

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

Jônatas Barreto Ribeiro

# **Nebulosas planetárias como traçadoras da evolução química da Galáxia**

São Paulo

2018



Jônatas Barreto Ribeiro

# Nebulosas planetárias como traçadoras da evolução química da Galáxia

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

Área de Concentração: Astronomia

Orientador: Prof. Dr. Roberto Dell’Aglio  
Dias da Costa

São Paulo

2018



*Dedicado a todos(as) os(as) cientistas, professores(as)  
e pesquisadores(as) brasileiros(as), que se dedicam a produzir e disseminar conhecimento,  
seja em tempos de luz ou de obscurantismo.*



# Agradecimentos

À minha família, sobretudo meus pais, Rejane e Gustavo, que me dão amor e suporte em tudo;

À Bianca, que tem sido minha inspiração diária em tudo que faço;

Ao Prof. Roberto Dell’Aglío Dias da Costa, que me orientou e muito me apoiou no decorrer deste projeto e da graduação;

Às Prof<sup>as</sup>. Jane Cristina Gregorio-Hetem e Vera Jatenco Silva Pereira, que coordenaram as disciplinas de Trabalho de Graduação I e II e me deram o estímulo e as ferramentas necessárias para a realização deste projeto;

Aos colegas que encontrei pela graduação, alguns dos quais se tornaram amigos e amigas que levarei para o resto da vida;

Ao CNPq, pelo apoio financeiro, pelo período de agosto de 2015 a agosto de 2016;

Ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo.



*“O nitrogênio em nosso DNA, o cálcio em nossos dentes, o ferro em nosso sangue, o carbono em nossas tortas de maçã... Foram feitos no interior de estrelas em colapso, agora mortas há muito tempo. Nós somos poeira das estrelas.”*

Carl Sagan

*“A alegria não chega apenas no encontro do achado, mas faz parte do processo da busca. E ensinar e aprender não pode dar-se fora da procura, fora da boniteza e da alegria.”*

Paulo Freire



# Resumo

As nebulosas planetárias (NPs), objetos remanescentes da evolução de estrelas de baixa e média massa, têm se provado importantes ferramentas de diagnóstico da evolução química da Galáxia, dada sua variedade de propriedades cinemáticas, químicas e morfológicas e as diferentes idades e regiões do disco em que estão inseridas suas estrelas progenitoras. A grande dispersão dos dados referentes ao extenso sistema de NPs da Galáxia, contudo, evidencia a necessidade de compilação e homogeneização das informações amostrais. Tendo isso em vista, foi produzido um extenso banco de dados com informações relevantes a respeito de mais de 300 objetos a fim de otimizar o trabalho analítico aqui realizado. Com essa ferramenta, foi possível determinar importantes indicativos da nucleossíntese das estrelas progenitoras das NPs e da evolução química do disco galáctico em termos das abundâncias de elementos  $\alpha$  leves (O, Ne, S e Ar).



# Abstract

Planetary nebulae (NP), remnants of the evolution of low- and intermediate-mass stars, have proven themselves as important tools for diagnosing the chemical evolution of the Galaxy, due to their variety of cinematic, chemical and morphological properties and the distinct ages and regions of the disc where their progenitor stars lie. The great dispersion of data related to the vast system of PN in the Galaxy, however, highlights the need for compilation and homogenization of the sample information. That said, a large database with relevant information about over 300 objects was produced aiming to optimize the analysis accomplished in this work. Using that tool, it was possible to determine important signs of the nucleosynthesis of PN progenitor stars and of the chemical evolution of the galactic disk in terms of the abundances of light  $\alpha$  elements (O, Ne, S and Ar).



## Lista de Figuras

2.1	Comparação entre abundâncias de N e He . . . . .	28
2.2	Comparação entre abundâncias de Ne e O . . . . .	28
2.3	Comparação entre abundâncias de S e O . . . . .	29
2.4	Comparação entre abundâncias de Ar e O . . . . .	29
2.5	Histograma das abundâncias de O para o Tipo I . . . . .	30
2.6	Histograma das abundâncias de O para o Tipo II . . . . .	30
2.7	Histograma das abundâncias de O para o Tipo III . . . . .	31
2.8	Histograma de R na amostra IAG . . . . .	31
2.9	Histograma de R na amostra SH . . . . .	32
2.10	Gradientes de O separados para IAG e SH para todos os pontos . . . . .	32
2.11	Gradientes de O separados para IAG e SH para $R > 2,9kpc$ . . . . .	33
2.12	Gradientes de O separados para IAG e SH para $R > 4 kpc$ . . . . .	33
2.13	Gradiente de O para IAG e SH em conjunto para $R > 4 kpc$ . . . . .	34
2.14	Gradientes de O de cada tipo de Peimbert para IAG e SH em conjunto para $R > 4 kpc$ . . . . .	34
2.15	Abundâncias de Ne em função de R com separação por amostra e tipo para $R > 4 kpc$ . . . . .	35
2.16	Gradientes de Ne de cada tipo de Peimbert para IAG e SH em conjunto para $R > 4 kpc$ . . . . .	35
2.17	Gradiente de O para IAG e SH em conjunto para $R > 4 kpc$ . . . . .	36
A.1	Histograma das abundâncias de Fe para o Tipo I . . . . .	45
A.2	Histograma das abundâncias de Fe para o Tipo II . . . . .	46
A.3	Histograma das abundâncias de Fe para o Tipo III . . . . .	46



# Lista de Tabelas

2.1	Crêterios de Peimbert . . . . .	24
-----	---------------------------------	----



# Sumário

1. <i>Introdução</i> . . . . .	19
2. <i>Base de dados e desenvolvimento</i> . . . . .	23
2.1 Banco de dados . . . . .	23
2.2 Correlações entre abundâncias . . . . .	24
2.3 Histogramas de abundâncias . . . . .	25
2.4 Gradientes radiais . . . . .	25
3. <i>Análise</i> . . . . .	37
4. <i>Conclusões</i> . . . . .	39
<i>Referências</i> . . . . .	41
<i>Apêndice</i>	43
A. <i>Histogramas para <math>[Fe/H]</math></i> . . . . .	45



## Introdução

As nebulosas planetárias (NPs) são objetos produzidos por estrelas de baixa e média massa que, após passarem pela fase denominada ramo assintótico das gigantes (AGB) e expelirem seus envoltórios externos, tornam-se muito quentes, irradiando em ultra-violeta, de forma a ionizar o material ejetado. Correspondem, portanto, a uma fase de transição entre uma estrela AGB e uma anã branca. Os complexos eventos de dragagem de matéria decorrentes da evolução estelar modificam as camadas externas das estrelas progenitoras das NPs com a produção nucleossintética recente. Essas camadas formam o envoltório expelido pelos rápidos ventos da fase pós-AGB.

Por outro lado, devido à limitação superior de massa que uma estrela pode ter para formar uma NP em seus estágios finais, alguns dos elementos encontrados não são sintetizados pela progenitora. Essas abundâncias, portanto, são fruto da contaminação química do meio em que a progenitora foi formada. Devido também à larga faixa de valores de massa possíveis para a progenitora ( $\sim 1 - 8 M_{\odot}$ ), bem como a diversidade de ambientes nos quais essa pode ter se formado (considerando também diferentes tipos de progenitora), as NPs mostram ampla variedade de propriedades cinemáticas, químicas e morfológicas, compreendendo diferentes gerações de estrelas e espalhando-se pelo disco, halo e bojo galácticos. Em razão dessas questões, as nebulosas planetárias são objetos de grande interesse astrofísico, servindo em um papel multidisciplinar como traçadoras para a evolução de estrelas de baixa e média massa e a evolução química galáctica.

Para se fazer inferências a respeito de evolução temporal em termos das abundâncias, é necessário, contudo, ter um ponto de referência. Para isso servem as classificações em tipos das nebulosas planetárias. Os chamados tipos de Peimbert, que usualmente são 4, permitem, utilizando critérios como razões entre abundâncias, velocidade orbital e a

distância do objeto ao plano galáctico (considerado como a região de latitude galáctica próxima a zero, no interior do disco fino), estabelecer relações a respeito da idade e massa das progenitoras e até mesmo a posição das NPs da Galáxia. Nebulosas de Tipo I foram formadas mais recentemente e se encontram no plano da Galáxia. Nebulosas de Tipo II (que também podem ser separadas em IIa e IIb) têm progenitoras mais antigas que as de Tipo I e se encontram no disco. Já NPs de Tipo III e IV se encontram no disco externo e no halo, respectivamente, e suas estrelas foram formadas antes do que as de Tipo II.

