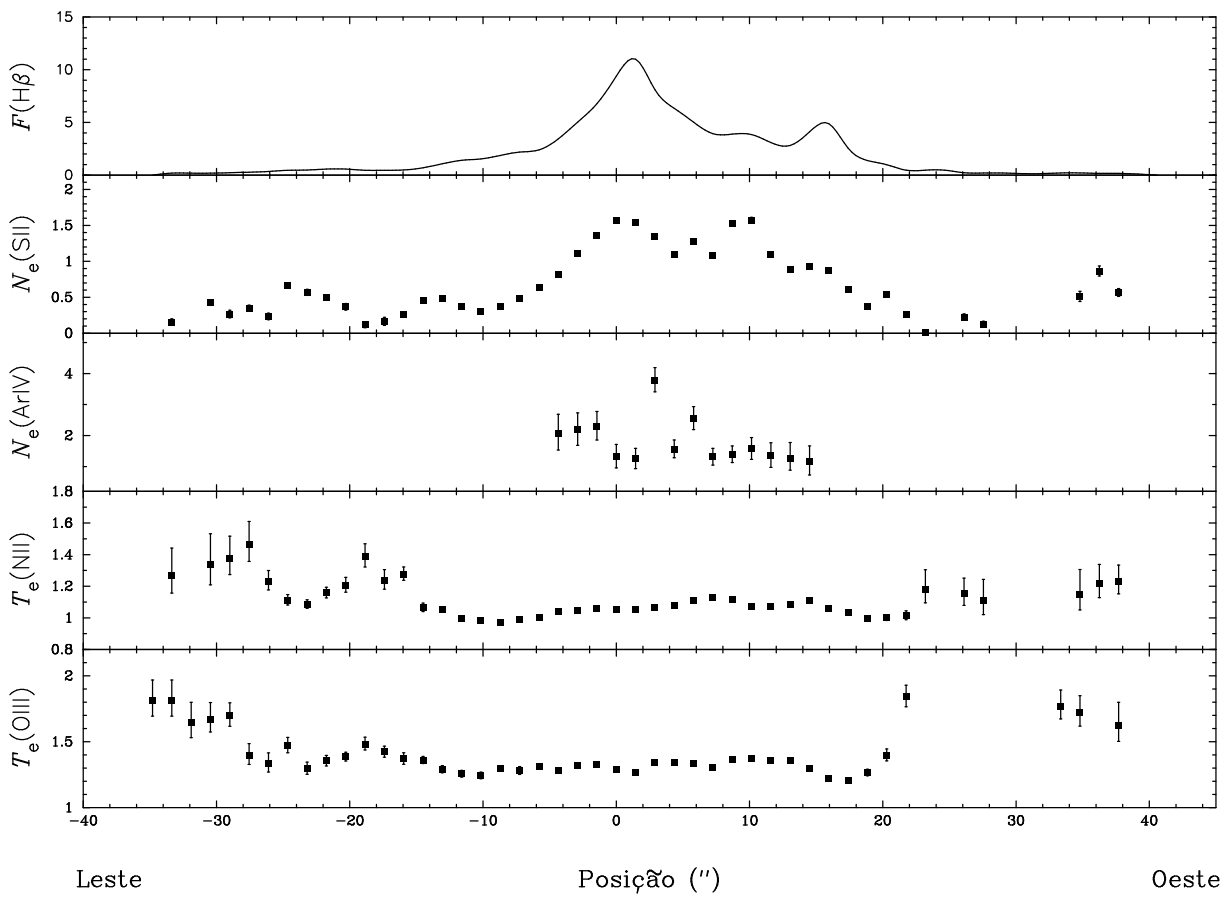


Figura C.6: Figura C.1, mas para $\Delta\delta = 0''$.

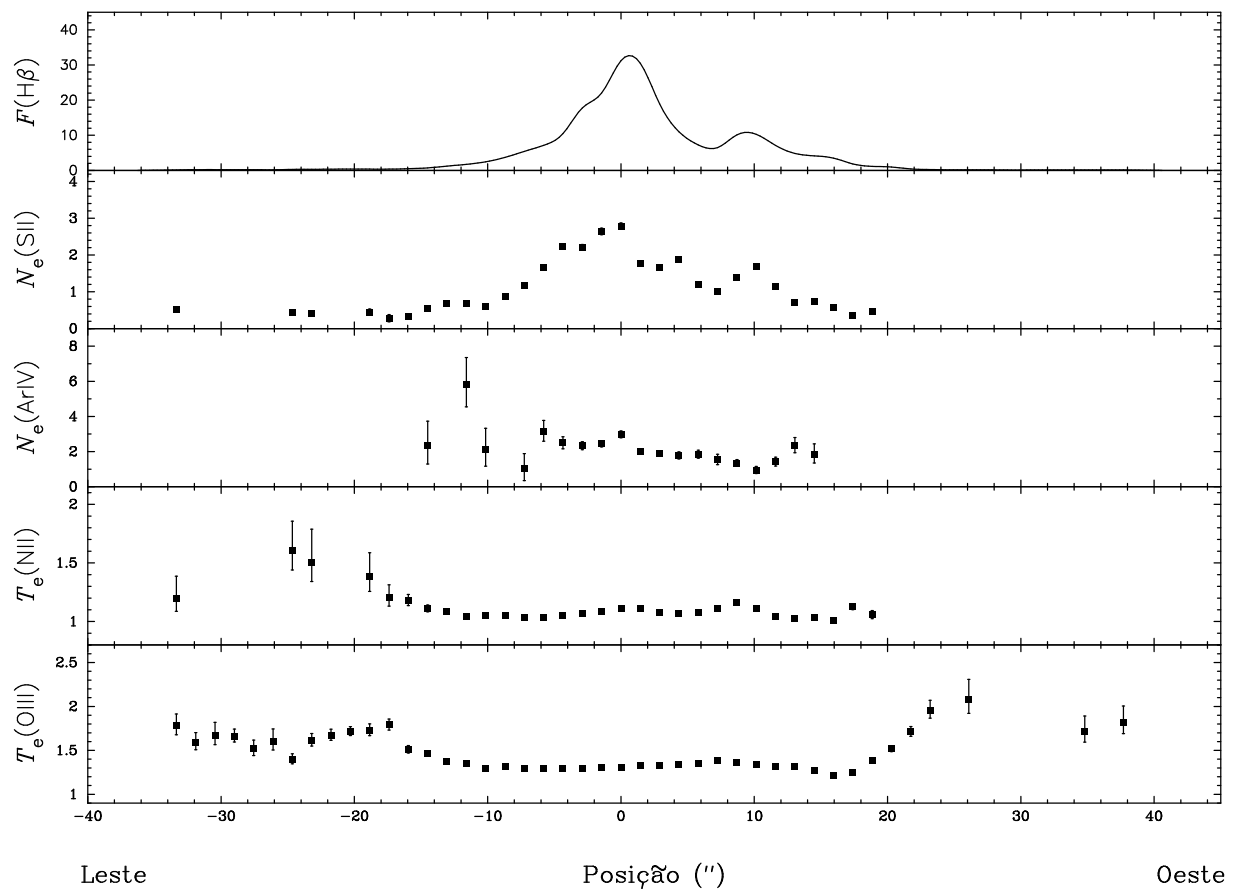
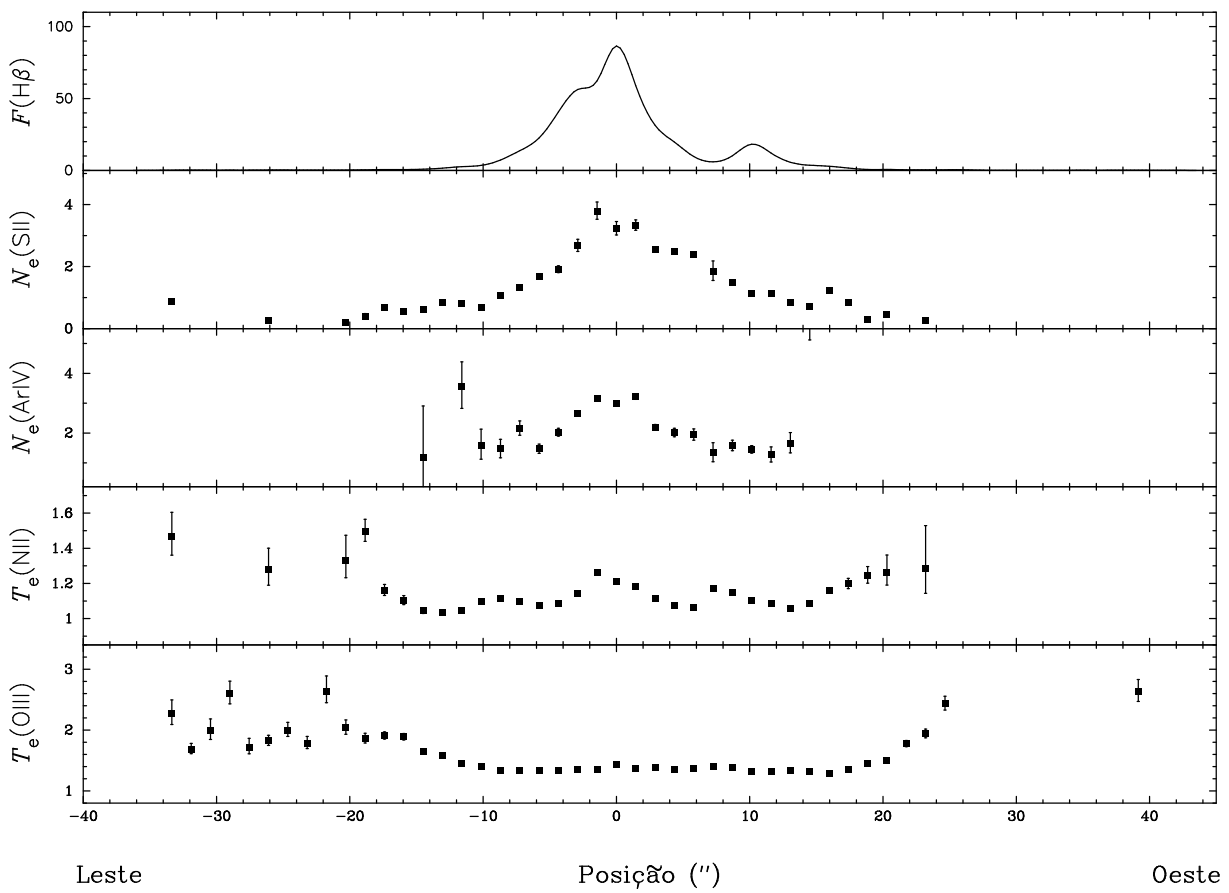


Figura C.7: Figura C.1, mas para $\Delta\delta = 2''$ N.

Figura C.8: Figura C.1, mas para $\Delta\delta = 4''$ N.

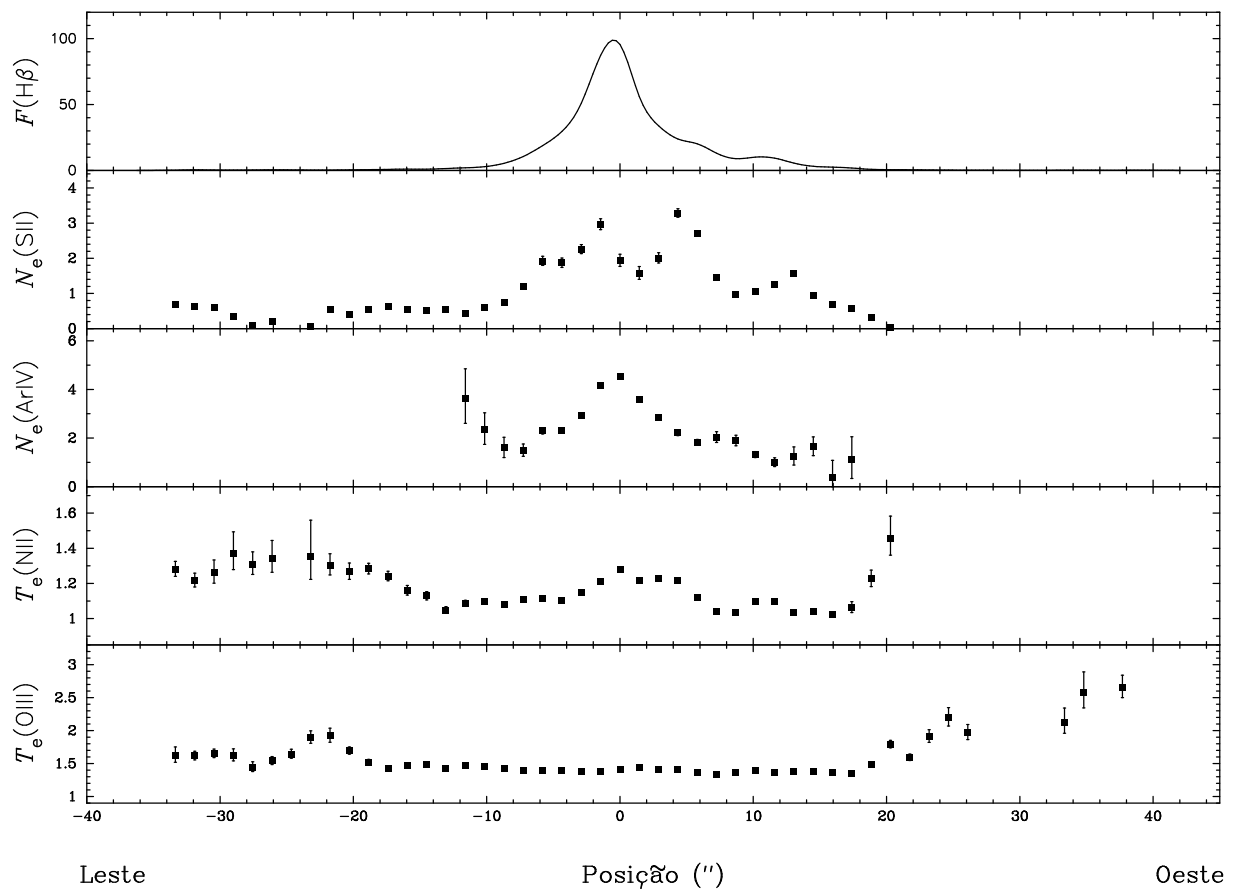


Figura C.9: Figura C.1, mas para $\Delta\delta = 6''$ N.

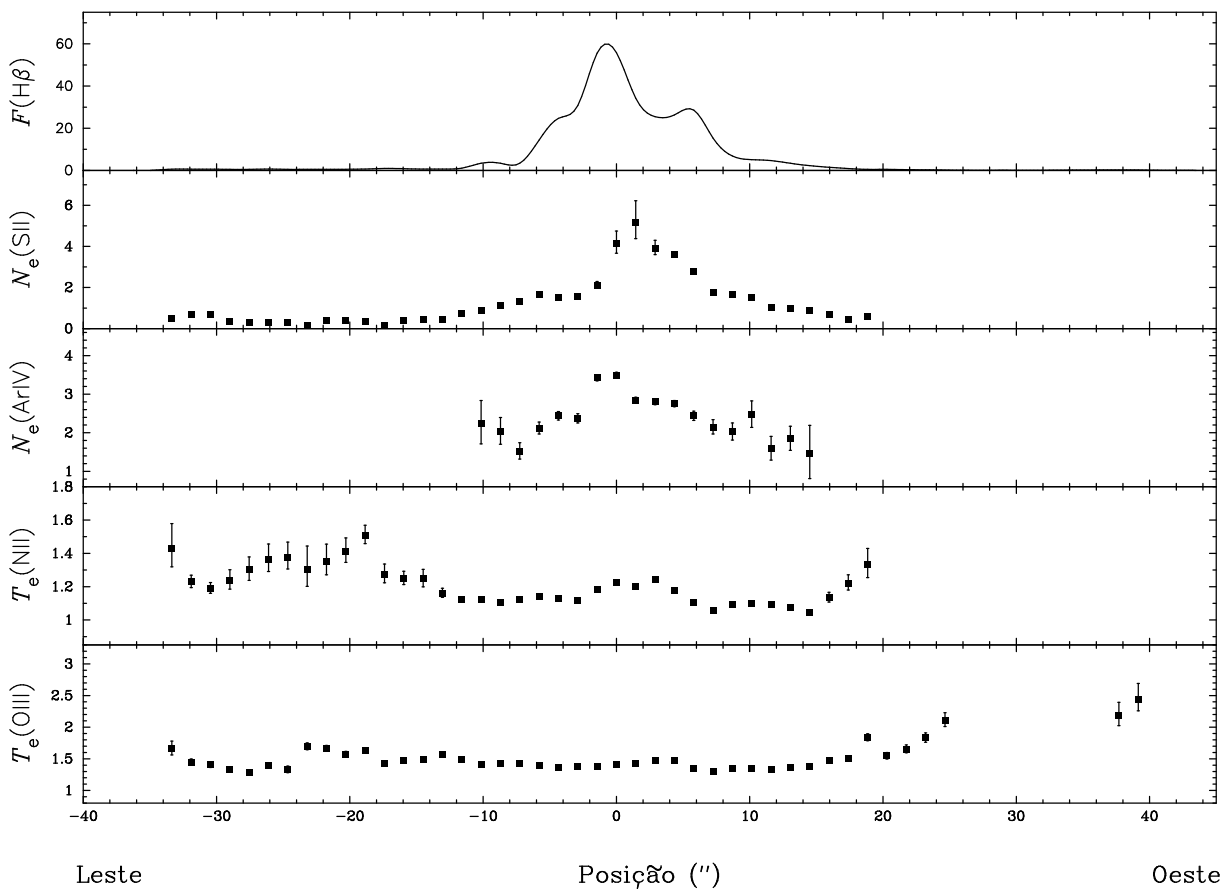


Figura C.10: Figura C.1, mas para $\Delta\delta = 8''$ N.

