

**NEIVA MARES DE CARVALHO FERNANDES**

**Evolução química em estrelas de massa intermediária a partir da análise de abundâncias químicas em nebulosas planetárias.**

Iniciação à Pesquisa III e IV

Orientador: Prof. Dr. Walter J. Maciel

São Paulo  
(2014)

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Walter J. Maciel pela oportunidade de realizar este trabalho e pelo apoio recebido durante todo o tempo, fato que tem sido fundamental para o meu aprendizado.

## RESUMO

As nebulosas planetárias trazem grande informação sobre a evolução química de estrelas de massa intermediária.

Através de dados observacionais de nebulosas planetárias originadas por essas estrelas é possível conhecer a abundância química desses objetos. Alguns elementos tem sua abundância modificada pela síntese das estrelas progenitoras como o nitrogênio e hélio, porém estão também presentes elementos mais pesados como o oxigênio, neônio, enxofre e argônio. Estes foram formados por estrelas mais massivas e portanto são originários das nuvens interestelares que deram origem a essas estrelas de massa intermediária.

Os dados utilizados foram retirados de observações de nebulosas planetárias do bojo e disco da Galáxia, como também da Pequena Nuvem de Magalhães e Grande Nuvem de Magalhães a fim de obter correlações entre as abundâncias dessas diversas regiões. Neste trabalho é discutida a comparação dessas correlações e sua implicação na evolução química das galáxias e nucleossíntese de estrelas de massa intermediária, com base na abundância química das nebulosas planetárias.

Palavras-Chave: (Nebulosas Planetárias. Abundância química. Evolução química)

## **ABSTRACT**

Planetary nebulae carry a large amount of information on the chemical evolution of intermediate mass stars.

The analysis of the observational data obtained from the planetary nebulae originated by these stars shows the chemical abundances of these objects. Some elements have their abundances modified by the progenitor star's nucleosynthesis, such as nitrogen and helium. Although, heavier elements, such as oxygen, neon, sulphur and argon, can also be found in planetary nebulae. These elements were produced by more massive stars and could be found at the moment of formation of these intermediate mass stars.

In this project, the data was obtained by planetary nebulae located at the galactic bulge and galactic disc as well as planetary nebulae located at the Small and Large Magellanic Clouds, in the interest of obtaining correlations of abundances in different regions. Afterwards these correlations and its implications in the galactic chemical evolution and intermediate mass star's nucleosynthesis are discussed based on the chemical abundances of planetary nebulae.

Keywords: ( Planetary Nebulae, Chemical abundances, Chemical evolution).

# SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 NEUBULOSAS PLANETÁRIAS	2
3 RELAÇÃO DE ABUNDÂNCIA ENTRE OS ELEMENTOS	3
4 DADOS	4
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	5
5.1 <i>Abundância de Ne, S, Ar</i>	5
5.1.1 Resultados das abundâncias de Ne, S e Ar do bojo e disco	6
5.1.2 Resultados das abundâncias de Ne, S e Ar em SMC e LMC	9
5.1.3 Resultados das abundâncias de Ne, S e Ar para Via Láctea e Nuvem de Magalhães	12
5.2 <i>Abundância dos elementos produzidos pelas estrelas progenitoras</i>	15
5.2.1 Resultados das abundâncias de N e He do bojo e disco	16
5.2.2 Resultados das abundâncias de N e He em SMC e LMC	17
5.2.3 Resultados das abundâncias de N e He da Via Láctea e Nuvem de Magalhães	18
5.3 <i>Gráficos com ajuste</i>	19
6 CONCLUSÕES	21

## 1 INTRODUÇÃO

O estudo da abundância química é de fundamental importância para a compreensão da evolução de galáxias. O conhecimento de sua distribuição fornece dados importantes para a formulação de modelos mais precisos das estruturas internas desses sistemas, como o bojo e o disco, e de sua evolução como um todo. A comparação da abundância entre as galáxias contribui para a investigação de padrões mais gerais de comportamento desses objetos.

Uma grande fonte de informação para determinação da abundância é encontrada nas nebulosas planetárias (NPs). A observação de NPs fornece dados precisos dos elementos que as compõem.

Estudos similares foram desenvolvidos (MACIEL, COSTA e CAVICHIA ,2014; MACIEL, COSTA, IDIART, 2009). Nestas pesquisas, foram estudadas abundâncias de NPs e regiões de HII, como também a evolução química da Nuvem de Magalhães, estabelecendo comparações de resultados com modelos teóricos de abundancia . Há também a pesquisa de MACIEL, COSTA e IDIART(2010), em que foram estudados médias e distribuições de abundâncias, e suas correlações em NPs. Estas correlações foram comparadas com modelos teóricos de evolução química em estrelas de massa intermediária. Os resultados de ambos os trabalhos apresentaram concordância com as previsões teóricas de modelos utilizados.

## 2 NEBULOSAS PLANETÁRIAS

Nebulosas planetárias são objetos que ocorrem durante certa fase da evolução estelar situada entre o ramo assintótico das gigantes ( AGB ) e das anãs brancas. Estrelas com massa de 1 à 8 massas solares, ao sair da sequência principal, evoluem para gigantes vermelhas e em seguida para o ramo assintótico das gigantes. Durante essa fase ejetam todo o seu envoltório externo, permanecendo, na sua região central, apenas o núcleo da AGB que, numa fase final, irá se converter em anã branca. Esse envoltório externo de material ejetado pela estrela na fase AGB que é ionizado pela estrela central ainda quente, resulta nas NPs (KWOK, 2008).

As NPs apresentam fortes linhas espectrais de emissão de elementos como H, He, O, N, Ne, S, Ar e a análise dessas linhas fornecem precisas determinações de suas abundâncias. Conhecendo as abundâncias de elementos como O, S, Ne, Ar, que não são produzidos pelas estrelas progenitoras, e portanto já estavam presentes no meio interestelar no momento da formação dessas estrelas, podem ser feitas inferências sobre a evolução química de galáxias. Além disso, as abundâncias de He, N, e C, que foram produzidos pela estrela progenitora, trazem informações sobre a nucleossíntese das estrelas de massa intermediária.

Para este estudo é de particular importância estabelecer correlações entre a abundância dos elementos encontrados na NP.

### 3 RELAÇÃO DE ABUNDÂNCIA ENTRE OS ELEMENTOS

Uma relação linear de quantidade entre dois elementos pode ser dada como:

$$\frac{X}{Y} = \frac{\text{número de átomos de } X}{\text{número de átomos de } Y} \quad (1)$$

A equação (1) pode também ser escrita como:

$$\mathcal{E}(X) = \log (X/H) + 12 \quad (2)$$

na qual  $\mathcal{E}(X)$  define-se como abundância de um elemento X em relação à quantidade de hidrogênio. Assim, usando a equação (2) para o oxigênio:

$$\mathcal{E}(O) = \log (O/H) + 12 \quad (3)$$

e usando a equação (3), obtem-se:

$$\mathcal{E}(X) - \mathcal{E}(O) = \log (X/H) - \log (O/H) = \log (X/O) \quad (4)$$

que fornece a abundância de um elemento X em relação ao oxigênio.

A relação de abundância do oxigênio é bastante importante pois o oxigênio funciona como um indicador de metalicidade.

Essas relações foram utilizadas para tratar os dados observacionais extraídos das NPs estudadas, a fim de pesquisar correlações entre as abundâncias dos elementos encontrados nas diferentes regiões estudadas.



## 4 DADOS

Os estudos foram baseados em duas fontes de dados observacionais para determinação da correlação entre as abundâncias. Uma delas foi retirada do conjunto de dados de nebulosas fotoionizadas do próprio IAG, obtidas com o telescópio de 1,60 metros do LNA (Laboratório Nacional de Astrofísica) e com o telescópio de 2,20 metros do ESO (European Southern Observatory). Esses dados foram complementados com os da literatura que foram obtidos com o mesmo método dos anteriores e suas quantidades estão exibidas na Tabela 1 (CAVICHIA, COSTA, MACIEL, 2010; MACIEL, RODRIGUES, COSTA, 2011; MACIEL, COSTA, 2014).

As NPs estudadas estão localizadas na região do bojo e do disco da Via Láctea (MW), da Grande Nuvem de Magalhães (LMC) e da Pequena Nuvem de Magalhães (SMC).

**Tabela 1** – Amostra de dados de cada região

	<b>Bojo</b>	<b>Disco</b>	<b>SMC</b>	<b>LMC</b>
<b>Dados</b>	148	200	129	251

Utilizando esses dados e obtendo relações de abundâncias entre os elementos, foram plotados gráficos que possibilitam a avaliação das correlação entre as abundâncias.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Abundância de Ne, S, Ar

O neônio, enxofre e argônio são elementos que provavelmente não foram produzidos pelas estrelas progenitoras da NP. A variação das relações de Ne/H, S/H e Ar/H quando plotadas com o O/H apresentam uma boa correlação para o bojo e o disco da Via Láctea (figura 1a, figura 2a e figura 3a) ocorrendo apenas alguma dispersão no Ar/H, porém ainda revelando uma correlação positiva. Esse fato é confirmado nos gráficos de Ne/O, S/O e Ar/O quando plotados em função com o O/H (figura 1b, figura 2b e figura 3b), onde se observa uma relação praticamente constante.

