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

Nícolas Dick Vidal de Oliveira

Mudanças na composição química das estrelas devido à difusão atômica

São Paulo
2021

Nícolas Dick Vidal de Oliveira

Mudanças na composição química das estrelas devido à difusão atômica

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Astronomia, Geofisica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Astronomia.

Vertente: Pesquisa Básica
Orientador: Prof. Dr. Jorge Luis Meléndez Moreno (IAG-USP)

São Paulo

2021

Dedico este trabalho a todos os astrônomos brasileiros, os quais lutam todos os dias, muitas vezes sem o devido prestígio, para o desenvolvimento tecnocientífico do país.

Agradecimentos

À minha família: Airton Vidal de Oliveira, Ilaine Dick Oliveira, Carolina Dick Oliveira, Adão Vidal de Oliveira, Pedrina Aparecida Fratantonio de Oliveira, Nelson Dick e Irene Dick, pelo apoio, assistência, carinho e suporte sem aos quais eu não poderia estar entregando esse trabalho.

Ao orientador Dr. Jorge Luis Meléndez Moreno, pela oportunidade, paciência, didática, discussões e a todo ensinamento que me proporcionou durante esse período de graduação.

A todos os pesquisadores do grupo SAMPA, em especial Jorge Luis Meléndez Moreno, Anne Viegas Rathsam, Giulia Martos e Jhon Yana Galarza, que me auxiliaram em todos os processos durante o desenvolvimento desse trabalho.

À professora Claudete Carmona Yonashiro, que durante o ano de 2014 ministrou aulas para a Olimpíada Brasileira de Astronomia e Astronáutica e fez despertar o meu interesse por astronomia.

Ao professor Julio Cesar Klafke, que durante 3 anos me ajudou a conquistar resultados em olimpíadas científicas e ainda me deixou motivado para escolher o curso de astronomia.

Aos meus amigos: João Victor Corrêa Rodrigues, Willian Yuuiti Nacafucasaco, Lucas Melani Rocha Volpe, David Fernando Freitas da Silva Cavalcante, Gabriel Menezes Sousa, Janaína Anjos Melo, Vitória Bellecerie da Fonseca, Giulia Martos, Lucas do Nascimento Degi, Rafael Hideki Cardoso Ishida, Carolina Silveira de Moraes, Beatriz Zacarias, Yasmmin Ferreira Tamburus, Milena Magalhães Hygino, Anne Viegas Rathsam, pelos momentos, conversas, discussões, apoio e por deixar o ambiente de estudos muito divertido e alegre, cada um foi especial de alguma forma durante essa jornada.

À FAPESP, pelo apoio financeiro, sob o projeto n^o: 2020/15801-2.

Esta tese/dissertação foi escrita em LaTeX com a classe IAGTESE, para teses e dissertações do IAG.

"*Se a educação sozinha não transforma a sociedade, sem ela tampouco a sociedade muda.*"

Paulo Freire

"*A imaginação é mais importante que o conhecimento. O conhecimento é limitado, enquanto a imaginação abraça o mundo inteiro, estimulando o progresso, dando à luz à evolução. Ela é, rigorosamente falando, um fator real na pesquisa científica.*"

Albert Einstein

"*E a gente vai ser feliz, olha nós outra vez no ar, o show tem que continuar*"

Arlindo Domingos Da Cruz Filho

Resumo

Visando o objetivo de treinar a utilização de técnicas de espectroscopia e estudar a variação da composição química estelar devida ao efeito da difusão atômica, foi selecionada uma amostra de 16 estrelas do tipo solar, em particular estrelas no final da sequência principal e na sua evolução imediatamente posterior, ou seja, no ramo das subgigantes. Os espectros foram retirados da base de dados pública do ESO (*European Southern Observatory*), das quais as observações foram feitas com o espectrógrafo HARPS (*High Accuracy Radial velocity Planet Searcher*) e foram utilizados os espectros já reduzidos. Com isso, foi feito o tratamento dos dados, fazendo a combinação e a normalização com a ferramenta computacional IRAF (*Image Reduction and Analysis Facility*), obtendo SNR_{total} (*Signal-to-Noise Ratio*) maior que 250. Esses dados foram utilizados para adquirir os parâmetros atmosféricos e as abundâncias químicas das estrelas via medida de larguras equivalentes, as quais foram feitas linha a linha. Com o intuito de conseguir perceber o efeito de difusão atômica, foi feita uma análise com base na abundância relativa ao elemento ferro ([X/Fe]), já que não se pode supor que as estrelas possuem uma origem em comum, e, portanto, estrelas de mesma fase evolutiva não necessariamente terão um aspecto homogêneo em relação as suas abundâncias químicas.

Abstract

Aiming at training high precision techniques and studying the variation of chemical composition due to atomic diffusion, 16 solar type stars was selected, in specific, stars that are in the end of the mean sequence and in the next stage which is the subgiant branch. The spectra were taken from the ESO (European Southern Observatory) public database which observations were made by HARPS (High Accuracy Radial Velocity Planet Searcher) spectrograph and these spectra were already reduced. The data processing was made considering the combination and the normalization by using the IRAF (Image Reduction and Analysis Facility) environment obtaining SNR_{total} (Signal-to-Noise Ratio) greater than 250. These data were used to seeking for the atmospheric parameters and the chemical abundances of these stars via measurements of equivalent widths which were measured line by line. In order to understand the atomic diffusion in these stars, an analysis was made based on relative abundance to the iron ([X/Fe]) since we cannot assume the stars have the same chemical origin and, therefore, stars in the same evolutionary stage would not necessarily have a homogeneous aspect related with their chemical abundances.

Lista de Figuras

1.1 Representação de largura equivalente. 21

2.1 Histograma com as 79 estrelas da primeira seleção de amostra com relação à temperatura efetiva (Teff). 24

2.2 Gráfico relacionando a gravidade superficial (log g) com a temperatura efetiva (Teff). 25

2.3 Espectro individual (acima) e espectro combinado (abaixo) para a estrela HD 014802 dentro da faixa de 5550 Å a 5575 Å. 27

2.4 Espectro normalizado para a estrela HD 084117. 28

2.5 Linha 5380,3 Å do carbono para o espectro solar. 29

3.1 Gráfico que evidencia a evolução da abundância química da espécie SiI relativa à abundância de ferro ([Fe]). 34

3.2 Histograma das inclinações obtidas das 27 espécies analisadas. 35

3.3 Gráfico que relaciona as inclinações com o número atômico das 27 espécies analisadas. 35

Lista de Tabelas

2.1 Estrelas resultantes da seleção da amostra com os parâmetros atmosféricos da base de dados do grupo SAMPA. 25
2.2 Divisão dos espectros para a normalização. 28
2.3 Parâmetros atmosféricos adquiridos. 30

A.1 Abundâncias químicas 43

Sumário

1. Introdução 19
1.1 Gêmeas Solares 20
1.2 Espectroscopia 20
1.2.1 Larguras equivalentes 21
1.2.2 Abundâncias químicas 21

2. Metodologia para estimar as abundâncias 23
2.1 Seleção da amostra 23
2.2 Aquisição dos espectros 25
2.2.1 Tratamento dos dados 26
2.3 Obtenção das abundâncias químicas 28
2.3.1 Medição de larguras equivalentes 29
2.3.2 Obtenção dos parâmetros atmosféricos 30
2.3.3 Aquisição das abundâncias químicas 31

3. Análise 33
3.1 Abundâncias relativas ao ferro 33
3.2 Análise das inclinações obtidas 34

4. Conclusão e perspectivas futuras 37
4.1 Efeito da difusão atômica nas estrelas 37
4.2 Perspectivas futuras 37

Referências 39

Apêndice 41

A. Abundâncias químicas calculadas. 43

Capítulo 1

Introdução

A evolução de estrelas de tipo solar na sequência principal termina com o esgotamento de hidrogênio no núcleo e com o colapso do núcleo de hélio, definido pelo limite de Schönberg–Chandrasekhar, e logo a seguir inicia-se a evolução no ramo das subgigantes (Carroll e Ostlie, 2017). Durante a sequência principal, a abundância química de elementos com número atômico maior decresce ligeiramente com o aumento da idade. Essa diminuição acontece devido à difusão atômica, mecanismo pelo qual elementos mais pesados são puxados para baixo da zona convectiva, enquanto elementos mais leves são menos afetados. No entanto, o efeito líquido depende também da aceleração radiativa para o exterior, que transfere momento do fluxo de fótons para os átomos (Dotter et al., 2017). Quando a estrela evolui para a fase de subgigante, o envoltório convectivo se aprofunda, trazendo de volta esses elementos químicos para a atmosfera estelar, o que pode ser observado como um aumento da abundância química de diversos elementos nessa fase evolutiva.