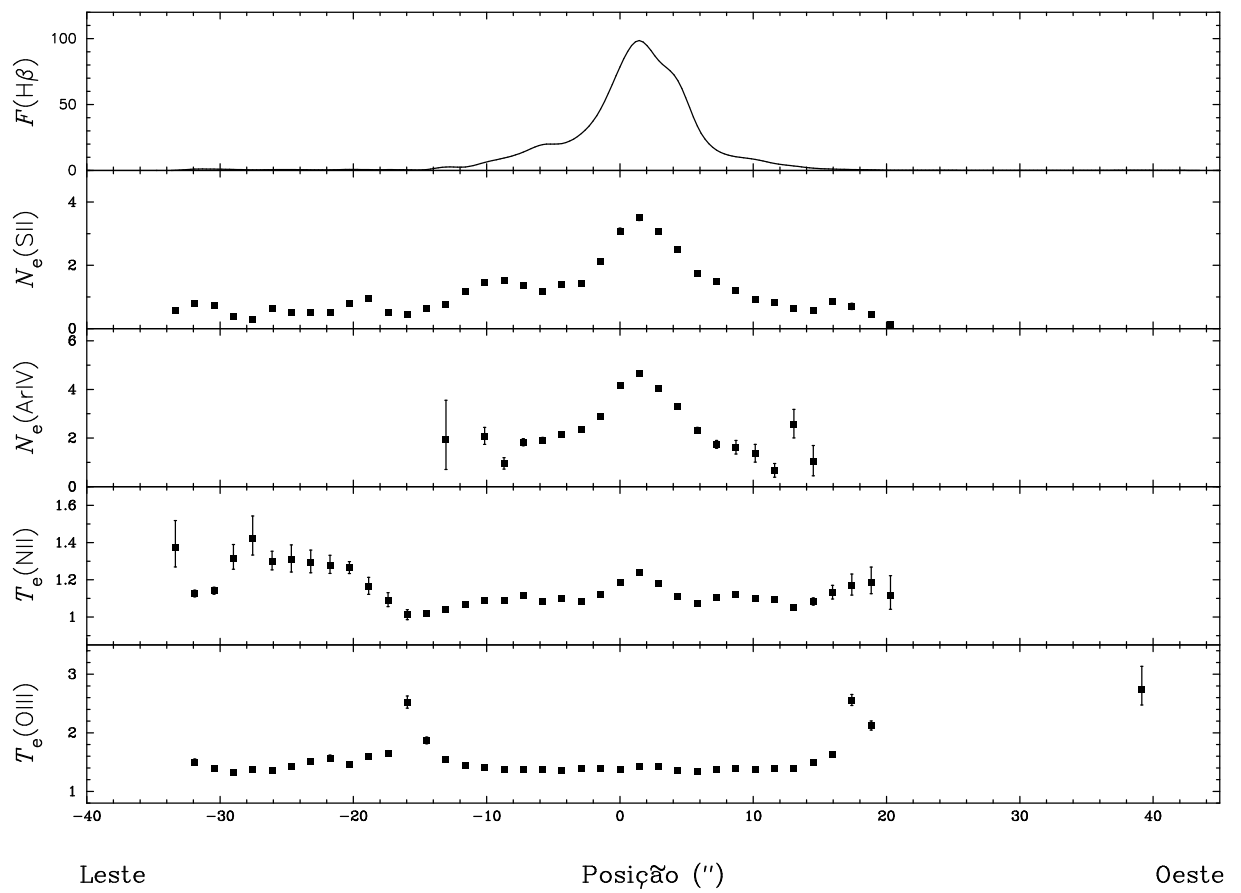
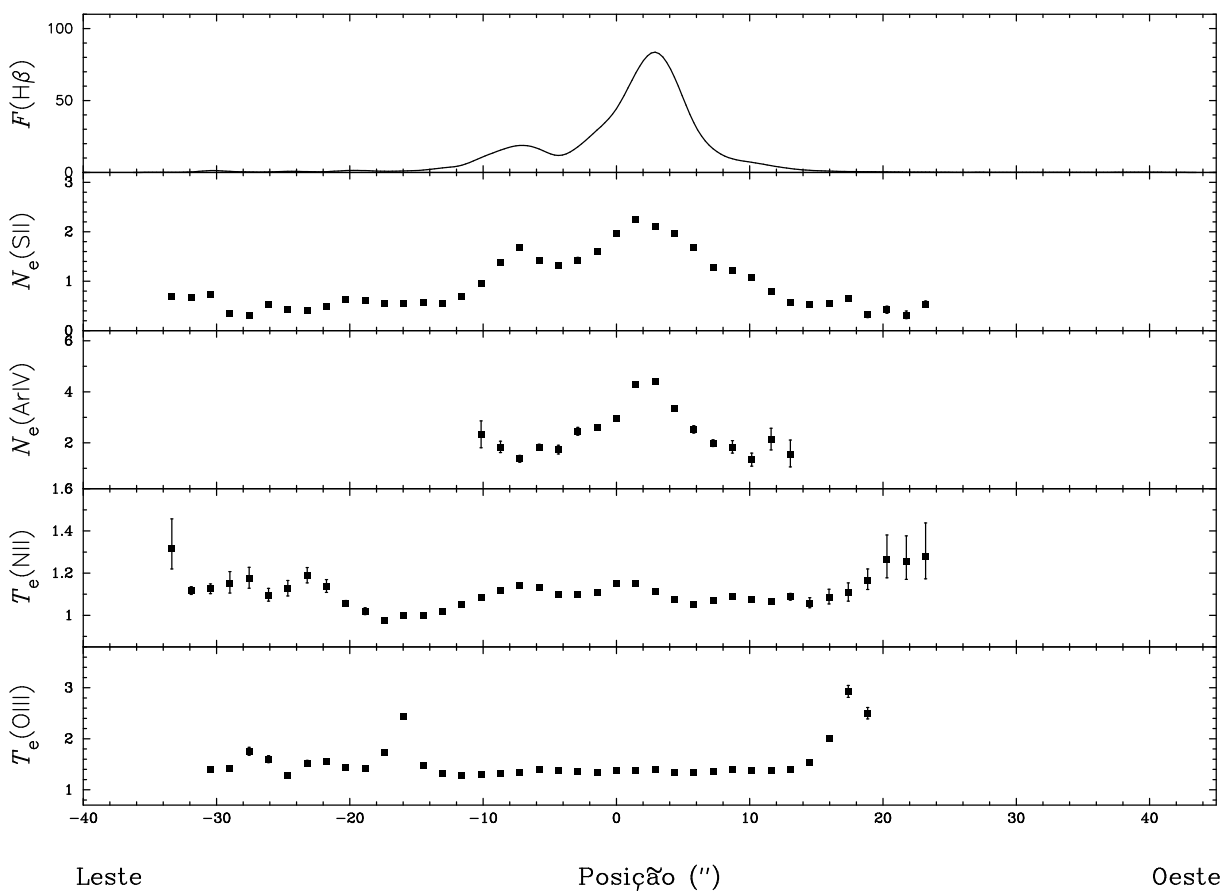


Figura C.11: Figura C.1, mas para $\Delta\delta = 10''$ N.

Figura C.12: Figura C.1, mas para $\Delta\delta = 12''$ N.

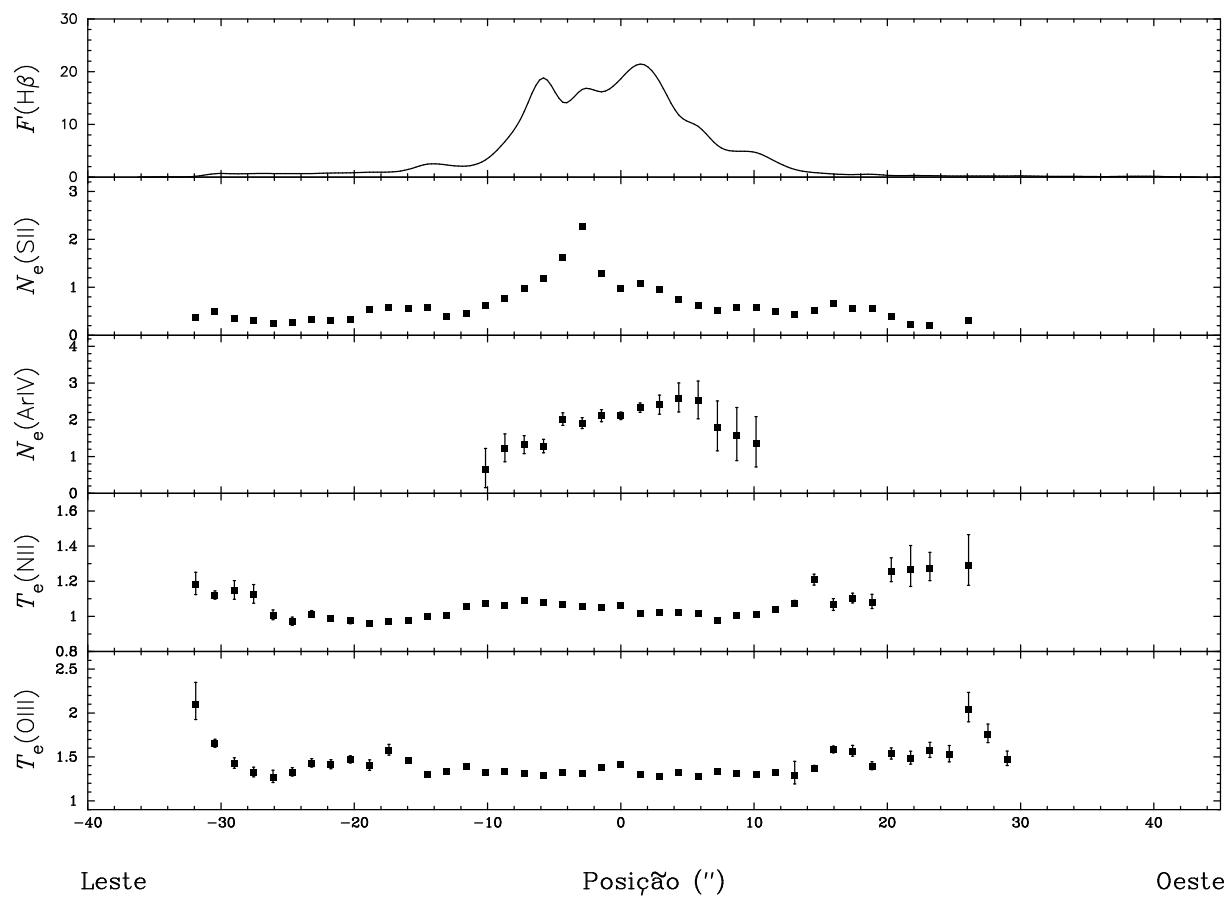


Figura C.13: Figura C.1, mas para $\Delta\delta = 14''$ N.

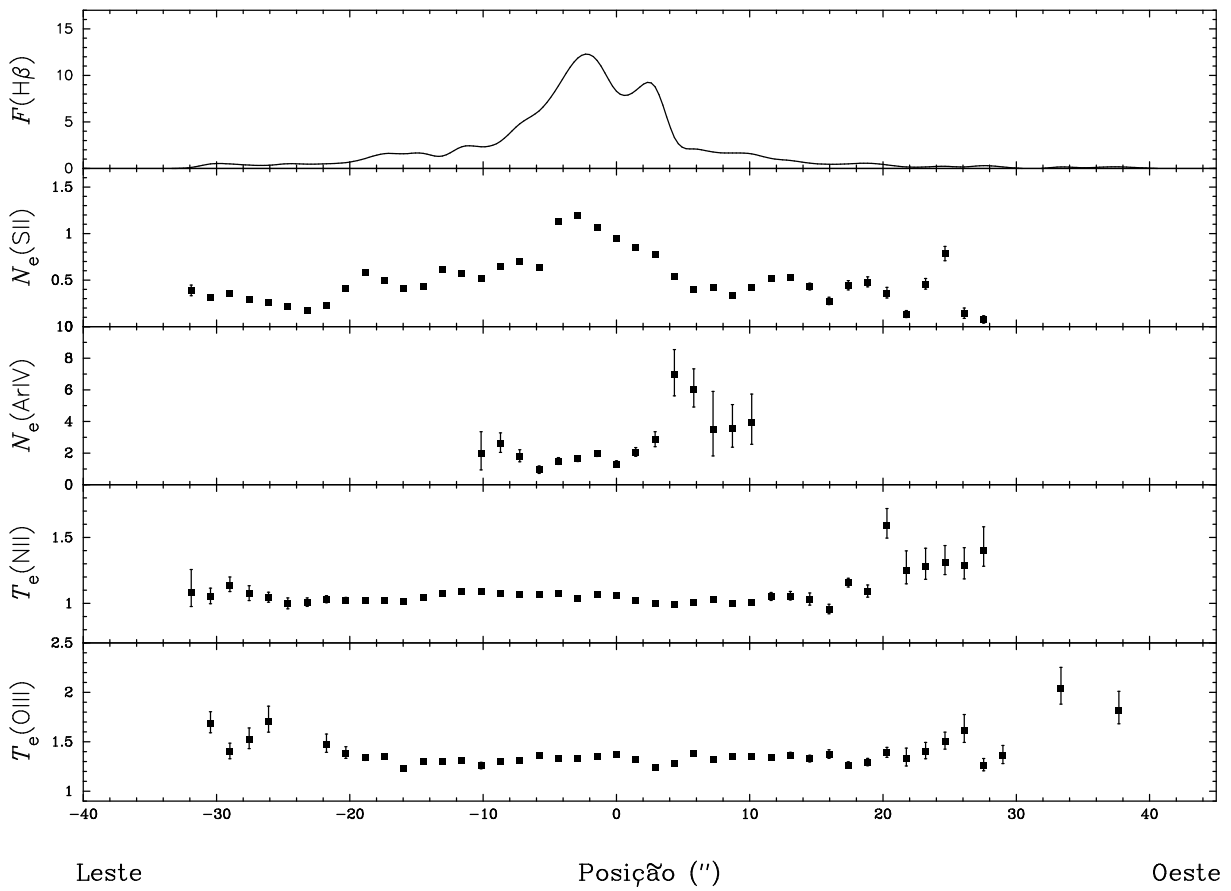


Figura C.14: Figura C.1, mas para $\Delta\delta = 16''$ N.

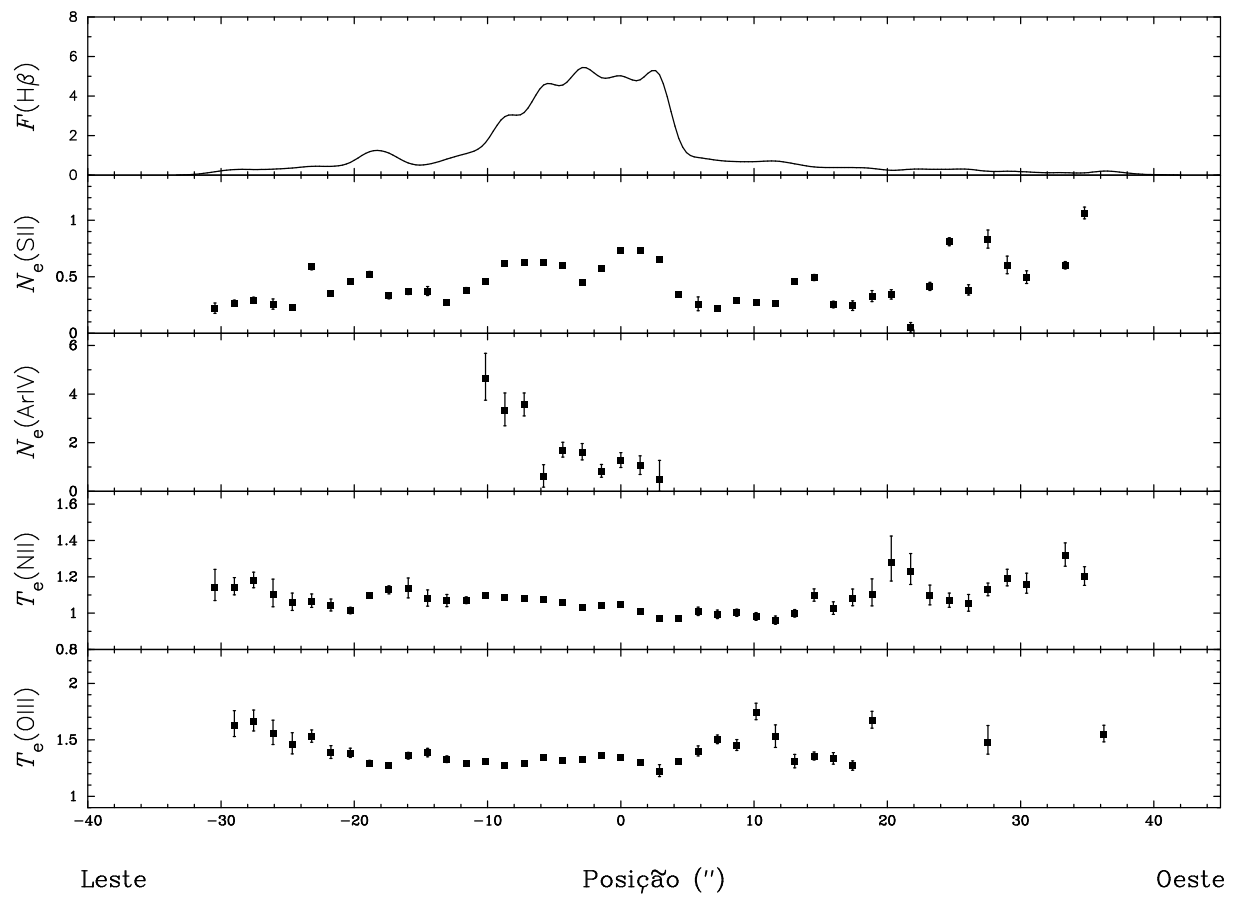


Figura C.15: Figura C.1, mas para $\Delta\delta = 18''$ N.