Os gráficos mostram um padrão similar entre as metalicidades do bojo e disco da Via Láctea.

Para as Nuvens de Magalhães, a melhor correlação foi obtida no gráfico que relaciona Ne/H com O/H (figura 4<sup>a</sup>). No caso do enxofre observou-se uma dispersão bastante acentuada (figura 5a).

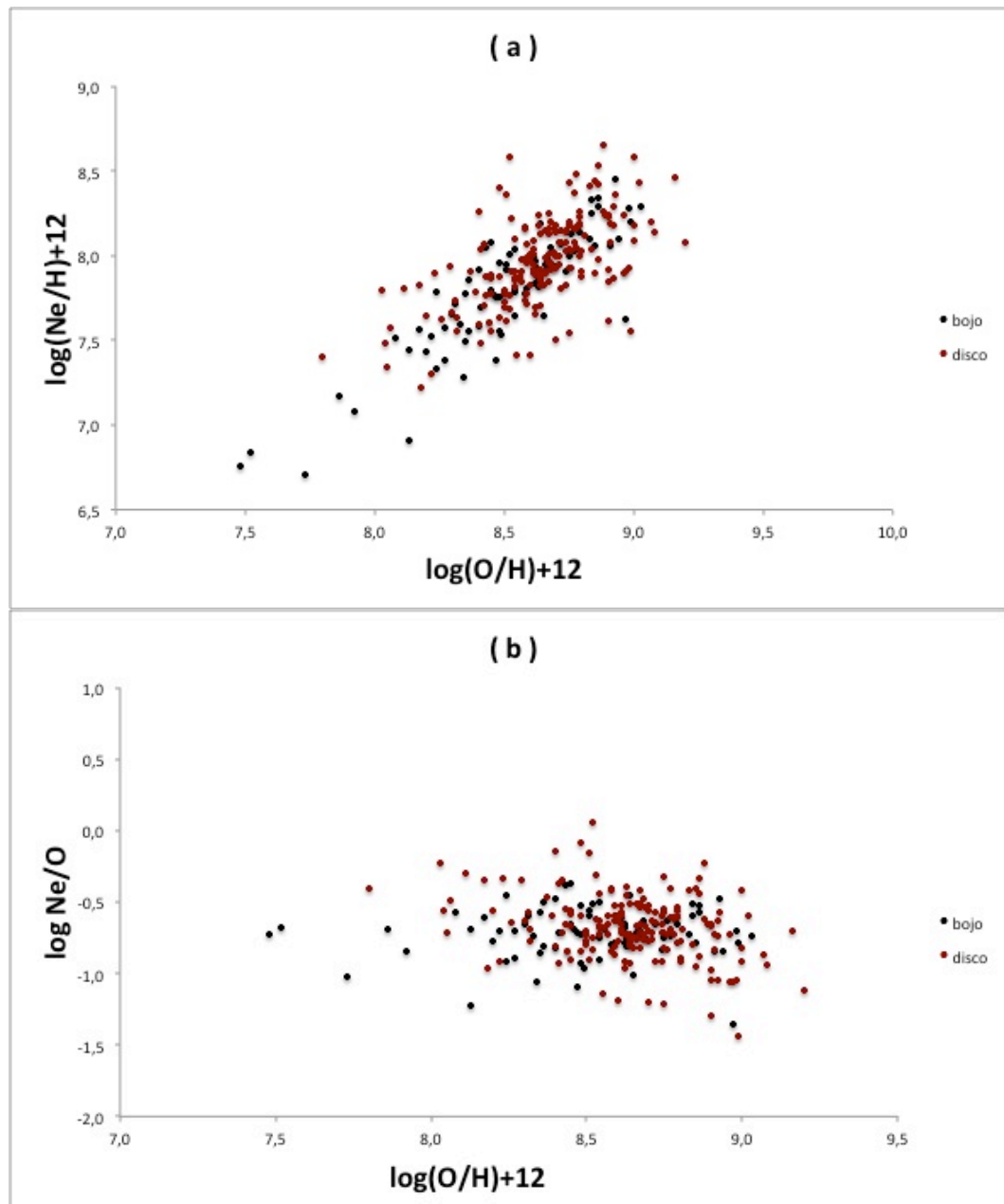
Na relação de Ar/H também houve um pouco de dispersão dos dados, porém menos intensa do que para o S/H, tornando possível observar uma tendência na sua correlação. Essa dispersão provavelmente foi causada por incertezas devido às linhas de emissão do argônio serem mais fracas se comparadas aos outros elementos. Esse fato, no caso da Via Láctea, foi atenuado por sua maior proximidade.

Em todos os resultados que relacionam SMC e LMC mostram claramente que LMC é mais rica em metalicidade do que SMC.

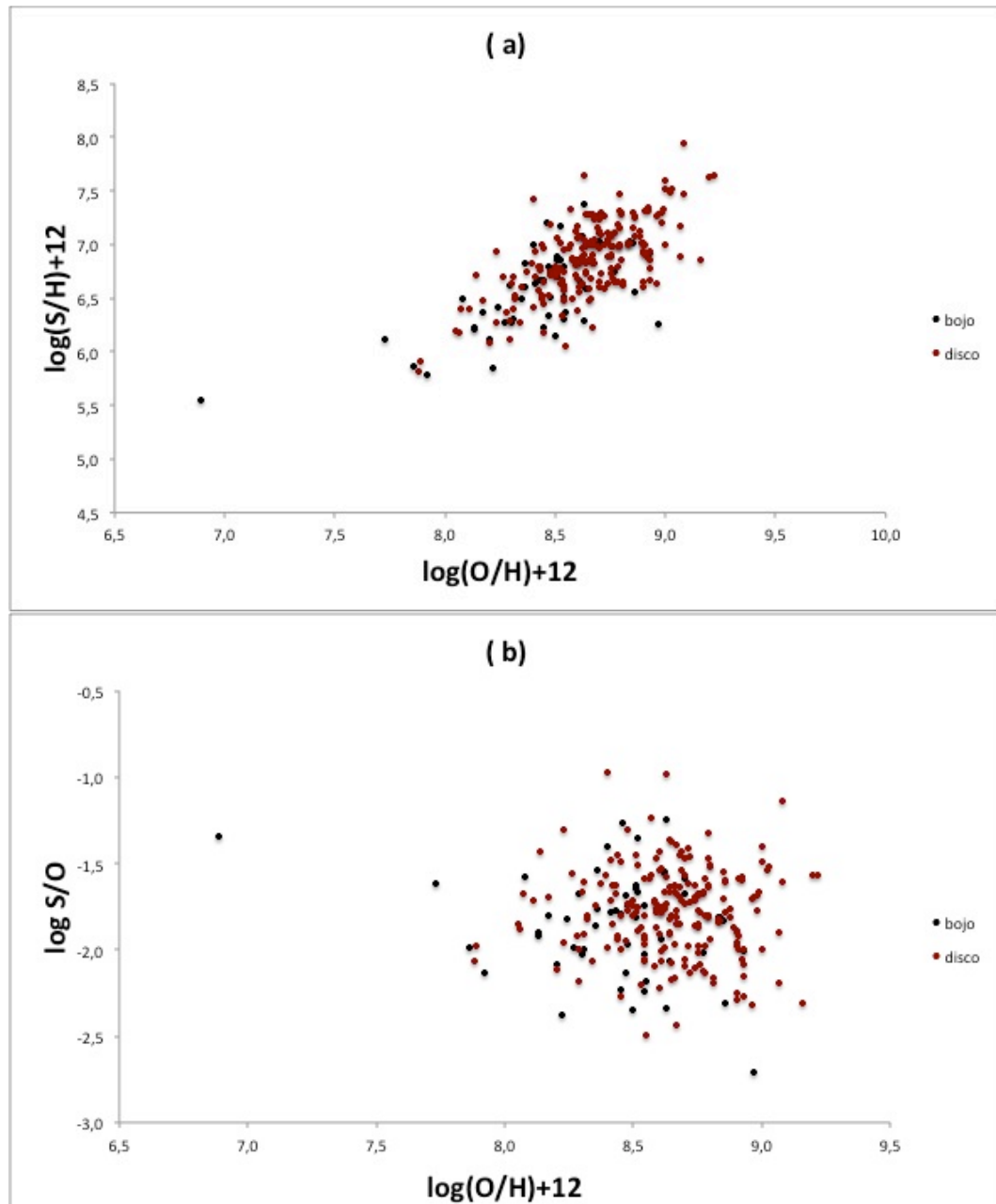
Os resultados que relacionam os dados da Via Láctea e da Nuvem de Magalhães mostram novamente uma dispersão do enxofre, embora seja possível perceber uma tendência.