Dito isso, existem também correlações a serem encontradas ao se estudar a distribuição de abundâncias ao longo do disco galáctico, que também podem ser avaliadas por sua evolução temporal. Se a relação que se encontra é linear, essa pode ser caracterizada pelo coeficiente angular do ajuste dos pontos referentes às abundâncias do elemento químico em questão, a que chamamos gradiente radial. Através da comparação das curvas representativas dos objetos pertencentes a cada um dos tipos de Peimbert, percebe-se como o gradiente se altera no decorrer do envelhecimento da Galáxia. É digno de nota que resultados como os de Costa et al. (2004) indicam também variações locais no gradiente a depender da região considerada do disco, mostrando um achatamento do mesmo a partir de maiores distâncias galactocêntricas. A costumeira baixa amostragem de dados de objetos além de 10 kpc do centro da Galáxia, contudo, pode comprometer a verificação dessas conclusões.

Comparando os resultados obtidos utilizando NPs com outros objetos para os quais as mesmas abundâncias podem ser estimadas, podemos também obter um panorama mais generalizado de como se dá a evolução química. Selecionar diferentes populações galácticas pode servir para selecionar diferentes períodos da história do disco. É interessante, portanto, comparar a ampla escala de tempo das nebulosas planetárias, separadas por idade através dos tipos de Peimbert (logo, através de suas abundâncias), com objetos jovens, como regiões HII e estrelas OB, ou de idade intermediária, como aglomerados abertos.

Ao longo de mais de 30 anos, o Departamento de Astronomia do IAG-USP tem trabalhado no que é, atualmente, o mais extenso catálogo homogêneo de abundâncias químicas de NPs do hemisfério sul, sendo todos os objetos catalogados observados, reduzidos e analisados utilizando as mesmas técnicas. Resultados expressivos desse trabalho estão presentes em, por exemplo, Escudero et al. (2004) e Cavichia et al. (2010). Ainda assim, essa amostra compreende uma pequena fração do número total de nebulosas catalogadas para a Galáxia, que por sua vez é uma ordem de grandeza menor do que o número estimado através de

---

projeções feitas a partir de contagens de objetos na vizinhança solar. Há de se notar também a frequente dispersão dos parâmetros físicos e abundâncias na literatura, que, por vezes, dificulta fazer inferências estatísticas a respeito de toda a amostra disponível, evidenciando também a necessidade de um trabalho de compilação e homogeneização dos dados.



## Base de dados e desenvolvimento

### 2.1 Banco de dados

A primeira etapa do trabalho constituiu-se na criação de um extenso banco de dados que catalogasse e facilitasse o acesso aos dados de NPs significativos para a análise final. Foram incluídas 182 NPs, observadas tanto nas direções do anti-centro galáctico quanto do bojo e cujos parâmetros físicos e abundâncias foram determinados pelo Departamento de Astronomia do IAG-USP em trabalhos como Costa et al. (2004), Escudero et al. (2004), Cavichia et al. (2010) e Escudero e Costa (2001). O catálogo inclui informações como abundâncias de elementos  $\alpha$  leves, como O, Ne, S e Ar, bem como de N e He (na forma comumente usada de  $\log(X/H)+12$ , sendo X o elemento em questão), bem como distâncias heliocêntricas, galactocêntricas, latitude e longitude galáctica, e algumas informações além do escopo desta primeira parte do projeto, como densidade e temperatura eletrônicas e fluxo em certas linhas espectrais importantes. Os dados são homogêneos, na medida em que grandezas em que a metodologia de obtenção pode variar de acordo com o trabalho, como as distâncias, utilizam do mesmo procedimento. As distâncias galactocêntricas ( $R$ ) são obtidas pela relação geométrica comumente utilizada (retirada de Maciel e Lago (2005)):

$$R^2 = R_0^2 + (d\cos(b))^2 - 2R_0d\cos(b)\cos(l) \quad (2.1)$$

Em (2.1),  $R_0$  é a distância do centro da Galáxia à vizinhança solar (sendo utilizado o valor de  $8,0kpc$ , como em Maciel et al. (2005)),  $d$  é a distância heliocêntrica e  $b$  e  $l$  são, respectivamente, latitude e longitude galáctica. Posteriormente, foram adicionados também dados retirados de Stanghellini e Haywood (2010), referentes a 130 novos objetos.

Os objetos presentes no banco de dados também foram classificados de acordo com

os tipos de Peimbert, no que os critérios utilizados estão presentes na Tabela 2.1. Nela,  $|z|$  é calculado a partir de  $|z| = R \sin(b)$ , em que  $R$  é a distância galactocêntrica e  $b$  é a latitude galáctica, e  $|\Delta V|$  se refere à diferença entre a velocidade radial medida em relação à vizinhança solar e a obtida pela curva de rotação da Galáxia.

Não foram encontrados dados de tipo IV, o que não é inesperado, considerando que as amostras utilizadas para criação do banco de dados são provenientes de estudos a respeito do disco galáctico. Também foi desconsiderado o critério referente à velocidade radial, já que a análise foi voltada somente para o estudo de abundâncias.

Tabela 2.1 - Tabela com os critérios de Peimbert usados para classificação de NPs em tipos.

Tipo	He/H	$\log(N/O)$	$ \Delta V $	$ z $
Tipo I	$\geq 0,125$	$\geq -0,3$	$< 60 km/s$	$\ll 1 kpc$
Tipo II	$< 0,125$	$< -0,3$	$< 60 km/s$	$< 1 kpc$
Tipo III	-	-	$> 60 km/s$	$> 1 kpc$

## 2.2 Correlações entre abundâncias

Utilizando da gama de informações disponíveis no banco de dados criado para este projeto, foram traçadas primeiramente correlações entre abundâncias, a partir das quais foram obtidos alguns resultados interessantes. A Figura 2.1 mostra uma correlação (independente das distâncias das NPs) entre abundâncias de N e He para toda a parte da amostra na qual esses dados estavam disponíveis (isto é, 126 objetos, correspondentes a 70% da amostra total). É interessante notar a aparente linearidade entre os dados, que demonstra que a quantidade de nitrogênio em uma NP é proporcional à sua quantidade de hélio. Vemos também que a separação em tipos mostra-se presente na figura: NPs de tipo I tendem a ocupar a região quimicamente mais rica, na parte superior direita, enquanto as de tipo II se concentram nas regiões inferiores. Há grande dispersão nos dados de tipo III, provavelmente decorrente de subamostragem.

As Figuras 2.2, 2.3 e 2.4, por sua vez, mostram correlações (também independentes das distâncias dos objetos) entre abundâncias de elementos  $\alpha$  leves (Ne, S e Ar, respectivamente) e o oxigênio. Os resultados em relação ao tipo III, pelo mesmo motivo citado na

análise da Figura 2.1, são pouco conclusivos. Nos três casos, contudo, há predominância de NPs de tipo I na região superior e de tipo II na região inferior dos gráficos. A correlação referente ao Ne (Figura 2.2), mostra-se bem forte, mas também há de se notar o número mais baixo de pontos em relação às comparações utilizando os outros elementos. A Figura 2.3 mostra uma relação mais dispersa, provável fruto da maior dificuldade de obtenção precisa das abundâncias de enxofre (como observado em Maciel et al. (2005)). O mesmo se observa na Figura 2.4, para o argônio (possivelmente devido à menor precisão na determinação de sua densidade eletrônica, como mencionado em Costa et al. (2004)), que, ainda assim, mostra correlação mais forte do que no caso anterior.

### 2.3 Histogramas de abundâncias

Em termos do estudo da evolução química, a utilização de histogramas para a abundância de oxigênio para cada tipo de Peimbert também pode fornecer algumas informações importantes. As Figuras 2.5, 2.6 e 2.7 correspondem aos tipos I, II e III, respectivamente. A Figura 2.7 se assemelha a uma distribuição bimodal, mas devido à baixa amostragem, o argumento estatístico para fazer esse tipo de afirmação se fragiliza. Para os objetos de tipo I, a distribuição já toma uma forma mais clara, mas é a Figura 2.6, mais robusta pelo número de dados muito maior (aproximadamente o dobro do número correspondente aos objetos de tipo I e tipo III somados) que se dá como mais informativa. No Apêndice A encontram-se os histogramas relativos às abundâncias de ferro, cujas formas gerais são as mesmas encontradas para o caso do oxigênio, em razão da linearidade da relação utilizada entre as abundâncias (retirada de Russell e Dopita (1992)).

### 2.4 Gradientes radiais

O estudo dos gradientes radiais de abundância, no caso do presente projeto, limitou-se a objetos do disco galáctico. Como o bojo e o halo conhecidamente têm diferentes propriedades físicas, químicas e cinemáticas e mesmo prováveis diferentes histórias de formação, procurou-se limitar os dados para evitar contaminações indesejadas na análise. O valor limite utilizado para a separação bojo-disco foi de 2,9 kpc, partindo de Cavichia et al. (2011), que utiliza e compara duas escalas estatísticas de distância para NPs. Aqui foi utilizado o valor numericamente superior (e razoável) para maximizar a chance da análise

estar compreendendo apenas o disco.