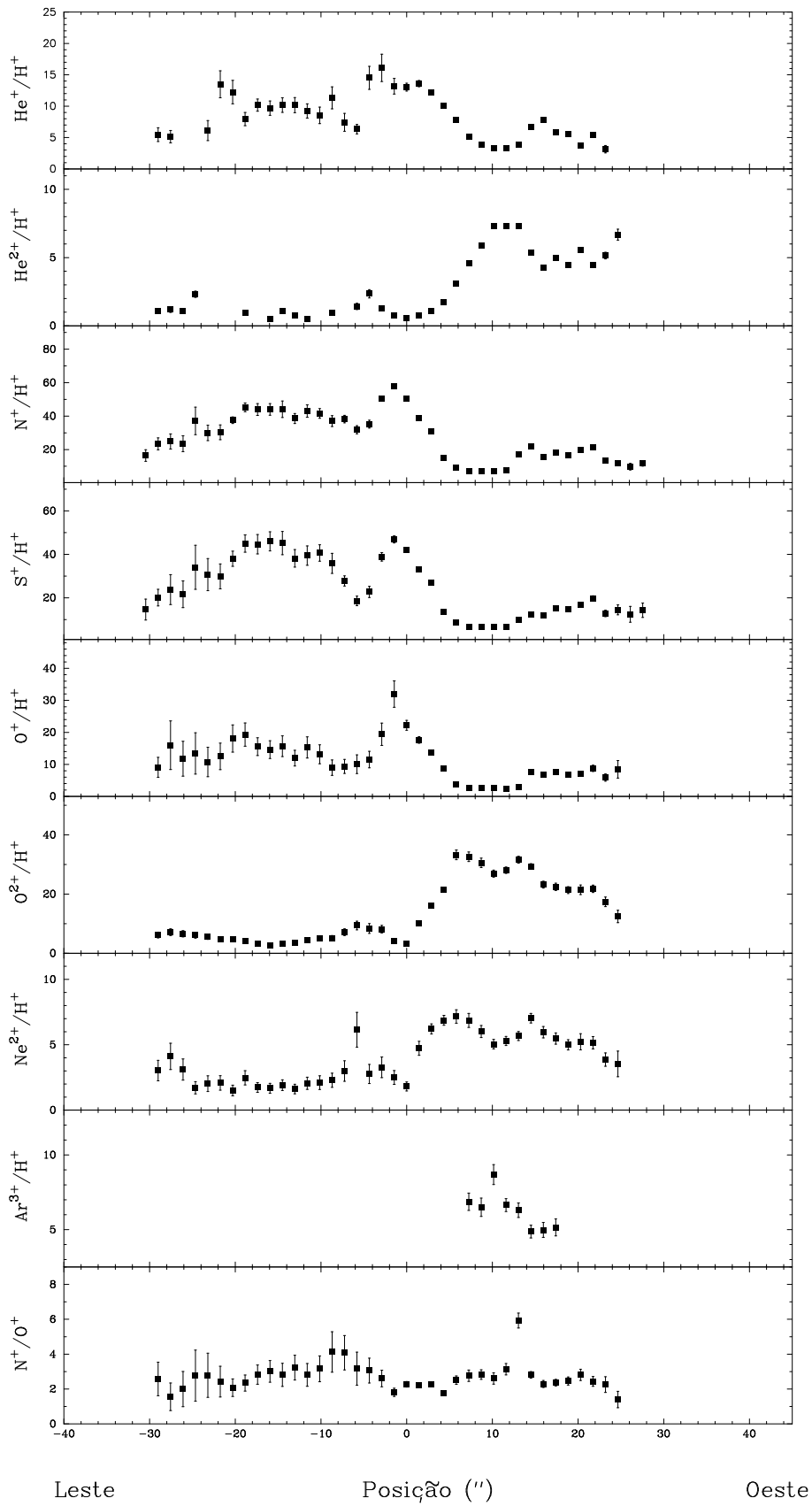


Figura C.16: NGC 2440 - Perfis espaciais de $\text{He}^+/\text{H}^+ \times 10^2$, $\text{He}^{2+}/\text{H}^+ \times 10^2$, $\text{N}^+/\text{H}^+ \times 10^5$, $\text{S}^+/\text{H}^+ \times 10^7$, $\text{O}^+/\text{H}^+ \times 10^5$, $\text{O}^{2+}/\text{H}^+ \times 10^5$, $\text{Ne}^{2+}/\text{H}^+ \times 10^5$, $\text{Ar}^{3+}/\text{H}^+ \times 10^7$ e N^+/O^+ ao longo de $\Delta\delta = 10''$ S. A posição no eixo horizontal é relativa à estrela central.

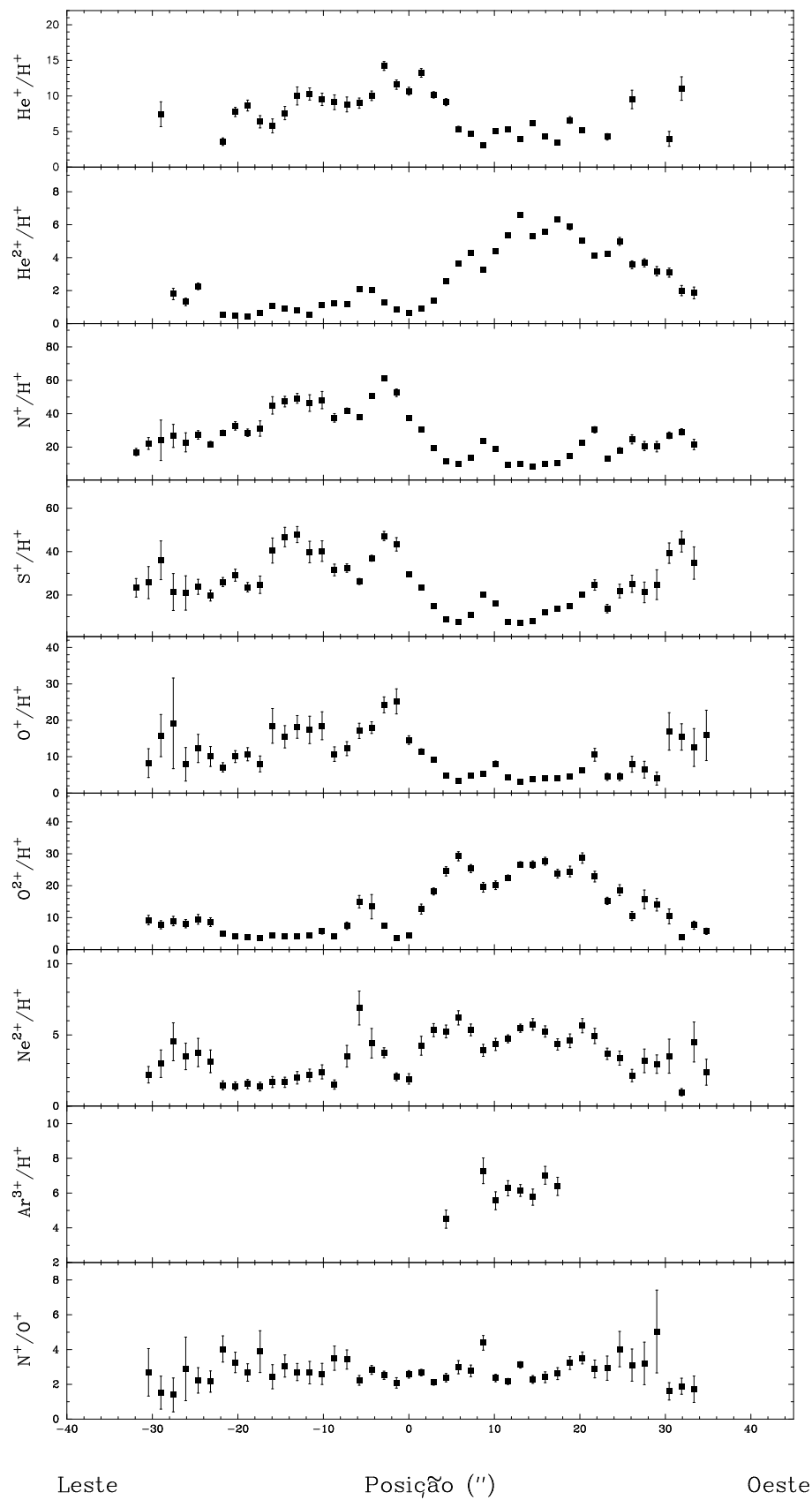


Figura C.17: Figura C.16, mas para $\Delta\delta = 8''$ S.

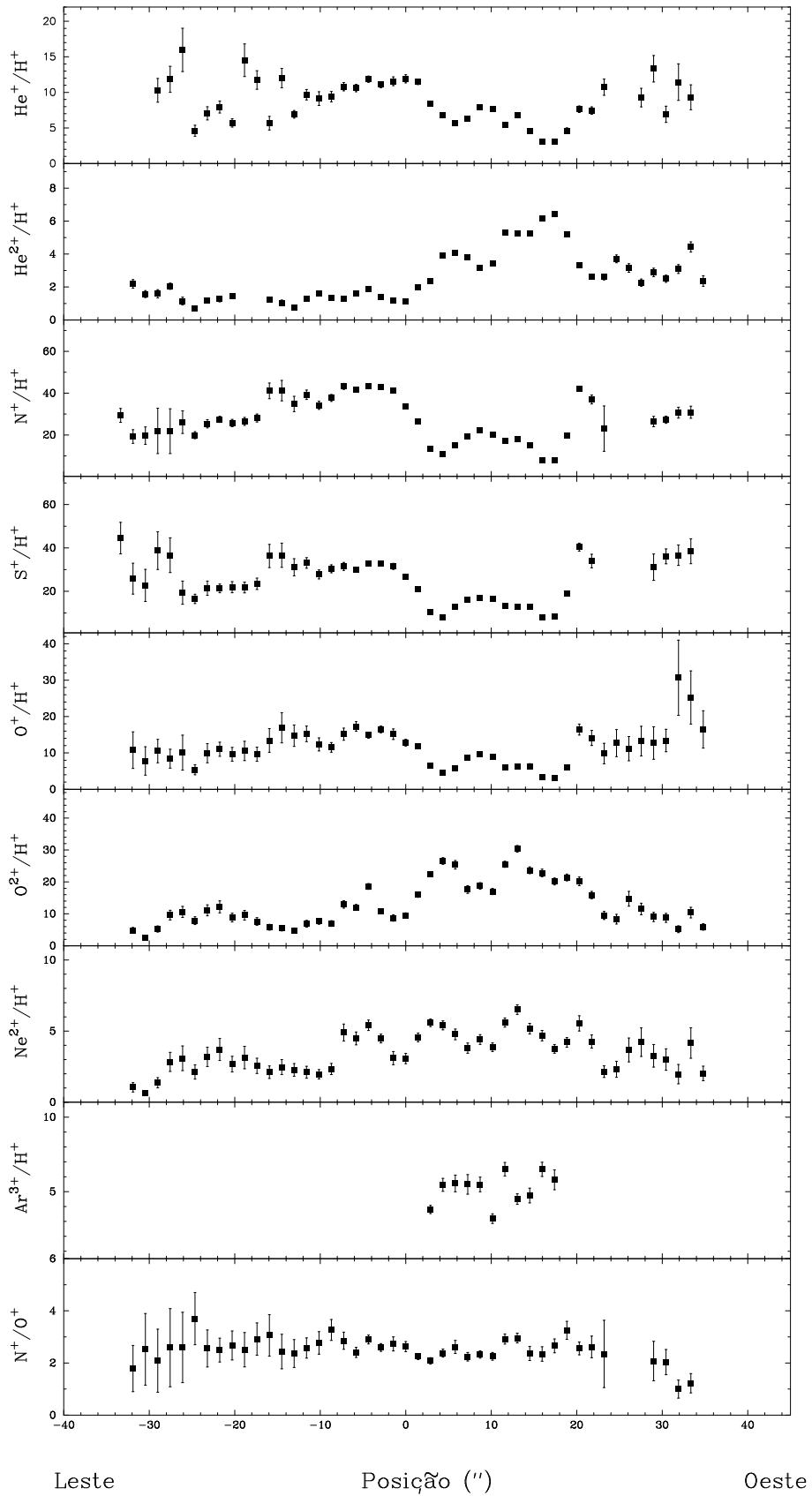


Figura C.18: Figura C.16, mas para $\Delta\delta = 6''$ S.

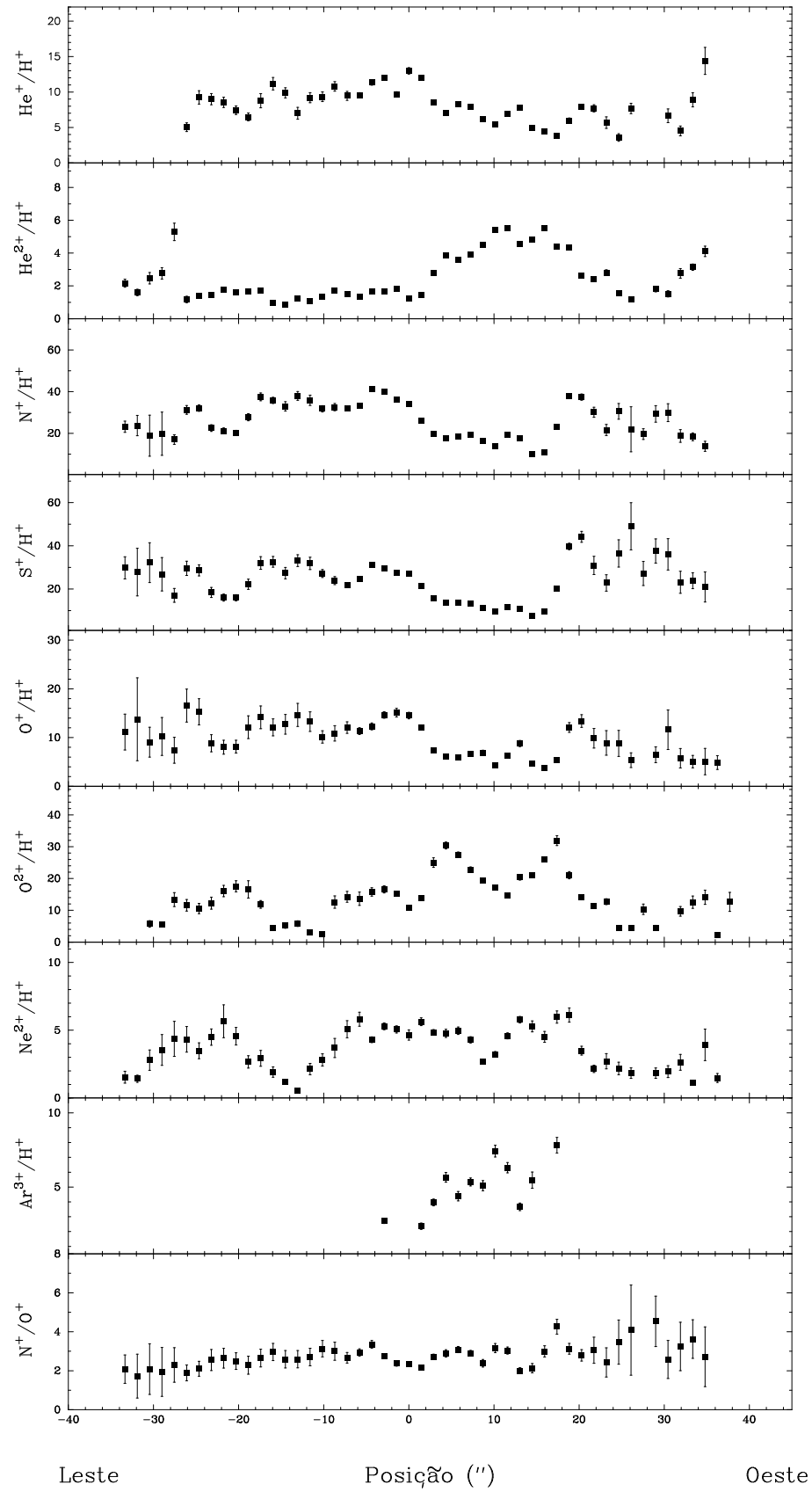


Figura C.19: Figura C.16, mas para $\Delta\delta = 4''$ S.

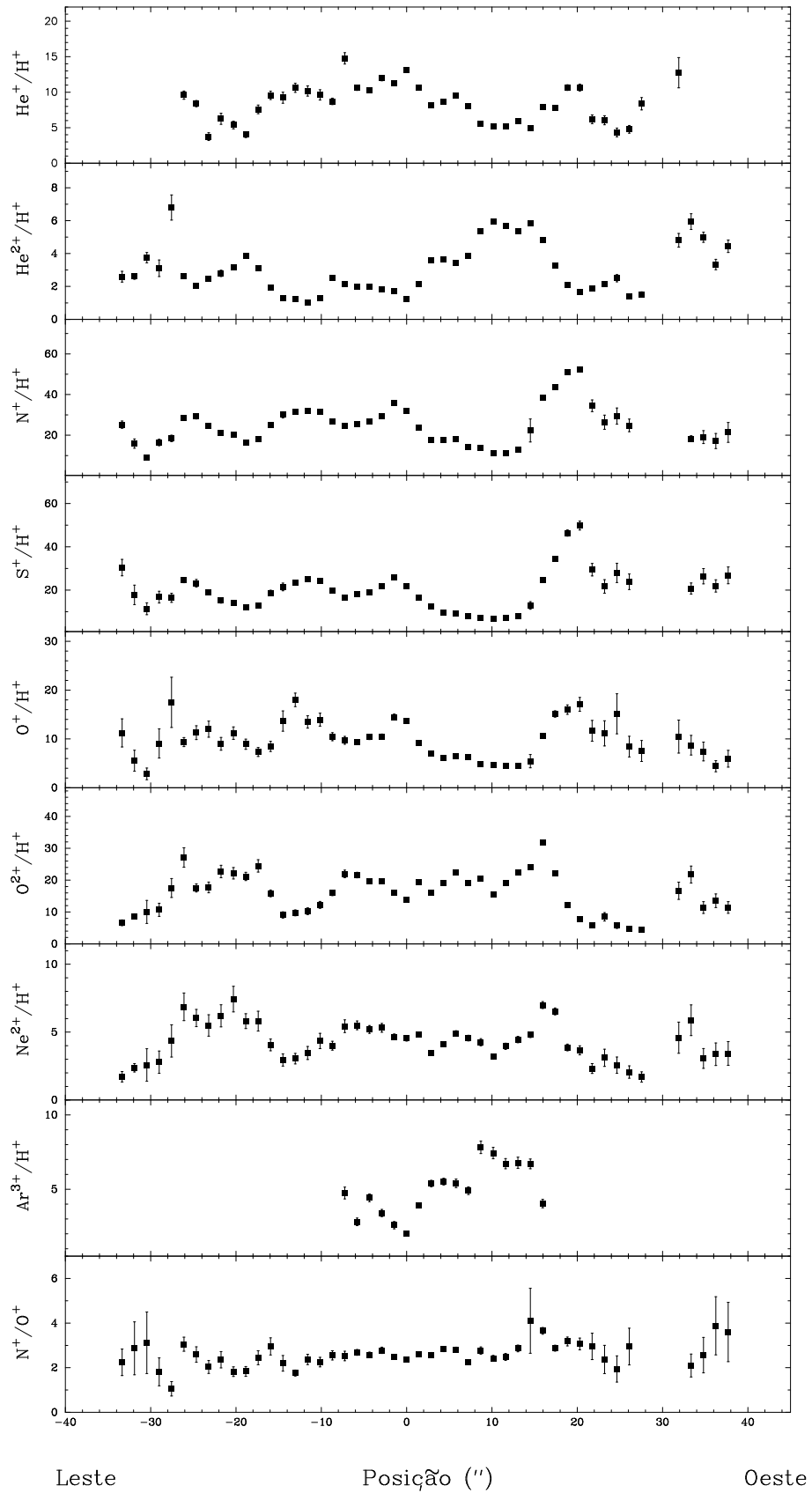


Figura C.20: Figura C.16, mas para $\Delta\delta = 2''$ S.