Nesses resultados fica evidente que a Via Láctea tem uma maior abundância em metalicidade do que a Nuvem de Magalhães

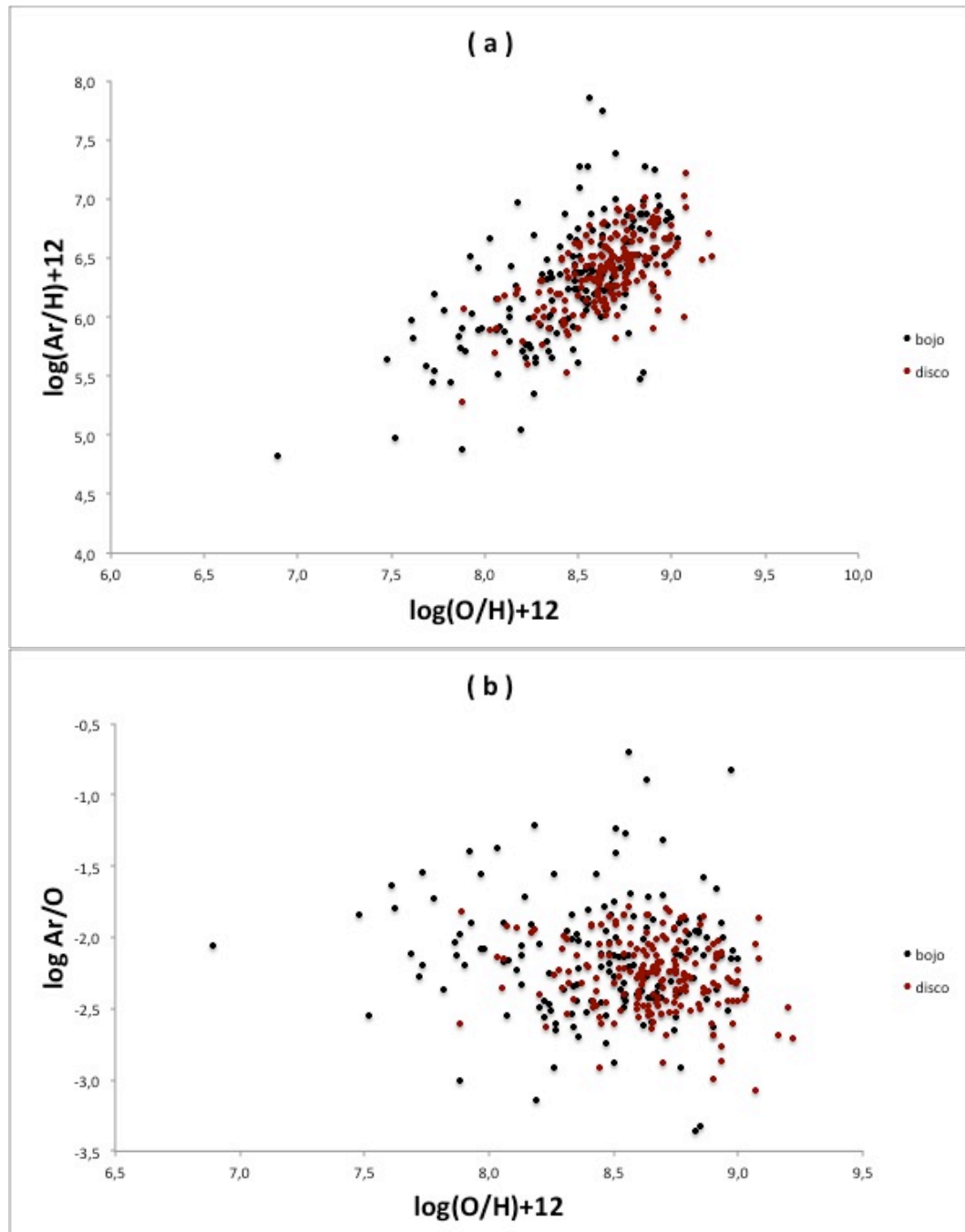
### 5.1.1 Resultados das abundâncias de Ne, S e Ar nas NPs das regiões do bojo e disco da Via Láctea.



**Figura 1** – Abundância química do Ne nas NPs das regiões do bojo (pontos pretos) e disco (pontos vermelhos) das NPs da Via Láctea. A relação de Ne/H x O/H é mostrada no gráfico (a) e a relação de Ne/O x O/H em (b).

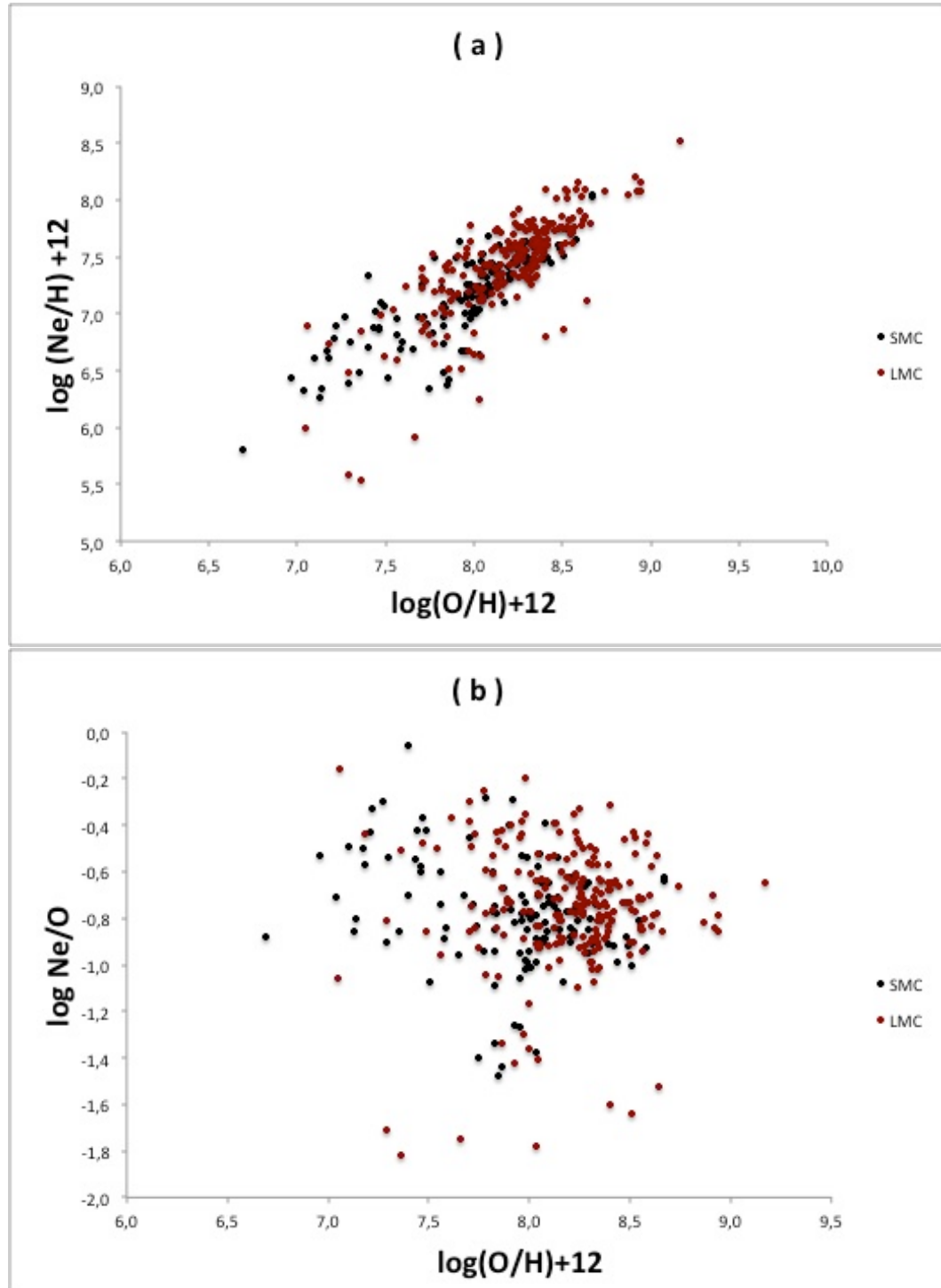


**Figura 2** – Abundância química de S das regiões do bojo (pontos pretos) e disco (pontos vermelhos) das NPs da Via Láctea. A relação de S/H x O/H é mostrada no gráfico (a) e a relação de S/O x O/H em (b).