No aglomerado aberto M67, que tem aproximadamente 4 bilhões de anos, foi observado, como em Liu et al. (2019), que as estrelas subgigantes têm abundâncias químicas cerca de 0,1 dex maiores que no *turnoff* (que é o final da sequência principal, logo antes da estrela evoluir para subgigante). Embora o efeito de difusão atômica seja relativamente pequeno (0,05 a 0,1 dex), pode ser detectado usando abundâncias químicas de alta precisão, como as determinadas pelo grupo SAMPA (*Stellar Atmospheres Planets and Abundances*) que usa o método diferencial linha a linha, como em Meléndez et al. (2012), Meléndez et al. (2014) e Bedell et al. (2018).

Com isso, o projeto visa o estudo dos efeitos de difusão atômica em estrelas na fase de *turnoff* e de subgigante que não estão presentes em um aglomerado, o que significa que as estrelas podem ter origens diferentes, sendo então um trabalho de caráter inédito e podendo

contribuir com informações para um assunto pouco estudado, já que estudos de difusão atômica só puderam ser feitos graças aos recentes avanços de técnicas de espectroscopia.

1.1 Gêmeas Solares

Estrelas que possuem características bastante similares ao Sol são chamadas de gêmeas solares. Essas características são: composição química, massa, idade, temperatura efetiva, luminosidade, gravidade superficial, campo magnético, etc. Por isso, os espectros dessas estrelas deveriam ser indistinguíveis ao do Sol.

O Sol é utilizado como a estrela padrão, sendo que praticamente todas as demais estrelas são comparadas a ele em várias características, como por exemplo as abundâncias químicas. Para fazer essas comparações, o ideal seria apontar o mesmo telescópio para o Sol e para as estrelas que se quer estudar, porém como nem todos os telescópios estão adaptados para poder observar o Sol, a observação de gêmeas solares pode ser de suma importância para as calibrações fundamentais, tais como temperatura efetiva e metalicidade fotométrica.

Estudando gêmeas solares tem-se o mesmo problema de não poder apontar diretamente o telescópio para o Sol. Uma maneira de conseguir um espectro solar, para utilizá-lo de comparação, é a utilização da observação da luz do Sol refletida em algum objeto que tenha praticamente uma atmosfera desprezível, como é o caso do asteroide Vesta ou até mesmo da própria Lua. Como esses corpos não possuem brilho próprio, toda a luz captada é originária do Sol, e como estes corpos praticamente não possuem atmosfera não há grandes influências nos espectros obtidos. Mesmo assim, é altamente recomendado utilizar espectros solares de mais de uma fonte. No trabalho usamos o espectro solar como referência para o cálculo das abundâncias diferenciais.

1.2 Espectroscopia

As técnicas de espectroscopia estão em crescente evolução, viabilizando a classificação de estrelas e mensuração de suas abundâncias químicas. Para se medir estas, é necessário entender um pouco sobre os processos que nos permitem relacionar as medidas de espectroscopia com o cálculo de abundância química.

1.2.1 Larguras equivalentes

A largura equivalente (EW - *Equivalent Width*) de uma estrela é dada pela Equação 1.1:

$$EW = \int_0^\infty \left(1 - \frac{F_\lambda}{F_c}\right) d\lambda, \tag{1.1}$$

em que F_c e F_λ são, respectivamente, o fluxo do contínuo e o fluxo na linha. Essa fórmula representa a substituição do perfil da linha por um retângulo cujas quantidades de energia são as mesmas para os dois casos, como é possível ver na Figura 1.1.

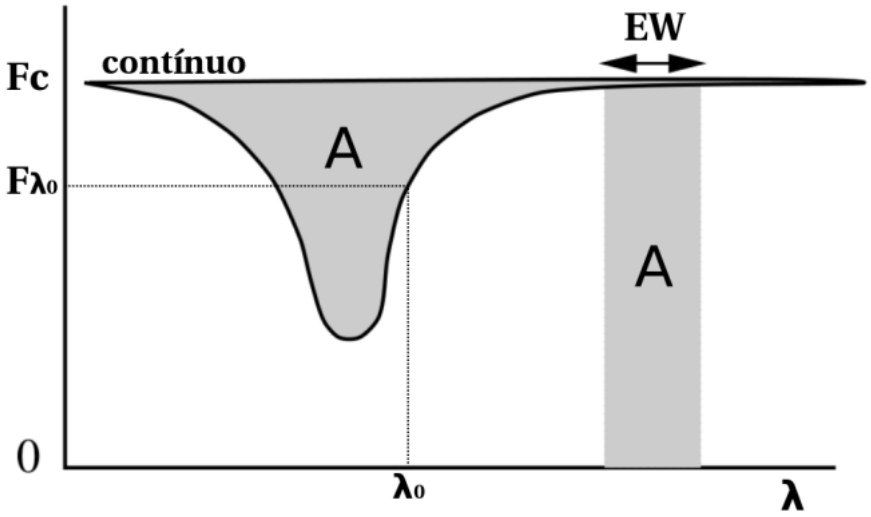

Figura 1.1: Representação de largura equivalente. Imagem retirada de Galarza (2016)

Para poder usar a largura equivalente como indicador de composição química, é necessário considerar os mecanismos de alargamento de linhas, sendo os principais: alargamento natural, doppler térmico e colisional.

1.2.2 Abundâncias químicas

A abundância química de uma estrela é definida pela Equação 1.2:

$$A_X = \log\left(\frac{n_X}{n_H}\right) + 12\ , \tag{1.2}$$

com n_X número de átomos por unidade de volume do elemento X e n_H número de átomos de hidrogênio por unidade de volume. O fator 12 é de escala, já que este representa a

abundância do hidrogênio. Assim, a razão de abundâncias do elemento X em relação ao Sol é dada pela Equação 1.3:

$$[\mathrm{X/H}] = A_{X,\star} - A_{X,\odot} = \log\left(\frac{n_X}{n_H}\right)_\star - \log\left(\frac{n_X}{n_H}\right)_\odot , \tag{1.3}$$

sendo o símbolo $\star$ indicador da estrela em estudo, enquanto o símbolo $\odot$ representa o Sol. É comum que se escreva as abundâncias químicas em relação a abundância química do ferro ([X/Fe]), calculada conforme a Equação 1.4:

$$\begin{aligned}
[\mathrm{X/Fe}] &= \log\left(\frac{n_X}{n_{Fe}}\right)_\star - \log\left(\frac{n_X}{n_{Fe}}\right)_\odot = \\
&= \log\left(\frac{\frac{n_X}{n_H}}{\frac{n_{Fe}}{n_H}}\right)_\star - \log\left(\frac{\frac{n_X}{n_H}}{\frac{n_{Fe}}{n_H}}\right)_\odot = \\
&= \log\left(\frac{n_X}{n_H}\right)_\star - \log\left(\frac{n_{Fe}}{n_H}\right)_\star - \log\left(\frac{n_X}{n_H}\right)_\odot + \log\left(\frac{n_{Fe}}{n_H}\right)_\odot \Rightarrow
\end{aligned}$$

$$\Rightarrow [\mathrm{X/Fe}] = [\mathrm{X/H}] - [\mathrm{Fe/H}]. \tag{1.4}$$

Capítulo 2

Metodologia para estimar as abundâncias

A metodologia utilizada para se obter as abundâncias químicas de estrelas e, assim, conseguir perceber se há efeito de difusão atômica em estrelas de campo, começa com a seleção de uma amostra de estrelas que sejam relativamente próximas às características do Sol. Após a seleção da amostra de estrelas, faz-se a obtenção dos espectros e tratamento desses, afim de obter SNR maior que 250. Com os espectros, são feitas medidas de larguras equivalentes para diversas linhas e com essas é possível estimar os parâmetros atmosféricos e as abundâncias químicas das estrelas da amostra.