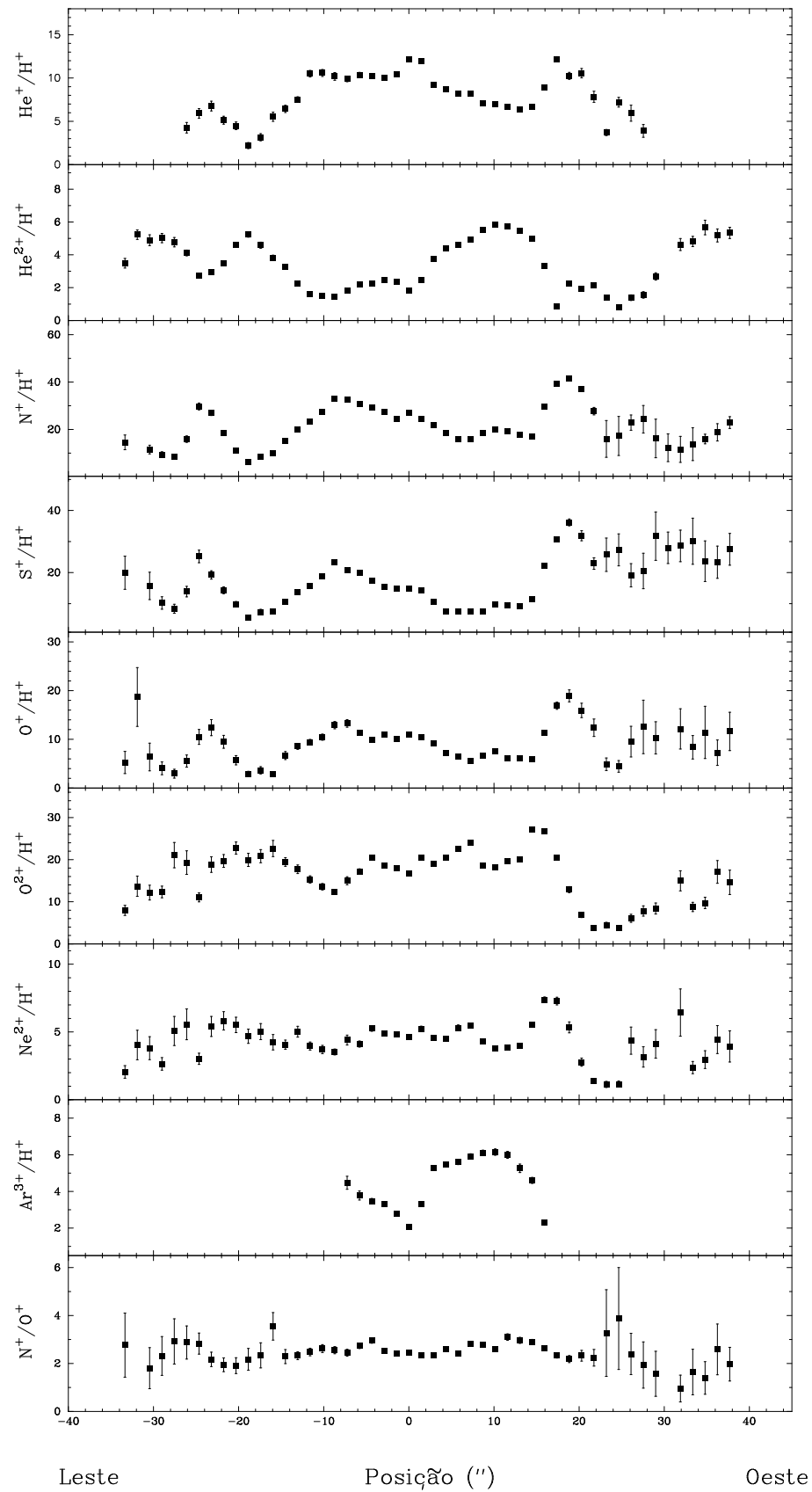


Figura C.21: Figura C.16, mas para $\Delta\delta = 0''$.

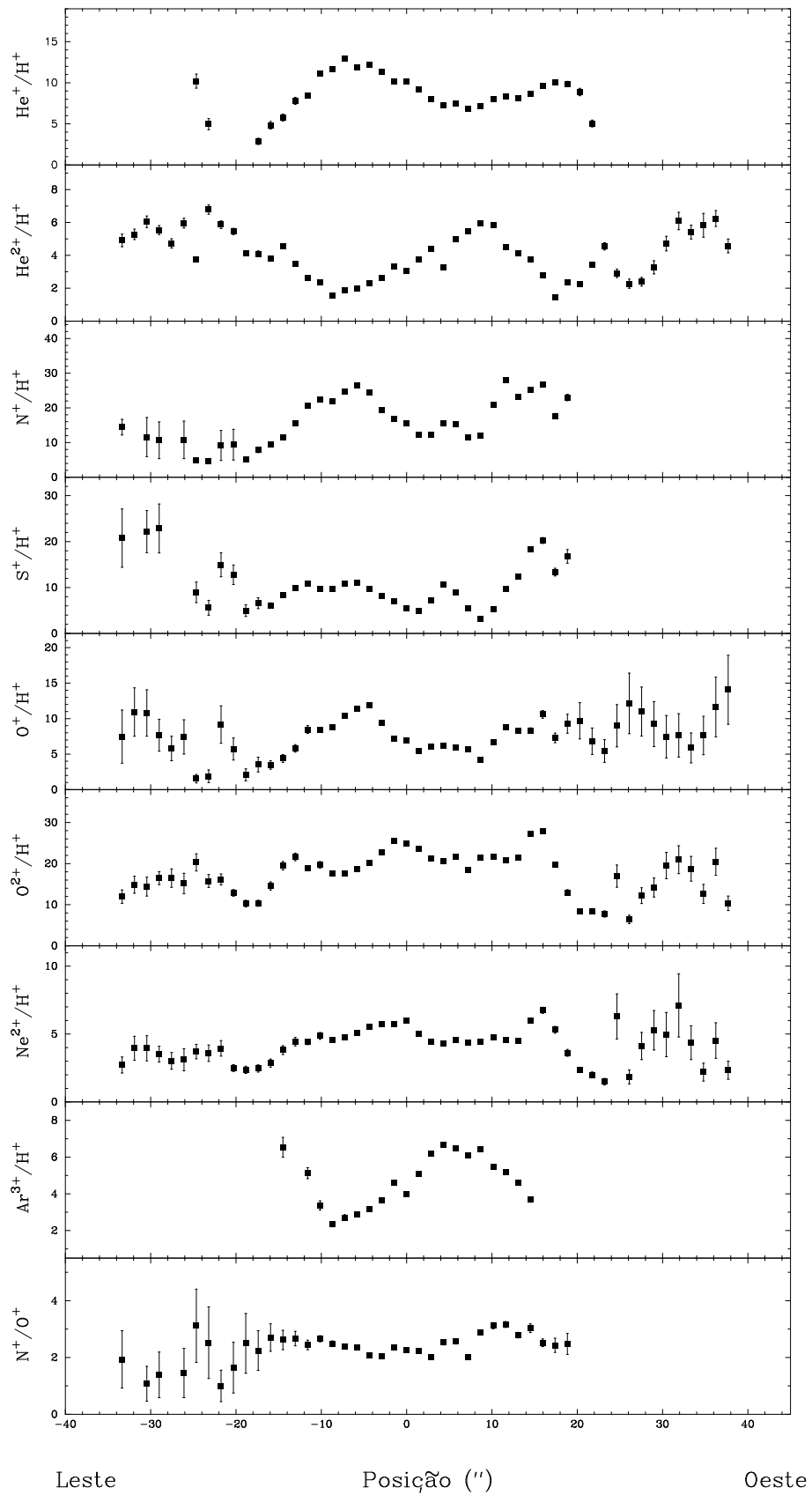


Figura C.22: Figura C.16, mas para $\Delta\delta = 2''$ N.

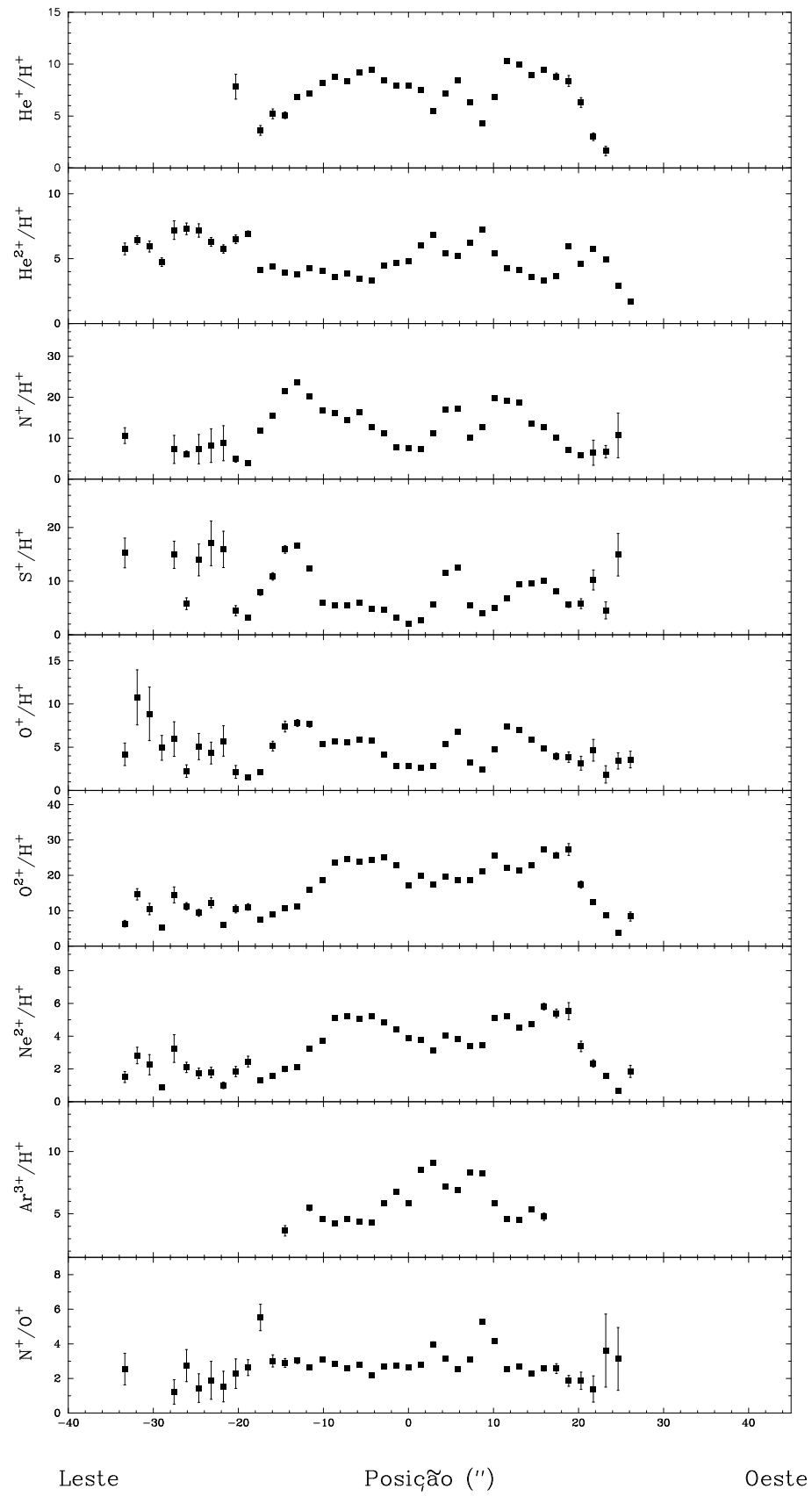


Figura C.23: Figura C.16, mas para $\Delta\delta = 4''$ N.

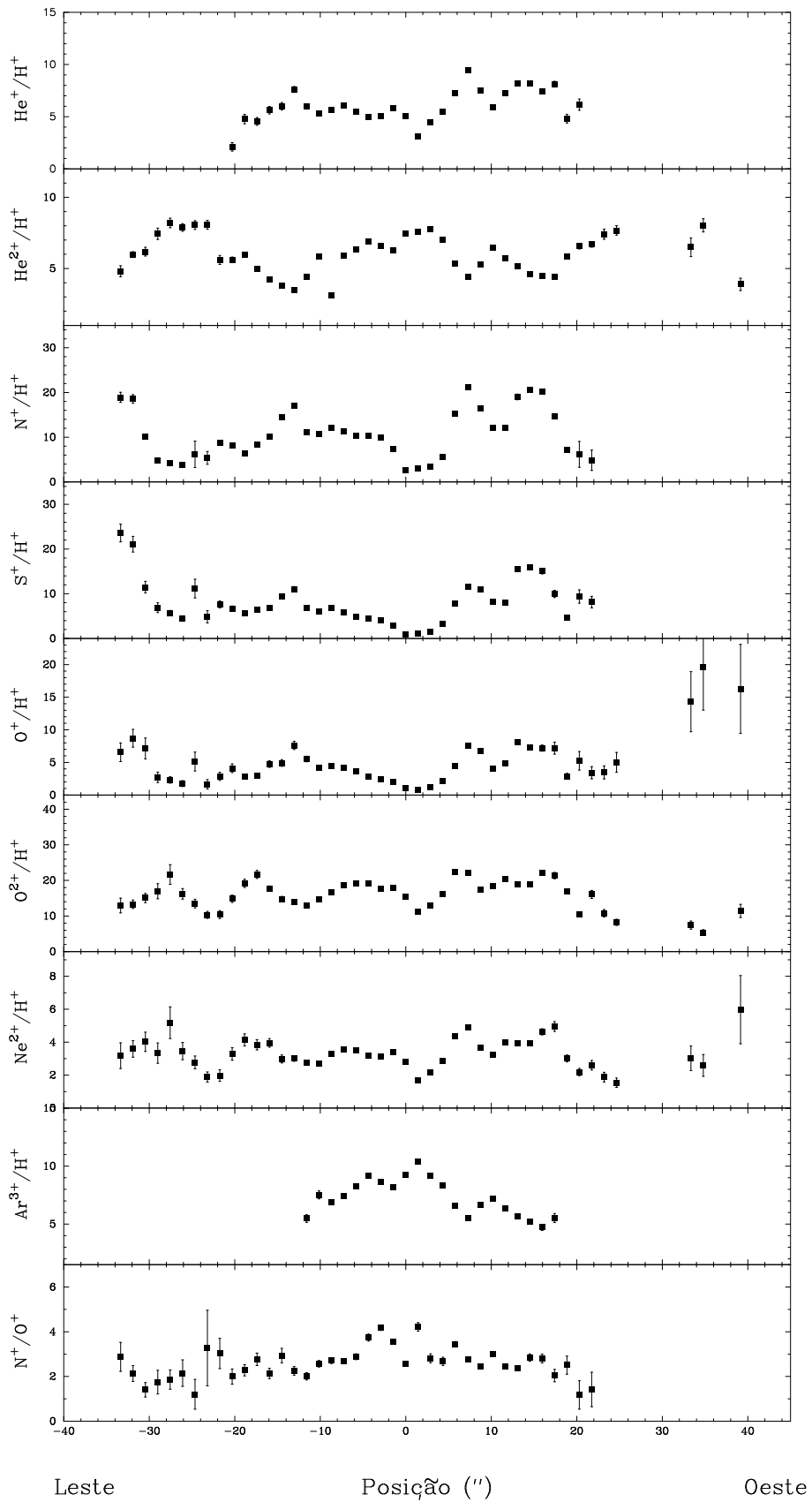


Figura C.24: Figura C.16, mas para $\Delta\delta = 6''$ N.

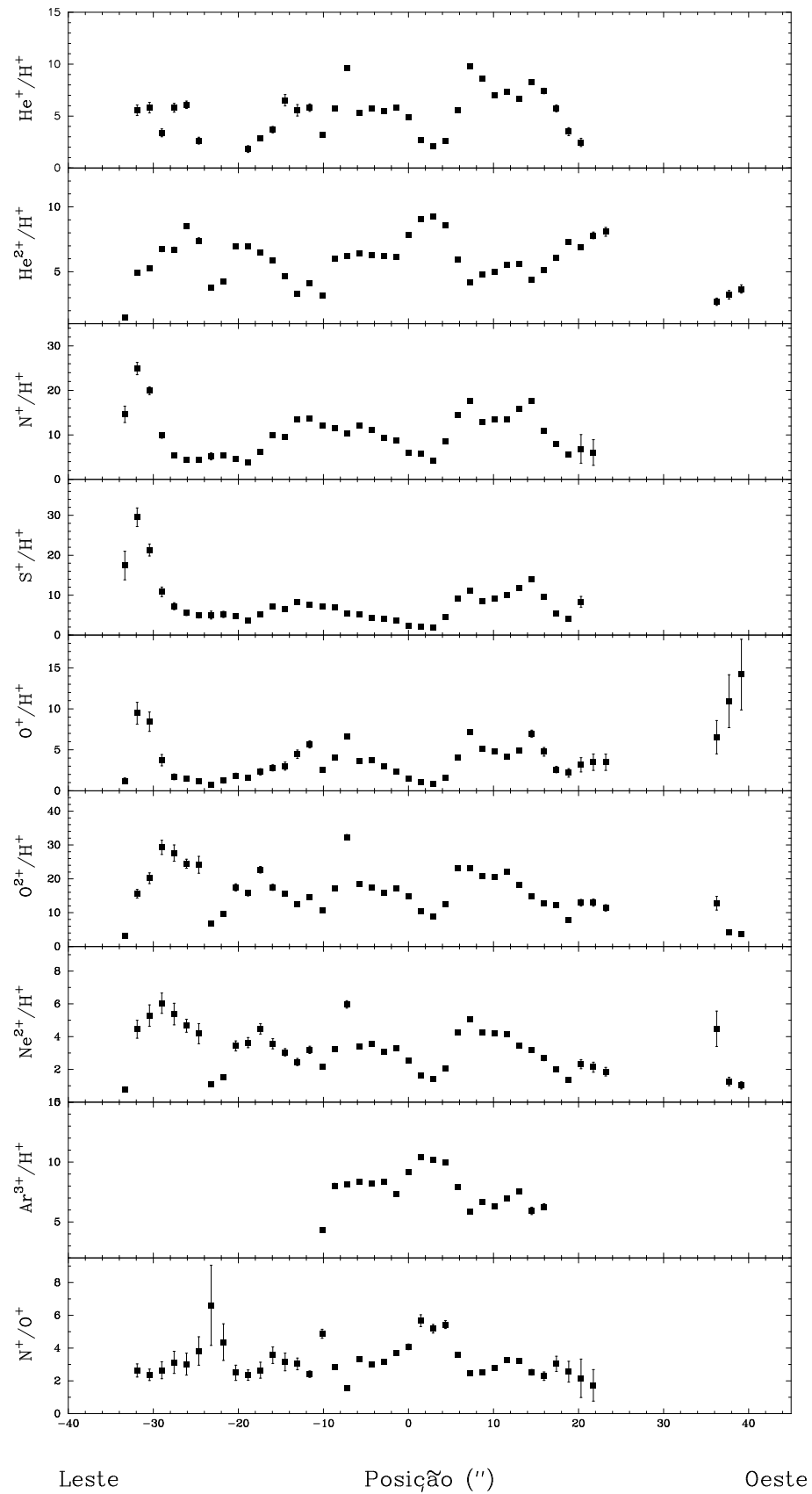


Figura C.25: Figura C.16, mas para $\Delta\delta = 8''$ N.