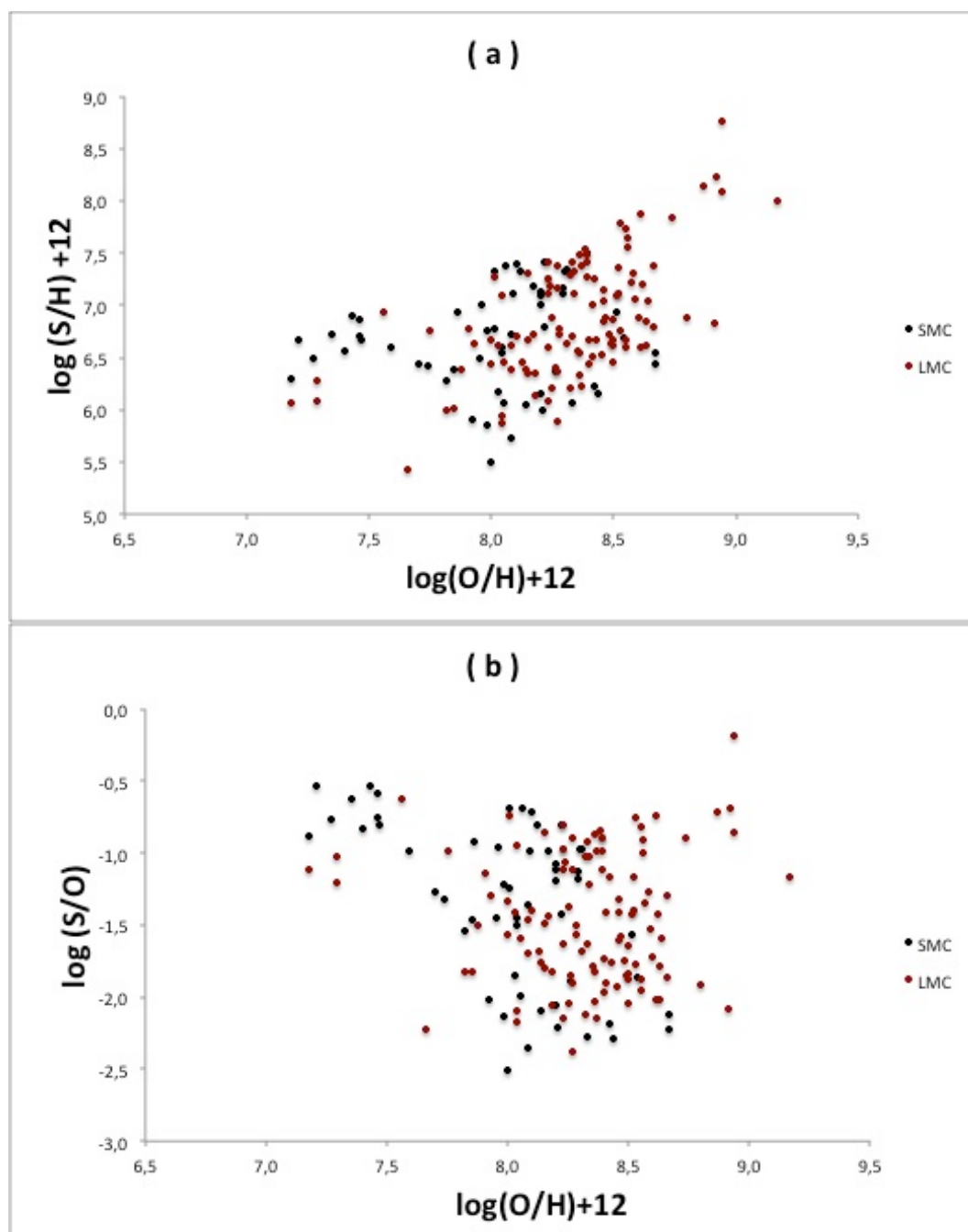


**Figura 3** – Abundância química do Ar das regiões do bojo (pontos pretos) e disco (pontos vermelhos) de NPs da Via Látea. A relação de Ar/H x O/H é mostrada no gráfico (a) e a relação de Ar/O x O/H em (b).

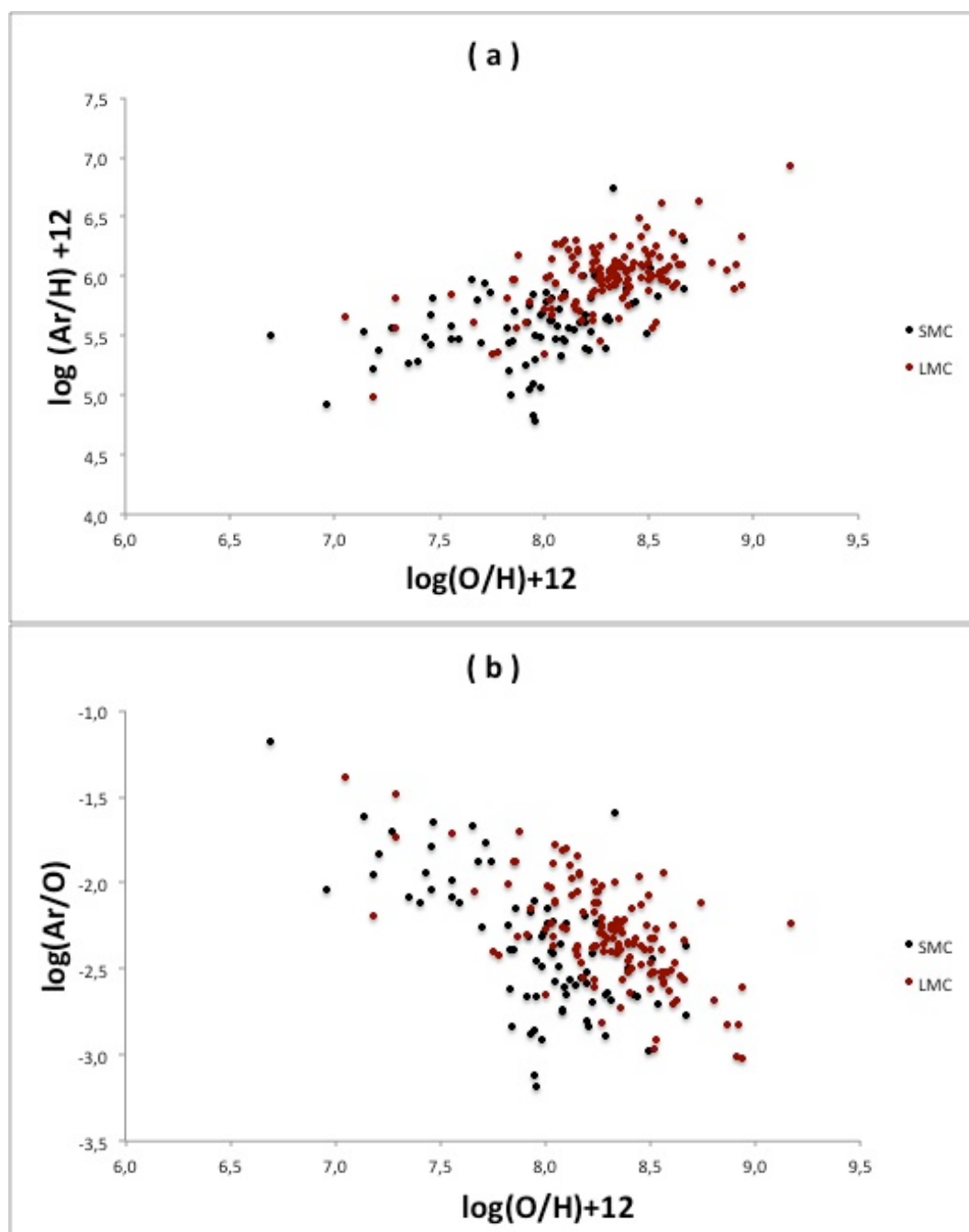
### 5.1.2 Resultados das abundâncias de Ne, S e Ar nas NPs da Pequena Nuvem de Magalhães (SMC) e Grande Nuvem de Magalhães (LMC).



**Figura 4** – Abundância química do Ne das NPs de SMC (pontos pretos) e LMC (pontos vermelhos). O gráfico (a) exibe a relação de Ne/H x O/H e em (b) a relação de Ne/O x O/H.



