

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

Vitor Prado Zampa

Estrelas Centrais de Nebulosas Planetárias: Classificação e Propriedades

São Paulo

2018

Vitor Prado Zampa

Estrelas Centrais de Nebulosas Planetárias: Classificação e Propriedades

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 D. D. Costa

São Paulo

2018

A todas e todos que se dedicam à universalização da ciência

Agradecimentos

Aos meus pais, Adriana e Darcio Zampa, pela formação como indivíduo e incondicional apoio em todas as minhas decisões acadêmico-profissionais;

Ao Prof. Dr. Roberto Costa, pela oportunidade de iniciação científica, por todo o embasamento teórico e orientação fornecidos ao longo de dois anos de trabalho e pela sempre presente cordialidade;

Aos professores Edilene Beraldo, Elias Noronha, Elaine Joaquim, Fábio Rodrigues, Fernanda Colonhese, Rafael Azzoni, Rafael Cavallari, Elisabete Tuasca, Camila Rebucci, Hugo Rodrigues, Márcia Bergamasco e Neia Blohem, pelo conhecimento e senso crítico transmitidos e por todo o incentivo e confiança em mim depositados ainda no colégio;

Aos colegas de escola, Mateus Pelogia, Érico Matsushita, Sarah Messias, Fernando Schmidt, Gueric Inselberger e Poliana Vidal, pelo duradouro apoio e amizade, que transcendem a distância;

Aos colegas de universidade, Ana Clara Saraiva, Jônatas Ribeiro, Lucas Moda, Leonardo Martins, Vinícius Camargo, Rodrigo Schmitt e Stela Adduci, pelo apoio e presença nos melhores e piores momentos ao longo da graduação;

A Kátia Torikai, pelo companheirismo e por acreditar em mim ainda quando eu mesmo não sou capaz de fazê-lo.

“O mais triste aspecto da vida atual é que a ciência ganha em conhecimento mais rapidamente que a sociedade ganha em sabedoria”

Isaac Asimov

“Você quer armas? Estamos numa biblioteca! Livros! As melhores armas do mundo!”

Russel T. Davies

Resumo

O projeto realizado teve como principal objetivo a catalogação de dados referentes a estrelas centrais de nebulosas planetárias, disponíveis de forma *online*, e obtenção de novas informações a partir destes. Foram reunidos valores de posição, temperatura efetiva, luminosidade e abundâncias químicas para 602 objetos da Galáxia e 174 das Nuvens de Magalhães. A aplicação de modelos teóricos para estrelas de baixa- e média-massa em estágio avançado de evolução (pós-ramo assintótico das gigantes) e de leis astrofísicas referentes à evolução estelar permitiu a determinação dos valores de massa da estrela progenitora e idade de 133 destes objetos, o que levou, por fim, ao traço do perfil da evolução química de cada um dos três sistemas galácticos. Uma comparação entre tal perfil da Galáxia e das Nuvens de Magalhães é apresentada, e possíveis causas de ligeiros desvios em relação ao modelo esperado são discutidas. No caso da Galáxia, pôde-se observar também uma relação entre tipo espectral e distribuição ao longo do disco.

Abstract

The main goal of this project consisted on cataloguing data regarding central stars of planetary nebulae, which are available online, and obtaining new information from these data. Values of position, effective temperature, luminosity and chemical abundances were collected for 602 Galactic objects and 174 from the Magellanic Clouds. The application of theoretical models for low- and intermediate-mass stars in advanced evolutionary state (post asymptotic giant branch) and astrophysical laws allowed the derivation of values of mass of the progenitor star and age for 133 of these objects, which led, in the end, to the plot of the chemical evolution profile of each of these three systems. A comparison between this profile for the Galaxy and the Magellanic Clouds is presented, and possible causes of slight deviations from the expected model are discussed. For the Galactic objects, a relationship between spectral type and distribution along the disk could also be observed.

Resumo

La ĉefa celo de ĉi tiu projekto estis la ellaborado de katalogo de datumoj pri centraj steloj de planedumaj nebulozoj, kiuj estas disponeblaj interrete, kaj la akiro de novaj informoj el tiuj datumoj. Oni kolektis valorojn de pozicio, efika temperaturo, lumineco kaj kemiaj abundoj de 602 objektoj el la Galaksio kaj 174 el la Magelanaĵ Nuboj. La apliko de teoriaj modeloj por steloj de malalta- kaj intera-maso in progresinta ŝtato de evoluo (post asimptota giganta branĉo) kaj de astrofizikaj leĝoj permesis derivi valorojn de maso de la pragerula stelo kaj la aĝon de 133 de tiuj objektoj, kiu kondukis, finfine, al la ploto de la profilo de kemia evoluo de la tri sistemoj. Komparo inter tiu profilo por la Galaksio kaj la Magelanaĵ Nuboj estas prezentata, kaj eblaj kaŭzoj de malgrandaj devioj el la atendata modelo estas diskutataj. Por la objektoj el la Galaksio, rilato inter spektra tipo kaj distribuo sur la disko povis ankaŭ esti observata.

Lista de Figuras

2.1	Distribuição de nebulosas ricas em hidrogênio no disco galáctico	31
2.2	Distribuição de nebulosas pobres em hidrogênio no disco galáctico	32
3.1	Isócronas para ECNPs da Galáxia com metalicidade $Z = 0.008$	35
3.2	Isócronas para ECNPs das Nuvens de Magalhães com metalicidade $Z = 0.004$	36
3.3	Evolução química do neônio para a Galáxia e para a Grande Nuvem de Magalhães	37
3.4	Evolução química do neônio para a Galáxia e para a Pequena Nuvem de Magalhães	38
3.5	Evolução química do neônio em nebulosas tipo I para a Galáxia e para a Grande Nuvem de Magalhães	40
3.6	Evolução química do neônio em nebulosas tipo I para a Galáxia e para a Pequena Nuvem de Magalhães	40
3.7	Evolução química do neônio em nebulosas não-tipo I para a Galáxia e para a Grande Nuvem de Magalhães	41
3.8	Evolução química do neônio em nebulosas não-tipo I para a Galáxia e para a Pequena Nuvem de Magalhães	41
3.9	Abundância do neônio em função do raio galactocêntrico	43
3.10	Evolução química do enxofre para a Galáxia e para a Grande Nuvem de Magalhães	44
3.11	Evolução química do enxofre para a Galáxia e para a Pequena Nuvem de Magalhães	45
A.1	Isócronas para ECNPs da Galáxia com metalicidade $Z = 0.001$	55

A.2	Isócronas para ECNPs da Galáxia com metalicidade $Z = 0.004$	56
A.3	Isócronas para ECNPs da Galáxia com metalicidade $Z = 0.016$	57
A.4	Isócronas para ECNPs das Nuvens de Magalhães com metalicidade $Z = 0.001$	58
A.5	Isócronas para ECNPs das Nuvens de Magalhães com metalicidade $Z = 0.008$	59
A.6	Isócronas para ECNPs das Nuvens de Magalhães com metalicidade $Z = 0.016$	60
B.1	Evolução química do hélio para a Galáxia e para a Grande Nuvem de Ma- galhães	61
B.2	Evolução química do nitrogênio para a Galáxia e para a Grande Nuvem de Magalhães	62
B.3	Evolução química do oxigênio para a Galáxia e para a Grande Nuvem de Magalhães	62
B.4	Evolução química do argônio para a Galáxia e para a Grande Nuvem de Magalhães	63
B.5	Evolução química do hélio para a Galáxia e para a Pequena Nuvem de Magalhães	63
B.6	Evolução química do nitrogênio para a Galáxia e para a Pequena Nuvem de Magalhães	64
B.7	Evolução química do oxigênio para a Galáxia e para a Pequena Nuvem de Magalhães	64
B.8	Evolução química do argônio para a Galáxia e para a Pequena Nuvem de Magalhães	65
C.1	Evolução química do hélio em nebulosas tipo I para a Galáxia e para a Grande Nuvem de Magalhães	67
C.2	Evolução química do nitrogênio em nebulosas tipo I para a Galáxia e para a Grande Nuvem de Magalhães	68
C.3	Evolução química do oxigênio em nebulosas tipo I para a Galáxia e para a Grande Nuvem de Magalhães	68
C.4	Evolução química do enxofre em nebulosas tipo I para a Galáxia e para a Grande Nuvem de Magalhães	69
C.5	Evolução química do argônio em nebulosas tipo I para a Galáxia e para a Grande Nuvem de Magalhães	69

C.6	Evolução química do hélio em nebulosas tipo I para a Galáxia e para a Pequena Nuvem de Magalhães	70
C.7	Evolução química do nitrogênio em nebulosas tipo I para a Galáxia e para a Pequena Nuvem de Magalhães	70
C.8	Evolução química do oxigênio em nebulosas tipo I para a Galáxia e para a Pequena Nuvem de Magalhães	71
C.9	Evolução química do enxofre em nebulosas tipo I para a Galáxia e para a Pequena Nuvem de Magalhães	71
C.10	Evolução química do argônio em nebulosas tipo I para a Galáxia e para a Pequena Nuvem de Magalhães	72
C.11	Evolução química do hélio em nebulosas não-tipo I para a Galáxia e para a Grande Nuvem de Magalhães	72
C.12	Evolução química do nitrogênio em nebulosas não-tipo I para a Galáxia e para a Grande Nuvem de Magalhães	73
C.13	Evolução química do oxigênio em nebulosas não-tipo I para a Galáxia e para a Grande Nuvem de Magalhães	73
C.14	Evolução química do enxofre em nebulosas não-tipo I para a Galáxia e para a Grande Nuvem de Magalhães	74
C.15	Evolução química do argônio em nebulosas não-tipo I para a Galáxia e para a Grande Nuvem de Magalhães	74
C.16	Evolução química do hélio em nebulosas não-tipo I para a Galáxia e para a Pequena Nuvem de Magalhães	75
C.17	Evolução química do nitrogênio em nebulosas não-tipo I para a Galáxia e para a Pequena Nuvem de Magalhães	75
C.18	Evolução química do oxigênio em nebulosas não-tipo I para a Galáxia e para a Pequena Nuvem de Magalhães	76
C.19	Evolução química do enxofre em nebulosas não-tipo I para a Galáxia e para a Pequena Nuvem de Magalhães	76
C.20	Evolução química do argônio em nebulosas não-tipo I para a Galáxia e para a Pequena Nuvem de Magalhães	77
D.1	Abundância do oxigênio em função do raio galactocêntrico	79

Lista de Tabelas

2.1	Valores médios de abundâncias para a Galáxia e as Nuvens de Magalhães .	30
2.2	Contagem de ECNPs por tipo espectral	30

Sumário

1. Introdução	23
2. Dados catalogados referentes às ECNPs	27
2.1 Temperatura efetiva	27
2.2 Luminosidade	28
2.3 Abundâncias químicas	29
2.4 Tipo espectral e posição galáctica	30
3. Determinação de parâmetros físicos e perfis de evolução química	33
3.1 Massa e idade da estrela progenitora	33
3.2 Evolução química da Galáxia e das Nuvens de Magalhães	37
3.2.1 A classificação de Peimbert	39
3.2.2 O gradiente radial de abundância química galáctica	42
3.2.3 A anomalia do enxofre	43
4. Conclusões e Perspectivas	47
Referências	49
Apêndice	53
A. Sobreposição de isócronas para ECNPs da Galáxia e das Nuvens de Magalhães	55
B. Perfil de evolução química para a Galáxia em comparação com as Nuvens de Magalhães	61

<i>C. Perfil de evolução química para a Galáxia em comparação com as Nuvens de Magalhães, divididas pela classificação de Peimbert</i>	<i>67</i>
<i>D. Gradiente radial de abundância para o oxigênio</i>	<i>79</i>

Introdução

Nebulosas planetárias, como vastamente discutido na literatura (e.g. Carroll e Ostlie (1996), Hansen e Kawaler (1994), Schwarzschild (1965)), representam um dos estágios finais do ciclo de vida de estrelas que possuem massa entre aproximadamente $0.8M_{\odot}$ e $8M_{\odot}$. Estes corpos celestes podem passar de centenas de milhões a dezenas de bilhões de anos na sequência principal, período no qual processos nucleossintéticos de fusão do hidrogênio em hélio ocorrem continuamente no núcleo estelar. Predominantemente, tem-se a cadeia próton-próton em objetos de massa até $1.5M_{\odot}$, e o ciclo CNO em objetos de maior massa, com este valor podendo sofrer ligeiras alterações a depender da metalicidade. Conforme descrito por equações de equilíbrio hidrostático, a estabilidade de uma estrela da sequência principal é mantida pelo contrabalanceamento entre a pressão gravitacional e a pressão de radiação oriunda das reações nucleares.

No momento em que o hidrogênio presente no núcleo estelar é completamente exaurido, tem início a fase evolutiva conhecida como gigante vermelha. Nela, os processos nucleossintéticos transferem-se para as camadas externas da estrela, ocorrendo a fusão do hidrogênio através do ciclo CNO, enquanto o núcleo permanece constituído por hélio inerte e, para objetos com massa inferior a aproximadamente $2M_{\odot}$, degenerado. As novas reações resultam na expansão do volume da estrela, que se torna, portanto, menos densa, e sua temperatura superficial decai. É também durante a transição entre as fases de sequência principal e gigante vermelha que ocorre o evento convectivo da primeira dragagem, responsável por levar produtos da fusão às proximidades da superfície estelar.

Os processos ocorrentes nas camadas externas da estrela contribuem para que cada vez mais hélio seja depositado em seu núcleo. Com o tempo, este se torna mais quente, e quando sua temperatura atinge aproximadamente 150MK, ocorre o *flash* do hélio em

objetos com menos de $2M_{\odot}$, o que dá início ao processo triplo-alfa, no qual este elemento é fundido em carbono - para objetos de maior massa, estas reações ocorrem sem o evento do *flash*, uma vez que a combustão nestas ocorre sem a degeneração do núcleo. A esta fase se denomina ramo horizontal, em referência ao fato de os objetos a ela pertencentes apresentarem luminosidade constante no Diagrama de Hertzsprung-Russell (H-R).

O estágio evolutivo seguinte, para o grupo de estrelas considerado, é o que se conhece como ramo assintótico das gigantes. Nele, o núcleo estelar é composto por carbono e, por vezes, oxigênio inertes, enquanto as camadas externas realizam a fusão do hélio (para as mais interiores) ou do hidrogênio (para as mais exteriores). No início deste período, ocorre também um novo episódio de dragagem, no qual elementos como o carbono são levados à superfície.

A configuração de instabilidade da estrela nesta fase de evolução leva ao início do processo de perda de massa através da ejeção das camadas externas, agora chamadas de envoltório circunstelar, por fortes ventos estelares. Com isso, forma-se então o que se conhece como nebulosa planetária. Neste período evolutivo, um remanescente estelar extremamente quente (com temperatura que pode variar dos 20kK aos 200kK) - a chamada estrela central de nebulosa planetária (ECNP) - emite, segundo a Lei de Wien, com pico no ultravioleta, o que é suficiente para ionizar o envoltório que o rodeia.

A alta velocidade dos ventos estelares responsáveis pela expulsão das camadas externas da estrela e os eventos de dragagem ao qual esta é submetida ao longo de sua evolução fazem das nebulosas planetárias, juntamente com as supernovas, objetos centrais no enriquecimento químico de sistemas galácticos. Além disso, são também utilizadas, ao lado de regiões HII, como importantes marcadores do histórico da evolução química destes sistemas. Isto se deve ao fato de que a abundância estipulada para elementos que não são afetados pelo processo de nucleossíntese estelar destes objetos, como o neônio, o enxofre e o carbono (e o oxigênio, a depender dos processos nucleossintéticos e de dragagem), indicam as condições do meio interestelar no momento em que a estrela foi formada.

Neste contexto, surge a importância da determinação de parâmetros físicos das ECNPs. Modelos teóricos que descrevem a taxa com a qual massa é perdida por estes objetos, com destaque para o proposto por Vassiliadis e Wood (1994) (V&W), trazem uma relação entre temperatura efetiva e luminosidade dos remanescentes estelares e massa da estrela progenitora (e, com isto, sua idade), sempre em função da metalicidade. O conhecimento de

tais dados torna possível um estudo detalhado do perfil de evolução química para diferentes sistemas galácticos e, com isto, a comparação entre estes.

O projeto aqui apresentado buscou fazer uma utilização deste método, aplicando-o a ECNPs da Galáxia, bem como da Pequena e da Grande Nuvens de Magalhães. Conforme citado em trabalhos como de Freitas-Pacheco et al. (1993), as análises de regiões HII revelam perfis químicos bastante distintos para a nossa galáxia em relação a suas satélites, com as anãs apresentando perfis muito mais baixos de abundâncias de metais, implicando um processo de enriquecimento mais lento.

Além disso, no que concerne a Galáxia, a localização também desempenha um papel importante, e resultados como os apresentados em Shaver et al. (1983) e Henry e Worthey (1999) devem ser verificados. Tais trabalhos revelam que galáxias espirais e elípticas apresentam um gradiente de metalicidade que decresce com a distância galactocêntrica, indicando um enriquecimento do meio interestelar mais intenso nas regiões próximas ao centro galáctico, e mais fraco em zonas periféricas.

Todos os fatos supracitados devem ficar evidentes no estudo destes valores em nebulosas planetárias provenientes dos sistemas analisados, conforme discutido e apresentado nas seções seguintes.

Dados catalogados referentes às ECNPs

A base de dados utilizada neste projeto concentrou-se unicamente em informações disponíveis publicamente *online*. Duas principais ferramentas digitais foram utilizadas, a saber, o *SAO/NASA Astrophysics Data System* (ADS), para busca de artigos, e o serviço *VizieR*, provido pelo *Centre de Données Astronomiques de Strasbourg*, para a obtenção de catálogos.

Com o auxílio destes aparatos, foram coletados parâmetros físicos de 602 ECNPs da Galáxia, a partir dos dados publicados por Weidmann e Gamen (2011), Stasińska et al. (1997), Guerrero e De Marco (2013), Moreno-Ibanez et al. (2016), Kerber et al. (2004), Milingo et al. (2010), Holovaty e Havrilova (2006), Garcia-Hernandez e Gorný (2014), Milanova e Kholtygin (2009) e Milingo et al. (2012). No que concerne estrelas das Nuvens de Magalhães, 174 objetos puderam ser catalogados, tendo como fontes os trabalhos de Villaver et al. (2007), Villaver et al. (2003), Villaver et al. (2004), Idiart et al. (2007), de Freitas Pacheco et al. (1993), Mashburn et al. (2016) e Leisy e Dennefeld (2006).