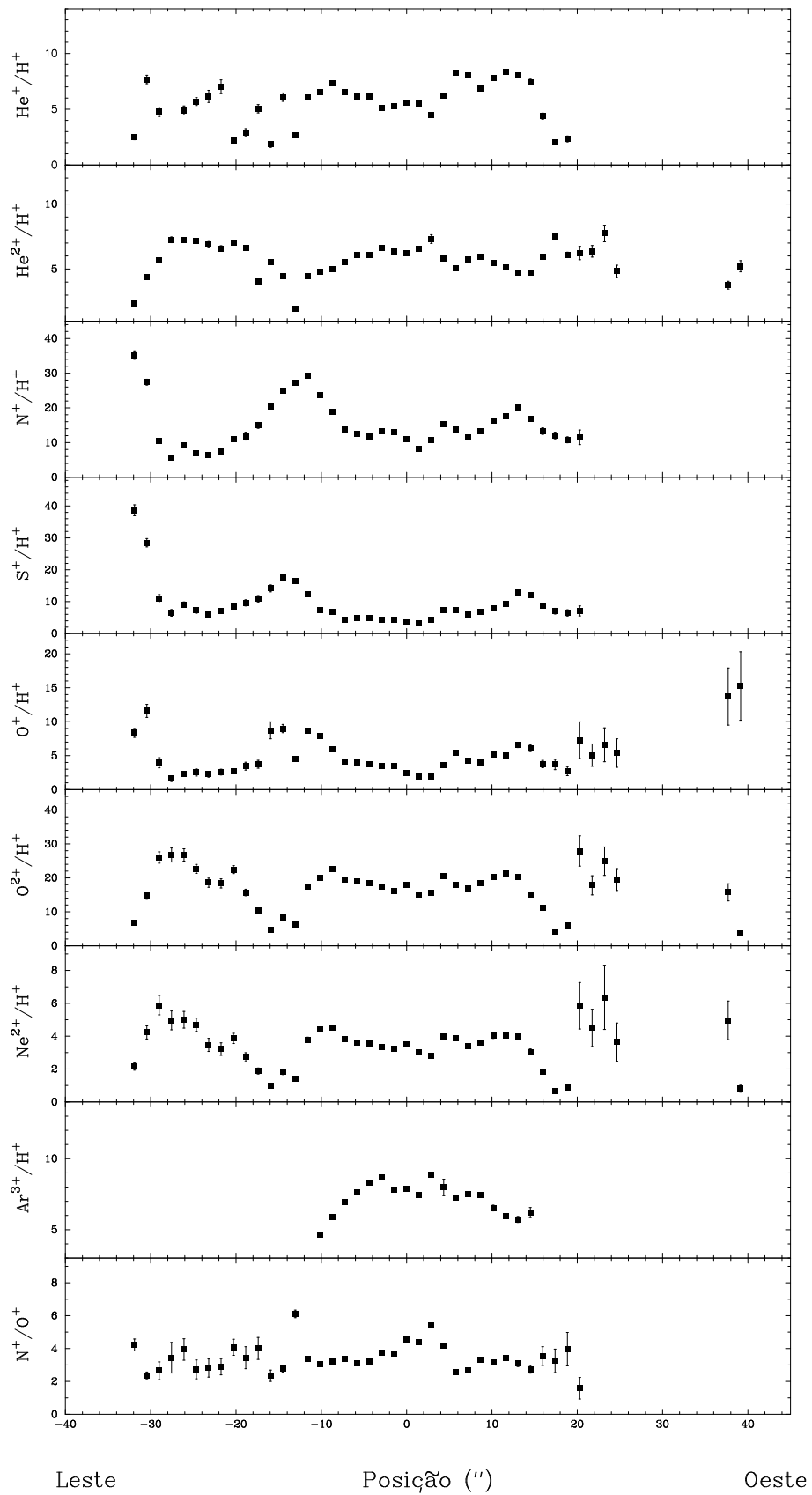


Figura C.26: Figura C.16, mas para $\Delta\delta = 10''$ N.

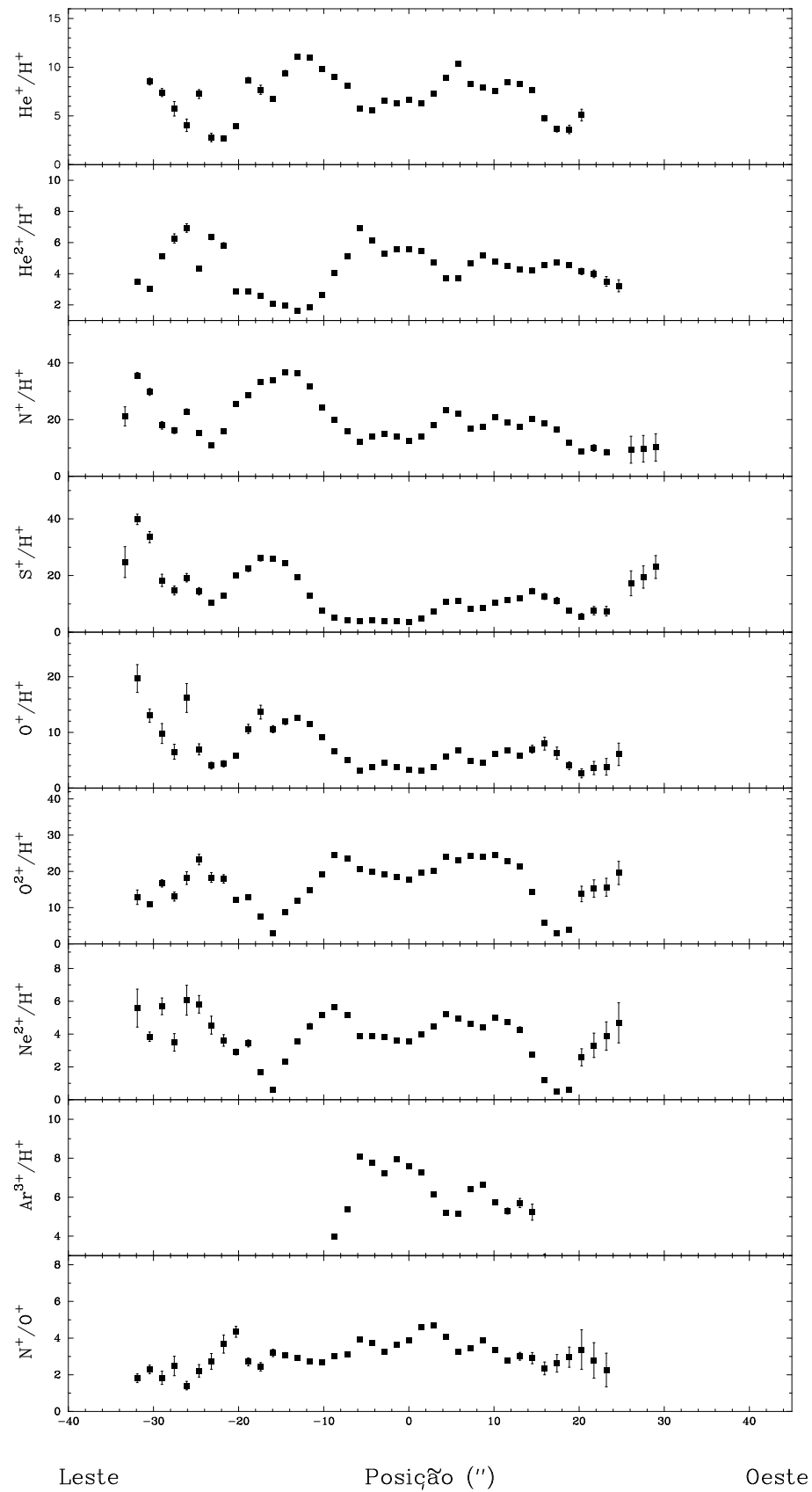


Figura C.27: Figura C.16, mas para $\Delta\delta = 12''$ N.

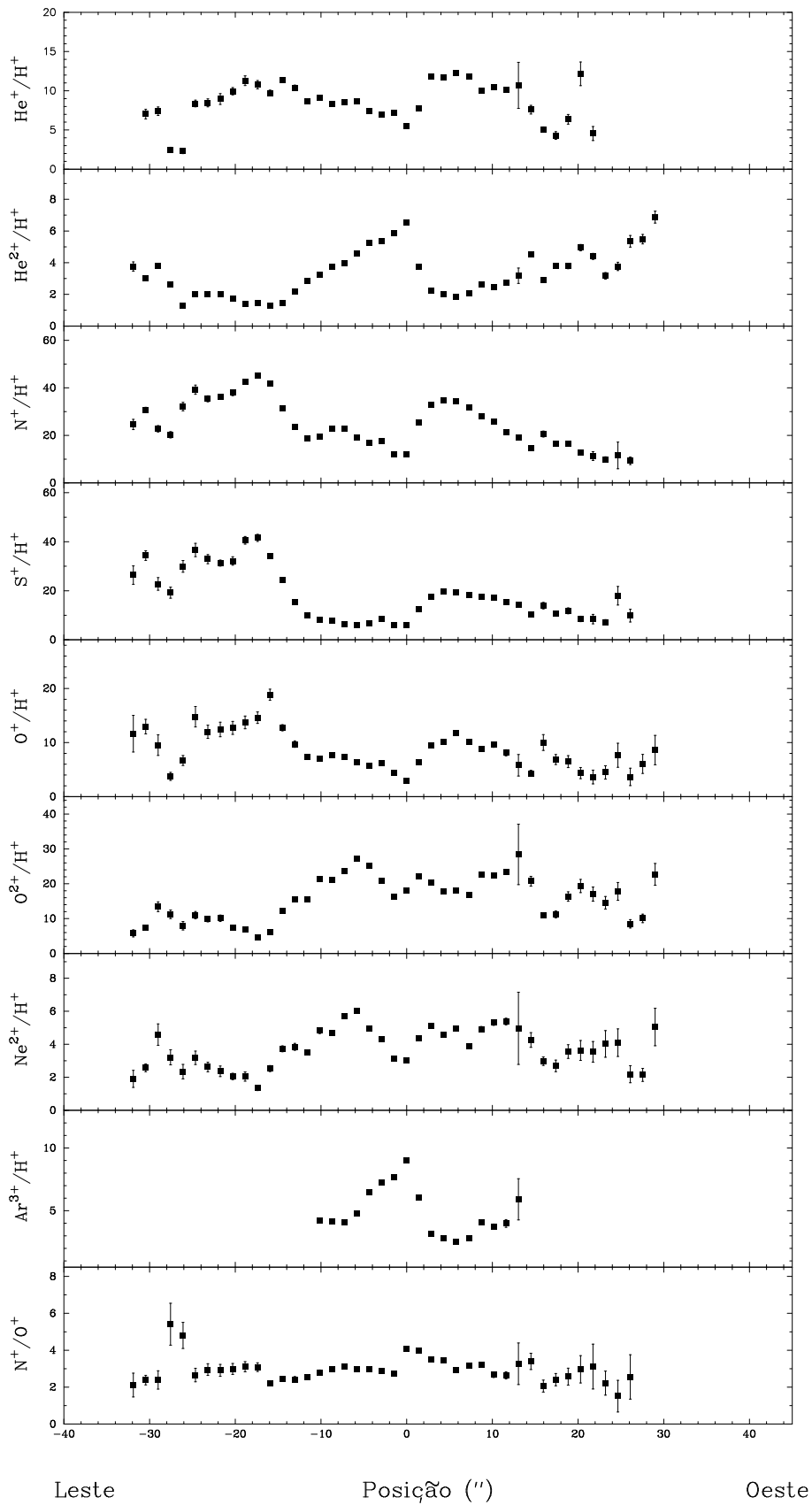


Figura C.28: Figura C.16, mas para $\Delta\delta = 14''$ N.

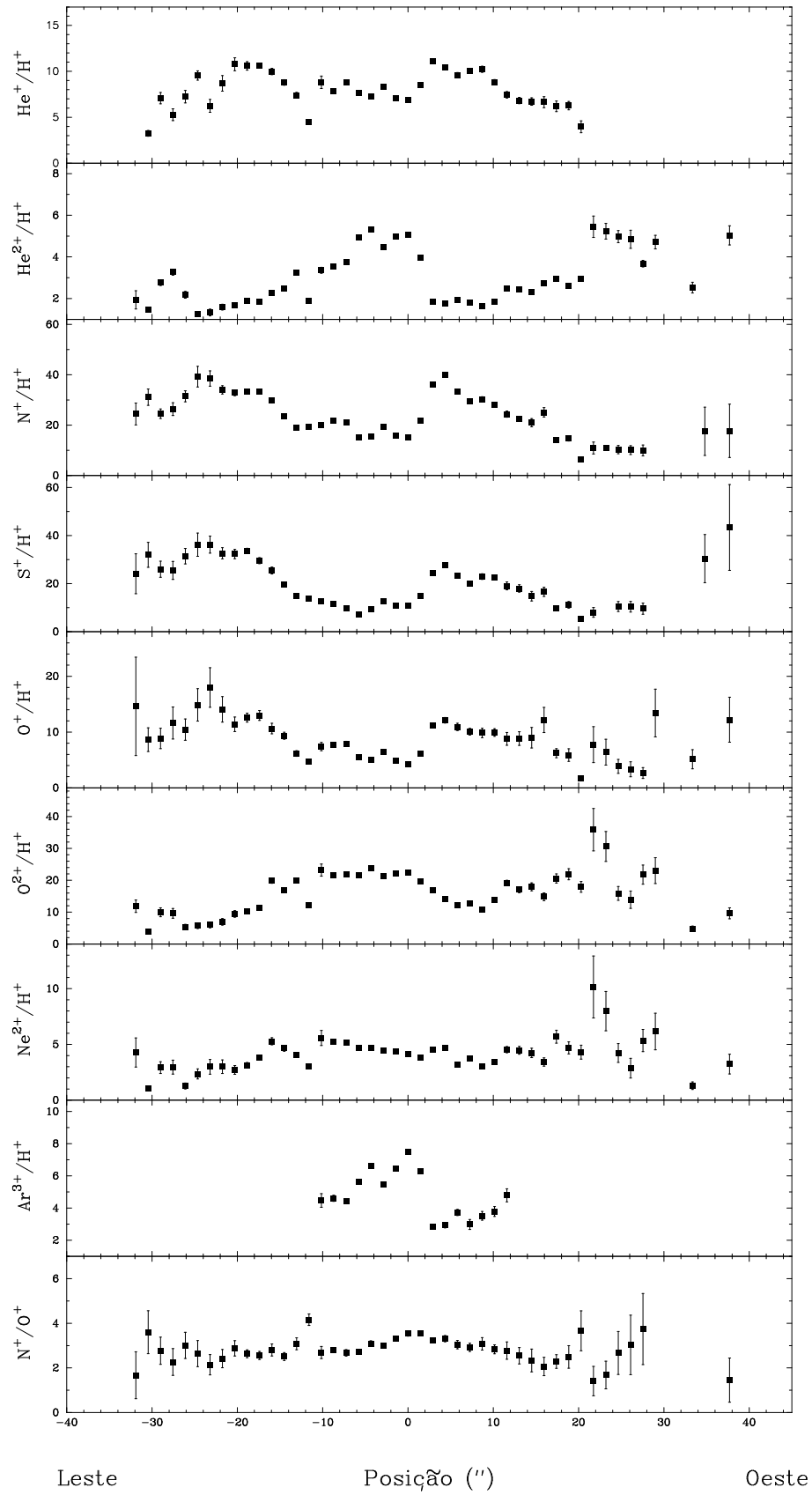


Figura C.29: Figura C.16, mas para $\Delta\delta = 16''$ N.