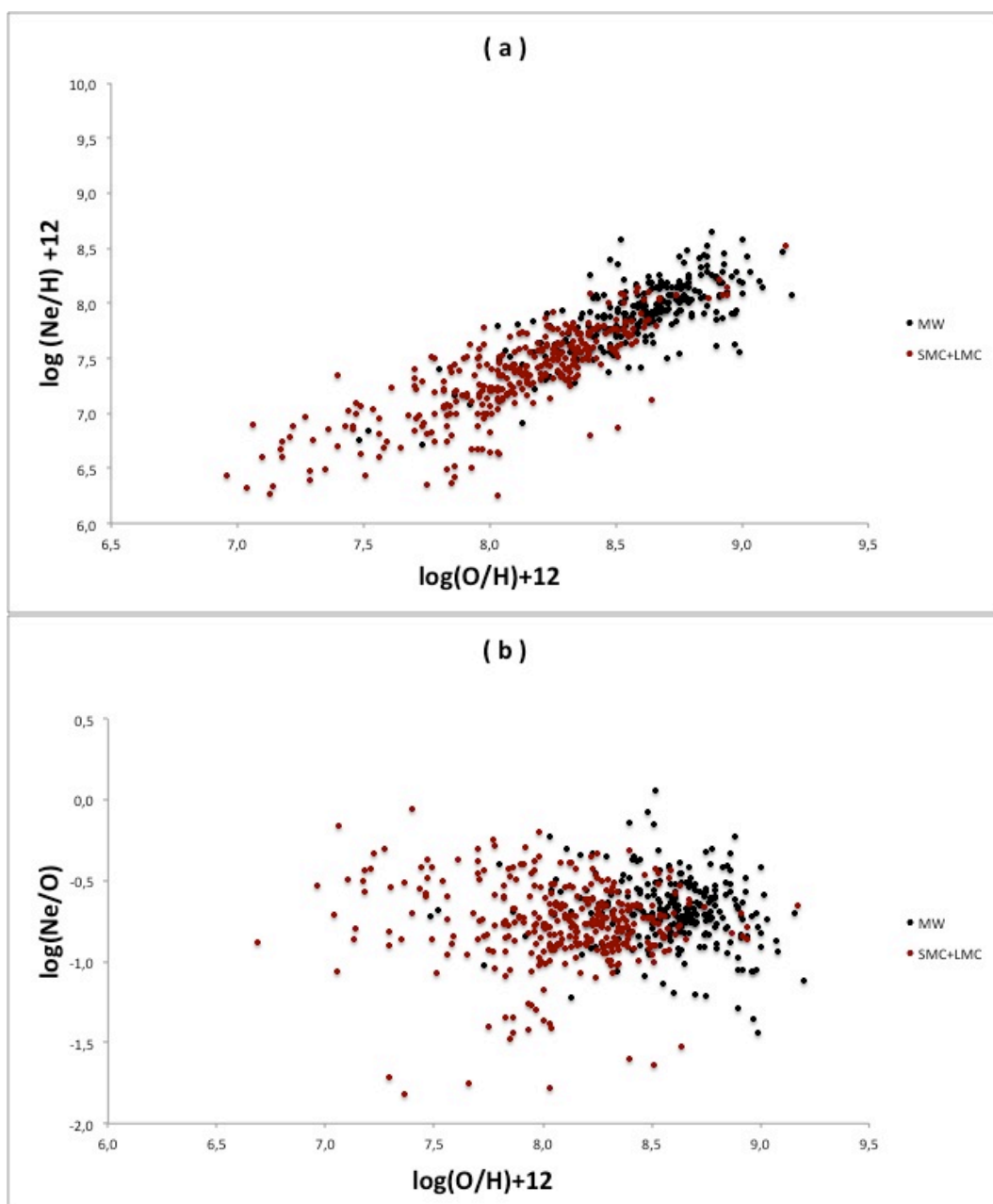
**Figura 5** – Abundância química do S das NPs de SMC (pontos pretos) e LMC (pontos vermelhos). O gráfico (a) exibe a relação de S/H x O/H e em (b) a relação de S/O x O/H. Gráficos



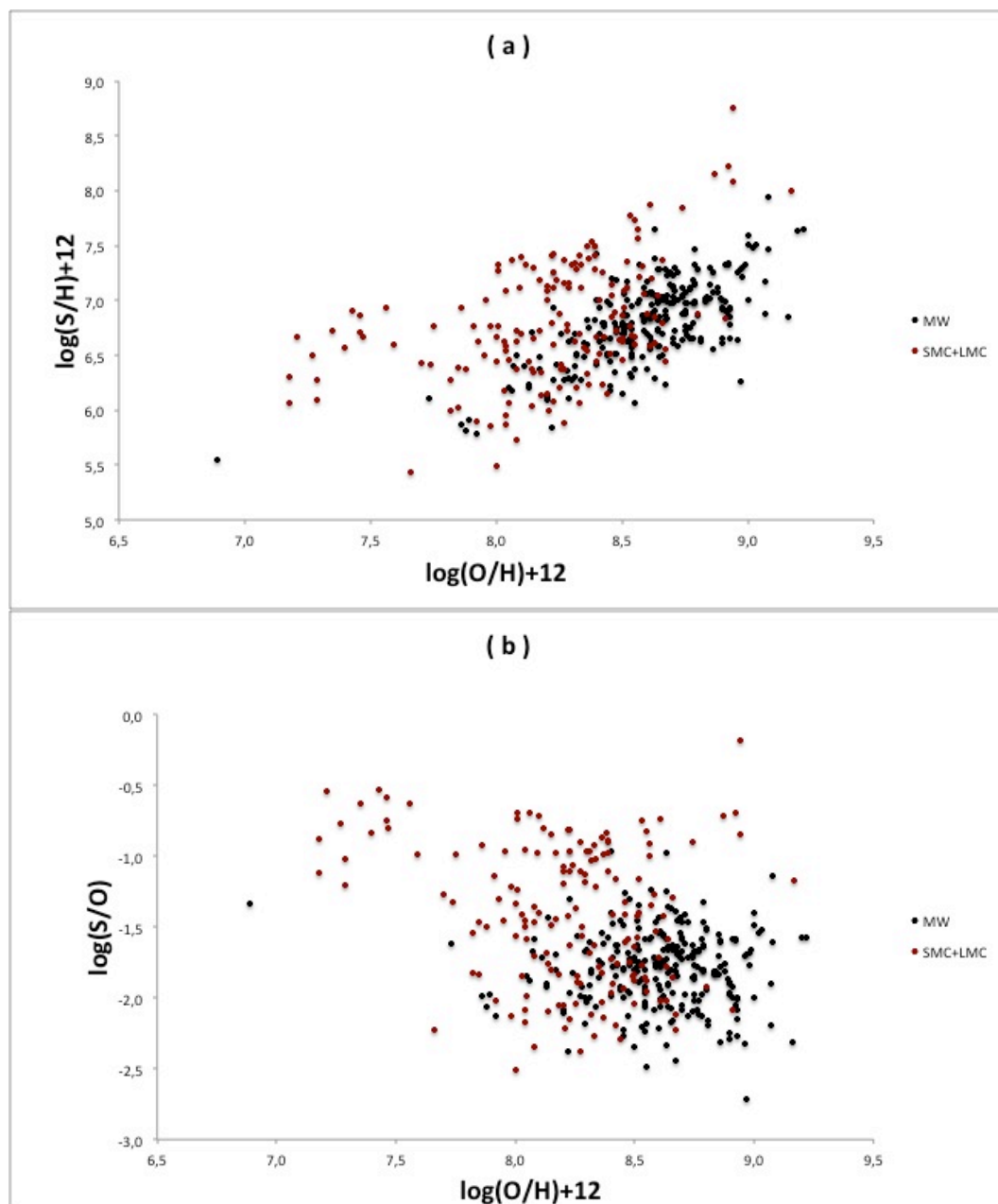
**Figura 6** – Abundância química do Ar das NPs de SMC (pontos pretos) e LMC (pontos vermelhos). O gráfico (a) exhibe a relação de Ar/H x O/H e em (b) a relação de Ar/O x O/H.



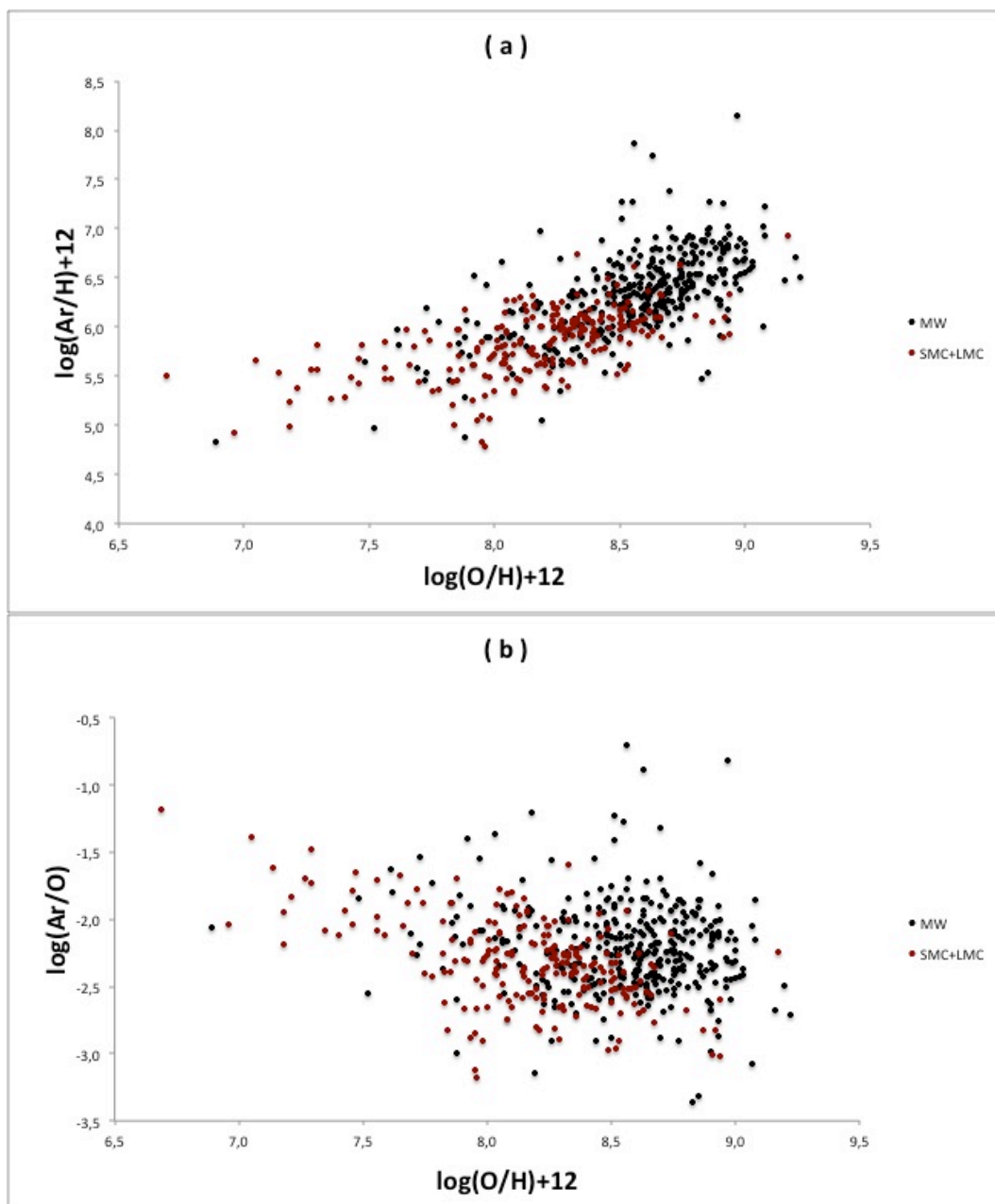
### 5.1.3 Resultados das abundâncias de Ne, S e Ar para Via Láctea (MW) e Nuvem de Magalhães