Foi encontrado outro problema de amostragem com os dados utilizados até então (chamados de “amostra IAG”), ilustrado pela Figura 2.8. É visível que a amostra se concentra na parte interna do disco e já se encontra em quantidade bastante reduzida na região imediatamente posterior, chegando a não haver objeto algum entre 8 e 9 kpc de distância. Explica-se isso parcialmente pela utilização de Escudero et al. (2004) na compilação do banco de dados do projeto, cujos objetos aparentemente foram menos sensíveis à filtragem de dados realizada para a análise (considerando que nem todas as NPs tinham abundâncias ou distâncias disponíveis para que pudessem ser utilizadas). A grande inomogeneidade dos dados em sua distribuição espacial dificulta a obtenção de um resultado confiável para o gradiente. É digno de nota também que os objetos dessa mesma referência citada são nela classificados como pertencentes ao bojo.

A solução encontrada foi buscar dados de outras fontes, no caso, o trabalho realizado por Stanghellini e Haywood (2010). A distribuição espacial dos dados segue como ilustrado na Figura 2.9. Com grande quantidade de dados na região  $6 \text{ kpc} < R < 11 \text{ kpc}$ , a nova amostra aparenta suprir um pouco da subamostragem dos dados anteriores, ao menos na região intermediária do disco (isto é, entre a região mais interna e a mais externa, em que é natural que haja subamostragem pela dificuldade de obtenção de informações precisas).

Iniciando o estudo pelo oxigênio, é interessante verificar os efeitos que tanto a remoção do bojo quanto o uso conjunto das duas amostras pode ter na análise. A Figura 2.10 ilustra a grande discrepância entre os gradientes encontrados para as duas amostras quando são utilizados os objetos do bojo, o que em muito influencia o ajuste geral (que leva todos os pontos em consideração). Nota-se, para  $R < 2,9 \text{ kpc}$  além de um provável “outlier” na região externa do disco, grande quantidades de pontos que aparentemente se mostram fora da correlação geral.

A Figura 2.11, contudo, mostra que a discrepância entre os dados da região inferior esquerda e o resto da amostra perdura, mesmo com a limitação de  $R > 2,9 \text{ kpc}$ . Adotou-se, então, sob pena de perder mais dados, mas buscando maior homogeneidade no conjunto total de objetos estudados, o valor de  $R = 4 \text{ kpc}$  para o limite que separa o bojo e o disco. O resultado é significativamente diferente dos anteriores, como visto na Figura 2.12. É seguro dizer que, dada essa limitação nas distâncias galactocêntricas, a probabilidade de estarmos trabalhando apenas com objetos do disco é muito maior. É digno de nota

também que Stanghellini e Haywood (2010) chega a classificar como pertencente ao bojo um objeto com  $R = 3,7kpc$ , o que mostra que o novo limite adotado tem razoabilidade se comparado com a literatura.

O resultado obtido utilizando as duas amostras é mostrado na Figura 2.13. O valor do gradiente é de  $-0,026$  dex/kpc. A Figura 2.14 mostra os gradientes para os três tipos, cujos valores numéricos correspondem a  $6,26 \times 10^{-3}$ , isto é, aproximadamente nulo;  $-0,022$  e  $-0,049$  dex/kpc para os tipos I, II e III, respectivamente.

O mesmo procedimento tomado para a investigação do gradiente de oxigênio foi utilizado para o neônio. A Figura 2.15 mostra que, para o caso desse, o conjunto é dominado pela amostra SH e essa mesma é dominada pelo tipo II, o que dificulta uma análise do gradiente em termos da evolução química. Na Figura 2.16, vemos os ajustes correspondentes aos gradientes para cada tipo. É notável a baixa quantidade de pontos de tipo I e tipo III (mas, sobretudo, de tipo I) em relação ao tipo II. Os resultados dos gradientes correspondem a  $-0,045$ ,  $-0,020$  e  $-0,050$  dex/kpc, para os tipos I, II e III, respectivamente. A confiabilidade desses resultados, contudo, devido à subamostragem, é demasiadamente prejudicada para que sejam levados em consideração da mesma maneira que para o oxigênio. A Figura 2.17 mostra o gradiente de Ne para as duas amostras em conjunto, de  $-0,013$  dex/kpc.

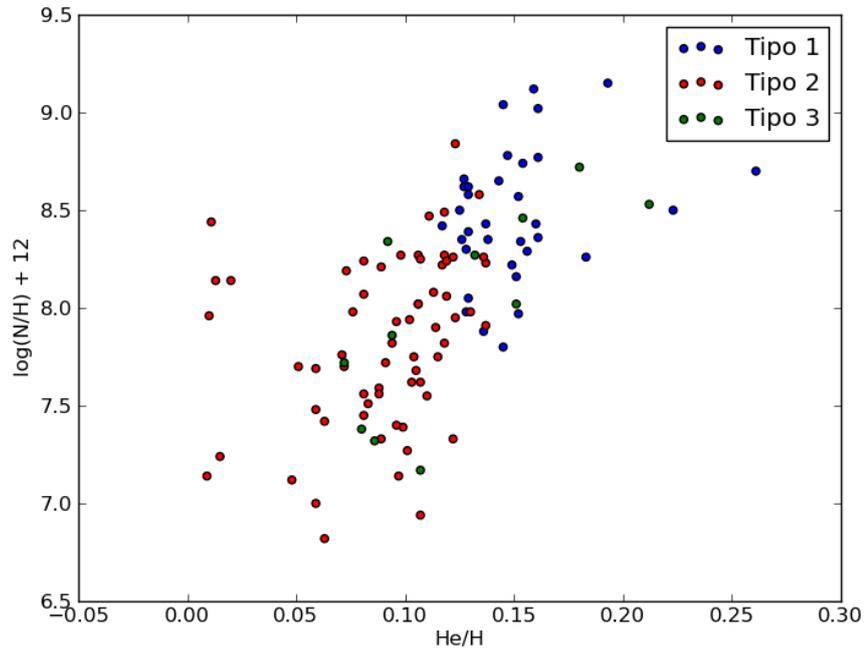


Figura 2.1: Abundâncias de nitrogênio em função das abundâncias de hélio utilizando a separação dos objetos nos tipos de Peimbert.

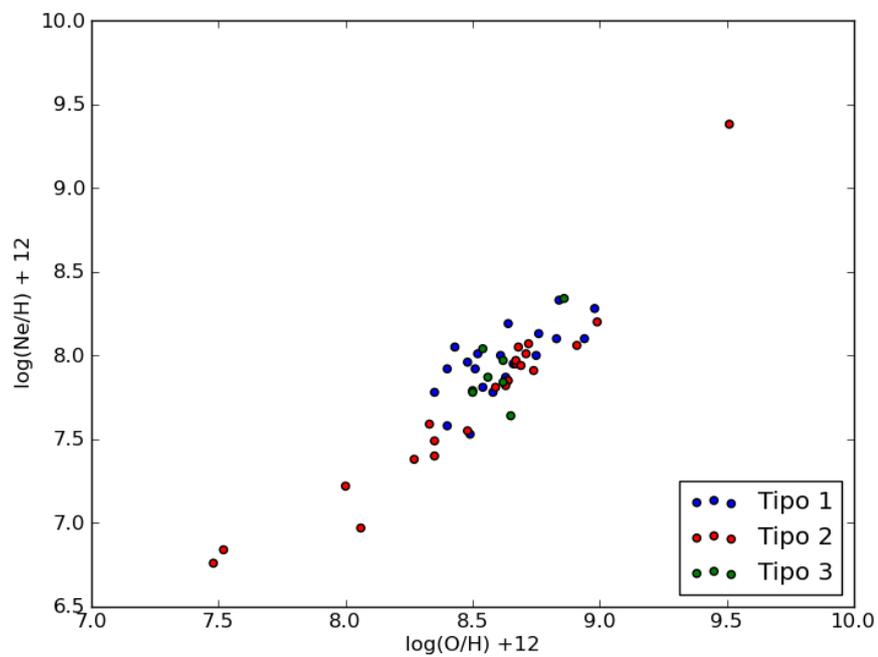


Figura 2.2: Abundâncias de neônio em função das abundâncias de oxigênio utilizando a separação dos objetos nos tipos de Peimbert.