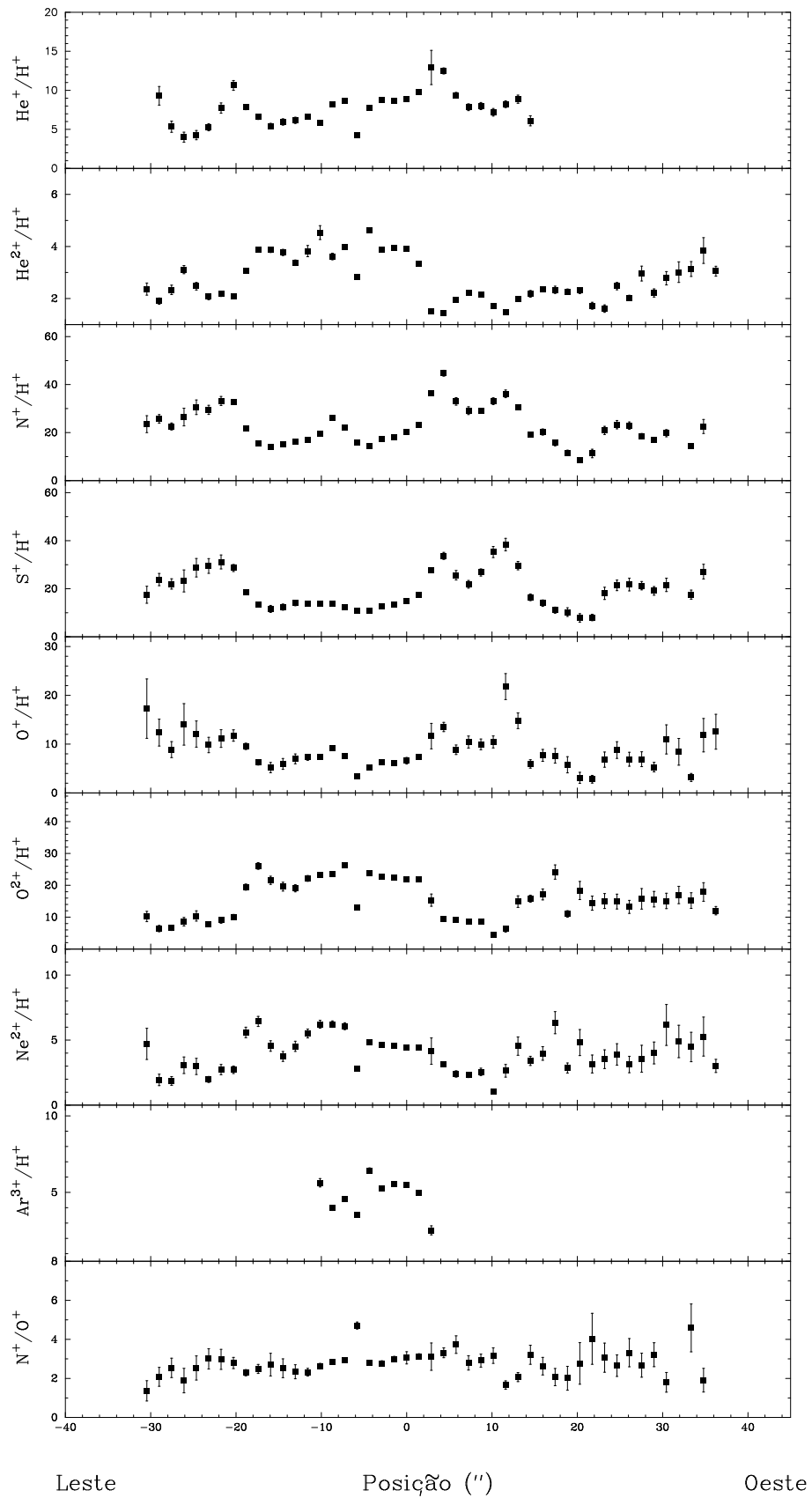


Figura C.30: Figura C.16, mas para $\Delta\delta = 18''$ N.

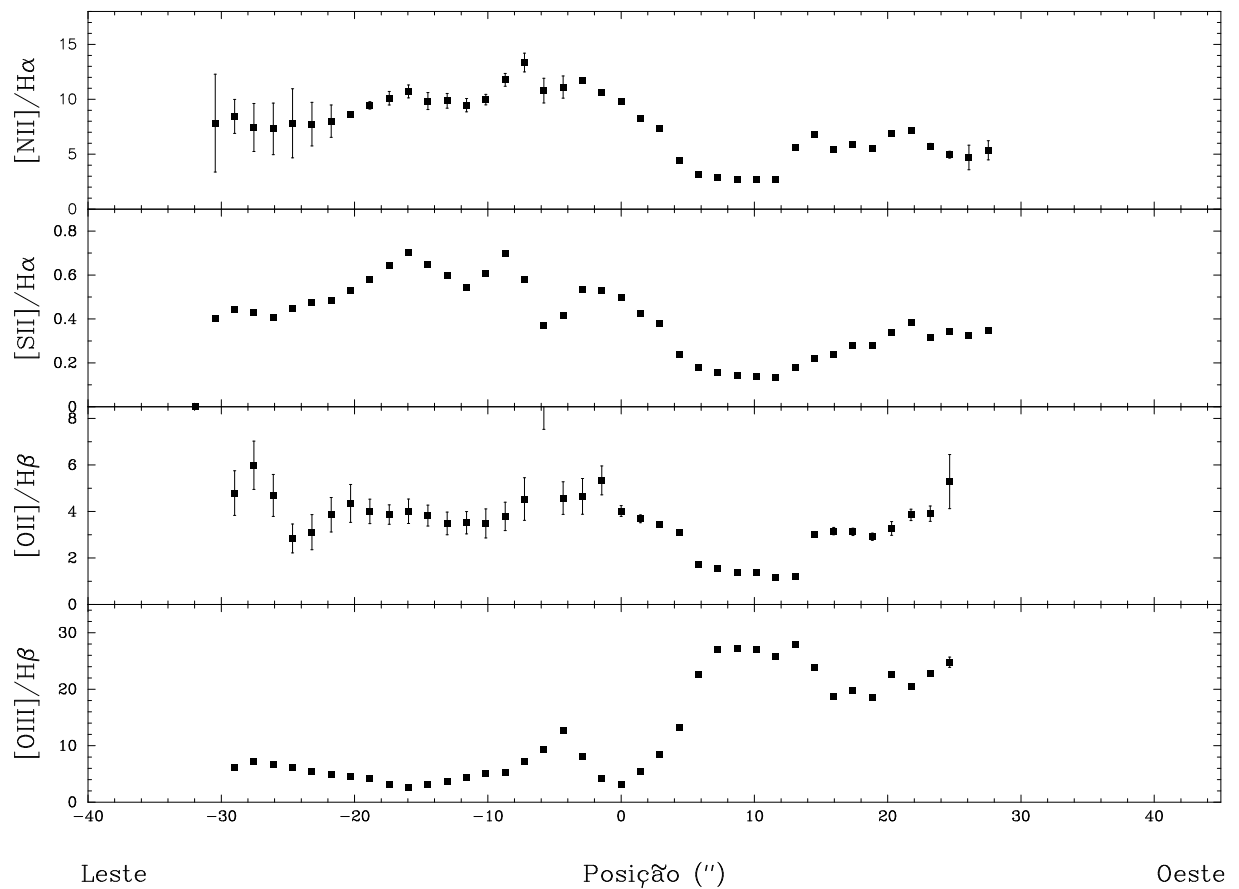
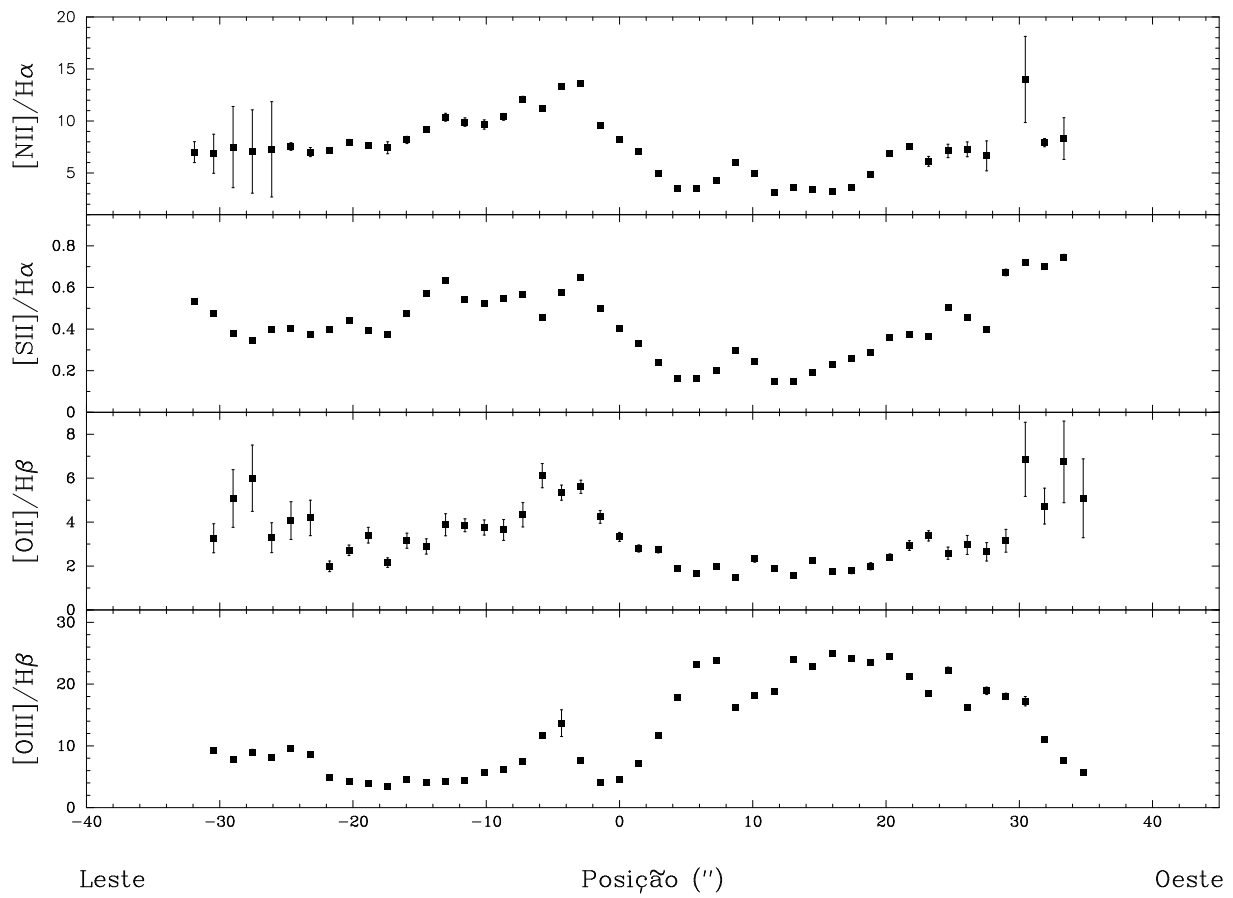


Figura C.31: NGC 2440 - Perfis espaciais de $[NII]/H\alpha$, $[SII]/H\alpha$, $[OII]/H\beta$ e $[OIII]/H\beta$ ao longo de $\Delta\delta = 10''$ S. A posição no eixo horizontal é relativa à estrela central.

Figura C.32: Figura C.31, mas para $\Delta\delta = 8''$ S.

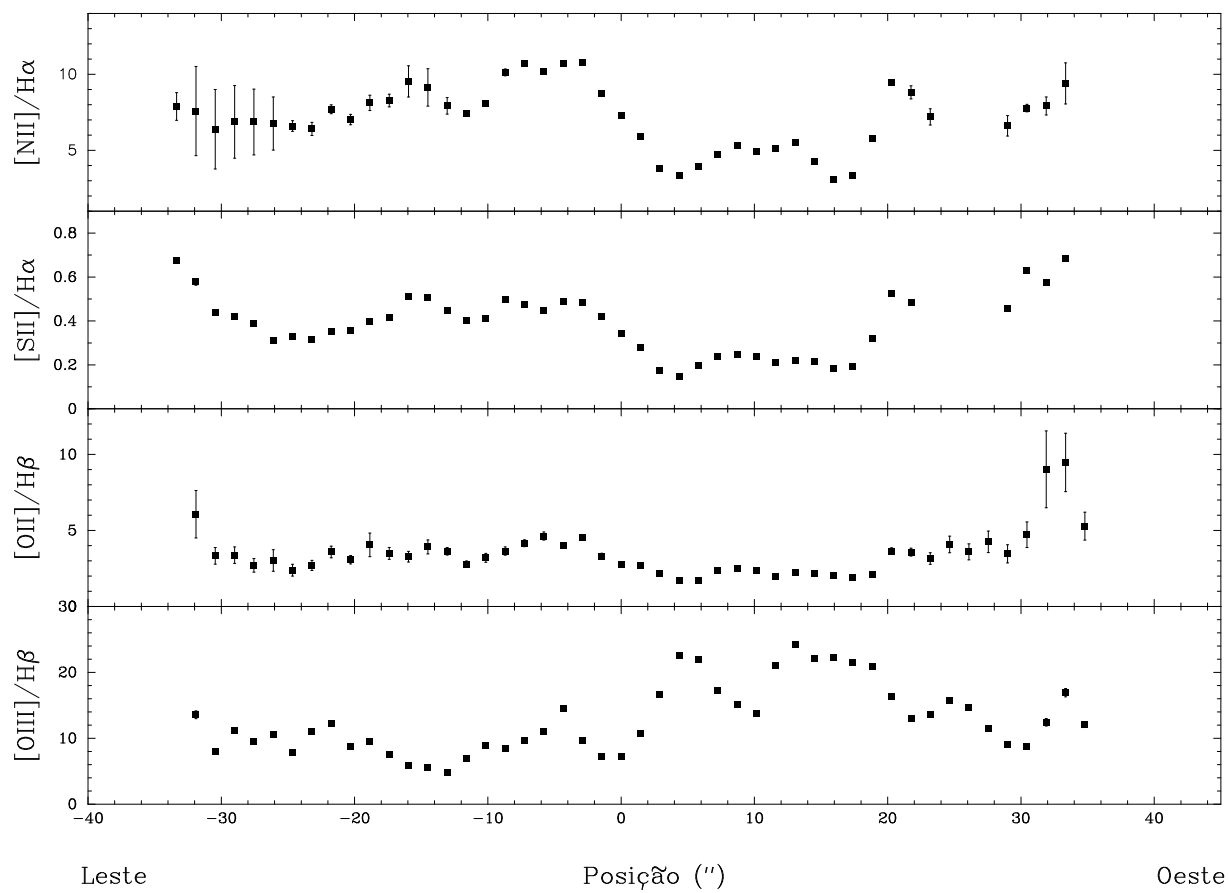
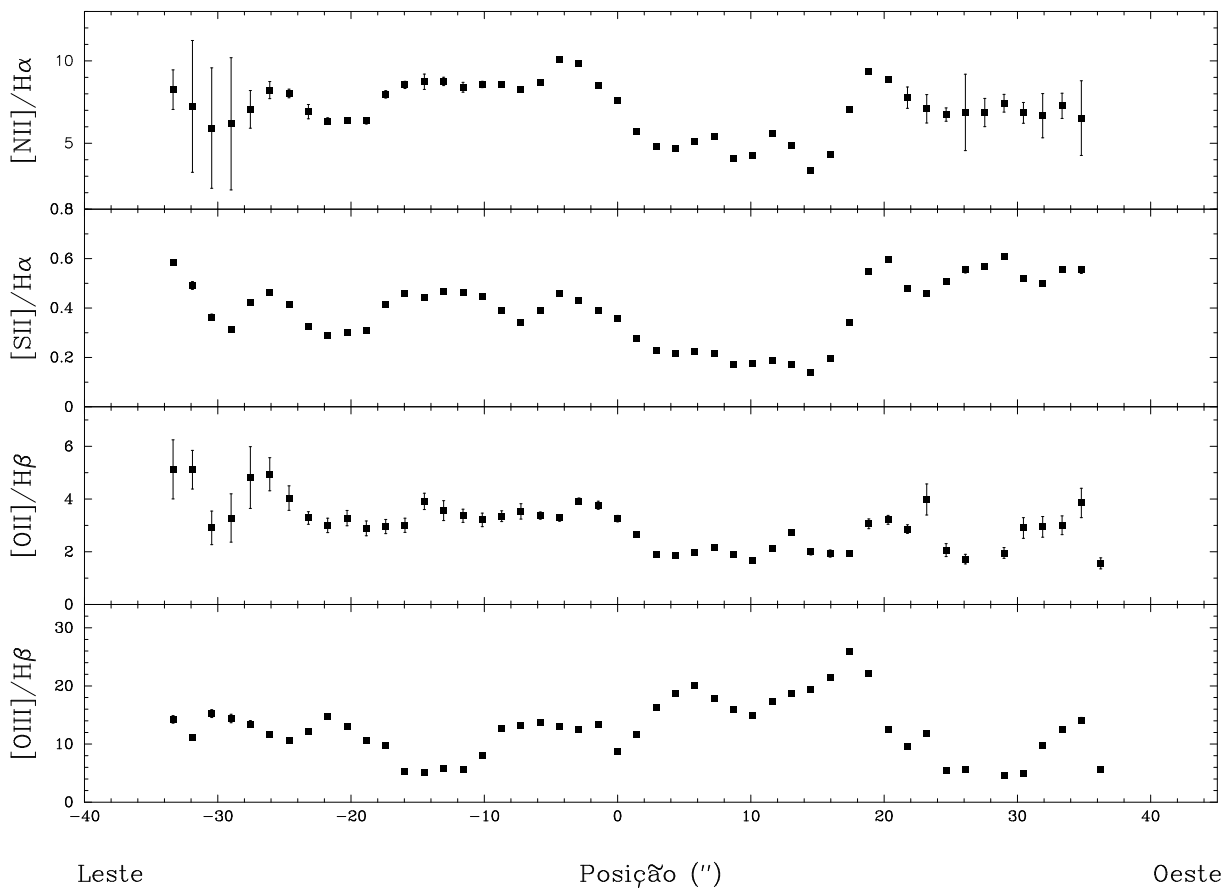
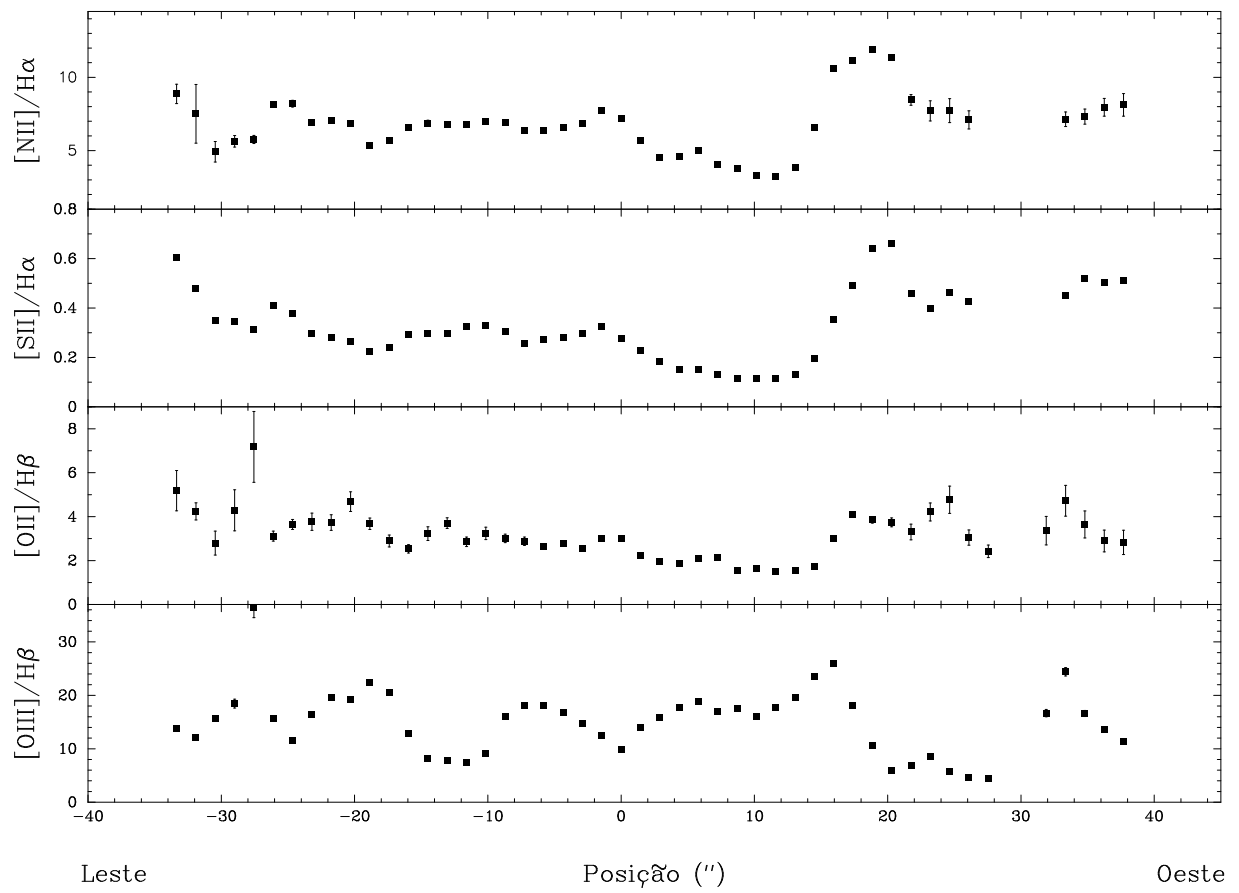
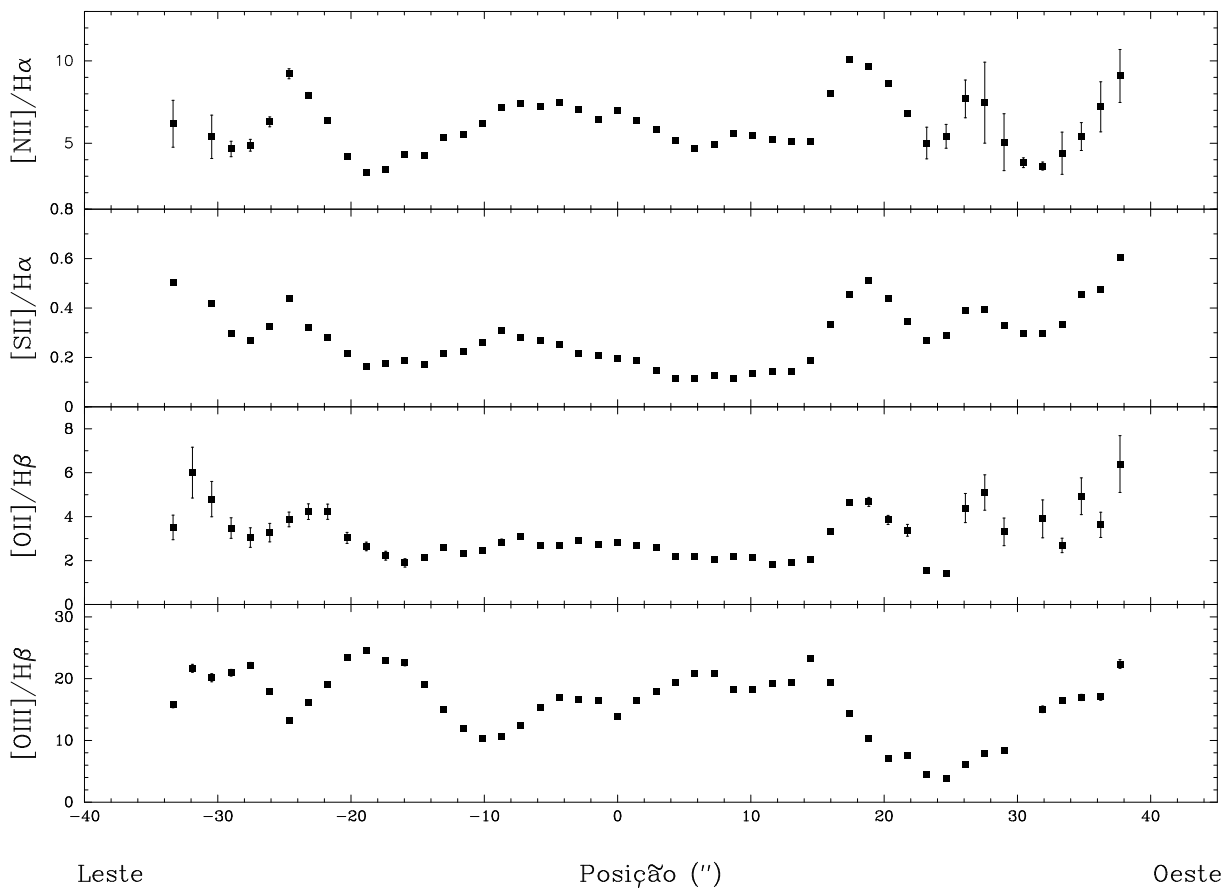
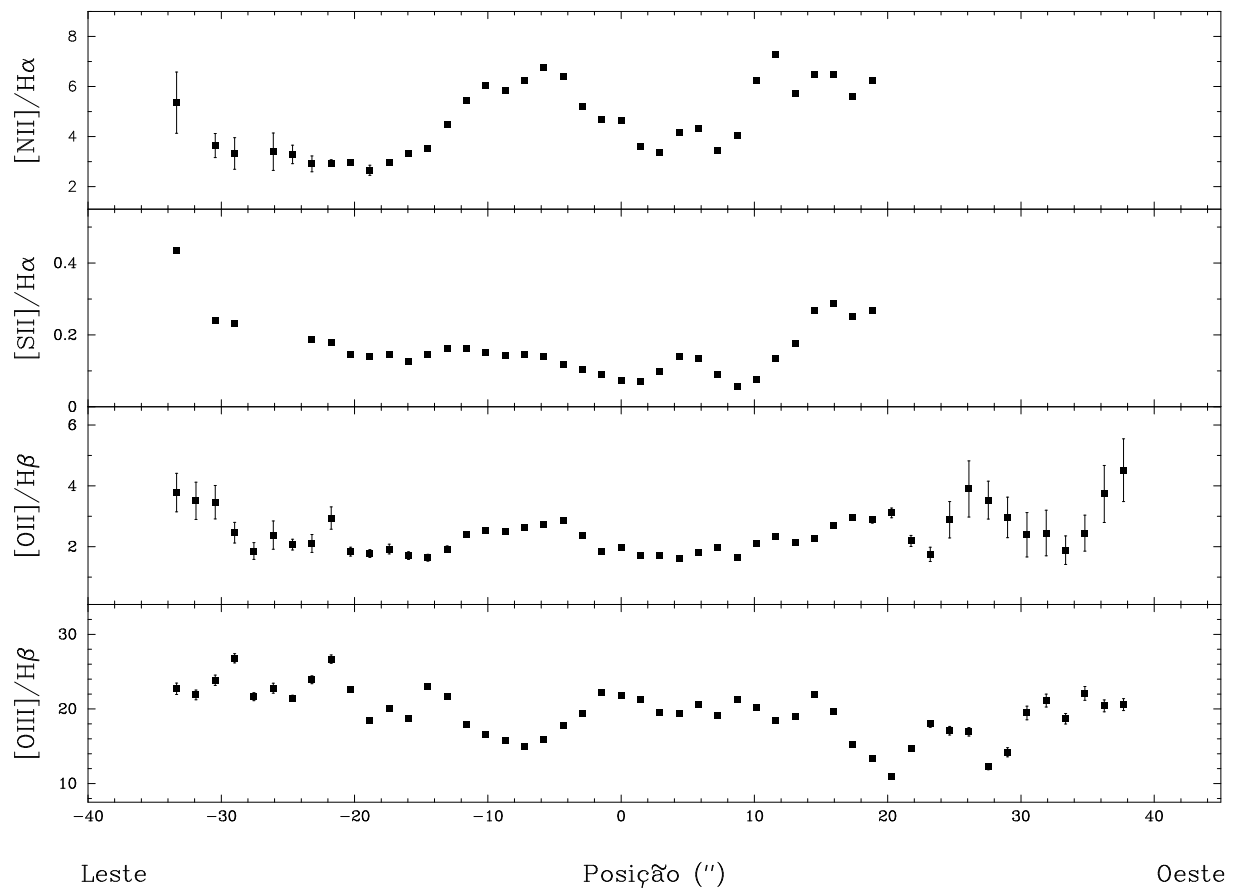