Os parâmetros físicos estelares catalogados e utilizados neste projeto foram: coordenadas dos objetos, temperaturas efetivas das estrelas centrais, suas luminosidades, seus tipos espectrais (para objetos galácticos apenas) e abundâncias químicas das nebulosas.

2.1 Temperatura efetiva

O conhecimento da temperatura efetiva de estrelas centrais de nebulosas planetárias é crucial para a determinação de novos parâmetros físicos, uma vez que possibilita a colocação destas no Diagrama H-R, a partir do qual comparações com isócronas, por exemplo, podem ser realizadas (cf. Seção 3.1).

O primeiro método para o cálculo desta grandeza foi proposto por Zanstra (1929), à luz do desenvolvimento da teoria quântica. Este método supõe que a estrela central irradia como um corpo negro e a nebulosa que a circunda é opticamente opaca no contínuo de Lyman (i.e. energia associada a fótons liberados pela transição eletrônica de um nível n qualquer para o nível $n = 1$). A radiação ultravioleta emitida pelo remanescente estelar seria então absorvida pela nebulosa, de forma a ionizar os átomos que a constituem. Esta ionização seria prontamente seguida de um processo de recombinação, o qual resultaria na emissão de novos fótons.

O método de Zanstra faz uso do conhecimento prévio do contínuo de emissão da estrela central e obtém a temperatura efetiva através da expressão apresentada na Equação 2.1,

$$\int_{\nu_0}^{\infty} \frac{\left(\frac{h\nu}{kT}\right)^2}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} d\nu = \sum_{\nu} \frac{\left(\frac{h\nu}{kT}\right)^3}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \frac{L_p}{\nu \frac{\delta L_s}{\delta \nu}} \quad (2.1)$$

onde ν_0 representa o potencial de ionização atômico, L_p é a energia total numa imagem monocromática de frequência ν , e $\frac{\delta L_s}{\delta \nu}$, a energia total por unidade de frequência para o espectro estelar nesta mesma frequência.

O processo é comumente aplicado a linhas do HI e do HeII, o que gera um dos tópicos de maior discussão no contexto da astrofísica de ECNPs, a chamada “discrepância de Zanstra”, isto é, uma inconsistência significativa entre os valores obtidos de $T_{eff}(HI)$ e $T_{eff}(HeII)$, na qual o segundo pode aparecer até cerca de 70% maior em relação ao primeiro. Em Henry e Shipman (1986), são fornecidas possíveis causas deste efeito, tais quais a diferença na profundidade óptica da esfera de Strömgren para os dois elementos e a absorção dos fótons por poeira na nebulosa.

Diversos trabalhos foram publicados sugerindo ligeiras modificações no método a fim de reduzir esta discrepância, como Harman e Seaton (1966) e Kaler e Jacoby (1989).

No catálogo utilizado neste projeto - embasado em uma série trabalhos que fizeram uso dos diversos tipos de métodos para obtenção de temperaturas efetivas -, foram coletados valores desta grandeza para aproximadamente 45% dos objetos trabalhados.

2.2 Luminosidade

Ao lado da temperatura efetiva, o valor da luminosidade de estrelas centrais de nebulosas planetárias mostra-se também como um fator de extrema importância para a deter-

minação de novos parâmetros físicos, uma vez que é também necessária para a colocação do objeto no Diagrama H-R.

Conforme explicado em diversas fontes (e.g. Villaver et al. (2003), Moreno-Ibanez et al. (2016)), esta grandeza é determinada a partir de dados fotométricos. Em seu método mais direto de determinação, calcula-se primeiramente a magnitude absoluta por meio da distância da nebulosa e de sua taxa de extinção, que pode ser estimada a partir da razão $H\alpha/H\beta$. A luminosidade total da ECNPs provém da adição de um fator BC de correção bolométrica, conforme proposto em trabalhos como Vacca et al. (1996).

Para o projeto aqui apresentado, catalogou-se este valor também para cerca de 45% dos objetos trabalhados.

2.3 Abundâncias químicas

A determinação das abundâncias em nebulosas, conforme detalhadamente descrito por Stasińska (2002), pode ser realizada através de diversos métodos. Destes, o mais simples e direto consiste em somar as razões de cada íon do elemento em questão em relação ao hidrogênio. Para um íon genérico X^{++} , esta razão é dada pela Equação 2.2,

$$\frac{X^{++}}{H^+} = \frac{[XIII]\lambda/H\beta}{j_{[XIII]}(T_e, n)/j_{H\beta}(T_e)}, \quad (2.2)$$

onde $[XIII]\lambda$ representa a intensidade de uma dada linha correspondente ao espectro de X^{++} , $j_{[XIII]}$ é o coeficiente de emissão desta linha, e T_e e n representam a temperatura e a densidade eletrônicas, as quais, por sua vez, são determinadas pela razão entre a intensidade de linhas espectrais de um dado íon que possuam potenciais de excitação distintos (para T_e) ou iguais (para n).

No projeto aqui apresentado, foram compilados os valores de abundância relativa ao hidrogênio para aproximadamente 55% dos objetos presentes no catálogo, para os elementos hélio, nitrogênio, oxigênio, neônio, enxofre e argônio. Na Tabela 2.1, encontram-se os valores médios destas abundâncias para cada um dos sistemas trabalhados, apresentados na forma $[X/H] = \log(X/H) - \log(X/H)_\odot$.

Tabela 2.1 - Valores médios de abundâncias para a Galáxia e as Nuvens de Magalhães.

	[He/H]	[N/H]	[O/H]	[Ne/H]	[S/H]	[Ar/H]
Gal.	0.078	0.286	-0.084	0.129	-0.521	0.153
GNM	0.085	-0.019	-0.293	-0.275	-0.032	-0.164
PNM	0.019	-0.364	-0.682	-0.638	-0.200	-0.571

2.4 Tipo espectral e posição galáctica

As linhas de absorção e de emissão observadas em nebulosas planetárias determinam a classificação em tipo espectral das ECNPs. Conforme proposto por Mendez (1991), dois principais grupos podem ser distinguidos: um no qual as linhas de hidrogênio apresentam-se fortemente marcadas (rico em hidrogênio), e outro no qual isto não ocorre (pobre em hidrogênio).

Neste projeto, foi catalogado o tipo espectral de cerca de 75% dos objetos galácticos trabalhados. A Tabela 2.2 traz a contagem de estrelas centrais por tipo espectral.

Tabela 2.2 - Quantidade de ECNPs galácticas de cada tipo espectral presentes no catálogo.

Tipo esp. (rica H)	Qtde.	Tipo esp. (pobre H)	Qtde.
O3-9+B1-5	66	[WC4-11]	59
Of	20	[WO1-4]	34
>B5	39	[WR]	11
B[e]	6	[WN]	5
DA+WD	12	PG 1159	18
DAO	14	O(He)	3
sdO	6	O(c)+Of(c)	2
hgO(H)	18	DO	4
Cont.	16	[WC]PG-1159	5
sdB	1		
Blue	50		

Além disso, a junção dos dados de tipo espectral aos de coordenadas galácticas permitiu demonstrar, de acordo com o que foi observado em Weidmann e Gamen (2011), que

nebulosas pertencentes ao grupo rico em hidrogênio distribuem-se de forma muito mais homogênea no disco da galáxia em relação às pobres, que se concentram na região central. Tal fato é evidenciado nas Figuras 2.1 e 2.2, que trazem a contagem de objetos de cada grupo para cada valor de longitude galáctica.

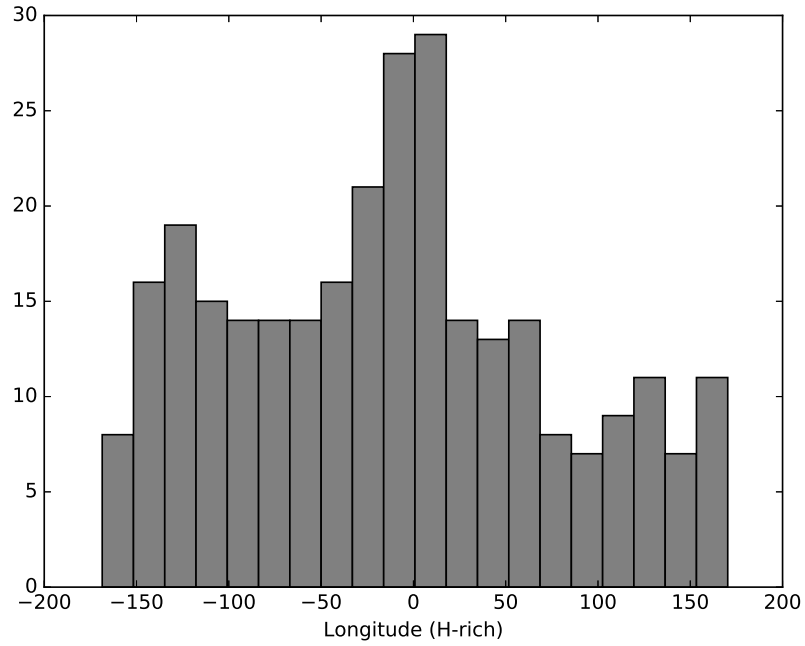


Figura 2.1: Contagem de nebulosas do tipo rico em hidrogênio para cada valor de longitude galáctica

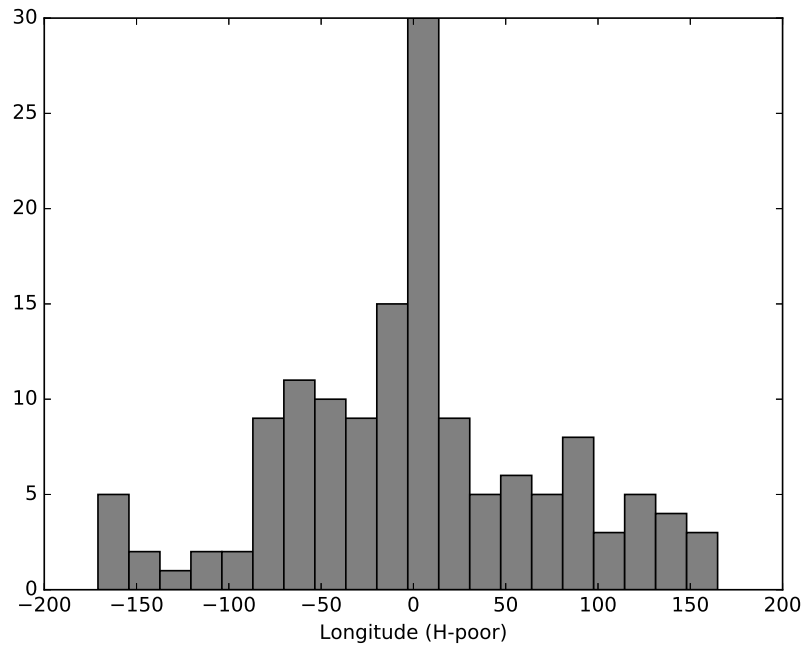


Figura 2.2: Contagem de nebulosas do tipo pobre em hidrogênio para cada valor de longitude galáctica

Determinação de parâmetros físicos e perfis de evolução química

A partir do catálogo de dados referentes a parâmetros físicos de ECNPs que foi gerado, tornou-se possível, através de modelos teóricos, a determinação da massa e da idade da estrela progenitora, bem como a confecção de gráficos que mostram a evolução química da Galáxia e das Nuvens de Magalhães.

3.1 *Massa e idade da estrela progenitora*

A determinação da massa da estrela progenitora deu-se por meio da aplicação do modelo apresentado por V&W, trabalho o qual fez uso de uma série de dados observacionais e teóricos com o intuito de chegar a um conjunto de equações que permitisse a geração de isócronas sobre o diagrama H-R, através de métodos numéricos.

Os autores, levando em consideração o papel crucial que desempenha a taxa de perda de massa no processo considerado, partiram inicialmente da relação empírica mostrada na Equação 3.1 e na expressão teórica trazida na Equação 3.2,

$$\log \left(\frac{v_{\infty}}{v_{esc}} \right) = -2.0 + 0.52 \times \log (T_{eff}) \quad (3.1)$$

$$\dot{M}_{lim} = \frac{L}{cv_{\infty}} \quad (3.2)$$

onde v_{∞} é a velocidade terminal dos ventos estelares; v_{esc} é a velocidade de escape na superfície da estrela; T_{eff} , a temperatura efetiva; $\dot{M}_{lim}$ representa o limite da taxa de perda de massa; L , a luminosidade do objeto e, por fim, c é a velocidade da luz.

A partir de dados observacionais referentes à relação entre temperatura efetiva e taxa de perda de massa, os autores obtiveram também a relação expressa na Equação 3.3.

$$\log \left(\frac{\dot{M}}{\dot{M}_{lim}} \right) = -3.92 + 0.67 \times \log (T_{eff}) \quad (3.3)$$

Neste contexto, sabe-se que $\dot{M}_{lim}$ apresenta dependência de L e v_{∞} , o qual, por sua vez, depende apenas da massa e do raio do remanescente estelar, uma vez que se relaciona diretamente com a velocidade de escape do objeto. Portanto, concluiu-se que a taxa de perda de massa estará em função da posição da estrela no diagrama H-R.

Para relacionar a massa do remanescente à massa da estrela progenitora, M_i , os autores do modelo fizeram uso da Equação 3.4, a qual explicita o papel da metalicidade Z no cálculo realizado.

$$\frac{M}{M_{\odot}} = 0.473 + 0.084 \times \frac{M_i}{M_{\odot}} - 0.058 \times \log \left(\frac{Z}{Z_{\odot}} \right) \quad (3.4)$$

Com estas equações, o trabalho de V&W realizou simulações da evolução de estrelas pós-ramo assintótico das gigantes, considerando valores de metalicidade iguais a 0.001, 0.004, 0.008 e 0.016, tornando o modelo aplicável tanto para a Galáxia quanto para as Nuvens de Magalhães. As massas das estrelas simuladas estão no intervalo de $0.85M_{\odot}$ e $5M_{\odot}$, e encontram-se divididas em dois grupos de perfis evolutivos ligeiramente diferentes: queimadoras de hidrogênio e queimadoras de hélio.

O projeto aqui apresentado, a exemplo de inúmeros outros (e.g. Moreno-Ibanez et al. (2016) e Idiart et al. (2007)), fez uso das isócronas resultantes da trabalho de V&W para apresentar uma estimativa das massas das estrelas progenitoras dos objetos contidos no catálogo. Ao todo, pôde-se determinar este valor para 133 das ECNPs.

A Figura 3.1 traz a sobreposição das isócronas ao Diagrama H-R dos remanescentes estelares da Galáxia, para valores de metalicidade $Z = 0.008$, que é o número para o qual a quantidade de objetos é mais abundante para este sistema. Na Figura 3.2, encontra-se o mesmo processo, realizado para as Nuvens de Magalhães; a metalicidade presente nesta figura, contudo, é $Z = 0.004$, considerando que estes sistemas possuem valores mais baixos de abundâncias metálicas e, portanto, a maioria de suas estrelas encontra-se nesta faixa. Os diagramas para os outros valores de metalicidade estão apresentados no Apêndice A.

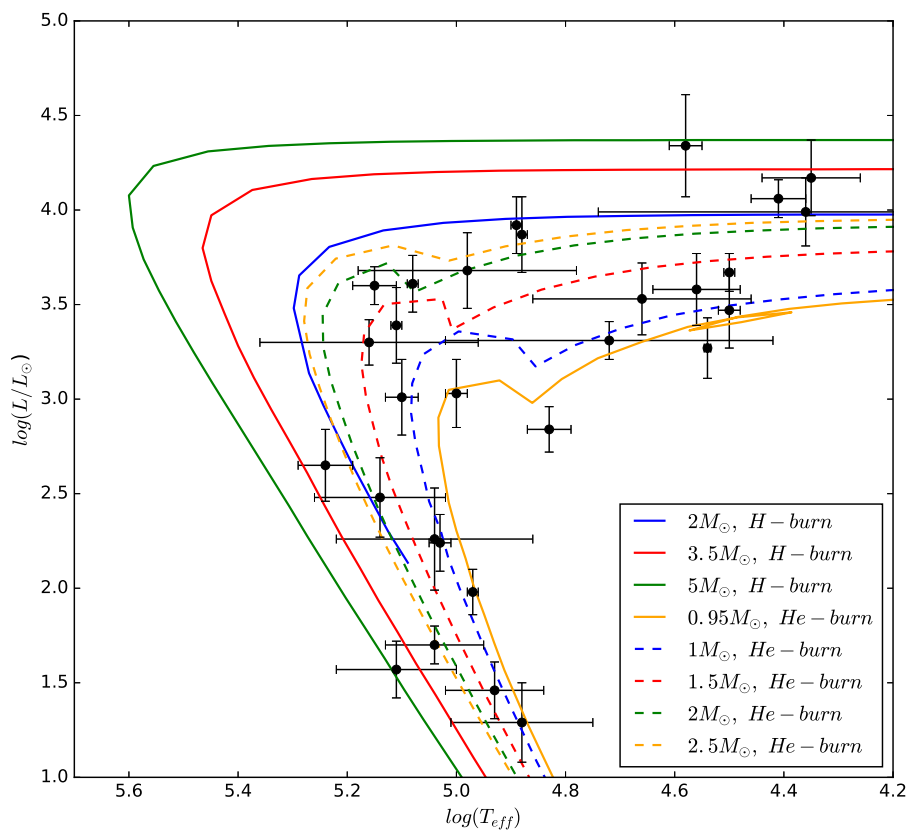


Figura 3.1: Isócronas de V&W sobrepostas ao diagrama H-R das estrelas centrais de nebulosas planetárias da Galáxia com metalicidade $Z = 0.008$

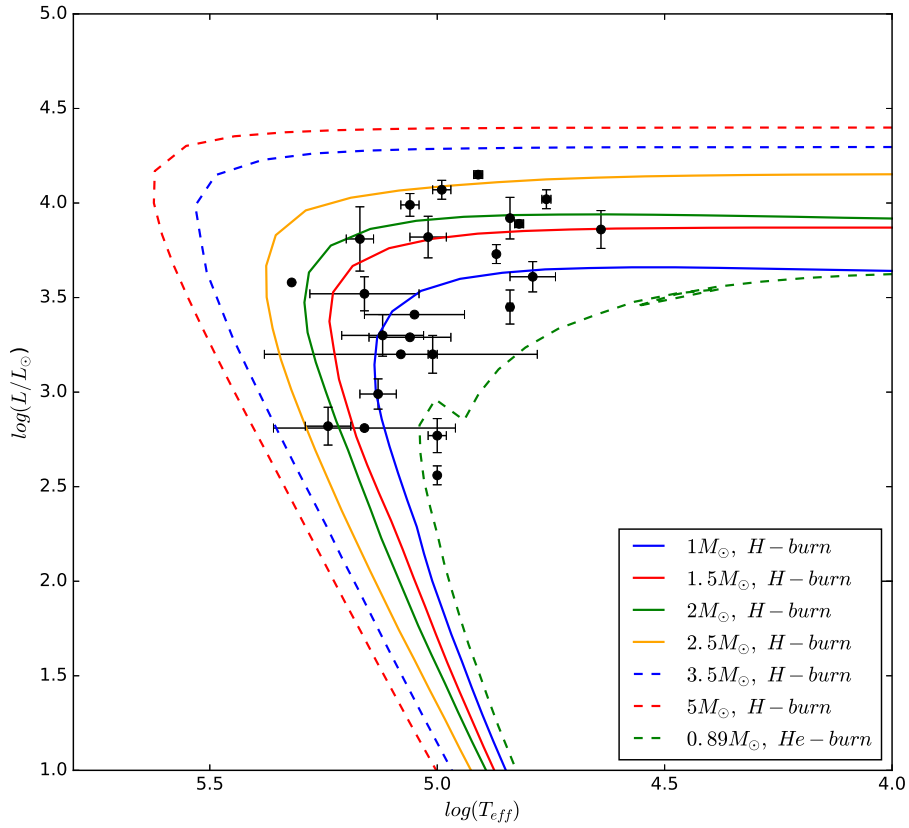


Figura 3.2: Isócronas de V&W sobrepostas ao diagrama H-R das estrelas centrais de nebulosas planetárias das Nuvens de Magalhães com metalicidade $Z = 0.004$

Uma vez determinadas as massas das estrelas progenitoras, torna-se uma tarefa simples a determinação de suas idades. A Equação 3.5 traz a bem conhecida relação entre a massa de uma estrela e seu período na sequência principal,

$$T_{SP} = 10 \times \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{-2.5}, \quad (3.5)$$

onde T_{SP} é dado em bilhões de anos. Tendo em vista que o tempo da estrela fora da sequência principal está dentro da incerteza para os valores trabalhados, a expressão acima traz uma boa estimativa para a idade total do objeto.