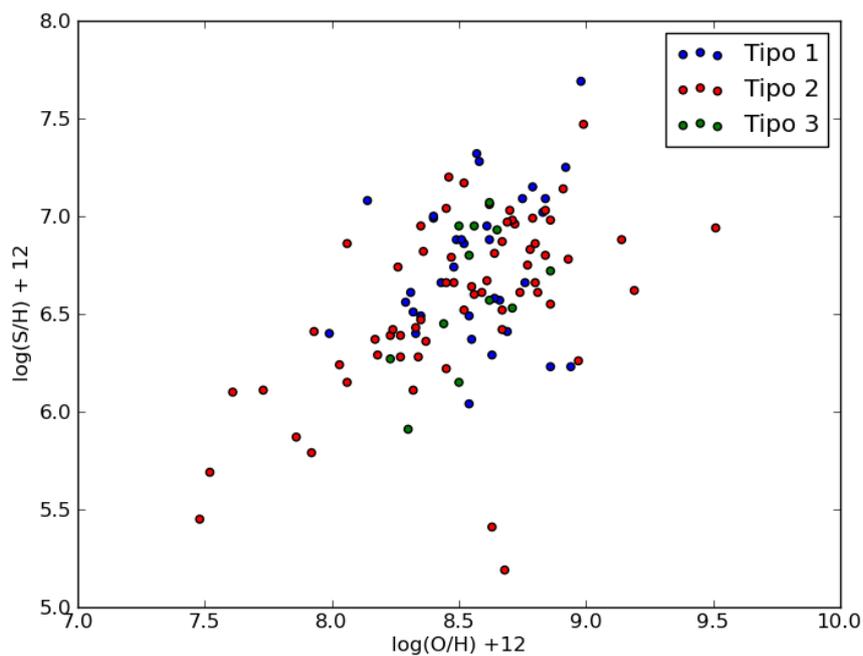


Figura 2.3: Abundâncias de enxofre em função das abundâncias de oxigênio utilizando a separação dos objetos nos tipos de Peimbert.

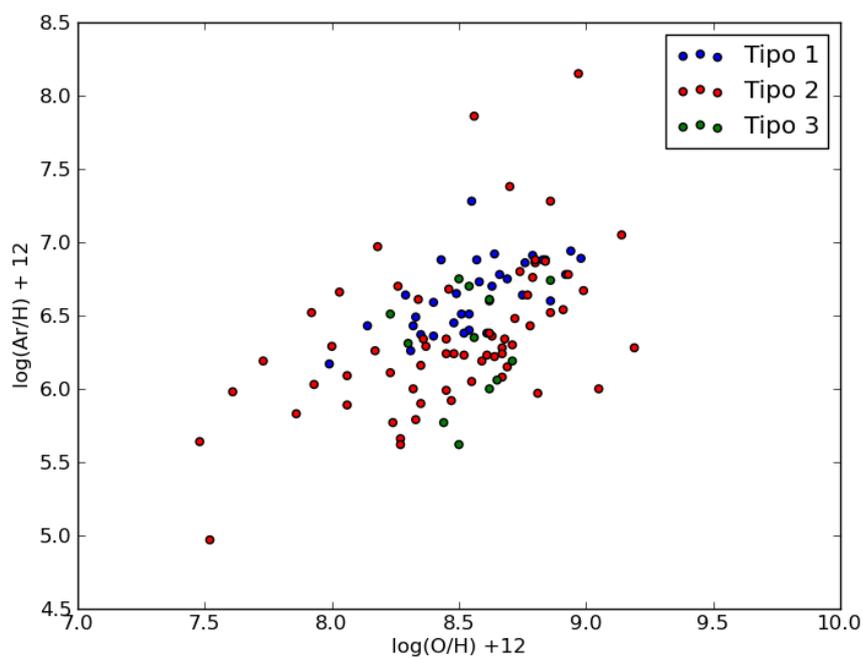


Figura 2.4: Abundâncias de argônio em função das abundâncias de oxigênio utilizando a separação dos objetos nos tipos de Peimbert.

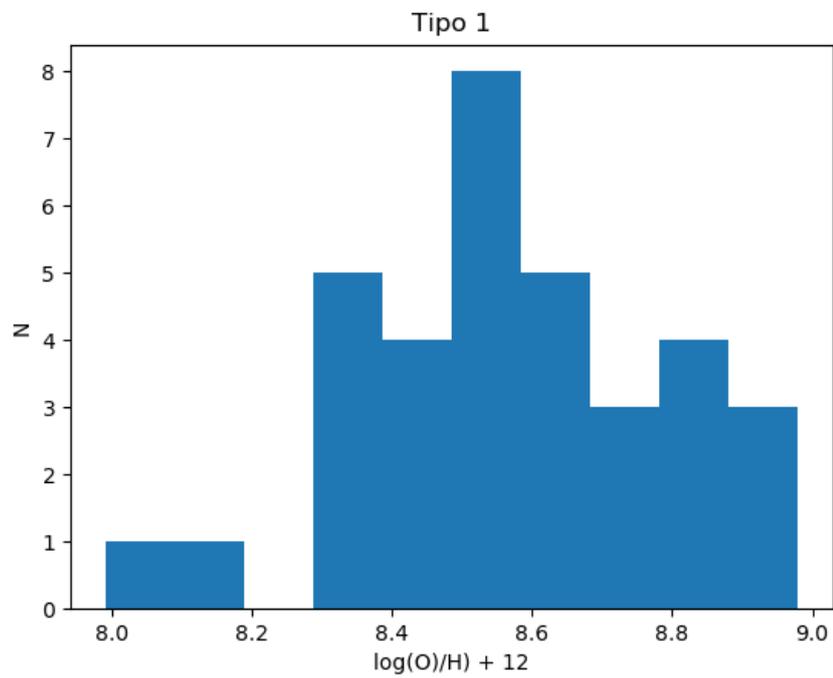


Figura 2.5: Histograma com abundâncias de oxigênio para NPs de tipo I.

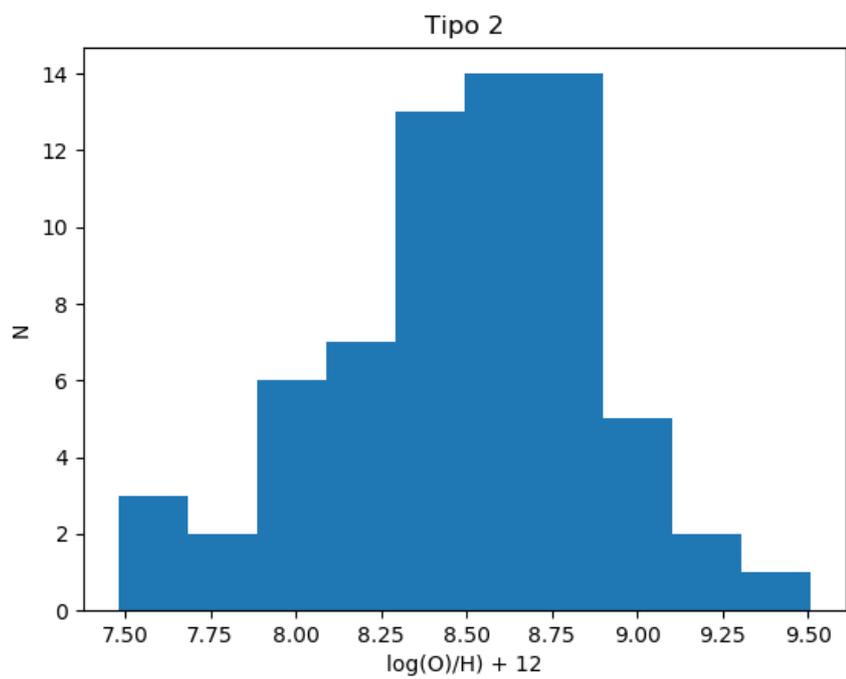


Figura 2.6: Histograma com abundâncias de oxigênio para NPs de tipo II.

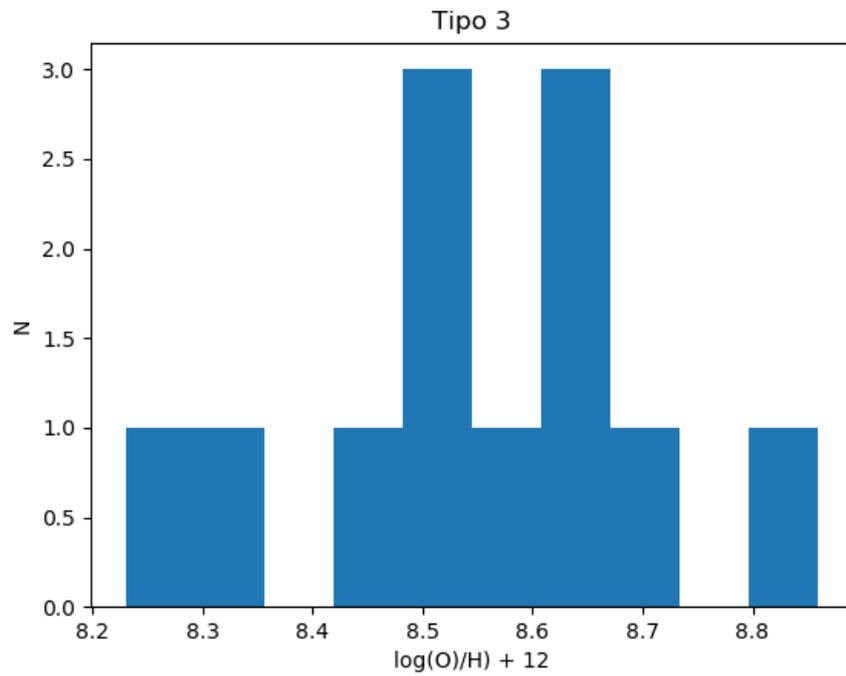


Figura 2.7: Histograma com abundâncias de oxigênio para NPs de tipo III.