2.1 Seleção da amostra

A escolha da amostra foi feita utilizando a base de dados de estrelas do grupo SAMPA, composta por milhares de estrelas com seus parâmetros atmosféricos já estudados na literatura. Como as estrelas que interessam neste estudo são estrelas de grande semelhança ao Sol, porém com massa ligeiramente maior, foram escolhidos objetos entre 1,14 e 1,26 massas solares (1,20±0,06 massas solares) e metalicidade ([Fe/H]) entre -0,13 dex e 0,13 dex. Para selecionar apenas estrelas na fase de *turnoff* e no ramo das subgigantes, foram escolhidos mais dois intervalos de restrição, assim selecionando estrelas com gravidade superficial entre 3,8 dex e 4,4 dex e temperaturas superficiais de 5.750 K a 6.250K. Após essa fase da seleção, foi obtida uma amostra de 79 objetos, como pode ser visto a distribuição de temperatura efetiva no histograma da Figura 2.1 e logarítimo da gravidade superficial por temperatura efetiva no gráfico da Figura 2.2, sendo que desses apenas 23 estão na base de dados do ESO obtidos com o instrumento HARPS. Para poder analisar as estrelas de forma que os efeitos da difusão atômica possam ser detectados, foram selecionadas apenas

aquelas cujos espectros, após a combinados, resultaram em SNR_{total} maior que 250, e que possuem pelo menos 5 espectros (a fim de poder diminuir os efeitos das linhas telúricas). Obteve-se assim um total de 18 estrelas.

A SNR foi calculado partindo da relação representada na Equação 2.1. Como uma das 18 estrelas é reconhecida como binária espectroscópica (HD 013612), ela foi descartada na análise. Outra estrela (HD025457) apresentou uma possível contaminação no seu espectro por uma outra estrela e por isso também foi excluída da amostra. Assim, o resultado final da seleção da amostra é 16 estrelas que podem ser vistas na Tabela 2.1.

$$\mathrm{SNR}_{total} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} \mathrm{SNR}_i^2}. \tag{2.1}$$

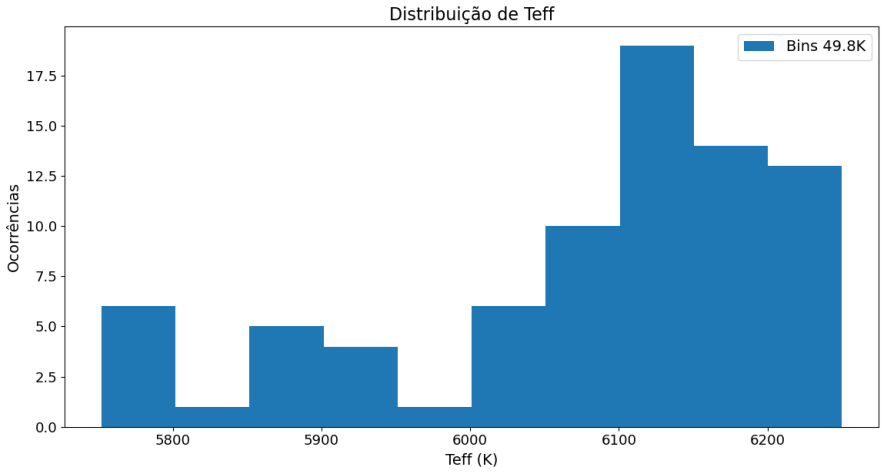

Figura 2.1: Histograma com as 79 estrelas da primeira seleção de amostra com relação à temperatura efetiva (Teff).

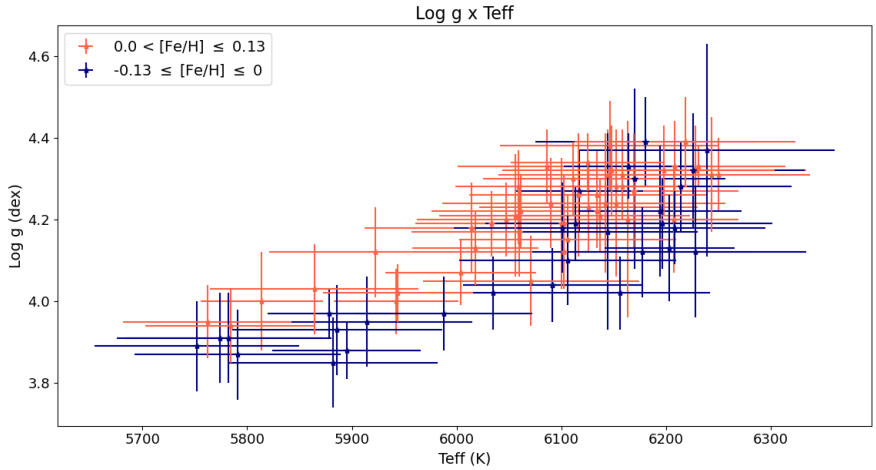

Figura 2.2: Gráfico relacionando a gravidade superficial (log g) com a temperatura efetiva (Teff).

Tabela 2.1 - Estrelas resultantes da seleção da amostra com os parâmetros atmosféricos da base de dados do grupo SAMPA.

Estrela	Teff (K)	erro Teff (K)	log g (dex)	erro log g (dex)	[Fe/H] (dex)	erro [Fe/H] (dex)
HD 014802	5878	59	3,97	0,06	-0,02	0,05
HD 025587	6170	86	4,30	0,22	-0,08	0,09
HD 044120	6033	72	4,19	0,08	0,11	0,07
HD 062364	6226	106	4,32	0,14	-0,11	0,11
HD 073121	6059	61	4,21	0,07	0,08	0,05
HD 075881	6163	104	4,20	0,24	0,05	0,11
HD 084117	6164	62	4,33	0,08	-0,05	0,05
HD 146389	6239	122	4,37	0,26	-0,02	0,07
HD 171990	6004	72	4,07	0,08	0,04	0,07
HD 175128	6102	85	4,12	0,09	0,09	0,09
HD 187085	6125	74	4,34	0,07	0,11	0,07
HD 187691	6142	61	4,24	0,17	0,11	0,05
HD 192865	6207	62	4,20	0,13	0,10	0,05
HD 214094	6228	106	4,12	0,16	-0,04	0,11
HD 222368	6203	62	4,13	0,13	-0,12	0,06
HD 231701	6158	61	4,28	0,06	0,01	0,05

2.2 *Aquisição dos espectros*

Para extrair os espectros da base de dados, foi desenvolvido um código em *python* que acessa a base de dados da ESO fazendo a seleção por nome da estrela, SNR e data, uma vez que é interessante separar os espectros antes e depois da atualização do HARPS, ocorrida no dia 3 de junho de 2015. Assim, o programa em *python* cria automaticamente as pastas

para as estrelas, separando em espectros antes da atualização e depois da atualização, baixa e descompacta os arquivos, mantendo apenas os arquivos referentes aos espectros reduzidos. A utilização do código facilita a aquisição de vários espectros, agilizando o processo.

Outra grande vantagem de se utilizar códigos durante esse processo é na fase de descompactação dos arquivos, uma vez que os arquivos de interesse (espectros já reduzidos) estão por padrão dentro de um arquivo `tar` (***T**ape **AR**chive*).

2.2.1 Tratamento dos dados

Com os espectros obtidos, era necessário fazer a correção de efeito Doppler, e para isso foi utilizado o ambiente do IRAF. Como cada estrela possui pelo menos 5 espectros, para facilitar e agilizar o processo de correção, foi criado um *script*, em que o IRAF consegue fazer a correção de cada espectro, utilizando o comando `dopcor` com as informações de velocidade radial que foram obtidas do arquivo relacionado ao ccf (*Cross Correlation Function*) correspondente.

Após a correção de efeito Doppler, foram feitas as combinações dos espectros, assim eliminando grande parte das linhas telúricas e chegando em SNR_{total} maior que 250. A combinação dos espectros também foi realizada utilizando o ambiente IRAF, agora fazendo uso da função `scombine`, que faz a combinação com base na média dos fluxos do conjunto de espectros, porém ponderando-os com base na mediana. A ponderação por meio da mediana é importante para as eliminações de anomalias e das linhas telúricas, melhorando a precisão das futuras medidas de largura equivalente. Pode-se verificar essa diferença na Figura 2.3, onde percebe-se um menor ruído nas regiões sem linhas, e a eliminação de uma linha de emissão (talvez da atmosfera terrestre, ou algum defeito na redução de dados) no comprimento de onda 5553,8 Å.