**Figura 7** – Abundância química do Ne das NPs localizadas na Via Láctea (pontos pretos) e Nuvem de Magalhães (pontos vermelhos). O gráfico (a) mostra a relação de Ne/H x O/H e em (b) a relação de Ne/O x O/H.



**Figura 8** – Abundância química do S das NPs localizadas na Via Láctea (pontos pretos) e Nuvem de Magalhães (pontos vermelhos). O gráfico (a) mostra a relação de S/H x O/H e em (b) a relação de S/O x O/H.



**Figura 9** – Abundância química do Ar das NPs localizadas na Via Láctea (pontos pretos) e Nuvem de Magalhães (pontos vermelhos). O gráfico (a) mostra a relação de Ar/H x O/H e em (b) a relação de Ar/O x O/H.

## 5.2 Abundância dos elementos produzidos pelas estrelas progenitoras

As abundâncias dos elementos como o hélio e o nitrogênio encontradas nas NPs foram modificadas pelas estrelas progenitoras. Esses elementos são de difícil estudo nas estrelas de massa intermediária, tornando as NPs uma boa fonte de informação para pesquisas de nucleossíntese desses elementos nessas estrelas.

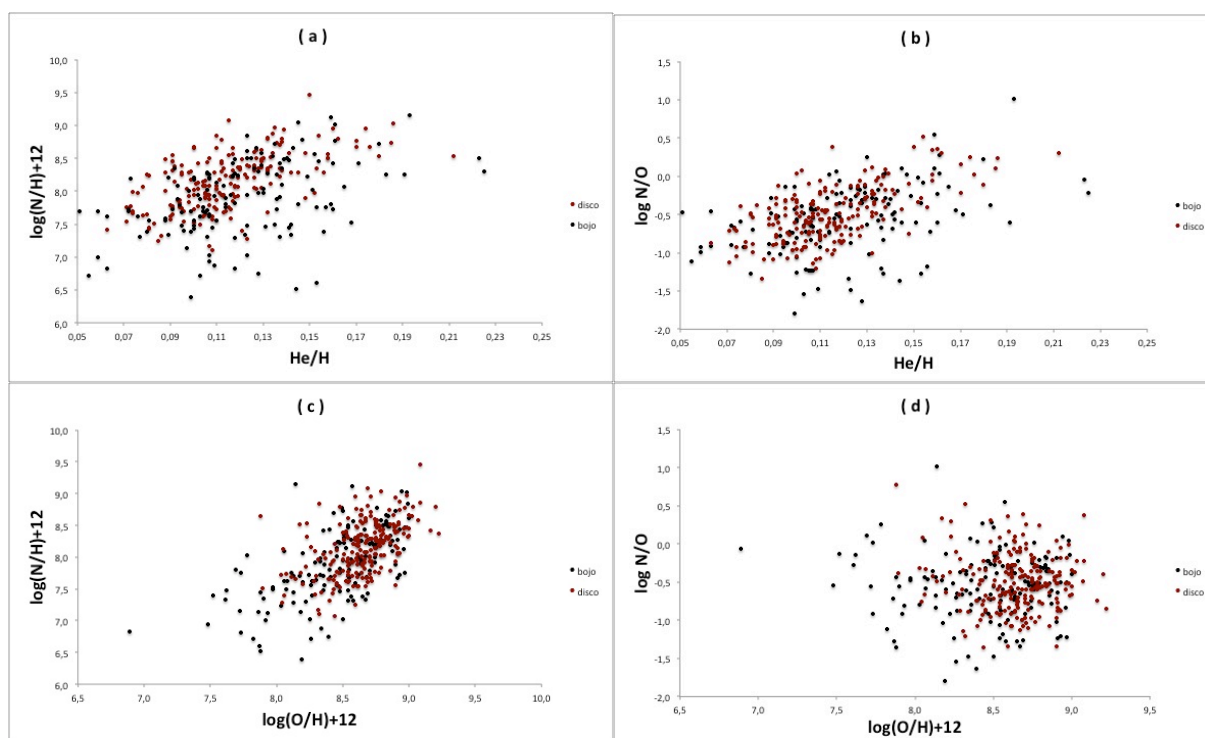
Os resultados obtidos para as relações de N/H e N/O em função de He/H mostram uma correlação positiva em todos os casos, mostrando que a quantidade de N/H e N/O aumenta com o aumento de He/H. Os gráficos que relacionam as abundâncias desses elementos (seção 5.2.1, seção 5.2.2 e 5.2.3) revelaram uma maior dispersão dos dados em relação aos metais mais pesados, indicando um excesso da quantidade de N medido nas NPs.

Esse excesso é o resultado da somatória do N contido no momento da formação das estrelas progenitoras com o N produzido durante o processo de evolução dessas estrelas.

Os gráficos de N/H em função de O/H (fig.10c, fig. 11c e fig 12c) mostram uma correlação positiva, fato que confirma a presença de um excesso de N.

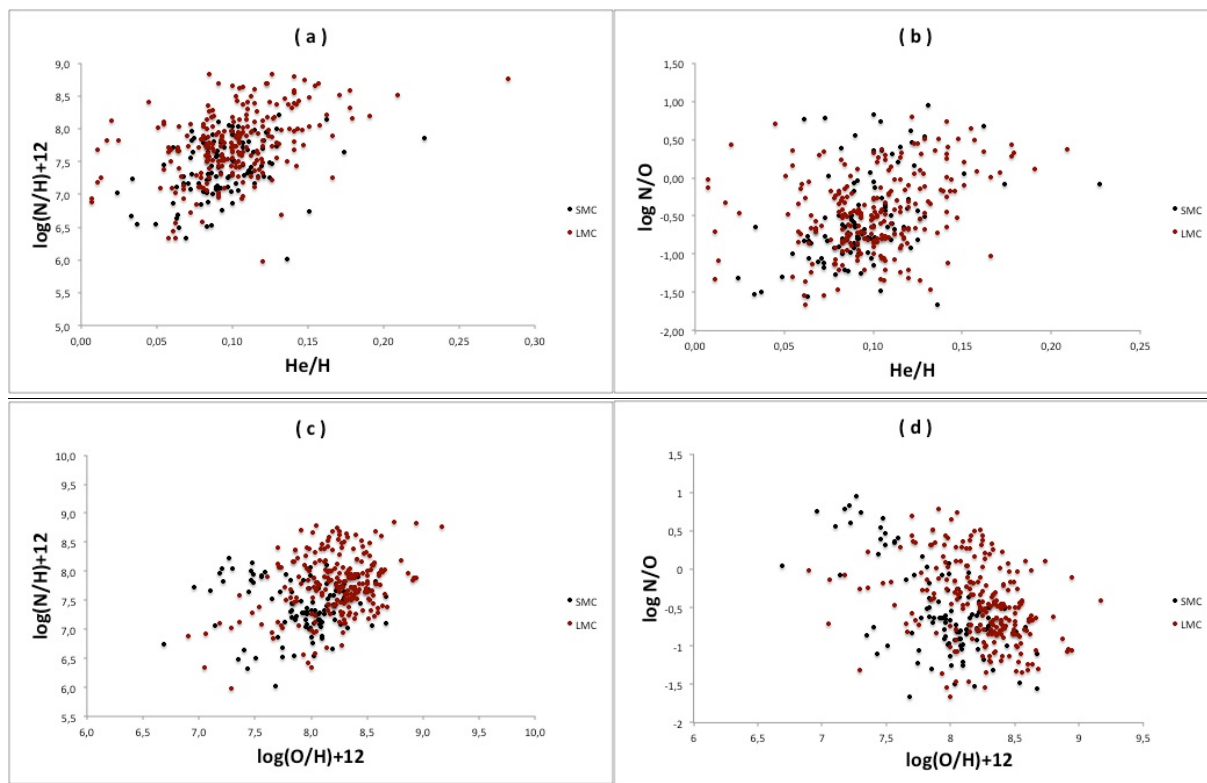
A correlação entre N/O e O/H ( fig. 10d, fig. 11d e fig. 12d) exibe uma tendência constante e bastante dispersão, corroborando com os resultados discutidos para o nitrogênio.