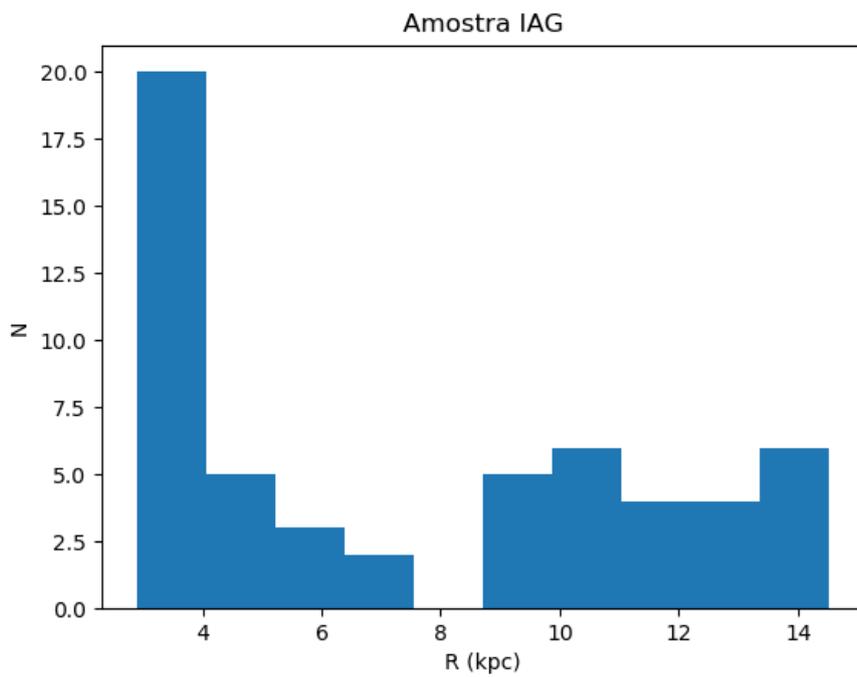


Figura 2.8: Histograma mostrando a distribuição espacial dos objetos da amostra IAG.

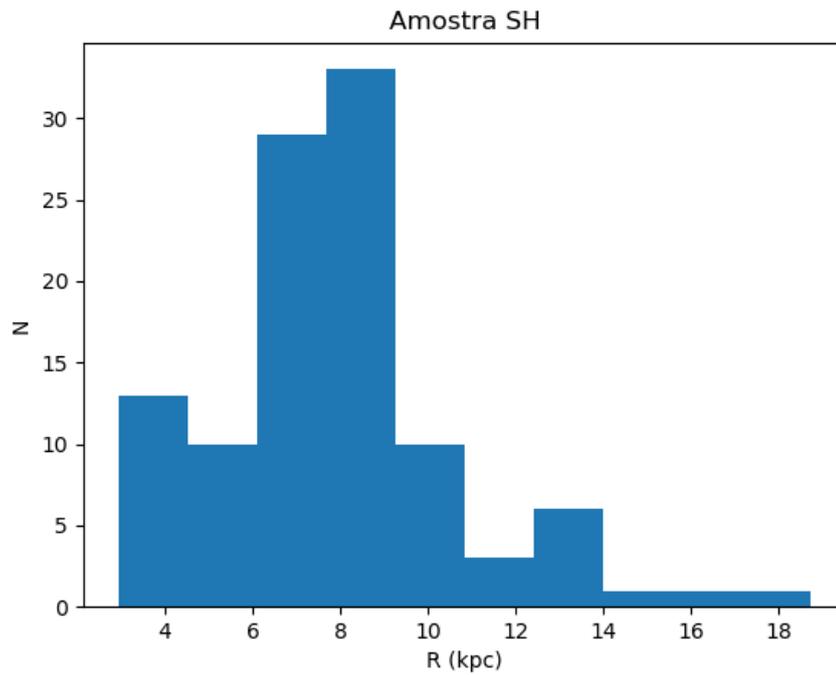


Figura 2.9: Histograma mostrando a distribuição espacial dos objetos da amostra SH.

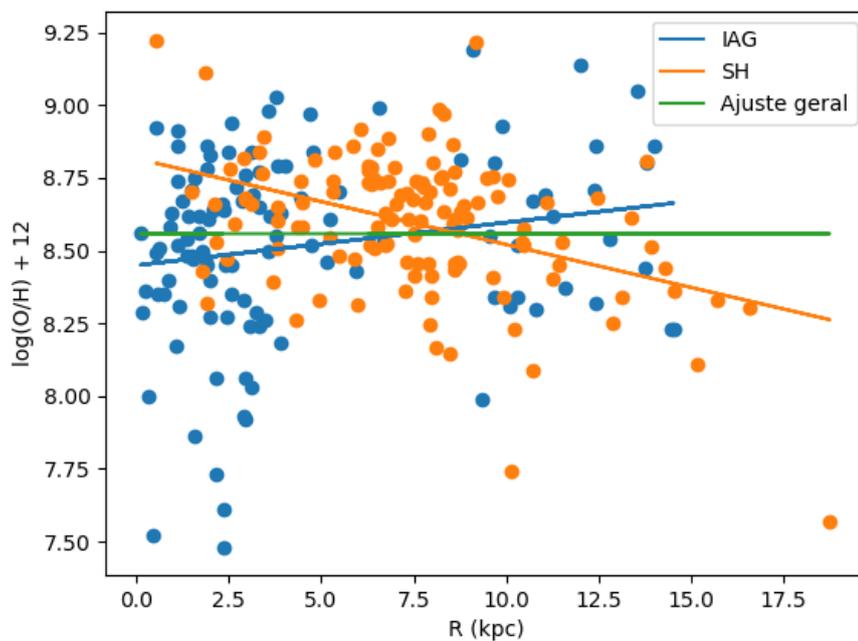


Figura 2.10: Gradientes radiais de oxigênio para a amostra IAG (em azul), SH (em laranja) e as duas em conjunto (em verde). Aqui, todo o conjunto de dados foi utilizado, incluindo os referentes aos objetos considerados como integrantes do bojo.

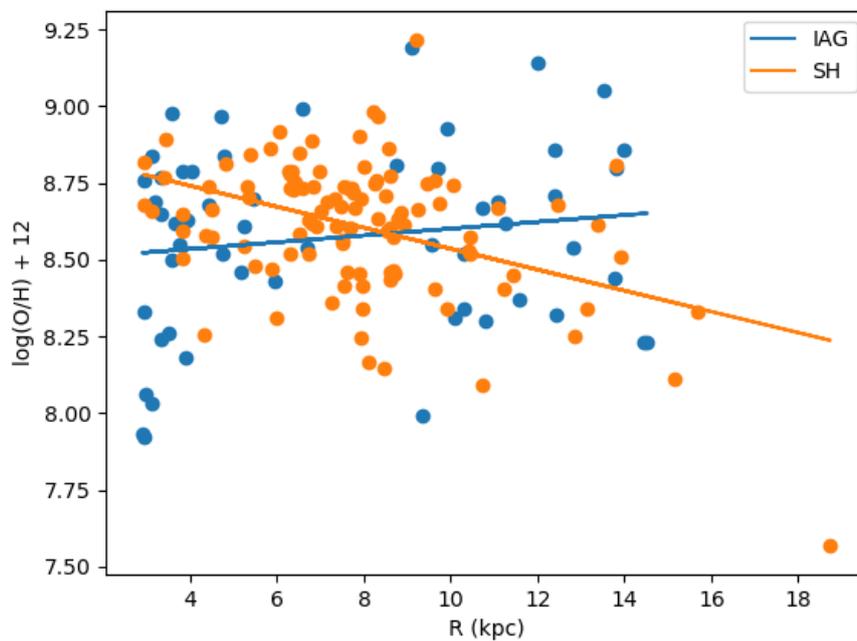


Figura 2.11: Gradientes radiais de oxigênio para a amostra IAG (em azul) e SH (em laranja). Foi utilizado 2,9  $kpc$  como limite para a separação bojo-disco.