Tendo os espectros combinados, realizou-se a normalização com o contínuo em 1 no intuito de facilitar sua detecção e a medição das larguras equivalentes. Para que a normalização fosse feita, foram divididos os espectros em 7 intervalos de comprimentos de onda, como segue na Tabela 2.2. Essa divisão tem o intuito de melhorar a normalização, uma vez que foi utilizada uma interpolação seguindo a função `spline cúbica`, que pode não corresponder muito bem ao contínuo em todo o espectro. Assim, para cada intervalo foi feita uma normalização que é combinada ao final, usando o comando `scombine scale-`, e

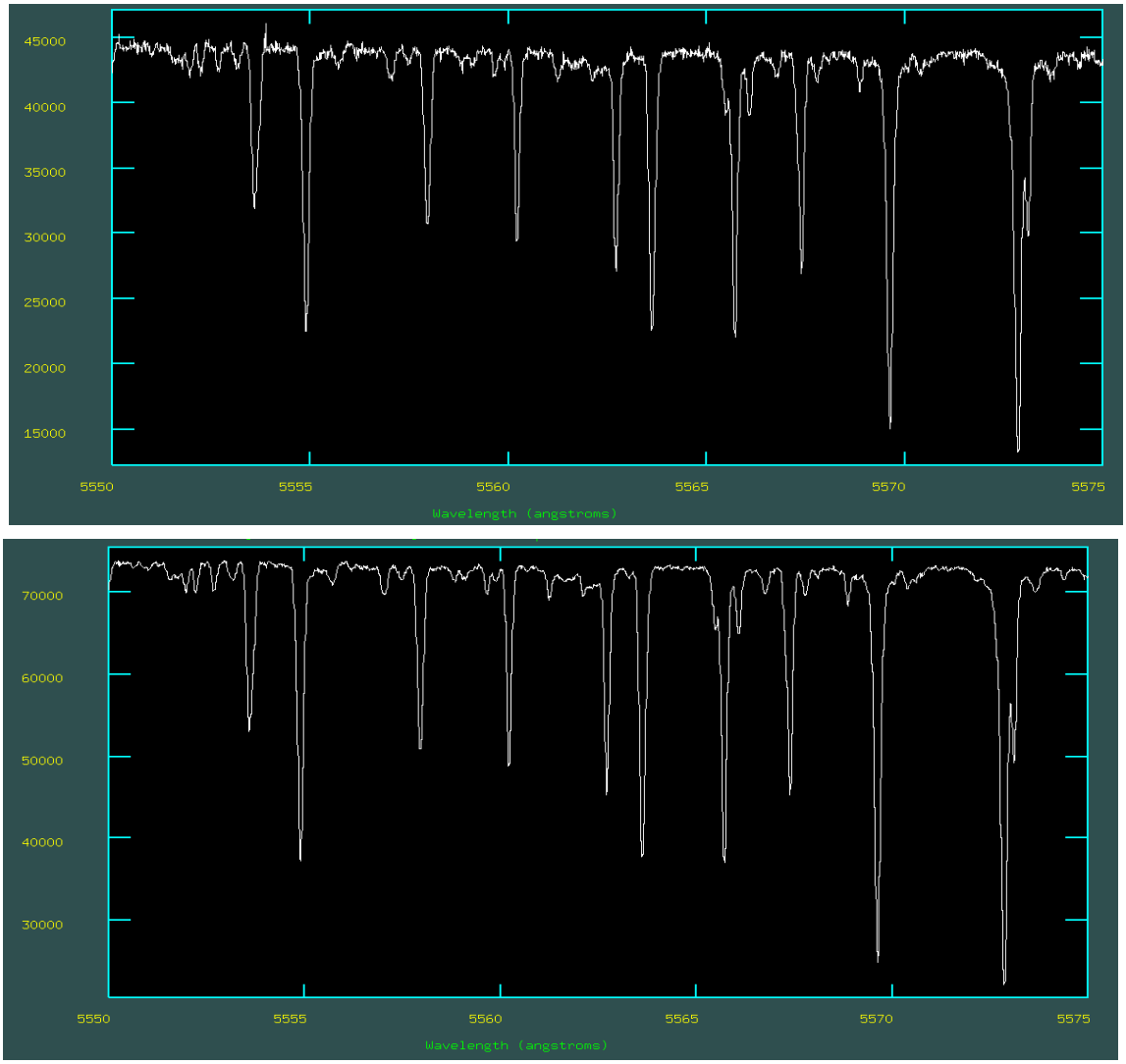

Figura 2.3: Espectro individual (acima) e espectro combinado (abaixo) para a estrela HD 014802 dentro da faixa de 5550 Å a 5575 Å.

assim obtendo o espectro normalizado como na Figura 2.4. Na parte do 1º e 2º intervalos podem ser necessárias futuras renormalizações, mas a priori, essas regiões não são de interesse nesse estudo.

Tabela 2.2 - Divisão dos espectros para a normalização.

Intervalo	$\lambda_{inferior}$ (Å)	$\lambda_{superior}$ (Å)
1º	3782	4000
2º	4000	4500
3º	4500	5303
4º	5338	5600
5º	5600	5800
6º	5800	6740
7º	6740	6913

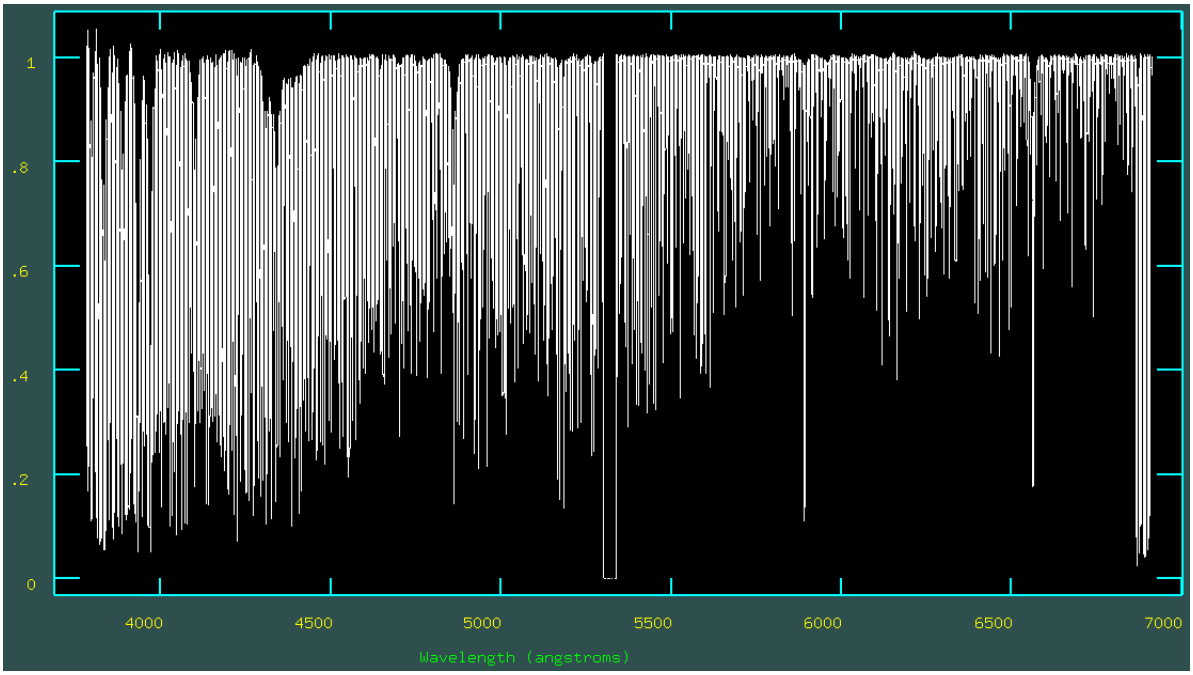

Figura 2.4: Espectro normalizado para a estrela HD 084117.

2.3 *Obtenção das abundâncias químicas*

A obtenção das abundâncias químicas foi realizada seguindo a ordem de medição de larguras equivalentes, obtenção dos parâmetros atmosféricos e utilizando as duas informações, o código `q2` consegue extrair os valores de abundâncias químicas para todas as estrelas da amostra.