3.2 Evolução química da Galáxia e das Nuvens de Magalhães

Os valores determinados das idades das ECNPs têm como uma de suas principais aplicações o traço do perfil de evolução química de sistemas galácticos. Para tal, faz-se necessário colocá-los no eixo das abscissas de um gráfico que tem como eixo das ordenadas as respectivas abundâncias químicas. Foram estudados os perfis para o hélio, o nitrogênio, o oxigênio, o neônio, o enxofre e o argônio. As Figuras 3.3 e 3.4 trazem comparações entre a evolução química da Galáxia em relação à Grande e à Pequena Nuvem de Magalhães, respectivamente, para o elemento neônio, este tendo sido escolhido por ser pouco influenciado pelo processo nucleossintético da estrela durante sua evolução e também por apresentar poucos empecilhos observacionais, resultando, portanto, nos melhores dados. O perfil evolutivo referente ao restante dos elementos encontra-se no Apêndice B (com exceção do enxofre, que será discutido separadamente na Subseção 3.2.3).

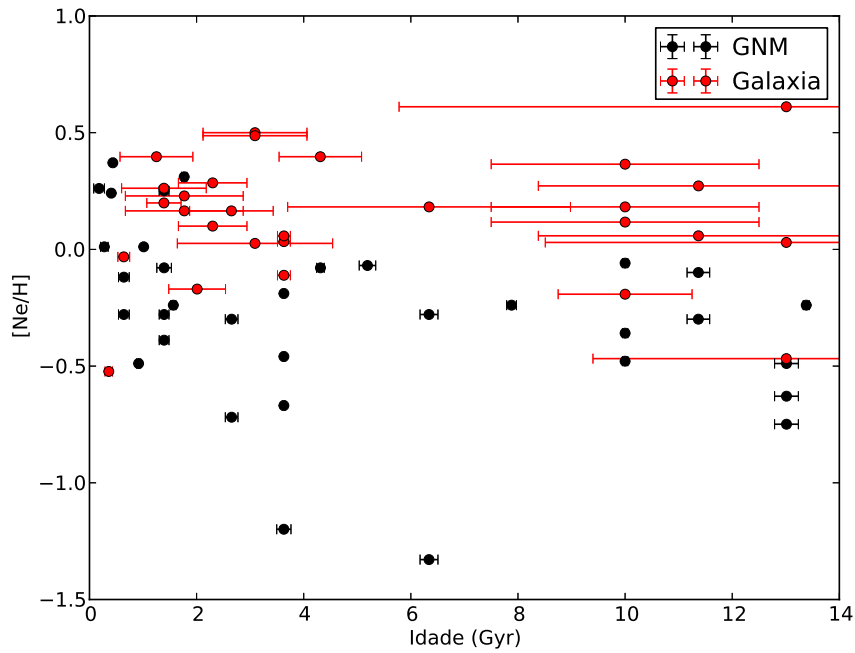


Figura 3.3: Comparação entre o perfil de evolução da abundância do neônio para a Galáxia e para a Grande Nuvem de Magalhães

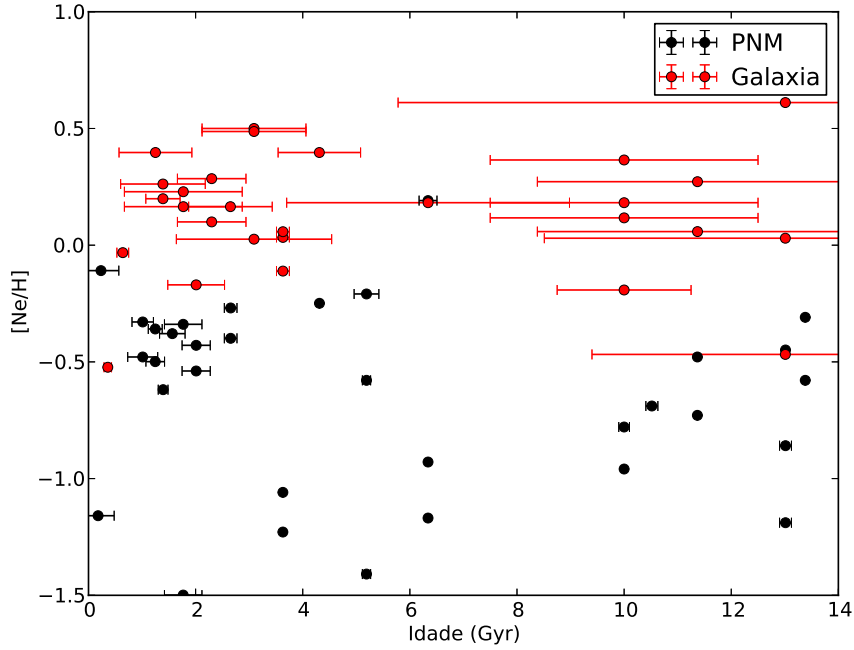


Figura 3.4: Comparação entre o perfil de evolução da abundância do neônio para a Galáxia e para a Pequena Nuvem de Magalhães

Os gráficos revelam uma considerável dispersão dos dados, decorrentes de uma série de motivos que serão discutidos; contudo, de forma geral, e excluindo-se alguns *outliers*, pode-se notar dois comportamentos que vão ao encontro do modelo esperado: *i)* os valores de abundância apresentam uma tendência a cair com a idade do objeto, revelando a constante inundação do meio interestelar por novos elementos conforme estrelas em processo de morte os ejetam, e *ii)* a Galáxia possui abundâncias visivelmente superiores às das Nuvens de Magalhães, sobretudo à Pequena, em concordância com os perfis de regiões HII observados nestes sistemas.

Chama a atenção também a questão da discrepância entre as incertezas nas idades dos objetos galácticos em relação aos das galáxias anãs. Este fato é uma decorrência das maiores incertezas na luminosidade de ECNPs da Galáxia, como pode ser facilmente observado na comparação entre as Figuras 3.1 e 3.2, o que ocorre pois nebulosas planetárias não se comportam como velas-padrão, e a estimativa da luminosidade torna-se mais incerta quanto mais ineficiente se torna o método da paralaxe trigonométrica na determinação da distância. No caso das galáxias anãs, a distância do sistema é bem conhecida, o que reduz as incertezas referentes à luminosidade, reduzindo, portanto, a incerteza na estimativa da

massa pela sobreposição das isócronas, o que, por fim, reduz as incertezas na idade.

3.2.1 A classificação de Peimbert

A partir da obtenção dos gráficos que relacionam idades e abundâncias químicas das nebulosas e da constatação de que há certa dispersão nos dados, existem meios de tratá-los de forma a eliminar fatores que afastam estes do modelo esperado.

Destes meios, destaca-se a classificação proposta por Peimbert (1978) e desenvolvida por Peimbert e Torres-Peimbert (1983), que separa as nebulosas em cinco tipos (a saber, I, II, III, IV e V) com base em suas abundâncias químicas. As de tipo I, comumente - mas não necessariamente - associadas a estrelas de população I, apresentam valores de abundâncias mais distoantes em relação às demais; portanto, os objetos do catálogo foram divididos em dois grupos: tipo I e não-tipo I.

Os valores de corte para os grupos foram escolhidos com base no que é proposto por de Freitas-Pacheco et al. (1993): para nebulosas galácticas, as de tipo I são aquelas que apresentam $\text{He}/\text{H} > 0.125$ e/ou $\text{N}/\text{O} > 0.5$; no caso das nebulosas das Nuvens de Magalhães, levando em conta o fator de enriquecimento e os dados observados referentes às regiões HII, o trabalho citado estipulou valores de corte em $\text{He}/\text{H} > 0.125$ e/ou $\text{N}/\text{O} > 0.3$.

As Figuras 3.5 e 3.6 mostram o perfil de evolução química do neônio apenas para o objetos de tipo I da Galáxia em comparação com os objetos de mesmo tipo da Grande e da Pequena Nuvem de Magalhães, respectivamente. As Figuras 3.7 e 3.8, por sua vez, trazem o mesmo perfil, mas para objetos não-tipo I. Os gráficos referentes ao restante dos elementos estão no Apêndice C.

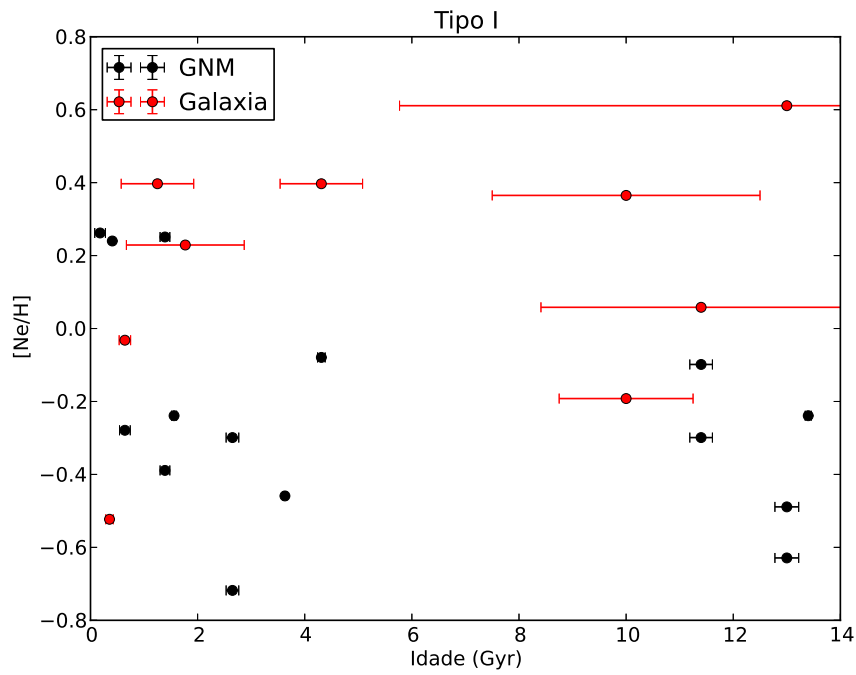


Figura 3.5: Comparação entre o perfil de evolução da abundância do neônio em nebulosas tipo I para a Galáxia e para a Grande Nuvem de Magalhães

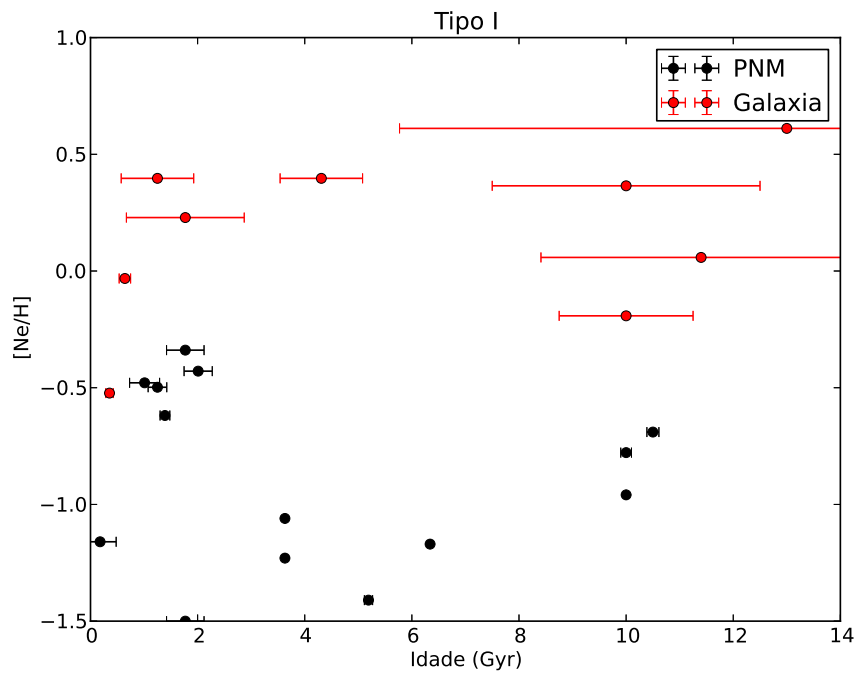


Figura 3.6: Comparação entre o perfil de evolução da abundância do neônio em nebulosas tipo I para a Galáxia e para a Pequena Nuvem de Magalhães

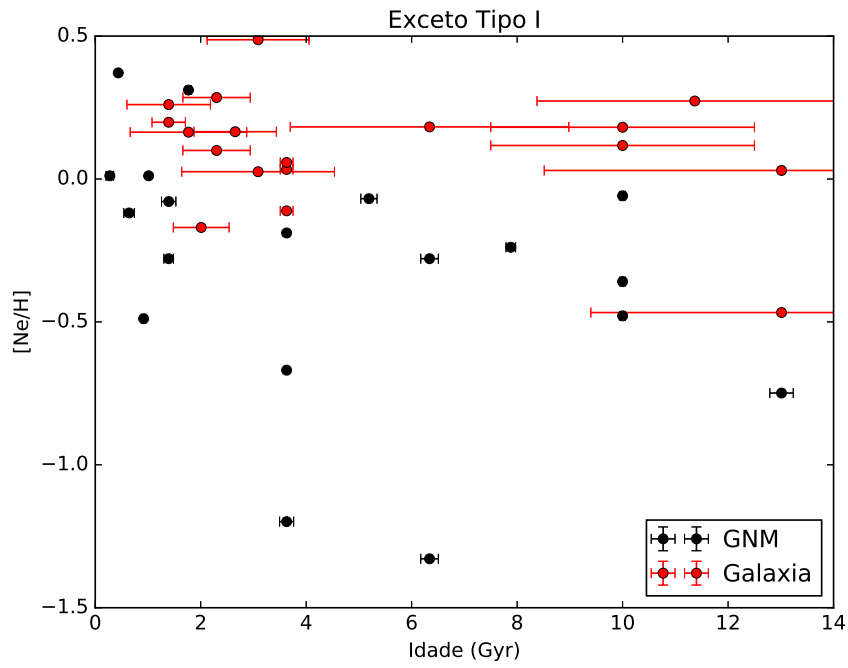


Figura 3.7: Comparação entre o perfil de evolução da abundância do neônio em nebulosas não-tipo I para a Galáxia e para a Grande Nuvem de Magalhães

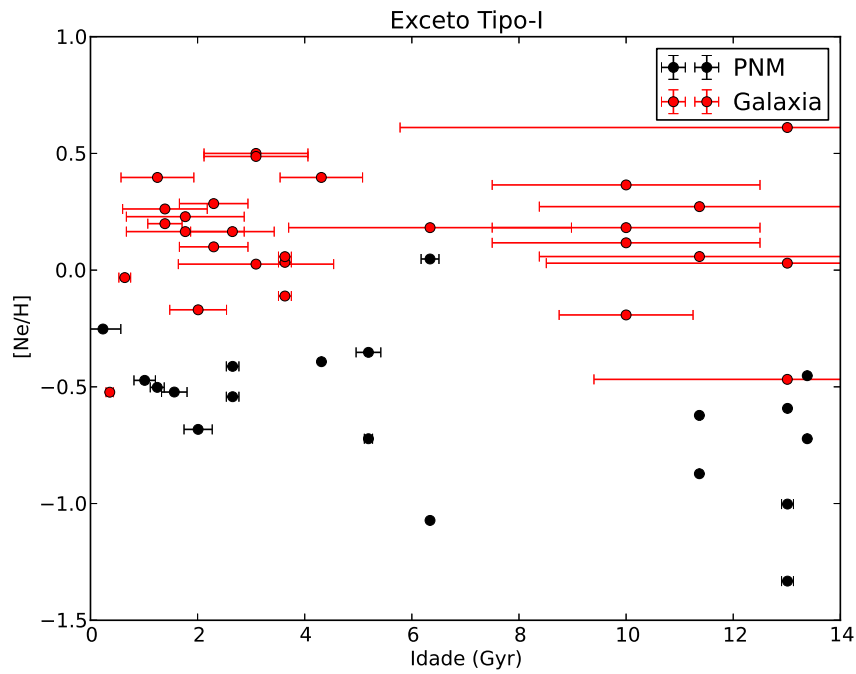


Figura 3.8: Comparação entre o perfil de evolução da abundância do neônio em nebulosas não-tipo I para a Galáxia e para a Pequena Nuvem de Magalhães

Os gráficos indicam que, por mais que ainda se evidencie certa dispersão nos dados, advindas sobretudo de fatores observacionais, a divisão do catálogo em dois grupos de acordo com o critério de Peimbert tornou mais nítida a divisão entre os diferentes sistemas e provocou uma redução de *outliers*, mostrando de forma mais conspícua a tendência de redução da abundância química com o aumento da idade das nebulosas, que é o que se espera neste contexto.