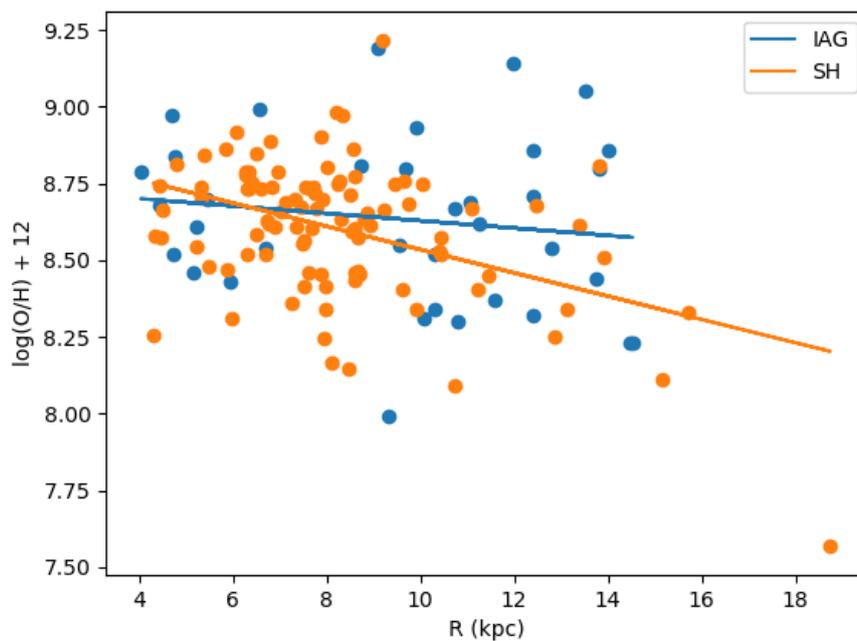


Figura 2.12: Gradientes radiais de oxigênio para a amostra IAG (em azul) e SH (em laranja). Foi utilizado 4  $kpc$  como limite para a separação bojo-disco.

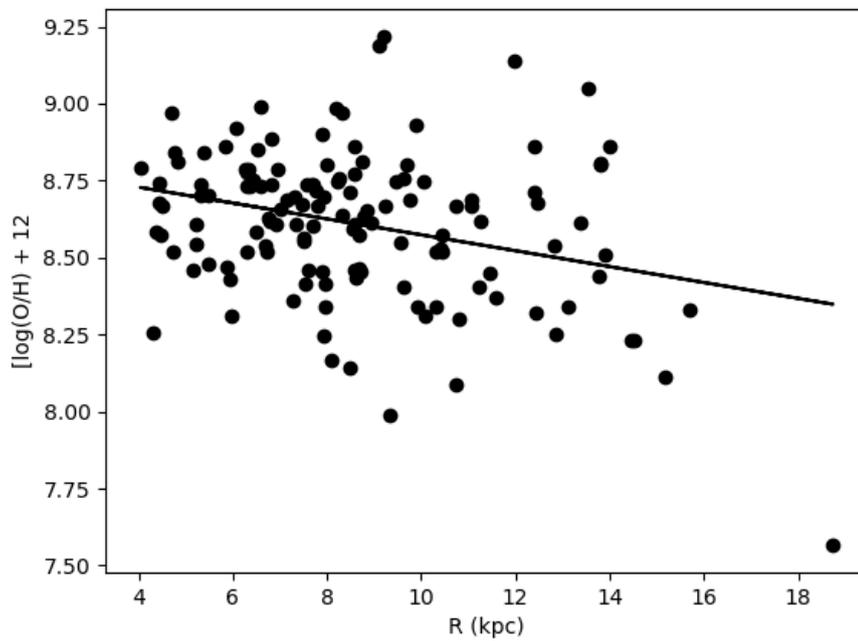


Figura 2.13: Gradiente radial de oxigênio para as amostras IAG e SH em conjunto para  $R > 4$  kpc.

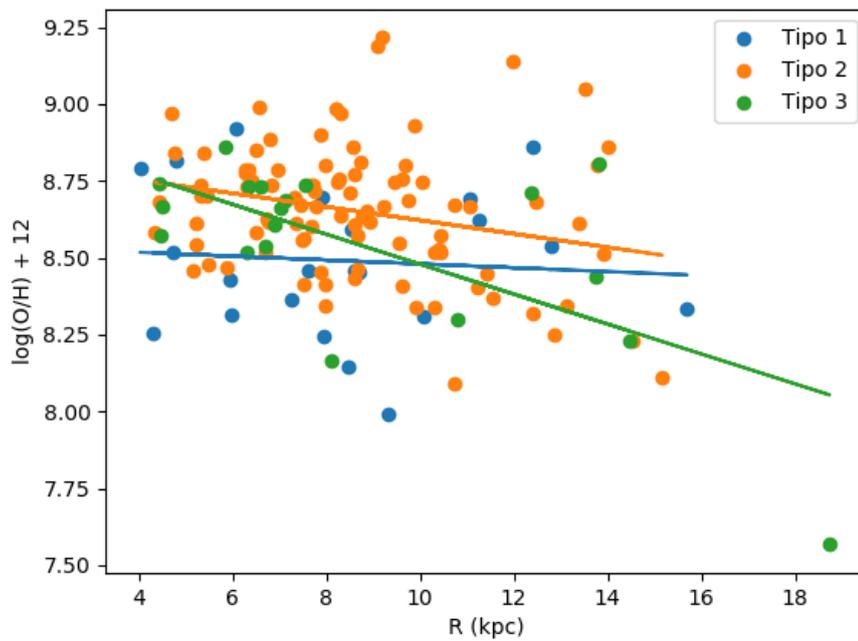


Figura 2.14: Gradiente radial de oxigênio para as amostras IAG e SH em conjunto para  $R > 4$  kpc com ajustes de gradiente para cada tipo.

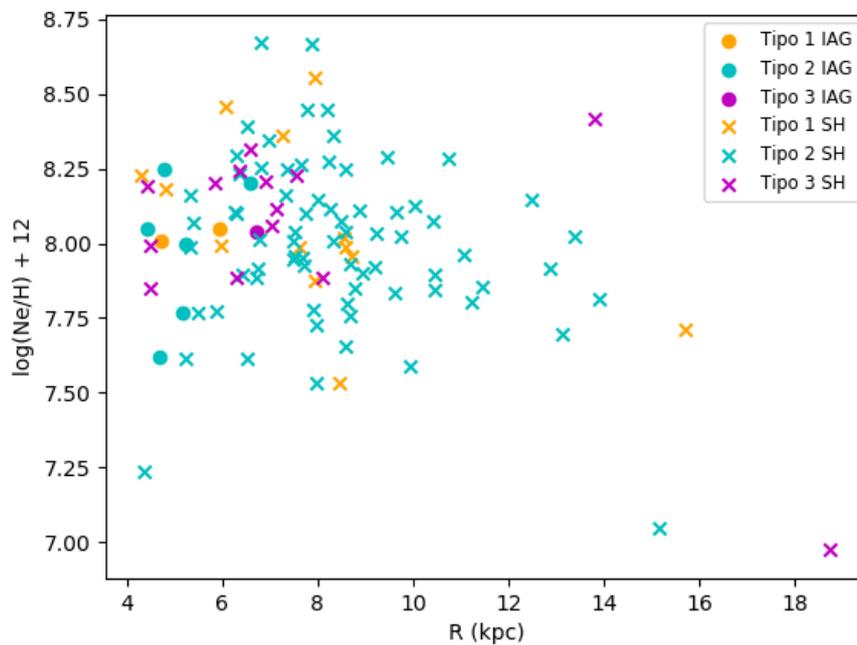


Figura 2.15: Abundâncias de neônio em função de  $R$  com a amostra IAG (círculos preenchidos) e SH (em forma de X) para os tipos I (laranja), II (ciano) e III (magenta).

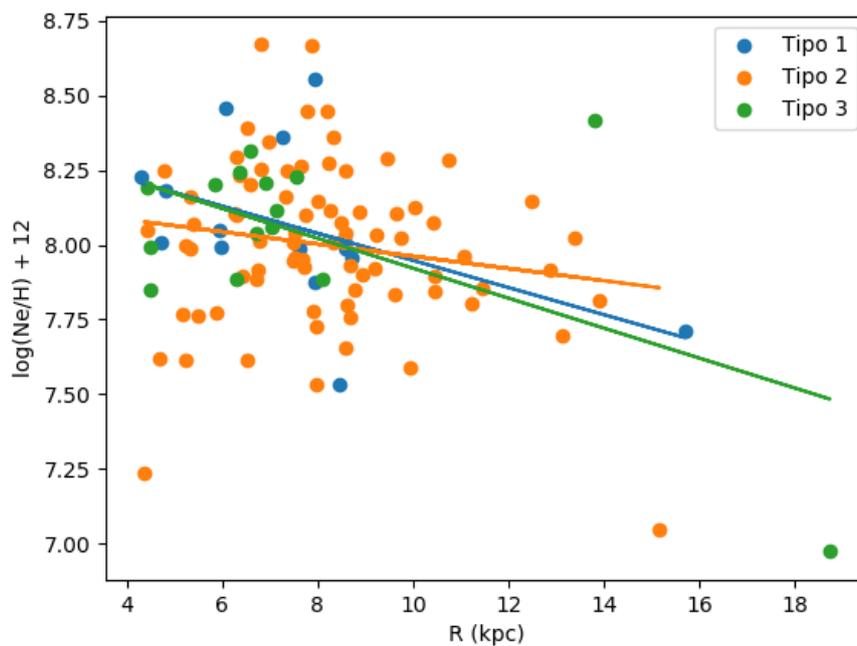


Figura 2.16: Gradiente radial de neônio para as amostras IAG e SH em conjunto para  $R > 4$  kpc com ajustes de gradiente para cada tipo.