2.3.1 Medição de larguras equivalentes

Para as medições de largura equivalente, foi utilizado o IRAF novamente, com o comando `splot`, usando um intervalo de 5 Å com a linha de interesse centrada, pois neste intervalo, o contínuo pode ser considerado a região mais alta da imagem, com exceção em casos que apresentam alguma linha de emissão. As medidas foram feitas de forma manual, linha a linha, com o intuito de diminuir os erros de abundâncias, e foram feitas com base no contínuo local e as bordas das linhas, como mostra a Figura 2.5. Foram medidas linhas das seguintes espécies químicas: CI, NaI, MgI, AlI, SiI, SI, CaI, ScI, ScII, TiI, TiII, VI, CrI, CrII, MnI, FeI, FeII, CoI, NiI, CuI, ZnI, SrI, YII, ZrII, BaII, LaII e CeII. Assim, realizando medições de larguras equivalentes de 27 espécies químicas no total. Todas as medidas foram salvas em um arquivo de texto `.log` que registra o centro da linha, a região do contínuo, o valor do fluxo, valor de largura equivalente, núcleo, largura a meia altura gaussiana e lorentziana.

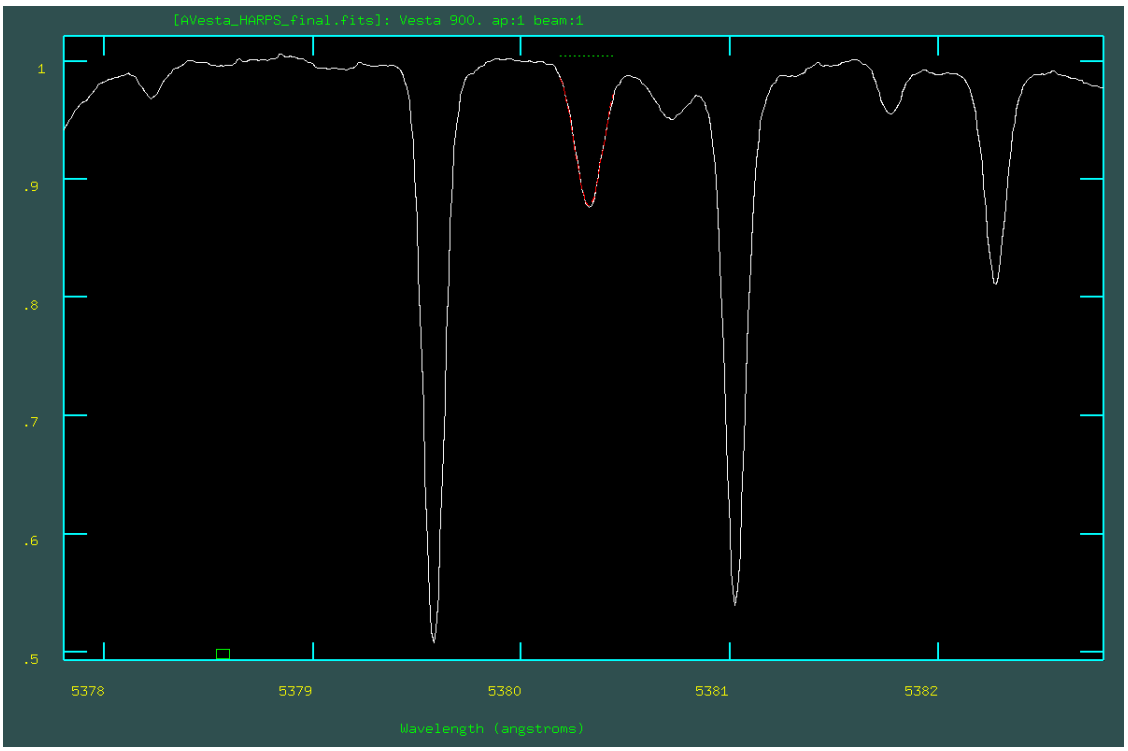

Figura 2.5: Linha 5380,3 Å do carbono para o espectro solar.

2.3.2 Obtenção dos parâmetros atmosféricos

Para a obtenção dos parâmetros atmosféricos, foi criado um código em *python* que utiliza a plataforma `q2` (*qoyllur-quipu*). Para que o `q2` possa entender os dados, foi utilizado um outro programa em *python* que leu o arquivo `.log` e o transformou em um arquivo CSV. O código utilizado para a obtenção dos parâmetros atmosféricos tem uma rotina onde avalia valores de temperatura efetiva, logaritmo da gravidade superficial, velocidade de microturbulência e metalicidade, tentando minimizar a inclinação dos ajustes lineares dos gráficos de abundância de ferro por potencial de excitação (EP) e de abundância de ferro por largura equivalente reduzida (REW), e tentando diminuir a diferença entre as abundâncias médias de FeI e FeII, o que é um processo iterativo. Com isso, foram obtidos os parâmetros atmosféricos da Tabela 2.3, sendo que T_{eff} e $\sigma_{T_{eff}}$ são a temperatura efetiva e sua respectiva incerteza, log g e $\sigma_{\log\ g}$ o logaritmo da gravidade superficial e sua respectiva incerteza, $[Fe/H]_{model}$ e $\sigma_{[Fe/H]_{model}}$ a metalicidade e sua respectiva incerteza e vt e σ_{vt} a velocidade de microturbulência e sua respectiva incerteza. Analisando a Tabela 2.3, é possível perceber que na amostra não há estrelas nas fase de subgigante ($\log g < 4$), obtendo apenas estrelas na fase de *turnoff* e de sequência principal.

Tabela 2.3 - Parâmetros atmosféricos adquiridos.

	T_{eff}	$\sigma_{T_{eff}}$	log g	$\sigma_{\log\ g}$	$[Fe/H]_{model}$	$\sigma_{[Fe/H]_{model}}$	vt	σ_{vt}
Sol	5777	0	4,440	0,000	0,000	0,000	1,00	0,00
HD014802	5926	8	4,078	0,018	0,003	0,005	1,29	0,01
HD025587	6172	17	4,188	0,036	0,007	0,012	1,45	0,03
HD044120	6061	6	4,228	0,015	0,118	0,005	1,36	0,01
HD062364	6201	12	4,278	0,030	-0,115	0,008	1,48	0,02
HD073121	6081	7	4,228	0,017	0,074	0,005	1,36	0,01
HD075881	6124	14	4,090	0,027	0,053	0,009	1,53	0,02
HD084117	6208	12	4,380	0,033	-0,012	0,008	1,37	0,02
HD146389	6247	19	4,215	0,045	0,054	0,014	1,50	0,03
HD171990	6015	10	4,063	0,017	0,043	0,008	1,42	0,01
HD175128	6107	13	4,218	0,029	0,113	0,010	1,35	0,02
HD187085	6136	7	4,330	0,020	0,112	0,005	1,34	0,01
HD187691	6180	8	4,268	0,019	0,171	0,006	1,37	0,01
HD192865	6218	14	4,178	0,034	0,149	0,009	1,44	0,02
HD214094	6206	15	4,103	0,032	-0,051	0,010	1,51	0,02
HD222368	6274	17	4,240	0,036	-0,070	0,012	1,55	0,03
HD231701	6187	14	4,288	0,035	0,017	0,009	1,35	0,02

2.3.3 Aquisição das abundâncias químicas

Com a obtenção dos parâmetros atmosféricos, a determinação das abundâncias químicas também foi feita usando um código em *python* baseado no `q2`, onde foram obtidas todas as abundâncias das 27 espécies químicas para cada uma das 16 estrelas. O cálculo leva em consideração os parâmetros atmosféricos, assim o `q2` estima a abundância para cada largura equivalente correspondente a um comprimento de onda, e em casos que mais de uma linha correspondem à mesma espécie química, a média desses valores é a abundância final, sendo seu erro o desvio-padrão da média dos dados correspondentes. Os valores das abundâncias químicas relativas ao Sol estão representadas na Tabela A.1 disponível no Apêndice A.