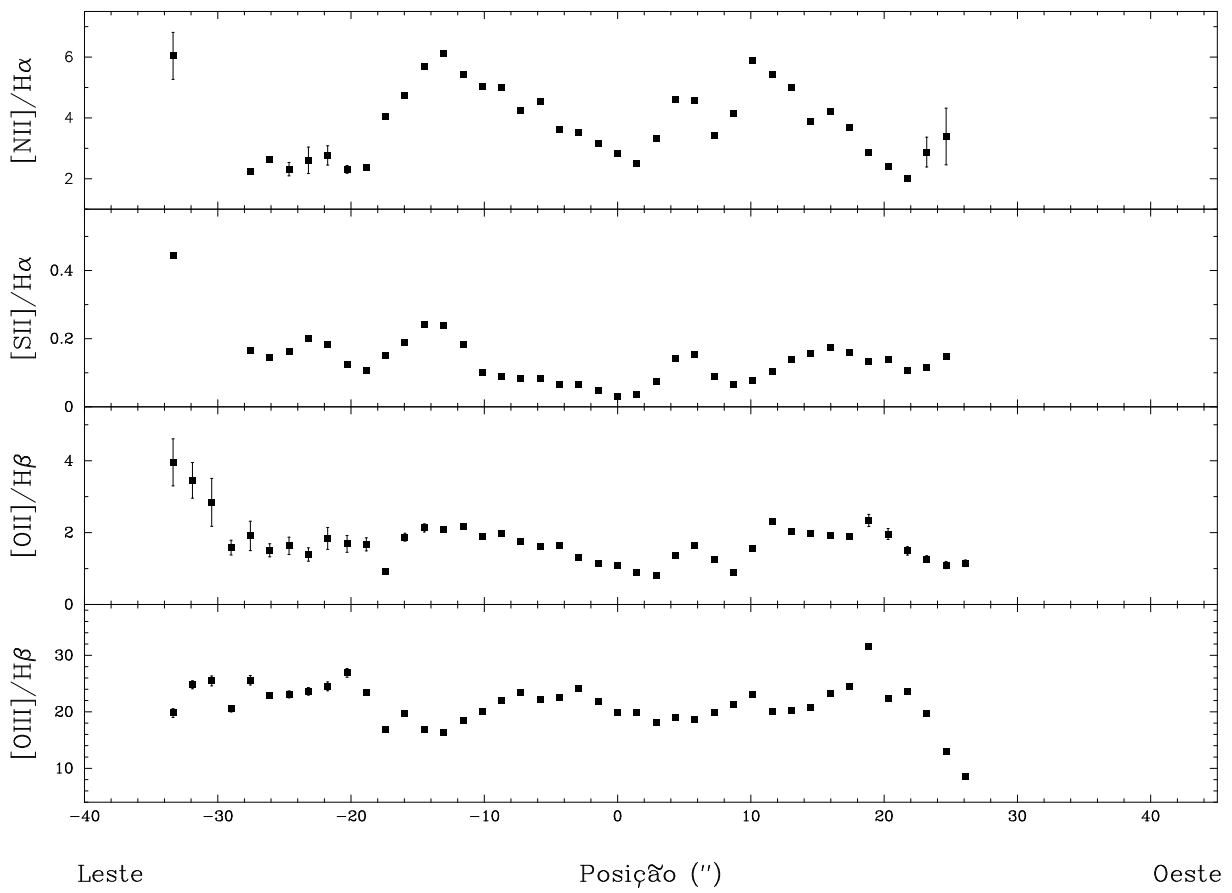
Figura C.33: Figura C.31, mas para $\Delta\delta = 6''$ S.

Figura C.34: Figura C.31, mas para $\Delta\delta = 4''$ S.

Figura C.35: Figura C.31, mas para $\Delta\delta = 2''$ S.

Figura C.36: Figura C.31, mas para $\Delta\delta = 0''$.

Figura C.37: Figura C.31, mas para $\Delta\delta = 2''$ N.

Figura C.38: Figura C.31, mas para $\Delta\delta = 4''$ N.

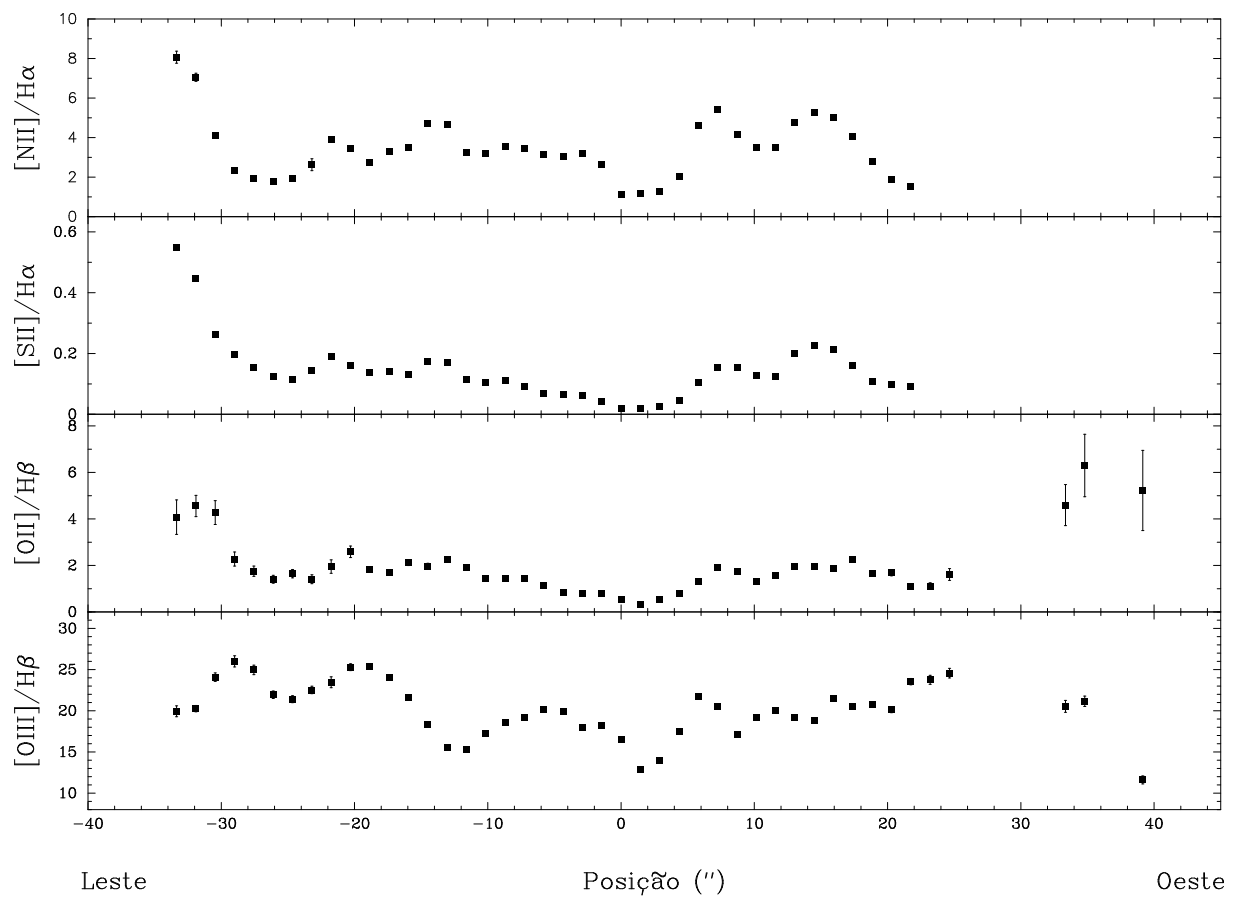
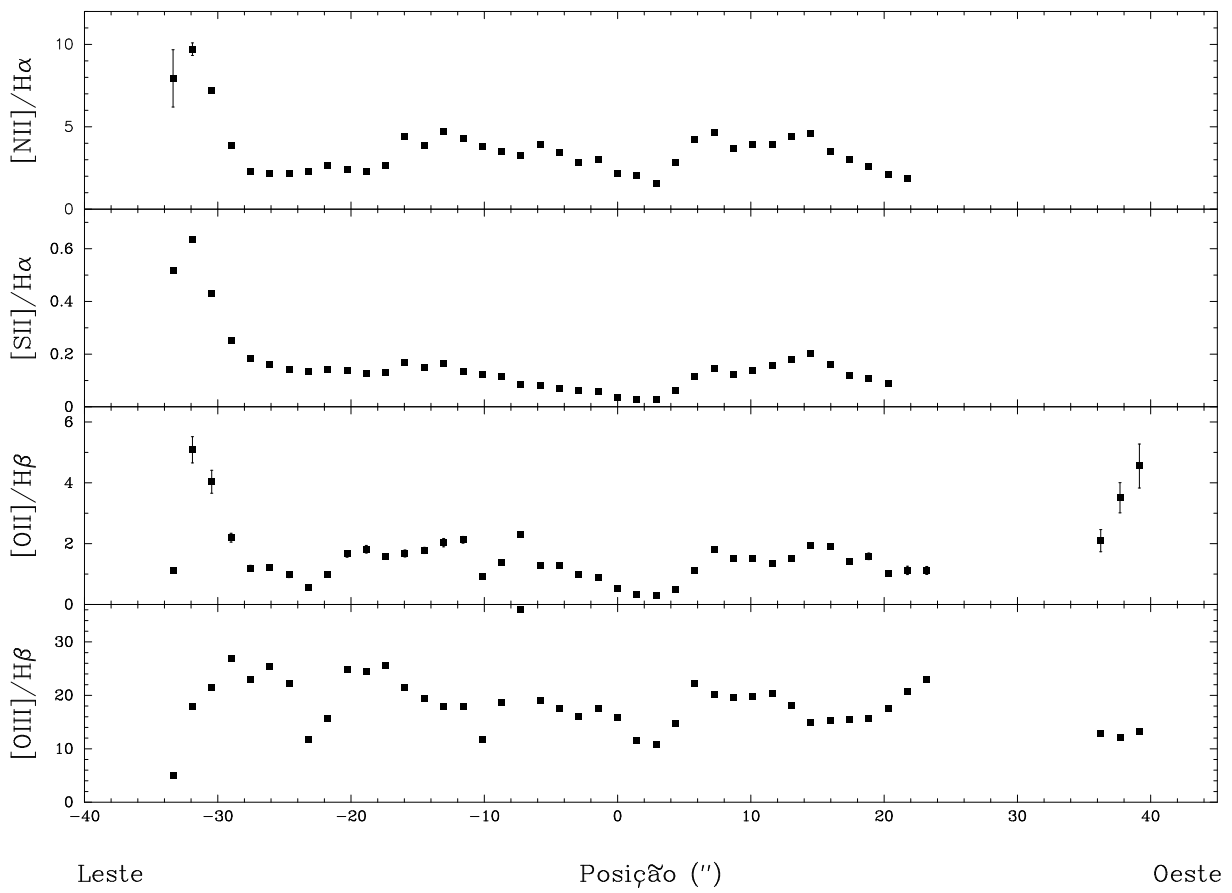


Figura C.39: Figura C.31, mas para $\Delta\delta = 6''$ N.