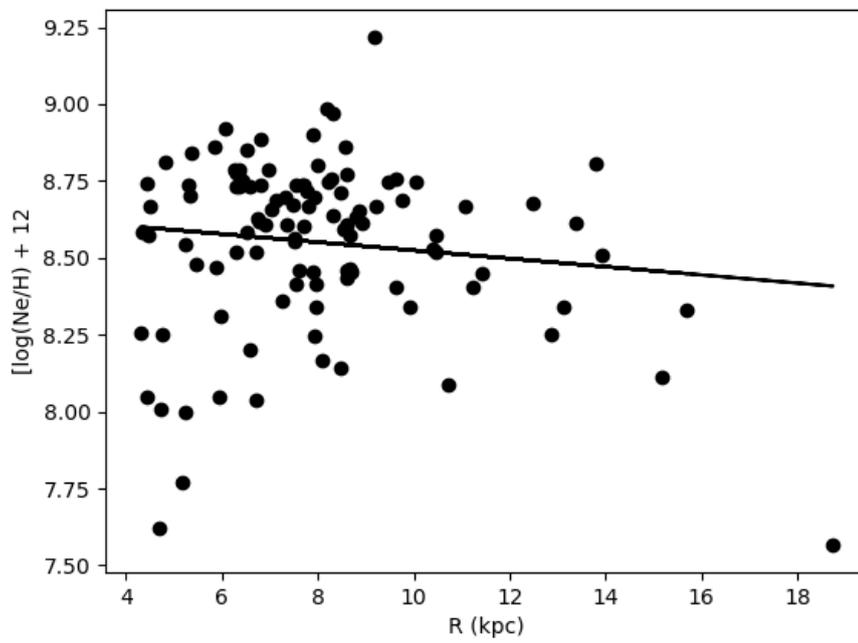


Figura 2.17: Gradiente radial de neônio para as amostras IAG e SH em conjunto para  $R > 4$  kpc.

## Análise

A partir da Figura 2.1, tiramos a importante informação de que nebulosas planetárias podem ser usadas como ferramentas de análise e corroboração de conceitos acerca da nucleossíntese e evolução de estrelas de baixa e média massa. A correlação de proporcionalidade é esperada e é qualitativamente compatível com a previsão dos modelos de evolução estelar, sendo o progressivo enriquecimento das NPs em N e He devido aos processos de dragagem (dredge-up) durante a vida das progenitoras. Estrelas de menor massa se localizam na parte inferior do gráfico (concordantemente também com a clara separação dos tipos I e II no gráfico).

As Figuras 2.2, 2.3, 2.4, por sua vez, são indicadoras da evolução química do disco galáctico. Como esperado, mostra-se que progenitoras mais jovens, e portanto, mais massivas, foram formadas em um meio interestelar mais rico em elementos  $\alpha$ . A tendência é de um progressivo enriquecimento do disco, validado também pelas regiões majoritárias em que os objetos de tipo I e tipo II se localizam (nas partes superiores e inferiores dos gráficos, respectivamente). A inclinação próxima da unidade nas três correlações também confirma, em uma primeira aproximação, que as quatro razões de abundância utilizadas são boas traçadoras das abundâncias interestelares correspondentes à época de formação das estrelas progenitoras.

A respeito dos histogramas das Figuras 2.5, 2.6 e 2.7, o de tipo II, mais robusto em termos estatísticos, indica, em decorrência do largo pico da distribuição mostrada, que a evolução química é um processo contínuo, que ocorre por longos períodos de tempo: não há uma abundância característica, portanto, não há correspondência com uma época precisa da história do disco galáctico. A separação em tipos de Peimbert, contudo, na metodologia aqui adotada, permanece útil qualitativamente como divisão de períodos de tempo em que

as progenitoras foram formadas, e assim, útil para se estudar as tendências de evolução química para o disco.

À parte das questões de estatística e amostragem abordadas no Capítulo 2, verificamos também algumas tendências de interesse para o estudo da evolução química da Galáxia a partir dos resultados gráficos e numéricos obtidos a partir das análises dos gradientes radiais. A Figura 2.13 mostra como se comporta o gradiente radial de oxigênio para o disco galáctico, de valor  $-0,026$  dex/kpc. O valor pode ser comparado com resultados como o de Maciel et al. (2005). Apesar de certa diferença numérica (que poderia ser atribuída à pouca quantidade de dados de tipo I e III), o declive esperado do ajuste se verifica.

Referências como a última mencionada e Maciel et al. (2006) mostram, por métodos diferentes daqueles aqui utilizados, uma tendência de achatamento do gradiente radial do oxigênio para a Galáxia com o decorrer do tempo. Isto significa que NPs de tipo I apresentam gradiente menor em módulo do que as de tipo II, e para essas últimas, menor do que as de tipo III. A tendência é confirmada pela Figura 2.14, bem como os resultados numéricos dos ajustes correspondentes (qualitativamente).

Para o caso do neônio, indicado pela Figura 2.17 como esperado e também indicado pelos mesmos trabalhos supracitados, o gradiente é negativo, assim como para o oxigênio. O valor obtido de  $-0,013$  dex/kpc é semelhante também ao valor apresentado na mesma referência para objetos com idades entre 4 e 8 giga-anos (a faixa de idade mais velha considerada na análise do artigo). Como a amostra é dominada pelo tipo II, isso pode ser um indicativo da faixa de idade correspondente a esse tipo. Considerando também, contudo, que as abundâncias de neônio têm incertezas maiores e as amostras disponíveis são menores, se fazem necessárias, contudo, mais investigações e uma amostragem mais homogênea (a fins de comparação com os outros tipos) para se fazer afirmações como essa. Era também esperado pela literatura que o declive do gradiente de oxigênio fosse maior do que o de neônio, o que se confirmou pela análise.

## Conclusões

Além de corroborar o conhecimento já estabelecido a respeito da produção nucleossintética e enriquecimento químico com o tempo de estrelas de baixa e média massa, os resultados obtidos corroboram as tendências esperadas e apontadas pela literatura para um diagnóstico químico do disco galáctico, em termos do gradiente e da evolução temporal do mesmo. Ressalvas a serem feitas se dão no sentido da baixa amostragem utilizada para as análises, principalmente em determinadas divisões das amostras, como em relação aos objetos de tipo III, bem como a inomegeneidade espacial dos objetos, como evidente para a amostra IAG; em relação aos três tipos de Peimbert (havia, em geral, muito maior quantidade de dados de tipo II); e no caso das abundâncias de S, Ar e Ne. No primeiro caso, em razão da dificuldade de se obter abundâncias precisas a partir das linhas iônicas mais fracas do enxofre. Nos outros dois, pela usual menor quantidade de dados disponíveis e maior incerteza na determinação dos valores.

É necessário também considerar que os dados das amostras IAG e SH são provenientes de diferentes métodos de obtenção de abundâncias e diferentes escalas de distância, o que pode comprometer a acurácia da análise final. Maciel et al. (2005) e Maciel e Lago (2005), por outro lado, concluem que o uso de diferentes escalas de distância não afeta o gradiente em grandes amostras, o que significa que uma maior amostragem poderia resolver parte do problema da inomogeneidade do conjunto final de dados a ser analisado.

Também devem ser mencionados resultados como Costa et al. (2004) que apontam variação espacial no gradiente: particularmente, um achatamento do mesmo a grandes distâncias. O ajuste dos pontos, dessa maneira, acaba por se assemelhar mais a uma parábola do que a uma reta propriamente dita. Nesse contexto, poderíamos falar dos resultados lineares como gradientes médios. Se faz necessária, contudo, mais investigação

a respeito com, como já mencionado, maior número de dados e em condições mais homogêneas.

Outra linha de continuidade dos resultados aqui apresentados se dá pela comparação dos mesmos com os gradientes obtidos por abundâncias extraídas de outros objetos, como aglomerados abertos, estrelas OB e Cefeidas. Maciel et al. (2005) indica que os resultados provenientes dos aglomerados abertos indicam a mesma tendência aqui trabalhada de achatamento com o decorrer do tempo, assim como o achatamento a grandes distâncias, no caso das Cefeidas. A utilização de diferentes objetos serve tanto para corroborar padrões seguidos pela evolução química da Galáxia quanto para se ter um panorama mais abrangente da evolução temporal a partir das diferentes escalas de tempo seguidas pelos objetos.