Capítulo 3

Análise

3.1 Abundâncias relativas ao ferro

A análise do trabalho se inicia com o problema de que as estrelas não possuem uma mesma origem química, assim não é possível dizer que se estivessem em um mesmo estado evolutivo as estrelas deveriam ter abundâncias químicas muito parecidas, de forma que se pudesse dizer que dentro das amostras essas abundâncias fossem homogêneas. Não podendo concluir que as estrelas têm a mesma origem química, fica muito difícil detectar a influência da difusão atômica nessas estrelas. Para tentar identificar o efeito da difusão atômica na abundância química das estrelas, foi feita uma análise utilizando o elemento ferro como referência, assim obtendo a abundância química relativa ao ferro [X/Fe]. Fazendo uma análise relativa, é possível identificar os efeitos da difusão atômica com relação ao ferro, mesmo que o próprio ferro também sofra efeito de difusão atômica; há um efeito líquido, uma vez que cada elemento sofre os efeitos na abundância química de forma diferente.

Para obter a abundância relativa ao ferro, utilizou-se a Equação 1.4, nas quais os erros foram propagados conforme a Equação 3.1. Com os valores de abundância relativa, foram feitos gráficos de cada espécie química para analisar como evolui a abundância relativa pelo logaritmo da gravidade superficial (log g), assim obtendo uma inclinação, que, se positiva, significa que a abundância química desse elemento em relação ao ferro diminui para estrelas na fase de *turnoff* em comparação com estrelas da sequência principal; caso seja negativa, evidencia um aumento de abundância química em relação ao ferro para estrelas de *turnoff*, o que pode significar que o ferro sofre mais o efeito de difusão que esse elemento. Um exemplo de gráfico pode ser visto na Figura 3.1 para a razão de abundância [Si/Fe].

$$\sigma_{[X/Fe]} = \sqrt{\sigma^2_{[X]} + \sigma^2_{[Fe]}} \tag{3.1}$$

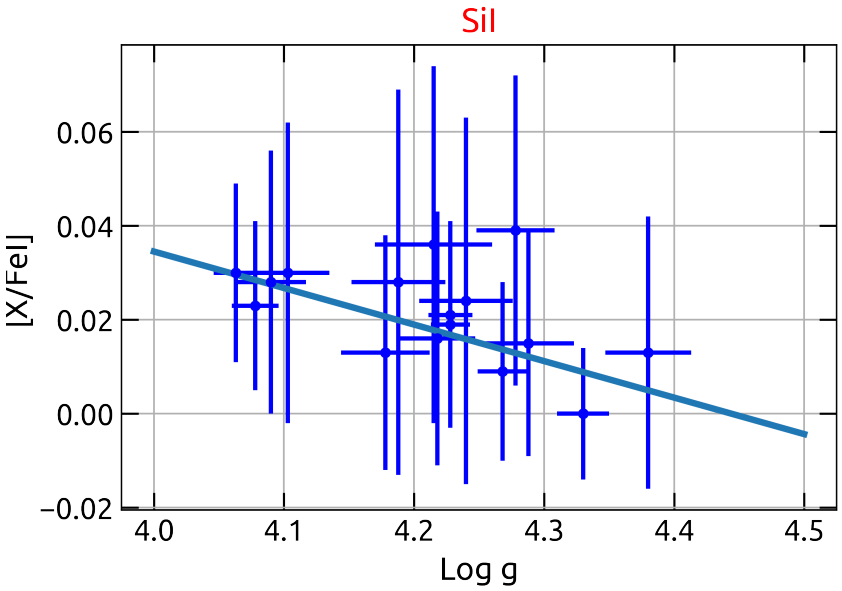

Figura 3.1: Gráfico que evidencia a evolução da abundância química da espécie SiI relativa à abundância de ferro ([Fe]).

3.2 Análise das inclinações obtidas

Com os valores de inclinação, foi feito o histograma apresentado na Figura 3.2 para identificar se há preferência para valores positivos ou negativos. Assim, a média das inclinações é de $-0,03 \pm 0,03$. Como a média distancia em apenas um σ de zero, não é possível perceber uma tendência clara de inclinação para as espécies estudadas.

Também foi feito o gráfico representado na Figura 3.3 onde se relaciona as inclinações com o número atômico das espécies. O gráfico deixou evidente uma tendência ascendente, e por isso foi feito um ajuste de uma reta, onde a inclinação representa a tendência que os elementos químicos apresentam devido ao fenômeno da difusão atômica. O resultado do ajuste é de uma inclinação de $0,0089 \pm 0,0011$ e um deslocamento de $-0,231 \pm 0,028$. Esse resultado deixa evidente que elementos mais pesados que o ferro devam sofrer uma diminuição mais acentuada na abundância química na fotosfera que o ferro, e que elementos mais leves sofram uma menor diminuição de sua abundância na fotosfera.

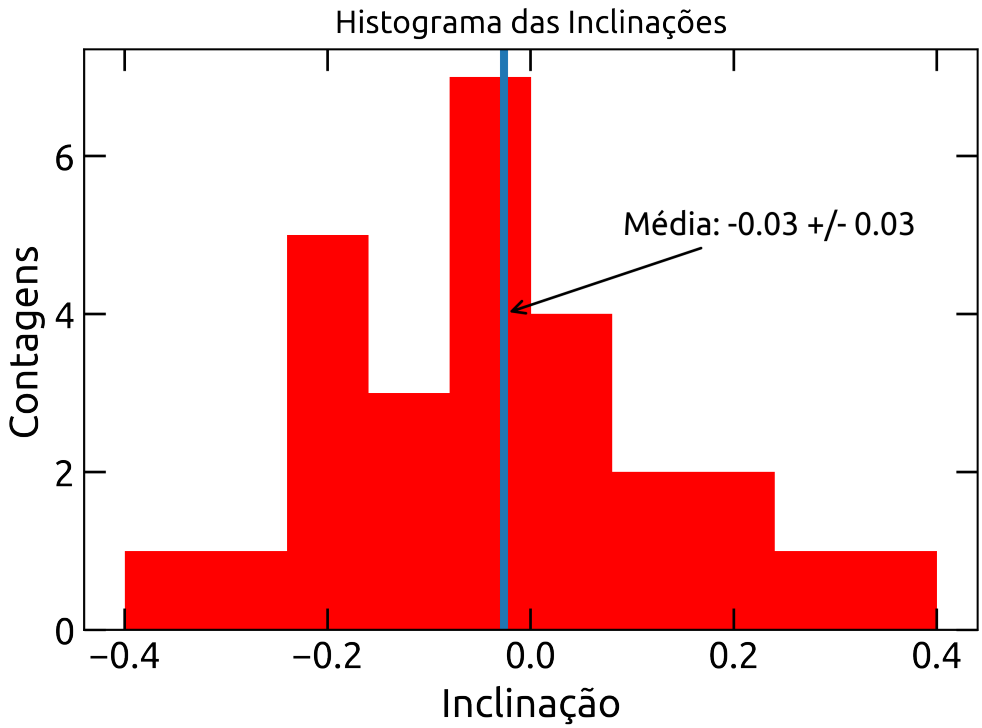

Figura 3.2: Histograma das inclinações obtidas das 27 espécies analisadas.

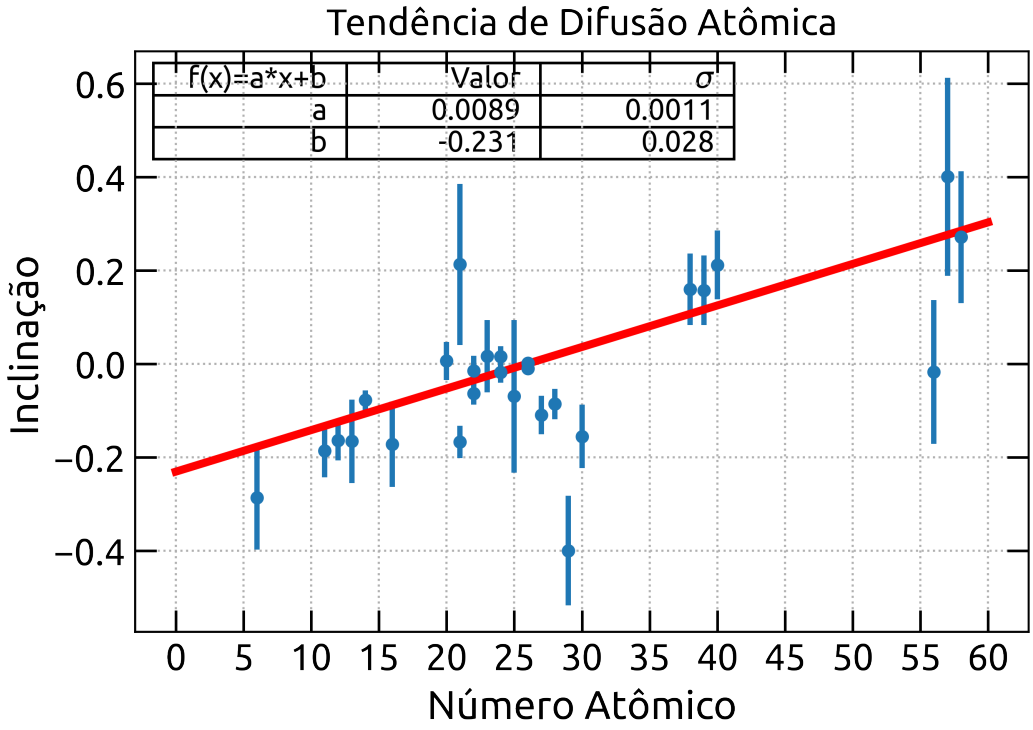

Figura 3.3: Gráfico que relaciona as inclinações com o número atômico das 27 espécies analisadas.