3.2.2 O gradiente radial de abundância química galáctica

No que concerne o perfil de evolução química da Galáxia, um fator deve ser levado em consideração como possível fonte de desvios em relação ao modelo esperado: o gradiente radial da abundância química, como discutido em Shaver et al. (1983) e Henry e Worthey (1999). Este gradiente surge como decorrência do fato de regiões próximas ao centro galáctico serem mais densas, tanto em gás quanto em populações estelares e, portanto, apresentarem uma taxa de enriquecimento do meio interestelar mais intensa do que aquela observada em regiões periféricas.

A Figura 3.9 traz os valores de abundância do neônio em função do raio galactocêntrico, sobrepostos por um ajuste que evidencia uma ligeira proporcionalidade inversa entre as duas grandezas. No Apêndice D, encontra-se também este perfil traçado para o caso do oxigênio.

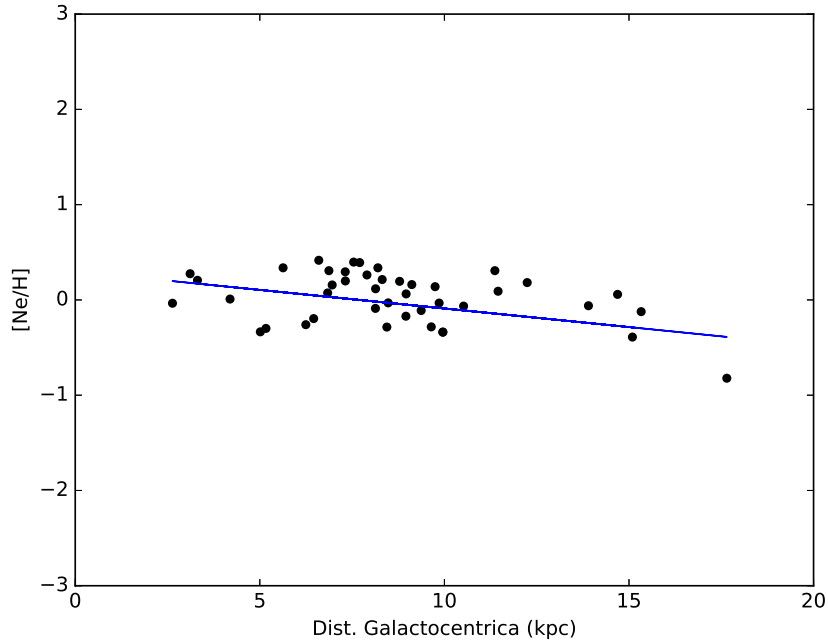


Figura 3.9: Abundância do neônio em função do raio galactocêntrico

O ajuste linear apresentado é dado pela Equação 3.6:

$$[Ne/H] = 0.2 - 0.07 \times R, \quad (3.6)$$

com um coeficiente de correlação $r = -0.52$. Cabe salientar que tanto o coeficiente angular do gráfico quanto o coeficiente de correlação apresentaram valores relativamente baixos, em decorrência, dentre outros fatores, da subamostragem (principalmente no que concerne a correlação), tornando o fator do gradiente radial de abundância pouco ou nada influente na questão da dispersão dos dados. Espera-se que projetos futuros, com uma base de dados mais vasta, possa não apenas melhorar estes valores, como também gerar gráficos que relacionem idade e abundância química para uma grande quantidade de objetos de mesma distância galactocêntrica.

3.2.3 A anomalia do enxofre

Dentre os elementos cuja abundância em nebulosas planetárias apresenta baixa influência do processo de nucleossíntese estelar, a grande maioria apresenta perfis bem comportados de evolução química em sistemas galácticos. Neste contexto, o enxofre mostra-se

como uma exceção, apresentando o fenômeno conhecido como “*anomalia do enxofre*”, amplamente discutido na literatura, e que pôde também ser evidenciado no projeto aqui apresentado, conforme visto nas Figuras 3.10 e 3.11.

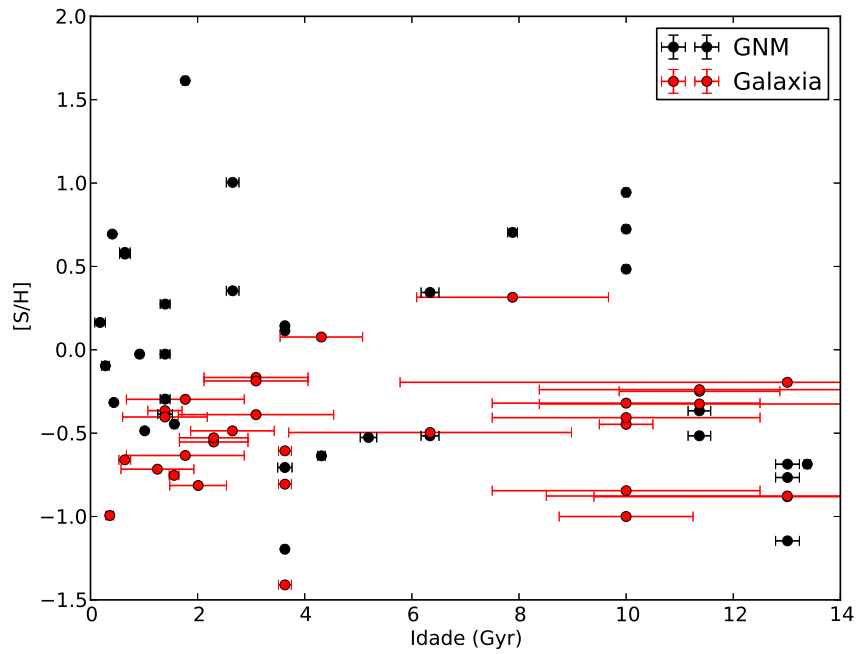


Figura 3.10: Comparação entre o perfil de evolução da abundância do enxofre para a Galáxia e para a Grande Nuvem de Magalhães, onde nota-se a anomalia

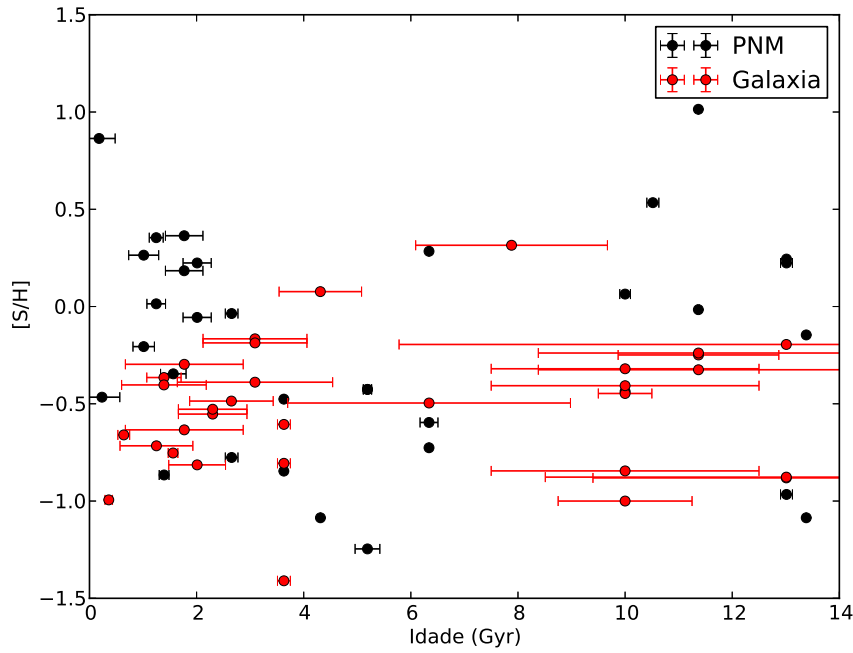


Figura 3.11: Comparação entre o perfil de evolução da abundância do enxofre para a Galáxia e para a Pequena Nuvem de Magalhães, onde nota-se a anomalia

Observam-se claramente duas principais características deste perfil: *i)* os valores para as abundâncias do enxofre, de forma generalizada e sistemática, encontram-se abaixo do esperado, com a grande maioria destes estando abaixo da abundância do elemento para o caso solar; *ii)* os valores encontram-se mais dispersos do que para qualquer outro elemento, havendo inclusive regiões do gráfico em que a abundância do elemento nas Nuvens de Magalhães supera a galáctica.

Uma possível explicação para a questão da anomalia é fornecida por Henry et al. (2004), bem como Henry et al. (2006). Os autores atribuem ao fato de que parte considerável do espectro referente ao íon S^{+3} é de difícil observação, de forma que esta abundância, muitas vezes, precisa ser determinada por meio do uso de um fator de correção de ionização, o qual, por sua vez, de acordo com os autores, subestima o valor calculado, resultando numa baixa abundância total do elemento. Considerando que o catálogo utilizado neste trabalho faz uso de diversas fontes, que utilizaram métodos de redução de dados diferentes, espera-se certa flutuação entre os valores. No caso do enxofre, em que as incertezas crescem, é de se esperar que as flutuações cresçam proporcionalmente.

Conclusões e Perspectivas

A catalogação de um vasto e variado acervo de dados referentes a parâmetros físicos de estrelas centrais de nebulosas planetárias da Galáxia e das Nuvens de Magalhães, e a subsequente aplicação de modelos teóricos mostraram-se produtivas no que concerne a determinação de novos dados e no estudo da relação entre estes.

A confecção de modelos de representação para a evolução química de sistemas galácticos mostrou-se possível, e verificaram-se - e explicaram-se - propriedades vastamente discutidas na literatura, como o gradiente radial de abundância química para o caso de galáxias espirais (ainda que de forma sutil) e a anomalia do enxofre.

Como principal limitação, levanta-se o fato de que trabalhar com base em informações provenientes de diversas fontes coloca a pesquisa à mercê das técnicas utilizadas pelos autores originais, as quais estão sujeitas a todo tipo de variação. Os dados utilizados foram observados em locais diferentes, sob condições atmosféricas diferentes e, finalmente, reduzidos e analisados com o uso das mais variadas técnicas. Este fator, mais do que qualquer parâmetro astrofísico, é capaz de gerar grandes inconsistências e flutuações em relação a modelos esperados.

Projetos similares futuros, de níveis mais avançados, devem buscar expandir o catálogo o tanto quanto possível - consoante novos dados vão sendo publicados - e, sobretudo, buscar as técnicas e condições de extração de cada um destes dados e, então, desenvolver meios para torná-los mais uniformes. Espera-se, principalmente, que resultados vindos de levantamentos automáticos tragam melhorias qualitativas e quantitativas aos modelos, uma vez que aumentam o número de dados em diversas ordens de grandeza e os analisam de forma homogênea.

Referências Bibliográficas

- Carroll B. W., Ostlie D. A., An Introduction to Modern Astrophysics, 1996
- de Freitas-Pacheco J. A., Barbuy B., Costa R. D. D., Idiart T. E. P., Type-I Planetary Nebulae in the Large Magellanic Cloud - Oxygen Sulphur and Argon Abundances as Tracers of Chemical Enrichment, *A&A*, 1993, vol. 271, p. 429
- de Freitas Pacheco J. A., Costa R. D. D., Maciel W. J., VizieR Online Data Catalog: Abundances of non-type I PNe in LMC (Freitas Pacheco+ 1993), *VizieR Online Data Catalog*, 1993, vol. 327
- Garcia-Hernandez D. A., Gorny S. K., VizieR Online Data Catalog: Chemical abundances in Galactic PNe (Garcia-Hernandez+, 2014), *VizieR Online Data Catalog*, 2014, vol. 356
- Guerrero M. A., De Marco O., Analysis of far-UV data of central stars of planetary nebulae: Occurrence and variability of stellar winds, *A&A*, 2013, vol. 553, p. A126
- Hansen C. J., Kawaler S. D., Stellar Interiors. Physical Principles, Structure, and Evolution., 1994, 84
- Harman R. F., Seaton M. J., The ionization structure of planetary nebulae, IV. Optical thickness of the nebulae and temperatures of the central stars, *MNRAS*, 1966, vol. 132, p. 15
- Henry R. B. C., Kwitter K. B., Balick B., Sulfur, Chlorine, and Argon Abundances in Planetary Nebulae. IV. Synthesis and the Sulfur Anomaly, *AJ*, 2004, vol. 127, p. 2284

- Henry R. B. C., Shipman H. L., Planetary nebula central stars - A detailed examination of the sensitivity of the Zanstra temperature method to stellar and nebular parameters, *ApJ*, 1986, vol. 311, p. 774
- Henry R. B. C., Skinner J. N., Kwitter K. B., Milingo J. B., The Sulfur Abundance Anomaly in Planetary Nebulae. In *Planetary Nebulae in our Galaxy and Beyond* , vol. 234 of IAU Symposium, 2006, p. 417
- Henry R. B. C., Worthey G., The Distribution of Heavy Elements in Spiral and Elliptical Galaxies, *PASP*, 1999, vol. 111, p. 919
- Holovatyy V. V., Havrilova N. V., VizieR Online Data Catalog: Calculated chemical composition of galactic PN (Holovatyy+, 2005), *VizieR Online Data Catalog*, 2006, vol. 808
- Idiart T. P., Maciel W. J., Costa R. D. D., Chemical evolution of the Small Magellanic Cloud based on planetary nebulae, *A&A*, 2007, vol. 472, p. 101
- Kaler J. B., Jacoby G. H., Central star temperatures of optically thick planetary nebulae and a distance-independent test of dredge-up theory, *ApJ*, 1989, vol. 345, p. 871
- Kerber F., Mignani R. P., Guglielmetti F., Wicenec A., VizieR Online Data Catalog: Coordinates of Galactic planetary nebulae (Kerber+, 2003), *VizieR Online Data Catalog*, 2004, vol. 340
- Leisy P., Dennefeld M., VizieR Online Data Catalog: Magellanic Clouds PNe abundances (Leisy+, 2006), *VizieR Online Data Catalog*, 2006, vol. 345
- Mashburn A. L., Sterling N. C., Madonna S., Dinerstein H. L., Roederer I. U., Geballe T. R., Neutron-capture Element Abundances in Magellanic Cloud Planetary Nebulae, *ApJ*, 2016, vol. 831, p. L3
- Mendez R. H., Photospheric Abundances in Central Stars of Planetary Nebulae, and Evolutionary Implications. In *Evolution of Stars: the Photospheric Abundance Connection* , vol. 145 of IAU Symposium, 1991, p. 375
- Milanova Y. V., Kholtygin A. F., VizieR Online Data Catalog: He, C, N, and O abundances in an ensemble of Galactic planetary nebulae., *VizieR Online Data Catalog*, 2009, vol. 903

- Milingo J. B., Kwitter K. B., Henry R. B. C., Souza S. P., Alpha Element Abundances in a Large Sample of Galactic Planetary Nebulae, *ApJ*, 2010, vol. 711, p. 619
- Milingo J. B., Kwitter K. B., Henry R. B. C., Souza S. P., VizieR Online Data Catalog: α -element abundances in galactic PNe (Milingo+, 2010), VizieR Online Data Catalog, 2012, vol. 171
- Moreno-Ibanez M., Villaver E., Shaw R. A., Stanghellini L., VizieR Online Data Catalog: Properties of galactic PNe central stars (Moreno-Ibanez+, 2016), VizieR Online Data Catalog, 2016, vol. 359
- Peimbert M., Chemical abundances in planetary nebulae. In *Planetary Nebulae* , vol. 76 of IAU Symposium, 1978, p. 215
- Peimbert M., Torres-Peimbert S., Type I planetary nebulae. In *Planetary Nebulae* , vol. 103 of IAU Symposium, 1983, p. 233
- Schwarzschild M., *Structure and evolution of the stars*, 1965
- Shaver P. A., McGee R. X., Newton L. M., Danks A. C., Pottasch S. R., The galactic abundance gradient, *MNRAS*, 1983, vol. 204, p. 53
- Stasińska G., Abundance determinations in HII regions and planetary nebulae, *ArXiv Astrophysics e-prints*, 2002
- Stasińska G., Gorny S. K., Tylenda R., VizieR Online Data Catalog: Planetary nebulae properties (Stasińska+ 1997), VizieR Online Data Catalog, 1997, vol. 332
- Vacca W. D., Garmany C. D., Shull J. M., The Lyman-Continuum Fluxes and Stellar Parameters of O and Early B-Type Stars, *ApJ*, 1996, vol. 460, p. 914
- Vassiliadis E., Wood P. R., Post-asymptotic giant branch evolution of low- to intermediate-mass stars, *ApJS*, 1994, vol. 92, p. 125
- Villaver E., Stanghellini L., Shaw R. A., Post-Asymptotic Giant Branch Evolution in the Large Magellanic Cloud: A Study of the Central Stars of Planetary Nebulae, *ApJ*, 2003, vol. 597, p. 298

Villaver E., Stanghellini L., Shaw R. A., The Low- and Intermediate-Mass Stellar Population in the Small Magellanic Cloud: The Central Stars of Planetary Nebulae, *ApJ*, 2004, vol. 614, p. 716

Villaver E., Stanghellini L., Shaw R. A., The Mass Distribution of the Central Stars of Planetary Nebulae in the Large Magellanic Cloud, *ApJ*, 2007, vol. 656, p. 831

Weidmann W. A., Gamen R., Central stars of planetary nebulae: New spectral classifications and catalogue, *A&A*, 2011, vol. 526, p. A6

Zanstra H., Luminosity of Planetary Nebulae and Stellar Temperatures, Publications of the Dominion Astrophysical Observatory Victoria, 1929, vol. 4