### 5.2.1 Resultados das abundâncias de N e He das NPs localizadas nas regiões do bojo e disco da Via Láctea.



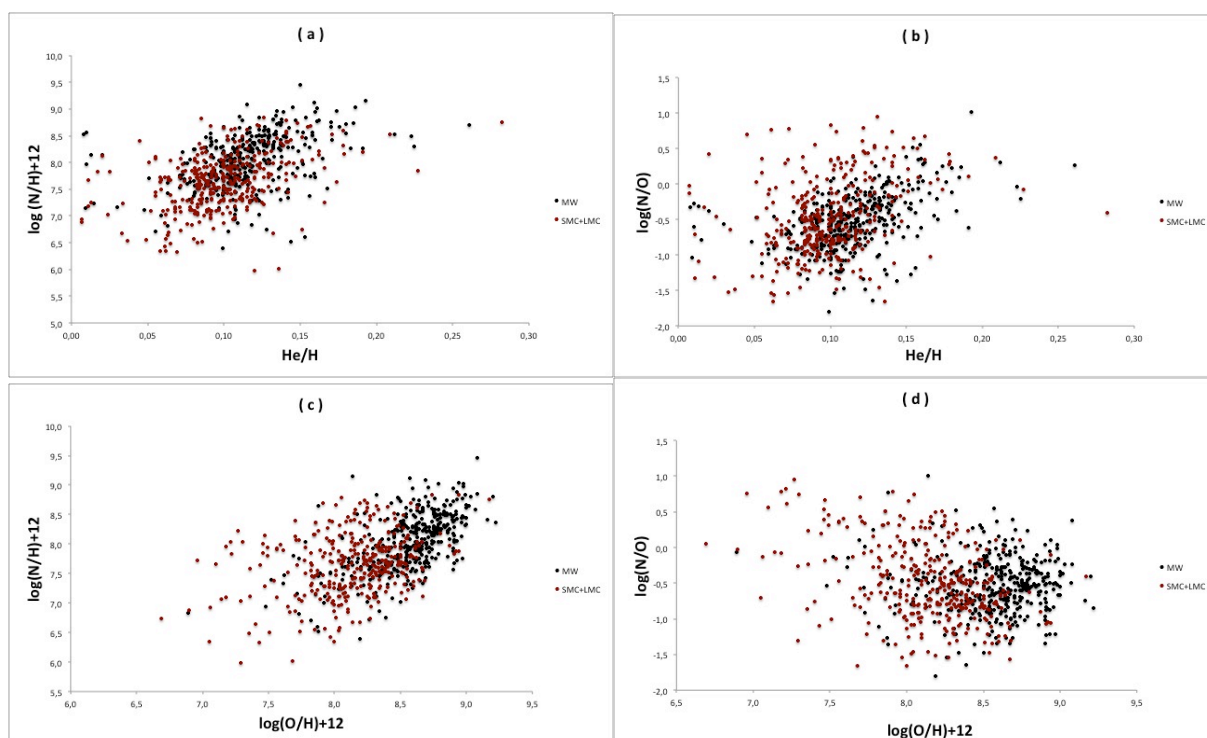
**Figura 10** – Relações de abundância de N e He das NPs das regiões do bojo (pontos pretos) e do disco (pontos vermelhos) da Via Láctea. Em (a) mostra a relação de  $N/H \times He/H$ . Em (b) a relação de  $N/O \times He/H$ . Em (c) a relação de  $N/H \times O/H$ . Em (d) a relação de  $N/O \times O/H$ .

### 5.2.2 Resultados das abundâncias de N e He das NPs localizadas na Pequena Nuvem de Magalhães (SMC) e na Grande Nuvem de Magalhães (LMC).



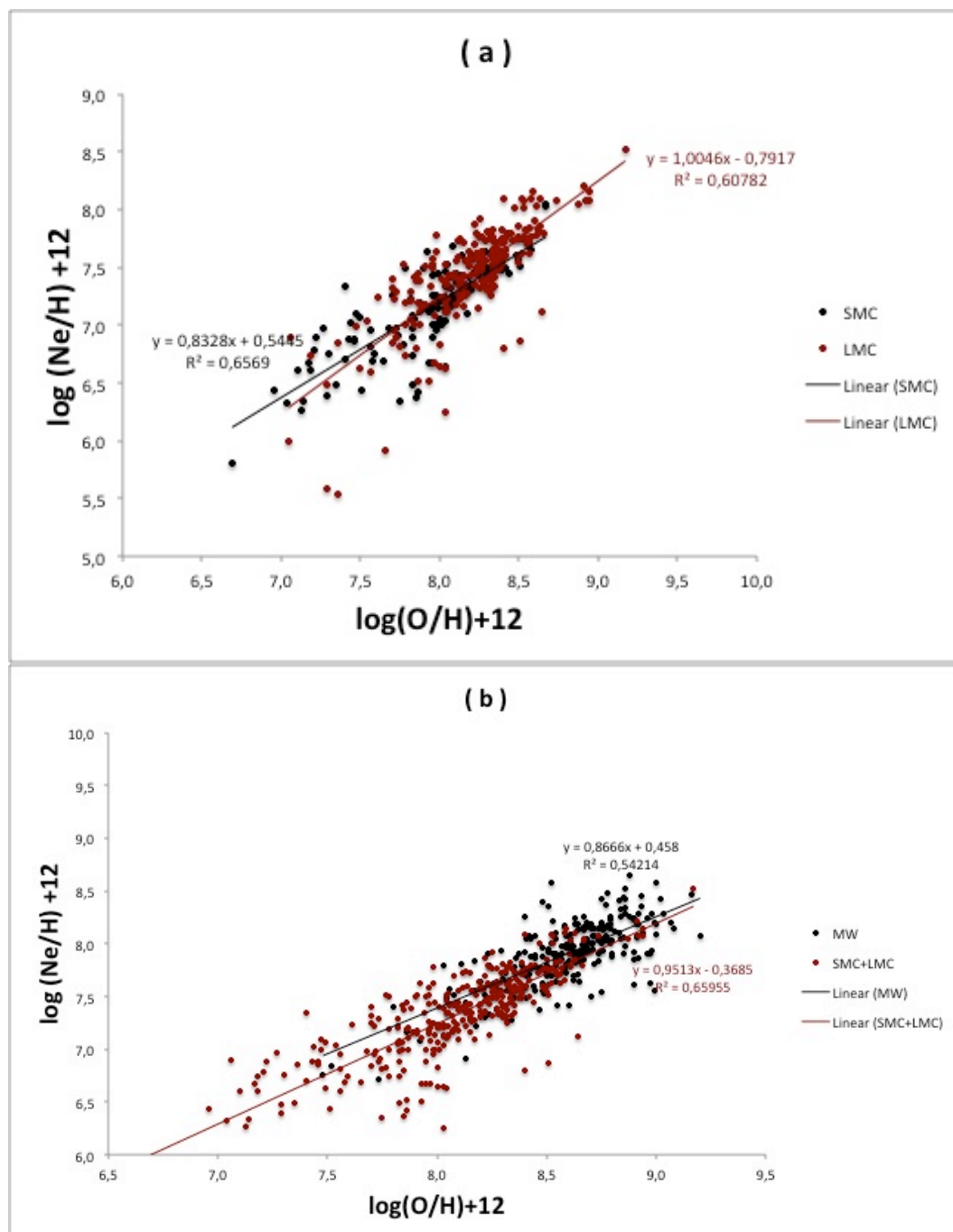
**Figura 11** – Relações de abundância de N e He das NPs Idas localizadas em SMC (pontos pretos) e em LMC (pontos vermelhos) da Via Láctea. Em (a) mostra a relação de  $N/H$  x  $He/H$ . Em (b) a relação de  $N/O$  x  $He/H$ . Em (c) a relação de  $N/H$  x  $O/H$ . Em (d) a relação de  $N/O$  x  $O/H$ .