Capítulo 4

Conclusão e perspectivas futuras

4.1 Efeito da difusão atômica nas estrelas

A análise feita nesse trabalho permite concluir que é possível identificar sinais dos efeitos de difusão atômica em estrelas de campo, ou seja, que não pertencem a um aglomerado e consequentemente não possuem uma origem química em comum. Os valores obtidos pelo gráfico apresentado na Figura 3.3 permite concluir que há uma forte tendência dentro dessas 27 espécies químicas, o que era esperada devido a difusão difusão atômica, uma vez que elementos químicos mais pesados devem apresentar uma tendência maior de diminuição da abundância química na fotosfera e que alguns elementos mais leves devem sofrer um leve aumento (Souto et al., 2019). Como o ajuste forneceu uma inclinação que representa um valor próximo de $8{\cdot}\sigma$, que é maior que $3{\cdot}\sigma$, o resultado obtido possui uma robustez estatística de caráter forte.

Assim, o trabalho abre um caminho para estudos de difusão atômica em estrelas de campo, que é algo de caráter inédito dentro da comunidade científica.

4.2 Perspectivas futuras

Para o futuro, seria interessante revisar os dados e tentar realizar ajustes mais finos a fim de diminuir as incertezas nas abundâncias calculadas, embora os resultados apresentados parecerem robustos. Também seria interessante fazer uma análise utilizando o cálcio como referência no lugar do ferro ([X/Ca]), pois o cálcio também é um elemento no qual a difusão atômica afeta a sua abundância em estrelas do tipo solar, porém de maneira diferente do fer (Liu et al., 2019).

Referências Bibliográficas

Bedell M., Bean J. L., Meléndez J., Spina L., Ramírez I., Asplund M., Alves-Brito A., dos Santos L., Dreizler S., Yong D., The Chemical Homogeneity of Sun-like Stars in the Solar Neighborhood, ApJ, 2018, vol. 865, p. 68

Carroll B. W., Ostlie D. A., An Introduction to Modern Astrophysics. 2nd ed. San Francisco: Pearson Addison - Wesley, 2017

Dotter A., Conroy C., Cargile P., Asplund M., The Influence of Atomic Diffusion on Stellar Ages and Chemical Tagging, ApJ, 2017, vol. 840, p. 99

Galarza J. J. Y., Análise da composição química das gêmeas solares HIP 100963, HD 45184 e a descoberta da gêmea solar Inti 1, São Paulo: Universidade de São Paulo, 2016, Dissertação de Mestrado

Liu F., Asplund M., Yong D., Feltzing S., Dotter A., Meléndez J., Ramírez I., Chemical (in)homogeneity and atomic diffusion in the open cluster M 67, A&A, 2019, vol. 627, p. A117

Meléndez J., Bergemann M., Cohen J. G., Endl M., Karakas A. I., Ramírez I., Cochran W. D., Yong D., MacQueen P. J., Kobayashi C., Asplund M., The remarkable solar twin HIP 56948: a prime target in the quest for other Earths, A&A, 2012, vol. 543, p. A29

Meléndez J., Ramírez I., Karakas A. I., Yong D., Monroe T. R., Bedell M., Bergemann M., Asplund M., Maia M. T., Bean J., 18 Sco: A Solar Twin Rich in Refractory and Neutron-captureElements. Implications for Chemical Tagging, ApJ, 2014, vol. 791, p. 14

Souto D., Prieto C. A., Cunha K., Pinsonneault M., Smith V. V., Garcia-Dias R., Bovy J., García-Hernández D. A., Holtzman J., Johnson J. A., Jönsson H., Majewski S. R., Shetrone M., Sobeck J., Zamora O., Pan K., Nitschelm C., Chemical Abundances of Main-sequence, Turnoff, Subgiant, and Red Giant Stars from APOGEE Spectra. II. Atomic Diffusion in M67 Stars, ApJ, 2019, vol. 874, p. 97

Apêndice

Apêndice A

Abundâncias químicas calculadas.

Tabela A.1 - Abundâncias químicas relativas ao Sol obtidas para as 16 estrelas da amostra.

	[CI]	e_[CI]	[NaI]	e_[NaI]	[MgI]	e_[MgI]	[AlI]	e_[AlI]	[SiI]	e_[SiI]
HD014802	0.052	0.023	0.048	0.009	0.013	0.014	0.017	0.009	0.021	0.017
HD025587	-0.011	0.031	-0.019	0.051	-0.007	0.047	0.087	0.000	0.037	0.039
HD044120	0.095	0.013	0.148	0.008	0.126	0.020	0.115	0.001	0.134	0.021
HD062364	-0.089	0.032	-0.123	0.036	-0.099	0.065	-0.137	0.002	-0.078	0.032
HD073121	0.074	0.025	0.087	0.011	0.087	0.015	0.084	0.003	0.098	0.014
HD075881	0.073	0.019	0.033	0.166	0.074	0.057	0.058	0.016	0.079	0.027
HD084117	0.035	0.024	-0.012	0.078	-0.160	0.126	-0.054	0.016	-0.002	0.028
HD146389	0.060	0.028	0.017	0.046	-0.025	0.100	0.116	0.076	0.092	0.035
HD171990	0.092	0.015	0.085	0.018	0.058	0.023	0.048	0.005	0.070	0.017
HD175128	0.099	0.024	0.063	0.082	0.022	0.160	0.100	0.011	0.126	0.025
HD187085	0.064	0.012	0.076	0.053	0.096	0.023	0.066	0.011	0.114	0.013
HD187691	0.074	0.014	0.125	0.056	0.155	0.012	0.142	0.008	0.178	0.018
HD192865	0.101	0.024	0.160	0.040	0.158	0.054	0.118	0.015	0.159	0.023
HD214094	-0.025	0.036	-0.056	0.037	-0.146	0.128	-0.088	0.005	-0.023	0.030
HD222368	-0.103	0.017	-0.092	0.059	-0.190	0.123	-0.139	0.006	-0.048	0.037
HD231701	0.069	0.053	0.025	0.030	-0.007	0.005	-0.029	0.003	0.030	0.022
	[SI]	e_[SI]	[CaI]	e_[CaI]	[ScI]	e_[ScI]	[ScII]	e_[ScII]	[TiI]	e_[TiI]
HD014802	0.018	0.054	0.009	0.023	0.064	0.014	0.043	0.031	-0.014	0.023
HD025587	0.032	0.085	0.058	0.033			0.045	0.055	0.014	0.065
HD044120	0.066	0.049	0.115	0.015	0.146	0.022	0.159	0.028	0.095	0.023
HD062364	-0.105	0.101	-0.078	0.054	0.061	0.010	-0.070	0.044	-0.093	0.061
HD073121	0.060	0.058	0.097	0.024	0.120	0.017	0.133	0.025	0.073	0.022
HD075881	0.073	0.100	0.059	0.031	0.126	0.038	0.092	0.025	0.043	0.058
HD084117	0.014	0.098	0.012	0.037	0.240	0.091	-0.022	0.011	-0.022	0.062
HD146389	0.097	0.083	0.106	0.050			0.073	0.054	0.029	0.082
HD171990	0.052	0.066	0.050	0.026	0.100	0.032	0.097	0.036	0.031	0.027
HD175128	0.120	0.071	0.116	0.018	0.182	0.024	0.163	0.083	0.102	0.059
HD187085	0.066	0.085	0.126	0.026	0.151	0.025	0.137	0.018	0.094	0.023
HD187691	0.087	0.083	0.189	0.021	0.230	0.028	0.202	0.036	0.158	0.028
HD192865	0.132	0.095	0.164	0.017	0.259	0.030	0.186	0.044	0.136	0.053

Continua na próxima página...