## Referências Bibliográficas

- Cavichia O., Costa R. D. D., Maciel W. J., Planetary nebulae in the inner Milky Way: new abundances, *Rev. Mexicana Astron. Astrofis.*, 2010, vol. 46, p. 159
- Cavichia O., Costa R. D. D., Maciel W. J., Planetary nebulae in the inner Milky Way II: the Bulge-Disk transition, *Rev. Mexicana Astron. Astrofis.*, 2011, vol. 47, p. 49
- Costa R. D. D., Uchida M. M. M., Maciel W. J., Chemical abundances of planetary nebulae towards the Galactic anticenter, *A&A*, 2004, vol. 423, p. 199
- Escudero A. V., Costa R. D. D., Abundances of recently discovered planetary nebulae towards the galactic bulge, *A&A*, 2001, vol. 380, p. 300
- Escudero A. V., Costa R. D. D., Maciel W. J., New abundances of planetary nebulae in the Galactic Bulge, *A&A*, 2004, vol. 414, p. 211
- Grevesse N., Sauval A. J., Standard Solar Composition, *Space Sci. Rev.*, 1998, vol. 85, p. 161
- Maciel W. J., Lago L. G., A New Determination of the Rotation Curve from Galactic Disk Planetary Nebulae, *Rev. Mexicana Astron. Astrofis.*, 2005, vol. 41, p. 383
- Maciel W. J., Lago L. G., Costa R. D. D., An estimate of the time variation of the abundance gradient from planetary nebulae. II. Comparison with open clusters, cepheids and young objects, *A&A*, 2005, vol. 433, p. 127
- Maciel W. J., Lago L. G., Costa R. D. D., An estimate of the time variation of the abundance gradient from planetary nebulae. III. O, S, Ar, and Ne: a comparison of PN samples, *A&A*, 2006, vol. 453, p. 587

Russell S. C., Dopita M. A., Abundances of the heavy elements in the Magellanic Clouds. III - Interpretation of results, *ApJ*, 1992, vol. 384, p. 508

Stanghellini L., Haywood M., The Galactic Structure and Chemical Evolution Traced by the Population of Planetary Nebulae, *ApJ*, 2010, vol. 714, p. 1096

# Apêndice



## Apêndice A

---

### Histogramas para $[Fe/H]$

As abundâncias de ferro são obtidas pela relação  $[Fe/H] = a + b[O/H]$ , com  $a = 0,45$  e  $b = 1,41$ , de Russell e Dopita (1992). A notação  $[X/H]$  relaciona a abundância determinada com a solar, de forma que  $[X/H] = \log(X/H) - \log(X/H)_{\odot}$ . Foram utilizados  $\log(O/H)_{\odot} + 12 = 8,66$  e  $\log(Fe/H)_{\odot} + 12 = 7,45$ , valores retirados de Grevesse e Sauval (1998).

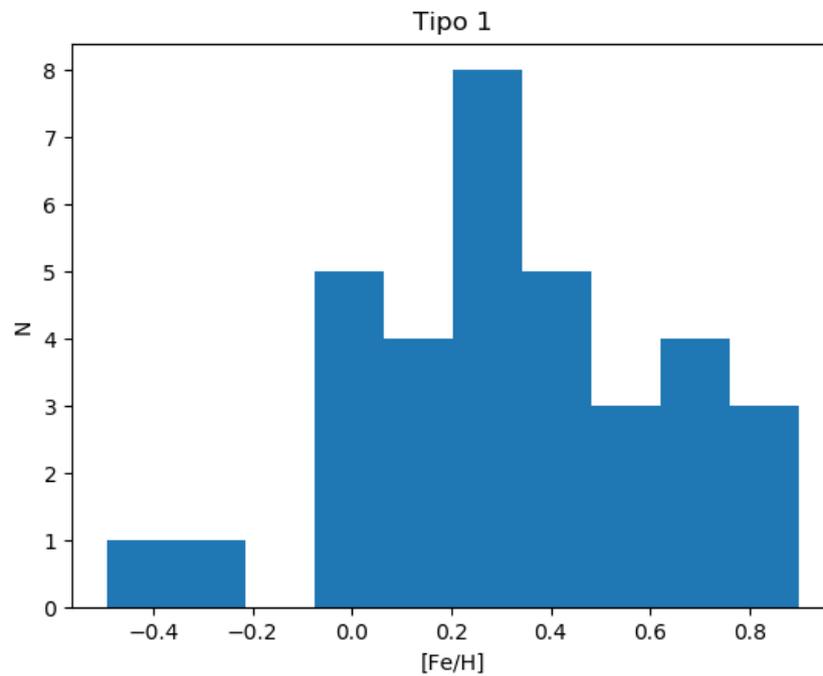


Figura A.1: Histograma com abundâncias de ferro para NPs de tipo I.

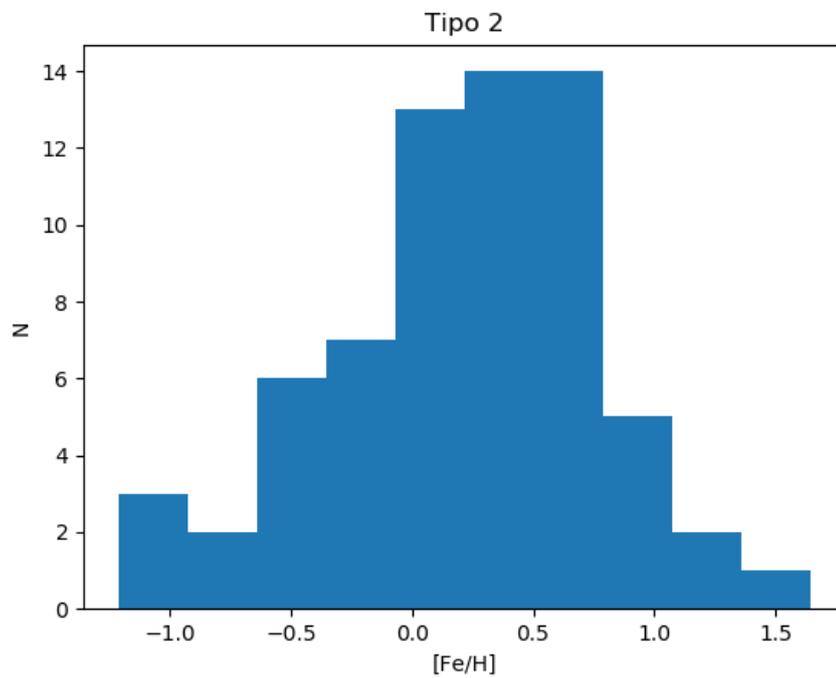


Figura A.2: Histograma com abundâncias de ferro para NPs de tipo II.

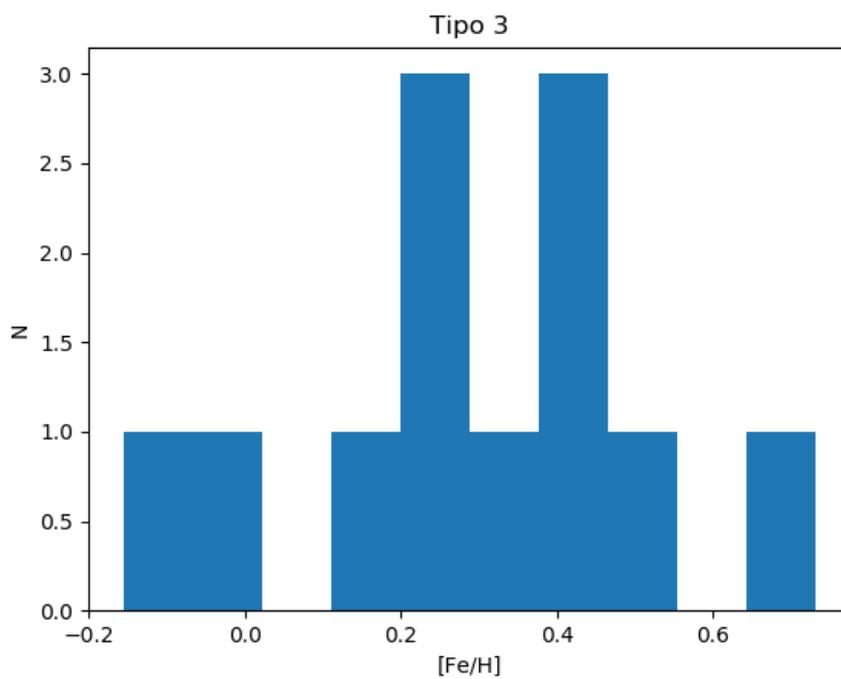


Figura A.3: Histograma com abundâncias de ferro para NPs de tipo III.