Apêndice

Apêndice A

Sobreposição de isócronas para ECNPs da Galáxia e das Nuvens de Magalhães

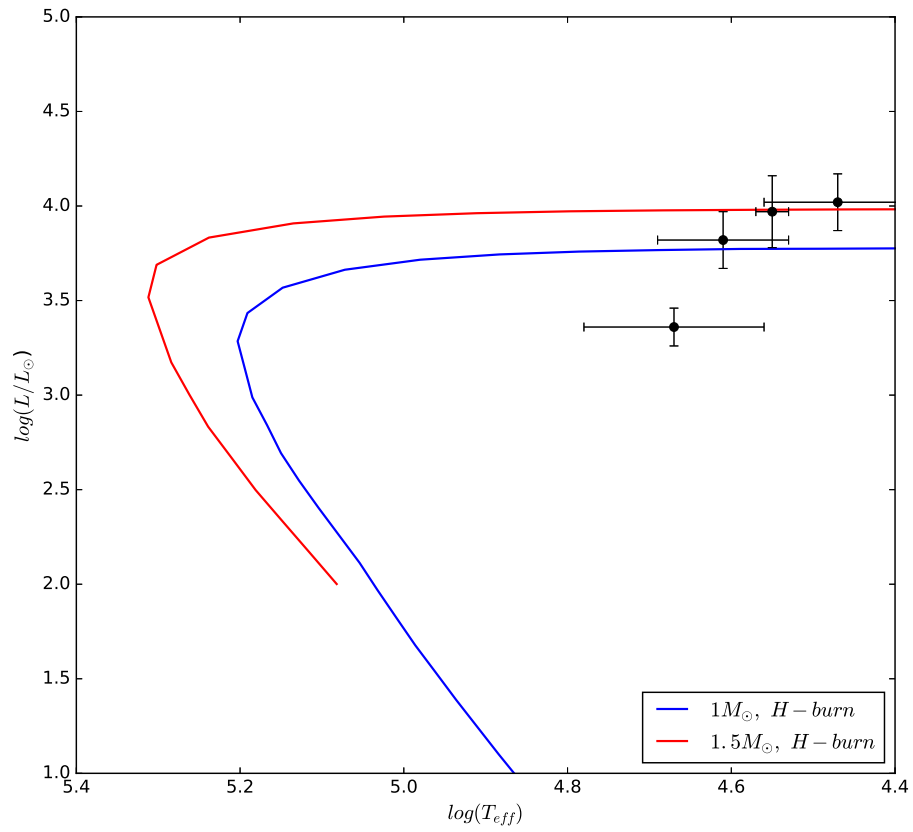


Figura A.1: Isócronas de V&W sobrepostas ao diagrama H-R das estrelas centrais de nebulosas planetárias da Galáxia com metalicidade $Z = 0.001$

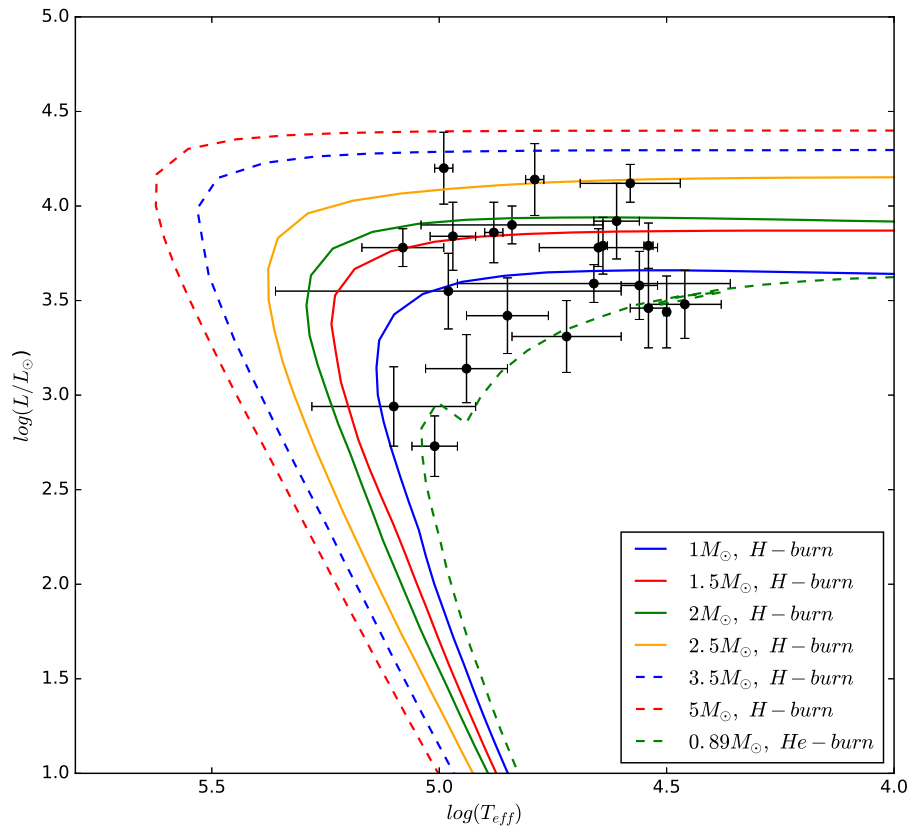


Figura A.2: Isócronas de V&W sobrepostas ao diagrama H-R das estrelas centrais de nebulosas planetárias da Galáxia com metalicidade $Z = 0.004$

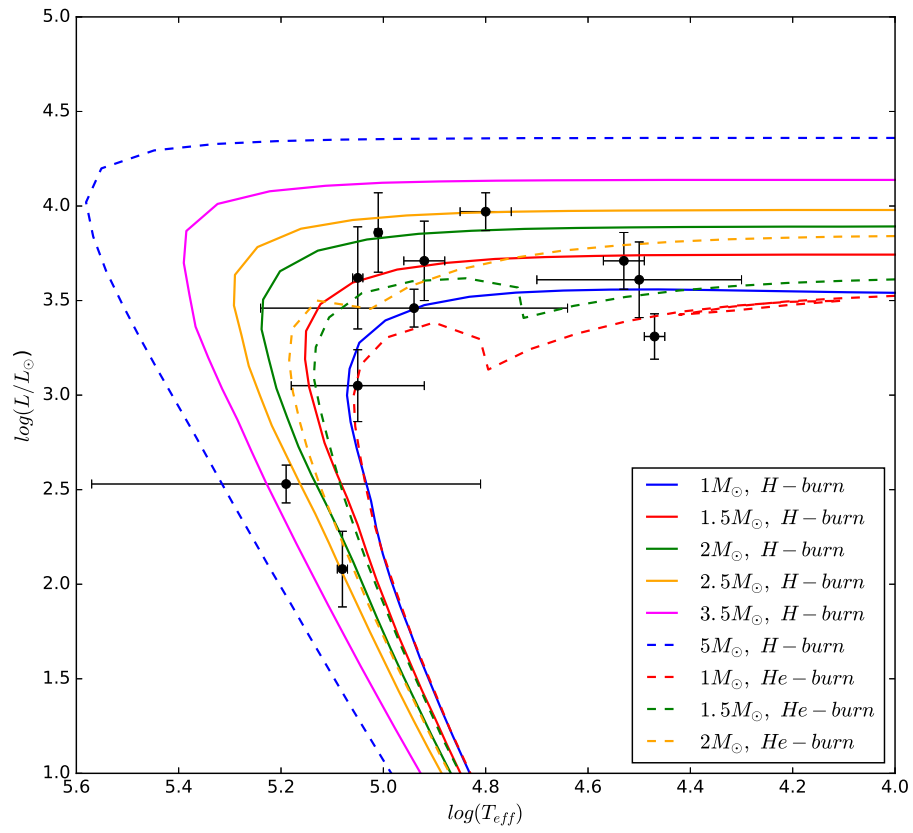


Figura A.3: Isócronas de V&W sobrepostas ao diagrama H-R das estrelas centrais de nebulosas planetárias da Galáxia com metalicidade $Z = 0.016$

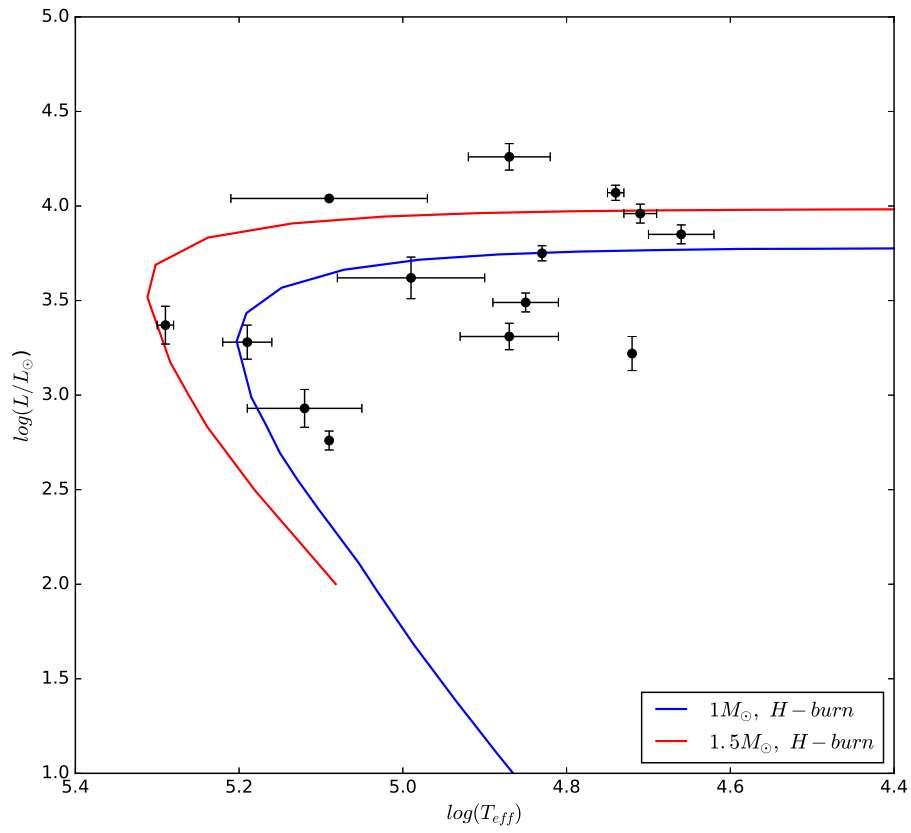


Figura A.4: Isócronas de V&W sobrepostas ao diagrama H-R das estrelas centrais de nebulosas planetárias das Nuvens de Magalhães com metalicidade $Z = 0.001$

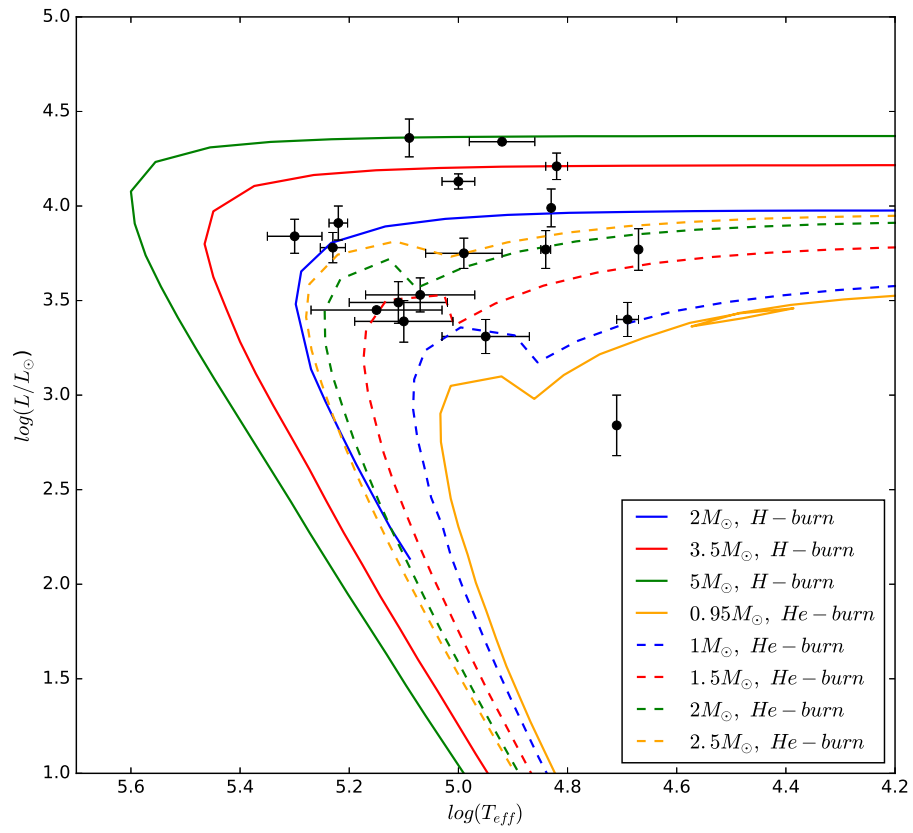


Figura A.5: Isócronas de V&W sobrepostas ao diagrama H-R das estrelas centrais de nebulosas planetárias das Nuvens de Magalhães com metalicidade $Z = 0.008$

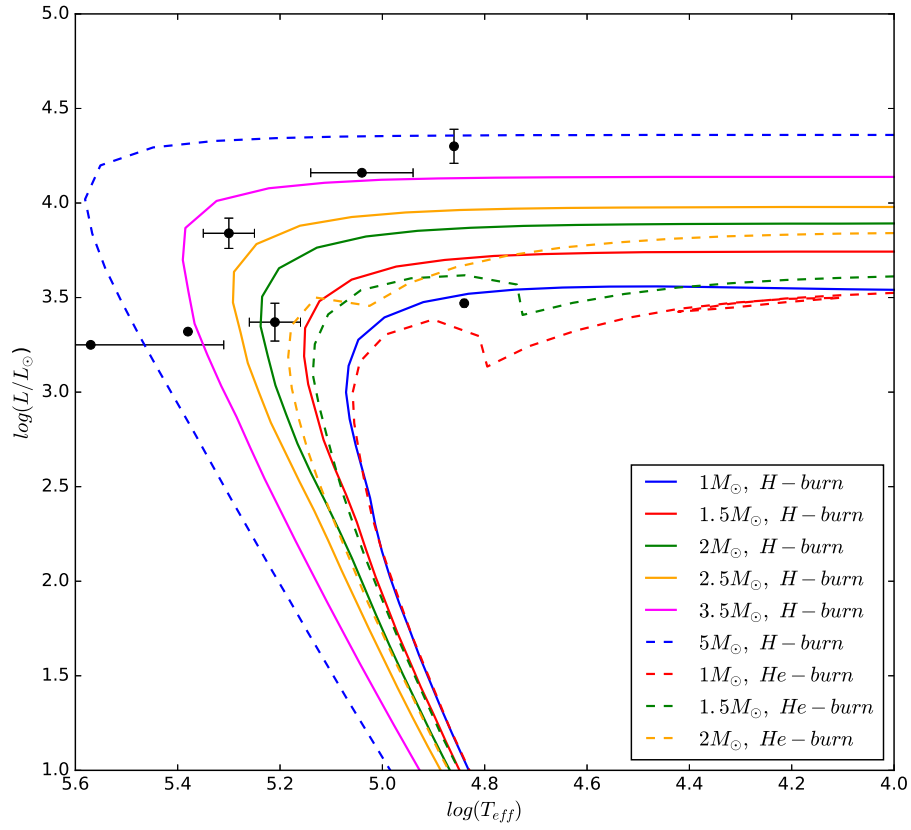


Figura A.6: Isócronas de V&W sobrepostas ao diagrama H-R das estrelas centrais de nebulosas planetárias das Nuvens de Magalhães com metalicidade $Z = 0.016$

Apêndice B

Perfil de evolução química para a Galáxia em comparação com as Nuvens de Magalhães

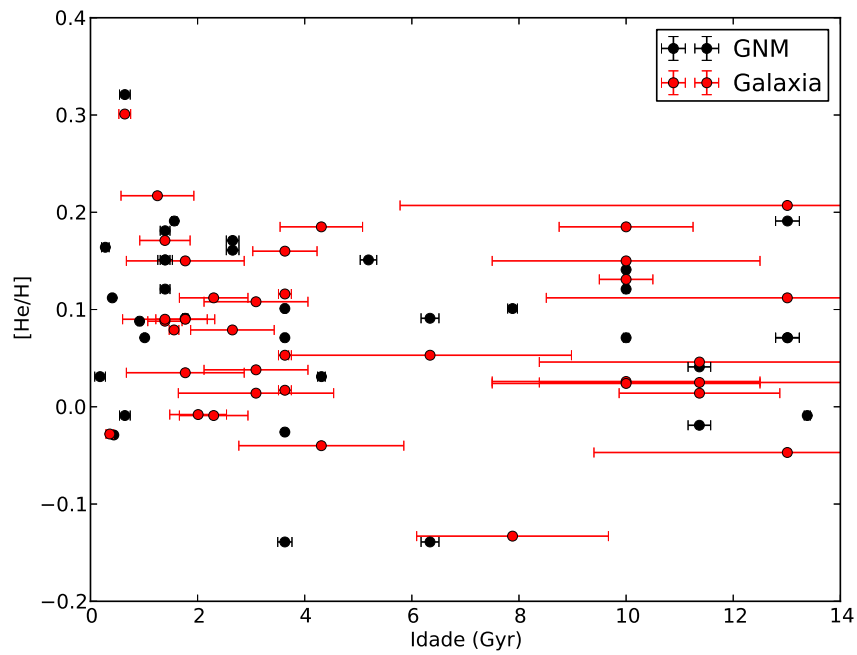


Figura B.1: Comparação entre o perfil de evolução da abundância do hélio para a Galáxia e para a Grande Nuvem de Magalhães

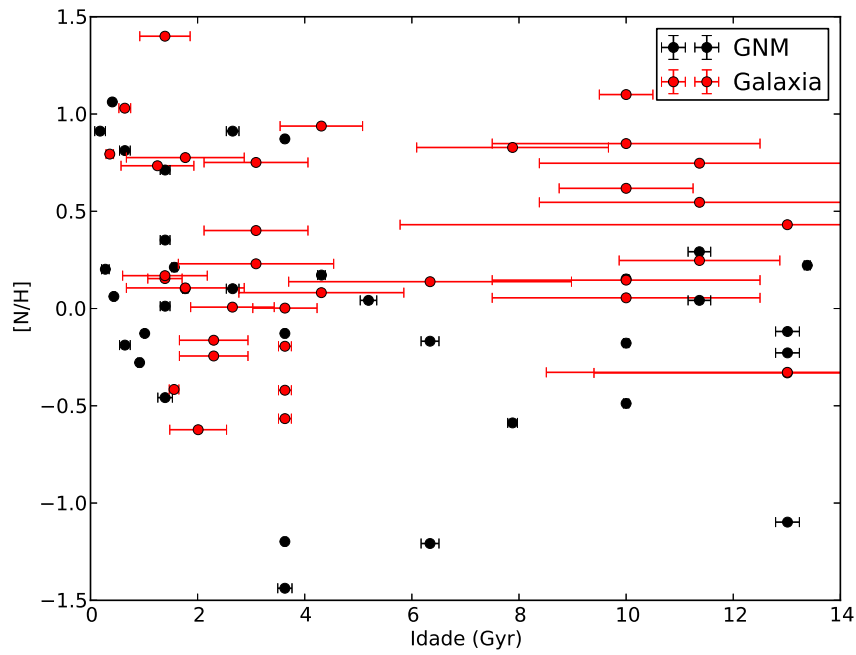


Figura B.2: Comparação entre o perfil de evolução da abundância do nitrogênio para a Galáxia e para a Grande Nuvem de Magalhães