Tabela A.1 - Continuação

	[SI]	e_[SI]	[CaI]	e_[CaI]	[ScI]	e_[ScI]	[ScII]	e_[ScII]	[TiI]	e_[TiI]
HD214094	-0.042	0.098	-0.024	0.027	0.041	0.028	-0.027	0.048	-0.043	0.051
HD222368	-0.106	0.115	-0.033	0.042	0.099	0.089	-0.054	0.035	-0.045	0.045
HD231701	-0.001	0.085	0.025	0.025	0.077	0.041	0.051	0.071	0.008	0.065
	[TiII]	e_[TiII]	[VI]	e_[VI]	[CrI]	e_[CrI]	[CrII]	e_[CrII]	[MnI]	e_[MnI]
HD014802	0.028	0.014	-0.017	0.044	-0.015	0.028	-0.003	0.029	-0.052	0.038
HD025587	0.050	0.053	0.097	0.140	-0.019	0.046	0.026	0.082	-0.210	0.057
HD044120	0.142	0.016	0.107	0.043	0.094	0.021	0.113	0.030	0.064	0.027
HD062364	-0.079	0.031	-0.055	0.123	-0.152	0.050	-0.131	0.049	-0.341	0.071
HD073121	0.115	0.023	0.075	0.052	0.055	0.025	0.073	0.036	-0.005	0.031
HD075881	0.085	0.055	0.071	0.091	0.015	0.034	0.054	0.040	-0.075	0.049
HD084117	-0.018	0.035	0.011	0.102	-0.033	0.044	-0.018	0.048	-0.171	0.071
HD146389	0.070	0.069	0.163	0.122	0.053	0.124	0.044	0.058	-0.101	0.047
HD171990	0.076	0.018	0.040	0.069	0.018	0.021	0.041	0.023	-0.016	0.044
HD175128	0.123	0.030	0.135	0.090	0.099	0.041	0.108	0.038	0.023	0.044
HD187085	0.127	0.023	0.092	0.063	0.093	0.026	0.116	0.038	0.033	0.030
HD187691	0.198	0.028	0.172	0.063	0.154	0.031	0.156	0.030	0.084	0.034
HD192865	0.178	0.043	0.162	0.091	0.134	0.034	0.164	0.037	0.047	0.047
HD214094	-0.024	0.028	-0.013	0.118	-0.097	0.035	-0.045	0.037	-0.241	0.068
HD222368	-0.029	0.045	-0.033	0.101	-0.103	0.060	-0.079	0.058	-0.305	0.062
HD231701	0.023	0.029	0.007	0.073	-0.008	0.040	0.025	0.030	-0.099	0.051
	[FeI]	e_[FeI]	[FeII]	e_[FeII]	[CoI]	e_[CoI]	[NiI]	e_[NiI]	[CuI]	e_[CuI]
HD014802	-0.002	0.018	-0.001	0.013	0.006	0.038	0.010	0.016	0.049	0.043
HD025587	0.009	0.028	0.011	0.032	-0.005	0.103	-0.001	0.088	-0.156	0.179
HD044120	0.115	0.013	0.117	0.020	0.112	0.035	0.123	0.016	0.109	0.054
HD062364	-0.116	0.022	-0.119	0.025	-0.104	0.103	-0.142	0.045	-0.216	0.203
HD073121	0.077	0.017	0.076	0.016	0.057	0.040	0.073	0.018	0.067	0.075
HD075881	0.051	0.020	0.050	0.023	0.044	0.070	0.041	0.037	0.020	0.188
HD084117	-0.015	0.026	-0.015	0.024	-0.011	0.112	-0.041	0.041	-0.111	0.199
HD146389	0.056	0.031	0.055	0.042	0.045	0.135	0.043	0.053	-0.106	0.165
HD171990	0.040	0.016	0.043	0.015	0.040	0.035	0.050	0.020	0.047	0.068
HD175128	0.110	0.024	0.107	0.024	0.118	0.071	0.106	0.025	0.107	0.122
HD187085	0.115	0.018	0.113	0.018	0.060	0.047	0.099	0.019	0.060	0.105
HD187691	0.169	0.018	0.165	0.017	0.154	0.055	0.160	0.022	0.101	0.086
HD192865	0.146	0.025	0.149	0.027	0.133	0.074	0.127	0.031	0.102	0.150
HD214094	-0.053	0.026	-0.055	0.027	-0.077	0.079	-0.089	0.045	-0.173	0.222
HD222368	-0.072	0.027	-0.071	0.021	-0.040	0.159	-0.127	0.057	-0.188	0.243
HD231701	0.014	0.027	0.016	0.025	-0.001	0.071	0.000	0.025	-0.052	0.138
	[ZnI]	e_[ZnI]	[SrI]	e_[SrI]	[YII]	e_[YII]	[ZrII]	e_[ZrII]	[BaII]	e_[BaII]
HD014802	-0.005	0.025	-0.078	0.000	-0.055	0.025	-0.019	0.015	0.003	0.031
HD025587	-0.063	0.049	0.044	0.000	0.058	0.061	-0.014	0.153	0.168	0.059
HD044120	0.083	0.010	0.060	0.000	0.089	0.020	0.098	0.017	0.094	0.012
HD062364	-0.216	0.040	-0.139	0.000	-0.146	0.053	-0.046	0.048	-0.006	0.056
HD073121	0.026	0.010	0.066	0.000	0.080	0.028	0.101	0.021	0.123	0.023
HD075881	-0.002	0.027	0.030	0.000	0.074	0.062	0.254	0.235	0.111	0.034
HD084117	-0.101	0.033	-0.014	0.000	0.002	0.033	0.051	0.070	0.084	0.039

Continua na próxima página...

Tabela A.1 - Continuação

	[ZnI]	e_[ZnI]	[SrI]	e_[SrI]	[YII]	e_[YII]	[ZrII]	e_[ZrII]	[BaII]	e_[BaII]
HD146389	0.012	0.083	0.073	0.000	0.127	0.095	-0.006	0.177	0.129	0.013
HD171990	0.020	0.009	0.005	0.000	0.023	0.022	0.035	0.016	0.053	0.029
HD175128	0.074	0.013	0.093	0.000	0.117	0.050	0.274	0.216	0.154	0.018
HD187085	0.041	0.025	0.110	0.000	0.146	0.027	0.183	0.038	0.151	0.011
HD187691	0.103	0.040	0.168	0.000	0.199	0.030	0.206	0.009	0.216	0.016
HD192865	0.113	0.029	0.158	0.000	0.205	0.047	0.259	0.074	0.234	0.015
HD214094	-0.140	0.036	-0.038	0.000	-0.021	0.051	0.046	0.047	0.107	0.046
HD222368	-0.205	0.030	-0.037	0.000	-0.011	0.062	-0.041	0.095	0.083	0.035
HD231701	-0.009	0.023	-0.017	0.000	0.009	0.036	0.057	0.030	0.079	0.042
	[LaII]	e_[LaII]	[CeII]	e_[CeII]						
HD014802	-0.066	0.058	-0.034	0.052						
HD025587	0.150	0.070	0.198	0.185						
HD044120	0.061	0.044	0.105	0.059						
HD062364	0.025	0.029	0.017	0.111						
HD073121	0.089	0.042	0.150	0.103						
HD075881	0.125	0.079	0.101	0.111						
HD084117	0.067	0.099	0.094	0.099						
HD146389	0.121	0.163	0.209	0.223						
HD171990	-0.010	0.044	0.046	0.070						
HD175128	0.121	0.097	0.164	0.096						
HD187085	0.126	0.053	0.160	0.069						
HD187691	0.165	0.075	0.199	0.077						
HD192865	0.188	0.073	0.220	0.119						
HD214094	0.013	0.066	0.073	0.135						
HD222368	0.096	0.094	0.120	0.122						
HD231701	0.040	0.063	0.041	0.101						