Figura C.40: Figura C.31, mas para $\Delta\delta = 8''$ N.

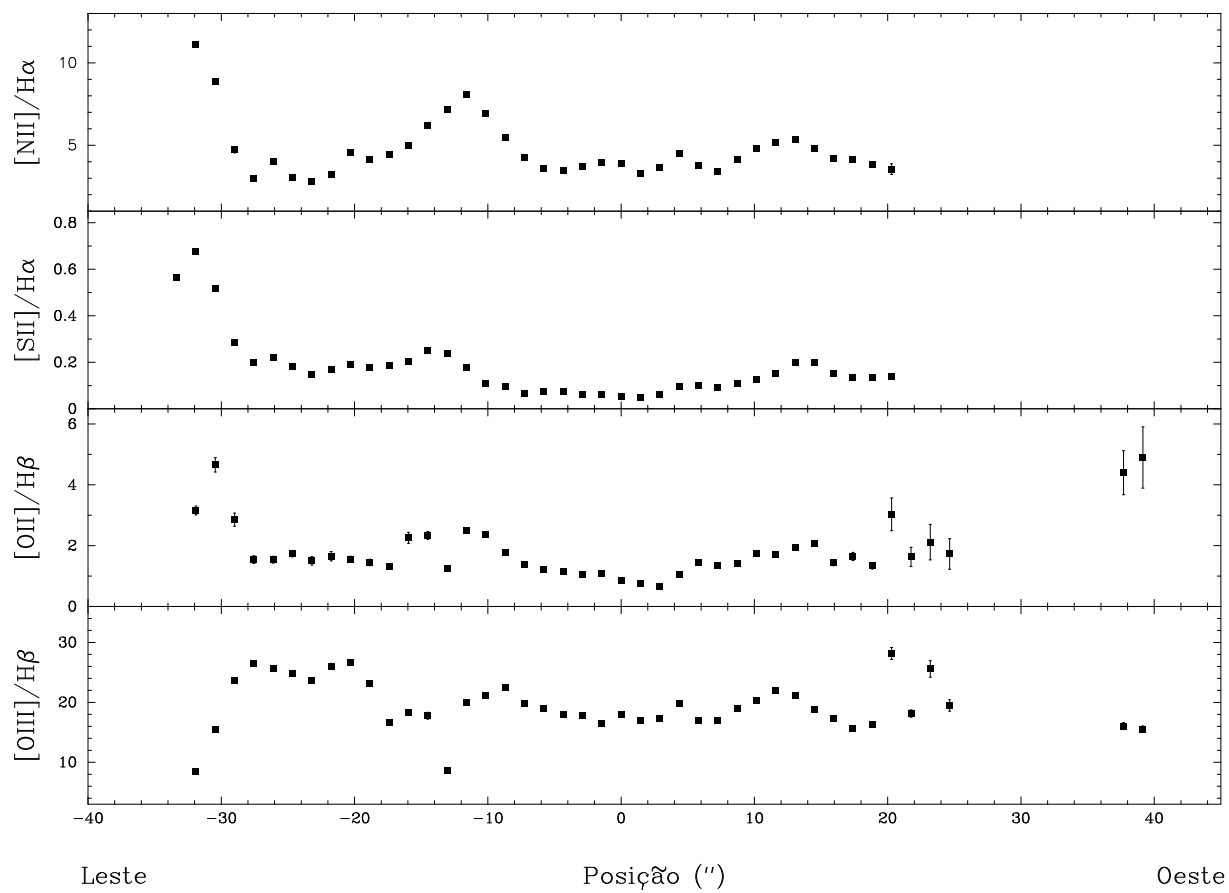
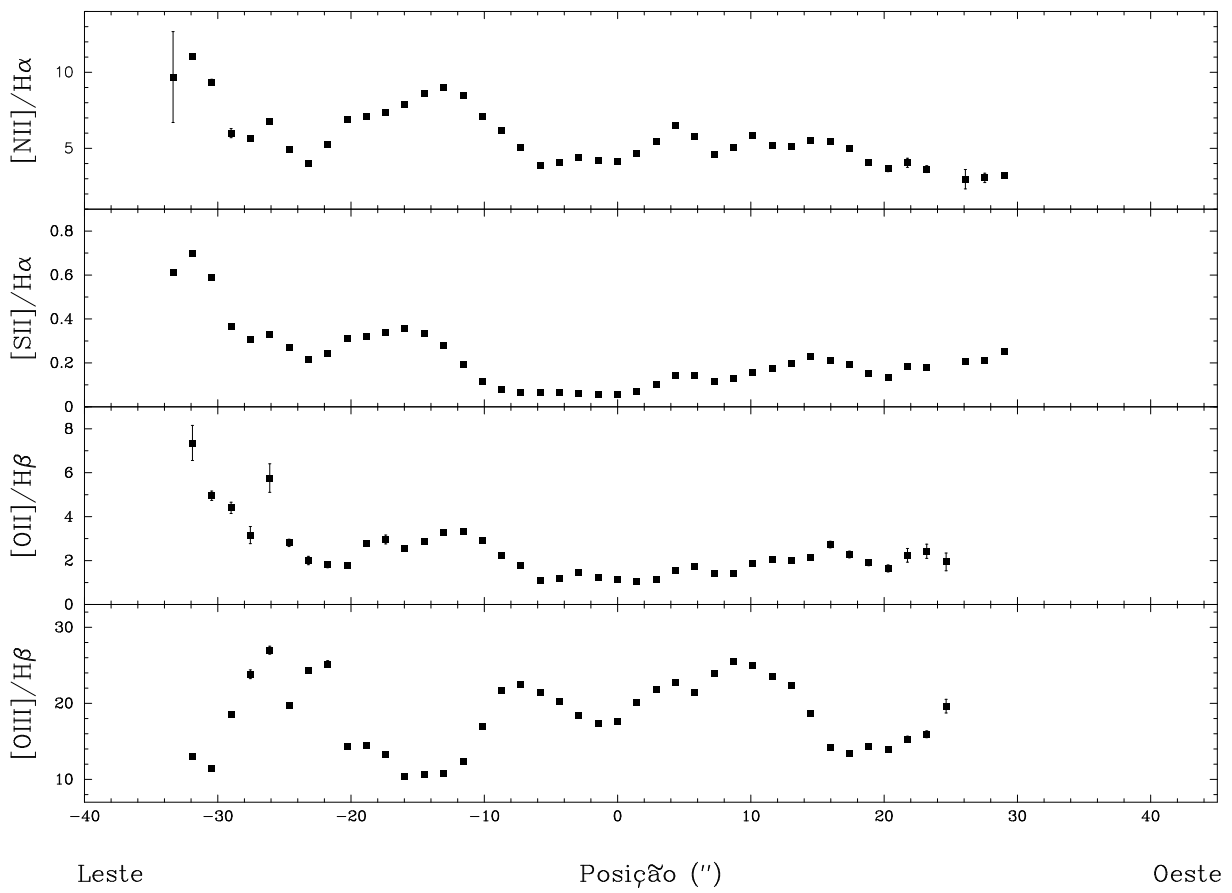
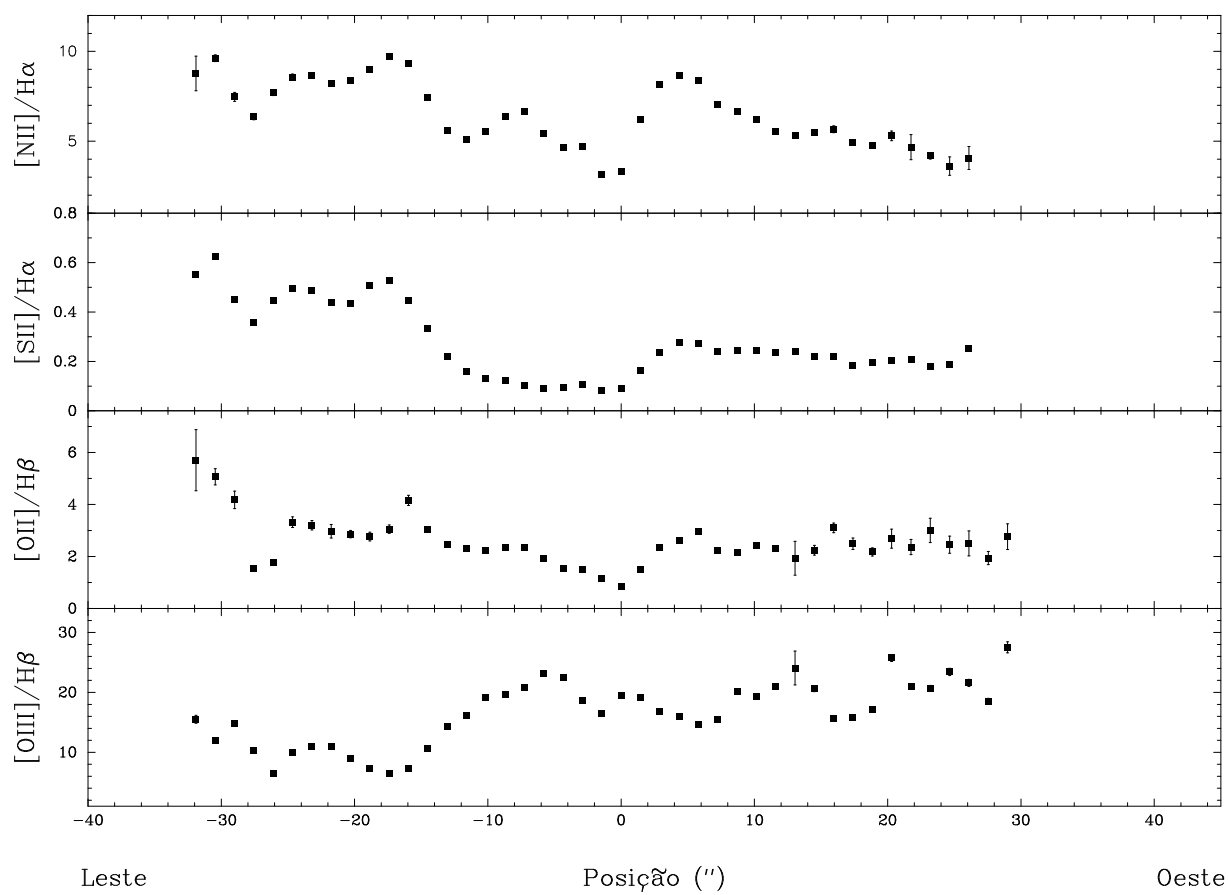
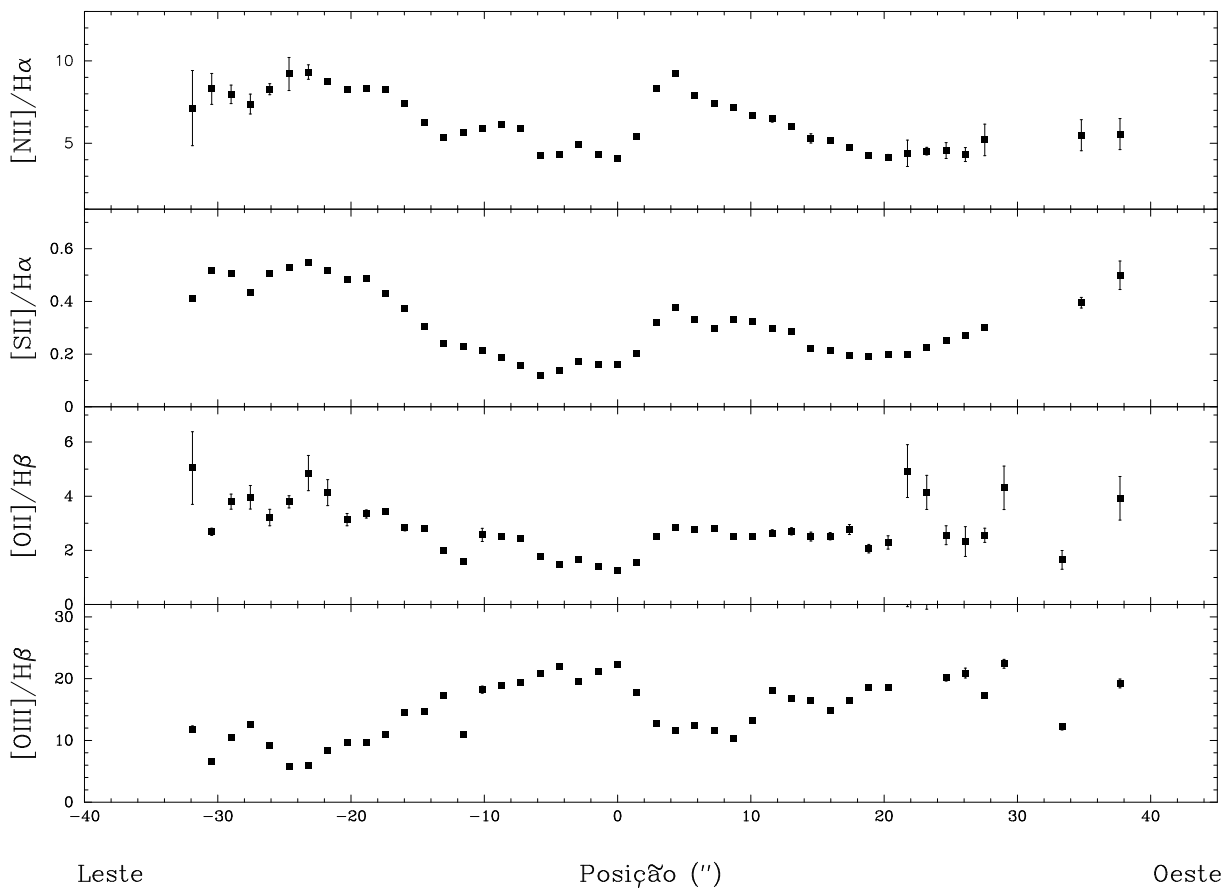
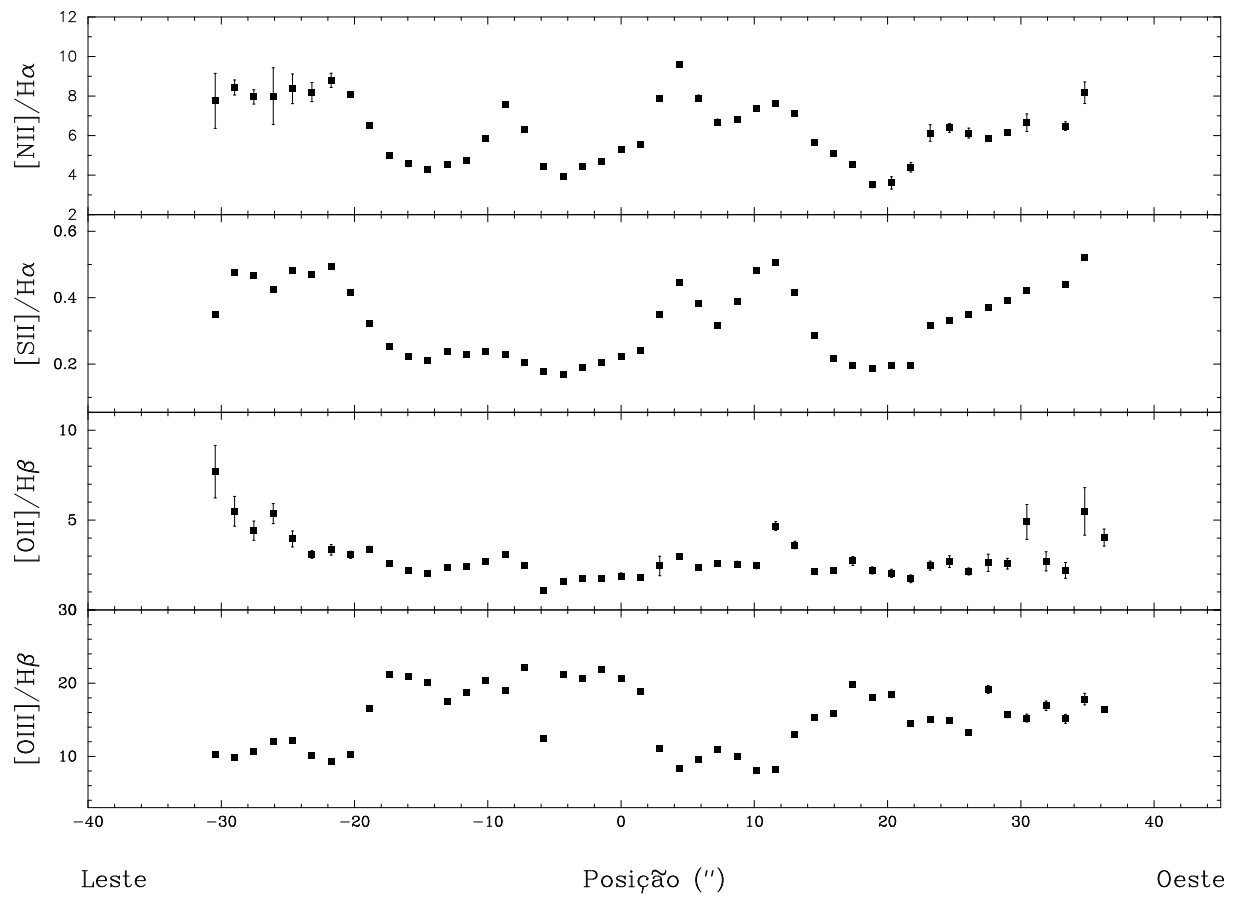


Figura C.41: Figura C.31, mas para $\Delta\delta = 10''$ N.

Figura C.42: Figura C.31, mas para $\Delta\delta = 12''$ N.

Figura C.43: Figura C.31, mas para $\Delta\delta = 14''$ N.

Figura C.44: Figura C.31, mas para $\Delta\delta = 16''$ N.

Figura C.45: Figura C.31, mas para $\Delta\delta = 18''$ N.