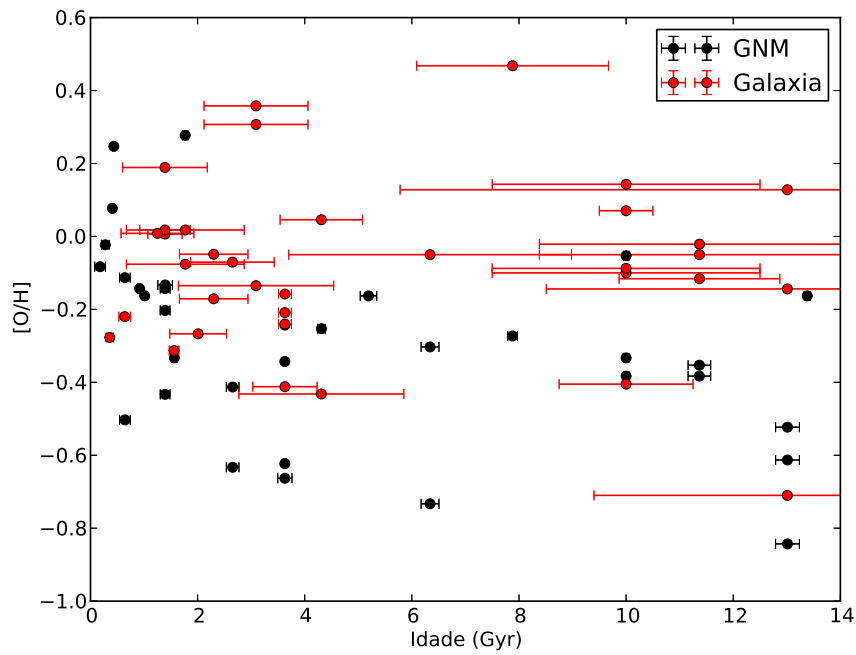


Figura B.3: Comparação entre o perfil de evolução da abundância do oxigênio para a Galáxia e para a Grande Nuvem de Magalhães

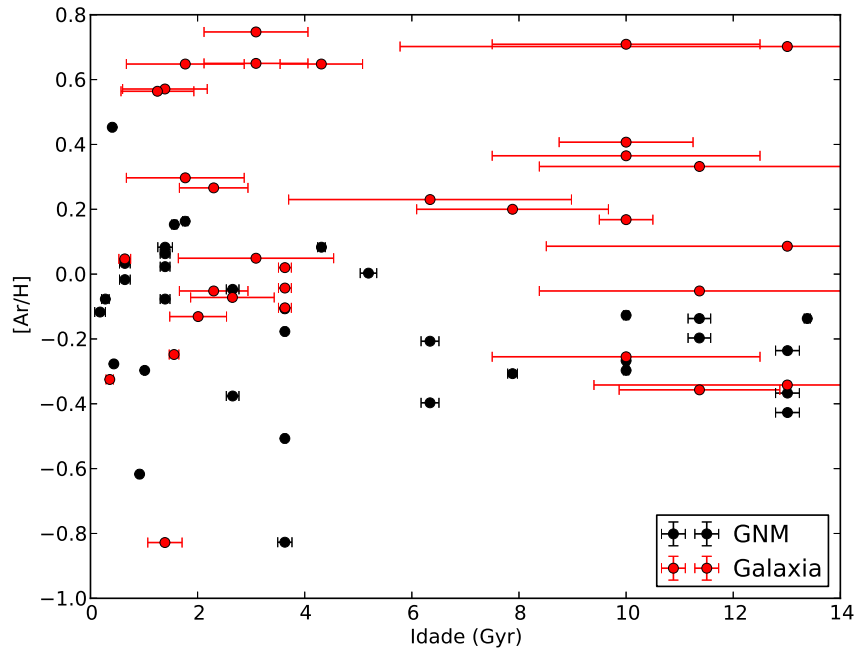


Figura B.4: Comparação entre o perfil de evolução da abundância do argônio para a Galáxia e para a Grande Nuvem de Magalhães

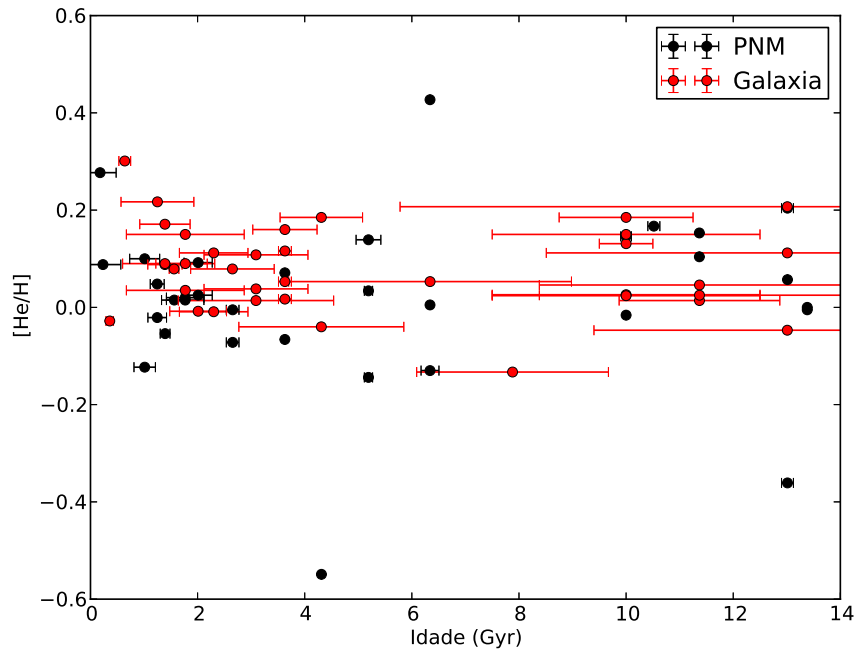


Figura B.5: Comparação entre o perfil de evolução da abundância do hélio para a Galáxia e para a Pequena Nuvem de Magalhães

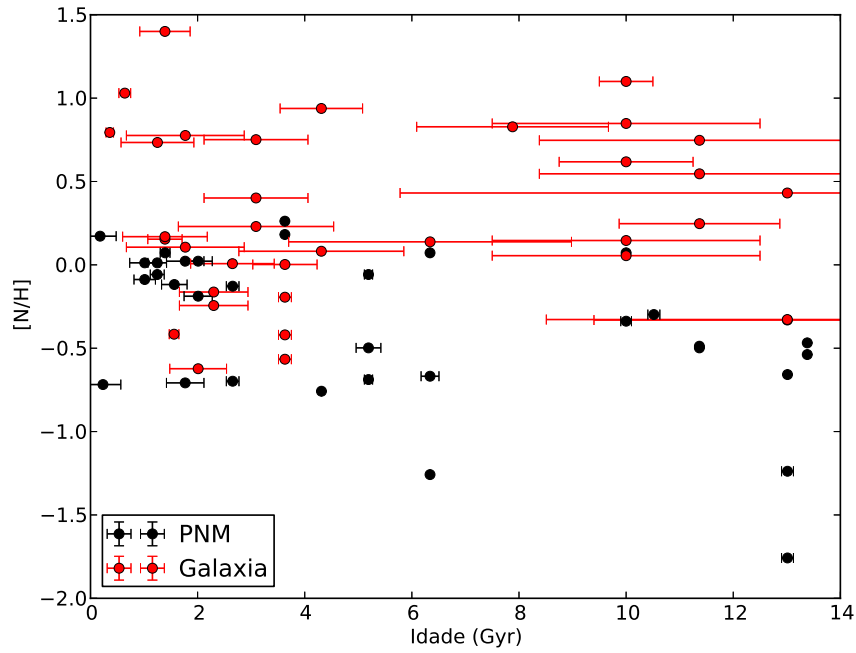


Figura B.6: Comparação entre o perfil de evolução da abundância do nitrogênio para a Galáxia e para a Pequena Nuvem de Magalhães

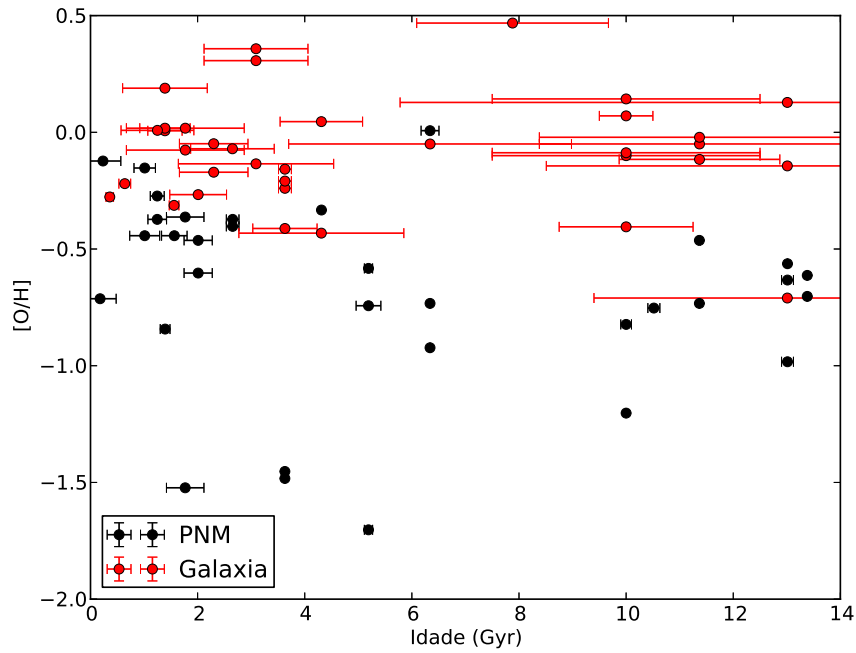


Figura B.7: Comparação entre o perfil de evolução da abundância do oxigênio para a Galáxia e para a Pequena Nuvem de Magalhães

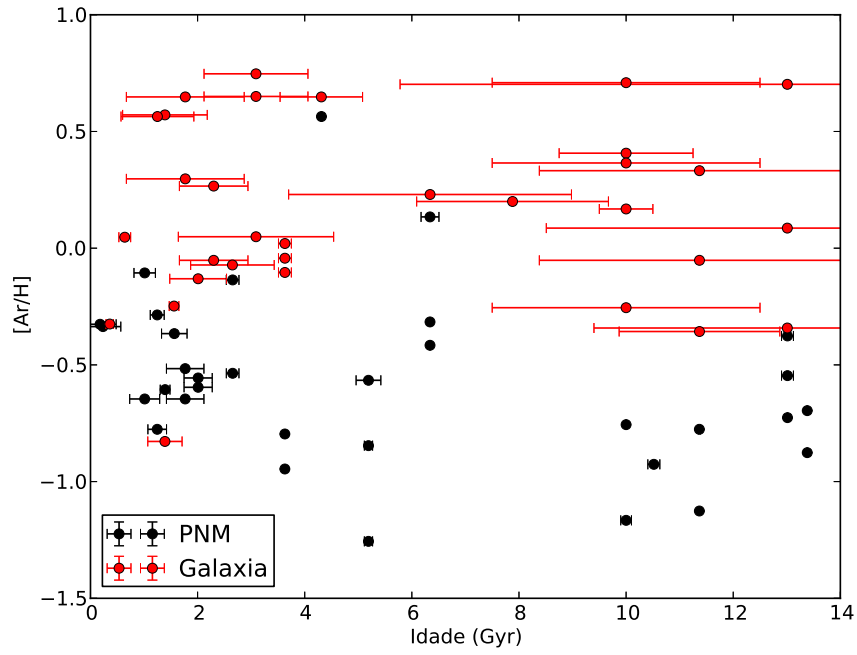


Figura B.8: Comparação entre o perfil de evolução da abundância do argônio para a Galáxia e para a Pequena Nuvem de Magalhães

Apêndice C

Perfil de evolução química para a Galáxia em comparação com as Nuvens de Magalhães, divididas pela classificação de Peimbert

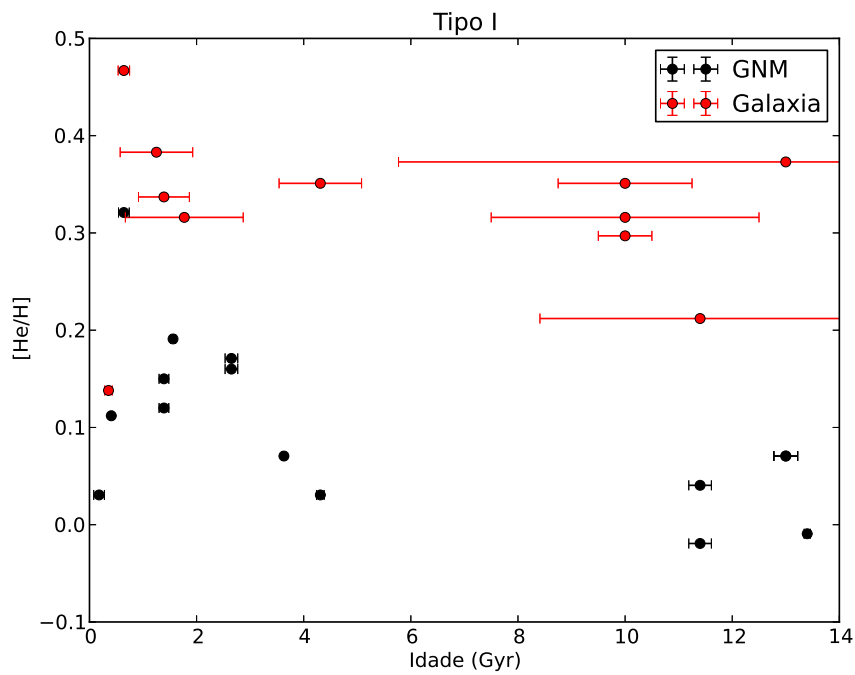


Figura C.1: Comparação entre o perfil de evolução da abundância do hélio em nebulosas tipo I para a Galáxia e para a Grande Nuvem de Magalhães

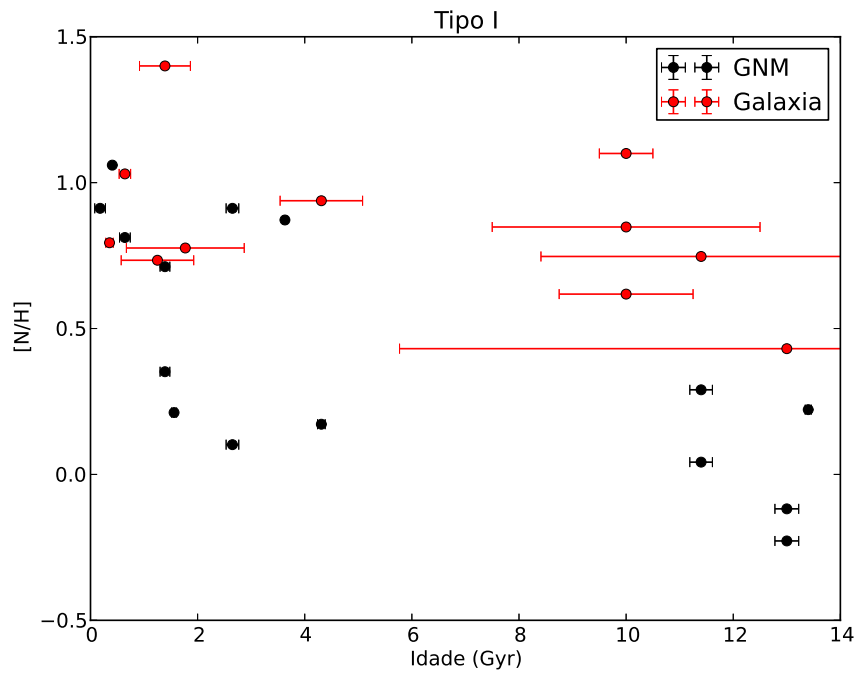


Figura C.2: Comparação entre o perfil de evolução da abundância do nitrogênio em nebulosas tipo I para a Galáxia e para a Grande Nuvem de Magalhães

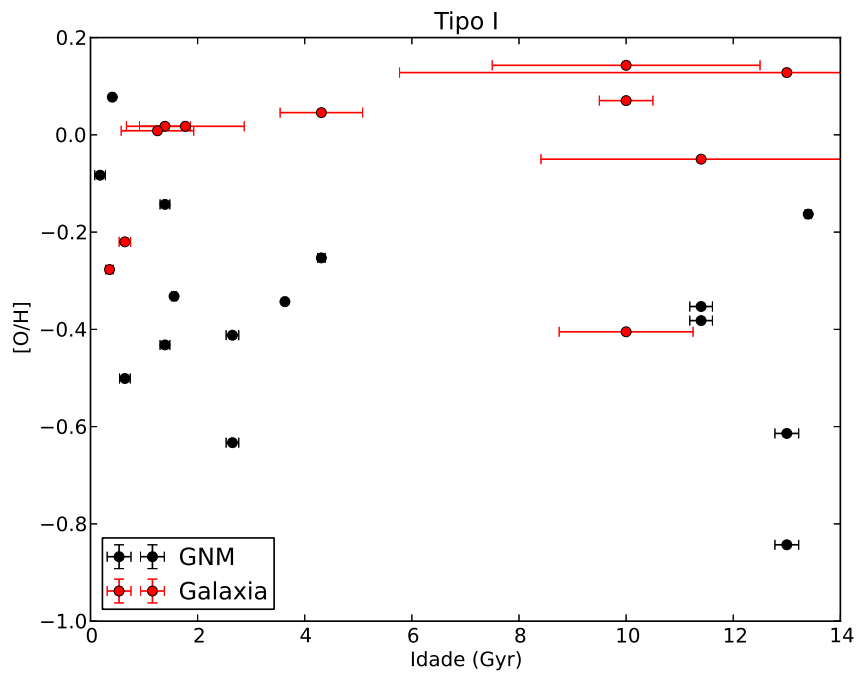


Figura C.3: Comparação entre o perfil de evolução da abundância do oxigênio em nebulosas tipo I para a Galáxia e para a Grande Nuvem de Magalhães