### 5.2.3 Resultados das abundâncias de N e He da localizadas na Via Láctea(MW) e Nuvem de Magalhães (SMC+LMC).



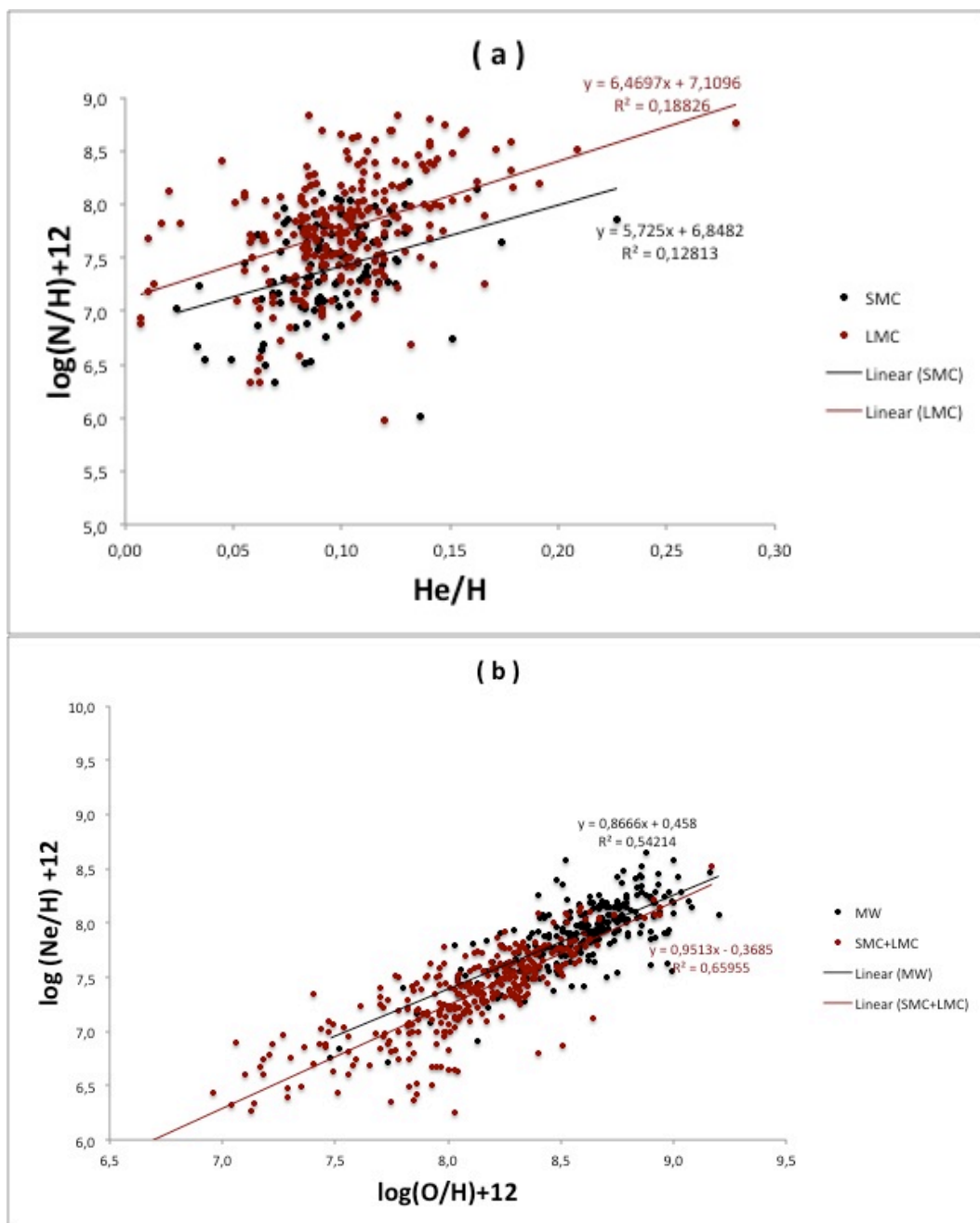
**Figura 12** – Relações de abundância de N e He das NPs Idas localizadas na Via Láctea (pontos pretos) e em Nuvem de Magalhães (pontos vermelhos). Em (a) mostra a relação de  $N/H$  x  $He/H$ . Em (b) a relação de  $N/O$  x  $He/H$ . Em (c) a relação de  $N/H$  x  $O/H$ . Em (d) a relação de  $N/O$  x  $O/H$ .

**5.3 Gráficos com ajustes lineares das relações de Ne e N, comparando as abundância entre as regiões de SMC e LMC e entre as regiões da Nuvem de Magalhães (SMC+LMC) e da Via Láctea (MW).**



**Figura 13** – Gráficos com ajustes lineares das relações de Ne/H x O/H. Em (a) mostra o ajuste de SMC (pontos pretos) e LMC (pontos vermelhos). Em (b) mostra o ajuste para a Via Láctea (MW) em preto e o ajuste para a Nuvem de Magalhães (SMC+LMC) em vermelho.





**Figura 14** – Gráficos com ajustes lineares das relações de N/H x He/H. Em (a) mostra o ajuste da Pequena Nuvem de Magalhães (SMC) em pontos pretos e a Grande Nuvem de Magalhães (LMC) em pontos vermelhos. Em (b) mostra o ajuste para a Via Láctea (MW) em preto e o ajuste para a Nuvem de Magalhães (SMC+LMC) em vermelho.

## 6 CONCLUSÕES

O gráfico do enxofre nos dados da Via Láctea (figura 2) apresentou uma boa correlação. Porém essa mesma relação quando considerados os dados da Nuvem de Magalhães das NPs (figura 5) foi observado uma dispersão bastante acentuada deste elemento, tornando sua análise um tanto inconclusiva. Esse problema à respeito do enxofre já foi observado em outros trabalhos e usualmente chamado de “anomalia do enxofre” não tendo ainda sua causa bem esclarecida ( Maciel, Costa e Cavichia, 2014).

O argônio também apresentou alguma dispersão que provavelmente se devem às incertezas nas linhas de emissão dos dados observacionais desse elemento e devem ser revistas. Esse fato não impediu de se perceber a existência de correlações e suas tendências.

Um fato importante foi observado na semelhança entre a abundância química do bojo e do disco da Galáxia que não revelaram diferenças na evolução química dessas duas regiões, pois suas correlações são bastante semelhantes tanto para os elementos mais pesados ( Ne, S, Ar ) como para o He e N.

Já o resultado das comparações entre a Via Láctea e a Nuvem de Magalhães, deixa evidente que a Via Láctea é mais rica em metalicidade. O mesmo acontece na comparação entre LMC e SMC que mostram uma superioridade da metalicidade de LMC em relação a SMC como mostra os ajustes das figuras 13a e 14a. Apesar dessa diferença, essas duas galáxias apresentam resultados bastante semelhantes de abundância, sugerindo que existe um padrão dominando a evolução química nesses objetos.

Nas correlações entre o He e N também se observou uma maior abundância desses elementos na LMC em relação a SMC, superioridade também observada da Via Láctea em relação a Nuvem de Magalhães e apresentadas no ajuste das figuras 13b e 14b.

Todas as investigações do hélio e nitrogênio resultaram em correlações positivas indicando que pode ser considerada a ocorrência de um excesso de He e N em relação aos metais mais pesados na análise dos gráficos.

Porém não é possível diferenciar a quantidades desses elementos que foram produzidos pelas estrelas progenitoras da quantidade que já estava presente no momento da formação dessas estrelas.

Para esses elementos, as pesquisas devem ser mais desenvolvidas e apuradas a fim de se obter conclusões mais precisas.

## REFERÊNCIAS

- MACIEL, W.J., COSTA, R. D. D., IDIART, T. E. P., **Nucleosynthesis and chemical evolution of intermediate-mass stars: results from planetary nebulae**, Alemanha, 11<sup>o</sup> Symposium on Nuclei in the Cosmos, Proceedings of Science, 2010.
- MACIEL, W. J., COSTA, R. D. D., CAVICHIA, O., **Photoionized nebulae in the Local Group: Nucleosynthesis and chemical evolution**, Hungria, 13<sup>o</sup> Nuclei in the Cosmos, Proceedings of Science, 2014.
- MACIEL, W. J., COSTA, R. D. D., IDIART, T. E. P., **Planetary nebulae and the chemical evolution of the Magellanic Clouds**, Brasil, IAG, Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica, 2009.
- KWOK, S., **Stellar Evolution from AGB to Planetary Nebulae**, The Art of Modelling Stars in the 21<sup>o</sup>. Century Proceedings IAU Symposium No. 252, 2008.
- CAVICHIA, O., COSTA, R. D. D., MACIEL, W. J., **Planetary nebulae in the inner Milky Way: new abundances**. Rev. Mexicana Astron. Astrof. 46, 159, 2010
- MACIEL, W. J., COSTA, R. D. D.. **Time variation of the O/H radial gradient in the galactic disk based on planetary nebulae**. Rev. Mex. Astron. Astrof. 49, 333, 2013,
- MACIEL, W. J., COSTA, R. D. D. **Symmetric and asymmetric planetary nebulae and the time variation of the radial abundance gradients**. Asymmetrical planetary nebulae VI, Ed. C. Morisset, G. Delgado- Inglada, S. Torres-Peimbert, 2014. (<http://www.astroscu.unam.mx/apn6/PROCEEDINGS/>)
- MACIEL, W. J., RODRIGUES, T. S., COSTA, R. D. D., **Kinematic ages of central stars of planetary nebulae**. Rev. Mex. Astron. Astrof. 47, 401, 2011.