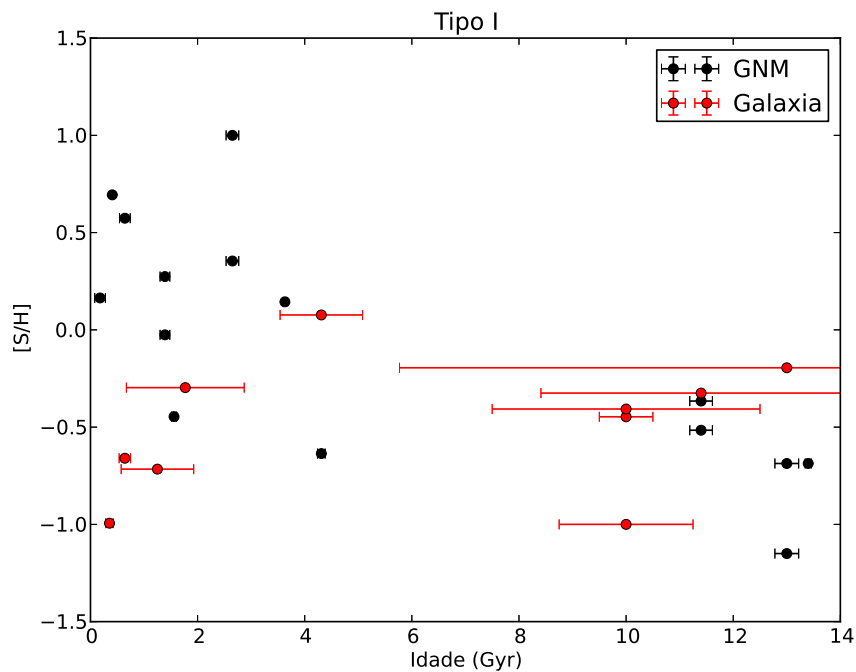


Figura C.4: Comparação entre o perfil de evolução da abundância do enxofre em nebulosas tipo I para a Galáxia e para a Grande Nuvem de Magalhães

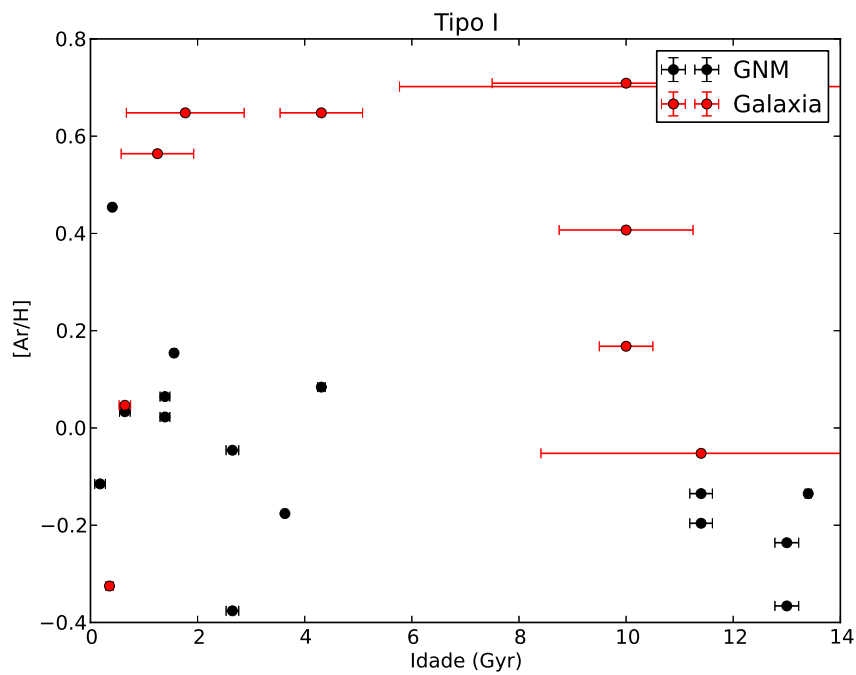


Figura C.5: Comparação entre o perfil de evolução da abundância do argônio em nebulosas tipo I para a Galáxia e para a Grande Nuvem de Magalhães

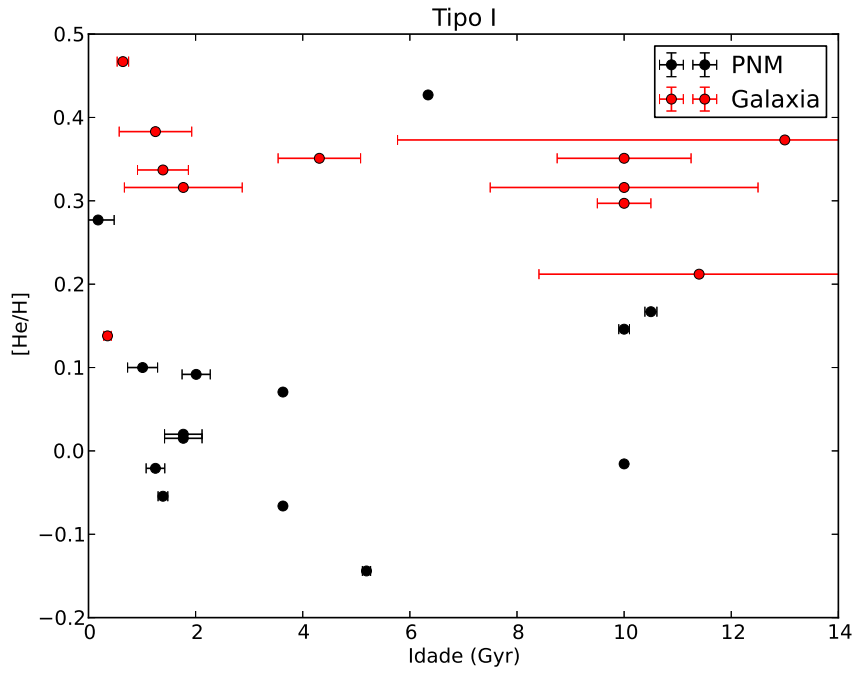


Figura C.6: Comparação entre o perfil de evolução da abundância do hélio em nebulosas tipo I para a Galáxia e para a Pequena Nuvem de Magalhães

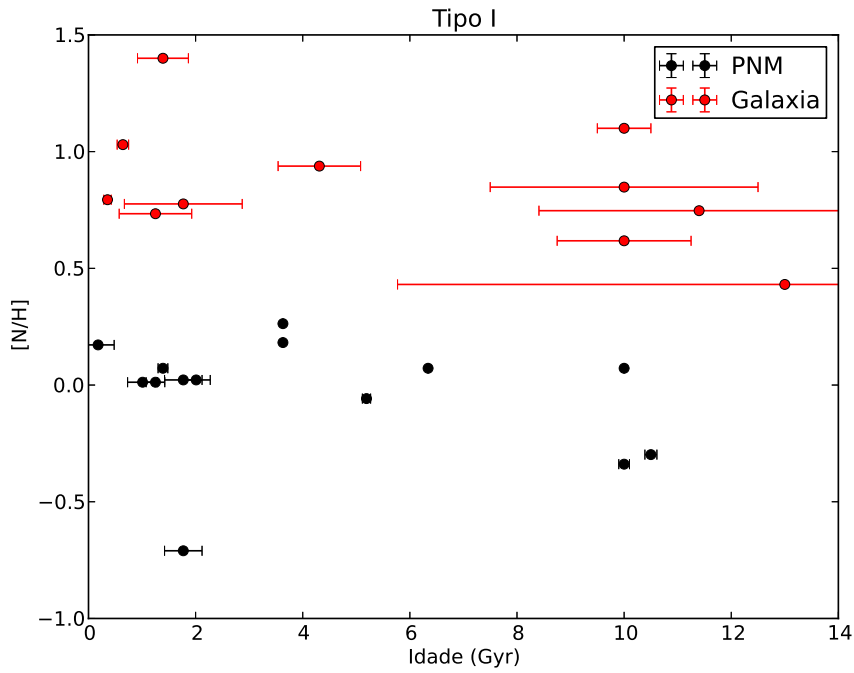


Figura C.7: Comparação entre o perfil de evolução da abundância do nitrogênio em nebulosas tipo I para a Galáxia e para a Pequena Nuvem de Magalhães

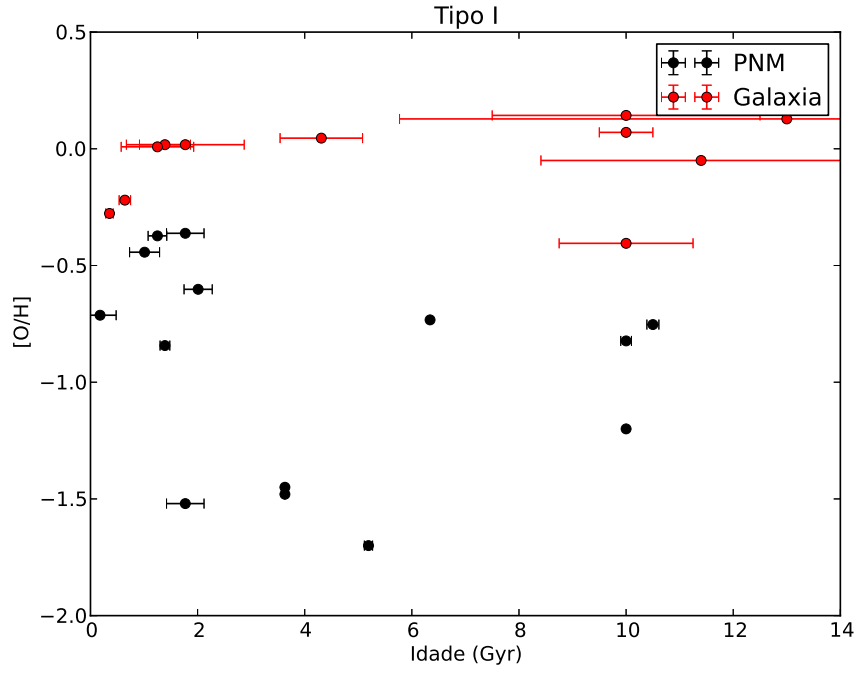


Figura C.8: Comparação entre o perfil de evolução da abundância do oxigênio em nebulosas tipo I para a Galáxia e para a Pequena Nuvem de Magalhães

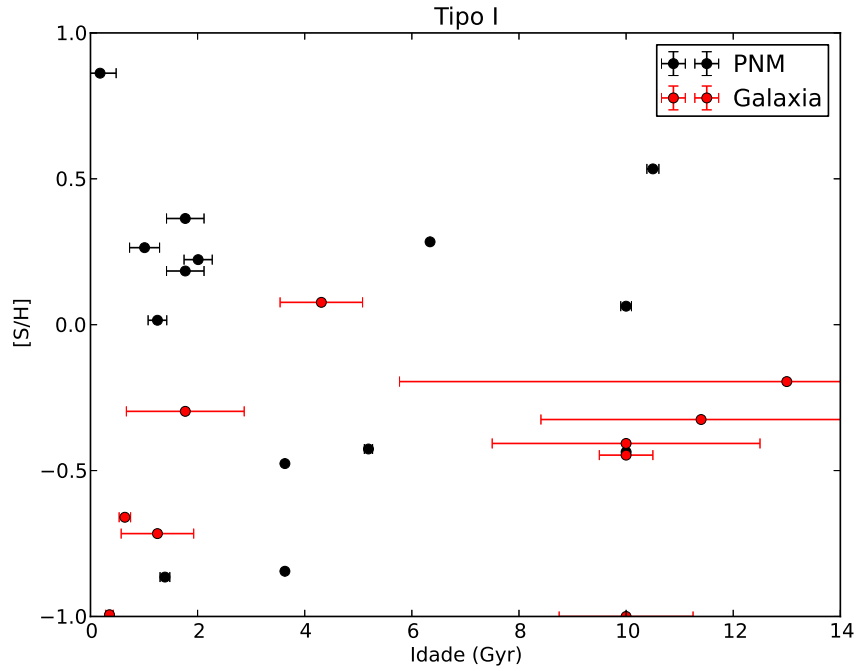


Figura C.9: Comparação entre o perfil de evolução da abundância do enxofre em nebulosas tipo I para a Galáxia e para a Pequena Nuvem de Magalhães

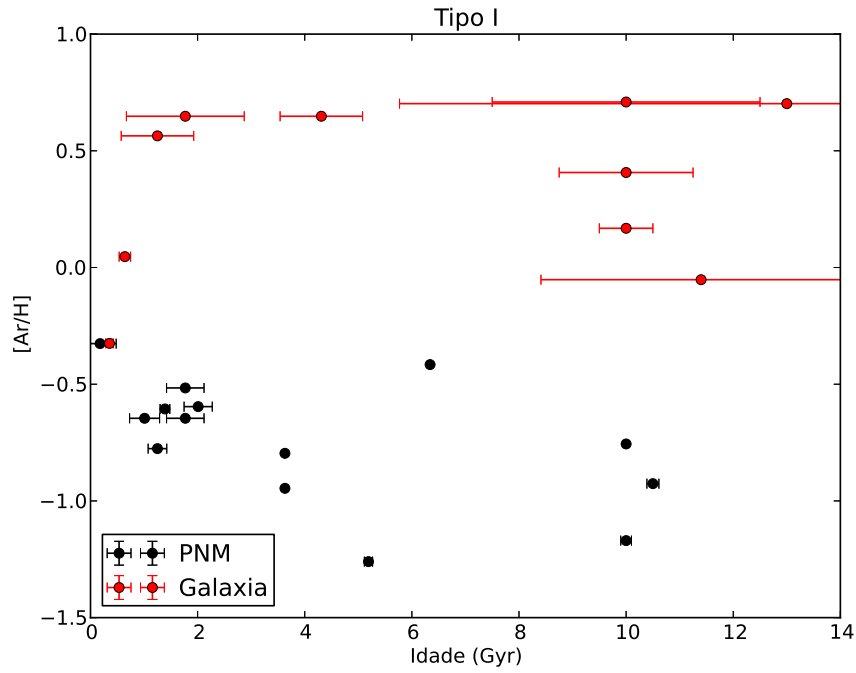


Figura C.10: Comparação entre o perfil de evolução da abundância do argônio em nebulosas tipo I para a Galáxia e para a Pequena Nuvem de Magalhães

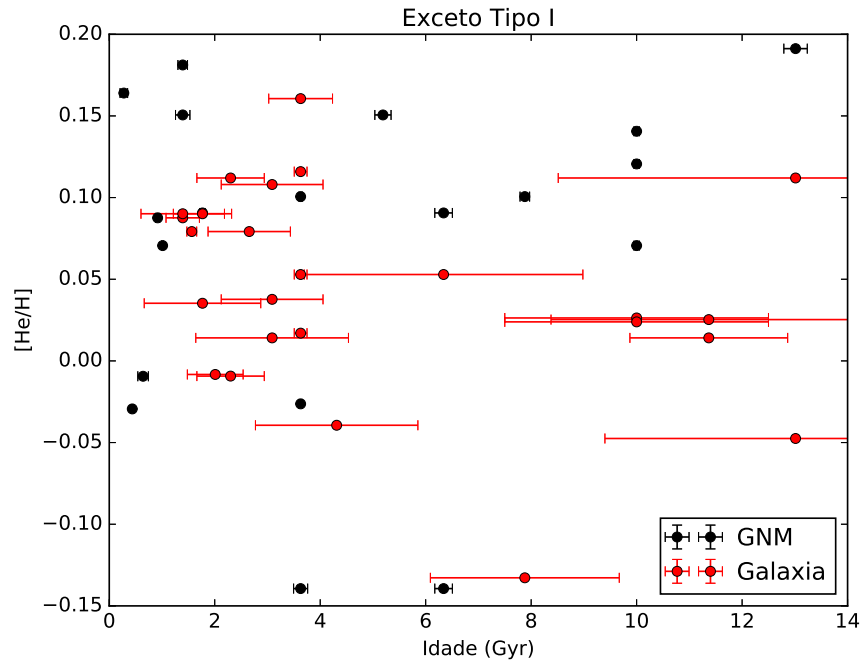


Figura C.11: Comparação entre o perfil de evolução da abundância do hélio em nebulosas não-tipo I para a Galáxia e para a Grande Nuvem de Magalhães

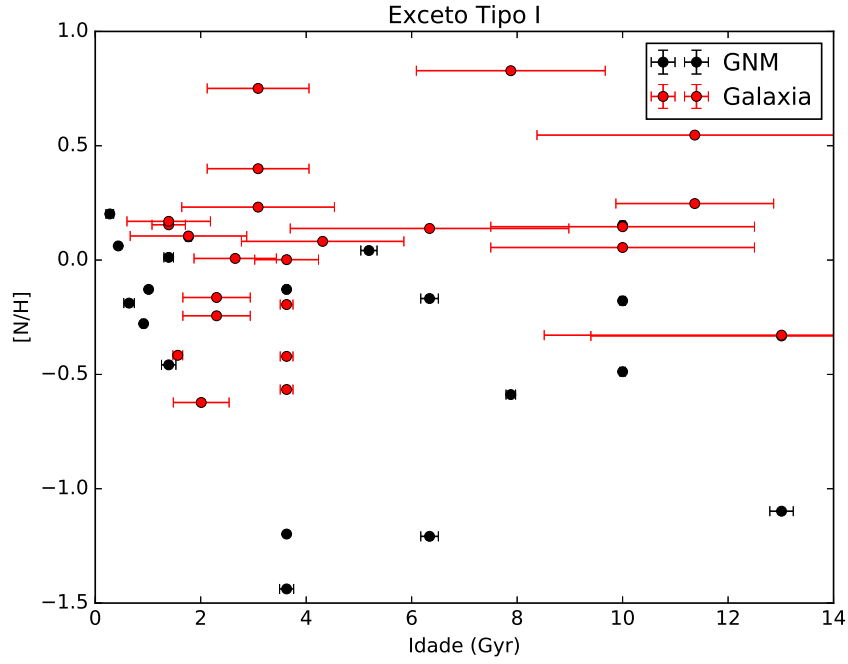


Figura C.12: Comparação entre o perfil de evolução da abundância do nitrogênio em nebulosas não-tipo I para a Galáxia e para a Grande Nuvem de Magalhães

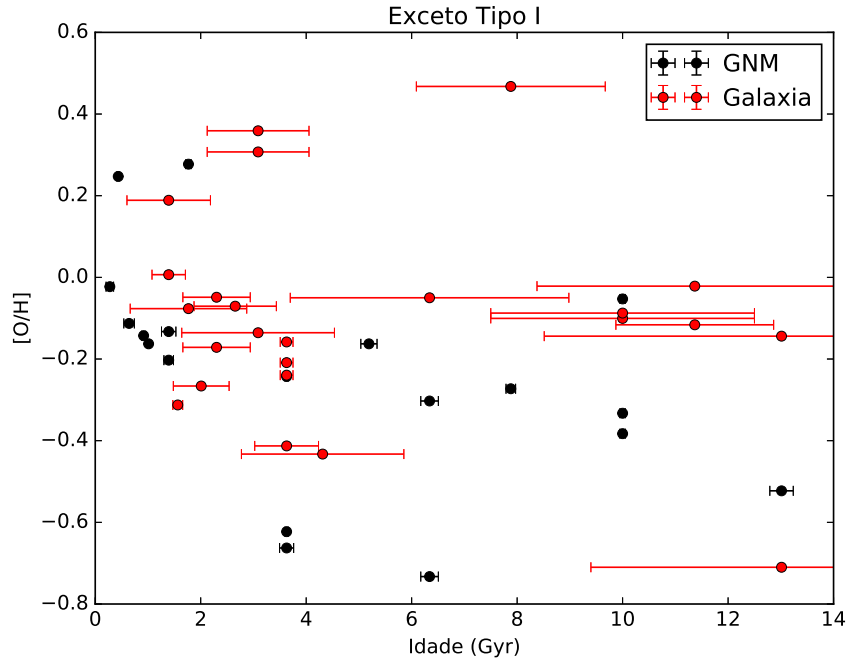


Figura C.13: Comparação entre o perfil de evolução da abundância do oxigênio em nebulosas não-tipo I para a Galáxia e para a Grande Nuvem de Magalhães

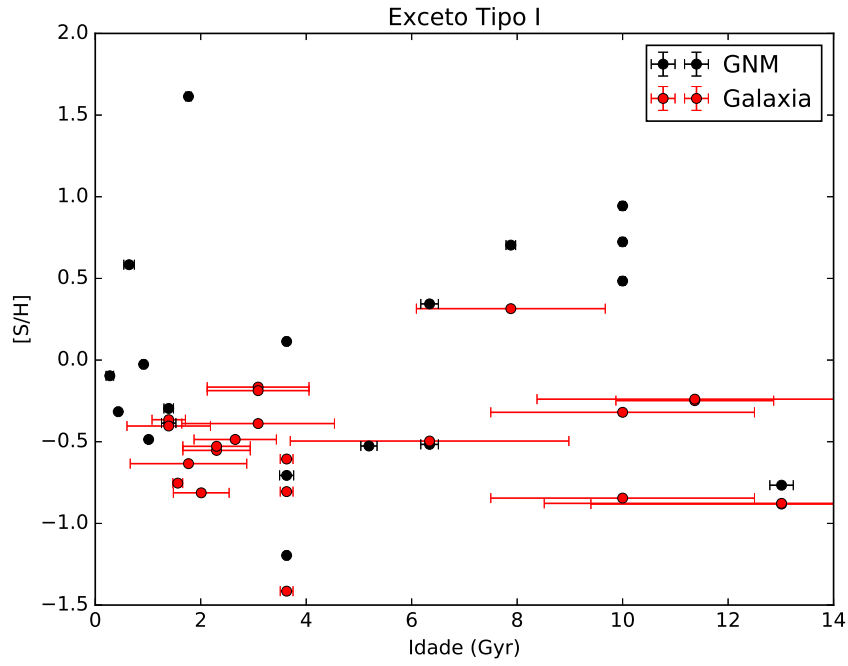


Figura C.14: Comparação entre o perfil de evolução da abundância do enxofre em nebulosas não-tipo I para a Galáxia e para a Grande Nuvem de Magalhães

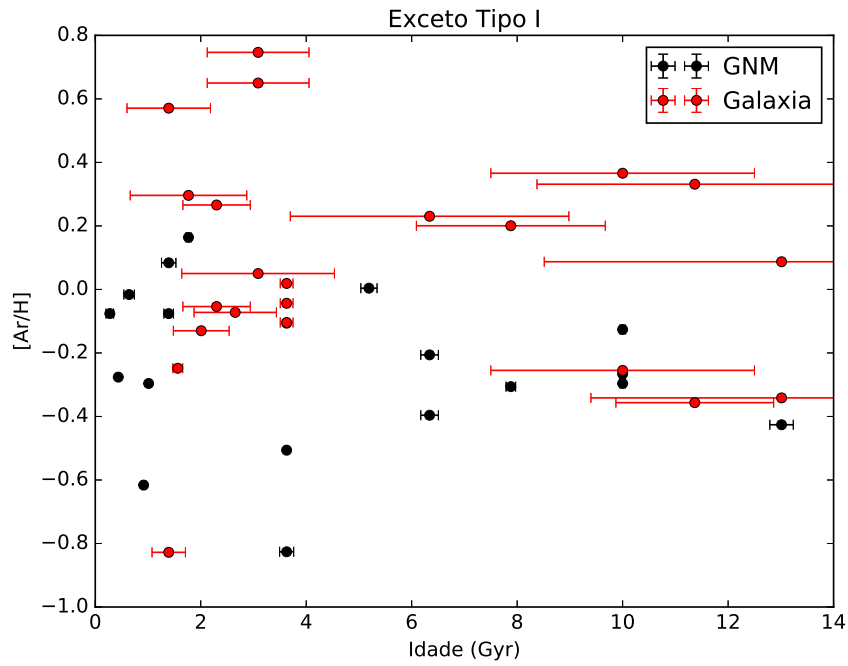


Figura C.15: Comparação entre o perfil de evolução da abundância do argônio em nebulosas não-tipo I para a Galáxia e para a Grande Nuvem de Magalhães

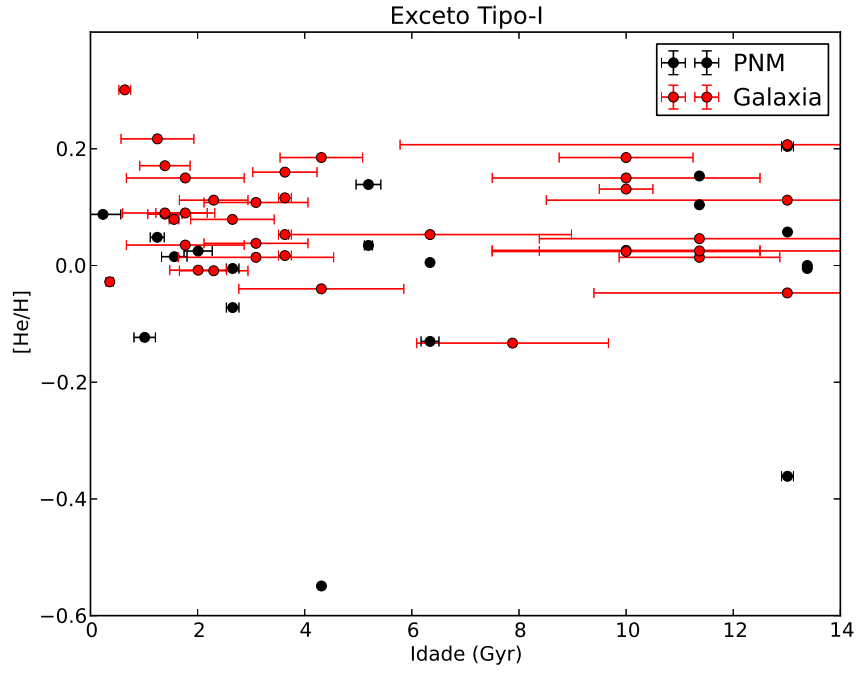


Figura C.16: Comparação entre o perfil de evolução da abundância do hélio em nebulosas não-tipo I para a Galáxia e para a Pequena Nuvem de Magalhães

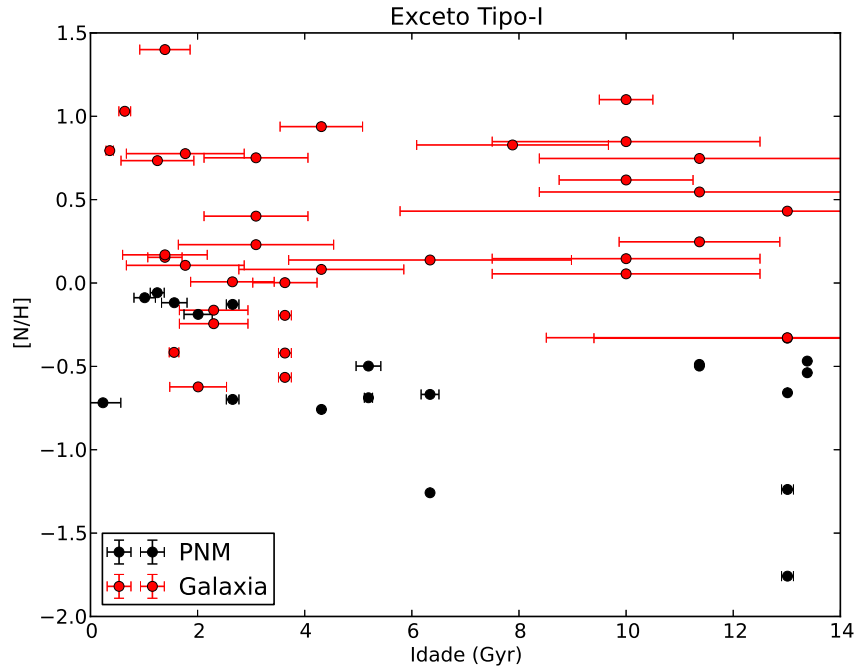


Figura C.17: Comparação entre o perfil de evolução da abundância do nitrogênio em nebulosas não-tipo I para a Galáxia e para a Pequena Nuvem de Magalhães

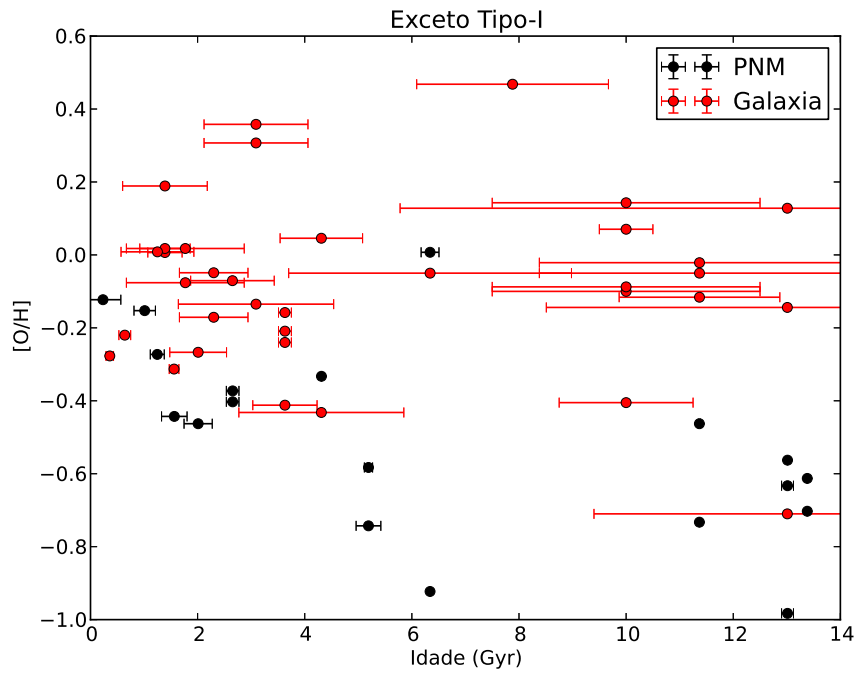


Figura C.18: Comparação entre o perfil de evolução da abundância do oxigênio em nebulosas não-tipo I para a Galáxia e para a Pequena Nuvem de Magalhães

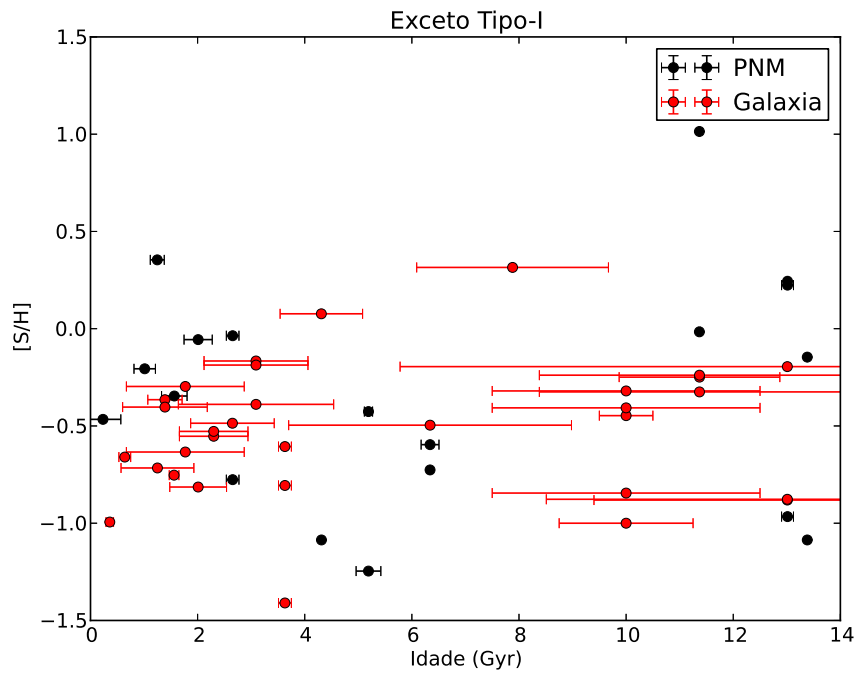


Figura C.19: Comparação entre o perfil de evolução da abundância do enxofre em nebulosas não-tipo I para a Galáxia e para a Pequena Nuvem de Magalhães

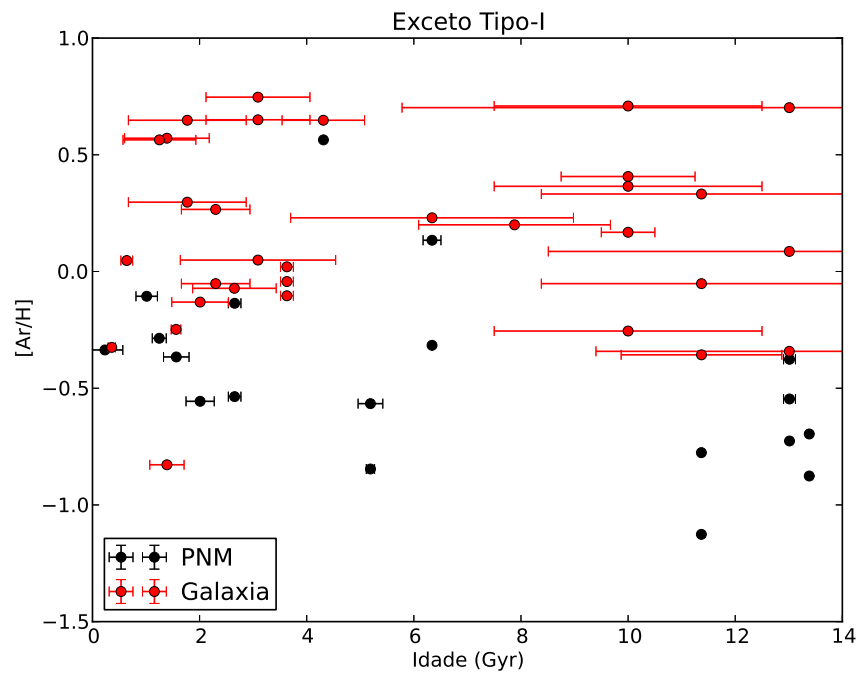


Figura C.20: Comparação entre o perfil de evolução da abundância do argônio em nebulosas não-tipo I para a Galáxia e para a Pequena Nuvem de Magalhães

Apêndice D

Gradiente radial de abundância para o oxigênio

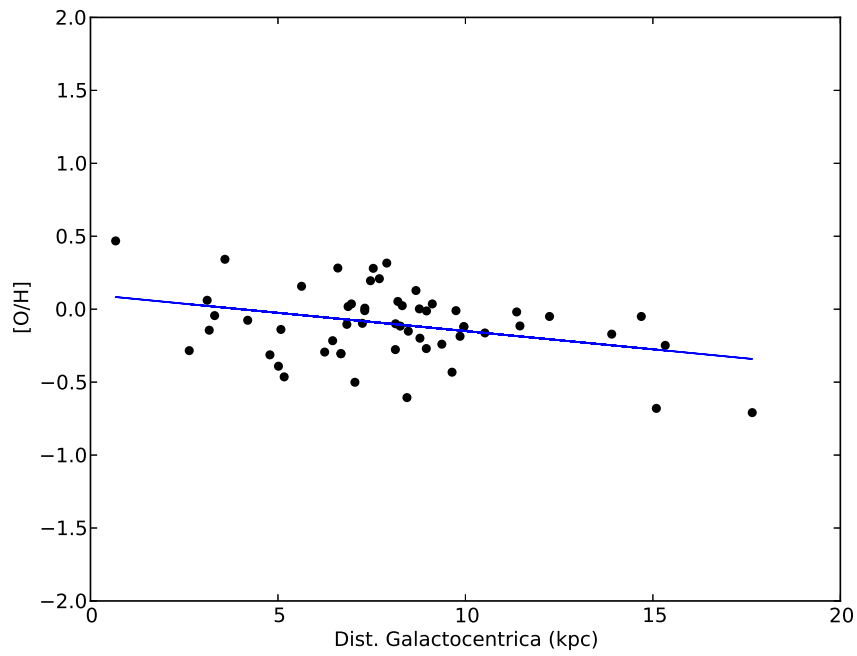


Figura D.1: Abundância do oxigênio em função do raio galactocêntrico